



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Alüvyon zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin sayısal analiz ile belirlenmesi ve zemin iyileştirmesinin analize etkileri

Evaluation of liquefaction potential on alluvial soils by numerical analysis and effect of soil improvement on the analysis

Yazar(lar) (Author(s)): Selen DAVRAN¹, Aşkın ÖZOCAK², Sedat SERT³, Ertan BOL⁴

ORCID¹: 0000-0002-0233-793X

ORCID²: 0000-0003-1102-1424

ORCID³: 0000-0002-4114-6132

ORCID⁴: 0000-0002-3903-0384

To cite to this article: Davran S., Özocak A., Sert S., ve Bol E., “Alüvyon zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin sayısal analiz ile belirlenmesi ve zemin iyileştirmesinin analize etkileri”, *Journal of Polytechnic*, *(*) : *, (*).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Davran S., Özocak A., Sert S., ve Bol E., “Alüvyon zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin sayısal analiz ile belirlenmesi ve zemin iyileştirmesinin analize etkileri”, *Politeknik Dergisi*, *(*) : *, (*).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1105277

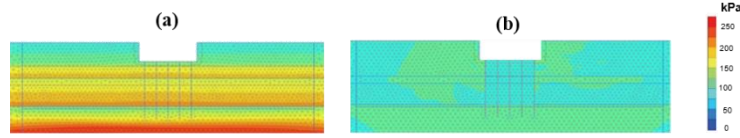
Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sayısal Analiz ile Belirlenmesi ve Zemin İyileştirmesinin Analize Etkileri

Evaluation of Liquefaction Potential on Alluvial Soils by Numerical Analysis and Effect of Soil Improvement on the Analysis

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Alüvyon zeminlerde deprem etkisi ile meydana gelecek sıvılaşmadan kaynaklı oluşabilecek hasarlar önem arz etmektedir. / The damages that may occur due to liquefaction that will occur due to the earthquake effect on alluvial soils are important.
- ❖ Sayısal analiz yöntemleri ile sıvılaşma potansiyeli belirlenmesi / Determination of liquefaction potential by various numerical analysis methods
- ❖ UBCSAND model kullanılarak zemin ve yapı özelliklerinin kalibre edilmesi / Calibrating soil and building properties using UBCSAND model
- ❖ Marmara deprem verisi ile model ivme değişimlerinin karşılaştırılması / Comparison of model acceleration changes with Marmara earthquake data
- ❖ Deprem etkisi ile meydana gelen ivme-deplasman-boşluk suyu basınçları değerlendirilmesi / Evaluation of acceleration-displacement-cavity water pressures caused by earthquake effect

Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. İyileştirmenin etkisiyle boşluk suyu basınçlarındaki değişim / **Figure.** Change in pore water pressures due to the effect of improvement

Amaç (Aim)

Zemin iyileştirmesinin deplasmanlar ve boşluk suyu basınçlarındaki olumlu etkisini gözlemlemek. / To observe the positive effect of ground improvement on displacements and pore water pressures.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sıvılaşma potansiyeli yüksek zemin ve inşa edilmesi planlanan yapının deprem etkisiyle sıvılaşma davranışı incelenmiştir. / The liquefaction behavior of the ground with high liquefaction potential and the structure planned to be built under the influence of earthquake has been studied

Özgünlük (Originality)

Seçilen tipik kesit özellikleri sondaj loglarından alınmış olup programa kalibre edilirken özgün özellikleri korunmuştur. / The selected typical cross-sectional characteristics were taken from the drilling logs and the original characteristics were preserved when calibrating to the program.

Bulgular (Findings)

Zemin iyileştirme yönteminin sıvılaşma üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. / The effect of the soil improvement method on liquefaction has been evaluated.

Sonuç (Conclusion)

Jet kolonlarının boşluk suyu basınçlarının artışı engellediği, yatay deplasmanları azalttığı ve sıvılaşmaya engel olduğu görülmüştür. It has been observed that jet columns prevent the increase of pore water pressures, reduce horizontal displacements and prevent liquefaction.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Alüvyon Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Sayısal Analiz ile Belirlenmesi ve Zemin İyileştirmesinin Analize Etkileri

Araştırma Makalesi / Research Article

Selen DAVRAN*, Aşkın Özocak, Sedat SERT, Ertan BOL

Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.04.2022 ; Kabul/Accepted : 06.12.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 10.03.2023)

ÖZ

Depremler sırasında yumuşak alüvyon zeminlerin bulunduğu bölgelerde sıvılaşma kaynaklı hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle bu çalışma, alüvyon kökenli Adapazarı zeminlerini temsil eden tipik bir kesitin sıvılaşma potansiyelinin sayısal analiz yardımıyla değerlendirilmesini konu almaktadır. Analizler, Plaxis 2D yazılımı ile yürütülmüş, zemin kesiti ise UBCSAND malzeme modeli ile modellenmiştir. Ek olarak, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan Adapazarı zemin kesitinde, zemin iyileştirmesinin sıvılaşmaya karşı etkisinin belirlenebilmesi adına, yapı yükü uygulanması halinde ve yapı altında jet-grout kolonlarının modellenmesi durumlarında analizler tekrar edilmiştir. Deprem verisi olarak 1999 Marmara Depremi kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda belirli analiz noktaları seçilerek, bu noktalardaki ivme-zaman, deplasman-zaman ve boşluk suyu basıncı değişimleri incelenmiştir. Söz konusu analiz noktalarında maksimum ivme değerleri incelendiğinde, bazı noktalarda sıvılaşmanın sönümlenememesi ile zemin büyütmelerinin yaşandığı gözlemlenmiştir. Deplasman-zaman değişimlerinde ise iyileştirmenin yatay deplasmanları %59 değerine kadar azalttığı belirlenmiştir. Ek olarak, iyileştirmenin olmadığı durumda boşluk suyu basınçlarının toplam gerilmeye ulaştığı ve sıvılaşmanın gerçekleştiği; iyileştirme durumunda ise boşluk suyu basınçları toplam gerilmeye ulaşmadığından sıvılaşmanın önüne geçildiği gözlemlenmiştir. Sonuçlara dayanarak, modelin sıvılaşma davranışını temsil edip etmediğinin daha detaylı tartışılması gerektiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet-grout, sıvılaşma potansiyeli, UBCSAND modeli, zemin iyileştirme.

Evaluation of Liquefaction Potential on Alluvial Soils by Numerical Analysis and Effect of Soil Improvement on the Analysis

ABSTRACT

During earthquakes, liquefaction-induced damages may occur in areas with soft alluvial soils. Therefore, this study deals with the evaluation of the liquefaction potential of a typical section representing the alluvial origin Adapazarı soils with the help of numerical analysis. The analyzes were carried out with Plaxis 2D software, and the soil section was modeled with the UBCSAND material model. In addition, in Adapazarı soil section with high liquefaction potential, the analyzes were repeated in order to determine the effect of soil improvement against liquefaction, in case of application of structural load and modeling of jet-grout columns under the structure. 1999 Marmara Earthquake was used as earthquake data. As a result of the analysis, certain analysis points were selected and the acceleration-time, displacement-time and pore water pressure changes at these points were examined. When the maximum acceleration values were examined at the mentioned analysis points, it was observed that there are soil amplifications due to the undamped liquefaction. In case of the displacement-time changes were examined, it was determined that the improvement reduced the horizontal displacements up to 59%. In addition, in the absence of improvement, pore water pressures reach total stress and liquefaction occurs; in the case of improvement, it was observed that liquefaction was prevented since the pore water pressures did not reach the total stress. Based on the results, it was determined that whether the model represents liquefaction behavior should be discussed in more detail.

Keywords: Jet-grout, liquefaction potential, UBCSAND model, soil improvement.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deprem, büyük alanlara yayılmış olan coğrafyalarda meydana gelen doğal felaketlerden biridir. Deprem tarafından tetiklenen durumlar incelendiğinde ise yer ha-

reketleri, toprak kaymaları, zemin büyütmesi ve tsunami gibi çeşitli felaketlerle karşılaşmaktadır. Dünyada her sene göz ardı edilemeyecek kadar çok deprem meydana gelmekte ve bu depremlerin büyük çoğunluğu can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Bu depremlerin oluşturduğu can ve mal kaybının sebeplerinden en önemlisi zemin

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : selendavran@hotmail.com

kaynaklı olanlardır [1]. Zeminde deprem etkisiyle oluşan sıvılaşma ve buna bağlı oluşan akmalardır [2-3]. Sıvılaşma olayının gözlemlenen en önemli örneklerden biri 1999 yılında meydana gelen Marmara depremidir [4].

Sıvılaşma; dinamik yüklerin etkisiyle birlikte kohezyonsuz, gevşek, suya doymuş zeminlerde oluşan boşluk suyu basınçlarındaki artış ve bunun neticesinde zemin daneleri arasındaki temas yüzeyinin yok denecek kadar azalması ile zeminlerin dayanımlarını kaybederek sıvı gibi davranması şeklinde tanımlanmaktadır. Sıvılaşma olayı sonucunda, zeminlerde oturma ve taşıma gücü problemleri, şev stabilitesi problemleri ortaya çıkmaktadır [5-7]. Bu nedenle, geoteknik ve deprem mühendisliğinin önemli bir konusu haline gelen sıvılaşmanın meydana gelebileceği zemin tabakalarının tespiti ve bu zeminlerde yapılaşma olması durumunda çözüme yönelik gerekli analizlerin yapılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Son zamanlarda birçok araştırmacı sıvılaşma problemi üzerinde farklı sayısal modeller oluşturarak zemin davranışını incelemek ve sıvılaşma sonrası meydana gelebilecek olumsuz durumlara engel olmak için çalışmalar gerçekleştirmişlerdir [8-14]. Plaxis bünyesinde yer alan ve ilk olarak Puebla ve diğ. [15] ve Beaty ve Byrne [16] tarafından tanıtılan UBCSAND modeli ise modelde kullanılan parametrelerin laboratuvar ve arazi testlerinden hızlıca tespit edilebiliyor oluşu açısından, özellikle kum ve kum benzeri zeminlerin sıvılaşma sırasındaki davranışının tahmininde birçok araştırmacı tarafından kullanılan bir model haline gelmiştir [15-21].

UBCSAND, zeminlerin gerilme-deformasyon analizlerinde kullanılması için geliştirilmiş 2 boyutlu bir gerilme plastisite modelidir. Ziotopoulou ve diğ. [17] sıvılaşabilir tabakalar için UBCSAND modeli kullanılarak elde edilen sonuçların gerçekçi ve makul cevaplar verdiğini belirtmiştir. Ecemiş [18] sarsma tablası deneyleri ile UBCSAND modelini kıyasladığı çalışması sonucunda, yüzeyde hesaplanan ve ölçülen oturmalar arasında iyi bir ilişki olduğunu belirlemiştir. Petalas ve Galavi [19] tarafından yürütülen bir başka çalışmada ise UBCSAND tabanlı UBC3D-PLM modeli kullanılarak gevşek Syncrude kumu üzerinde gerçekleştirilen dinamik üç eksenli basınç (CTX) ve dinamik direkt basit kesme (DSS) deneyi sonuçları, model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, Sriskandakumar [20] Fraser Nehri kumu üzerinde yaptığı DSS deneyi sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarını karşılaştırarak modelin çevrimsel yükler etkisindeki sonuçlarını kıyaslamıştır. Çalışmalar neticesinde, çevrimsel yükler etkisinde UBCSAND modelin laboratuvar sonuçları ile paralel sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyeline sahip alüvyon zemin tabakalarından oluşan tipik bir Adapazarı zemin kesiti modellenmiş ve bu kesite üç farklı senaryoda sayısal analizler uygulanmıştır. İlk senaryo sadece sıvılaşabilir zemin kesitinin deprem durumundaki sayısal analizini içeriyorken; ikinci senaryo ilkinde ek olarak

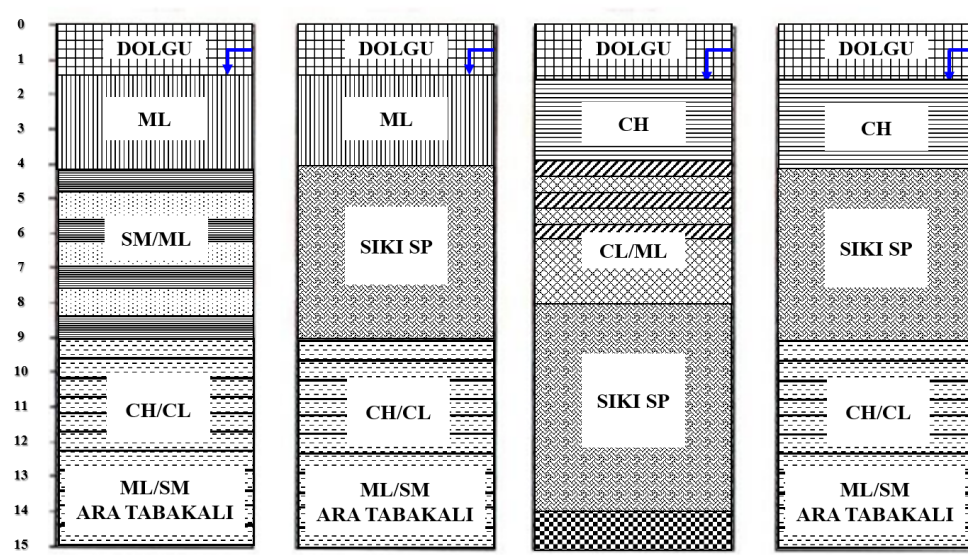
zemin üzerinde bir yapı olması durumunu içermektedir. Üçüncü senaryoda ise, zemin iyileştirmesinin sıvılaşma potansiyeline etkisinin irdelenebilmesi açısından, yapı altında jet-grout kolonları modellenmiştir. UBCSAND modelin kumlu zeminlerde başarılı sonuçlar verdiği ve parametre seçimlerinin kolaylığı göz önünde bulundurularak, kum zeminin hâkim olduğu Adapazarı kesiti, UBCSAND ile modellenmiştir. Analizler sonucunda, sıvılaşma derinliği boyunca çeşitli analiz noktaları belirlenerek üç farklı senaryonun ivme, deplasman ve boşluk suyu basıncı kıyaslarına yer verilmiştir. Bu konuda yürütülmüş çok sayıda çalışma olmasına rağmen, konu halen araştırılması gereken ve mümkün olduğu kadar çok vaka çalışması gereken geliştirilmeye açık bir konudur. Bu çalışmanın ise Adapazarı'nda sıvılaşmış bilinen gerçek bir sahanın verilerini içeriyor olması, çalışmayı diğerlerinden ayıran ve literatüre ek katkı sağlama potansiyelini arttıran en önemli etken olmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1 Zemin Özellikleri (Soil Properties)

Adapazarı, Sakarya ve Mudurnu nehirlerinden gelen çakıllı ve siltli kumlardan oluşan kuvaterner alüvyon birikintilerinden meydana gelmektedir. Bu birikintiler, genellikle düşük plastisiteli kil ve silt serilerini içermektedirler. Kil, kum, çakıl ve silt bazen tek başlarına belirli seviyelerde, bazen de bunların değişik kombinasyonları şeklinde katman katman görülmektedir [22]. Adapazarı ve çevresi, Türkiye'nin kuzeyinde bulunan Kuzey Anadolu Fayı'ndan dolayı tektonik olarak aktif ve önemli bir konumdadır. Kent, aynı zamanda oldukça kalın bir alüvyon dolgu yani zayıf bir zemin üzerinde yer almasından dolayı farklı zamanlarda gerçekleşen şiddetli depremlerden oldukça büyük hasar görmüştür. Deprem sırasında oluşan dinamik yüklemeye ile bölgedeki zeminlerin çoğunluğunun sıvılaşması ve taşıma gücünü kaybetmesi büyük bir kaygı uyandırmıştır [23]. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminden sonra yapılan 600'e yakın sığ sondajdan elde edilen örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde TS1900/2006'ya [24] göre Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarı'nda deneyler yapılmış ve numuneler TS1500/2000'e [25] göre sınıflandırılmışlardır. Deprem sonrası yapılan laboratuvar deneylerine ek olarak, Sakarya Üniversitesi tarafından, yaklaşık 250 adet Koni Penetrasyon (CPTU) deneyini de kapsayan birçok arazi deneyi gerçekleştirilmiştir [26]. Önalp ve diğ. [22] şehir merkezinde yapılan incelemeler sonucunda, üst 5 m'de killer ve plastik olmayan siltlerin, bunların altında da sıkı kum veya hafif aşırı konsolide killerin bulunduğu kesitlerle sık sık karşılaşıldığını belirtmişlerdir. Üst 5 m'deki tabakalarda SPT-N değerlerinin 2 ile 10 arasında değiştiği, sonda uç dirençlerinin ise 2 MPa'dan küçük ölçüldüğü vurgulanmıştır. Bu derinliğin altında, SPT-N değerinin 20'nin üzerinde çıktığı ve değerlerin refüye yönelmekte olduğu

belirtilmiştir. Buradan hareketle, kentte minimum yüzeysel temel derinliğinin 3 m olması gerektiği ve yüksek yapılaşmada derin temel sistemlerinin kullanılması gerektiği sonucuna varılmaktadır. Üst katmanlardaki kayma direnci düşük zeminlerin aksine, eski nehir yataklarının bulunduğu katmanlar yüksek yapılaşma için sağlam bir temel zemini oluşturabilecek sıkı kum ve çakıllı kumları içermektedir. Bol ve Önalp [27], Adapazarı'ndaki çalışmalarında 104 sondaj ve 57 sondalama (CPTU) sonuçlarını kullanarak Sakarya nehrinin eski yatağını oluşturan kanalın güneyden kuzey batıya doğru uzanan kolunu ortaya çıkarmışlardır. Sondajlarda SPT-N değeri refü (SPT-N>50) veren ve CPTU deneyinde uç direnci (q_c) 30 MPa'ı aşan sıkı kum ve çakıllara rastlanmıştır. Sancio ve diğ. [28], Adapazarı kent merkezinde, zemin problemlerinin olduğu bölgelerde ve yıkım oranlarının yüksek olduğu eksenler



Şekil 1. Adapazarı Kent Merkezi zemin profilleri (Adapazarı City Center soil profiles) [28]

2.2 Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi (Determination of Soil Liquefaction Potential)

Özellikle büyük depremler sonrasında yaşanan zemin problemleri nedeniyle, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi adına geçmişten günümüze değin birçok yöntem tanıtılmıştır. Bu bölümde, ince ve iri daneli zeminler için sık kullanılan ve literatürde kabul gören yöntemler tanıtılacaktır.

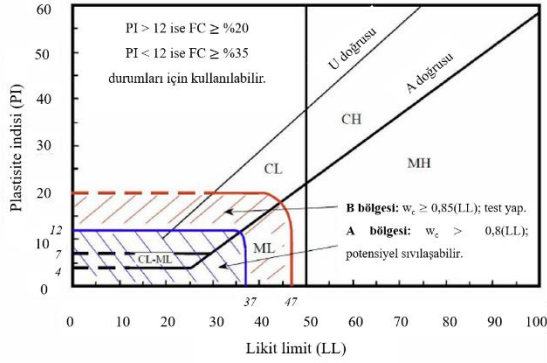
2.2.1 İnce Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi (Determination of Liquefaction Potential of Fine Grained Soils)

Latince "liquefacere" kelimesinden türetilmiş olan sıvılaşma, yumuşamak, erimek veya zayıflamak anlamına gelen, kumlarda ani sismik yükleme esnasında oluşan direnç kaybı olarak ifade edilen genel bir terimdir. Başlangıçta sadece kumlara ait bir davranışmış gibi düşünülen sıvılaşma olayının, özellikle Haicheng (1975) ve Tangshan (1976) depremleri sonrasında ince daneli zeminlerde de olabileceği ortaya çıkmıştır. İnce daneli

boyunca, toplam 46 noktada sondaj ile birlikte Standart Penetrasyon testi (SPT) ve 135 noktada Koni Penetrasyon testi (CPT) yapmışlar ve çalıştıkları alanlardaki üst 15 m için dört farklı tipte zemin profili sunmuşlardır (Şekil 1). Şekil 1'deki kesitler incelendiğinde, kalınlığı 6 m'yi bulan sıkı kum ve çakıllı kumların varlığı gözlemlenmektedir. Sıkı kumların üstünde killi silt ve siltli killerin, derin katmanlarda ise silt ve kum ara katmanlı kil katmanlarının varlığı gözlemlenmiştir. Depremin ardından DSİ tarafından yapılan 200m'lik sondajda da ana kayaya ulaşılmamış olup yukarıdaki sonuçlara benzer şekilde üst katmanlarda genel olarak ince kum katmanları içeren kil ve siltler olduğu belirtilmiştir, 50 m ile 70 m arasında ise birkaç CL zemin dışında tüm kesitin yüksek plastisiteli killerden oluştuğu görülmüştür [26].

zeminlerde sıvılaşma olasılığının tespiti için Seed ve diğ. [29] tarafından modifiye edilmiş Çin kriteri ve Adapazarı kriteri kullanılmaktadır. Seed ve diğ. [29] tarafından tanıtılan yaklaşıma göre; plastisite indisi (PI) 12'den ve likit limiti (LL ya da w_L) 37'den düşük olan zeminlerin, doğal su muhtevaları (w_n) likit limitlerinin %80'inden fazla ise ($w_n \geq 0.8 \cdot LL$), bu zeminler sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnce daneli zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin bahsi geçen kriter ile belirlenmesine yönelik önerilen grafik Şekil 2'de verilmiştir.

Bol ve diğ. [30]'nin 1999 depremi sonrasında siltli zeminlerin davranışını inceleyerek geliştirdikleri Adapazarı Kriterine göre; $M_w = 7$ büyüklüğündeki bir depremde, ince daneli bir zeminin sıvılaşabilmesi için likit limitinin %35'ten küçük olması, kil içeriğinin ($<0.002 \phi_m$) %10'dan küçük olması, ortalama dane boyutunun (D_{50}) 0.02 mm'den büyük olması ve sıvılık indisinin (PI ölçülemiyorsa w_n/w_L oranının) 0.9'dan büyük olması şartlarının hepsinin sağlanması gerekmektedir.



Şekil 2. Seed ve diğ. [29] tarafından önerilen ince daneli zemin karışımlarında sıvılaşabilirlik koşulu (According to Seed et al. [29] the liquefiability condition of fine-grained soil mixtures)

Adapazarı kriterinde diğerlerinden farklı olarak ince daneli zeminin ortalama dane boyutu da bir kriter olarak gösterilmiştir. Su muhtevasının ve plastisite indisinin sıvılaşabilirliğe etkisinin sıvılık indisi (I_L) ile ilişkisinin göz önüne alınması da önemli bir yaklaşım olmaktadır. Ancak plastik olmayan siltlerde sıvılık indisi hesaplamak mümkün olmadığından, bu parametreye temkinli yaklaşılması gerekmektedir [30].

2.2.2 İri Daneli Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi (Determination of Liquefaction Potential of Coarse Grained Soils)

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Ancak iri daneli zeminler için Seed ve Idriss [31] tarafından önerilen “basitleştirilmiş yöntem” yaklaşımı oldukça sık kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda zeminlerin sıvılaşma potansiyeli iki değişkene bağlıdır. Bu parametrelerden ilki, deprem sırasındaki yatay kesme kuvveti ile oluşan ve dinamik yüklemenin seviyesini gösteren çevrimsel gerilme oranı (CSR); ikincisi ise, zeminlerin deprem yüküne karşı sıvılaşma direncini ifade eden çevrimsel direnç oranıdır (CRR). CSR değeri aşağıda verilen Denklem 1’deki gibi hesaplanabilmektedir [32].

$$CSR = 0,65 \times \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \times \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) \times r_d \quad (1)$$

Burada; a_{max} yüzeydeki en büyük yatay ivme, σ_v toplam gerilme, σ'_v efektif gerilme, r_d gerilme azaltma katsayısıdır [33].

CRR’nin hesaplanması için düzeltilmiş SPT-N darbe sayısı ($N_{1,60}$) kullanılmaktadır. 7,5 büyüklüğündeki bir deprem ($M_w = 7,5$) için sıvılaşma direnci değeri Denklem 2 ile elde edilmektedir. Bu denklem NCEER grubu tarafından önerilmiştir [34].

$$CRR = \frac{1}{34 - N_{1,60}} + \frac{N_{1,60}}{135} + \frac{50}{(10N_{1,60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (2)$$

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) ise CSR ve CRR parametreleri kullanılarak Denklem 3’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

Deprem büyüklüğünün 7,5’tan farklı olduğu durumlarda ise ($M_w \neq 7,5$), güvenlik sayısı büyüklük düzeltme faktörü (MSF) ile çarpılmakta ve deprem büyüklüğüne göre düzeltme yapılmaktadır. MSF değeri Denklem 4’teki bağıntı ile hesaplanmaktadır. Yeni durumdaki güvenlik sayısı ise Denklem 5 ile elde edilmektedir.

$$MSF = 10^{2.24 / M_w^{2.56}} \quad (4)$$

$$FS = \left(\frac{CRR}{CSR}\right) \times MSF \geq 1.10 \quad (5)$$

Denklem 5’te verilen güvenlik sayısı şartının sağlandığı durumlarda zeminin sıvılaşma potansiyeli yok denilmektedir [35]. Sıvılaşma ihtimali yüksek olan tabakalarda güvenlik sayısının tespit edilmesinin ardından, sıvılaşma derinliği boyunca (yüzeyden ilk 20 m) sıvılaşma tehlikesi indisi (LPI) hesaplanarak bölgesel sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmesi yapılmalıdır [32].

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) \cdot dz \quad (6)$$

Burada; “LPI” sıvılaşma potansiyeli indisi, “F(z)” sıvılaşma şiddeti değeri, “W(z)” ağırlıklı (ortalama) fonksiyon, “z” zemin yüzeyinden ilgili tabakanın orta noktasına kadar olan derinlik olarak tanımlanmaktadır. W(z), derinliğe göre değişen sıvılaşma potansiyeli azaltma faktörüdür. F(z) ise Juang ve diğ. [36] tarafından tanımlanan sıvılaşma olasılığıdır. Bu değer, güvenlik sayısına bağlı olarak, güvenlik sayısının 1’e eşit veya 1’den büyük olduğu durumlarda 0; diğer durumlarda ise (1-FS) olarak alınmaktadır.

2.2.3 Ubcсанд Malzeme Modeli (Ubcсанд Material Model)

UBCSAND model, Plaxis analiz programında sıvılaşma analizi yapabilmek için kullanıcı tanımlı özelliğe sahip bir modeldir. İlk kez Puebla ve diğ. [15] ve Beaty ve Byrne [16] tarafından kumlu veya siltli kumlu zeminlerin sıvılaşma davranışını modelleyebilmek için tanımlanan elasto-plastik efektif gerilme modeli, daha sonralarda Petalas ve Galavi [19], Galavi ve diğ. [37], Tsegaye [38] tarafından geliştirilip düzeltmelerle birlikte UBC3D-PLM modeli haline almıştır. UBCSAND ile UBC3D-PLM arasındaki ana farklılık akma yüzeyinin tanımlanmasında kullanılan boyut farklılığıdır. UBCSAND model, iki boyutlu Mohr-Coulomb akma yüzeyini kullanırken, UBC3D-PLM ise Mohr-Coulomb akma durumunu üç boyutlu (3D) asal gerilme uzayında dikkate almaktadır. Sayısal analizlerde kullanılan model kompleks hale geldikçe, kullanılan parametre sayısı ve dolayısıyla kurulan korelasyonların sayısı artmaktadır. Bu durum hem analiz süresini hem de analize dahil edilen parametrelerin geçerliliğindeki soru işaretlerini arttırabilmektedir [39]. Bu çalışmada, kum ağırlıklı zeminlerin UBCSAND ile modellenmesinin

arazi deneyleri ile tutarlı sonuçlar verdiği literatürdeki çalışmalarla daha önceden teyit edildiğinden [15-18], daha kompleks bir yapıya sahip olan UBC3D-PLM modelinin kullanımına gerek duyulmamıştır. Analiz için kullanılan parametreler Çizelge 1’de belirtilmektedir. UBCSAND model parametrelerinden kayma direnci parametreleri, üç eksenli kesme deneyleri veya basit kesme deneylerinden elde edilebilmektedir. Ayrıca, düzeltilmiş SPT-N darbe sayısının kullanılması ile Denklem 7-11’de verilen model parametrelerine ulaşmak mümkündür.

$$\varphi_p = \varphi_{cv} + \frac{N_{1,60}}{10} \max(0, \frac{N_{1,60}^{-15}}{5}) \quad (7)$$

$$k_G^e = 21.7 \times A \times (N_{1,60})^{0.333} \quad (8)$$

$$k_B^e = \alpha \times k_G^e \quad (9)$$

$$k_G^p = k_G^e \times (N_{1,60})^2 \times 0.003 + 100 \quad (10)$$

Daha önce yürütülmüş çalışmalarda, Denklem 8’de yer alan A katsayısının 15-20 aralığında, Denklem 9’da yer alan α katsayısının ise 0,7-1,3 aralığında değiştiği belirlenmiştir. Beaty ve Byrne [40], Naesgaard [41] ve Marka [42] ise yaptıkları çalışmalar neticesinde A katsayısının 20 ve α katsayısının 0,7 alınmasını önermiştir. Rijitliğin gerilmeye hangi mertebeye bağlı

olduğunu gösteren faktörlerden elastik üslerin (m_e ve n_e) 0,5, plastik üssün (n_p) ise 0,4 olarak alınması önerilmektedir. Göçme oranı (R_f) için Denklem 11’deki formül kullanılmaktadır. Göçme oranı genelde 0,99’dan küçük değerler almaktadır.

$$R_f = 1.1 \times (N_{1,60})^{-0.15} \quad (11)$$

Sıkılaştırma faktörü (f_{achard}) için UBCSAND modülünde 1 değerinin alınması önerilmiştir. Ancak bu değer 1 alınması sonucunda, sıvılaşma sonrası davranışta aşırı büyük deplasmanlar hesaplanmaktadır. Bu nedenle bu değer 1 alınması önerilmiştir [42]. Sıvılaşma sonrası davranışı gösteren f_{acpost} faktörünün ise 0,2 ile 1 arasında bir değer alınması önerilmiştir [19].

Literatürde, $N_{1,60}$ değerine ampirik yollardan ulaşmak için Denklem 12’de verilen korelasyonun kullanılması önerilmiştir.

$$D_r = ((N_{1,60})/C_d)^{0.5} \quad (12)$$

Bu denklemde kullanılan D_r rölatif sıkılık, C_d ise kalibrasyon faktörünü temsil etmektedir. Kalibrasyon faktörünün değeri Meyerhof [43] tarafından 41 olarak alınması önerilmiştir. Diğer araştırmalarda ise C_d değerinin dane dağılımı, dane çapı, aşırı konsolidasyon oranı gibi parametrelere bağlı olarak 36-60 arası değerler aldığı belirlenmiştir [44].

Çizelge 1. Plaxis UBCSAND modelde kullanılan parametreler (Parameters used in the Plaxis UBCSAND model)

Sembol	Parametre Tanımı	Birim	Yöntem	Hipotez
$N_{1,60}$	‘Düzeltilmiş SPT-N değeri’	-	‘Yerinde arazi deneyi’	-
φ_{cv}^o	‘Sabit hacim içsel sürtünme açısı’	(°)	‘Üç eksenli veya DSS’	-
φ_p	‘Pik içsel sürtünme açısı’	(°)	‘Üç eksenli veya DSS’	-
c	‘Kohzyon’	kPa	‘Üç eksenli veya DSS’	0
k_G^e	Elastik kayma modülü faktörü	-	‘Eğri uydurma’	-
k_B^e	Elastik bulk modülü faktörü	-	‘Eğri uydurma’	-
k_G^p	Plastik kayma modülü faktörü	-	‘Eğri uydurma’	-
m_e & n_e	Elastik bulk ve kayma modülü üssü	-	‘Eğri uydurma’	0.5
n_p	‘Plastik kayma modülü üssü’	-	‘Eğri uydurma’	0.4-0.5
R_f	‘Göçme oranı’	-	‘Eğri uydurma’	0.9
P_A	‘Atmosferik basınç’	kPa	‘Standart değer’	100
σ_1	‘Çekme gerilmesi’	kPa	-	0
f_{achard}	‘Sıkılaştırma faktörü’	-	‘Eğri uydurma’	1
f_{acpost}	‘Sıvılaşma sonrası faktör’	-	‘Eğri uydurma’	0.2-1

2.3 Sayısal Analiz (Numeric Analysis)

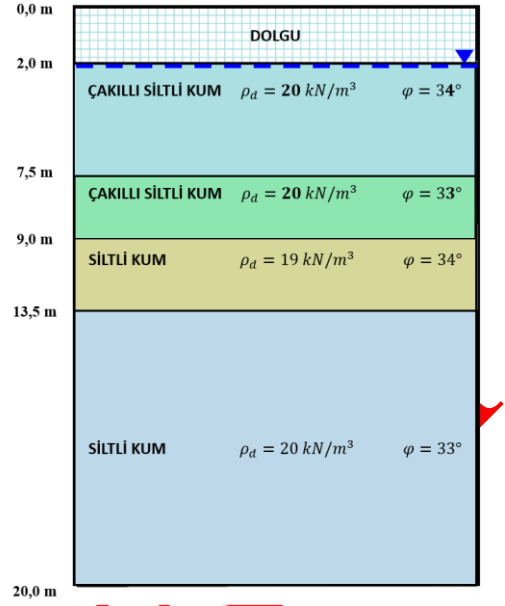
Bu çalışmada Şekil 3’te verilen, yer altı su seviyesinin yüzeye yakın yerlerde bulunduğu, tipik bir Adapazarı kesitinde çalışılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, Seed ve Idriss [31] tarafından önerilen “basitleştirilmiş yöntem” kullanılarak sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Kesitte verilen arazide yapılan sondajlar sonucunda, SPT-N darbe sayıları elde edilmiş ve gerekli düzeltmeler yapılarak $N_{1,60}$ değerlerine geçilmiştir. Bu değer ($N_{1,60}$) belirli derinliklerde elde edildikten sonra basitleştirilmiş yöntem ile sıvılaşmaya karşı güvenlik

sayıları Çizelge 2’deki gibi elde edilmiştir. Kesit genelinde (yüzeye yakın katmanlar) hesaplanan güvenlik sayısı değerleri 1,10’un altında olduğu için, kesitteki zeminlerin sıvılaşma olasılığı yüksektir. Kesitte yapılan sıvılaşma analizi sonucunda ise, sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) 16,55 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3).

Elde edilen güvenlik sayıları ve LPI analizleri incelendiğinde, belirlenen kesite yapı inşası durumunda, kesitin sıvılaşacağı ve dolayısıyla sıvılaşmaya karşı bir iyileştirme yönteminin uygulanması gerektiği net bir şekilde görülmektedir. Bu çalışmada, inşa edilmesi

düşünülen yapının altına zemin iyileştirme yöntemi olarak jet-grout kolonları kullanılmıştır. 10 m genişlik ve 15 m yüksekliğe sahip bina altındaki zemin katmanlarına (dolgu dışındaki tabakalar) ait UBCSAND model parametreleri SPT-N darbe sayılarına göre Çizelge 5'teki gibi belirlenmiştir.

İnşa edilmesi düşünülen yapı, 4 normal kat ve bir bodrum kattan oluşmakta ve sıvılaşma olasılığı yüksek olan gevşek kum üzerine modellenmiştir. Modelde kullanılan zemin kesiti Adapazarı zemininden alınan sondaj sonuçlarına göre oluşturulmuş 20 m derinliğindeki kum tabakasına aittir. Modeldeki elemanlara ait özellikler ise Çizelge 6'da verilmiştir.



Şekil 3. Adapazarı kesiti (Adapazarı cross section)

Çizelge 2. Basitleştirilmiş yöntemle sıvılaşma analizi sonuçları (The results of liquefaction analysis with the Simplified method)

z (m)	$N_{1,60}$	α	β	$N_{1,60cs}$	a_{max}	r_d	CRR	CSR	MSF	τ_{deprem}	FS
2,0	12,6	2,50	1,05	15,22	0,3	0,985	0,165	0,192	1,0	11,1	0,9
3,0	11,6	2,50	1,05	14,17	0,3	0,977	0,155	0,228	1,0	18,3	0,7
4,5	11,3	1,55	1,03	12,91	0,3	0,966	0,143	0,259	1,0	27,1	0,6
6,0	14,9	0,56	1,02	15,43	0,3	0,954	0,167	0,292	1,0	32,1	0,6
7,5	24,1	2,50	1,05	26,72	0,3	0,943	0,332	0,287	1,0	44,1	1,2
9,0	13,7	2,50	1,05	16,32	0,3	0,931	0,176	0,294	1,0	52,3	0,6
10,5	18,1	1,55	1,03	19,67	0,3	0,920	0,213	0,321	1,0	54,2	0,7
12,0	11,2	1,55	1,03	12,82	0,3	0,908	0,142	0,324	1,0	61,2	0,5
13,5	15,5	2,50	1,05	18,10	0,3	0,897	0,195	0,300	1,0	75,5	0,7
15,0	47,3	1,55	1,03	48,87	0,3	0,885	0,290	0,300	1,0	82,9	1,0
16,5	30,2	1,55	1,03	31,81	0,3	0,874	0,687	0,299	1,0	90,0	2,4
18,0	35,4	1,55	1,03	37,02	0,3	0,862	0,580	0,298	1,0	96,9	2,0
19,5	25,4	1,55	1,03	26,96	0,3	0,851	0,338	0,296	1,0	103,5	1,2

Çizelge 3. Sıvılaşma potansiyeli (Liquefaction potential)

z(m)	F(z)	W(z)	LPI
2,0	0,1	9,00	1,01
3,0	0,3	8,50	2,53
4,5	0,4	7,75	3,32
6,0	0,4	7,00	2,86
7,5	0,0	6,25	0,00
9,0	0,4	5,50	2,09
10,5	0,3	4,75	1,49
12,0	0,5	4,00	2,19
13,5	0,3	3,25	1,07
15,0	0,0	2,50	0,00
16,5	0,0	1,75	0,00
18,0	0,0	1,00	0,00
19,5	0,0	0,25	0,00
20,0	0,0	0,00	0,00
			$\Sigma 16,55$

Çizelge 4. LPI sınıflaması (Classification of LPI) [32]

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI)	Sıvılaşma potansiyeli
0	Çok düşük
$0 \leq LPI \leq 5$	Düşük
$5 \leq LPI \leq 15$	Yüksek
$15 \leq LPI$	Çok yüksek

Embedded beam row özelliğinde tanımlanmış jet-grout kolonları, lineer (doğrusal) elastik özellik gösteren ayrılcı çubuk elemanlar olarak modellenmiştir.

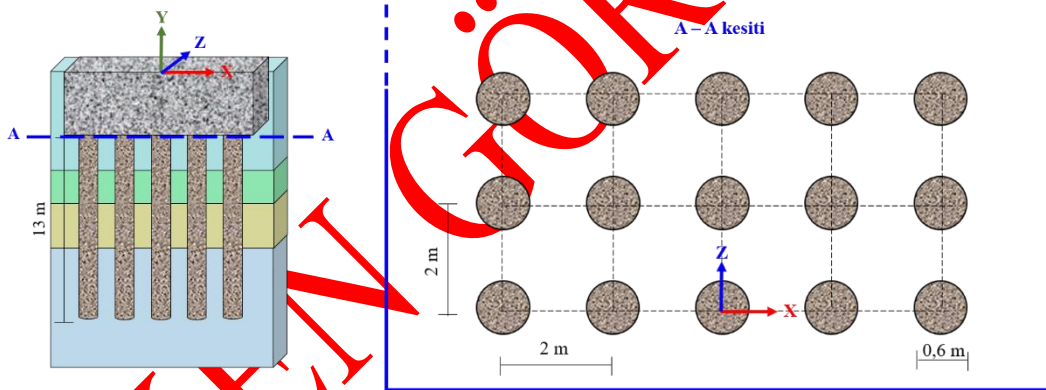
13 m uzunluğa sahip kolonlara ait 3 boyutlu düzlemde ve 2 boyutlu düzlemde verilen kesitler Şekil 4'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 5. UBCSAND modelde kalibre edilmiş zemin parametreleri (The calibrated soil parameters in the UBCSAND Model)

z (m)	N _{1,60}	DR	φ _{ev} (°)	φ _p (°)	c (kPa)	kg ^e	kb ^e	kg ^p	me	ne	np	R _r	P _A (kPa)	σ _t	f _{achard}	f _{acpost}
0-7,5	15,4	0,57	34	36	2	1032	722	668	0,5	0,5	0,4	0,74	100	0	1	0,2
7,5-9,0	23,0	0,75	33	38	2	1233	863	2057	0,5	0,5	0,4	0,69	100	0	1	0,2
9,0-13,5	16,0	0,62	33	37	10	1091	763	960	0,5	0,5	0,4	0,73	100	0	1	0,2
13,5-20,0	45,3	1,05	33	42	10	1539	1077	1012	0,5	0,5	0,4	0,62	100	0	1	0,2

Çizelge 6. Modelde kullanılan elemanların özellikleri (Characteristics of the elements used in the model) [45]

Parametreler	Birim	Binanın gömüde kalan bölümü	Binanın zemin yüzeyi üzerinde kalan bölümü	Kolon	Jet-Grout
Malzeme türü	-	Elastik	Elastik	Elastik	Embedded beam row
EA ₁	kN/m	1,2x10 ⁷	9x10 ⁶	-	-
EI	kNm ² /m	1,6x10 ⁵	6,8x10 ⁴	-	-
w	kN/m/m	20	10	-	-
v	-	0	0	-	-
Rayleigh α	-	0,232	0,232	-	-
Rayleigh β	-	8x10 ⁻³	8x10 ⁻³	-	-
EA	kN/m	-	-	2,5x10 ⁶	-
L _{spacing}	m	-	-	3	2
E	(kN/m ²)	-	-	-	3x10 ⁶
ρ	kN/m ³)	-	-	-	4
d	m	-	-	-	0,6
F _{s,start,min}	kN	-	-	-	100
F _{s,end,max}	kN	-	-	-	150
Q _u	kN	-	-	-	315



Şekil 4. Jet-grout kolonlarından kesit (Cross section from jet-grout columns)

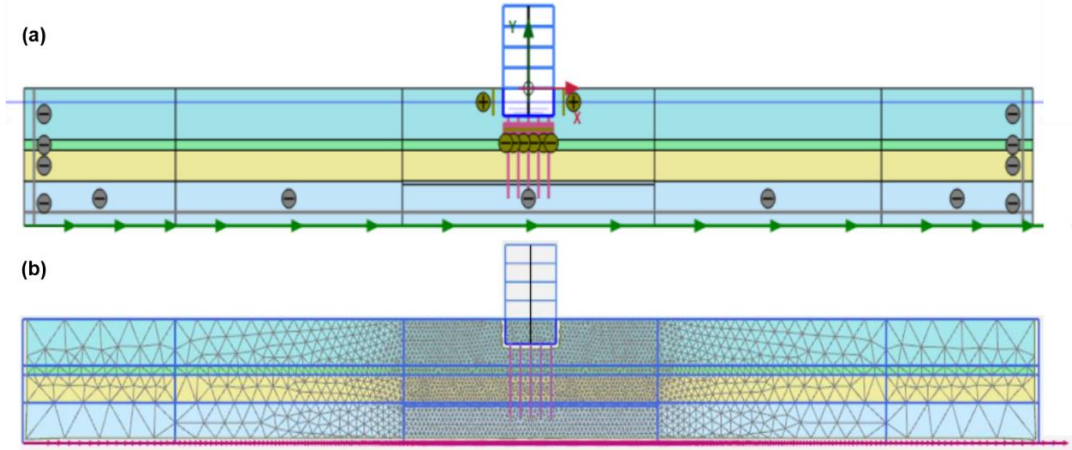
Analizde bina ve zemin elemanlarının deprem sırasındaki sönüm davranışını temsil etmek için Rayleigh sönüm parametreleri (α ve β) kullanılmıştır. Bu parametreler, kütle (M) ve rijitlik (K) matrisleri kullanılarak Denklem 13'teki gibi belirlenebilmektedir. Denklemde toplam sönüm "C" ile ifade edilmektedir.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (13)$$

Rayleigh parametrelerinin belirlenmesi için sönüm oranı ve frekans değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada bina sönüm oranı için genel kabul gören %2 değeri kullanılmıştır. Zeminin doğal frekansı ve sönüm oranı ise literatürde önerildiği üzere 2.97 Hz. ve %3 alınmıştır [15].

Modelde sınır koşullarının belirlenmesi, özellikle deprem dalgalarının sınırlardan yansıyor geri dönmemesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Burada, modelin sağ ve sol sınırları "free field" iken, alt taban "compliant

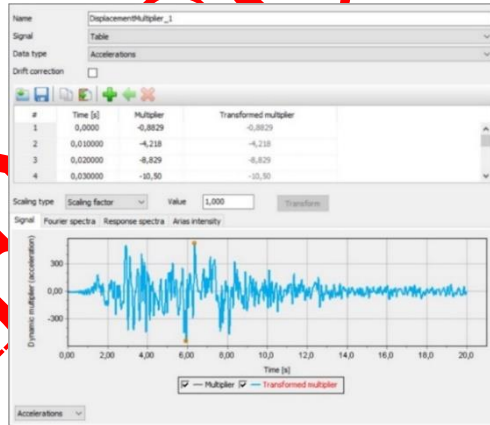
base" olarak belirlenmiştir. Dinamik analizleri etkileyen bir başka parametre ise ağ sıklığıdır. Elverişli ve uygun düzeyde bir ağ sıklığının seçilmesi, oluşacak dalgaların gerçekçi olarak yayılması açısından önem arz etmektedir. Çok fazla ağ, çözüm süresini uzatacağından ve hafıza gerektireceğinden ekonomik olmayacaktır. Ağ sıklığının az olması ise detaylı çözüm yapılmayacağından sonuçların gerçekten uzaklaşmasına neden olacaktır. Uygun ağ aralığını belirlemek için literatürde sıklıkla kullanılan yöntem ele alınmıştır [46]. Buna göre, zeminin minimum kayma dalgası hızı ile depremin maksimum frekans bileşeninin 8 katı arasındaki oran maksimum eleman boyutuna karşılık gelmektedir. Yöntem ile sayısal modelin eleman boyutları ortalama 0,7 m olarak belirlenmiştir. Sonlu eleman modeli ve ağ geometrisi Şekil 5'teki gibidir.



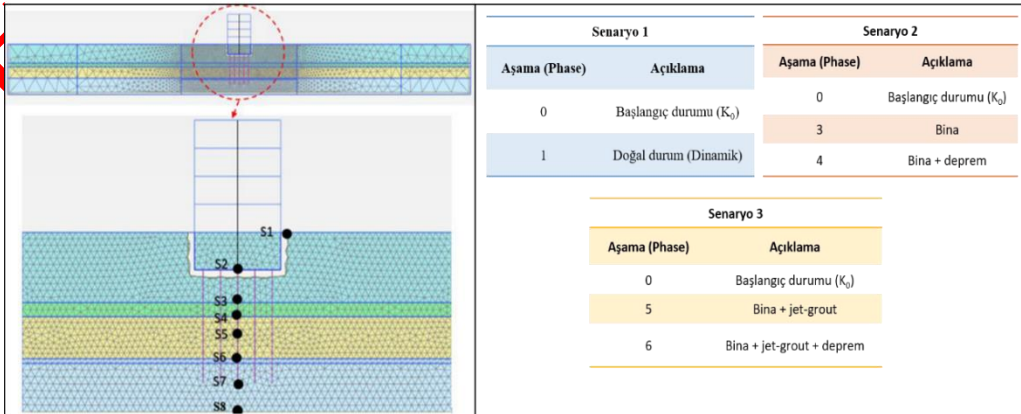
Şekil 5. (a) Sonlu eleman modeli (Finite element model), (b) Oluşturulan ağ, (Generated mesh)

Dinamik analizlerde kullanılan deprem hareketi 1999 Marmara depreminde Kocaeli'nin Sakaya istasyonundan elde edilen DB yönündeki yer hareketi kaydından (outcrop motion) elde edilmiştir. Yüzeiden alınan kayıt, istasyonun yer aldığı zemin özellikleri göz önünde bulundurularak Shake 2000 programında deconvolution yöntemi uygulanarak ana kayaya indirilmiştir. Kayda gerekli düzeltmeler (baseline correction ve bandpass filtreleme) yapıldıktan sonra, kaydın maksimum ivme-zaman aralıkları düşünülerek efektif deprem zamanına ait 20 saniyelik kısım deprem verisi olarak kullanılmıştır.

Düzenlenmiş ivme verisi için drift correction düzeltmesi yapılmasına ihtiyaç duyulmamıştır. Model tabanına x yönünde, büyüklüğü 0.01 m olan yer değiştirme (prescribed displacement) uygulanarak analizlere dahil edilen veri Şekil 6'da gösterildiği gibidir. İyileştirmenin boşluk suyu basınçları, deplasman ve ivme değerleri üzerindeki etkisinin daha net gözlemlenebilmesi için analiz yapılacak noktaların seçimi önem arz etmektedir. Bu çalışmada S1 ile S8 noktaları arasında gerekli değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 7'de seçilen noktaların yeri ve hesap aşamaları verilmiştir.



Şekil 6. Dinamik yük penceresi (Dynamic load window)



Şekil 7. Grafikler için seçilen noktalar ve model hesap aşamaları (Selected points for graphs and stages of model calculation)

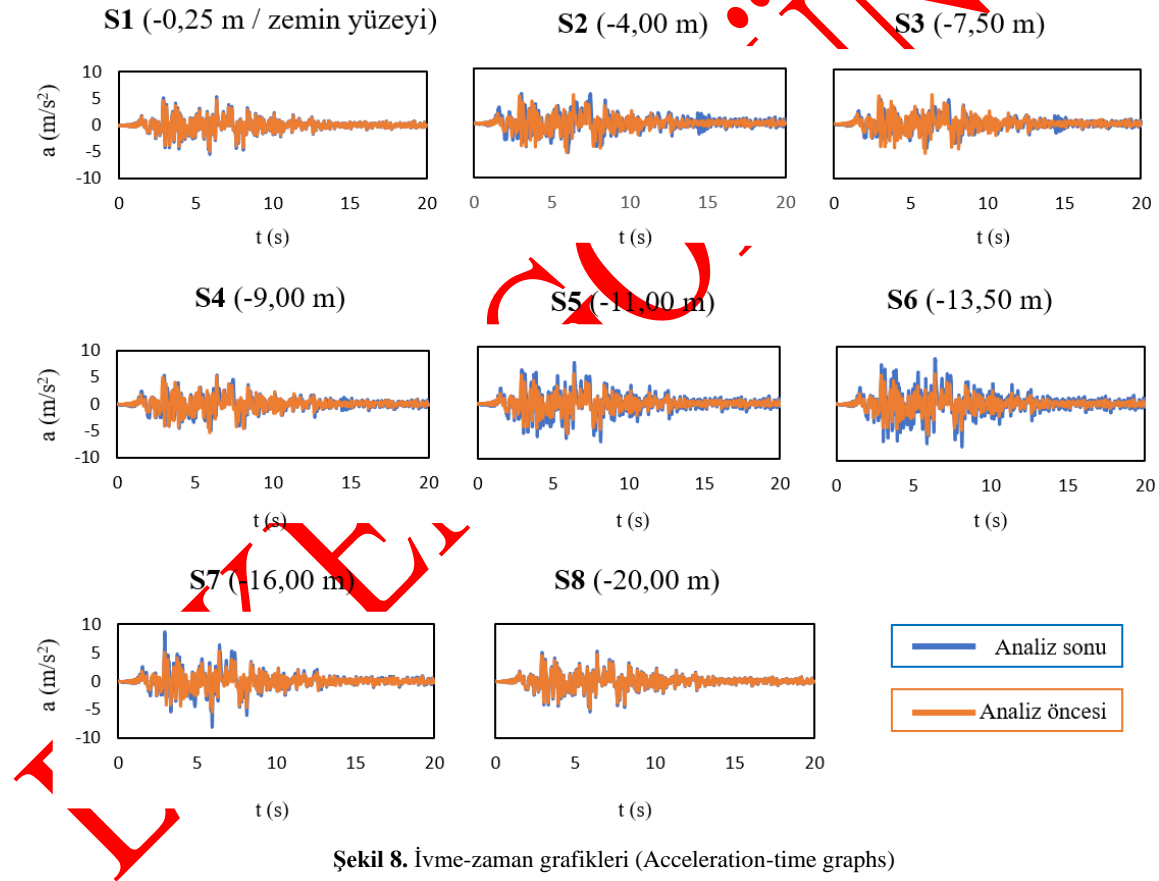
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyeli yüksek olan Adapazarı zemininin sayısal analiz programı yardımıyla modellenmesi ve jet-grout ile iyileştirmenin ivme, deplasman ve boşluk suyu basıncı değerlerine olan etkisi incelenmiştir.

3.1 İvme Değişimleri (Acceleration Changes)

Sayısal analizler sonucunda Şekil 7'de gösterilen analiz noktalarındaki ivme değerleri Adapazarı deprem girdisi ivme-zaman grafikleri ile kıyaslanmış ve Şekil 8'de gösterilmiştir. Yüzeysel olarak incelendiğinde, modelin deprem girdisiyle yakın ivme davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Benzer durumun Demir ve Özener [47] tarafından da elde edildiği tespit edilmiştir. Söz konusu analiz noktaları irdelendiğinde ise

maksimum ivme değerlerinin deprem girdisine göre S5 noktasında %38, S6 noktasında %45, S7 noktasında ise %65 arttığı görülmektedir. Zemin yüzeyinde ve -20 metre derinlikte (depremin etki ettiği derinlik) elde edilen maksimum ivme değerlerinin ise aynı çıktığı belirlenmiştir. S5, S6 ve S7 noktalarındaki veriler incelendiğinde, buralardaki ivme değerlerinde büyütme meydana geldiği, dolayısıyla büyütme en fazla siltli kum tabakalarında rastlandığı ortaya çıkmıştır. Bu duruma ince dane oranındaki artışın etkisiyle sıvılaşma potansiyelindeki düşüşün, bu nedenle de ivme değerlerindeki sönümün azalması sebebiyet verdiği düşünülmektedir. En alt tabakanın rölatif sıklığının bir önceki tabakaya göre daha fazla olması, bu tabakanın sıvılaşma potansiyelini indirmekte ve daha az sönüm gerçekleşmesini sağlamaktadır [47]. Bu nedenle S7 noktasındaki büyütme, diğerlerine oranla fazla olmuştur.

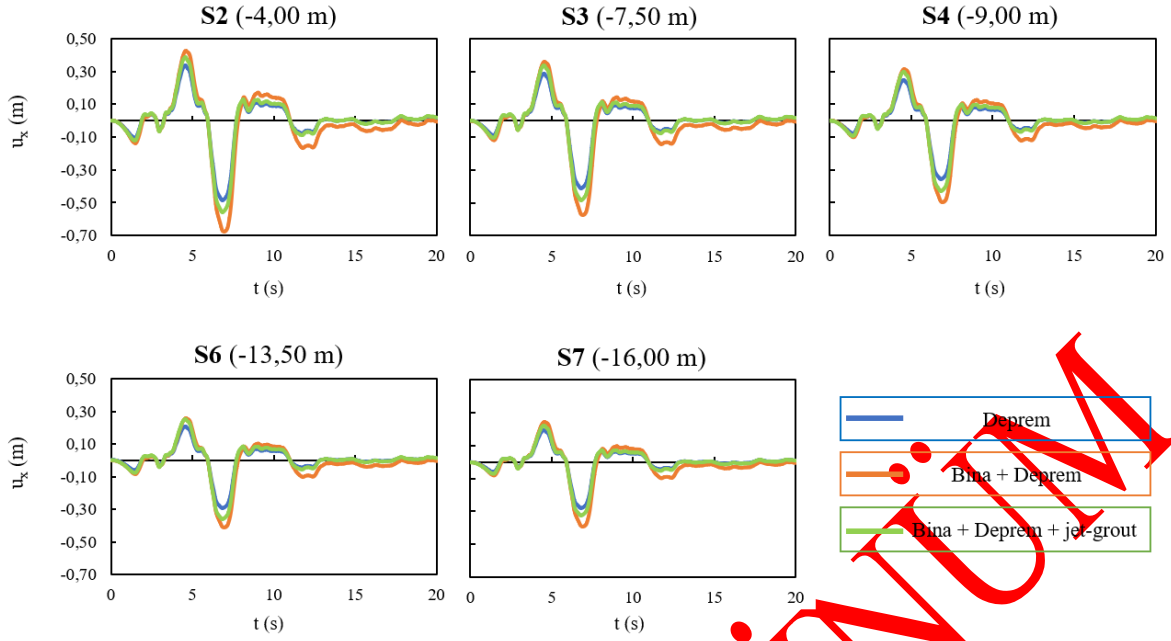


Şekil 8. İvme-zaman grafikleri (Acceleration-time graphs)

3.2 Deplasman Değişimleri (Displacement Changes)

Sayısal analizler sonucunda, boşluk suyu basıncı ve deplasmanların doğrudan ilişkili olduğu düşünülerek, boşluk suyu basıncının oluştuğu sıradaki (deprem sırasında) yatay deplasman değişimleri ve iyileştirmenin bu sırada oluşan deplasmanlara etkisi değerlendirilmiştir. Ek olarak, UBCSAND modelin deprem sonrası deplasman davranışını yansıtmadığı daha önceki çalışmalarda belirlendiğinden

deplasmanlar sadece deprem sırasındaki durum için irdelenmiştir [47]. Şekil 9'da verilen grafikler kıyaslandığında, sıvılaşmanın gerçekleştiği ilk tabakalarda yatay deplasmanların daha fazla olduğu ve iyileştirmenin etkisiyle deplasmanların neredeyse tüm noktalarda azaldığı görülmektedir. Bu durumda, jet-grout iyileştirmesi ile sıvılaşma kaynaklı boşluk suyu basınçlarındaki ani artışların azalması, deplasmanları azaltıcı yönde rol oynadığı söylenebilmektedir [48].

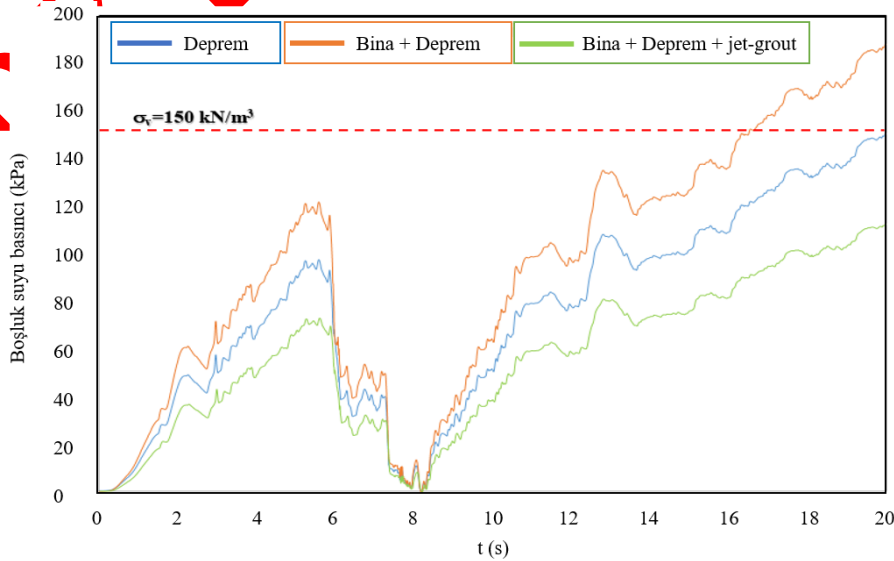


Şekil 9. Deprem sırasındaki yatay deplasman değişimleri (Horizontal displacement changes during the earthquake)

3.3 Boşluk Suyu Basıncı Değişimleri (Pore Water Pressure Changes)

Sayısal analizler sonucunda deprem sırasında oluşan boşluk suyu basıncındaki değişim; deprem durumu, binanın aktif olduğu durum ve jet-grout kolonlarının aktif olduğu durum karşılaştırılmış olup zemin iyileştirmesinin boşluk suyu basıncındaki değişimine olan etkisi değerlendirilmiştir. Boşluk suyu basıncındaki değişim, sıvılaşmanın aktif rol aldığı derinliklerde (ilk tabakalar) incelenmiş ve S2, S3, S4 noktalarındaki dağılımların benzer çıktığı belirlenmiştir. Bu nedenle, iyileştirme etkisi sadece S3 noktasında irdelenmek üzere Şekil 10'da gösterildiği gibi verilmiştir. Boşluk suyu basıncının zamana göre değişimini gösteren grafik incelendiğinde, deprem ile

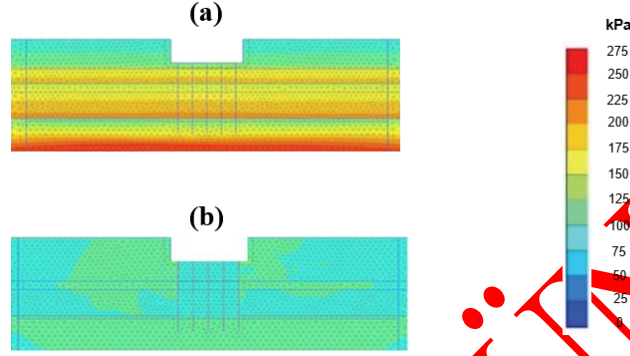
birlikte boşluk suyu basıncında artışın olduğu iyileştirmenin olmadığı durumda 16,50. saniyede basıncın toplam gerilmeye ulaştığı ve sıvılaşmanın meydana geldiği; iyileştirmenin yapıldığı durumda ise basıncın toplam gerilmeye ulaşmadığı, dolayısıyla sıvılaşmanın önüne geçildiği gözlemlenmiştir. Grafikte boşluk suyu basıncının bazı değerlerinde tutarsızlıklar olduğu (8.sn) görülmektedir. Bu tutarsızlıkların ivme ve deplasman değişimleri üzerinde değil de, sadece boşluk suyu basıncında değişime sebep olması modelin henüz bu parametreyi tam temsil edememesinden kaynaklanmaktadır. Boşluk suyu basıncı ölçümündeki model kaynaklı tutarsızlıklar önceki çalışmalarda da vurgulanmıştır [47, 49].



Şekil 10. S3 noktasında oluşan boşluk suyu basınçlarındaki değişim (Change in pore water pressures at the S3)

Demir ve Özener [47] bu malzeme modelinin ancak sıvılaşma başlangıcını ve boşluk suyu basıncı dağılımını iyi yansıttığını belirlemiştir. Bu durumun ve iyileştirmenin etkisinin incelenmesi adına, deprem sonunda oluşan (20.sn) boşluk suyu basınçlarındaki değişim; iyileştirme olmayan ve iyileştirme olan durumlarda (Şekil 11) irdelenmiştir. Şekil 11’de jet-grout ile iyileştirmenin etkisi daha net bir şekilde görülmektedir. Buradan, boşluk suyu basıncının

kolonların olduğu bölgelerde ciddi oranlarda düşüş yaşadığı, bina yakınlarında ve jet-grout grubu tabanında ise daha az düştüğü belirlenmiştir. Dağılımın kolon aralarında veya binadan uzak yerlerde tam doğru yansıtamamış olması, model kapasitesinin boşluk suyu basıncı dağılımında da halen eksikliklerinin bulunduğu göstergesidir. Ancak davranış hakkında genel bir fikir elde edilmesi modelle mümkündür.



Şekil 11. Boşluk suyu basıncı dağılımı: (Distribution of pore water pressure) (a) Binanın aktif olduğu durum (When the building is active) (b) Jet-Grout kolonlarının aktif olduğu durum (When the jet-grout columns are active).

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Adapazarı zemininden seçilen tipik bir kesite ait gerçek saha verileri ile kesitin sıvılaşma potansiyeli belirlenip, Plaxis 2D sayısal analiz programı yardımıyla sıvılaşma durumundaki değişimler tespit edilmiştir. Ek olarak, sıvılaşmaya karşı zemin iyileştirme yöntemlerinden biri olan jet-grout kolonlarının rolü irdelenmiştir. Çalışmada malzemelerin sıvılaşma modelini temsilen literatürce önerilen ve hala eksiklikleri irdelenip tamamlanma aşamasında olan UBCSAND modeli kullanılarak sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlar ivme, deplasman ve boşluk suyu basıncı açısından değerlendirilirken modelin kapasitesi ve jet-grout kolonları ile iyileştirme yönteminin etkisi ayrı ayrı sorgulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, UBCSAND modelin deprem sırasındaki ivme ve deplasmanlar açısından tutarlı sonuçlar elde edilebileceğini; ancak bu durumun boşluk suyu basınçlarında geçerli olamayabileceğini kanıtlar niteliktedir. Genel durum hakkında bir yaklaşım elde edilmesi açısından sonuçlar yorumlandığında ise aşağıdaki yorumlar yapılabilmektedir;

- İvme değerlerindeki büyütme en fazla ince dane oranının yükseldiği siltli kum tabakalarında, azalan sıvılaşma potansiyeli ile daha az sönüm sonucunda oluşmuştur. Rölatif sıklığın ise potansiyeli azaltan bir başka parametre olarak karşımıza çıktığı belirlenmiştir.
- Yatay deplasman değerlerinde, iyileştirmenin etkisiyle azalış yaşandığı, bu durumun sönümlenen boşluk suyu basınçları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.
- Boşluk suyu basınçları irdelendiğinde, jet-grout iyileştirmesi ile oluşan artık basınçların hızlıca

sönümlendiği, sıvılaşma potansiyelinin azaldığı görülmüştür. Ancak boşluk suyu basıncı dağılımında modelin bazı bölgelerdeki dağılımı temsil etmede eksiklikleri olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle gerçek saha verileri ve kesitleri ile daha gelişmiş sıvılaşma modellerinin kullanımına ve modellerin iyileştirilmesi adına daha fazla çalışmanın yürütülmesine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

- İvme değerlerindeki büyütme en fazla ince dane oranının yükseldiği siltli kum tabakalarında, azalan sıvılaşma potansiyeli ile daha az sönüm sonucunda oluşmuştur. Rölatif sıklığın ise potansiyeli azaltan bir başka parametre olarak karşımıza çıktığı belirlenmiştir.
- Yatay deplasman değerlerinde, iyileştirmenin etkisiyle azalış yaşandığı, bu durumun sönümlenen boşluk suyu basınçları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.
- Boşluk suyu basınçları irdelendiğinde, jet-grout iyileştirmesi ile oluşan artık basınçların hızlıca sönümlendiği, sıvılaşma potansiyelinin azaldığı görülmüştür. Ancak boşluk suyu basıncı dağılımında modelin bazı bölgelerdeki dağılımı temsil etmede eksiklikleri olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle gerçek saha verileri ve kesitleri ile daha gelişmiş sıvılaşma modellerinin kullanımına ve modellerin iyileştirilmesi adına daha fazla çalışmanın yürütülmesine ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Selen DAVRAN: Analizleri yapmış, sonuçlarını değerlendirmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Aşkın ÖZÖCAK: İlk yazarın tez danışmanı olarak çalışmanın yürütücülüğünü yapmış, verileri değerlendirmiş, makalenin bölümlerini oluşturmuştur.

Sedat SERT: Sayısal çözümler konusunda destek vermiş, makalenin şekillenmesine katkıda bulunmuştur.

Ertan BOL: Sıvılaşma analizlerinin gerçekleştirilmesinde katkıda bulunmuş, sonuçları kontrol etmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kara D., Bozdoğan K. B. ve Keskin E., "Çerçeve sistemlerin yapı zemin etkileşimli serbest titreşim analizi", *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1347-1355, (2020).
- [2] Yiğit, A., "Newmark Yöntemine Göre Zemin Deplasmanının Tahmin Edilmesi", *Politeknik Dergisi*, 24(3): 943-952, (2021).
- [3] Sarımurat S., Taşan H. E., Işık N.S. ve Frat S., "Taş kolon performanslarının hipoplastik model ile analizi", *Politeknik Dergisi*, 24(3): 997-1007, (2021).
- [4] Huang Y. and Wen Z., "Recent Developments of Soil Improvement Methods for Seismic Liquefaction Mitigation", *Natural Hazards*, 76(3): 1927-1938, (2015).
- [5] Youd T.L., "Liquefaction, Flow, and Associated Ground Failure", *US Geological Survey Circular*, 688: 1 - 12, (1973).
- [6] Ishihara K., "Liquefaction and Flow Failure During Earthquakes", *Geotechnique*, 43(3): 351 - 451, (1993).
- [7] Kramer S.L., "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Upper Saddle River, (1996).
- [8] Popescu R. and Prevost J.H., "Centrifuge Validation of a Numerical Model for Dynamic Soil Liquefaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12(2): 73 - 90, (1993).
- [9] Cetin K.O., Seed R.B., Moss R.E.S. et al., "Field Case Histories for SPT-Based In Situ Liquefaction Potential Evaluation, Geotechnical Engineering Research", Report No. UCB/GT-2000/09, Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, *University of California, Berkeley*, (2000).
- [10] Kramer S.L. and Elgamal A.W., "Modeling Soil Liquefaction Hazards for Performance Based Earthquake Engineering", *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, Berkeley, California, (2001).
- [11] Byrne P.M., Park S.S., Beaty M., Sharp M., Gonzalez L. and Abdoun T. "Numerical Modeling of Liquefaction and Comparison with Centrifuge Tests", *Canadian Geotechnical Journal*, 41(2): 193 - 211, (2004).
- [12] Andrianopoulos K.I., Papadimitriou A.G., and Bouckovalas G.D., "Bounding Surface Plasticity Model for the Seismic Liquefaction Analysis of Geotechnical Structures", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10): 895 - 911, (2010).
- [13] Beaty M.H. and Perlea V.G., "Effect of Ground Motion Characteristics on Liquefaction Modeling of Dams", Geo congress, State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, USA, 2108 - 2117, (2012).
- [14] Ramirez J., Barrero A.R., Chen L., Dashti S., Ghofrani A., Taiebat M. and Arduino P., "Site Response in a Layered Liquefiable Deposit: Evaluation of Different Numerical Tools and Methodologies with Centrifuge Experimental Results", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(10): 1943 - 1947, (2018).
- [15] Puebla H., Byrne P.M. and Phillips R., "Analysis of CANLEX Liquefaction Embankments: Prototype and Centrifuge Models", *Canadian Geotechnical Journal*, 34(5): 641 - 657, (1997).
- [16] Beaty M. and Byrne P.M., "An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand", Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics III, Edited by P. Dakoulas, M. Yegian, and R. Holtz. American Society of Civil Engineers, *Geotechnical Special Publication*, 75(1): 766-777, (1998).
- [17] Ziotopoulou K., Boulanger R.W. and Kramer S.L., "Site response analysis of liquefying sites", GeoCongress, ASCE, 1799 - 1808, (2012).
- [18] Ecemis N., "Simulation of seismic liquefaction: 1-g model testing system and shaking table tests", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(10): 899 - 919, (2013).
- [19] Petalas A. and Galavi V., "Plaxis Liquefaction Model UBC3D-PLM", Online, (2013). Available in: <http://kb.plaxis.nl/search/site/UBC3D-PLM>.
- [20] Sriskandakumar S., "Cyclic Loading Response of Fraser Sand for Validation of Numerical Models Simulating Centrifuge Tests", *Master thesis*, The University of British Columbia, Department of Civil Engineering, (2004).
- [21] Ozenc S., "PM4SAND Zemin Bünye Modeline ait Parametrelerin Yüzeysel Temellerde Sıvılaşma Kaynaklı Deformasyonlara Etkisi", *Master Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, (2019).
- [22] Önalp A., Sert S. ve Bol E., "Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı", *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, İstanbul*, 373 - 382, (2000).
- [23] Erken A., "The Role of Geotechnical Factors on Observed Damage in Adapazarı", *XVth International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*, İstanbul, 15 - 22, (2001).
- [24] TS1900/2006, "İnşaat mühendisliğinde zemin laboratuvar deneyleri - Bölüm 1: Fiziksel özelliklerin tayini", (2006).
- [25] TS1500/2000, "İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması", (2000).

- [26] Sert S., "Aluviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi", *Doktora tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- [27] Bol E. ve Önalp A., "Adapazari Zeminlerinin Jeomorfolojik ve Geoteknik Özellikleri", *ZMTM 9. Ulusal Kongresi, Eskişehir*, 1 - 8, (2002).
- [28] Sancio R.B., Bray J.D., Stewart J.P., Youd T.L., Durgunoğlu H.T., Önalp A., Seed R.B., Christensen C., Baturay M.B. and Karadayılar T., "Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9-12): 1093 - 1102, (2002).
- [29] Seed R.B., Cetin K.O., Moss R.E., Kammerer A.M., Wu J., Pestana J.M., Riemer M., Sancio R., J. Bray, R. Kayen and A. Faris, "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework", *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar*, California, (2003).
- [30] Bol E., Önalp A., Arel E., Sert S. and Özocak A., "Liquefaction of silts: the Adapazari criteria", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(4): 859 - 873 (2010).
- [31] Seed H.B. and Idriss I.M., "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", *Journal of Soil Mechanics*, 97(9): 1249 - 1273, (1971).
- [32] Iwasaki T., Arawaka T. and Tokida K.I., "Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes", *Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1): 49 - 58, (1984).
- [33] Liao S.S and Whitman R.V., "Overburden correction factors for SPT in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3): 373 - 377, (1986).
- [34] Robertson P. and Wride C.E., "Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT", NCEER Work-shop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. Report NCEER-97-0022, *National Center for Earthquake Engineering Research*, SUNY Buffalo, NY, (1997).
- [35] TBDY 2018, "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği: Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar", (2018).
- [36] Juang C.H., Yuan H., Lee D.H. and Lin F.S., "A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 129(1), 66 - 80, (2003).
- [37] Galavi V., Petalas A. and Brinkgreve R.B.J., "Finite Element Modelling of Seismic Liquefaction in Soils", *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 44(3): 55 - 64, (2013).
- [38] Tsegaye A.B., "Plaxis Liquefaction Model", Delft, The Netherlands, (2010).
- [39] Schweiger H.F., "The Role of Advanced Constitutive Models in Geotechnical Engineering", *Journal of Geomechanics and Tunneling*, 1(5): 336 - 344, (2008).
- [40] Beaty M.H. and Byrne P.M., "UBCSAND Constitutive Model Version 904aR", *Documentation Report: UBCSAND Constitutive Model on Itasca UDM Web Site*, (2011).
- [41] E. Naesgaard, "A hybrid effective stress-total stress procedure for analysing soil embankments subjected to potential liquefaction and flow", *Doctorate thesis*, University of British Columbia, (2011).
- [42] Marka A., "Evaluation of the UBC3D-PLM Constitutive Model For Prediction of Earthquake Induced Liquefaction On Embankment Dams", Master Thesis, TU Delft CITG, (2013).
- [43] Meyerhof G., "Discussion on research on determining the density of sands by spoon penetration testing", *4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, London, (1957).
- [44] Cubrinovski M. and Ishihara K., "Correlation between penetration resistance and relative density of sandy soils", *15. ICSMGE*, İstanbul, Türkiye (2001).
- [45] PLAXIS 2D CONNECT Edition V21, "PLAXIS 2D CONNECT Edition V21 Tutorial 16 Free Vibration and Earthquake Analysis of a Building", (2021).
- [46] Kuhlemeyer R.L., and Lysmer J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, 99(5): 421 - 427, (1973).
- [47] Demir S. ve Özener, P., "Sıvılaşmanın UBC3D-PLM Model ile Tahmin Edilmesi: Santrifüj Deneyi Örneği", *Teknik Dergi*, 30: 9421-9442, (2019).
- [48] Sünbül A.B. ve Parlak S., "Sonlu elemanlara dayalı sayısal analiz: temel altı zemin iyileştirme örneği", *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, ISBS, Ankara, Turkey: 253 - 257, (2015).
- [49] Dülger M., "UBCSAND model ile sıvılaşma davranışının incelenmesi", *Master tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).