

Haydarpaşa Limanı Proje Alanının Doğrusal Olmayan Sismik Yerel İvme Değişimlerine Bağlı Sıvılaşma Analizi

Fırat AYKAT¹, Arda Burak EKMEK^{2*}

^{1,2}Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 63050, Şanlıurfa

¹<https://orcid.org/0000-0001-5501-6702>

²<https://orcid.org/0000-0002-9703-2185>

*Sorumlu yazar: ardaburakmekmen@harran.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihçesi:

Geliş tarihi: 05.01.2022

Kabul tarihi: 14.03.2022

Online Yayınlanma: 12.12.2022

Anahtar Kelimeler:

Deprem

Sıvılaşma analizi

Sıvılaşma potansiyeli

Sismik saha analizi

Haydarpaşa Limanı

ÖZ

Sıvılaşma analizlerinin detaylı olarak gerçekleştirilme gereksinimi ve bu analizlerin gerçekçi çözümlerine hızlı bir şekilde ulaşma ihtiyacı, bilgisayar teknolojilerinin bu kapsamda daha yaygın kullanımını sağlamıştır. Bu çalışmada, bilgisayar programları aracılığıyla deprem senaryolarına bağlı gerçek ivme-zaman değişimleri kullanılarak Haydarpaşa Limanı (İstanbul) proje alanı için sıvılaşma potansiyeli araştırılmıştır. Sismik saha analizleri Deepsoil programı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde $M_w=5,5$, $M_w=6,0$, $M_w=6,6$, $M_w=7,1$ ve $M_w=7,6$ büyüklüklerindeki deprem kayıtları (sırasıyla Bolu-Düzce-1, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar, Bolu-Düzce-2 ve İzmit-Gölcük) kullanılmış olup doğrusal olmayan yöntem seçilerek her deprem için maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri elde edilmiştir. Sıvılaşma analizlerinde sadeleştirilmiş teorik yöntem ve Novoliq yazılımı kullanılmıştır. İlgili deprem kayıtlarının sıvılaşma analizlerinde dikkate alınmasıyla gerçek duruma yakın bir şekilde analizler yapılmıştır. Sıvılaşma analizleri Novoliq programında her bir deprem büyüklüğü için 9 farklı yaklaşım kullanılarak yürütülmüştür. Sadeleştirilmiş teorik yöntemle birlikte toplamda 10 farklı metoda göre sıvılaşma analizleri tamamlanmış ve ulaşılan sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmıştır. İncelenen alanda belirtilen büyüklüklerdeki depremler için tüm derinliklerde sıvılaşma riskinin bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Liquefaction Analysis of the Haydarpaşa Port Project Area Considering Nonlinear Seismic Local Acceleration Variations

Research Article

Article History:

Received: 05.01.2022

Accepted: 14.03.2022

Published online: 12.12.2022

Keywords:

Earthquake

Liquefaction analysis

Liquefaction potential

Seismic field analysis

Haydarpaşa Port

ABSTRACT

The need to carry out liquefaction analyses in detail and quickly reach realistic solutions for these analyses has led to the widespread use of computer technologies in this context. In this study, the liquefaction potential for Haydarpaşa Port (Istanbul) project area was investigated by using real acceleration-time variations depending on earthquake scenarios through computer programs. Seismic response analyses were carried out by the Deepsoil software. The earthquake magnitudes of $M_w=5.5$, $M_w=6.0$, $M_w=6.6$, $M_w=7.1$ and $M_w=7.6$ (Bolu-Düzce-1, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar, Bolu-Düzce-2, and İzmit-Gölcük, respectively) were used in the analyses, and peak ground acceleration (PGA) values were obtained for each earthquake by using the non-linear method. The simplified theoretical method and Novoliq software were used in liquefaction analysis. Analyses were carried out realistically by considering the earthquake records. Liquefaction analyses were conducted according to 9 different methods for each earthquake magnitude in the Novoliq software. Liquefaction analyses were completed according to a total of 10 different methods with the simplified theoretical method, and the results were compared with each other. It has been

concluded that there is a risk of liquefaction at all depths for earthquakes of specified magnitudes in the investigated field.

To Cite: Aykat F., Ekmen AB. Haydarpaşa Limanı Proje Alanının Doğrusal Olmayan Sismik Yerel İvme Değişimlerine Bağlı Sıvılaşma Analizi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2022; 5(3): 1155-1171.

Giriş

Sismik dalgalar zemin katmanları içerisinde yayılırken zeminde düzensiz kayma gerilmelerinin oluşmasına neden olurlar. Bu durumda zeminde dayanım azalması ve zemin katmanlarında yumuşama görülebilmektedir (Ansal, 1999). Depremlerden hemen sonra sıvılaşma, çığ düşmeleri, heyelan, faylanma vb. doğa olayları ortaya çıkabilmekte ve yapılarda ciddi hasarlar oluşabilmektedir. Tasarımı uygun yapılmamış yapılar zemin koşullarının elverişsiz olduğu yerlerde deprem esnasında ağır kayıplara neden olabilir. Sıvılaşmaya elverişli zeminlerin fiziksel özellikleri, depremin yer ivmesi ve yer altı su seviyesine göre ortaya çıkabilen zemin davranışları, zeminlerin üzerindeki ve içindeki yapı elemanlarına ağır hasarlar verebilmektedir.

Deprem esnasında ortaya çıkan enerji, ses veya su dalgalarına benzer şekilde hareket ederek sismik dalgalar halinde yayılır. Deprem anında zeminlerde görülen sismik dalgalar, zeminlerin cinsine bağlı olarak farklı hızlarda yayılabilmekte ve zeminlerde farklı etkiler bırakabilmektedir. Büyüklüğü 5'ten fazla olan ($M_w > 5$) depremler incelendiğinde, sıvılaşma durumunun genellikle suya doygun, gevşek, siltli, kumlu ve ince çakıllı zeminlerde meydana geldiği görülmüştür (Hakan, 2019).

Zemin sıvılaşması genel olarak yeraltı suyunun yüksek olduğu deniz, dere ve göl kenarlarına yakın olan alanlarda ortaya çıkar. Sıvılaşma anında boşluk suyu basıncı arttığından efektif gerilme azalır ve artan boşluk suyu basıncından dolayı danelerin arasında var olan sürtünme kuvveti ortadan kalkar, bu sebeple zemin viskoz bir sıvıymış gibi hareket eder (Öztürk, 2016). Depremler sismik dalgalar olarak yayıldığından geçtiği kaya veya zemin ortamını değiştirebilmektedirler. Sismik dalgaların zemin katmanları arasından yayılımı esnasında ortaya çıkan tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu zeminlerin dayanımında, sıklığında ve sertliğinde azalmalar olabilmektedir (Çıklaiblikçi, 2019). Sismik nedenlerden dolayı ortaya çıkabilecek sıvılaşma hasarları gözetildiğinde sıvılaşma riskinin bulunduğu alanlarda yer alan kritik yapıların (limanlar, metrolar, barajlar, demir yolları, havaalanı pistleri vb.) tasarımlarının büyük önem arz ettiği anlaşılmaktadır. Sıvılaşma anında zeminlerin yüzeye doğru hareket etmesiyle taşıma gücünde azalmalar olacağından bu duruma maruz kalan zeminler yapı yüklerini taşıyamayacak hale gelebilir ve yapılarda çökme, devrilme, oturma yana yatma gibi ciddi hasarlar görülebilir. Bu durumda yüzeye yakın yerlerin hemen altındaki elemanlar (su depoları, boru, kanalizasyon vb.) zemin yüzeyine doğru çıkmaya çalışırlar. Sıvılaşma; baraj, köprü, bina, su şebekeleri, yol vb. yapılarda yıkıcı etkiler bırakabilmektedir. Sıvılaşma potansiyelini projenin tasarım aşamasında belirleyip gerekli önlemlerin alınması ile oluşabilecek hasarların minimum seviyeye indirilmesi günümüzde mümkündür. Literatürde, güncel yöntemlerle gerçekleştirilen sıvılaşma değerlendirmelerine (örneğin; Tang ve ark., 2021; Zhang ve ark., 2021) yaygın olarak rastlanmaktadır. Bu çalışmada, Mersin ve İzmir Limanlarından sonra Türkiye'nin üçüncü büyük limanı olma özelliğine sahip Haydarpaşa Limanı proje alanının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Haydarpaşa Limanı ve

çevresinin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması amacıyla farklı deprem büyüklükleri için sismik saha analizleri gerçekleştirilmiştir. Sismik saha analizlerinde DEEPSOIL (2020) yazılımı kullanılmış olup yapılan analizlerde PGA değerleri her deprem senaryosu için ayrı ayrı elde edilmiştir. Sismik saha tepkisi aracılığıyla çalışılan bölge için gerçekçi sıvılaşma analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Sıvılaşma analizleri SPT bazlı sadeleştirilmiş teorik yöntem (Seed ve Idriss, 1971) ve NOVOLIQ (2020) zemin sıvılaşma yazılımında yer alan yöntemlerin birlikte dikkate alınması ile gerçekleştirilmiş olup sonuçlar birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Materyal ve Metot

Bu çalışmada kullanılan zemin parametrelerinin tümü Haydarpaşa Tren Garı'nda yapılan sondaj verilerinden alınmıştır. Yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen zemin profilinde; ağız kotundan başlayarak 2,80-3,40 metre aralığında yapay dolgu, 13,80-16,50 metre aralığında alüvyon, 16,5 metre altında ise grovak-şeyl (Trakya Formasyonu'na ait) bulunmaktadır. İnceleme alanında 5 adet 20 metre ve 1 adet 17 metre derinliğinde olmak üzere toplamda 6 sondaj kuyusu mevcuttur. Sismik saha analizlerinde sondaj verileri kullanılırken en riskli durumun gözetilmesiyle güvenli tarafta kalınarak Tablo 1'de sunulan değerler dikkate alınmıştır. İlgili zemin etüt raporunda belirtildiği üzere; inceleme alanında yapılan sondajlarda yer altı su seviyesi 4,20 metre olarak belirlenmiştir ve yapılan sondaj çalışmalarından alınan numunelerin mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla dayanım deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışmada sismik saha analizlerinde DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak gerçek deprem senaryoları simüle edilmiştir. $M_w=5,5$, $M_w=6,0$, $M_w=6,6$, $M_w=7,1$, $M_w=7,6$ büyüklüğündeki depremler kullanılmış ve ilgili alana uygulanmıştır. Sismik saha analizlerinde belirtilen deprem büyüklüklerinin tümü için ayrı ayrı PGA değerleri elde edilmiştir. Sıvılaşma analizlerinde SPT'ye bağlı yöntemler kullanılmıştır. Seed ve Idriss'e (1971) göre yapılan teorik analiz sonuçlarını karşılaştırmak için kapsamlı sıvılaşma analizleri yapabilen NOVOLIQ (2020) programı kullanılmıştır. NOVOLIQ (2020) programıyla yapılan analizlerde önemli araştırmacıların geliştirdikleri çeşitli yöntemler seçilmiştir (Shibata, 1981; Seed ve ark., 1983; Kokusho ve ark., 1983; Tokimatsu ve Yoshimi, 1983; Youd ve ark., 1997; Japanese Highway Bridge Code, 2002; Vancouver Task Force, 2007; Chinese Code, 2010; Boulanger ve Idriss, 2014). Böylece teorik analizle birlikte 10 ayrı yöntem kullanılarak inceleme alanı için kapsamlı sıvılaşma analizi çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. DEEPSOIL (2020) programına girilen zemin parametreleri (Zemin Etüt Raporu, 2019)

	Tabaka	Derinlik, (m)	Birim Ağırlık, (kN/m ³)	Vs min, (Kayma dalga hızı) (m/s)	Katman Kalınlığı, (m)	Kayma Dayanımı, (kPa)
1	Dolgu	0,50	13,24	90	0,50	49,76
2	Dolgu	1,10	13,24	119	0,60	49,76
3	Dolgu	1,70	13,24	111	0,60	49,76
4	Dolgu	2,30	13,24	104	0,60	49,76
5	Dolgu	3,00	13,24	179	0,70	49,76
6	Dolgu	3,70	13,24	173	0,70	49,76
7	Alüvyon	4,40	15,70	180	0,70	49,76
8	Alüvyon	5,20	15,70	203	0,80	49,76
9	Alüvyon	6,00	15,70	264	0,80	51,93
10	Alüvyon	6,80	15,70	287	0,80	51,93
11	Alüvyon	7,70	15,70	308	0,90	51,93
12	Alüvyon	8,60	15,70	334	0,90	51,93
13	Alüvyon	9,60	15,70	367	1,00	52,25
14	Alüvyon	10,60	15,70	392	1,00	52,25
15	Alüvyon	11,60	15,70	415	1,00	52,25
16	Alüvyon	12,70	15,70	432	1,10	52,25
17	Alüvyon	13,80	15,70	431	1,10	52,25
18	Alüvyon	15,00	15,70	426	1,20	52,25
19	Grovak	16,10	22,00	419	1,10	52,25
20	Grovak	17,40	22,00	420	1,30	52,25
21	Grovak	18,60	22,00	402	1,20	52,25
22	Grovak	19,90	22,00	392	1,30	52,25

Bu çalışmadaki teorik analizde yer alan N_{60} ve $N_{1,60}$ değerleri Denklem 1 ve 2 dikkate alınarak (Skempton, 1986) hesaplanmıştır.

$$N_{60} = 1,67 E_m C_b C_r N \quad (1)$$

$$N_{1,60} = N_{60} C_N \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de, N_{60} , tokmağın serbest düşme enerjisine göre düzeltilmiş vuruş sayısını, N , arazide ölçülmüş SPT vuruş sayısını, E_m , şahmerdan etkinliğini, C_r , tij uzunluğu düzeltme katsayısını, C_b , sondaj çapı düzeltme katsayısını, C_N , örtü basıncı düzeltme katsayısını ve $N_{1,60}$, tokmağın serbest düşme enerjisine göre düzeltilmiş vuruş sayısını ifade eder.

Ayrık taneli (kum gibi) zeminlerin çevre basınçları büyük oranda penetrasyon direncini etkilemektedir. Kum zeminlerde farklı derinliklerde yapılan SPT uygulamalarında aşağıya doğru inildikçe vuruş sayısının artması beklenir. Çevre basıncı etkisinin hesaplanması için örtü basıncı

düzeltilme faktörü ile N_{60} değerleri Denklem 2’de gösterildiği gibi işleme girer. Düşey efektif gerilmeye göre 2 farklı durum söz konusu olmaktadır.

Bu çalışmada düşey efektif gerilmenin 200 kPa’dan az olması durumunda örtü basıncı düzeltilme katsayısı değeri (C_N), Liao ve Whitman’ın (1986) önerdiği, Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_N = \sqrt{\frac{Pa}{\sigma'_{v0}}} \leq 1,70 \quad (3)$$

Düşey efektif gerilmenin 200 kPa’dan fazla olması durumunda ise örtü basıncı düzeltilme katsayısı değeri (C_N), Kayen ve ark.’ın (1992) önerdiği Denklem 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$C_N = 2,2 / (1,2 + \frac{\sigma'_{v0}}{Pa}) \quad (4)$$

Denklem 3 ve 4’te, σ'_{v0} , düşey efektif gerilmeyi, Pa , yaklaşık olarak 100 kPa değerini ifade etmektedir.

Sıvılaşma potansiyelini belirlemek için pek çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerin başında “Tekrarlı Kayma Gerilmesi Oranı Kriterleri” yöntemi gelmektedir. Bu yöntemde güvenlik sayısı (G_s), Denklem 5’te gösterilen şekilde elde edilmektedir:

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

Denklem 5’te, CSR, tekrarlı gerilme oranını, CRR, ise tekrarlı mukavemet oranını ifade etmektedir. Bu yöntemde göre; $G_s < 1,00$ olması halinde sıvılaşma kaçınılmazdır, $1,00 \leq G_s < 1,20$ olması halinde sıvılaşma riski söz konusudur, $G_s \geq 1,20$ olması halinde ise sıvılaşmanın meydana gelmeyeceği belirtilmiştir. Seed ve ark. (1985) SPT ile sıvılaşma arasındaki ilişkiyi $N_{1,60} > 30$ durumunda önemsiz, $20 \leq N_{1,60} < 30$ için orta ve $0 \leq N_{1,60} < 20$ içinse yüksek olmak üzere 3 durumda açıklamışlardır.

Sıvılaşmaya yatkın zeminlerde olası bir deprem için CSR Denklem 6 ile hesaplanabilmektedir (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = \frac{\tau_{tek}}{\sigma'_0} = 0,65 rd \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (6)$$

Denklem 6'da, τ_{tek} , tekrarlı kayma gerilmesini (deprem kaynaklı uniform), a_{max} , maksimum yer ivmesini, σ_{V0} , toplam düşey gerilmeyi, σ'_{V0} , düşey efektif gerilmeyi, rd , derinlik azaltma faktörünü, g , yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

Denklem 7'de derinlik azaltma faktörü (gerilme azaltma katsayısı) sunulmuştur (Kayen ve ark., 1992).

$$rd = 1 - 0,012 z \quad (7)$$

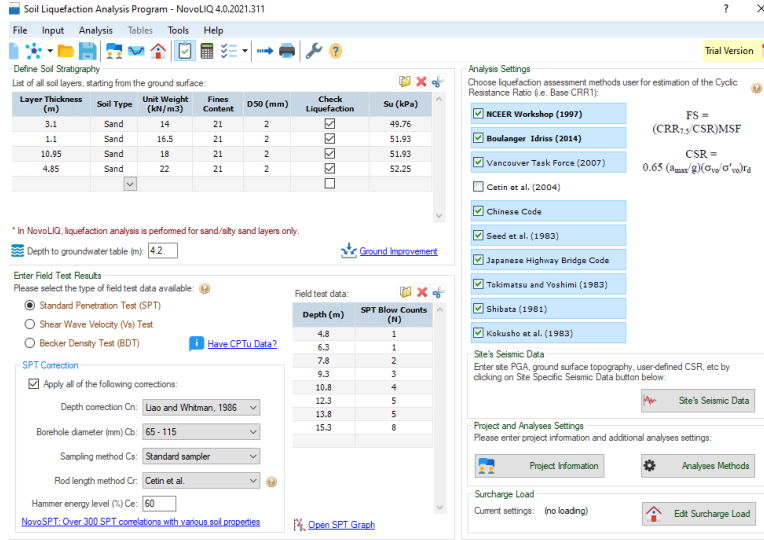
Denklem 7'de z , derinliği ifade etmektedir.

Zeminin sıvılaşmaya karşı direncini elde etmek için düzeltilmiş vuruş sayısı ile ince tane oranı kullanılır. Tekrarlı mukavemet oranı sıvılaşma direncini ifade etmektedir. CRR değeri Seed ve ark. (1985) dikkate alınarak hesaplanabilmektedir. Bu kapsamda $M_w=7.5$ olan depremlerde $N_{1,60}>30$ olması durumunda temiz kumlarda sıvılaşmanın meydana gelmeyeceği kabul edilir. $M_w=7.5$ 'ten farklı bir deprem büyüklüğü söz konusuysa CRR değerinin hesaplanmasında Denklem 8'de yer alan büyüklük ölçek faktörü (BÖF) kullanılır (Youd ve ark., 2001).

$$BÖF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (8)$$

Denklem 8'de M_w , deprem moment büyüklüğünü ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında teorik sıvılaşma hesaplarında Denklem 5-8 kullanılarak gerekli işlemler yapılmıştır.

Çok aşamalı ve bir boyutlu sismik saha tepki analizi yapabilen DEEPSOIL (2020) programında, meydana gelmiş depremlerin ivme kayıtları incelenen alana uygulanarak sıvılaşma analizlerinde kullanılacak PGA değerleri elde edilmiştir. NOVOLIQ (2020) programı kullanılarak önemli araştırmacıların geliştirdikleri Şekil 1'de sunulan çeşitli yöntemler ile sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. NOVOLIQ (2020) programında seçilen yöntemler ve programa tanımlanan bu çalışmadaki zemin verileri

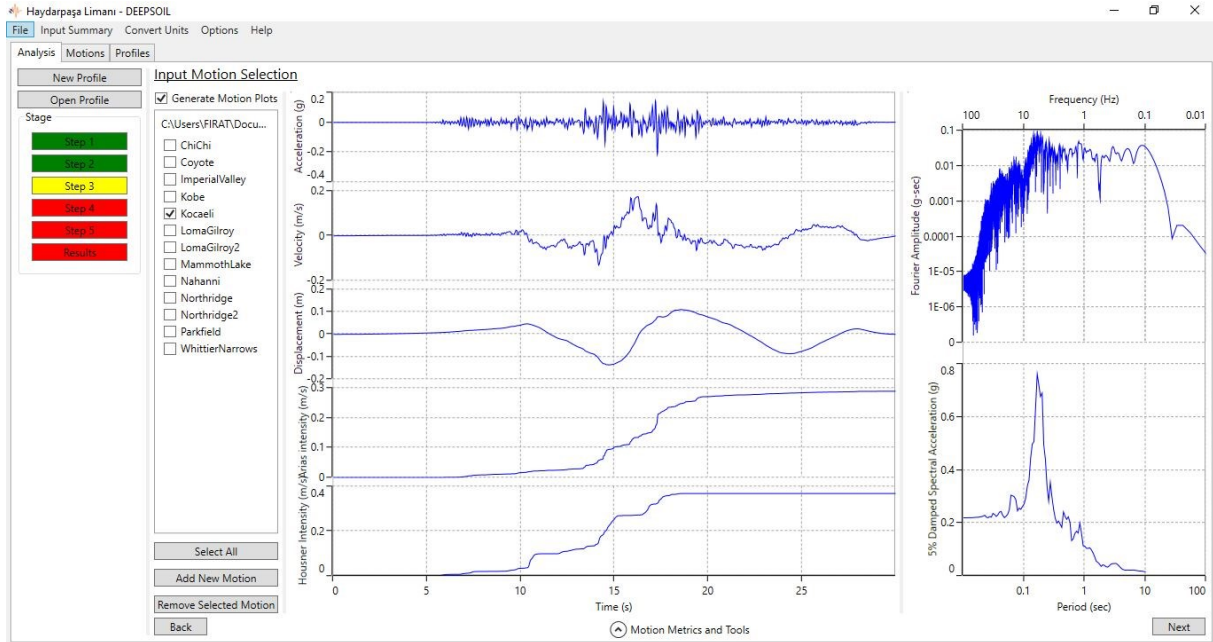
Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada incelenen alanda sıvılaşma analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için ilk aşamada DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak sismik saha analizi yapılmıştır. Öncelikle Düzce (Bolu) Depremi (12.11.1999, Bolu Merkez istasyonu, Mw=5,5), Orta (Çankırı) Depremi (06.06.2000, Çankırı Çerkeş istasyonu, Mw=6,0), Ege Denizi (17.26 km Seferihisar (İzmir) Depremi, 30.10.2020, İzmir Çeşme istasyonu, Mw=6,6), Düzce (Bolu) Depremi (12.11.1999, Düzce istasyonu, Mw=7,1), Gölcük (İzmit) Depremi (17.08.1999, DEEPSOIL (2020) kayıtlı deprem, Mw=7,6) senaryoları ayrı ayrı Şekil 2’de gösterildiği gibi Haydarpaşa Limanı proje alanına uygulanmıştır. Yapılan sismik saha analizleriyle her bir deprem büyüklüğü için PGA değerleri elde edilmiş ve PGA-derinlik grafikleri Şekil 3’te gösterildiği gibi oluşturulmuştur. Elde edilen PGA değerleri, Seed ve Idriss (1971) yöntemi ve NOVOLIQ (2020) programına göre yapılan sıvılaşma analizlerinde dikkate alınmıştır. Teorik analiz için ilgili zemin etüt raporundan; standart penetrasyon test (SPT) verileri ve zemin özellikleri alınarak, N₆₀ ve N_{1,60} düzeltilmiş vuruş sayılarına ulaşılmıştır. Son aşamada CSR ve CRR değerleri hesaplanıp bütün derinlikler için güvenlik sayıları elde edilmiştir. Seed ve Idriss (1971) yönteminin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen teorik analizden elde edilen sonuçların karşılaştırılması amacıyla birçok sıvılaşma analiz yöntemi içeren NOVOLIQ (2020) programı kullanılarak sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Programa sismik veriler, zemin özellikleri ve deney çeşidi girildikten sonra 9 farklı yöntem seçilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

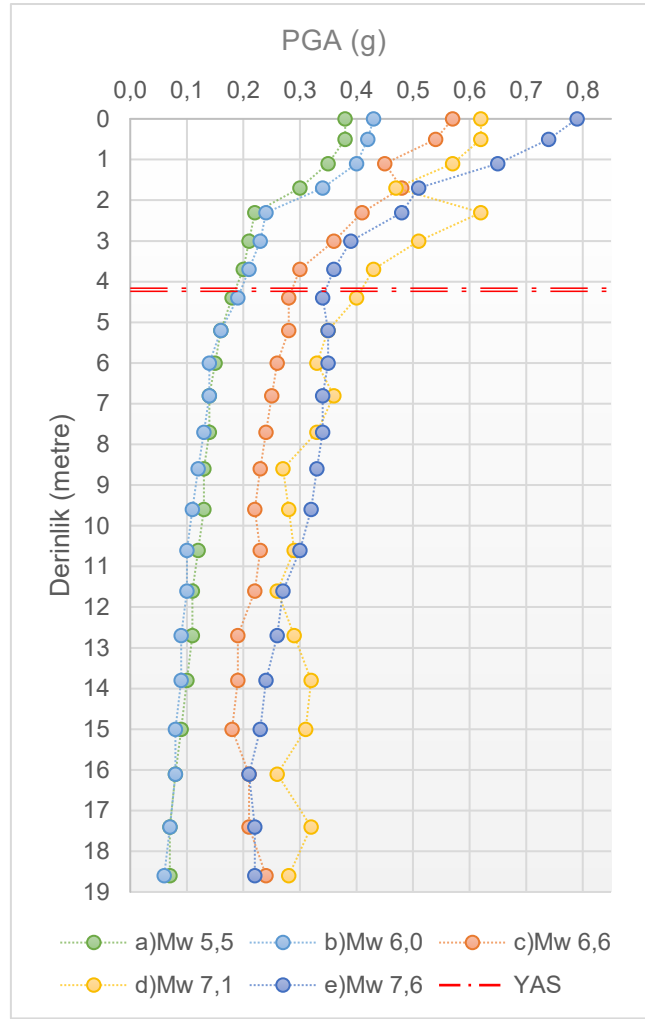
Haydarpaşa Limanı inceleme alanında yer alan sondajlarda yaklaşık her 1,50 metre için SPT yapılmıştır. SPT sonuçlarında genel olarak düşük değerler elde edilmiştir. SPT verileri, analizlerde güvenli tarafta kalacak şekilde en riskli durum seçilerek Tablo 2’de sunulan biçimde dikkate alınmıştır.

Tablo 2. SPT vuruş sayıları ve derinlikleri (Zemin Etüt Raporu, 2019)

SPT-N ₃₀								
SPT NO	Derinlik (Metre)	Sk1	Sk2	Sk3	Sk4	Sk5	Sk6	Sk-Min.
SPT1	4,50 – 4,95	1	1	1	1	1	1	1
SPT2	6,00 – 6,45	1	1	2	2	1	1	1
SPT3	7,50 – 7,95	3	3	11	2	2	3	2
SPT4	9,00 – 9,45	4	12	5	4	3	4	3
SPT5	10,50 – 10,95	14	5	4	5	14	5	4
SPT6	12,00 – 12,45	5	6	5	16	7	19	5
SPT7	13,50 – 13,95	6		5	7	10	6	5
SPT8	15,00 – 15,45					11	8	8

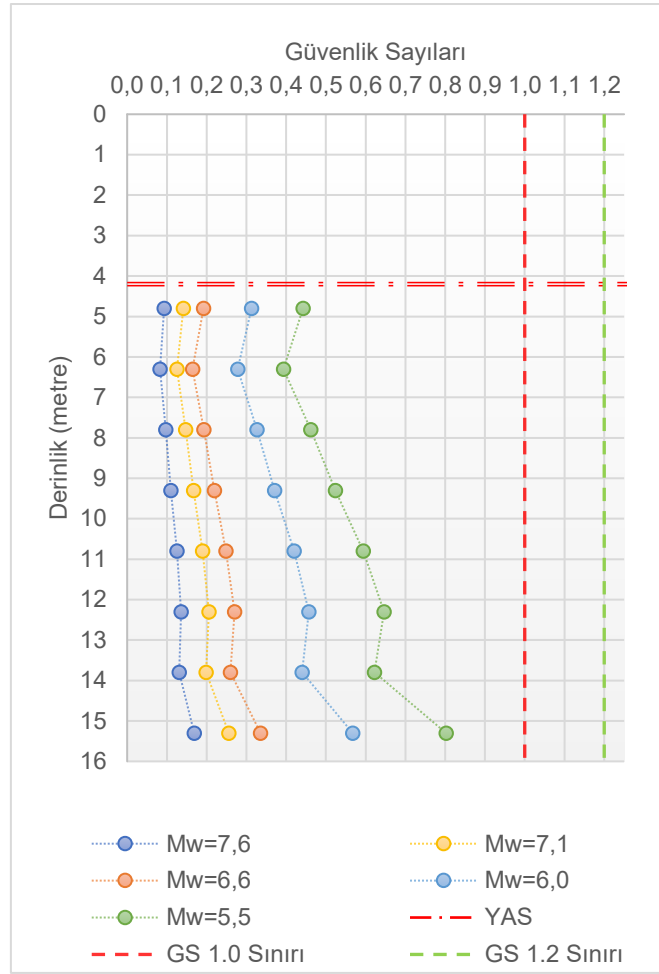


Şekil 2. DEEPSOIL (2020) programında deprem verilerinin seçimi



Şekil 3. Mw=5,5, Mw=6,0, Mw=6,6, Mw=7,1 ile Mw=7,6 için DEEPSOIL (2020) programıyla elde edilen PGA-derinlik grafiği

DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak yapılan sismik saha analizi sonucunda PGA değerleri Mw=5,5 için 0,38 g, Mw=6,0 için 0,43 g, Mw=6,6 için 0,57 g, Mw=7,1 için 0,62 g, Mw=7,6 için 0,79 g şeklinde elde edilmiştir. İlgili alanda yeraltı suyu seviyesi 4,20 metredir. Şekil 4'te sadeleştirilmiş teorik yöntem (Seed ve Idriss, 1971) göre elde edilen güvenlik sayıları sunulmuştur.



Şekil 4. Teorik analizde elde edilen güvenlik sayıları

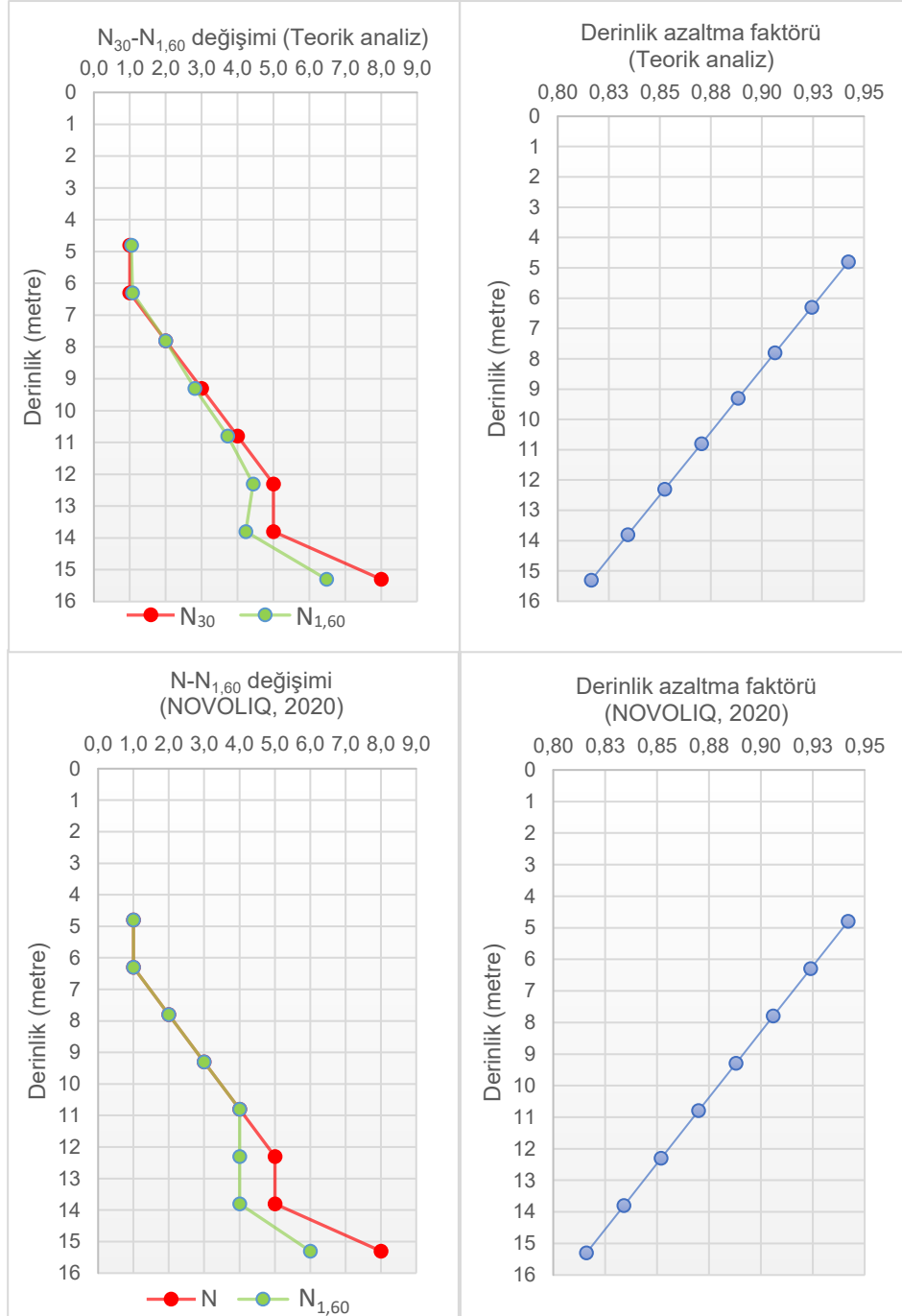
Seed ve Idriss (1971) yöntemine göre yapılan teorik analizde Mw=5,5, Mw=6,0, Mw=6,6, Mw=7,1 ile Mw=7,6 deprem büyüklükleri için her bir derinlikte sıvılaşma riskinin olduğu ($G_s < 1$) sonucuna varılmıştır. Seed ve Idriss'in (1971) önerdiği sadeleştirilmiş yöntem için yapılan teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla NOVOLIQ (2020) programıyla 9 farklı yöntemle sıvılaşma analizi yapılmıştır.

Zemin etüt raporundan alınan veriler, düzeltme faktörleri ve deney çeşidi Şekil 1'de gösterilen biçimde NOVOLIQ (2020) programına tanımlanmıştır. Maksimum deprem ivmesi olarak sismik saha analizlerinden elde edilen PGA değerleri Mw=5,5 için 0,38 g, Mw=6,0 için 0,43 g, Mw=6,6 için 0,57 g, Mw=7,1 için 0,62 g ve Mw=7,6 için 0,79 g şeklinde ayrı ayrı girilmiştir.

Tablo 3. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analiz sonucu ulaşılan güvenlik sayıları

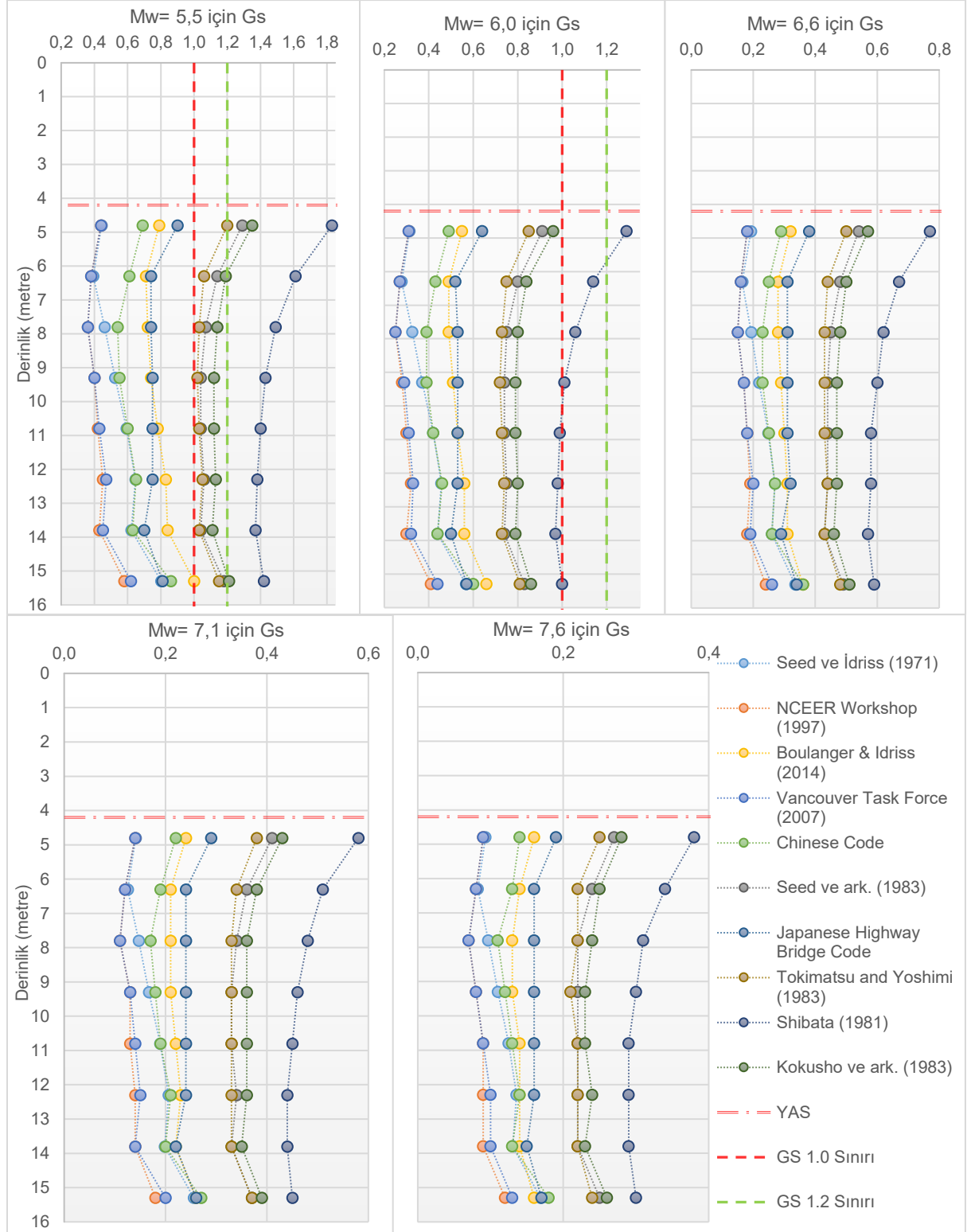
Deprem Büyüklüğü	Derinlik (m)	Güvenlik Sayısı									
		Seed ve Idriss (1971), Teorik	NCEER Workshop Youd ve ark. (1997)	Boulangier & Idriss (2014)	Vancouver Task Force (2007)	Chinese Code	Seed ve ark. (1983)	Japanese Highway Bridge Code	Tokimatsu and Yoshimi (1983)	Shibata (1981)	Kokusho ve ark. (1983)
Mw=5,5	4,80	0,44	0,44	0,79	0,44	0,69	1,29	0,90	1,20	1,83	1,35
	6,30	0,39	0,38	0,71	0,38	0,61	1,14	0,74	1,06	1,61	1,19
	7,80	0,46	0,36	0,72	0,36	0,54	1,07	0,74	1,03	1,49	1,14
	9,30	0,52	0,40	0,74	0,40	0,55	1,04	0,75	1,02	1,43	1,12
	10,80	0,59	0,42	0,78	0,43	0,60	1,04	0,75	1,03	1,40	1,12
	12,30	0,65	0,45	0,83	0,47	0,65	1,06	0,75	1,05	1,38	1,13
	13,80	0,62	0,43	0,84	0,45	0,63	1,04	0,70	1,03	1,37	1,11
	15,30	0,80	0,58	1,00	0,62	0,86	1,18	0,81	1,15	1,42	1,21
Mw=6,0	4,80	0,31	0,31	0,55	0,31	0,49	0,91	0,64	0,85	1,29	0,96
	6,30	0,28	0,27	0,49	0,27	0,43	0,80	0,52	0,75	1,14	0,84
	7,80	0,33	0,25	0,49	0,25	0,39	0,75	0,53	0,73	1,06	0,80
	9,30	0,37	0,28	0,51	0,29	0,39	0,74	0,53	0,72	1,01	0,79
	10,80	0,42	0,30	0,53	0,31	0,42	0,74	0,53	0,73	0,99	0,79
	12,30	0,46	0,32	0,56	0,33	0,46	0,75	0,53	0,74	0,98	0,80
	13,80	0,44	0,30	0,56	0,32	0,44	0,74	0,50	0,73	0,97	0,79
	15,30	0,57	0,41	0,66	0,44	0,60	0,83	0,57	0,81	1,00	0,86
Mw=6,6	4,80	0,19	0,18	0,32	0,18	0,29	0,54	0,38	0,50	0,77	0,57
	6,30	0,16	0,16	0,28	0,16	0,25	0,48	0,31	0,44	0,67	0,50
	7,80	0,19	0,15	0,28	0,15	0,23	0,45	0,31	0,43	0,62	0,48
	9,30	0,22	0,17	0,29	0,17	0,23	0,44	0,31	0,43	0,60	0,47
	10,80	0,25	0,18	0,30	0,18	0,25	0,44	0,31	0,43	0,58	0,47
	12,30	0,27	0,19	0,31	0,20	0,27	0,44	0,32	0,44	0,58	0,47
	13,80	0,26	0,18	0,31	0,19	0,26	0,43	0,29	0,43	0,57	0,46
	15,30	0,34	0,24	0,36	0,26	0,36	0,49	0,34	0,48	0,59	0,51
Mw=7,1	4,80	0,14	0,14	0,24	0,14	0,22	0,41	0,29	0,38	0,58	0,43
	6,30	0,13	0,12	0,21	0,12	0,19	0,36	0,24	0,34	0,51	0,38
	7,80	0,15	0,11	0,21	0,11	0,17	0,34	0,24	0,33	0,48	0,36
	9,30	0,17	0,13	0,21	0,13	0,18	0,33	0,24	0,33	0,46	0,36
	10,80	0,19	0,13	0,22	0,14	0,19	0,33	0,24	0,33	0,45	0,36
	12,30	0,21	0,14	0,23	0,15	0,21	0,34	0,24	0,33	0,44	0,36
	13,80	0,20	0,14	0,22	0,14	0,20	0,33	0,22	0,33	0,44	0,35
	15,30	0,26	0,18	0,26	0,20	0,27	0,37	0,26	0,37	0,45	0,39
Mw=7,6	4,80	0,09	0,09	0,16	0,09	0,14	0,27	0,19	0,25	0,38	0,28
	6,30	0,08	0,08	0,14	0,08	0,13	0,24	0,16	0,22	0,34	0,25
	7,80	0,10	0,07	0,13	0,07	0,11	0,22	0,16	0,22	0,31	0,24
	9,30	0,11	0,08	0,13	0,08	0,12	0,22	0,16	0,21	0,30	0,23
	10,80	0,12	0,09	0,14	0,09	0,13	0,22	0,16	0,22	0,29	0,23
	12,30	0,14	0,09	0,14	0,10	0,14	0,22	0,16	0,22	0,29	0,24
	13,80	0,13	0,09	0,14	0,10	0,13	0,22	0,15	0,22	0,29	0,23
	15,30	0,17	0,12	0,16	0,13	0,18	0,25	0,17	0,24	0,30	0,26

Shibata (1981), Seed ve ark. (1983), Kokusho ve ark. (1983), Tokimatsu ve Yoshimi (1983), Youd ve ark. (1997), Japanese Highway Bridge Code (2002), Vancouver Task Force (2007), Chinese Code (2010), Boulanger ve Idriss (2014) olacak şekilde toplamda 9 ayrı analiz yöntemi seçilmiştir. NOVOLIQ (2020) programı ve teorik analiz sonucu ulaşılan güvenlik sayıları Tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'te belirtilen yöntemlere göre; $G_s < 1,00$ olan derinliklerde sıvılaşma olacağı beklenirken $1,00 \leq G_s < 1,20$ olan derinliklerde sıvılaşma riskinin bulunduğu ve $G_s \geq 1,20$ olan derinliklerde sıvılaşma riskinin olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 5. Teorik analiz ve NOVOLIQ (2020) programıyla elde edilen N_{1,60} ve rd değerinin derinliğe bağlı olarak değişim grafikleri

Şekil 5'te teorik analiz ve NOVOLIQ (2020) programıyla elde edilmiş birbirine uyumlu değerlerin derinliğe bağlı $N_{1,60}$ ve r_d değerlerinin değişim grafikleri sunulmuştur. $M_w=5,5$, $M_w=6,0$, $M_w=6,6$, $M_w=7,1$ ile $M_w=7,6$ deprem büyüklükleri için tüm yöntemlere göre yapılan sıvılaşma analizleri sonucunda güvenlik sayıları elde edilmiştir.



Şekil 6. Tüm yöntemden elde edilen Gs değerlerinin grafiksel gösterimi

$G_s=1$ ve $G_s=1.2$ sınırlarına göre; $G_s<1,00$ olan derinliklerde sıvılaşma olacağı, $1,00\leq G_s<1,20$ olan derinliklerde sıvılaşma riskinin bulunduğu ve $G_s\geq 1,20$ olan derinliklerde sıvılaşma riskinin olmadığı Şekil 6’da görülmektedir.

Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında, Haydarpaşa Limanı çevresi için gerçek deprem senaryoları kullanılarak teorik yöntem ve bilgisayar programları aracılığı ile çalışılan alanın sıvılaşma potansiyeli 10 farklı yöntemle incelenmiştir. İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilebilmesi için DEEPSOIL (2020) programı kullanılarak gerçekleştirilen sismik saha analizlerinde $M_w=5,5$, $M_w=6,0$, $M_w=6,6$, $M_w=7,1$ ve $M_w=7,6$ büyüklüklerindeki depremlerin verileri (sırasıyla Bolu-Düzce1, Çankırı-Orta, İzmir-Seferihisar, Bolu-Düzce2 ve İzmit-Gölcük)) kullanılarak doğrusal olmayan yöntem seçilip her bir deprem büyüklüğü için PGA değerleri ayrı ayrı elde edilmiştir. İnceleme alanı için sadeleştirilmiş teorik yöntemle beraber NOVOLIQ (2020) programı kullanılarak toplamda on farklı yöntem için sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiş olup ulaşılan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada sunulan analizlerin sonucunda $M_w=6,6$, $M_w=7,1$ ile $M_w=7,6$ deprem büyüklükleri için bütün derinliklerde sıvılaşmanın beklendiği belirlenmiştir.

$M_w=6,0$ deprem büyüklüğünde Shibata (1981) yöntemi için yapılan analiz sonucunda sadece 4,80 metrede sıvılaşma beklenmemektedir. Geri kalan bütün yöntemlerin tüm derinlikleri için sıvılaşma riski bulunmakta ya da sıvılaşma durumu beklenmektedir.

$M_w=5,5$ deprem büyüklüğünde Shibata (1981) yöntemi ile yapılan analiz için bütün derinliklerde sıvılaşma beklenilmemektedir. Kokusho ve ark. (1983) yöntemi ile yapılan analiz için 4,80 metre ve 15,30 metrede sıvılaşma beklenilmemektedir. Seed ve ark. (1983) yöntemi için yapılan analiz sonucunda 4,80 metrede sıvılaşma beklenilmemektedir. Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemi için yapılan analiz sonucunda 4,80 metrede sıvılaşma beklenilmemektedir. Geri kalan tüm yöntemlerin bütün derinlikleri için sıvılaşma riski bulunmakta ya da sıvılaşma durumu beklenmektedir.

Bu çalışmada, en riskli senaryolar dikkate alınmış olup kullanılan bütün yöntemlerin analiz sonuçları çoğul durum gözetilerek birlikte değerlendirildiğinde, belirtilen büyüklüklerdeki depremler için inceleme alanındaki tüm derinliklerde sıvılaşma riskinin söz konusu olduğu veya sıvılaşmanın beklendiği belirlenmiştir. Araştırılan alan için meydana gelmiş depremlerin bilgisayar programları aracılığıyla simüle edilerek sıvılaşma analizlerinin yürütülmesi yaklaşımı, gerçek duruma yakın analizlerin yapılmasını sağladığından ilgili yaklaşımın bu tip sıvılaşma analizleri için yol gösterici bir nitelik taşıdığı kanısına varılmıştır.

Teşekkür

Bu çalışmada yapılan analizler için, 21020 nolu lisansüstü tezi bilimsel araştırma projesi ile gerekli desteği sağlayan Harran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (HÜBAP) ve çalışılan alan için gerekli zemin verilerini sağlayıp kullanma izni sunan İstanbul Zemin Sondaj Müh. İnş. San. İç ve Dış Tic. Ltd. Şti. şirketine teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Kaynakça

- Ansal A. Depremlerde yerel zemin davranışları. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi 1999; 384: 64-68.
- Boulanger RW., Idriss IM. CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Report No: UCD/CGM.-14, 1, 2014, sayfa no:138, Davis, CA.
- 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, 2010, Beijing.
- Çıklaiblikçi P. Depremler sırasında zeminlerin sıvılaşması ve sonrasında meydana gelen deplasmanların belirlenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:1, Kayseri, Türkiye, 2019.
- Hakan T. Zeminlerin sıvılaşmasının tahmini için istatistik ve yapay zekaya dayalı modeller oluşturma. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:1, Kayseri, Türkiye, 2019.
- Hashash YMA., Musgrove MI., Harmon JA., Ilhan O., Xing G., Numanoglu O., Groholski DR., Phillips CA., Park D. DEEPSOIL 7.0-user manual. IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2020.
- Japan Road Association. Design specifications for highway bridges. Part V, Seismic Design, 2002, Tokyo:Maruzen, Japanese.
- Kayen RE., Mitchell JK., Seed RB., Lodge A., Nishio S., Countinho R. Evaluation of SPT-CPT and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using loma prieta data. Proceedings, Fourth Japan-US, Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Technical Report NCEER-92-0019, M. Hamada and T.D. O'Rourke, (Eds.), Honolulu, Hawaii, Buffalo, NY 1992; 1: 177-204.

- 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, Research Report No: 383026, 1983; 1-32, Japanese.
- Liao SSC., Whitman RV. Overburden correction factor for SPT in sand. Journal of Geotechnical Engineering 1986; 3: 373-377.
- Mollamahmutođlu M., Kayabalı K. Geoteknik deprem mhendisliği el kitabı. Ankara: Gazi Kitapevi; 2004.
- Novo Tech Software. NOVOLIQ, versiyon 4.0, kullanım kılavuzu. sayfa no:3-27. Vancouver, Kanada, 2020.
- ztrk S. Sıvılaşmaya karşı jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi: samsun-tekkeky rneđi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, sayfa no:18-19, Trabzon, Türkiye, 2016.
- 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.
- Seed HB., Idriss IM., Arango I. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. Journal of Geotechnical Engineering 1983; 109(3): 458-482.
- Seed HB., Tokimatsu K., Harder LF., Chung R. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Journal of Geotechnical Engineering ASCE 1985; 111(12): 1425-1445.
- 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 1981; pp:621-624, Tokio.
- 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.
- Task Force Report. Geotechnical design guidelines for buildings on liquefiable sites in accordance with NBC 2005 for greater vancouver region. 2007.
- Tang L., Man X., Zhang X., Bhattacharya S., Cong S., Ling X. Estimation of the critical buckling load of pile foundations during soil liquefaction. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2021; 146, 106761.
- Tokimatsu K., Yoshimi Y. Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT n-value and fines content. Soils and Foundations 1983; 23(4): 56-74.
- TS EN ISO 22475-1. Jeoteknik etüt ve deneyler - numune alma yöntemleri ve yeraltı suyu ölçümleri - bölüm 1: teknik uygulama esasları. Türk Standartları Enstitüsü, 2006, sayfa no:114, Ankara.
- Youd TL., Idriss IM. Proceeeding of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils. State University of New York at Buffalo, National Center for Earthquake Engineering Research, Report No: NCEER-97-0022, 1997, New York.

- Youd TL., Idriss IM., Andrus RD., Arango I., Castro G., Christian JT., Dobry R., Finn WDL., Harder JrLF., Hynes ME., Ishihara K., Koester JP., Liao SSC., MarcusonIII13 WF., Martin GR., Mitchell JK., Moriwaki Y., Power MS., Robertson PK., Seed RB., StokoeII KH. Liquefaction resistance of soils. Summary Report from the NCEER and NSF Workshops, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 2001; 127(10): 817-833.
- Zhang Y., Xie Y., Zhang Y., Qiu J., Wu S. The adoption of deep neural network (DNN) to the prediction of soil liquefaction based on shear wave velocity. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 2021; 80(6): 5053-5060.
- Zemin Etüt Raporu. Haydarpaşa 5 numaralı bina (eski liman ve gümrük binası) parsel bazında zemin ve temel etüdü veri raporu. İstanbul İli Kadıköy İlçesi Rasim Paşa Mahallesi 54 Pafta 240 Ada 16 Parsel, Rapor No:İZ0319, Tarih: 13.03.2019, 2019.