



A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation

Gizem Sahin ¹, Onur Toygar ² and Mehmet Rifat Kahyaoglu ²

¹ Mugla Sitki Kocman University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Mugla, Türkiye

² Mugla Sitki Kocman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Mugla, Türkiye

ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

Keywords

Jet grout column, Liquefaction, Finite Element Method, UBCSAND Constitutive Model

Highlights

- * Parametric analyses by employing properties of a site with a liquefaction risk
- * Examining liquefaction behavior of the soil by using the UBCSAND constitutive model
- * Parametric study on the efficiency of jet grout columns on the mitigation of liquefaction

Aim

The study aims to reveal the efficiency of jet grout columns in the mitigation of liquefaction

Location

Kocaeli, Türkiye

Methods

A series of finite element analyses were performed in MIDAS GTS NX software by using jet grout columns having different area and strength ratios in time domain

Results

Shear stress in soil notably decreases as the area ratio increases. Increasing the rigidity of the columns lowers the shear stress till a level, then, more rigidity does not provide an appreciable contribution

Supporting Institutions

The authors declared that they used seismic data about the study area from AFAD. The local site properties were provided by civil engineer Turgay Erdoğan

Financial Disclosure

The author declares that this study has received no financial support

Peer-review

Externally peer-reviewed

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Manuscript

Research Article

Received: 02.09.2022

Revised: 17.10.2022

Accepted: 22.10.2022

Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International Non-Commercial License

Corresponding Author

Mehmet Rifat Kahyaoglu

Email: rkahyaoglu@mu.edu.tr

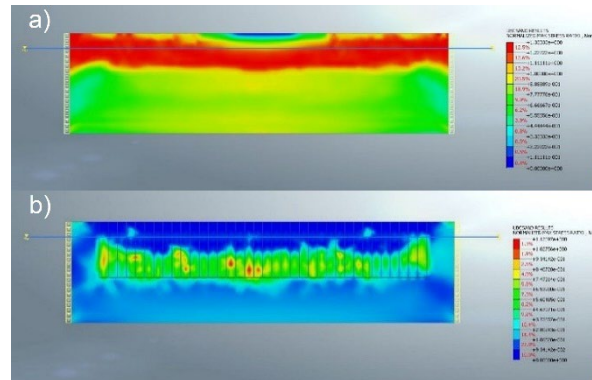


Figure
UBCSAND stress ratio at the end of dynamic analysis; a) free field, b) with jet grout columns

How to cite:

Sahin G., Toygar O., Kahyaoglu T., 2022. A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation, Turk Deprem Arastirma Dergisi 4(2), 210-229, <https://doi.org/10.46464/tdad.1170304>



Sıvılaşma Riskinin Azaltılması için Kullanılan Jet Grout Kolonlarının Verimliliği Üzerine Bir Sayısal Çalışma

Gizem Şahin¹, Onur Toygar² ve Mehmet Rifat Kahyaoglu²

¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mentese 48000 Muğla, Türkiye

² Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mentese 48000 Muğla, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

ÖZET

Kocaeli İli'ndeki bir trafo montaj-demontaj binasının bulunduğu arazide kapsamlı bir zemin etüdü yapılmış ve bu alanda sıvılaşma riskinin olduğu görülmüştür. Sıvılaşma riskini ortadan kaldırmak amacıyla jet grout kolonlar zemin iyileştirme yöntemi olarak seçilmiştir. Tasarımı yapılan jet grout kolonların imalatından sonra sıvılaşma riskinin ortadan kalkıp kalkmadığı, gerçekleştirilen analitik ve sayısal analizler ile incelenmiştir. Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, efektif gerilme tabanlı sonlu elemanlar analizleri yapabilen MIDAS GTS NX programı ile UBCSAND bünye modeli kullanılarak, aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu üzerinden değerlendirilmiştir. Ayrıca, jet grout kolonların sıvılaşabilir zemin tabakasındaki kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı dağılımları üzerindeki etkisi, jet grout kolonların farklı alan ve dayanım oranları için gerçekleştirilen parametrik analizlerle ortaya konmuştur.

Anahtar kelimeler

Jet Grout Kolon, Sıvılaşma, Sonlu Elemanlar Yöntemi, UBCSAND Bünye Modeli

Öne Çıkanlar

- * Sıvılaşma riski olan bir sahanın özellikleri kullanılarak parametrik analizler yapılması.
- * UBCSAND bünye modeli kullanarak zemin davranışının incelenmesi.
- * Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliğinin parametrik olarak incelenmesi.

Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 02.09.2022
Düzeltilme: 17.10.2022
Kabul: 22.10.2022
Basım: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304

Sorumlu yazar

Mehmet Rifat Kahyaoglu
Eposta:
rkahyaoglu@mu.edu.tr

A Numerical Study on the Efficiency of Jet Grout Columns in Liquefaction Mitigation

Gizem Sahin¹, Onur Toygar² and Mehmet Rifat Kahyaoglu²

¹ Muğla Sıtkı Kocman University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Muğla, Türkiye

² Muğla Sıtkı Kocman University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Mentese 48000 Muğla, Türkiye
ORCID: 0000-0002-1199-8107, 0000-0003-2366-3993, 0000-0002-9288-5277

ABSTRACT

A comprehensive site investigation was carried out on the site in Kocaeli, where a transformer assembly-disassembly building was located, and it was observed that there was liquefaction risk in the area. Therefore, jet grout columns were selected as the soil improvement method. After the production of the designed jet grout columns, it was investigated whether the liquefaction risk was eliminated through analytical and numerical analyses. The effectiveness of jet grout columns in preventing liquefaction was evaluated in terms of the generation of excess pore water pressure by using UBCSAND constitutive model on MIDAS GTS NX software which can perform effective stress-based finite element analyses. In addition, the effect of jet grout columns on the variation of shear stresses, shear deformations and excessive pore water pressure ratios in liquefiable soils were examined through the parametric analyses performed for different area and strength ratios of jet grout columns.

Keywords

Jet Grout Column, Liquefaction, Finite Element Method, UBCSAND Constitutive Model

Highlights

- * Parametric analyses by employing properties of a site with a liquefaction risk.
- * Examining liquefaction behavior of the soil by using the UBCSAND constitutive model.
- * Parametric study on the efficiency of jet grout columns on the mitigation of liquefaction.

Manuscript

Research Article

Received: 02.09.2022
Revised: 17.10.2022
Accepted: 22.10.2022
Printed: 30.12.2022

DOI

10.46464/tdad.1170304

Corresponding Author

Mehmet Rifat Kahyaoglu
Email:
rkahyaoglu@mu.edu.tr

1. GİRİŞ

Sıvılaşma terimi ilk olarak Mogami ve Kubo (1953) tarafından; suya doymuş, kohezyonsuz zeminlerin tekrarlı yükler altında deformasyonuna neden olan bir olay olarak tanımlanmıştır. Drenajsız durumda, hızlı yüklemeler nedeniyle aşırı boşluk suyu basıncı oluşmakta, bununla beraber zemindeki efektif gerilme azalmaktadır. Deprem gibi tekrarlı yüklemeler esnasında bu tip zeminlerde efektif gerilme 0'a kadar azalmakta ve zemin taşıma gücünü kaybedebilmektedir. Tarihte ilk olarak 1906 San Fransisco depremi sonucunda sıvılaşma ve buna bağlı yapısal hasarlar gözlenmiştir (Youd ve Hoose 1976). Ancak o dönemde sıvılaşma terimi bilinmediği için ilk olarak Alaska (1964) ve Nigata (1964) depremlerinden sonra konu ile ilgili çalışmalar başlamış ve günümüzde bile hala incelenmektedir. Bu iki büyük depremden sonra Loma Prieta (1989), Northridge (1994), Kobe (1995) ve Kocaeli (1999) depremlerinde sıvılaşma gözlenmiştir (Tonaroglu 2006). 1995 Kobe depreminde, o dönem dünyanın en büyük 6'ncı konteyner limanı olan Kobe limanı sıvılaşma nedeniyle ağır hasar görmüş ve iki yıl süreyle kapalı kalmıştır. Limanın uğradığı toplam zarar 10 milyar ABD doları iken depremin yarattığı zararın yaklaşık 100 milyar ABD doları olduğu ve 6000'den fazla insanın ölümüne yol açtığı rapor edilmiştir (Chang 2000). Ülkemizde ise 1999 Kocaeli depreminde sıvılaşma olayı gözlenmiş, Gölçük sahil kesimindeki dolgu alanının denize doğru kayması nedeniyle çok sayıda can kaybı yaşanmıştır (Tonaroglu 2006). Sıvılaşma, önemli bir zemin problemi olup bu riskin belirlenmesine ve önlenmesine yönelik çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır. Kocaeli, dünyanın en aktif faylarından birisi olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın (Askan ve Karimzadeh 2019) yakınında yer alması nedeniyle bu gibi tehlikelere açık durumdadır.

Seed ve Idriss (1971), zeminlerin sıvılaşma direncini değerlendiren basitleştirilmiş bir yöntem önermiştir. Bu yöntem, Youd ve Idriss (2001) tarafından geliştirilmiş, saha deneylerinin yanı sıra laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin kullanıldığı ampirik denklemler önerilmiştir. Vaka analizlerine dayanan bu yöntemde, depremin neden olduğu sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (GK) kabaca, çevrimsel direncin (CRR) çevrimsel kayma gerilmesine (CSR) oranı olarak tanımlanmış, güvenlik katsayısının 1'den küçük olması durumunda sıvılaşma riskinin varlığı kabul edilmiştir.

Sıvılaşma tehlikesinin olduğu durumlarda olası problemlerin önüne geçebilmek için bu riskin bertaraf edilmesi gerekir. Selçukhan ve Ekinci (2021) çeşitli zemin iyileştirme yöntemlerini detaylıca incelemiş ve dinamik kompaksiyon, derin karıştırma, taş kolon ve jet grout kolon imalatı gibi yöntemlerin sıvılaşmayı önleme amacıyla kullanılabilceğini belirtmiştir. Bu yöntemler içerisinde yüksek modüllü kolonlar olarak da bilinen jet grout kolonlar; sıvılaşma riskini azaltmak, zeminin taşıma kapasitesi arttırmak ve oturma miktarını azaltmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Moseley ve Kirsh (2004), jet grout enjeksiyonunu, zeminin çimento ile hem karıştırılmasını hem de kısmi yer değiştirmesini içeren çok amaçlı bir zemin ıslah yöntemi olarak tanımlamıştır. Sıvılaşmayı önleme açısından jet enjeksiyonunun etkinliği, vaka analizlerine dayalı çok sayıda araştırma ile incelenmiştir (Hausler ve Sitar 2001, Martin ve diğ. 2004, Mısır 2020). Ayrıca Adalier ve diğ. (2003) gerçekleştirdikleri santrifüj deneyleri ile taş kolonların plastik olmayan siltli kumlarda sıvılaşmayı önlediğini belirlemiştir. Bu çalışmalara ek olarak, jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki katkısı bazı sayısal analizlerle de doğrulanmıştır. Yapılan sayısal analizlerde toplam gerilme yaklaşımının (Olgun ve Martin 2008, Unutmaz 2012) yanı sıra boşluk suyu basıncını hesaba katan çalışmalar (Beaty ve Byrne 1998, Almani ve diğ. 2013, Galavi ve diğ. 2013) da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, jet grout kolonların sıvılaşmayı önleme konusundaki etkinliğinin jet grout ile zemin kayma dayanımı farkına bağlı olarak artacağı belirlenmiştir.

Zeminde meydana gelebilecek rijitlik ve mukavemet kaybı ile olası oturmaları belirlemek için boşluk suyu basıncı değişiminin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Ayrıca kumlu zeminlerde meydana gelen büyük yer değiştirmelerin hesaplanmasında mekanik temelli bir yaklaşıma ek olarak sorunun fiziksel yönü de dikkate alınmalıdır. Bu sebeple, zeminde gerilme deformasyon analizi için kullanılan tüm yöntemlerde, malzeme davranışını modelleyebilmek için gerilme-şekil değiştirme ilişkilerine ya da diğer bir deyişle bünye modellerine ihtiyaç vardır. Bir geoteknik uygulama için gerçekçi bir modelin seçimi; zeminin mekanik özelliklerine, zeminin geçmişine ve gelecekte meydana gelecek gerilme değişikliklerine bağlıdır (Wood 1990). Sıvılaşma, dinamik yükler altında oluşan bir zemin problemidir. Dinamik yükleri histeretik bir biçimde sönmüleyen zemin davranışını en uygun şekilde modelleyebilmek için visko-elastik teorilere dayanan bünye modelleri kullanmak gereklidir (Özener 2007).

Sıvılaşmayı sayısal olarak modellemek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Beaty ve Byrne (2000), sıvılaşmanın tetiklenme durumunu ve sonrasında oluşan deformasyonları tahmin etmek için toplam gerilme yaklaşımına dayalı bir model olan UBCTOT bünye modelini geliştirmişlerdir. Ayrıca, TARA-3FL yazılımı (Finn ve diğ. 1986) ve Roth bünye modeli (Dawson ve diğ. 2001) kısmi birleşik efektif gerilme temelli modellerdendir. Bu modeller, doğrudan boşluk suyu basıncının değişimine bağlı olarak hacimsel şekil değiştirmeyi hesaplayamayan daha basit bünye modelleridir. Her bir yük artış basamağında, zeminin davranışına göre boşluk suyu basıncının artışını ve hacimsel değişimi hesaba katan modellere tamamen birleşik efektif gerilme temelli modeller denilebilir (Oral 2014). Bu kompleks bünye modellerine Wang modeli (Wang 1990), NTUA-SAND modeli (Papadimitriou ve diğ. 2001) ve UBCSAND modeli (Puebla ve diğ. 1997, Byrne ve diğ. 2004, Beaty ve Byrne 2011) örnek olarak gösterilebilir. Zemin ve yükleme koşullarına göre en uygun bünye modelinin seçilmesi, güvenilir sonuçlar elde etmek için çok önemlidir.

UBCSAND, kum ve sıvılaşma riski taşıyan benzer zeminlerin, tekrarlı yükler altındaki davranışını doğrusal olmayan yöntem kullanarak inceleyen bir modeldir. Efektif gerilmeye dayalı bu yöntem, birim şekil değiştirmeleri, herhangi bir yükleme anında hesaplayabilen elasto-plastik bir yaklaşımdır. Elastik sınırlar içerisindeki deformasyonlar, kayma ve hacim modülü kullanılarak, akma durumundan sonraki deformasyonlar ise efektif gerilme değişim oranına bağlı olan bir akma kuralına göre hesaplanmaktadır. Kum ve benzeri sıvılaşabilir zeminlerde geçerli olması, tekrarlı yüklemelerde herhangi bir adımdaki deformasyonu hesaplayabilmesi ve efektif gerilme temelli bir model olması nedeniyle UBCSAND, sıvılaşma problemlerinin sayısallaştırılmasında kullanılabilecek bünye modellerinden biridir.

Bu çalışmada jet grout kolonlarının sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği bir dizi sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Jet grout kolon imalatı, her ne kadar sıvılaşmanın ıslahında sıklıkla kullanılsa da sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği yeterince detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Saha çalışmalarının zorluğu, pahalı olması, çok sayıda parametrik analizleri içeren deneylerin yapılamaması ve vaka analizlerinin sınırlı sayıda olması nedeniyle çoğunlukla sayısal yöntemler tercih edilmektedir. Bu nedenle, Kocaeli İlinde, sıvılaşma riskinin olduğu bilinen siltli kumlu bir zemin, MIDAS GTS NX yazılımındaki UBCSAND bünye modeli kullanılarak modellenmiştir. Mevcut sahanın sıvılaşma riski, analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analizleri ile ortaya konmuş, jet grout kolonlarının imalatından sonra problemin ortadan kalkıp kalmadığı yine bu yöntemlerle belirlenmiştir. Ayrıca bu sonlu elemanlar modeli kullanılarak; farklı kolon dayanım oranları ve alan oranları dikkate alınarak, deprem sırasında sıvılaşan zeminde oluşan kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı oranları değişimleri incelenmiş, sonuçlar değerlendirilerek yorumlanmıştır.

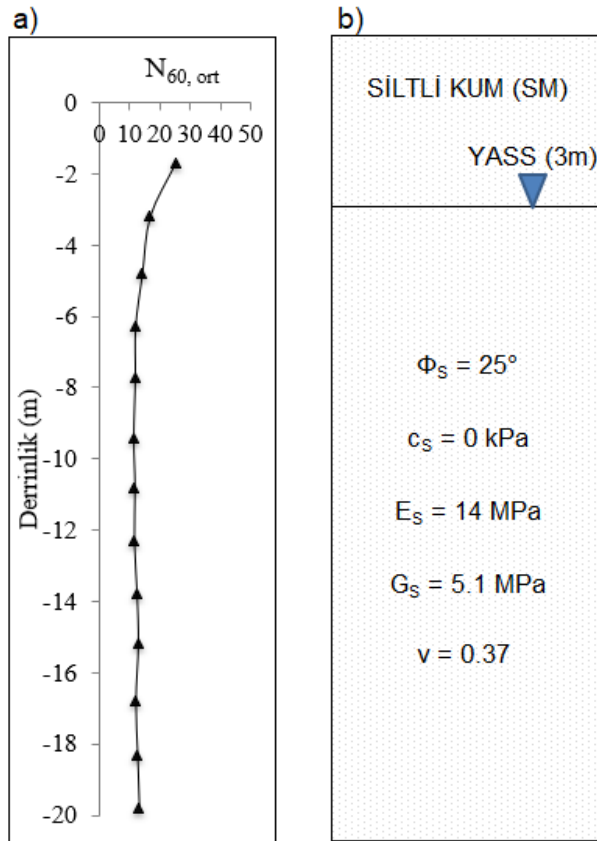
2. GEOTEKNİK DEĞERLENDİRME

2.1) Test Sahası ve Zemin Özellikleri

Çalışma alanı, Kocaeli İli'nde, üzerine bir trafo montaj-demontaj binasının yapılması planlanan 1119.73 m² alana sahip olan arazidir. İnşa edilecek olan üst yapının zemine 150 kPa gerilme aktaracağı hesaplanmıştır.

Arazide 4 adet sondaj kuyusu açılmış, derinlik boyunca her 1.5 m'de bir Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) yapılmıştır. Alüvyon formasyonunun hâkim olduğu bu arazide yer yer kil bantları görülmüş, ancak zeminin genellikle değişiklik göstermeyen derin siltli kum olduğu belirlenmiştir. Her birinin derinliği 20 m olan 4 adet sondaj kuyusu boyunca SPT N₆₀ değerleri elde edilmiş, ortalama N_{60,ort} değerlerinin (N_{60,ort}) derinlikle değişimi Şekil 1a'da sunulmuştur.

Çeşitli derinliklerde örselenmiş numuneler alınarak, zemin sınıflandırma deneyleri yapılmıştır. Elek analizi sonucunda zeminin dane boyu dağılımının %10 çakıl, %58 kum ve %32 silt ve kilden oluştuğu, USCS'e (Unified Soil Classification System) göre plastik olmayan siltli kum olduğu (SM) tespit edilmiştir. Yeraltı su seviyesi (YASS) 3 m derinlikte gözlenmiştir.



Şekil 1: Zemin özellikleri; a) SPT N_{60,ort} değerlerinin derinlikle değişimi, b) İdealize zemin profili
Figure 1: Properties of the soil; a) Variation of SPT N_{60,ort} with the depth, b) Idealized soil profile

Şekil 1a'da gösterilen N_{60,ort} değerlerinin derinlik boyunca çok değişmediği görülerek zemin tek tabakalı olarak modellenmiş, 20 m'lik zemin profili için ortalama SPT N₆₀ değeri 13 olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılacak olan zeminin elastisite modülü (E_s), içsel sürtünme açısı (Φ_s) gibi parametreler, SPT sonuçlarına bağlı olarak önerilen aşağıdaki korelasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır (Bowles 1997):

$$\Phi_s = 0.45 * (N_{70}) + 20^\circ \quad (1)$$

$$E_s = 500 * (N_{60} + 15) \quad (2)$$

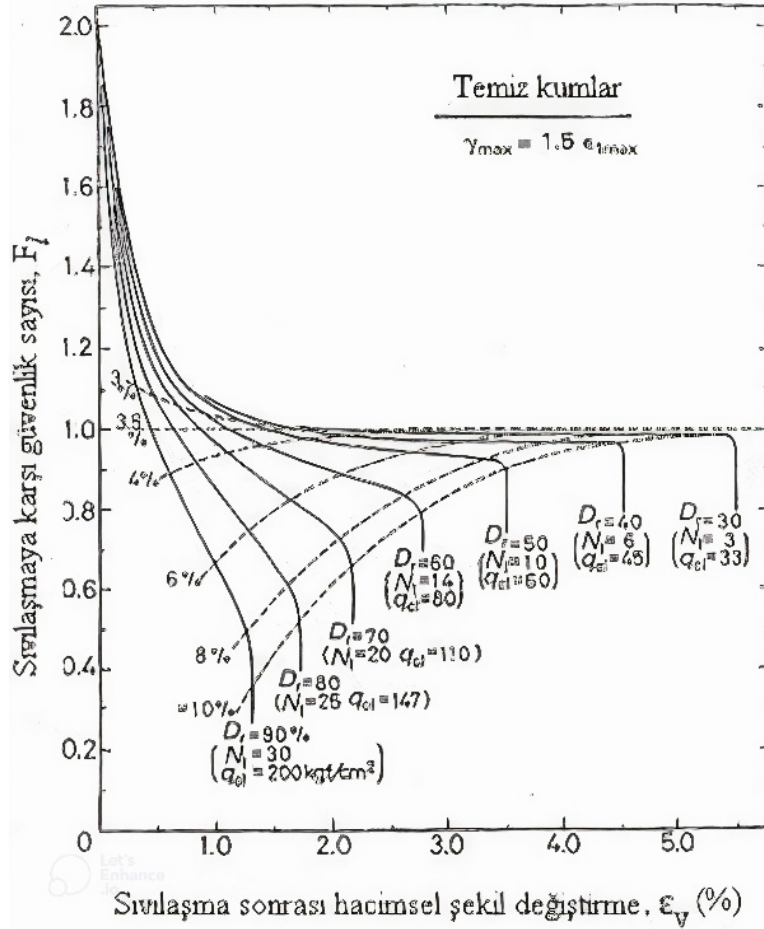
Denklem (1) ve (2)'de belirtilen korelatif ilişkiler, normal konsolide kumlar için önerilen genel yaklaşımlardır. %60 enerji düzeyine göre hesaplanan N_{60} değeri, N_{70} değerine çevrilmiş ve içsel sürtünme açısı 25° olarak elde edilmiştir. Zeminin elastisite modülü de 14 MPa olarak hesaplanmıştır. Suyu doymuş bu kum zemin için Poisson oranı (ν) 0.37 olarak kabul edilmiştir (Bowles 1997). Elastisite modülü ve Poisson oranı kullanılarak bu zemin için kayma modülü (G_s) 5100 kPa olarak hesaplanmış, idealize zemin profili ve özellikleri Şekil 1b'de gösterilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne (TBDY 2018) göre bu zemin, $N_{60}=13$ (<15) olduğu için ZE yerel zemin grubunda olduğu halde sıvılaşma riski bulundurduğu için ZF olarak sınıflandırılmıştır.

2.2) Sıvılaşma Analizi

Bölgede meydana gelmiş depremler incelendiğinde; aletsel dönem öncesinde 16 yıkıcı depremin yaşandığı (Scawthorn ve Johnson 2000), 1900'den günümüze ise büyüklüğü 4'ten fazla olan 110 depremin (AFAD 2021) meydana geldiği görülmüştür. Özellikle 17 Ağustos 1999'de Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda meydana gelen ve moment büyüklüğü (M_w) 7.4 olan deprem, bölgede büyük yapısal hasara ve can kaybına yol açmıştır. Şehir merkezini çevreleyen alandaki yapısal hasarların, zemindeki sıvılaşma nedeniyle olduğu rapor edilmiştir (Yoshida ve diğ. 2001). Bu alandaki sismisitenin yüksek olması, yeraltı suyunun yüzeye yakın olması, zeminin siltli kum olması gibi etmenler göz önünde bulundurulduğunda sahanın sıvılaşma riski yönünden detaylı bir şekilde değerlendirilmesi ihtiyacı doğmuştur.

Sıvılaşma riski, TBDY (2018) Bölüm 16B.3'e göre değerlendirilmiştir. Bu yönetmelikte deprem tehlikesi, inceleme alanının coğrafi koordinatlarına göre spektral ivmeler cinsinden tanımlanmıştır (Sucuoglu 2019). Spektral büyüklüklerin 50 yılda aşılma olasılığının %10 (475 yıllık tekrarlanma periyodu) olduğu deprem yer hareketi düzeyine (DD-2, standart tasarım yer hareketi) göre en büyük yer ivmesi (PGA) 0.546 g olarak tespit edilmiştir (AFAD 2018). Buna göre zemin profili boyunca sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (GK) belirlenmiştir. Sonuç olarak, yeraltı su tablasının altında kalan bölgede (3-11 m) sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı 1.1'den küçük olduğu belirlenmiş, bu bölgede ortalama güvenlik katsayısı 0.745 olarak hesaplanmıştır. Bu nedenle zeminin ilk 11 m'lik tabakasında sıvılaşmaya karşı bir önlem alınması gerekmektedir.

Ishihara ve Yoshimine (1992), sıvılaşma nedeniyle oluşan oturmaları hesaplamak için suya doymuş kum zemin kullanarak çok sayıda basit kesme kutusu deneyi yapmıştır. Her bir deneyde, sıvılaşma riski, zeminin yoğunluğu ve hacimsel şekil değiştirme gibi parametrelerin arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Sonuç olarak Şekil 2'de sunulan çizelgenin, sıvılaşma kaynaklı oturmaları makul bir doğrulukla tahmin edebildiğini ve bunun mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmiştir. Bu çizelgede belirtilen SPT N darbe sayısı, %90 enerji düzeyindeki N_{90} değerini ifade etmektedir. Mevcut çalışmada, sıvılaşan bölgedeki güvenlik katsayısının ortalama 0.745 ve $N_{90}=8$ olduğu ve buna göre zeminde yaklaşık 60 cm sıvılaşma kaynaklı oturma meydana gelebileceği hesaplanmıştır. Zemin özellikleri ve olası sıvılaşma kaynaklı oturma miktarı dikkate alındığında, bu tehlikeleri önlemek için jet grout kolonlar kullanılarak zemin iyileştirilme projesi yapılmıştır.



Şekil 2: Sıvılaşma sonrası hacimsel şekil değiştirme oranı (Ishihara ve Yoshimine 1992)
 Figure 2: Post-liquefaction volumetric strain (Ishihara and Yoshimine 1992)

2.3) Jet Grout Kolonlar ile Zemin İyileştirme Projesi

Jet grout kolonlu zemin iyileştirme yönteminde, zemine yüksek basınçla su-çimento karışımı enjekte edilir ve enjeksiyon sıvısının zeminle karışarak yaklaşık dairesel kesitli iyileştirilmiş kısımların oluşturulması amaçlanır. Enjeksiyon, yüksek basınçlı pompalar ve özel tijler kullanılarak yapılmaktadır. Enjeksiyon tijleri önce jet grout kolon alt kotuna hidrolik basınç uygulanarak indirilmektedir. Daha sonra yüksek basınç altında enjeksiyona başlanmakta, tijler bir yandan belirli bir hızda döndürülmekte diğer yandan öngörülen bir hızda zemin yüzeyine doğru çekilerek jet grout kolonlar oluşturulmaktadır.

Tasarımı yapılan jet grout kolonların projesine göre hedeflenen serbest basınç dayanımı (q_c) 1500 kPa'dır. Bruce ve Bruce (2003), jet grout kolonların çekme dayanımlarının (q_t), basınç dayanımının yaklaşık %8-14'ü arasında değiştiğini rapor etmiştir. Mevcut çalışmada bu oran %14 olarak kabul edilmiş ve jet grout kolonların çekme dayanımları 210 kPa olarak hesaplanmıştır.

Jet grout kolonların imalatından sonra elde edilen jet grout kolon-zemin ikilisi, iyileştirilmiş zemin olarak ifade edilmiştir. İyileştirilmiş zeminin kayma mukavemeti parametreleri (c_{ort} ve ϕ_{ort}) ile elastisite modülü (E_{ort}), jet grout kolon ve doğal zeminin planda kapladığı alana göre ilgili parametrelerin ağırlıklı ortalaması alınarak hesaplanabilmektedir. Bu nedenle öncelikle jet grout kolonların mukavemet parametreleri aşağıdaki ilişkiler kullanılarak belirlenmiştir (Nishimatsu 1972):

$$c_{jg} = \frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{2[\sigma_t(\sigma_c - 3\sigma_t)]^{0.5}} \quad (3)$$

$$\tan\Phi_{jg} = \frac{\sigma_c^2 - 4c^2}{4\sigma_c \cdot c} \quad (4)$$

Denklem (3) ve (4) kullanılarak jet groutların kohezyonu (c_{jg}) ve içsel sürtünme açısı (Φ_{jg}) sırasıyla 368 kPa ve 37.7° olarak hesaplanmıştır. Xanthakos ve diğ. (1994), jet grout kolonların elastisite modülünün (E_{jg}), basınç dayanımlarının 362 ile 913 katı arasında değiştiğini belirtmiştir. Mevcut çalışmada bu oran alt sınır olarak kabul edilmiş ve 540 MPa olarak hesaplanmıştır. Poisson oranı da yaklaşık 0.5 olarak kabul edilmiş (Özsoy ve Durgunoğlu 2003), buna bağlı olarak jet grout kolonların kayma modülü (G_{jg}) 197 MPa olarak hesaplanmıştır.

Jet grout uygulaması yapıldıktan sonra beklenen iyileştirilmiş zemin parametreleri, belirtilmiş olduğu üzere ilgili parametrenin jet grout kolon ve doğal zemindeki değerlerinin ağırlık ortalaması olacak şekilde hesaplanmıştır. Buna göre; iyileştirilmiş zeminin kohezyonu (c_{ort}) 32.2 kPa, içsel sürtünme açısı (Φ_{ort}) 26.1° , elastisite modülü (E_{ort}) 59.9 MPa ve kayma modülü de (G_{ort}) 21.9 MPa olarak elde edilmiştir. Jet grout kolonların, doğal zeminin ve iyileştirilmiş zeminin özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1: Jet grout kolonların, zeminin ve iyileştirilmiş zeminin özellikleri
Table 1: Characteristics of jet grout columns, soil and improved soil

Özellik	Parametre	Değer
Jet Grout	Serbest basınç (q_c)	1500 kPa
	Çekme dayanımı (σ_t)	210 kPa
	Kohezyon (c_{jg})	368 kPa
	İçsel sürtünme açısı (Φ_{jg})	37.7°
	Elastisite modülü (E_{jg})	540 MPa
	Kayma modülü (G_{jg})	197 MPa
	Çap (B)	60 cm
	Aralık ($S=3B$)	180 cm
Zemin	Uzunluk	11 m
	Kohezyon (c_s)	0
	İçsel sürtünme açısı (Φ_s)	25°
İyileştirilmiş Zemin	Elastisite modülü (E_s)	14 MPa
	c_{ort}	32.2 kPa
	Φ_{ort}	26.1°
	E_{ort}	59.9 MPa
	G_{ort}	21.9 MPa

Tasarımı yapılan jet grout kolonların çapı (B) 60 cm, kolonlar arası aksenal mesafe (S) ortalama 180 cm (3B) olarak seçilmiştir. Kolon pozisyonu hazırlanırken konstruktif esaslara da dikkat edilmiştir. Planda yatay kolon sayısı 14, düşey kolon sayısı 37 adet olmak üzere toplam 518 adet jet grout kolonu tasarlanmıştır. $S=3B$ durumunda, jet grout kolonların planda kapladığı alanın (A_{jg}) temelin alanına (A) oranı 0.087 olup bu oran, alan oranı (A_r) olarak Denklem (5)'teki gibi tanımlanmıştır:

$$A_r = A_{jg} / A \quad (5)$$

Jet grout kolonların arasında kalan zemine etkiyen dinamik kayma gerilmeleri, kolon çapı ve arada kalan zeminin alanın bir fonksiyonu olarak değişmektedir (Özsoy ve Durgunoğlu 2003). Buna göre; belirli bir alandaki kolonun ve zeminin şekil değiştirmelerinin uyumlu olacağı kabulüyle, çevrimsel kayma gerilmesi (CSR) kayma gerilmesi azaltma faktörü (Baez 1995), SR, kullanılarak azaltılır (Denklem 6):

$$CSR_{tasarım} = CSR \times SR \quad (6)$$

$$S_R = \frac{\tau_s}{\tau} = \frac{1}{G_r} \cdot \frac{1}{[A_r + \frac{1}{G_r}(1-A_r)]} \quad (7)$$

Denklem (7)'deki τ zemindeki kayma gerilmesini, τ_s azaltılmış kayma gerilmesini, G_r ise kayma modülü oranını temsil eder:

$$G_r = G_{jg} / G_s \quad (8)$$

Bu durumda; Denklem (8) kullanılarak alan oranı 0.087, kayma modülü oranı 38.6 ve $S_R=0.234$ olarak hesaplanır. Böylelikle jet grout kolon imalatı sonrası sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü 1.32 (>1.1) olarak elde edilir ve sıvılaşma riski kabul edilebilir mertebelere (TBDY 2018) indirilmiş olur.

3. SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ

3.1) Bünye Modeli

Sonlu elemanlar modellerinde, analize konu olan yükleme koşulları ve zeminin bu durumdaki davranışını gerçekçi şekilde modellemek için doğru bir zemin bünye modeli seçmek esastır. Sıvılaşma, kısa süre içerisinde tekrarlı yüklemelerin söz konusu olduğu ve oluşan şekil değiştirmelerin boşluk suyu basıncına göre değiştiği dinamik bir problemdir. Bu nedenle, sıvılaşma problemlerinin modellenmesinde; toplam gerilme temelli ya da kısmi birleşik efektif gerilme temelli modeller yerine boşluk suyu basıncı ve buna bağlı olarak şekil değiştirme hesaplayabilen tamamen birleşik efektif gerilme tabanlı zemin bünye modelleri tercih edilmelidir (Bölüm 1). Mevcut çalışmada; boşluk suyu basıncının ve efektif gerilmelerin her yükleme adımında hesaplanabildiği, doğrusal olmayan elasto-plastik bir gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi sunan UBCSAND bünye modeli (Beaty ve Byrne 2011) tercih edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizleri UBCSAND zemin bünye modelini içeren MIDAS GTS NX programı kullanılarak yapılmıştır. Bu modeldeki; elastik kayma modülü sayısı (K_G^e), bulk (hacim) modülü sayısı (K_B^e), plastik kayma modülü sayısı (K_G^p) ve hata oranı (R_f) gibi parametreler, SPT N_{60} değerine bağlı ilişkiler (Denklem 9, 10, 11, 12) kullanılarak belirlenebilir (Beaty ve Byrne 2011):

$$K_G^e = 21.7 * 20 * (N_{60})^{0.334} \quad (9)$$

$$K_B^e = 0.7 * K_G^e \quad (10)$$

$$K_G^p = K_G^e * (N_{60})^2 * 0.003 + 100 \quad (11)$$

$$R_f = 1.1 * (N_{60}) - 0.15 \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak, ilgili zemin parametreleri çalışma sahası için hesaplanmıştır. Diğer UBCSAND zemin modeli parametreleri de bünye modelinin geliştiricilerinin (Puebla ve diğ. 1997, Beaty ve Byrne 1998; 2011) önerdiği aralıklarda seçilerek tüm model parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir:

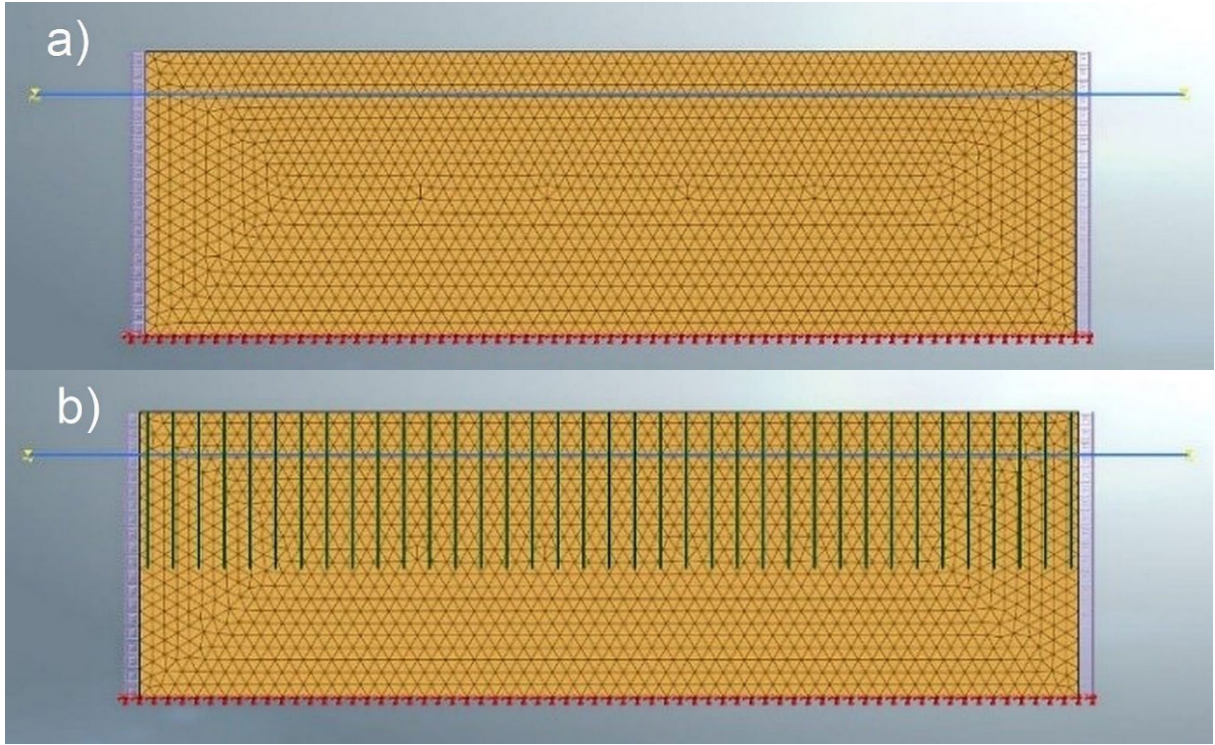
Tablo 2: UBCSAND bünye modeli parametreleri
Table 2: UBCSAND constitutive model parameters

Parametre	Tanım	Değer
N_{60}	Düzeltilmiş SPT değeri	13
K_G^e	Elastik kayma modülü sayısı	766
K_B^e	Bulk modülü sayısı	535.7
K_G^p	Plastik kayma modülü sayısı	488
m_e	Elastik bulk modülü indeksi	0.5
n_e	Elastik kayma modülü indeksi	0.5
n_p	Plastik kayma modülü indeksi	0.4
Φ_{cv}	Sabit hacim sürtünme açısı	33
Φ_p	Tepe sürtünme açısı	34.3
R_f	Hata oranı	0.75
$f_{ac, hard}$	Yoğunlaştırma faktörü	1
$f_{ac, post}$	Sivilaşma sonrası kalibrasyon değeri	0.2

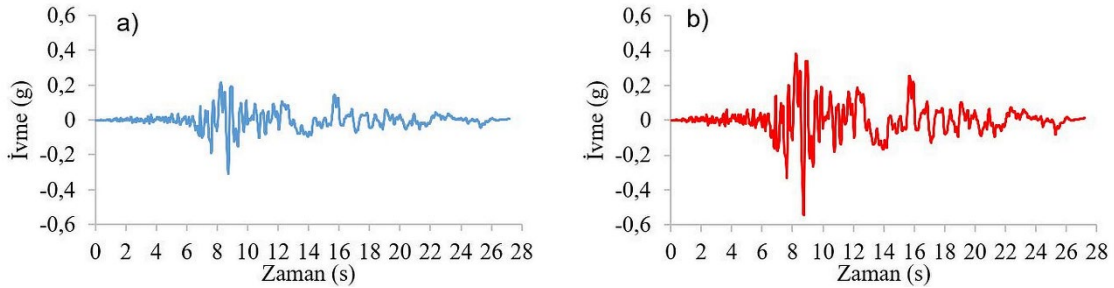
3.2) Sonlu Elemanlar Modeli

MIDAS GTS NX programı kullanılarak 65 m uzunluğunda ve 20 m derinliğinde, düzlem gerinim koşullarında bir model oluşturulmuştur. Zemin özellikleri, UBCSAND bünye modeli kullanılarak Tablo 2'deki gibi tanımlanmıştır. Dinamik yüklemeler söz konusu olduğunda, zemin modelinin boyutları ve sınır koşulları büyük önem taşır. Her bir dinamik yükleme adımı sırasında oluşan dalgaların yayılımı sonucunda, modelin sınırlarında yansıyan veya kırılan dalgalar, yeni oluşan dalgalarla birleşerek farklı sonuçlar elde edilmesine neden olabilir. Bu yansıma ve kırılmalar, model boyutunun küçük olması ya da sınır koşullarının doğru tanımlanmaması durumunda yanlış sonuçlara neden olur. Bu nedenle, oluşturulan sonlu elemanlar modelinin sınırları; serbest alan (free-field) olarak tanımlanıp, buralarda sönümleyici sınır koşulları (absorbent boundary) tanımlanmıştır. Bu koşullarda; modelin sınırları daha geniş bir alan gibi tanımlanmakta ve doğal olarak olduğundan daha büyük bir model elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca kullanılan sönümleyici sınır koşulları da yükleme sırasında oluşan deprem dalgalarının sınırlardan yansımadan yayılmasına olanak sağlamaktadır. Boyutu 1 m'den küçük üçgen ağ elemanları kullanarak; herhangi bir jet grout kolonu olmadan serbest saha modeli (Şekil 3a) ve ardından jet grout kolonlu (Şekil 3b) sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Yapılan dinamik analizlerde, inceleme alanının yakınlarında daha önce meydana gelen 1999 Kocaeli depreminin kayıtları kullanılmıştır. 0.02 s zaman aralığı ile kaydedilmiş olan bu yer hareketi kaydına göre en büyük ivme 0.312 g'dir (Şekil 4a). Çalışma alanında; 475 yıllık tekrarlanma periyoduna sahip olan standart tasarım yer hareketinin oluşturabileceği en büyük yer ivmesi 0.546 g olarak tespit edilmiştir (AFAD 2018). Bu nedenle özgün deprem kaydı, PGA=0.546 g olacak şekilde ölçeklendirilmiştir (Şekil 4b). Tüm sonlu elemanlar analizlerinde ölçeklendirilmiş olan ivme-zaman kaydı kullanılmıştır.



Şekil 3: Sonlu elemanlar modeli; a) serbest saha, b) S=3B jet grout kolonlu durum
Figure 3: Finite element model; a) free field, b) S=3B jet grout column case

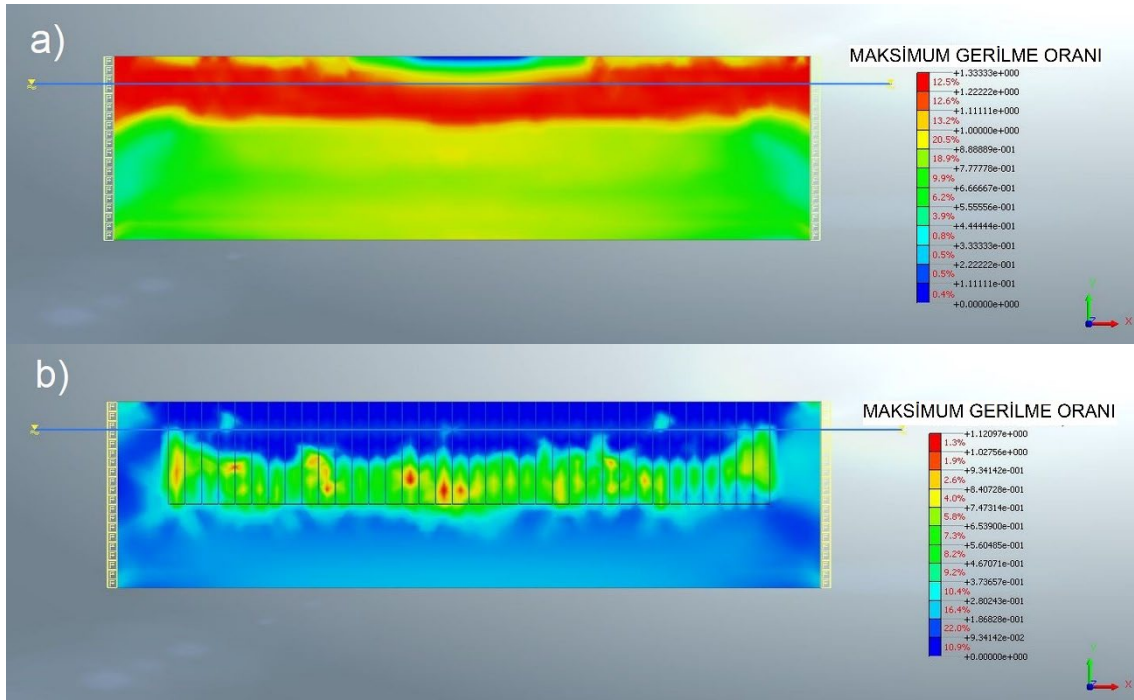


Şekil 4: İvme-zaman kaydı; a) özgün kayıt, b) ölçeklendirilmiş kayıt
Figure 4: Acceleration-time history; a) original record, b) scaled records

Oluşturulan 2 boyutlu sonlu elemanlar modelinde, Şekil 4b'de sunulan ivme-zaman kaydı kullanılarak serbest saha modeli için dinamik analiz yapılmıştır. Bu ve sonraki analizlerde sıvılaşma; kayma gerilmeleri, kayma deformasyonları ve aşırı boşluk suyu basıncı oranı (r_u) üzerinden değerlendirilmiştir.

3.3) Parametrik Analizler

TBDY (2018)'e göre yapılan geoteknik değerlendirme sonucunda, mevcut sahada sıvılaşma riski olduğu görülmüş, özellikleri Tablo 1'de belirtilen jet grout kolonların imalatı sonrasında sıvılaşma tehlikesinin ortadan kalktığı belirlenmişti (Bölüm 2). Yapılan sonlu elemanlar analizleri, herhangi bir jet grout kolonun bulunmadığı durumda zeminin sıvılaştığını doğrulamaktadır (Şekil 5a). S=3B aralıklarla yerleştirilen, kayma modülü oranı 38.6 olan jet grout kolonlu durumda ise bu tehlike ortadan kaldırılmıştır (Şekil 5b).



Şekil 5: Dinamik analizi sonucu UBCSAND gerilme oranı; a) serbest saha, b) jet grout kolonlu zemin
Figure 5: UBCSAND stress ratio at the end of dynamic analysis; a) free field, b) with jet grout columns

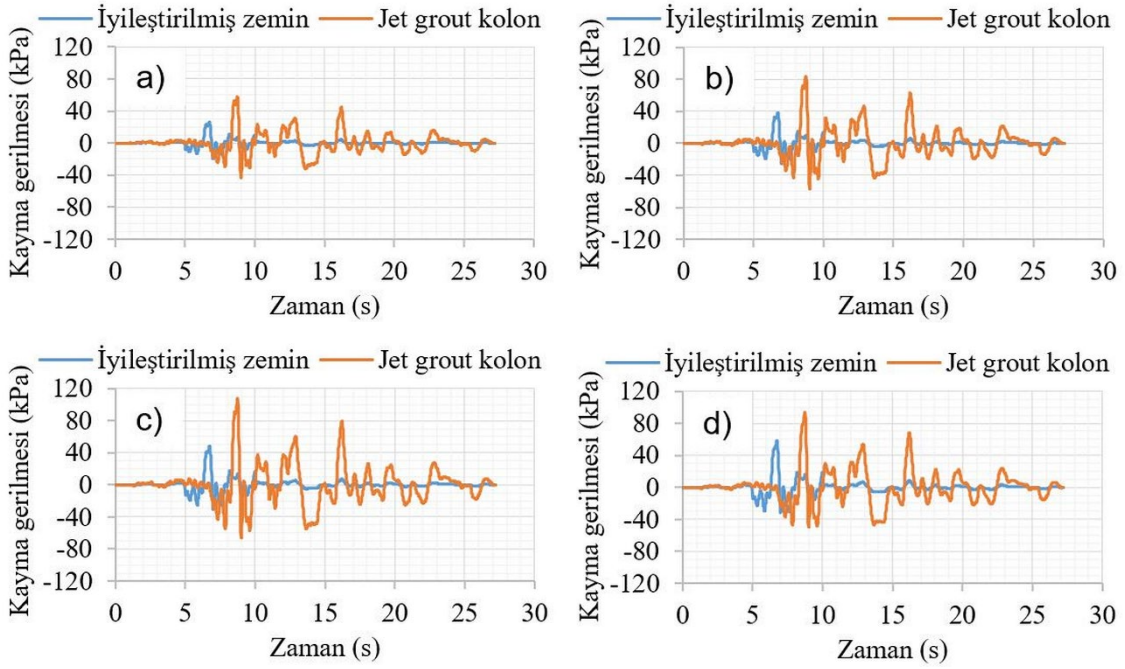
Bu çalışma kapsamında; zeminin özellikleri sabit tutulmuş, jet grout kolonların dayanımları, kolonlar arasındaki mesafe gibi parametreler değiştirilerek çok sayıda parametrik analizler yapılmıştır. Jet grout kolonların kayma modülleri (G_{jg}), zeminin kayma modülüne (G_s) oranlanarak kayma modülü oranı (G_r) cinsinden ifade edilmiştir (Denklem 8). Kayma modülü oranı; 20, 38.6, 60, 80 ve 100 olan, farklı dayanıma sahip jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca jet grout kolonların arasındaki mesafenin (S) sıvılaşmayı önlemeye etkisi $S=2B$, $3B$, $4B$, $5B$ ve $6B$ durumları için incelenmiştir. Bu durumda alan oranı (A_r); sırasıyla 0.196, 0.087, 0.049, 0.031 ve 0.022 olarak hesaplanmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Serbest saha koşullarında; analitik yöntemler ve sayısal analizler kullanılarak yapılan incelemelerde, yeraltı su seviyesinin altında sıvılaşma riski olduğu görülmüş, bu nedenle 11 m uzunluğunda jet grout kolonların yapılması önerilmiştir. Jet grout kolonların kayma dayanımları ($G_r=20, 38.6, 60, 80$ ve 100) ve aralarındaki mesafe değiştirilerek ($A_r=0.196, 0.087, 0.049, 0.031$ ve 0.022) çok sayıda sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, kayma gerilmesi/gerinimi ve aşırı boşluk suyu basıncı oranı değişimi üzerinden değerlendirilmiştir.

4.1) Kayma Gerilmesi ve Kayma Geriniminin Değişimi

Jet grout kolonların imalatından sonra elde edilen zemin, iyileştirilmiş zemin olarak tanımlanmıştır. Şekil 4b'de gösterilen ivme-zaman kaydı kullanılarak, zaman tanım alanında yapılan dinamik analizlerde; hem jet grout kolonlarda hem de iyileştirilmiş zeminde kayma gerilmelerinin ve kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi elde edilmiştir.

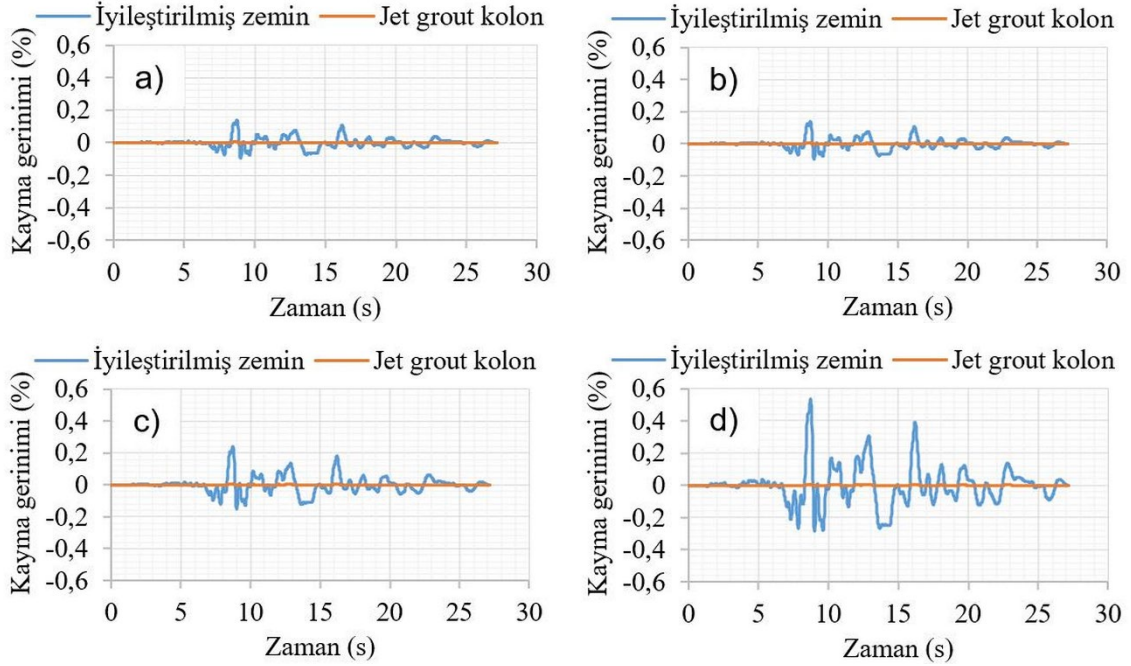


Şekil 6: Farklı derinliklerdeki kayma gerilmelerinin zamana göre değişimi; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m
Figure 6: Variation shear stress with time at different depths; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m

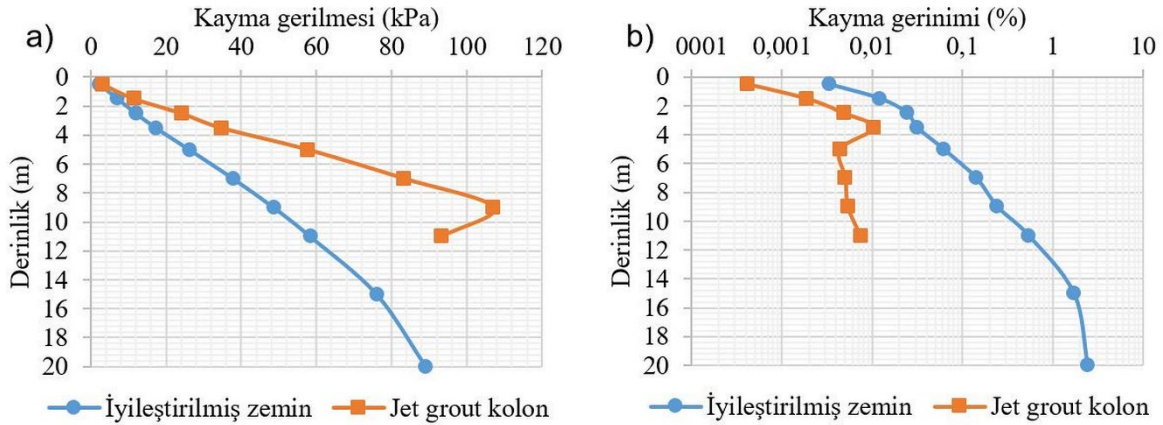
Örnek olarak, $G_r=20$ ve $A_r=0.196$ durumunda (mevcut projede uygulanan) kayma gerilmelerinin ve kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmuştur. Yeraltı su seviyesinin 3 m'de gözlenmesi ve sıvılaşmanın bu derinliğin altında oluşması nedeniyle 5 m, 7 m, 9 m ve 11 m derinlikte elde edilen kayma gerilmeleri/gerinimleri gösterilmiştir.

Jet grout kolonlar, zeminden daha rijit oldukları için onları çevreleyen zemine kıyasla oluşan kayma gerilmelerinin büyük bir kısmını taşımaktadır. Ancak yüksek rijitlikleri nedeniyle zemine göre daha düşük kayma gerinimleri göstermişlerdir. Zeminde ve jet grout kolonlarda oluşan kayma gerilmelerinin/gerinimlerinin değişimini daha iyi inceleyebilmek için belirli derinliklerde maksimum kayma gerilmeleri/gerinimleri hesaplanmıştır. Buna göre $G_r=20$ ve $A_r=0.196$ durumunda (mevcut projede uygulanan) maksimum kayma gerilmeleri ve kayma gerinimlerinin derinlikle değişimi Şekil 8'de sunulmuştur. Daha rijit oldukları için jet grout kolonlar her derinlikte zeminden daha çok kayma gerilmesini üzerine çekmiş ancak yine aynı nedenden dolayı daha düşük kayma gerinimi göstermiştir.

Jet grout kolonların kayma modüllerinin ve aralıklarının sıvılaşmayı önlemedeki etkinliğini daha iyi inceleyebilmek için her farklı özelliklere sahip jet grout kolonlu durumda, Denklem (7)'de belirtilen kayma gerilmesi azaltma faktörü (S_R) hesaplanmıştır. Sıvılaşma; yeraltı su seviyesinin altında (3 m) beklendiği ve jet grout kolonların boyu 11 m olduğu için, bu azaltma faktörü, 5 m, 7m, 9 m ve 11 m derinlikte hesaplanmıştır. Kayma gerilmesi azaltma faktörünün düşük olması, zeminin daha az kayma gerilmesine maruz kaldığı anlamına gelmektedir.

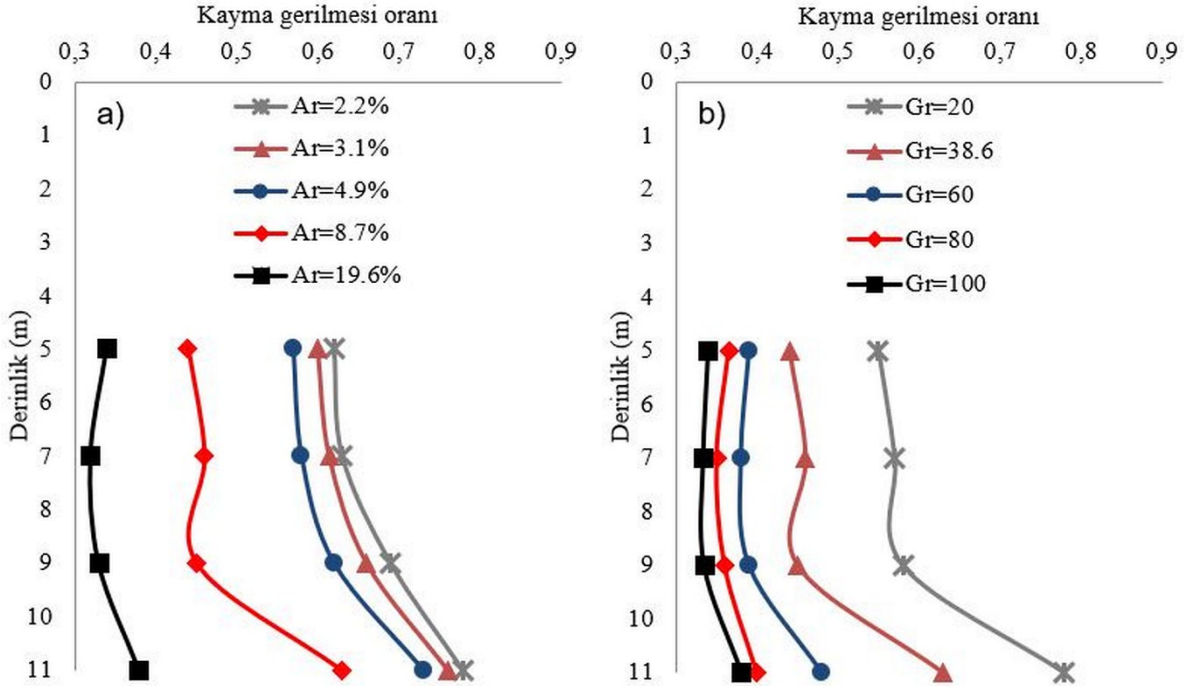


Şekil 7: Farklı derinliklerdeki kayma gerinimlerinin zamana göre değişimi; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m
Figure 7: Variation shear strain with time at different depths; a) 5 m b) 7 m c) 9 m d) 11 m



Şekil 8: Kayma parametrelerinin derinlikle değişimi; a) kayma gerilmesi, b) kayma gerinimi
Figure 8: Variation of shearing with the depth, a) shear stress, b) shear strain

Örneğin; kayma modül oranının sabit olduğu ($G_R=38.6$) jet grout kolonlu bir durumda farklı alan oranları için S_R değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 9a'da gösterilmiştir. Buna göre, alan oranı arttıkça S_R azalmaktadır. Alan oranındaki değişimin az olduğu ($A_R = \%2.2 - 4.9$) bu etki çok belirgin olmasa da alan oranı $\%19.6$ iken bu faktör 0.3-0.4 mertebelerine kadar düşmektedir. Sonuç olarak, alan oranı arttıkça zeminde oluşan kayma gerilmelerinin azaldığı gözlenmiştir.



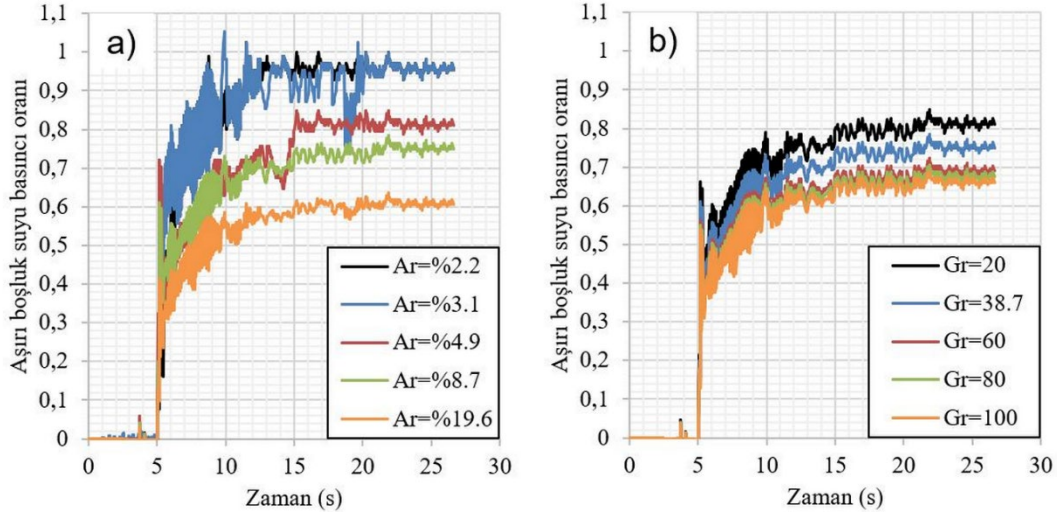
Şekil 9: Kayma gerilmesi azaltma faktörünün derinlikle değişimi; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$
 Figure 9: Variation of shear reduction factor with the depth; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$

Jet grout kolonların $S=3B$ aralıklarla yerleştirildiği, alan oranının 0.087 olduğu durumda ise kayma modül oranlarının değişiminin S_R üzerindeki etkisi Şekil 9b'de gösterilmiştir. Beklenildiği üzere jet grout kolonların rijitliği arttıkça zeminin maruz kaldığı kayma gerilmeleri azalmaktadır. G_R değeri belirli bir eşik değere ulaşına kadar zemindeki kayma gerilmeleri belirgin bir şekilde azalmaktadır. $G_R=60, 80$ ve 100 durumlarında ise kayma gerilmesi azaltma faktörü çok değişmemektedir. Sonuç olarak, belirli bir eşik değer üzerinde rijitlikteki jet grout kolonların daha sık yerleştirilmesi durumunda sıvılaşmayı önlemede daha etkili olacağı görülmektedir.

4.2) Boşluk Suyu Basıncının Değişimi

Bölüm 4.1'de jet grout kolonların rijitliği ve aralarındaki mesafeye göre sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, zemindeki kayma gerilmelerini azaltması üzerinden değerlendirilmiştir. Ancak zemindeki kayma gerilmeleri azalsa dahi sıvılaşmanın oluşup oluşmadığını belirlemek için aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) belirlenmesi oldukça önemlidir.

MIDAS GTS NX programı kullanılarak, zaman tanım alanında yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, verilen dinamik yük süresince aşırı boşluk suyu basınçları kaydedilmiştir. Örnek olarak $G_r=38.6$ durumunda farklı alan oranları için, $A_r=0.087$ durumda farklı kayma modülü oranları için aşırı boşluk suyu basıncı oranının (r_u) zamana göre değişimi Şekil 10'da sunulmuştur. Şekil 10a'da görüldüğü üzere, alan oranı arttıkça r_u azalmaktadır. Alan oranı %2.2-3.1 mertebelerindeyken jet grout olmasına karşın r_u değeri hareketin 15'inci saniyesinden itibaren 1'e yaklaşmakta ve teorik olarak sıvılaşma meydana gelmektedir. Alan oranı %19.7 iken r_u , en fazla 0.6 mertebelerinde değişmektedir. Şekil 10b'de görüldüğü üzere kayma modül oranı değişse dahi r_u değerleri nispeten küçük bir aralıkta değişmektedir. Her ne kadar rijitlik arttıkça r_u azalsa da jet grout kolonlarının rijitliğinin değişimi aşırı boşluk suyu basıncı oranını çok etkilememektedir. Jet grout kolonlar, sıvılaşma durumunda kayma gerilmelerini azaltsa da sıvılaşma yine de meydana gelmektedir. Benzer bir sonuç Özener ve diğ. (2015) tarafından da rapor edilmiştir.



Şekil 10: Aşırı boşluk suyu basıncı oranının zamana göre değişimi; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$
 Figure 10: Variation of excess porewater pressure ratio with time; a) $G_r=38.6$ b) $A_r=0.087$

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, sıvılaşma potansiyeli olan bir arazinin sıvılaşma riski analitik yöntemler ve sonlu elemanlar analizleri ile ortaya konmuştur. MIDAS GTS NX programı kullanılarak yapılan dinamik analizlerde, UBCSAND bünye modeli kullanılarak zemin modellenmiş, sıvılaşma tehlikesini bertaraf etmek için jet grout kolon imalatı önerilmiştir. Yüksek rijitlikteki bu kolonların sıvılaşmayı önlemedeki etkinliği, rijitlikleri ve aralarındaki mesafe değiştirilerek incelenmiştir. Yapılan analizler ve değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sıvılaşma gibi dinamik yüklemeler esnasında ve sonucunda zeminin lineer olmayan davranışını ve aşırı boşluk suyu basıncı oluşumunu incelemek için UBCSAND zemin bünye modeli kullanılabilir.
- Yüksek rijitlikteki jet grout kolonlar, deprem yer hareketi sırasında zemine göre daha çok kayma gerilmelerine maruz kalsa da yüksek rijitlikleri nedeniyle zemine göre daha az kayma gerinimi göstermiştir.
- Jet grout kolonların arasındaki mesafe azaldıkça (alan oranı arttıkça) zeminin maruz kaldığı kayma gerilmesi de azalmaktadır. Böylelikle sıvılaşmanın neden olabileceği deformasyonlar da azalmaktadır.
- Jet grout kolonların rijitliği arttıkça zemindeki kayma gerilmeleri azalmaktadır. Ancak belirli bir eşik değerden sonra ($G_R=60$) rijitlik artışı kayma gerilmelerinin değişimini çok etkilememektedir.
- Jet grout kolonların rijitliği artırılıp ve aralarındaki mesafe azaltılsa dahi aşırı boşluk suyu basıncı oranı çok etkilenmemekte ve sıvılaşma meydana gelmektedir. Bu bakımdan, jet grout kolonların sıvılaşmayı önlemekten ziyade neden olduğu kayma gerilmelerini azalttığından bahsedilebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi tarafından 18/001 numaralı "Jet-Grout Kolonların Zemin İyileştirme Verimliliğinin Belirlenmesi Adına Bir Vaka Analizi" başlıklı proje ile desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi'ne desteğinden dolayı teşekkür ederiz. Ayrıca araştırmaya konu olan inceleme alanının verilerini bizlerle paylaşan İnş. Müh. Turgay Erdoğan'a da teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

Adalier K., Elgamal A., Meneses J., Baez J.I., 2003. Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 23, 571-584

AFAD, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritası, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adresi: <http://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>

AFAD, 2021. 1900-20xx Deprem Kataloğu (M >= 4.0). Erişim adresi: <http://deprem.afad.gov.tr/event-catalog>

Almani Z.A., Memon A.A., Habib A.F., Lal K., Shah S.F., 2013. 3D numerical modelling of liquefaction-induced settlements and its mitigation, *Sindh University Research Journal (Science Series)* 45(2), 301-304

Askan A., Karimzadeh S., 2019. Kuzey Anadolu Fay Hattı üzerinde olası deprem senaryoları için benzeştirilmiş bir kuvvetli yer hareketi veri tabanı, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 1(1), 76-97

Baez J.I., 1995. A design model for the reduction of soil liquefaction by using vibro-stone columns, PhD Thesis, University of Southern California, Los Angeles, 207 p.

Beaty M.H., Byrne P.M., 1998. An effective stress model for predicting liquefaction behaviour of sand, *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE* 75(1), 766-777

Beaty M.H., Byrne P.M., 2000. A synthesized approach for predicting liquefaction and resulting displacements, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 30 January-4 February 2000, Auckland-New Zealand, Erişim adresi: <https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/1589.pdf>

Beaty M.H., Byrne P.M., 2011. UBCSAND constitutive model version 904aR, Itasca UDM, Erişim adresi: <https://docplayer.net/84675337-Ubcsand-constitutive-model-version-904ar.html>

Bowles J.E., 1997. Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill, Singapore, 1168 p.

Bruce D.A., Bruce, M.E.C., 2003. The practitioner's guide to deep mixing, Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, 10-12 February 2003, New Orleans-USA, Erişim adresi: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40663%282003%2922>

Byrne P.M., Park S.S., Beaty M., Sharp M.K., Gonzalez L., Abdoun T., 2004. Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests, *Canadian Geotechnical Journal* 41(2), 193-211

Chang S.E., 2000. Disasters and transport systems: loss, recovery and competition at the Port of Kobe after the 1995 earthquake, *Journal of Transport Geography* 8, 53-65

Dawson E.M., Roth W.H., Nesarajah S., Bureau G., Davis C.A., 2001. A practice-oriented pore pressure generation model, 2nd International FLAC Symposium, 29-31 May 2001, Lyon-France, Erişim adresi: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003077527-9/practice-oriented-pore-pressure-generation-model-dawson-roth-nesarajah-bureau-davis>

Finn W.D.L., Yogendrakumar M., Yoshida N., Yoshida H., 1986. TARA-3: A program to compute the response of 2D embankments and soil-structure interaction systems to seismic loadings, University of British Columbia, Vancouver-USA

Galavi V., Petalas A., Brinkgreve R.B.J., 2013. Finite element modelling of seismic liquefaction in soils, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA* 43(3), 55-64

Hausler E.A., Sitar N., 2001. Performance of soil improvement techniques in earthquakes, 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 28 March 2001, California-USA,

Erişim adresi: <https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1807&context=icrageesd>

Ishihara K., Yoshimine M., 1992. Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundation* 32 (1), 173-188

Martin J.R., Olgun C.G., Mitchell J.K., Durgunoglu H.T., 2004. High-modulus columns for liquefaction mitigation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 30(6), 561-571

Mısır G., 2020. Jet grout yöntemi ile zemin iyileştirme ve deplasman tahmini: Vaka analizi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 18, 290-299

Mogami T., Kubo K., 1953. The behaviour of soil during vibration, 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 16-17 August 1953, Switzerland,

Erişim adresi: https://www.issmge.org/uploads/publications/1/42/1953_01_0034.pdf

Moseley M.P., Kirsch K., 2004. Ground Improvement, Spon Press-Taylor & Francis, Oxford, U.K., 431 p.

Nishimatsu Y., 1972. The mechanics of rock cutting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 9(2), 261-270

Olgun C.G., Martin J.R., 2008. Numerical modeling of the seismic response of columnar reinforced ground, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV, 18-22 May 2008, California-USA,

Erişim adresi: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/40975%28318%29112>

Oral S.Ü., 2014. Effective stress based constitutive modelling and assessment of seismic pile-soil interaction in liquefiable soils, PhD Thesis, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Ankara, 284 p.

Özener P., 2007. Depremde tabakalı kum zeminde oluşan sıvılaşma ve sıvılaşma sonrası davranışın model deneylerle araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 444 s.

Özener P., Dulger M., Berilgen M., 2015. Numerical study of effectiveness of jet-grout columns in liquefaction mitigation, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 1-4 November 2015, New Zealand,

Erişim adresi: https://secure.tcc.co.nz/ei/images/ICEGE15%20Papers/Ozener_584.00.pdf

Özsoy B., Durgunoğlu T., 2003. Sıvılaşma etkilerinin yüksek kayma modüllü zemin-çimento karışımı kolonlarla azaltılması, Beřinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul, Erişim adresi: <https://www.zeminas.com.tr/docs/paperno42.pdf>

Papadimitriou A.G., Bouckovalas G.D., Dafalias Y.F., 2001. Plasticity model for sand under small and large cyclic strains, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127(11), 973-983

Puebla H., Byrne P.M., Phillips R., 1997. Analysis of CANLEX liquefaction embankments: Prototype and centrifuge models, *Canadian Geotechnical Journal* 34(5), 641-657

Scawthorn C., Johnson G.S., 2000. Preliminary report Kocaeli (Izmit) earthquake of 17 August 1999, *Engineering Structures* 22, 727-745

Seed H.B., Idriss I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 97(9) 1249-1273

Selçukhan O., Ekinci A., 2020. Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 23, 481-496

Sucuoglu H., 2019. 2019 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde Başlıca Yenilikler, *Türk Deprem Araştırma Dergisi* 1(1), 63-75

TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Ankara, Erişim adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2-1.pdf>

Tonaroğlu M., 2006. Sıvılaşmanın nümerik yöntemlerle modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 134 s.

Unutmaz B., 2012. Numerical assessment of high-modulus columns on liquefaction triggering potential, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 32, 1312-1325

Wang Z.L., 1990. Bounding surface hypoplasticity model for granular soils and its applications, PhD Thesis, University of California, Davis, California, USA

Wood D.M., 1990. Soil Behaviour and critical state soil mechanics, Cambridge University Press, USA, 462 p.

Xanthakos P.P., Abrahamson L.W., Bruce D.A., 1994. Ground Control and Improvement, Wiley, New York, USA, 936 p.

Yoshida N., Tokimatsu K., Yasuda S., Kokusho T., Okimura T., 2001. Geotechnical aspects of damage in Adapazarı City during 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, *Soils and Foundation* 41(4), 25-45

Youd T.L., Hoose S., 1976. Liquefaction during 1906 San Francisco Earthquake, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE* 102(5), 425-439

Youd T.L., Idriss I.M., 2001. Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 127(10), 297-313.

ARAŞTIRMA VERİSİ (Research Data)

Araştırmaya konu olan inceleme alanının verileri, İnş. Müh. Turgay Erdoğan'dan alınmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI / İLİŞKİSİ (Conflict of Interest / Relationship)

Araştırma kapsamında herhangi bir kişiyle ve/veya kurumla çıkar çatışması/ilişkisi bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKI ORANI BEYANI (*Author Contributions*)

- Çalışmanın tasarlanması (*Designing of the study*): G.Ş., M.R.K.
- Literatür araştırması (*Literature research*): G.Ş., O.T., M.R.K.
- Saha çalışması, veri temini/derleme (*Fieldwork, collection/compilation of data*): G.Ş., M.R.K.
- Verilerin işlenmesi/analiz edilmesi (*Processing/analysis of data*): G.Ş., O.T., M.R.K.
- Şekil/Tablo/Yazılım hazırlanması (*Preparation of figures/tables/software*): G.Ş., O.T.
- Bulguların yorumlanması (*Interpretation of findings*): G.Ş., O.T., M.R.K.
- Makale yazımı, düzenleme, kontrol (*Writing, editing and checking of manuscript*): G.Ş., O.T., M.R.K.