

SIVILAŞABİLİR ZEMİNDE ENJEKSİYONLA İYİLEŞTİRME ÖNCESİ ve SONRASI DİNAMİK DAVRANIŞIN KARŞILAŞTIRMASI ÜZERİNE

COMPARISON OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF UNTREATED AND CEMENT INJECTED LIQUEFIABLE SOILS

Güldem KORKMAZ¹, Sinan SARGİN², Gökhan ŞENOĞLU³, Sadık ÖZTOPRAK⁴

ÖZET

İri daneli zeminlerin sismik etkiler altındaki dinamik davranışı efektif gerilmenin boşluk suyu basıncı ile ters orantılı azalması, yani sıvılaşma ile açıklanmaktadır. Sıvılaşma kaynaklı yapılarda meydana gelen oturma ve dönmelerin sayısal ve analitik yöntemler ile günümüzde tahmin edilebilmesi ve bu hasarın çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri ile azaltılması mümkün olabilmektedir. Bu doğrultuda, bu çalışma kapsamında ilk olarak ince dane oranı yüksek kum zeminin sıvılaşma potansiyeli laboratuvar ortamında tanımlama ve tekrarlı dinamik basit kesme deneyleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, düşük bütçeli bir bender eleman deney sistemi ile bu zeminin başlangıç rijitliği farklı çevre basıncı koşullarında ölçülmüştür. Laboratuvarda dinamik davranışı incelenen zeminin alındığı sahada yapılan arazi deneyleri değerlendirilerek; geoteknik karakterizasyon yapılmış ve zemin profili belirlenmiştir. İdealize edilen bu zemin profili üzerinde, literatürde kabul görmüş ve sıvılaşmayı belirleyen analitik yaklaşımlar kullanılarak her tabaka için sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen zemin profili bir sonlu elemanlar metodu yazılımı olan Plaxis 2D ile modellenmiş ve zaman-tanım alanında, yerel zemin sınıfına uygun ölçeklenmiş kayıt kullanılarak konsolidasyonlu ve konsolidasyonsuz dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma durumunda iyileştirme yönteminin performansını değerlendirmek üzere, programda hazır olarak bulunan sıvılaşma bünye modelleri hem tekrarlı basit kesme hem de arazi CPT verileri göz önünde bulundurularak kalibre edilmiştir. Enjeksiyonla yapılan iyileştirme sonrası durum için bünye modeli kalibrasyonu ve zemin özellikleri güncellenmiş; dinamik analizler tekrarlanmıştır. Yapılan sayısal analizler sonucunda, enjeksiyonla iyileştirme yönteminin kumlu zeminlerde sıvılaşma kaynaklı oturmaları oldukça sınırlamıştır. Buna ilaveten, iyileştirme öncesi ve sonrası durumda zemin ortamında deprem etkisinde oluşan ilave boşluk suyu basıncı değerleri karşılaştırılmış ve iyileştirme sonrası durumu temsil eden analizde boşluk suyu basıncı oluşumunun engellendiği ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bender Eleman, Dinamik Basit Kesme, Enjeksiyon, Kum, Sıvılaşma, Sayısal Analiz

ABSTRACT

The dynamic behavior of coarse-grained soils under seismic effects is explained by the decrease in effective stress, which is inversely proportional to the pore water pressure, called liquefaction. The amount of settlement and tilting that occur in structures due to liquefaction in such soils can be estimated by using numerical and analytical tools, and this damage can be reduced by various soil improvement techniques. In

¹ Araş. Gör., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, gkorkmaz@iuc.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Araş.Gör. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, ssargin@iuc.edu.tr

³ İnş.Yük.Müh., Arçelik, Gokhan.Senoglu@arcelik.com

⁴ Prof. Dr., İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, oztoprak@iuc.edu.tr

this study, first, the liquefaction potential of sandy soils with high fine content is defined in the laboratory environment through cyclic dynamic simple shear tests. Additionally, the initial stiffness of this soil was measured under different confining pressure conditions using a low-cost bender element test system. The geotechnical characterization is determined by evaluating field tests conducted on the soil whose dynamic behaviour is examined in the laboratory. The probability of manifestation of the liquefaction for each soil layer is predicted by using analytical approaches accepted in the literature and used to idealize this soil profile. After the soil profile determined according to the results of analytical methods is modelled using the finite element method software Plaxis 2D, and consolidated and unconsolidated dynamic analyses were performed in the time-domain using scaled records depending on local soil conditions. In order to evaluate the performance of the improvement method in case of liquefaction, the available liquefaction constitutive models (PM4Sand, UBC3D-PLM) in the program are calibrated by considering both cyclic simple shear and field CPT/SPT data. The soil model calibration and soil properties are updated after the improvement through injection, and dynamic analyses are re-run. According to findings from the numerical analyses, it can be concluded that the injection method is an effective method in mitigating liquefaction-induced settlement and tilting in sandy soils. In addition to this, the excess pore water pressure values induced by earthquake excitations in the soil environment are compared before and after improvement, and it is revealed that pore water pressure generation is considerably prevented in the dynamic analysis representing the post-improvement condition.

Keywords: *Bender Element, Dynamic Simple Shear, Injection, Sand, Liquefaction, Numerical Analysis*

1. GİRİŞ

Son yaşanan Kahramanmaraş merkezli depremlerde özellikle İskenderun-Hatay ve Gölbaşı-Adıyaman'da sismik etkiler neticesinde zeminde meydana gelen sıvılaşma kaynaklı yapısal hasarlar yoğun olarak gözlemlenmiştir (Öser vd., 2023). Sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma kaynaklı serbest saha ve bina temel altı oturmaları literatürde Seed ve Idriss (1971), Tokimatsu ve Seed (1987), Ishihara ve Yoshimine (1992), Zhang vd., (2002), Boulanger ve Idriss (2014), Bray ve Macedo (2017) birçok araştırmacı tarafından önerilen ampirik formüller ile tahmin edilebilmektedir. Oturma hesapları ve zemin-yapı etkileşiminin tüm deprem süresi boyunca sıvılaşma durumu da dikkate alınarak sonlu elemanlar metodu yardımı ile modellenmesi mümkündür. Ancak bunun için literatürde kabul görmüş sıvılaşma bünye modelleri (UBCSand, PM4Sand, PM4Silt) arazi ya da laboratuvar deneylerine göre kalibre edilerek gerçeğe uygun bir şekilde zemin-yapı etkileşim sayısal analizlerine (sonlu elemanlar, sonlu farklar) dahil edilmelidir. İlk olarak Boulanger (2010) tarafından geliştirilen PM4Sand bünye modeli, sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin sismik etkiler altındaki davranışını ve zemin ortamında dinamik yüklemeye bağlı ilave boşluk suyu basıncı değerlerini simüle edebilmektedir. Bu bünye modeli beş versiyondan oluşmakta ve araştırmacılar tarafından geliştirilmesi devam etmektedir (Boulanger ve Ziotopoulou, 2012;2015; 2017 ve 2022).

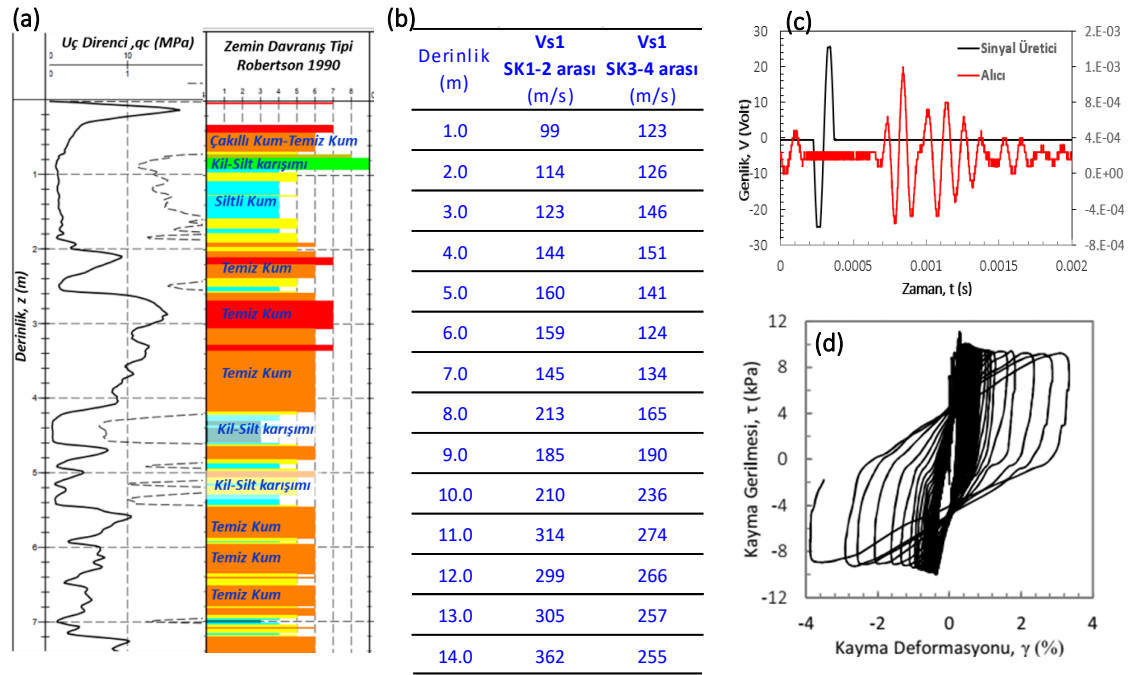
Sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerde, uygulamada kullanılan geleneksel iyileştirme yöntemleri ile sıvılaşma direnci arttırılarak depremlerin tetiklediği sıvılaşma kaynaklı oturmalar, yapı temelindeki dönmeler sınırlandırılabilir (Chiang, ve Chae, 1972; Gopal Madabhushi, 2007; Huang vd., 2008; Pantazopoulos ve Atmatzidis, 2012; You-xue vd., 2019; Nagula vd., 2021). Ayrıca son on yılda bilim ve teknoloji ile ilerlemelerle birlikte yeni sıvılaşma direncini arttırmaya yönelik iyileştirme yöntemleri geliştirilmiştir (Hamderi, ve Gallagher, 2015; Huang ve Wang, 2016; Xiao vd., 2018).

Bu çalışma kapsamında, öncelikle arazi deneyleri ile karakterizasyonu yapılan sahadan alınan sıvılaşma potansiyeli yüksek kum ve çimento enjeksiyonu ile iyileştirilmiş kum numunesi üzerinde laboratuvar da bender eleman ve CDSS deneyleri yapılarak her iki durum için de dinamik davranış belirlenmiştir. İki boyutlu zemin-yapı etkileşimini dikkate alan sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmak üzere PM4Sand sıvılaşma bünye modeli bahsi geçen CDSS deneyleri ile kalibre edilmiştir. Sahaya uygun seçilen deprem kayıtları ile gerçekleştirilen analiz sonuçları yapı oturmaları ve temel altı spektrumları açısından doğal zemin ve iyileştirme sonrası durum için karşılaştırılmıştır.

2. GEOTEKNİK ARAZİ KARAKTERİZASYONU

Bu çalışmaya esas teşkil edecek vaka analizlerinin yapıldığı inceleme sahası ve üzerinde bulunan sanayi yapısı İstanbul İli, Tuzla ilçesi sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu nedenle, sismik açıdan bir hayli aktif ve yıkıcı

olabilen Kuzey Anadolu Fayı'na yakın bir konumda ($R \approx 12$ km.) bulunmaktadır. Sağa yana atımlı (Barka, 1996; Şengör vd., 2005) bu fay sisteminde meydana gelme olasılığı yüksek olan şiddetli depremlerin inceleme sahasındaki yapıya farklı seviyelerde hasar vermesi beklenmektedir. Deprem etkisinde zeminde meydana gelen sıvılaşma durumu da sahanın yüzeye yakın üst tabakalarında gevşek orta sıkı kumlu zeminlerin bulunması ve yeraltı suyu seviyesinin yüzeye yakın olması sebebiyle önemli bir hasar etkeni olarak belirlenmiştir. Enjeksiyonla iyileştirme durumundan önce, yapılan arazi çalışmaları neticesinde derinlik boyunca CPT uç direnci (Şekil 1'a) ve sismik ölçümlerle elde edilen kayma dalgası hızları (Şekil 1b) elde edilmiştir. Ayrıca sahadan alınan sıvılaşma potansiyeli yüksek kum ve çimento enjeksiyonu ile iyileştirilmiş numuneler üzerinde laboratuvarda bender eleman (Şekil 1c) ve CDSS deneyleri (Şekil 1d) yapılmış ve dinamik davranış belirlenmiştir. İndeks özelliklerinin deneyleri sonuçlarına göre ise üniformluk katsayısı, $C_u=36$, derecelenme katsayısı $C_c=5.3$ ve ince dane oranı $FC=\%23$ olan zemin birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre SC olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 1. (a) CPT uç direnci ve zemin davranış tipi (b) Sondajlar arasında yapılan sismik ölçümler (c) Laboratuvar bender deneyi (d) Laboratuvar tekrarlı dinamik basit kesme deneyi (CDSS)

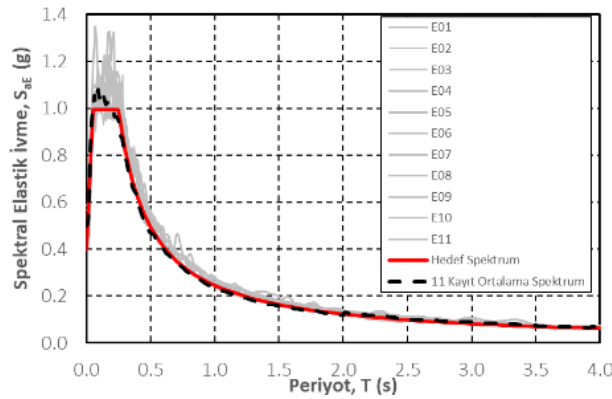
Laboratuvarda çimento enjeksiyonu ile iyileştirilmiş zeminin deprem yükleri altında davranışını belirleyebilmek için relatif sıklığı $D_R = \%45$ olan kuru kuma ağırlıkça $\%3$, $\%5$ ve $\%7$ oranında su/çimento=1.0 olan enjeksiyon yapılarak; sahada iyileştirme sonrası gerçekleştirilen jeofizik ölçümler sonucu elde edilen kayma dalgası hızına en yakın katkı oranı olan $\%7$ seçilmiştir. Şekil 2'de laboratuvarda oluşturulan $\%7$ çimento katkı numuneler gösterilmektedir. Katkılı numuneler, bender eleman ve tekrarlı dinamik kesme cihazında test edilmeden önce 7 gün kürde bekletilmiştir.



Şekil 2. (a)-(b): $\%7$ çimento katkı kum numuneleri, (c) numunenin tekrarlı dinamik kesme cihazına yerleştirilmesi

3. KUVVETLİ YER HAREKETLERİNİN SEÇİMİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Çalışma kapsamında kullanılan deprem kayıtları PEER veri tabanından (<https://ngawest2.berkeley.edu>), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY – 2018)'inde tanımlanan esaslara uygun olarak seçilmiştir (Tablo 1). Kayıtların seçiminde TBDY-2018'de tanımlanan tasarıma esas yer hareketi düzeyi spektrumu ile tam uyumlu olacak 11 adet kayıt seçilmiştir. Bölgenin depremselliği dikkate alındığında moment büyüklüğü, M_w 6.5 ila 7.5 arasında olan; 9 yana atımlı ve 2 normal fay depremi seçilmiştir. Sayısal analizlerde deprem kayıtlarının sisteme girdi olarak tanımlandığı derinlikte kayma dalgası hızı ZC yerel zemin sınıfına ait olduğundan $360 \text{ m/s} > V_s > 760 \text{ m/s}$ aralığı olarak tanımlanmıştır. Deprem kayıtlarının basit ölçeklendirme kriterlerine göre seçildiği PEER veri tabanına başlangıç ölçeklendirme faktörü kriteri olarak da 0.5-4.0 aralığı arama kriteri olarak girilmiştir (Tablo 1). Seçilen kayıtların tasarım spektrumuna tam uyumlu hale getirilmesi için SeismoMatch (2022) yazılımı kullanılırken; hem 0.1 s-4.0 s arasında 11 kayıt ortalamasının tasarım spektrumu ile tam uyumu aranmış hem de ilgili kayıtların hız-zaman ve deplasman-zaman grafiklerinin kayıt sonunda 0'a yakın değerler almasına dikkat edilmiştir. Tam uyum algoritması olarak yazılımda Hancock vd., (2006) tarafından önerilen yöntem seçilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. DD-2 Deprem seviyesine ve ZB tipi zemin sınıfına göre ölçeklendirilmiş kayıtların spektrumları ve hedef spektrumun birlikte gösterimi

Tablo 1. Seçilen Deprem Kayıtlarının ve Ölçüm Yapılan İstasyonların Bilgileri

#	RSN	Deprem / İstasyon İsmi	Yıl	M_w	Fay Tipi	R _{jb} (km)	R _{rup} (km)	V_s (m/s)	Kullanılabilir En düşük Frekans (Hz)	Ölçek Oranı
E01	285	Irpinia / Bagnoli Irpinio	1980	6.9	N	8.14	8.18	649.67	0.1125	1.74
E02	587	New Zealand/Matahina Dam	1987	6.6	N	16.09	16.09	551.30	0.25	1.08
E03	1102	Kobe/Chihaya	1995	6.9	SS	49.91	49.91	609.00	0.10	3.51
E04	1618	Duzce/ Lamont 531	1999	7.14	SS	8.03	8.03	638.39	0.075	1.87
E05	1626	Sitka, Alaska/ Sitka Observatory	1972	7.68	SS	34.61	34.61	649.67	0.08	3.57
E06	1633	Manjil, Iran/ Abbar	1990	7.37	SS	12.55	12.55	723.95	0.13	0.48
E07	3926	Tottori / OKYH08	2000	6.61	SS	24.84	24.84	694.21	0.0375	2.26
E08	3932	Tottori / OKYH04	2000	6.61	SS	26.51	26.51	709.86	0.125	1.45
E09	6891	Darfield/CSHS	2010	7.0	SS	43.6	43.6	638.39	0.0375	2.49
E10	6928	Darfield/LPCC	2010	7.0	SS	25.67	25.67	649.67	0.125	1.11
E11	8164	Duzce/IRIGM 487	1999	7.14	SS	2.65	2.65	690.00	0	0.91

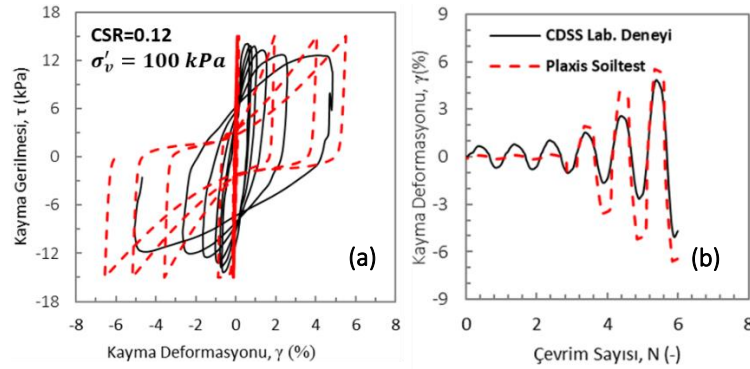
4. ANALİTİK VE SAYISAL HESAPLAMALAR

Bu çalışmada, zeminlerin sıvılaşma potansiyelini bildiren göstergeler (LSN, LPI) Tonkin ve Taylor (2013), Sonmez (2003) ve Iwasaki vd., (1978) tarafından önerilen yöntemlerle hesaplanmıştır. Zemin profilinin ilk 10 m'si dikkate alındığında iyileştirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra sıvılaşma kaynaklı yapıda oluşması beklenen oturmalar ve hasar seviyeleri Tablo 2'de verilmiştir.

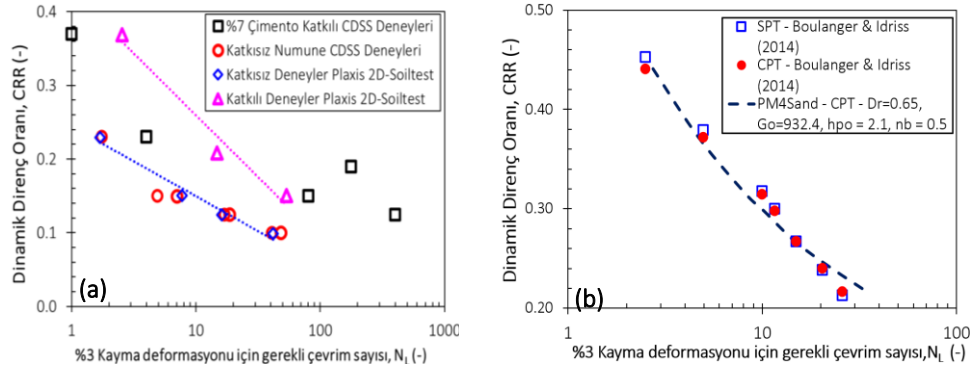
Tablo 2. Saha için sıvılaşma hesaplarından elde edilen oturma miktarı ve hasar seviyeleri

Sıvılaşmada dikkate alınan en alt derinlik	Hacimsel def. ile elde edilen oturmalar	Bina da dikkate alındığında oluşacak toplam oturma	LSN ve sıvılaşma hasar seviyesi	LPI ve sıvılaşma hasar seviyesi
10m (iyileştirme öncesi)	14.3	22.4	30.7 Orta hasar	17.9 Yüksek hasar
10m (iyileştirme sonrası)	8.7 cm	-	8.1 Hasar yok	2.2 Az Hasar

Sayısal analizlerde zemin-yapı etkileşimini dikkate alan sonlu elemanlar yazılımı olan Plaxis programı kullanılmıştır. Sıvılaşma potansiyelini ve buna bağlı oturmaları tahmin etmek için Plaxis yazılımında kullanıcı tanımlı olarak bulunan PM4Sand model ve parametreleri ,yüzye (z=3.0-7.0 m) bulunan kum tabakasından alınan numuneler üzerinde doğal ve katkılı olarak gerçekleştirilen CDSS deney sonuçları aynı yazılımın Soiltest modülü ile tutturularak elde edilmiştir(Şekil 4 (a)-(b)). Farklı dinamik gerilme oranları (CSR) ile yapılan deneylerden bulunan sıvılaşma direnç eğrisi (LRC) ile yazılımda simülasyonla elde edilen eğri katkısız ve katkılı numuneler için Şekil 5 (a)'da verilmiştir. Şekil 5(b)'de derinliği 7.0-12.0 m arasında olan siltli kuma ait CRR-çevrim sayısı ilişkisi Boulanger ve Idriss (2008,2014) tarafından önerilen CPT-SPT deneylerine bağlı olarak bulunmuş; Plaxis yazılımından elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. Laboratuvarda yapılan tekrarlı dinamik kesme deneyi ve Plaxis Soiltest modülünden elde edilen deneysel eğrilerin karşılaştırılması: (a) Gerilme- deformasyon, (b) Çevrim sayısı-deformasyon ilişkisi

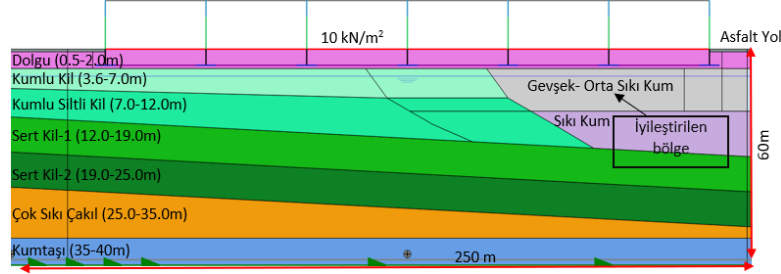


Şekil 5. (a)Laboratuvarda yapılan tekrarlı dinamik kesme deneyi ve Plaxis Soiltest modülünden elde edilen deneysel sıvılaşma direnç eğrilerinin karşılaştırılması: DR: %45 olan katkısız-katkılı numuneler, (b) Arazi deneylerinden elde edilen CRR-N ilişkileri ve Plaxis Soil Test kalibrasyonu (siyah kesik çizgi) DR: %65 olan 7.0-12.0 m arası tabaka

Bu çalışmadaki sonlu elemanlar analizi için oluşturulan zemin profili Şekil 6'da verilmiştir. Sıvılaşan zeminler için PM4Sand sıvılaşma bünye modeli (Tablo 3); sıvılaşmayan zeminler için ise küçük deformasyonu dikkate alan pekleşen zemin modeli, HSSmall (pekleşen zemin bünye modeli) kullanılmıştır (Tablo 4). PM4Sand modelde saha ve laboratuvar deneyleri ile belirlenemeyen tüm parametreler, modeli öneren araştırmacıların aynı tutulmasını önerdiği varsayılan parametreler olarak bırakılmıştır. Üst yapı için programda gömülü plate elemanlar lineer elastik model ile tanımlanmıştır. Fabrika içi hareketli yük taşıyıcı araç yükleri için 10 kPa olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3. PM4Sand bünye modeli parametreleri (iyileştirme öncesi-iyileştirme sonrası)

Parametre	Gevşek-Orta Sıkı Kum	İyileştirilmiş Gevşek-Orta Sıkı Kum	Sıkı Kum
D_{R0}	0.45	0.85	0.65
G_0	595.2	1163.0	932.4
h_{p0}	0.395	0.58	2.1



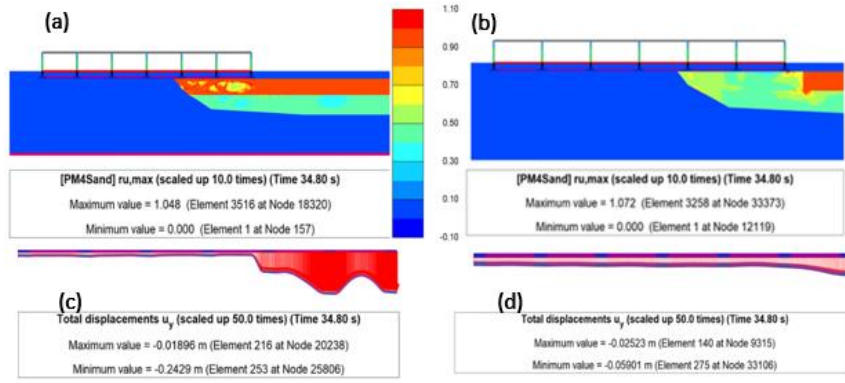
Şekil 6. Sonlu elemanlar modeli ve boyutları

Tablo 4. Sıvılaştırmayan zeminlerde kullanılan (HSSmall ve Lineer elastik model) parametreler

Parametre	Dolgu	Kumlu Kil	Kumlu Siltli Kil	Sert Kil-1	Sert Kil-2	Çok Sıkı Çakıl	Gevşek-Orta Sıkı Kum	Sıkı Kum	Kumtaşı
Malzeme Tipi	Und-A	Und-B	Und-B	Und-B	Und-B	Und-A	Und-A	Und-A	Drenajlı
γ_{unsat} (kN/m ³)	19.0	18.0	18.5	18.5	19.0	20.0	17.0	17.5	24.0
γ_{sat} (kN/m ³)	20.0	19.0	19.5	19.5	20.0	21.0	18.0	18.5	24.0
e_{ini}	0.5	0.9	0.9	0.9	0.9	0.5	0.861	0.726	0.3
k (m/gün)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.009	0.8	0.09	0.08	-
E_{50}^{ref} (MPa)	40.0	48.3	81.3	111.0	206.0	338.0	6.5	16.0	-
E_{oed}^{ref} (MPa)	40.0	48.3	81.3	111.0	206.0	338.0	6.5	16.0	-
E_{ur}^{ref} (MPa)	120.0	144.8	243.0	333.0	619.0	1016.0	19.4	50.0	-
E' (MPa)	-	-	-	-	-	-	-	-	2826.0
$\gamma_{0.7}$	0.93E-3	0.56E-3	0.63E-3	0.39E-3	0.344E-3	0.024E-3	0.36E-3	0.17E-3	-
G_{maks} (MPa)	72.0	159.8	212.0	252.7	387.0	635.0	40.5	89.5	-
m	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	-
ν_{ur}	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-
c' (kPa)	20.0	200.0	250.0	300.0	300.0	1.0	0.0	0.0	-
ϕ' (°)	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0	40.0	32.0	36.0	-
ψ' (°)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	2.0	6.0	-

5. BULGULAR

Yapılan hesaplar ve zemin davranış analizleri sonrasında enjeksiyon ile zemin iyileştirmesi öncesi durumda sıvılaşma olacağı tespit edilmiştir. Yapının dikkate alınmasıyla sıvılaşma kaynaklı oturmaların artacağı da görülmüştür. Analizler sonucunda 11 deprem kaydı için iyileştirme yapılmadan ve yapıldıktan sonra elde edilen temel altı sıvılaştırılabilir zeminlerdeki boşluk suyu basıncı katsayısı r_u konturları, temeldeki düşey deplasmanlar ve temele yakın bölgedeki zeminde boşluk suyu basıncının değişimi hesaplanmıştır (Şekil 7). Sonuçlara bakıldığında iyileştirme yapıldıktan sonra sıvılaşmanın çoğu kayıta minimuma indiği tespit edilmiştir. Zemin-yapı etkileşiminin dikkate alındığı durumda zemin iyileştirmesi neticesinde ise sıvılaşmanın minimuma indiği ve temel altındaki oturmaların azaldığı gözlemlenmiştir (Tablo 5).

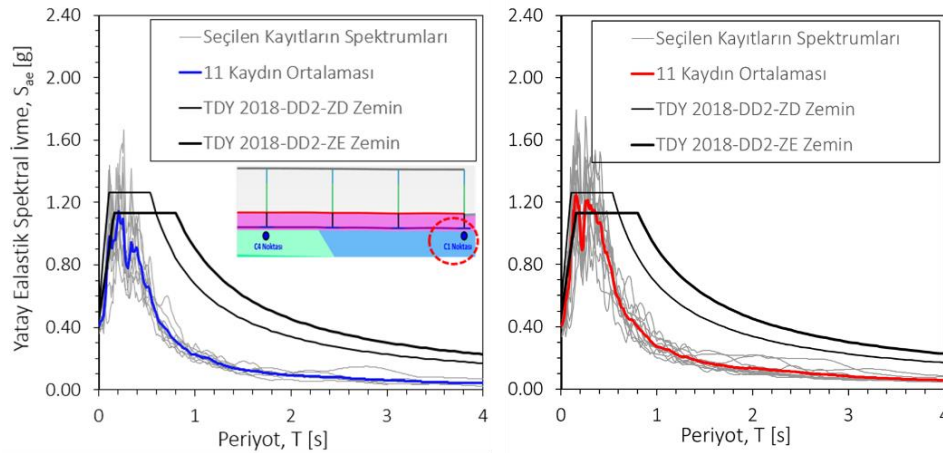


Şekil 7. E01 depremi ile yapılan analizi sonuçları (a)ve (c) iyileştirme öncesi (b) ve (d) iyileştirme sonrası

Tablo 5. 11 deprem kaydı ile gerçekleştirilen dinamik analizlerden elde edilen temel deplasmanları

Deprem No	İyileştirmeden Önceki Temel Oturmaları (cm)			İyileştirmeden Sonraki Temel Oturmaları (cm)		
	Solu	Sağı	Farklı Oturma	Solu	Sağı	Farklı Oturma
E01	1.9	24.3	22.4	2.5	5.9	3.4
E02	2.3	0.1	2.2	2.5	4.4	1.9
E03	2.3	31.5	29.2	3.0	6.6	3.6
E04	0.5	6.0	5.5	2.2	6.9	4.7
E05	2.2	43.4	41.2	3.2	9.3	6.1
E06	2.6	28.4	25.8	3.0	7.6	4.6
E07	2.4	17.6	15.2	3.3	6.2	2.9
E08	2.6	9.7	7.0	3.5	4.9	1.4
E09	1.9	47.3	45.4	2.4	10.2	7.8
E10	2.6	26.5	23.9	2.8	5.8	3.0
E11	2.3	37.3	34.9	3.0	9.5	6.5
Ortalama	2.2	24.7	23.0	2.9	7.0	4.2

İyileştirme öncesi ve sonrası durumunda, 11 kayıtlı yapılan analizlerin ortalama spektrumu TBDY 2018'de inceleme sahası için tasarım depremi spektrumları ile birlikte incelenmiştir (Şekil-8). Buna göre, sıvılaşmanın da etkisi ile iyileştirme öncesi durumda analiz sonuçları ZE yerel zemin spektrumu ile uyumlu iken; enjeksiyonla iyileştirme durumunda sıvılaşabilir sığ kum zeminde boşluk suyu basıncının oluşmaması ve rijitliğin azalmaması nedeniyle spektral ivme değerleri yükselmiş ve ZD zemin spektrumu ile uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Zemin davranış analizi ile bulunan 11 deprem kaydının temel altı ortalama yatay ivme spektrumu ile TBDY-2018 ZD ile ZE zemin sınıflarının ivme spektrumlarının karşılaştırılması (DD-2 deprem düzeyi için) a)iyileştirme öncesi b) iyileştirme sonrası

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sahada yapılan arazi çalışmaları değerlendirilerek idealize edilmiş bir zemin profili için literatürde kabul görmüş ve sıvılaşmayı belirleyen analitik yaklaşımlar kullanılarak sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Analitik yöntemlerin sonuçlarına göre belirlenen zemin profili Plaxis 2D ile modellenerek ve zaman-tanım alanında, yerel zemin sınıfına uygun ölçeklenmiş 11 adet kayıt kullanılarak dinamik efektif gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, enjeksiyonla iyileştirme yönteminin kumlu zeminlerde sıvılaşma kaynaklı oturmaların ve dönmelerin azaltılmasında etkili bir yöntem olduğu tespit edilmiştir. Buna ilaveten, iyileştirme öncesi ve sonrası durumda zemin ortamında deprem etkisinde oluşan ilave boşluk suyu basıncı değerleri karşılaştırılmış ve iyileştirme sonrası durumu temsil eden analizde boşluk suyu basıncı oluşumunun engellendiği ortaya konmuştur. Etkatif gerilme analizleri sonuçları üst yapıya etkiyecek spektral ivmeler bakımından karşılaştırıldığında; iyileştirme sonrasında sıvılaştırılabilir kumda deprem kaynaklı ilave boşluk suyu basınçları oluşmaması ve buna bağlı ortam rijitliğinin azalmaması nedeniyle spektral değerler artmıştır. Böylece, deprem yönetmeliğinde önerilen yerel zemin sınıflarına ait yatay tepki spektrumları ile birlikte incelendiğinde temel altı ortalama yatay spektrumun iyileştirme sonrasında ZE zemin sınıfından ZD sınıfına girdiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Barka, A. (1996). "Slip Distribution along The North Anatolian Fault Associated with The Large Earthquakes of The Period 1939 To 1967". Bulletin of the Seismological Society of America, 86(5), 1238-1254.
- Boulanger, R. W. (2010). "A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-10/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, 77 pp.
- Boulanger, R. W., and Ziotopoulou, K. (2012). "PM4Sand (version 2): A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-12/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, May, 100 pp.
- Boulanger, R. W., and Ziotopoulou, K. (2015). "PM4Sand (version 3): A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-15/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp.
- Boulanger, R. W., and Ziotopoulou, K. (2017). "PM4Sand (version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp.
- Boulanger, R. W., and Ziotopoulou, K. (2022). "PM4Sand (Version 3.2): A sand plasticity model for earthquake engineering applications." Report No. UCD/CGM-22/02, Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, CA, March, 112 pp.
- Chiang, Y. C., ve Chae, Y. S. (1972). "Dynamic Properties of Cement Treated Soils". Highway Research Record, 379, 39-51.
- Gopal Madabhushi, S. P. (2007). "Ground Improvement Methods for Liquefaction Remediation". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 11(4), 195-206.
- Hancock ve diğ., (2006). "An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion Using Wavelets". Journal of Earthquake Engineering, 10(spec01),67-89
- Hamderi, M., ve Gallagher, P. M. (2015). "Pilot-Scale Modeling of Colloidal Silica Delivery to Liquefiable Sands". Soils and Foundations, 55(1), 143-153.
- Huang, Y., ve Wang, L. (2016). "Laboratory Investigation of Liquefaction Mitigation in Silty Sand Using Nanoparticles". Engineering geology, 204, 23-32.
- Huang, Y., Zhang, F., Yashima, A., ve Ye, W. (2008). "Numerical Simulation of Mitigation for Liquefaction-Induced Soil Deformations in A Sandy Ground Improved By Cement Grouting". Environmental Geology, 55, 1247-1252.
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K., ve Yasuda, S. (1978). "A practical Method for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan". 2nd International Conference on Microzonation for Safer Construction Research and Application, 885-896
- Nagula, S. S., Hwang, Y. W., Dashti, S., ve Grabe, J. (2021). "Numerical Investigation of Liquefaction Mitigation Potential with Vibroflotation". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 146, 106736.

- Öser, C., Sargın, S., Korkmaz, G., Altınok, E. (2023). "06 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık Mw:7.7, Elbistan Mw:7.6 Depremlerinde oluşan Geoteknik ve Yapısal Hasarlara Ait Bulgular" Tübitak Deprem Araştırmaları Sanal Konferansı.
- Pantazopoulos, I. A., ve Atmatzidis, D. K. (2012). "Dynamic Properties of Microfine Cement Grouted Sands". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 42, 17-31.
- SeismoSoft (2022). "SeismoMatch-Earthquake Software for Response Spectrum Matching"(çevrimiçi) İndirilen web sitesi: <https://seismosoft.com/products/seismomatch/>
- Sonmez, H., (2023). "Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area(Inegol, Turkey)".*Environmental Geology*, 44, 862-871, <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0831-0>
- Şengör, A. M. C., Tüysüz, O., Imren, C., Sakıncı, M., Eyidoğan, H., Görür, N., ... ve Rangin, C. (2005). "The North Anatolian Fault": A new look. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 33, 37-112.
- Tonkin & Taylor, Ltd. (2013). "Liquefaction Vulnerability Study, Report to Earthquake Commission". TandTref 52020.0200/v1.0
- TBDY. (2018). "Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği". T. C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- Xiao, P., Liu, H., Xiao, Y., Stuedlein, A. W., ve Evans, T. M. (2018). "Liquefaction Resistance of Bio-Cemented Calcareous Sand". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, 9-19.
- You-xue, Z. O. U., Rui, W. A. N. G., ve Jian-min, Z. H. A. N. G. (2019). "Numerical Investigation on Liquefaction Mitigation of Liquefiable Soil Improved by Stone Columns". *工程力学*, 36(10), 152-163.