

YALOVA İLİ SÜLEYMANBEY MAHALLESİNDE BULUNAN PROJE ALANININ NONLİNEER SİSMİK SAHA TEPKİSİ KULLANILARAK SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN İNCELENMESİ

Merve GÜNEŞ¹, Arda Burak EKME^{2*}

¹⁻²Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, 63050, Türkiye

Geliş Tarihi/Received Date: 23.01.2022 Kabul Tarihi/Accepted Date: 16.08.2022 DOI: 10.54365/adyumbd.1061896

ÖZET

Meydana gelen depremler sonucunda yapılarda sıvılaşma kaynaklı büyük hasarların oluşması, sıvılaşma analizlerinin önemini zamanla arttırmış ve bilgisayar destekli analizlerin daha sık kullanılmasına olanak sağlamıştır. Bu çalışmada, Yalova İli Süleymanbey Mahallesi'nde yer alan proje alanı için sismik saha tepkisi dikkate alınarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. Sismik saha tepki analizleri gerçek deprem senaryoları kullanılarak Deepsoil programında yürütülmüştür. Sırasıyla $M_w=5.3$, 5.8, 6.6, 7.1 ve 7.6 büyüklüğündeki Çanakkale Ayvacık, Afyonkarahisar Çobanlar, Ege Denizi İzmir Seferihisar Açıkları, Düzce (Bolu) ve Kocaeli Deprem verileri kullanılarak nonlineer analiz yöntemiyle maksimum yer ivmesi değerlerine ulaşılmıştır. Söz konusu deprem senaryolarının ilgili proje alanına uygulanmasıyla elde edilen verilerin sıvılaşma analizlerinde bir girdi olarak kullanılması, analizlerin gerçek duruma yakın bir biçimde yürütülmesini sağlamıştır. Her bir deprem büyüklüğü için Novoliq programında yer alan 9 farklı metot ve sadeleştirilmiş teorik yöntem kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Proje alanında $M_w=5.3$, 5.8 ve 6.6 büyüklüğündeki depremler için sıvılaşma potansiyeli değişkenlik gösterirken $M_w=7.1$ ile $M_w=7.6$ büyüklüğündeki depremlerde alanın tamamında sıvılaşma riski gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sismik Saha Analizi, Sıvılaşma Analizi, Sıvılaşma Potansiyeli, Deprem, Yalova İli

INVESTIGATION OF LIQUEFACTION POTENTIAL UTILIZING NONLINEAR SEISMIC SITE RESPONSE OF THE PROJECT AREA LOCATED IN YALOVA PROVINCE SÜLEYMANBEY DISTRICT

ABSTRACT

The occurrence of significant liquefaction-induced damage in structures due to earthquakes has increased the importance of liquefaction analyses over time and has enabled computer-aided analyses to be used more frequently. This study evaluated the liquefaction potential for the project area located in the Süleymanbey District of Yalova Province considering the seismic field response. Seismic field response analyses were carried out in the Deepsoil software using real earthquake scenarios. Peak ground acceleration values were obtained by utilizing the nonlinear analysis method using Çanakkale Ayvacık, Afyonkarahisar Çobanlar, Aegean Sea İzmir Seferihisar Offshore, Düzce (Bolu) and Kocaeli Earthquake data with $M_w=5.3$, 5.8, 6.6, 7.1 and 7.6 magnitudes, respectively. Using the data obtained from earthquake scenarios in the relevant project area as an input enabled the analyses to be carried out realistically. Liquefaction analyses were performed for each earthquake magnitude utilizing the nine different methods in the Novoliq software and simplified theoretical method; then, the results were compared. While the liquefaction potential in the project area for earthquakes with a magnitude of $M_w=5.3$, 5.8, and 6.6 varies, liquefaction risk was observed throughout the area in earthquakes with a magnitude of $M_w=7.1$ and $M_w=7.6$.

Keywords: Seismic Field Analysis, Liquefaction Analysis, Liquefaction Potential, Earthquake, Yalova Province

*1e-posta: muh.mervegunes@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4544-3123>

2e-posta: ardaburakekmen@harran.edu.tr ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9703-2185> (Sorumlu Yazar)

1. Giriş

Sismik sarsıntılarının neden olduğu hasarlar, yapı kalitesi ve uygunluğunun yanı sıra zemin karakterlerinin de etkisiyle meydana gelmektedir. Sıvılaşma, yapılarda aşırı oturma, zemine gömülme, batma, göçme ve devrilme gibi hasarlar oluşturabilir. Zeminlerde sıvılaşma olayı, yeraltı su seviyesinin altında bulunan zemin tabakalarının deprem esnasında veya sonrasında geçici bir süre dayanımını kaybederek sıvı gibi davrandığı süreçtir [1].

Sıvılaşma mekanizması ve sıvılaşmadan kaynaklı hasarlarla ilgili araştırmalar, 1964 yılında Niigata-Japonya ve Büyük Alaska-A.B.D. depremlerinin meydana gelmesi ile artış göstermiştir. Özellikle sıvılaşmayla ilgili çalışmalar son kırk yılda popülerlik kazanmıştır [2]. Sıvılaşma olayının genellikle kohezyonsuz zeminlerde meydana geldiği düşünülse de son zamanlarda yürütülen arazi ve laboratuvar çalışmalarıyla drenajlı çakıllı kumlu ve düşük kohezyonlu siltli zeminlerde de sıvılaşma olayına rastlanılmaktadır. Zeminlerde sıvılaşma başlangıç rölatif sıklık derecesine bağlı hacimsel değişim, dane boyutu ve dağılımı, jeolojik yaş, çökme şartları ve su geçirgenliği gibi zemin özellikleriyle birlikte depremin süresi, büyüklüğü ve mesafesi gibi sismik faktörlerden etkilenmektedir [3]. Sıvılaşma esnasında sismik dalgalar nedeniyle zemin tanelerinin arasında artan boşluk suyu basıncının toplam gerilmeye eşit olması durumunda taneler arasındaki sürtünme kuvveti sıfır olmaktadır. Bu durumun gelişimiyle temel zemininde taşıma gücü kaybı, ani ve aşırı oturmalar gibi hasarlar görülmektedir. Genellikle deprem büyüklüğünün 5'ten büyük olması durumunda zeminde sıvılaşma olayı gözlenebilmektedir [4].

Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli belirlenirken sahada uygulanan Standart Penetrasyon Testi (SPT), Koni Penetrasyon Testi (CPT), Kayma dalga hızı (Vs) vb. verilerden veya saha çalışmalarından elde edilen örselenmemiş zemin örneklerine laboratuvar ortamında uygulanan dinamik basit kesme ve üç eksenli basınç deneylerinden elde edilen verilerden yararlanılmaktadır [5]. Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli, sismik sarsıntılar meydana gelmeden önce Geoteknik Deprem Mühendisliği kapsamındaki literatürde kabul gören formüllerle belirlenebilmektedir. Zeminlere uygulanan çeşitli deprem senaryoları sayesinde elde edilen ivme değerlerinin sıvılaşma analizi hesap yöntemlerinde kullanılmasıyla sismik sarsıntının sıvılaşma üzerindeki etkisi dikkate alınır. Bu sayede deprem esnasında ve sonrasında oluşabilecek sıvılaşma riski tespit edilebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Yalova İli Süleymanbey Mahallesi'nde yer alan bir proje alanının SPT verileri kullanılarak sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. İnceleme alanının sıvılaşma potansiyeli değerlendirmesi için meydana gelmiş farklı büyüklüklerdeki depremlerin verileri kullanılarak sismik saha analizleri yürütülmüştür. Bir boyutlu sismik saha analizi programı olan DEEPSOIL [6] yazılımıyla yapılan sismik saha analizlerinde her deprem büyüklüğü için ayrı ayrı maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerine ulaşılmıştır. Sıvılaşma analizi için sadeleştirilmiş yöntem olan Seed ve Idriss [7] metodundan ve NOVOLIQ [8] zemin sıvılaşma programındaki yöntemlerden faydalanılmış olup elde edilen güvenlik faktörleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

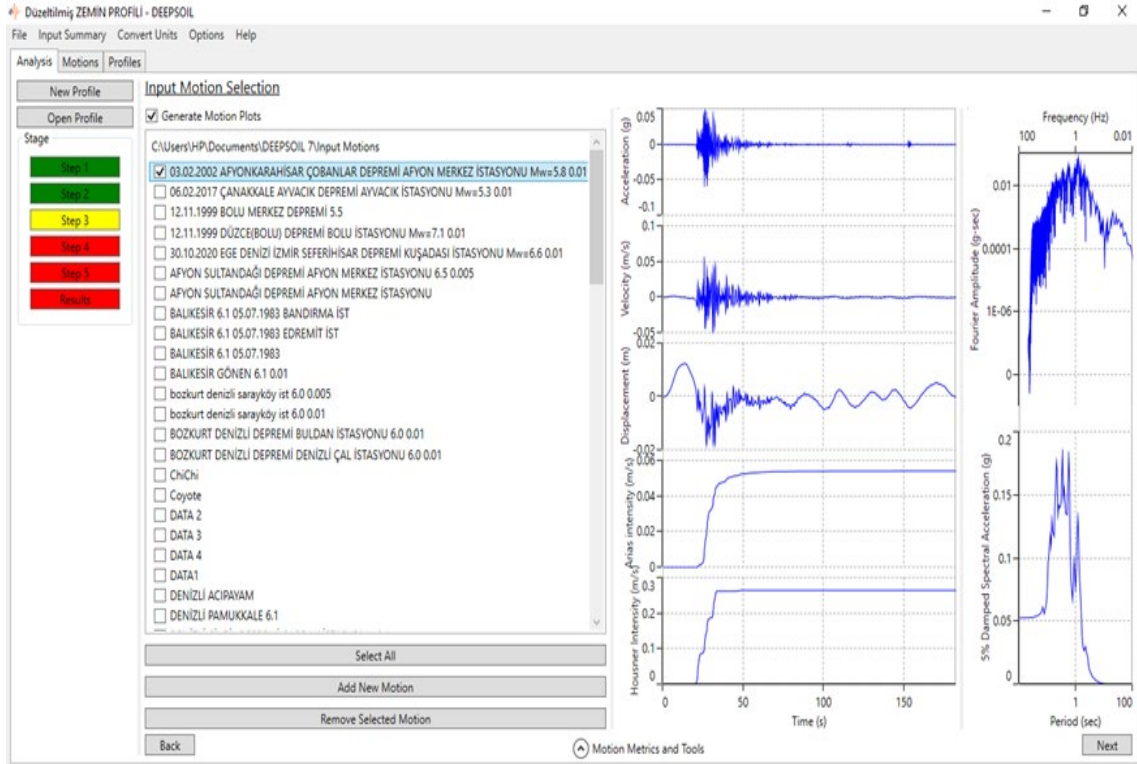
Bu çalışma kapsamındaki analizlerde Yalova İli Süleymanbey Mahallesi'nde yer alan proje alanının zemin parametreleri kullanılmıştır. Sismik saha analizleri, inceleme alanında açılan 3 adet toplam 91,35 m ve 2 adet toplam 120,00 m derinliğindeki 5 farklı sondaj noktasından ulaşılan en kritik zemin parametreleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sondaj noktaları aracılığıyla belirlenen yeraltı su seviyelerinden en kritik olanı seçilerek analizlerde yeraltı su seviyesi 2.70 m olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada kullanılan en kritik sondaj verilerine ait zemin tiplerinin derinliğe bağlı değişimi Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Araştırma alanının temel sondajlarında zemin tipinin derinliğe göre değişimi [9]

Derinlik	Zemin Tipi	Doygun/Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kayma Dalga hızı (m/sn)
1.70	Siltli Kum	19.2	71.95
2.70	Siltli Kum	19.2	71.95
3.20	Siltli Kum	20.2	70.14
4.70	Siltli Kum	19.8	70.85
6.25	Siltli Kum	19.3	71.76
7.70	Killi Kumlu Çakıl	19.5	100.96
9.20	Siltli Kum	20.2	70.14
10.70	Siltli Kum	19.2	71.95
12.20	Siltli Kum	18.9	72.52
13.70	Düşük Plastisiteli Kil	19.2	43.72
15.25	Düşük Plastisiteli Kil	18.85	44.12
16.70	Kil	18.85	40.28
18.20	Kil	18.85	40.28
19.70	Kil	18.85	40.28
21.25	Kil	18.85	40.28
22.70	Kil	18.85	40.28
24.20	Kil	18.85	40.28
25.70	Siltli Kil	18.85	44.12
27.20	Siltli Kil	18.85	44.12
28.70	Siltli Kil	18.85	44.12
30.20	Siltli Kil	18.85	44.12

Çizelge 1’de sunulan birim hacim ağırlıklar 2.70 metre ve altındaki zeminler için doygun birim ağırlığı, bu derinliğin üstündeki zemin için ise doğal birim hacim ağırlığı ifade etmektedir. Zemin parametrelerinden ve SPT verilerinden yararlanarak sismik saha tepki analizinin etkisi dikkate alınıp inceleme alanının sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. Zemin profilinin 30.2 m derinliğine kadar olan kısmında sismik saha analizleri yapılmıştır. Kum ve siltli kum tipindeki zeminlerde sıvılaşma analizleri genellikle 15 m derinliğe kadar yapılmaktadır. Belirtilen zemin litolojisinde 13.70 ve 15.25 m derinliklerde düşük plastisiteli kil, 16.70 m ve altındaki tabakalarda kil tipi zeminlerin varlığı tespit edilmiştir. Bu kil tabakalarında sıvılaşma meydana gelmesi için özel durumlar [10] sağlanmadığından inceleme alanında ilgili gerekçelere dayanarak 12.2m derinlik sonrasında sıvılaşma analizine ihtiyaç duyulmamıştır. Sıvılaşma analizleri 12.2 m derinliğe kadar olan noktalarda gerçekleştirilmiştir.

Sismik saha analizleri için DEEPSOIL [6] yazılımı kullanılmıştır. DEEPSOIL [6] yazılımında, tarihsel süreç içerisinde meydana gelmiş bölgeye yakın istasyonlardaki gerçek deprem kayıtlarıyla zeminin dinamik davranışı incelenmiştir. $M_w=5.3$, $M_w=5.8$, $M_w=6.6$, $M_w=7.1$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki gerçek deprem kayıtları çalışılan alana uygulanarak her deprem büyüklüğü için ayrı ayrı maksimum yer ivmesi (PGA) değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen PGA değerleri sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için teorik ve bilgisayar programında yapılan sıvılaşma analizi hesaplarına dahil edilmiştir. DEEPSOIL [6] programında deprem kayıtlarının seçimi Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. DEEPSOIL [6] programında deprem kayıtlarının seçimi

Seçilen depremlerin verilerine temel gürültü düzeltmesi uygulanmıştır. İnceleme alanına ait SPT verilerinden yararlanılarak SPT'ye dayalı analiz yöntemleriyle sınılaşma potansiyeli, araştırılmıştır. Sınılaşma analizi hesaplarında teorik yöntem olarak Seed ve Idriss [7] metodu ve zemin sınılaşma analizlerinde kullanılan NOVOLIQ [8] geoteknik yazılımı kullanılmıştır. NOVOLIQ [8] programında yapılan analizlerde Youd ve ark. [11], Boulanger ve Idriss [12], Vancouver Task Force [13], Chinese Code [14], Seed ve ark. [15], Japanese Highway Bridge Code [16], Tokimatsu ve Yoshimi [17], Shibata [18], Kokusho ve ark. [19] yöntemleri seçilmiştir. Bu şekilde hem teorik yöntemle hem de sınılaşma analiz programı yardımıyla 10 farklı yöntemle göre proje alanının sınılaşma potansiyeli değerlendirilmesi karşılaştırmalı bir biçimde yürütülmüştür.

Çalışmanın teorik analiz kısmında kullanılan N_{60} ve $(N_1)_{60}$ değerleri, SPT-Narazi değerlerinden Denklem 1 ve 2'deki formüller yardımıyla elde edilmiştir [20].

$$N_{60} = (1.67)E_m C_b C_r N \quad (1)$$

$$(N_1)_{60} = C_N N_{60} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de yer alan N_{60} arazi testlerine göre düzeltilmiş SPT- N değerini, E_m şahmerdan etkinliğini, C_b kuyu çapı düzeltmesini, C_r tij uzunluğu düzeltmesini, C_N üst tabaka yükü (örtü basıncı) düzeltme katsayısını, $(N_1)_{60}$ arazi deneyleri ve örtü basıncına göre düzeltilmiş N değerini ve N arazide ölçülmüş ham standart penetrasyon testi değerini belirtmektedir.

Bu çalışmada, üst tabaka yükü (örtü basıncı) düzeltme katsayısı (C_N), düşey efektif gerilme değerinin 200'den küçük olması durumunda Liao ve Whitman [21] tarafından önerilen Denklem 3'teki denklem aracılığıyla hesaplanmış olup ilgili değer 200'den büyük olması durumunda ise Kayen ve ark. [22] tarafından sunulan Denklem 4'te verilen eşitlik kullanılmıştır.

$$C_N = \sqrt{\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}} \leq 1.7 \quad (3)$$

$$C_N = \frac{2.2}{1.2 + \frac{\sigma'_{vo}}{P_a}} \quad (4)$$

Denklem 3 ve 4'te yer alan P_a yaklaşık 100 kPa değerindeki referans gerilmeyi ve σ'_{vo} düşey efektif gerilmeyi temsil etmektedir.

Seed ve ark. [23], SPT ile sıvılaşma hasarını $(N_1)_{60}$ değerine göre; $0 \leq (N_1)_{60} < 20$ olması durumunda yüksek hasar, $20 \leq (N_1)_{60} < 30$ orta hasar ve $(N_1)_{60} > 30$ önemsiz hasar olmak üzere 3 durumda yorumlanmıştır.

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için yapılan sıvılaşma analizi hesaplamalarında kullanılabilen birçok yaklaşım vardır. Bu çalışmada sıvılaşma potansiyeli hem manuel teorik hesaplamalarla hem de analiz programı aracılığıyla belirlenmiştir. Teorik hesaplamalarda kullanılan sadeleştirilmiş Seed ve Idriss [7] yönteminde sıvılaşmaya karşı direnci temsil eden çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) ve depremin neden olduğu çevrimsel kayma gerilme oranı (CSR) ile Denklem 5 aracılığıyla güvenlik sayısı elde edilmektedir.

$$G_s = \frac{CRR}{CSR} \quad (5)$$

Elde edilen güvenlik sayısının 1'den küçük ($G_s < 1.0$) olması durumunda sıvılaşma olayı beklenmektedir. Güvenlik sayısının 1'den büyük veya 1 eşit ve 1.2'den küçük ($1.0 \leq G_s < 1.2$) olması durumunda sıvılaşma riski bulunmakta ve 1.2'ye eşit veya 1.2'den büyük ($G_s \geq 1.2$) olması durumunda sıvılaşma olayı meydana gelmemektedir [7].

Seed ve Idriss [7] yönteminde depremin neden olduğu CSR Denklem 6'da verilen eşitlikten elde edilmektedir.

$$CSR = \frac{\tau_{dev}}{\sigma'_{vo}} = 0,65 r_d \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \frac{a_{max}}{g} \quad (6)$$

Denklem 6'da, τ_{dev} depremin üniform devirsel kayma gerilmesini (kPa), σ'_{vo} düşey efektif gerilmeyi, r_d derinlik azaltma faktörünü (boyutsuz), σ_{vo} toplam düşey gerilmeyi (kPa), a_{max} maksimum yatay yer ivmesini ve g yerçekimi ivmesini (9.81 m/s^2) ifade etmektedir.

Denklem 6'daki eşitlikte yer alan derinlik azaltma faktörü (r_d) Denklem 7'de verilen eşitlikten elde edilmektedir [22].

$$r_d = 1 - 0.012z \quad (7)$$

Derinlik azaltma faktörünün elde edildiği Denklem 7'deki z , derinliği ifade etmektedir.

Sıvılaşmaya karşı direnci temsil eden çevrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR), Seed ve ark. [22] tarafından $M_w=7.5$ depremleri için ince tane yüzdeleri grafiği dikkate alınarak elde edilmiştir. Seed ve ark.'a [22] göre $M_w=7.5$ büyüklüğündeki depremlerde $(N_1)_{60}$ değerinin 30'dan büyük olması durumunda zemin sıkı bir durumda olacağından sıvılaşma meydana gelmemektedir. Bu kapsamda meydana gelen depremin büyüklüğünün $M_w=7.5$ 'ten büyük veya küçük olması durumunda CRR değerlerinin hesabında Youd ve ark. [24] tarafından önerilen büyüklük ölçek faktörünün kullanılması gerekmektedir. Büyüklük ölçek faktörü Denklem 8'de verilmiştir.

$$BÖF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad (8)$$

Denklem 8’de verilen eşitlikte M_w , depremin moment büyüklüğünü ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen teorik sıvılaşma analizlerinde Denklem 1-8’den faydalanılarak hesaplamalar yapılmıştır.

NOVOLIQ [8] programında yer alan birçok araştırmacının yapmış olduğu çalışmalardan problem tipine uygun bir biçimde Şekil 2’de sunulan 9 farklı yöntem seçilerek sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir.

Soil Liquefaction Analysis Program - NovoLIQ 4.0.2021.311

File Input Analysis Tables Tools Help

Define Soil Stratigraphy

List of all soil layers, starting from the ground surface:

Layer Thickness (m)	Soil Type	Unit Weight (kN/m ³)	Fines Content	D50 (mm)	Check Liquefaction	Su (kPa)
1.7	Sand	19.2	8.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22
1	Sand	19.2	8.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22
0.5	Sand	20.2	8.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22
1.5	Sand	19.8	8.5	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22
1.55	Sand	19.3	9.68	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22
1.45	Gravel	19.5	6.1	4	<input checked="" type="checkbox"/>	0
1.5	Sand	20.2	15.88	2	<input checked="" type="checkbox"/>	22

* In NovoLIQ, liquefaction analysis is performed for sand/silty sand layers only.

Depth to groundwater table (m): 2.7

Analysis Settings

Choose liquefaction assessment methods user for estimation of the Cyclic Resistance Ratio (i.e. Base CRR1):

- NCEER Workshop (1997)
- Boulanger Idriss (2014)
- Vancouver Task Force (2007)
- Cetin et al. (2004)
- Chinese Code
- Seed et al. (1983)
- Japanese Highway Bridge Code
- Tokimatsu and Yoshimi (1983)
- Shibata (1981)
- Kokusho et al. (1983)

FS = (CRR_{7.5}/CSR)MSF

CSR = 0.65 (a_{max}/g)(σ_{vo}/σ'_{vo})_d

Enter Field Test Results

Please select the type of field test data available:

- Standard Penetration Test (SPT)
- Shear Wave Velocity (Vs) Test
- Becker Density Test (BDT)

Field test data:

Depth (m)	SPT Blow Counts (N)
1.7	25
2.7	20
3.2	18
4.7	22
6.25	19
7.7	8
9.2	13
10.7	13
12.2	13

SPT Correction

- Apply all of the following corrections:

Depth correction Cn: Liao and Whitman, 1986

Borehole diameter (mm) Cb: 65 - 115

Sampling method Cs: Standard sampler

Rod length method Cr: Cetin et al.

Hammer energy level (%) Ce: 60

NovoSPT: Over 300 SPT correlations with various soil properties

Site's Seismic Data

Enter site PGA, ground surface topography, user-defined CSR, etc by clicking on Site Specific Seismic Data button below:

Project and Analyses Settings

Please enter project information and additional analyses settings:

Project Information

Analyses Methods

Surcharge Load

Current settings: (no loading)

Edit Surcharge Load

Şekil 2. NOVOLIQ [8] programına girilen zemin parametreleri ve analiz için seçilen yöntemler

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışma kapsamındaki araştırma alanına yakın ve litolojik olarak uygun bölgelerde bulunan istasyonlardan AFAD [25] veritabanını aracılığıyla alınan gerçek deprem ivme-zaman verileri DEEPSOIL [6] programında modellenen zemine uygulanmıştır. Zemin profiline $M_w=5.3$ büyüklüğündeki Çanakkale Ayvacık Depremi (Ayvacık İstasyonu), $M_w=5.8$ büyüklüğündeki Afyonkarahisar Çobanlar Depremi (Afyonkarahisar Merkez İstasyonu), $M_w=6.6$ büyüklüğündeki Ege Denizi İzmir Seferihisar Açıkları Depremi (Kuşadası İstasyonu), $M_w=7.1$ büyüklüğündeki Düzce (Bolu) Depremi (Bolu İstasyonu) ve DEEPSOIL [6] programında kayıtlı olan $M_w=7.6$ büyüklüğündeki Kocaeli Depremi senaryoları uygulanmıştır.

Her bir deprem büyüklüğünden elde edilen maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur. DEEPSOIL [6] programında gerçekleştirilen sismik saha analizinde deprem büyüklükleri

için elde edilen PGA değerleri Seed ve Idriss [7] yöntemi ve NOVOLIQ [8] programındaki yöntemler ile yapılan sıvılaşma analizlerinde kullanılmıştır.

Çizelge 2. DEEPSOIL [6] programında gerçekleştirilen sismik saha analizinde deprem büyüklükleri için elde edilen PGA değerleri

Deprem	Büyükük	Maksimum Yer İvmesi (PGA) (g)
Çanakkale Ayvacık Depremi Ayvacık İstasyonu	5.3	0.37
Afyonkarahisar Çobanlar Depremi Afyonkarahisar Merkez İstasyonu	5.8	0.41
Ege Denizi İzmir Seferihisar Açıkları Depremi Kuşadası İstasyonu	6.6	0.55
Düzce(Bolu) Depremi Bolu İstasyonu	7.1	0.61
Kocaeli Depremi	7.6	0.69

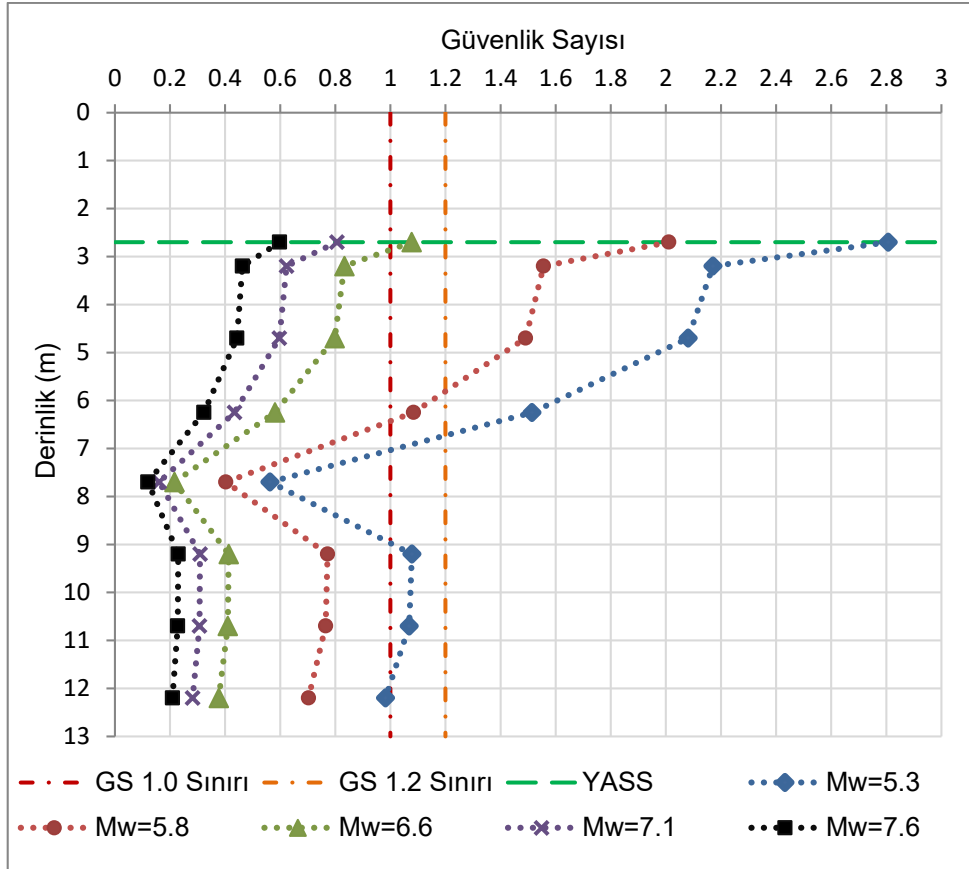
Seed ve Idriss [7] yöntemiyle her deprem büyüklüğü için yapılan sıvılaşma analizi hesaplamalarından elde edilen güvenlik sayıları Çizelge 3'te, güvenlik sayılarının eğrileri ise Şekil 3'te sunulmuştur. Teorik hesaplamalarda ve analiz programındaki sıvılaşma analizlerinde 1.7 m derinlikte $(N_1)_{60}$ değeri 30'dan büyük olduğu için Seed ve ark.'ın [23] önerisi dikkate alınarak bu derinlikte sıvılaşma analizi hesabı yapılmamıştır.

Çizelge 3. Sadeleştirilmiş yöntem ile sıvılaşma analizinden elde edilen güvenlik sayıları (Gs)

Derinlik	$M_w=5.3$	$M_w=5.8$	$M_w=6.6$	$M_w=7.1$	$M_w=7.6$
1,70	-	-	-	-	-
2,70	2.807	2.011	1.077	0.806	0.598
3,20	2.171	1.556	0.833	0.623	0.463
4,70	2.081	1.491	0.798	0.597	0.443
6,25	1.514	1.084	0.581	0.434	0.323
7,70	0.563	0.403	0.216	0.161	0.12
9,20	1.078	0.772	0.413	0.309	0.23
10,70	1.068	0.765	0.41	0.307	0.228
12,20	0.982	0.703	0.377	0.282	0.209

Seed ve Idriss [7] yöntemiyle yapılan sıvılaşma analizlerinde $M_w=5.3$ ve $M_w=5.8$ büyüklüğündeki depremlerde zemin tabakalarında sıvılaşma riski değişkenlik göstermektedir. $M_w=6.6$, $M_w=7.1$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki depremler için ise zeminin tamamında sıvılaşma potansiyeli mevcuttur.

İnceleme alanına ait zemin özellikleri, SPT verileri ve sismik saha analizlerden elde edilen PGA değerleri Şekil 2'de arayüzü gösterilmiş olan NOVOLIQ [8] yazılımına tanımlanarak sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. NOVOLIQ [8] yazılımında sıvılaşma analizleri "Materyal ve Yöntem" kısmında belirtilen metotlarla [11-19] yürütülmüştür.



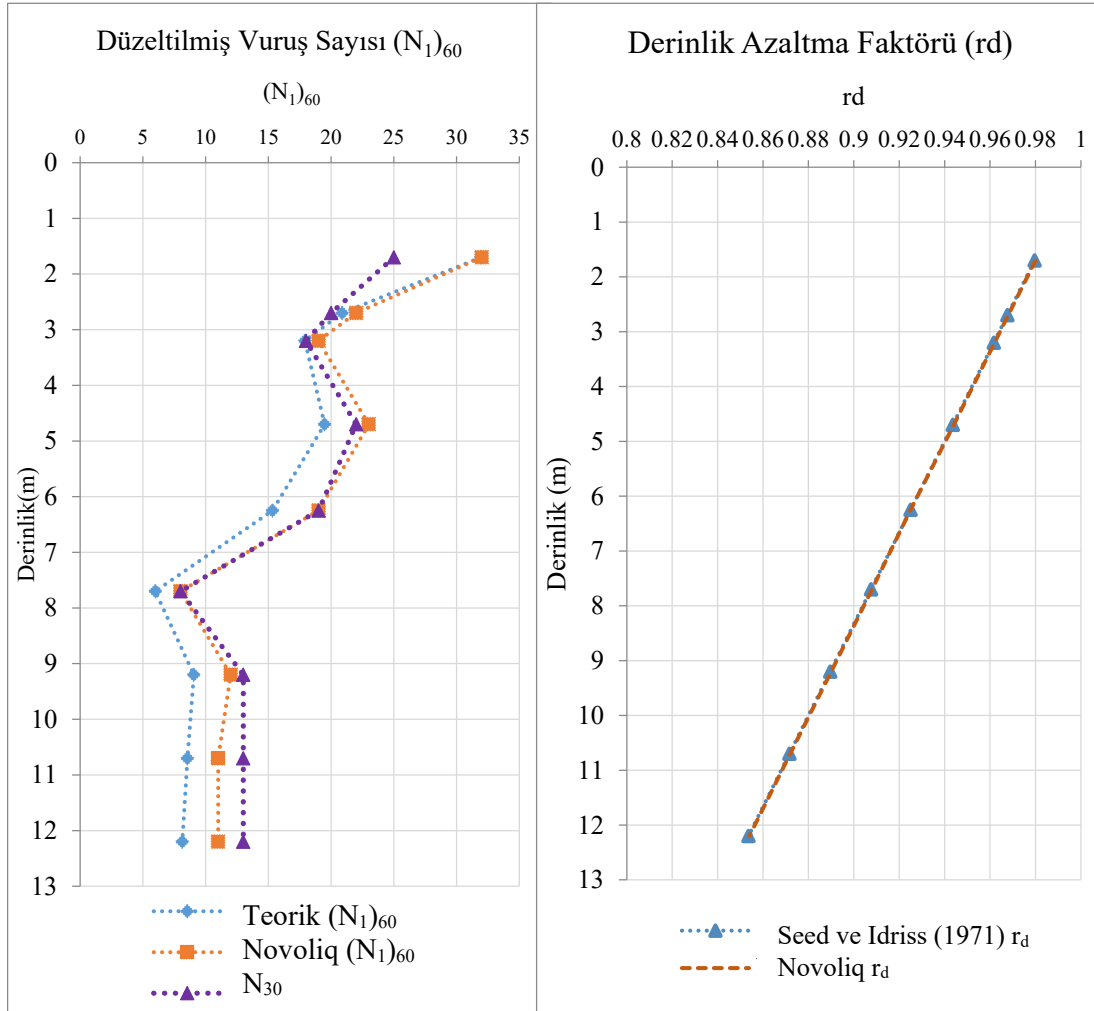
Şekil 3. Sadeleştirilmiş yöntem ile sıvılaşma analizinden elde edilen güvenlik sayılarının eğrileri

Sıvılaşma analizlerinde kullanılan SPT verileri, 5 farklı sondaj noktası için standart penetrasyon testinden elde edilen en kritik N_{30} değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Teorik analizde ve NOVOLIQ [8] programında hesaplanan derinlik azaltma faktörü ve $(N_1)_{60}$ değerleri Çizelge 4'te sunulmuştur.

Çizelge 4. Teorik analizden ve NOVOLIQ programından elde edilen $(N_1)_{60}$ ve derinlik azaltma faktörü (rd) değerleri

Derinlik	Zemin Tipi	N_{30}	N_{60}	Teorik $(N_1)_{60}$	NOVOLIQ $(N_1)_{60}$	Teorik rd	NOVOLIQ rd
1,70	Siltli Kum	25	18.79	31.94	32	0.9796	0.98
2,70	Siltli Kum	20	15.03	20.88	22	0.9676	0.968
3,20	Siltli Kum	18	13.53	17.91	19	0.9616	0.962
4,70	Siltli Kum	22	16.53	19.48	23	0.9436	0.944
6,25	Siltli Kum	19	14.28	15.33	19	0.925	0.925
7,70	Killi Kumlu Çakıl	8	6.01	5.99	8	0.9076	0.908
9,20	Siltli Kum	13	9.77	9.06	12	0.8896	0.89
10,70	Siltli Kum	13	9.77	8.55	11	0.8716	0.872
12,20	Siltli Kum	13	9.77	8.14	11	0.8536	0.854

Şekil 4'te verilen $(N_1)_{60}$ ve derinlik azaltma faktörünün (rd) derinliğe bağlı eğrilerinde, Seed ve Idriss [7] yönteminden ve NOVOLIQ [8] programından elde edilen değerlerin uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



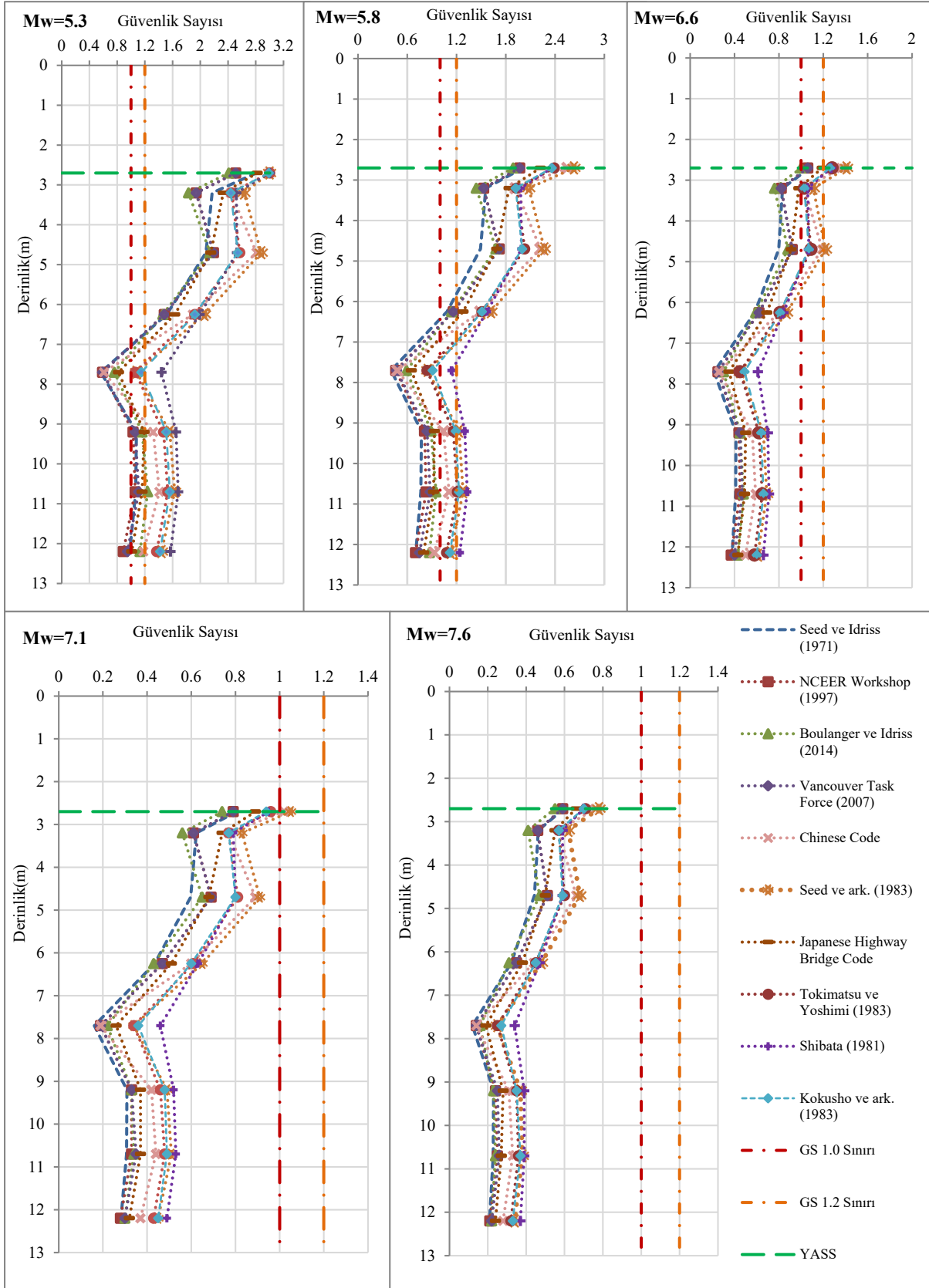
Şekil 4. Teorik analiz ve NOVOLIQ programından elde edilen $(N_1)_{60}$ ve derinlik azaltma faktörü (rd) değerlerinin eğrileri

NOVOLIQ [8] programında yer alan 9 farklı yöntemle $M_w=5.3$, $M_w=5.8$, $M_w=6.6$, $M_w=7.1$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki depremler için analizler ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar Seed ve Idriss [7] yönteminden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. NOVOLIQ [8] programında yapılan sıvılaşma analizinin güvenlik sayıları Çizelge 5'te sunulmuştur.

Klasik teorik yöntem ve NOVOLIQ [8] programındaki yöntemler ile dikkate alınan büyüklüklerdeki depremler için yapılan sıvılaşma analizlerinden elde edilen güvenlik sayılarının grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. NOVOLIQ programında sıvılaşma analizi sonucunda elde edilen güvenlik sayıları

Deprem Büyüklüğü PGA değeri	Derinlik	Güvenlik Sayıları								
		NCEER Workshop (1997)	Boulanger ve Idriss (2014)	Vancouver Task Force (2007)	Chinese Code	Seed ve ark. (1983)	Japanese Highway Bridge Code	Tokimatsu ve Yoshimi (1983)	Shibata (1981)	Kokusho ve ark. (1983)
$M_w=5.3$ PGA=0.37 g	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,70	2.51	2.41	2.51	3	3	2.82	3	3	2.99
	3,20	1.94	1.83	1.94	2.44	2.63	2.33	2.45	2.52	2.44
	4,70	2.19	2.14	2.19	2.81	2.88	2.15	2.57	2.53	2.54
	6,25	1.48	1.46	1.48	1.89	2.06	1.63	1.92	1.99	1.92
	7,70	0.59	0.76	0.59	0.61	1.08	0.82	1.06	1.44	1.15
	9,20	1.03	1.16	1.06	1.32	1.56	1.19	1.47	1.65	1.51
	10,70	1.06	1.24	1.11	1.41	1.63	1.16	1.53	1.68	1.56
$M_w=5.8$ PGA=0.41 g	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,70	1.97	1.89	1.97	2.55	2.63	2.22	2.39	2.36	2.36
	3,20	1.53	1.44	1.53	1.92	2.08	1.84	1.93	1.98	1.92
	4,70	1.72	1.68	1.72	2.22	2.27	1.69	2.03	1.99	2
	6,25	1.16	1.14	1.16	1.49	1.62	1.28	1.51	1.57	1.51
	7,70	0.46	0.59	0.47	0.48	0.85	0.65	0.84	1.14	0.91
	9,20	0.81	0.89	0.84	1.04	1.23	0.93	1.16	1.3	1.19
	10,70	0.83	0.95	0.88	1.11	1.28	0.92	1.21	1.33	1.23
$M_w=6.6$ PGA=0.55 g	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,70	1.06	1	1.06	1.36	1.41	1.19	1.28	1.27	1.26
	3,20	0.82	0.76	0.82	1.03	1.11	0.98	1.03	1.06	1.03
	4,70	0.92	0.88	0.92	1.19	1.22	0.91	1.09	1.07	1.07
	6,25	0.62	0.59	0.62	0.8	0.87	0.69	0.81	0.84	0.81
	7,70	0.25	0.3	0.25	0.26	0.45	0.35	0.45	0.61	0.49
	9,20	0.44	0.45	0.45	0.56	0.66	0.5	0.62	0.7	0.64
	10,70	0.45	0.48	0.47	0.59	0.69	0.49	0.65	0.71	0.66
$M_w=7.1$ PGA=0.61 g	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,70	0.79	0.74	0.79	1.02	1.05	0.89	0.96	0.95	0.94
	3,20	0.61	0.56	0.61	0.77	0.83	0.74	0.77	0.79	0.77
	4,70	0.69	0.65	0.69	0.89	0.91	0.68	0.81	0.8	0.8
	6,25	0.47	0.43	0.47	0.6	0.65	0.51	0.61	0.63	0.6
	7,70	0.19	0.22	0.19	0.19	0.34	0.26	0.34	0.46	0.36
	9,20	0.33	0.33	0.33	0.42	0.49	0.37	0.46	0.52	0.48
	10,70	0.33	0.34	0.35	0.44	0.51	0.37	0.48	0.53	0.49
$M_w=7.6$ PGA=0.69 g	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,70	0.59	0.55	0.59	0.76	0.78	0.66	0.71	0.7	0.7
	3,20	0.46	0.41	0.46	0.57	0.62	0.55	0.57	0.59	0.57
	4,70	0.51	0.47	0.51	0.66	0.68	0.5	0.6	0.59	0.59
	6,25	0.35	0.31	0.35	0.44	0.48	0.38	0.45	0.47	0.45
	7,70	0.14	0.16	0.14	0.14	0.25	0.19	0.25	0.34	0.27
	9,20	0.24	0.23	0.25	0.31	0.37	0.28	0.35	0.39	0.35
	10,70	0.25	0.24	0.26	0.33	0.38	0.27	0.36	0.39	0.37
12,20	0.21	0.22	0.22	0.28	0.34	0.24	0.32	0.37	0.33	



Şekil 5. Sadeleştirilmiş yöntem ve NOVOLIQ programındaki metotlardan elde edilen derinliğe bağlı güvenlik sayılarının grafikleri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, en kritik durumlar göz önüne alınarak Yalova İli Süleymanbey Mahallesi'nde yer alan proje alanının sınıvlaşma potansiyeli, sismik serbest saha tepki analizleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. DEEPSOIL [6] programında doğrusal olmayan yöntem seçilerek $M_w=5.3$, $M_w=5.8$, $M_w=6.6$, $M_w=7.1$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki her deprem için PGA değerleri sırasıyla 0.37 g, 0.41 g, 0.55 g, 0.61 g ve 0.69 g olarak elde edilmiştir. Bu PGA değerlerinden faydalanılarak sadeleştirilmiş yöntem ve NOVOLIQ [8] programında yer alan 9 farklı metodun kullanılmasıyla sınıvlaşma analizleri yürütülmüştür. Teorik yöntem ve bilgisayar programlarıyla yapılan sınıvlaşma analizlerinden elde edilen güvenlik sayılarına göre sınıvlaşma riski çoğul durum gözetilerek karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Sınıvlaşma analizlerinden ulaşılan sonuçlara göre, $M_w=5.3$, $M_w=5.8$, $M_w=6.6$ büyüklüğündeki depremler için zeminde sınıvlaşma beklenen ve sınıvlaşma riski olan tabakalar değişkenlik göstermiştir. $M_w=7.1$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki depremler için zemin katmanlarının tamamında sınıvlaşmanın beklendiği belirlenmiştir.

$M_w=5.3$ büyüklüğündeki deprem için 2.70-6.25 m arasında sınıvlaşma beklenmemektedir. Bu deprem büyüklüğü için Seed ve Idriss [7] yönteminde sınıvlaşma beklenen ve sınıvlaşma riski olan alanlar NCEER Workshop [11] ve Vancouver Task Force [13] yöntemleriyle elde edilen sınıvlaşma bölgeleriyle benzerlik göstermiştir. $M_w=5.8$ büyüklüğündeki Afyonkarahisar Çobanlar Depremi için teorik yöntem ve NOVOLIQ [8] programındaki metotlara göre 4.70-6.25 m arasında sınıvlaşma riski tespit edilmemiştir. $M_w=5.8$ deprem büyüklüğü için Seed ve Idriss [7] yöntemine göre sınıvlaşma beklenen ve sınıvlaşma riski olan bölgelerin NCEER Workshop [11], Boulanger ve Idriss [12] ve Vancouver Task Force [13] yöntemleriyle ulaşılan sınıvlaşma bölgeleriyle benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

$M_w=6.6$ büyüklüğüne sahip Ege Denizi İzmir Seferihisar Açıkları Depremi için teorik yöntem ve NOVOLIQ [8] programındaki metotlara göre 6.25-12.20 m arasındaki derinliklerde sınıvlaşmanın beklendiği belirlenmiştir. Ege Denizi İzmir Seferihisar Açıkları Depremi için NCEER Workshop [11], Boulanger ve Idriss [12], Vancouver Task Force [13] ve Japanese Highway Bridge Code [16] yöntemlerinde sınıvlaşma ve sınıvlaşma tehlikesi olan bölgeler Seed ve Idriss [7] yöntemiyle uyumaktadır.

$M_w=7.1$ büyüklüğündeki Düzce (Bolu) Depremi için Chinese Code [14] ve Seed ve ark. [15] yönteminde 2.70 m derinlikte sınıvlaşma riski mevcut olup geri kalan tüm derinliklerinde sınıvlaşma olacağı ön görülmüştür. $M_w=7.6$ büyüklüğündeki Kocaeli Depremi için teorik yöntem ve NOVOLIQ [8] programındaki analiz sonuçlarına göre zemin profilinin tamamında sınıvlaşma beklenmektedir.

Bu çalışma kapsamında ilgili bölgeye yakın yerlerde meydana gelmiş depremlerin bilgisayar programlarıyla sınıvlaşma analizlerine dahil edilmesi, gerçeğe yakın analizler yürütmeye olanak sağlamıştır. Kullanılan birçok yöntemden elde edilen güvenlik sayılarının kıyaslanmasıyla mühendislik açısından güvenilir ve ekonomik tasarımlara olanak sağlandığından sınıvlaşma analizlerinde bu yaklaşımın kullanılması önerilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma kapsamında yürütülen analizlere, 21019 nolu yüksek lisans tezi bilimsel araştırma projesi aracılığıyla destek sağlayan Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve proje alanına ait verilerin kullanım iznini sağlayan Safir Jeoteknik Mühendislik Son. Mad. İnş. San. ve Tic. Ltd. firmasına teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- [1] Akkaş Ü. Sıvılaşma potansiyelinin ve etkilerinin azaltılması. Yüksek lisans tezi. Sakarya: Sakarya Üniversitesi; 2006.
- [2] Çetin KÖ, Unutmaz, B. Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı. Türkiye Mühendislik Haberleri 2004; 430(2), 32-37.
- [3] Özaydın K. Zeminlerde Sıvılaşma. 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 2007.
- [4] Aytaş Z. Zemin sıvılaşmasına zemin ve deprem parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi. Yüksek lisans tezi. Batman: Batman Üniversitesi; 2019.
- [5] Şengül T, Karabaş B. Kütahya merkez ilçesinde sıvılaşma potansiyelinin coğrafi bilgi sistemi ile incelenmesi. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 2021; 8(2), 817-825.
- [6] Hashash YMA, Musgrove MI, Harmon JA, Ilhan O, Xing G, Numanoglu O, Groholski DR, Phillips CA, Park D. DeepSoil, Version 7.0, User Manual. Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, 2020.
- [7] Seed HB, Idriss IM. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971; 97(9): 1249-1273.
- [8] Novotech, 2020. NOVOLIQ (2020), Version 4.0.2020.905, User Manual.
- [9] Safir Jeoteknik Müh. Sond. Mad. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti, Zemin Etüt Raporu.
- [10] Youd TL, Gilstrap SD. 1999. Liquefaction and Deformation of Silty and Fine-Grained Soils. 2nd-3rd Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, 1013-1020, 1999
- [11] Youd TL, Idriss IM. Proceeding of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. State University of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, 1997, Report No: NCEER-97-0022.
- [12] Boulanger RW, Idriss IM. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Center for Geotechnical Modeling, University of California at Davis, 2014, Report No: UCD/CGM-14 (1).
- [13] Anderson DL, Byrne PM, Devall RH, Naesgaard E, Wijewickreme D, Adebar P, Yan L. Geotechnical Design Guidelines For Buildings on Liquefiable Sites in Accordance With Nbc 2005 for Greater Vancouver Region. Greater Vancouver Liquefaction Task Force Report, University of British Columbia; 2007.
- [14] Chinese Code. Code for Seismic Design of Buildings-GB 50011-2010. National Standard of the People's Republic of China, China Architecture and Building Press, Beijing; 2010.
- [15] Seed HB, Idriss IM, Arango I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983; 109(3): 458-482.
- [16] Japan Road Association. Design Specifications for Highway Bridges. Part V, Seismic Design, Tokyo:Maruzen, Japanese; 2002.
- [17] Tokimatsu K, Yoshimi Y. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT n-value and fines content. Soil and Foundations 1983; 23(4): 56-74.
- [18] Shibata T. Relations Between N-Value and Liquefaction Potential of Sand Deposits. In Proc, 16th Annual Convention of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, p.621-624, Tokio, 1981.
- [19] Kokusho T, Yoshida Y, Esashi Y. A study on a seismic stability of dense sand (part 2)-evaluation method based on SPT n-value. Technical Report of Central Research Institute of Electric Power, 1983; Research Report No: 383026, Japanese, p.1-32.
- [20] Skempton AW. Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. Geotechnique 1986; 36(3): 425-447.
- [21] Liao SSC, Whitman RV. Overburden correction factor for SPT in sand. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE 1986;112(3): 373-377.
- [22] Kayen RE, Mitchell JK, Seed RB, Lodge AL, Nishio S, Couinho R. Evaluation of SPT, CPT, and Shear Wave Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Lome Prieta Data. Proceedings, 4 th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Life Line Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, 1992; 1: 177 – 204.

- [23] Seed HB, Tokimatsu K, Harder LF, Chung RM. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* 1985; 111(12):1425-1445.
- [24] Youd TL, Idriss IM, Andrus RD, Arango I, Castro G, Christian JT, Dobry R, Liam Finn WD, Harder JrLF, Hynes ME, Ishihara K, Koester JP, Liao SSC, Marcuson WF, IIMartin GR, Mitchell JK, Moriwaki Y, Power MS, Robertson PK, Seed RB, Stokoe KH. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 2001; 127(10): 817-833.
- [25] AFAD, 2021. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Deprem Dairesi Başkanlığı, Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sistemi.