

Sahilkent (Bafra, Samsun) yöresindeki alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin CPT verileri kullanılarak araştırılması

Investigating liquefaction potential of alluvial soils in Sahilkent (Bafra, Samsun) area using CPT data

Muhammet Oğuz SÜNNETCİ^{*1,a}, Hakan ERSOY^{1,b}

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon

• Geliş tarihi / Received: 17.10.2020

• Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 31.12.2020

• Kabul tarihi / Accepted: 15.01.2021

Öz

Bu çalışmada Sahilkent (Bafra, Samsun) yöresindeki kil, silt ve kum boyutlu malzemelerden oluşan alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyeli CPT verileri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında Bafra ilçesi genelinde her biri 15 metre derinliğinde 20 adet sondaj yapılmış, bunlardan Sahilkent yöresindeki 5 tanesinden UD tip örnek alıcılarla her 1 metrede 1 adet olacak şekilde örselenmemiş zemin örnekleri temin edilmiştir. Bu örneklerden silt ve kum oranı yüksek olan 20 tanesi üzerinde ıslak elek, hidrometre, plastik limit, likit limit ve doğal su muhtevası tayinleri yapılmıştır. Yapılan ön değerlendirmede farklı derinliklerdeki bazı bölgelerde sıvılaşma potansiyelinin olduğu belirlenmiş ve detaylı sıvılaşma analizlerin yapılabilmesi amacıyla 5 sondaj kuyusunun 1'er metre yakınında 15'er metrelik CPTu deneyi uygulanmıştır. CPTu deneylerinde koni uç direnci, kenar sürtünmesi, efektif gerilme, rölatif sıklık vb. veriler her 5 cm'de bir kaydedilmiş, sıvılaşma analizlerinde bu verilerin her 1 metre derinlik için ortalamaları alınmıştır. Sıvılaşma analizleri Mw=7.2'lik bir deprem senaryosu için yapılmış ve çalışma alanındaki 15 metrelik zemin katmanının sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda Sahilkent yöresinde Mw=7.2'lik bir deprem senaryosu için herhangi bir sıvılaşma olayının gerçekleşmeyeceği belirlenmiştir. Alüvyon malzemesinin ince daneli malzeme oranının yüksek olması, var olan kum ve siltli kum seviyelerinin ise çok sıkı ince daneli zemin katmanları arasında yer almasının zeminin sıvılaşmaya karşı mukavemetini arttırdığı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Alüvyon, Bafra kıyı ovası, CPT, Sıvılaşma, Zemin

Abstract

In this study, liquefaction potential of the alluvial soils consisting of clay, silt, and sand sized materials in Sahilkent (Bafra, Samsun) area was investigated using CPT data. Within the scope of the study, 20 boreholes each having a depth of 15 meters were drilled throughout Bafra district, and one undisturbed soil sample were obtained per meter from 5 of these boreholes located in Sahilkent area. Wet sieve, hydrometer, plastic limit, liquid limit, and natural water content determinations were conducted on 20 samples with high silt and sand content. In the preliminary evaluation, it was determined that there is a liquefaction potential in some regions at different depths, and in order to perform detailed liquefaction analyses, 15-meter-deep CPTu were carried out in 1 meter distance from those 5 borehole locations. In CPTu tests, data including cone tip resistance, sleeve friction, effective stress, relative stiffness, etc. were recorded every 5 cm, and average values of these data for each meter depth were used in the liquefaction analysis. Liquefaction analyses was conducted for an earthquake scenario of Mw = 7.2 and the liquefaction potential of the 15-meter soil layer in the study area was determined. As a result of the analyses, it was determined that no liquefaction will occur for an earthquake scenario of Mw = 7.2 in Sahilkent region. It is thought that high fine-grained content of the alluvium, and the fact that existing clean sand levels are located between fine-grained soil layers increase the resistance of the soil against liquefaction.

Keywords: Alluvium, Bafra coastal plain, CPT, Liquefaction, Soil

*a Muhammet Oğuz SÜNNETCİ; moguzsunnetci@ktu.edu.tr, Tel: (0462) 377 35 05, orcid.org/0000-0002-5215-3143

^b orcid.org/0000-0001-5556-547X

1. Giriş

Sıvılaşma, suya doymuş granüler zeminlerin sismik yükler altında tekrarlı gerilmelere maruz kalarak zemin iskeletinin yeniden düzenlenmesi, bu sırada boşluk suyu basıncının aşırı derecede yükselerek toplam gerilmeye eşit olması sebebiyle efektif gerilmenin sıfıra düşmesi ve zeminin bir sıvı gibi davranması olarak tanımlanmaktadır. Sıvılaşma sırasında zeminin kayma dayanımı önemli ölçüde azalmakta ve zemin yapısında büyük deformasyonlar meydana gelmektedir. Genellikle sismik yükün kalkmasıyla birlikte sıvılaşma olayının zemin üzerindeki etkisi de sonra ermekte, zemin kayma mukavemetini geri kazanmaktadır (Marcuson, 1978).

Sıvılaşma olayı 1964 yılında Japonya'da meydana gelen Niigata depreminin ardından yerbilimleri dünyasının dikkatini çekmiştir. Niigata depremi sonrasında bilim insanları, zarar gören binaların çok büyük bir kısmının gevşek ve suya doymuş zeminler üzerinde inşa edilmiş olduğunu, ayrıca bu binaların çoğunun çok düşük yapısal hasarlarla devrildiğini veya zemine gömüldüğünü fark etmişlerdir. Aynı yıl Kanada'da meydana gelen 9.2 büyüklüğündeki Alaska depreminin ardından benzer olayların gözlenmesiyle birlikte sıvılaşma olayı mühendisler ve sismologlar tarafından araştırılmaya başlanmıştır (Davis, 1960; Seed ve Wilson, 1967).

Sıvılaşma olayının belli zeminlerde ve belli koşullar altında geliştiği bilinmektedir (Seed ve Wilson, 1967; Seed ve Idriss, 1971; Iwasaki vd., 1984). Zemin malzemesinin kohezyonu, plastisitesi, rölatif sıklığı, dane dağılımı ve drenaj durumu sıvılaşma potansiyelini doğrudan etkileyen etmenlerdir. Literatürde düşük kohezyonlu siltli zeminlerde, kohezyonsuz kumlu zeminlerde ve az da olsa çakıllı zeminlerde sıvılaşma olayının gerçekleştiği ortaya konmuştur (Youd vd., 1985). Zemin türünden bağımsız olarak boşluk suyu basıncının yükselmesine neden olacak geçirimsiz tabakaların ve sismik bir yükün varlığı sıvılaşma olayının gerçekleşmesinde en önemli faktörlerdir. Seed ve Idriss (1982) tarafından önerilen Çin Kriterine göre bir zeminin sıvılaşabilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gereklidir:

1. Ağırılıkça kil yüzdesi < %15 olmalı.
2. Likit limit < %35 olmalı.
3. Doğal su muhtevası likit limitin 0.9 katından daha yüksek olmalı.

Bray vd. (2004) bu kriterin her zaman geçerli olmadığını 1999 Kocaeli depreminden etkilenen

Adapazarı'nda yaptıkları çalışmalarla göstermişlerdir. Bu çalışmada Çin Kriterine uymayan birçok zemin katmanının sıvılaşma gösterdiği belirtilmiştir. Önalp ve Arel (2002) ve Bol vd. (2010), Çin Kriterini 1999 Kocaeli depreminden sonra Adapazarı siltlerine uyarlamışlar ve çeşitli değişiklikler önermişlerdir.

Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini irdelemek üzere birçok yöntem ortaya atılmıştır (Seed ve Idriss 1971; Dobry vd., 1981; Seed vd., 1981; Iwasaki vd., 1984). Bu yöntemler temelde zemine etkiyen tekrarlı kayma oranının (CSR) zeminin tekrarlı dayanım oranı (CRR) ile kıyaslanmasına dayanmaktadır. Herhangi bir zemin için CSR>CRR olduğunda bu zemin sıvılaşma potansiyeline sahip olarak değerlendirilmektedir. Zeminlere ait CRR değeri laboratuvar veya arazi deneyleriyle belirlenebilmektedir. Çevirmeli üç eksenli, çevirmeli direkt kesme ve çevirmeli torsiyon deneyleri en çok tercih edilen laboratuvar deneyleriyken, arazide standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT) ve jeofizik ölçümler (kayma dalgası hızı, V_s) kullanılmaktadır. SPT'nin özellikle örnek alıcı aparata iletilen enerjiye bağlı olarak zaman zaman tutarsız sonuçlar verebilmesi (Robertson ve Wride, 1998), buna karşılık CPT'nin daha tekrarlanabilir ve sürekli veri alınmasına izin veren bir yöntem olması sıvılaşma potansiyeli araştırmalarında CPT verilerinin kullanımını son yıllarda önemli ölçüde artırmıştır (Dobry vd., 2019; Kurnaz ve Kaya, 2019; Ntritos ve Cubrinovski, 2020). Birçok araştırmacı (Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve de Alba, 1986; Shibata ve Teparaska, 1988; Stark ve Olson, 1995) CPT verileri ile temiz kum ve siltli zeminlerin CRR değerleri arasında bağıntılar önermişlerdir. 1996 yılında Birleşik Devletler Ulusal Deprem Mühendisliği Araştırmaları Merkezi (NCEER) tarafından Utah'ta düzenlenen sıvılaşma çalıştayında Robertson ve Wride (1998) tarafından arazi verileri ve edinilen tecrübeler ışığında CPT'nin sıvılaşma potansiyeli araştırmalarında kullanılması amacıyla önerilen metodoloji gerek proje mühendisleri gerekse de bilim insanları tarafından benimsenmiştir (Youd ve Idriss 2001).

Ülkemizde yapılan sıvılaşma riski/potansiyeli araştırmalarında CPT deney verilerinin kullanıldığı çalışmalar olsa da (Sönmez vd., 2015; Sert vd., 2018), SPT deney verilerinin kullanıldığı çalışmalar çok daha fazladır (Duman, 2013; Esin, 2015; Işık vd., 2016; Ateş, 2017). Söz konusu deneylerden elde edilen verilerin kalitesi ve tekrarlanabilirliği göz önüne alındığında bu durumun bir eksiklik olduğu söylenebilir.

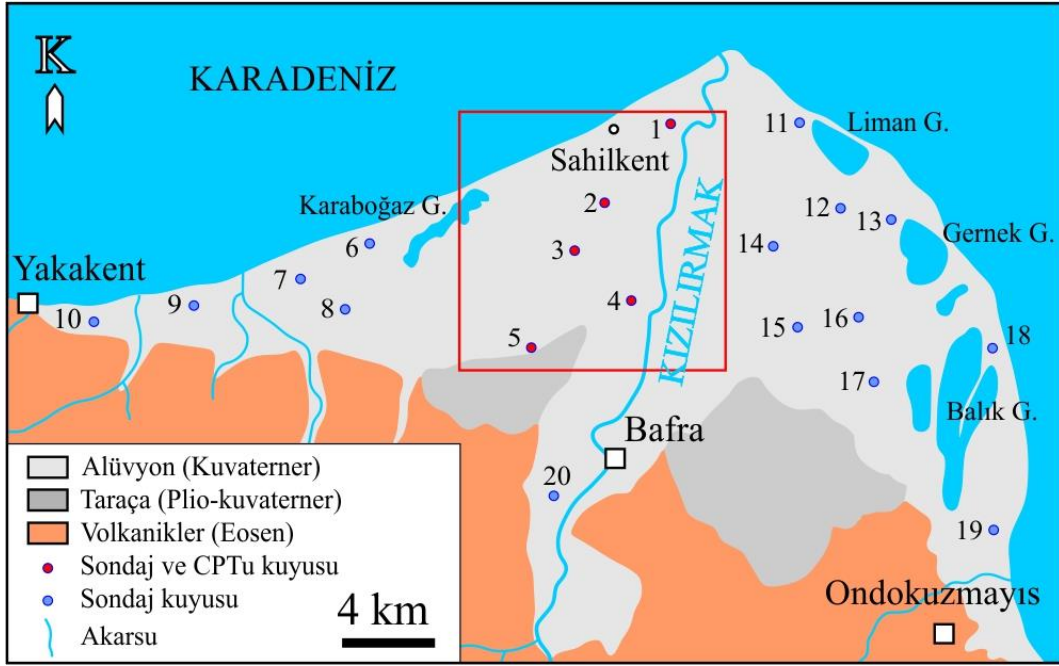
Marmara Bölgesi'nin gerek sismik faaliyetlerin yoğun olması gerekse de Adapazarı silti gibi granüler zeminlerin geniş bir alanda yüzeyleme vermesinden dolayı sıvılaşma riski yüksek olan bir bölge olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte Karadeniz Bölgesi'nin sahil kesiminde geniş bir alana yayılan siltli-kumlu alüvyon zeminlerin varlığı ve bu bölgenin Kuzey Anadolu Fayı'na yakın olması nedeniyle sıvılaşma riski bakımından araştırılması gereken bir bölge olduğu da ortadadır. Özellikle Samsun ve Ordu illerinde sıvılaşma riski taşıyan zeminler üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur. Ertek (2015) tarafından yapılan çalışmada Atakum ilçesinin sıvılaşma potansiyeli ve buna bağlı muhtemel oturmalar belirlenmiş, sıvılaşma analizlerinde SPT deney verileri kullanılmıştır. Öztürk (2016) tarafından yapılan çalışmada Tekkeköy bölgesinin sıvılaşma potansiyeli SPT deney verilerini kullanarak Seed ve Idriss (1971) yöntemine göre belirlenmiştir. Dipova ve Cangir (2017) yaptıkları çalışmada CPT deneylerinin istenilen derinliklere ulaşamaması sebebiyle sıvılaşma analizlerinde SPT deney verilerini kullanmak durumunda kalmışlardır.

Bu çalışmada jeolojik, jeomorfolojik ve sismolojik özellikler bakımından sıvılaşma potansiyeline sahip olan Samsun ili Bafra ilçesi Sahilkent yöresindeki alüvyal zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin CPT deney verileri kullanılarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma alanının tamamını kaplayan alüvyon malzemesi kil, silt ve kum boyutlu malzemelerden oluşmaktadır. Özellikle silt ve kumlu zeminlerin sıvılaşma potansiyeli taşıdığı bilinmekle birlikte, son zamanlarda yapılan çalışmalar killi zeminlerde dahi sıvılaşma olayının belli koşullar altında gelişebileceğini göstermiştir (Bilge ve Çetin, 2017). Bölgede akarsu tarafından beslenen yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden itibaren yaklaşık 2 metre veya daha sığ derinliklerde olması ve birçok yerleşim yerinin bulunması bölgenin sıvılaşma potansiyeli açısından araştırılması gerekliliğini doğurmaktadır. Bu amaç doğrultusunda aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır:

- Bafra ilçesinin farklı bölgelerinde 15 metre derinliğinde 20 adet sondaj çalışması yapılmış ve Sahilkent yöresindeki 5 adet sondajdan her metrede bir adet olacak şekilde örselenmemiş zemin örnekleri alınmış,
- Zemin örneği alınan sondaj kuyularına yakın olacak şekilde (yatay mesafe < 1 m) 5 adet boşluk suyu basıncı ölçümlü Koni Penetrasyon Tesi (CPTu) çalışması yapılarak sıvılaşma analizlerinde kullanılacak olan parametreler elde edilmiş ve aynı zamanda zemin davranış tipi profili belirlenmiş,
- Alınan zemin örneklerinden silt ve kum oranı yüksek olan 20 örnek üzerinde ıslak elek, hidrometre, likit limit, plastik limit ve doğal su muhtevası deneyleri yapılmış,
- Tüm veriler ışığında Youd ve Idriss (2001) tarafından derlenen yöntemle göre sıvılaşma analizleri yapılmış,
- Son olarak Iwasaki (1978) tarafından önerilen yöntemle çalışma alanının sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

2. Çalışma alanının jeolojisi

Çalışma alanı Samsun ili Bafra ilçesinin 12 km kuzeybatısındaki Sahilkent yöresidir (Şekil 1). Ülkemizin en büyük ikinci drenaj alanına sahip nehri olan Kızılırmak'ın denize döküldüğü Bafra'da nehrin taşıdığı alüvyon malzemesi çok geniş bir alanda yüzeyleme vermektedir. Çalışma alanındaki en genç birim olan bu alüvyon malzemesi Geç Kuvaterner (Holosen) yaşlı yeni alüvyon ve Erken Kuvaterner (Pleistosen) yaşlı eski alüvyon olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Eski alüvyon Kızılırmak'ın sağ ve sol sahillerinde seki ve taraçalar şeklinde gözlenirken yeni alüvyon Karadeniz kıyısına kadar uzanan sulak alanları ve düzlükleri oluşturmaktadır. Her iki birimin yüzeylendiği bölge ise güncel delta düzlüğü veya Bafra kıyı ovası olarak isimlendirilmektedir (Turoğlu, 2010). Bu birimlerin altında Eosen yaşlı volkanik kayalar yer almaktadır (Temizel vd., 2016; Fırat Ersoy ve Karaca, 2019).



Şekil 1. Çalışma alanının jeoloji haritası ile sondaj ve CPT lokasyonları

3. Malzeme ve yöntem

3.1. Sondaj çalışmaları

Çalışma kapsamında 15 metre derinliğinde 20 adet sondaj yapılmış ve çalışma alanı olan Sahilkent yöresindeki 5 adet sondajdan her bir metrede 1 adet örselenmemiş zemin örneği temin edilmiştir. Örnekler özel olarak yaptırılan 60 cm uzunluğunda (maksimum örnek uzunluğu 50 cm) ince yanaklı UD tip örnek alıcılarla alınmış ve alınan örnekler hemen alt ve üst yüzeyleri parafinlenerek streç filme sarılmıştır (Şekil 2). Örselenmemiş örnek alımından sonra sondaj tabanında kalan diğer 50 cm'lik kısım örselenme etkisini ortadan kaldırmak amacıyla auger ile geçildikten sonra sıradaki örselenmemiş örnek temin edilmiş, böylece her 1 metrede 1 adet 50 cm uzunluğunda örselenmemiş örnek alınmıştır. Elde edilen örnekler üzerinde ASTM standartlarına (ASTM, 2009, 2010, 2011) uygun olarak ıslak elek analizi, hidrometre, likit

limit, plastik limit ve doğal su muhtevası tayinleri yapılmıştır.

3.2. CPT çalışmaları

Çalışma kapsamında Sahilkent yöresinde 5 adet CPT yapılmış (Şekil 2), CPT lokasyonları bu bölgedeki 5 adet sondaja yakın olacak şekilde (yatay mesafe ≤ 1 m) seçilmiştir. Zemine ait CSR değerinin hesaplanmasında efektif gerilme değerleri kullanılacağı için CPT deneyleri piezokoni (CPTu) adı verilen, koni uç direnci ve kenar sürtünmesine ek olarak gözenek suyu basıncını da ölçebilen koni kullanılarak yapılmış ve tüm kuyularda 15 metre derinliğe inilmiştir. Deney sırasında koni uç direnci, kenar sürtünmesi, gözenek suyu basıncı ve rölatif sıkılık dahil olmak üzere alüvyon malzemesine ait birçok parametre her 5 cm'de bir kaydedilmiştir. Sıvılaştırma analizlerinde bu veriler her 1 metre derinlik için ortalamaları alınarak kullanılmıştır.



Şekil 2. (a) Alınan örselenmemiş zemin örneklerin parafınle kaplanması. (b) CPTu deneylerinde kullanılan Gouda® mobil CPT cihazı

CPT verileri kullanılarak yapılan sıvılaşma analizlerinde Youd ve Idriss (2001) tarafından derlenen metodoloji kullanılmıştır. Bu metodoloji temel olarak Robertson ve Wride (1998) tarafından önerilen yöntemi esas alsa da başka araştırmacıların önerilerini de kapsamaktadır. Yöntemin detaylı açıklaması CPT Verileri ile Sıvılaşma Analizi bölümünde verilmiştir.

3.3. CPT verileri ile sıvılaşma analizi

CPT 1930'lu yıllarda ilk kez uygulanmış olsa da (Huizinga, 1942; Plantema, 1948) günümüzdeki halini 1960'ların ikinci yarısından itibaren alan ve giderek daha yaygın olarak kullanılmakta olan bir arazi deneyidir. Begemann (1969) koni ucundaki direncin belirlenmesine ek olarak konik ucun kenarına eklediği adhezyon kaplamasıyla kenar sürtünmelerini de hesaplamayı başarmış ve bu şekilde uç direnci/kenar sürtünmesi oranını kullanarak zemin katmanlarının sınıflandırılabilmesini sağlamıştır. Senneset ve Janbu (1985) koni ucuna boşluk suyu basıncını ölçen bir aparat yerleştirerek kumlu ve killi zeminlerin efektif kayma direnci parametrelerini belirlemiştir. 1980'li yıllardan itibaren ise CPT verileri zeminlerin sıvılaşma tehlikesinin belirlenmesinde kullanılmaya başlanmıştır (Robertson ve Campanella, 1985; Shibata ve Teparaska, 1988). Neredeyse 70 yıllık arazi deneyimi, vaka çalışması ve gözlem birikimi ile CPT deneyi günümüzde zeminlere ait CRR değerinin arazide belirlenmesinde kullanılan en yaygın ve güvenilir deney haline gelmiştir (Dobry

vd., 2019; Kurnaz ve Kaya, 2019; Ntritsos ve Cubrinovski, 2020).

CPT verileri yardımıyla 7.5 büyüklüğündeki bir deprem için zemine ait CRR değeri aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilmektedir (Robertson ve Wride, 1998):

$$(q_{cIN})_{cs} < 50 \text{ ise } CRR_{7.5} = 0.833 [(q_{cIN})_{cs}/1000] + 0.05$$

$$(q_{cIN})_{cs} \leq 160 \text{ ise } CRR_{7.5} = 93 [(q_{cIN})_{cs}/1000]^3 + 0.08$$

burada;

$(q_{cIN})_{CS}$: Temiz kum için normalize koni uç direnci,

$CRR_{7.5}$: Mw=7.5 depremler için zemine ait tekrarlı dayanım oranıdır.

Seed and Idriss (1971) bir deprem durumunda zemine etkiyecek olan CSR değerini belirlemek için aşağıdaki eşitliği önermişlerdir:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (1)$$

burada; a_{max} deprem tarafından yüzeyde üretilen en büyük yatay yer ivmesi, g yerçekimi ivmesi, σ_{v0} ve σ'_{v0} sırasıyla incelenen derinlikteki toplam ve efektif gerilmeler, r_d ise zemin esnekliğinden ileri gelen gerilme azaltma katsayısıdır. Liao ve Whitman (1986)'a göre r_d aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilmektedir:

$$z \leq 9.15 \text{ m ise } r_d = 1.0 - 0.00765z \quad (2a)$$

$$9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m ise } r_d = 1.174 - 0.0267z \quad (2b)$$

burada z metre cinsinden analiz yapılan zemin katmanının derinliğidir.

Ancak bilgisayar ortamında daha kolay programlanabilmesi nedeniyle aşağıdaki eşitlik rutin mühendislik uygulamalarında kullanılabilir (Youd ve Idriss, 2001):

$$r_d = (1 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}) / (1 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2) \quad (2c)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, incelenen zemin profilinin herhangi bir derinliğinde $CSR > CRR$ olması zeminin sıvılaşma riski taşıdığı anlamına gelmektedir. Yapılan arazi gözlemleri CRR değerlerinin artan normal ve efektif gerilmelerle arttığını göstermiştir. Bu nedenle zeminlere ait CRR değerleri belirlenirken arazide ölçülen koni uç direnci (q_c) değeri efektif gerilmeye göre normalize edilmelidir (Robertson ve Wride, 1998):

$$q_{c1N} = C_Q \left(\frac{q_c}{P_a} \right) \quad (3)$$

$$C_Q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (4)$$

burada; q_{c1N} normalize koni uç direnci, C_Q koni uç direnci düzeltme faktörü, P_a σ'_{v0} ile aynı birimde olmak üzere 1 atmosfere karşılık gelen basınç (0.1 MPa veya 100 KPa), n zemin türüne bağlı üstel değişkendir. C_Q için 1.7'den büyük değerler kullanılmamalıdır. n temiz kum zeminler için 0.5, kil zeminler için 1.0, silt ve siltli kum zeminler için ise 0.5-1.0 arasında değerler almaktadır. Normalize koni uç direnci (q_{c1N}) birimsiz bir değerdir.

CPT deneyi sırasında ölçülen koni uç direnci (q_c) ve kenar sürtünmesi (f_s) değerleri zeminin dane boyu dağılımına ve plastisitesine bağlı olarak değişmektedir. İri daneli zeminler tipik olarak yüksek koni uç direnci – düşük kenar sürtünmesi değerlerine sahip olurken ince daneli ve plastik zeminler düşük koni uç direnci – yüksek kenar sürtünmesi değerlerine sahiptir. Bu farklılık CPT

sürtünme oranı adı verilen f_s/q_c oranından faydalanarak zeminlerin sınıflandırılabilmesini mümkün kılmaktadır (Şekil 3). Zemin sınıfını, daha doğru bir tanımla zemin davranışı tipini karakterize eden I_c değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

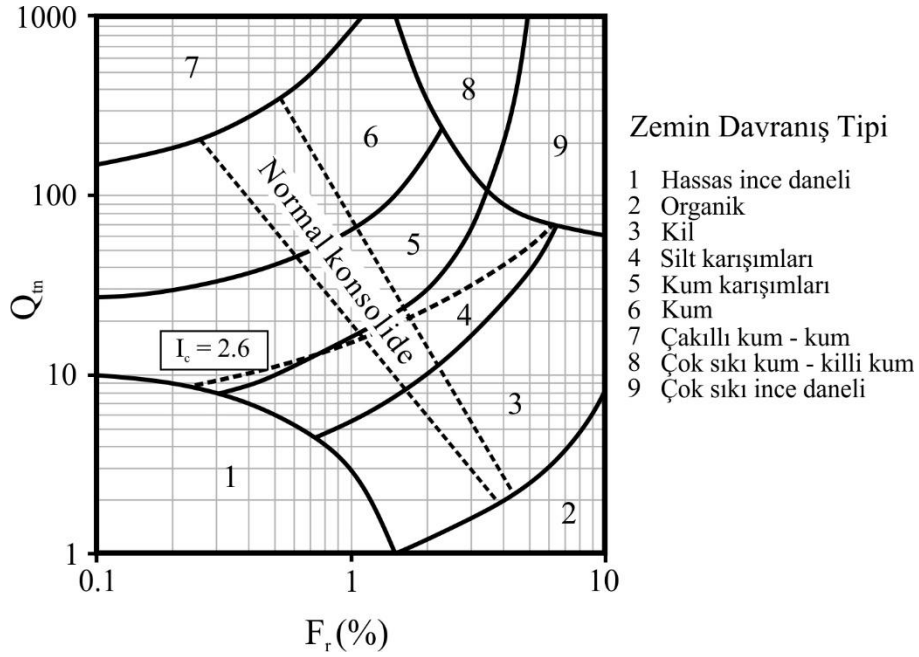
$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \quad (5)$$

burada;

$$Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{v0}}{P_a} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \quad (6)$$

$$F(\%) = \frac{f_s}{q_c - \sigma_{v0}} \times 100 \quad (7)$$

Robertson ve Wride (1998) Eşitlik 5'te öncelikle $n = 1.0$ alınarak Q ve buna bağlı I_c değerinin hesaplanmasını önermiştir. Hesaplanan I_c değeri 2.6'dan büyükse zeminin killi zemin sınıfında olduğu ve sıvılaşma göstermeyeceği kabul edilerek analiz sonlandırılır. Eğer hesaplanan I_c değeri 2.6'dan küçükse $n = 0.5$ alınarak Q ve I_c değerleri tekrar hesaplanır. Bu durumda hesaplanan I_c değeri 2.6'dan küçükse zeminin plastik olmayan granüler zemin sınıfında olduğu kabul edilir ve I_c değeri sıvılaşma dayanımının belirlenmesinde kullanılır. Eğer $n = 0.5$ için hesaplanan I_c değeri 2.6'dan büyükse $n = 0.7$ alınarak Q ve I_c değerleri yeniden hesaplanır ve I_c değeri bu haliyle sıvılaşma dayanımının belirlenmesinde kullanılır.



Şekil 3. Robertson (1990) tarafından önerilen Zemin Davranış Tipi sınıflaması

Siltli zeminler için belirlenen normalize koni uç direnci (q_{c1N}) temiz kumlar (Birleştirilmiş Zemin Sınıflaması'nda SW-SP sınıfındaki zeminler; ASTM, (2011) için aşağıdaki eşitlik kullanılarak düzeltilir (Robertson ve Wride, 1998):

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N} \quad (8)$$

burada;

$$I_c \leq 1.64 \text{ için } K_c = 1.0 \quad (9a)$$

$$I_c > 1.64 \text{ için } K_c = -0.403I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75I_c - 17.88 \quad (9b)$$

Yukarıda verilen eşitlikler ile belirlenen CRR değeri yalnızca 7.5 büyüklüğündeki depremler için uygulanabilmektedir. Temiz kumlar için belirlenen ($q_{c1N})_{cs}$ değerleri büyüklük düzeltme faktörü (MSF) denilen katsayılarla çarpılarak CRR değerleri deprem büyüklüğüne bağlı olarak artırılır ya da azaltılır. Genel olarak MSF aşağıdaki şekilde uygulanır:

$$FS = (CRR_{7.5}/CSR)MSF \quad (10)$$

burada FS güvenlik sayısıdır.

Literatürde farklı araştırmacıların önerdiği MSF değerleri bulunmasına karşın (Seed ve Idriss, 1982; Ambraseys, 1988; Arango, 1996; Andrus ve Stokoe, 1997) bunlardan en çok tercih edileni Seed ve Idriss (1982) tarafından önerilen düzeltme faktörüdür:

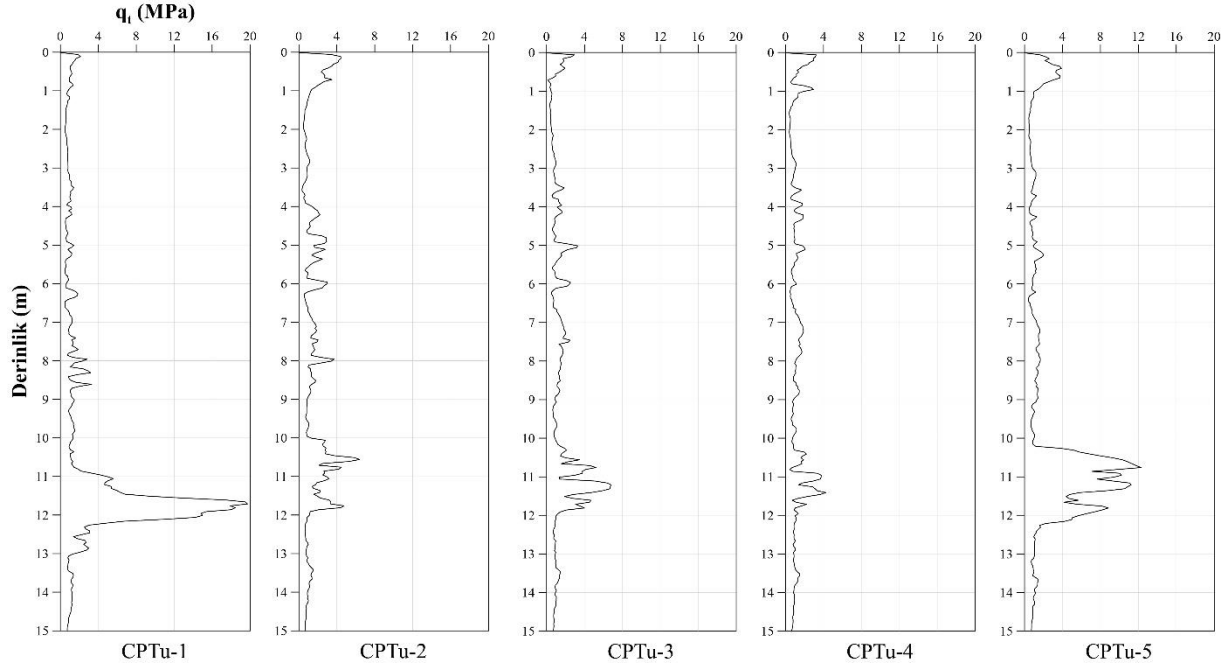
$$MSF = 10^{2.24} / (M_w)^{2.56} \quad (11)$$

burada M_w deprem moment büyüklüğüdür.

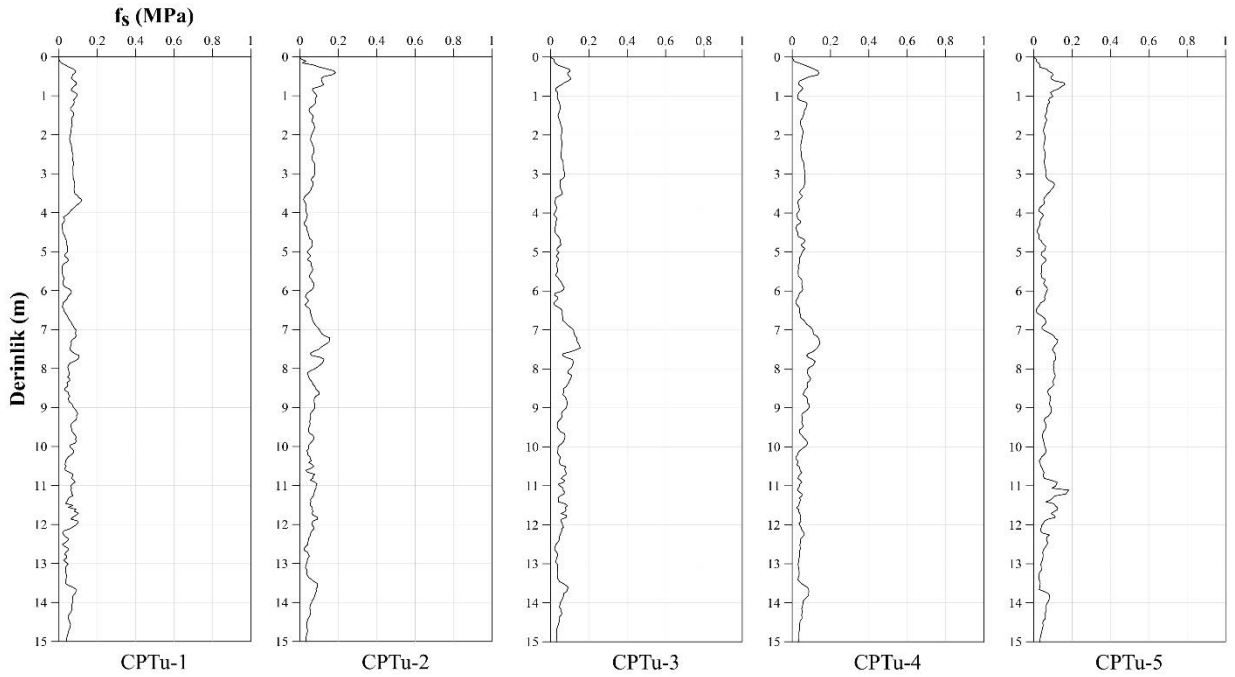
4. Bulgular

4.1. CPTu verileri

CPTu deneylerinden elde edilen ham (arazi) koni uç direnci (q_c) ve kenar sürtünmesi (f_s) değerlerinin derinlikle değişimi Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4 ve 5 incelendiğine özellikle 10-13 metreler arasında yüksek q_c - düşük f_s değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu veriler sıvılaştırma potansiyeline sahip granüler zeminlerin varlığına işaret etmektedir.



Şekil 4. CPTu kuyularındaki q_c değerlerinin derinlikle değişimi



Şekil 5. CPTu kuyularındaki f_s değerlerinin derinlikle değişimi

Daha önce de belirtildiği gibi, elde edilen CPT verilerinin her 1 metre derinlik için ortalaması alınmıştır. Daha sonra arazide belirlenen q_c ve f_s değerleri üzerinde Youd ve Idriss (2001) tarafından önerilen yönteme göre düzeltmeler yapılarak sıvılaşma analizlerinde kullanılacak olan $q_{c1n(cs)}$, I_c ,

K_c , r_d , CSR ve CRR parametreleri belirlenmiştir. Sıvılaşma analizlerinde kullanılmış olan parametrelerden bazıları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Sıvılaştırma analizlerinde kullanılan I_c ve $q_{cIN,CS}$ parametreleri

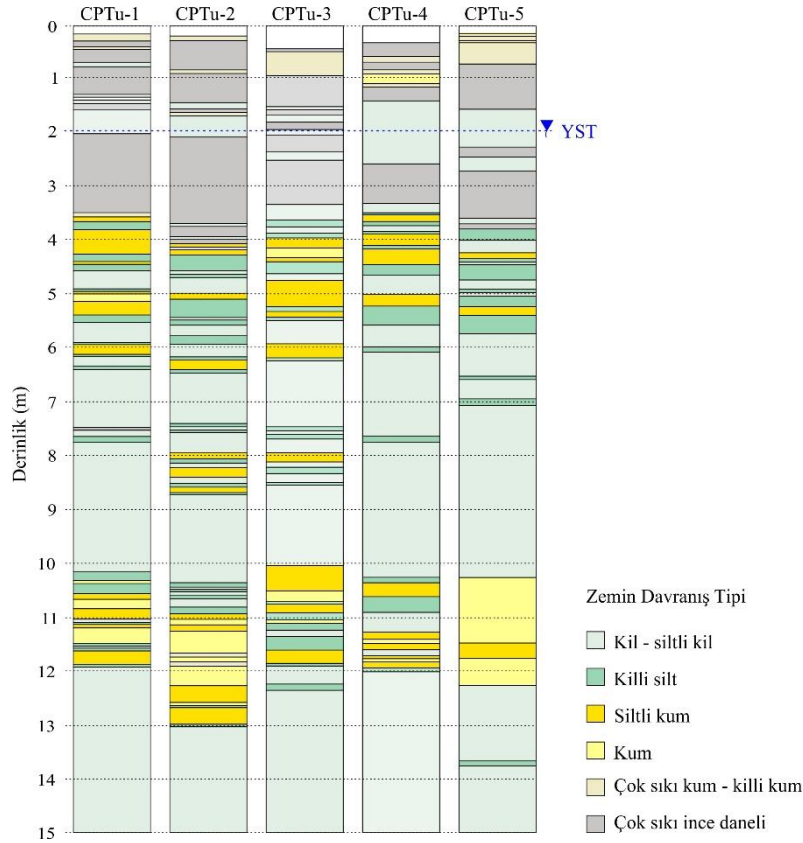
z (m)	CPTu-1		CPTu-2		CPTu-3		CPTu-4		CPTu-5	
	I_c	$q_{cIN,CS}$	I_c	$q_{cIN,CS}$	I_c	$q_{cIN,CS}$	I_c	$q_{cIN,CS}$	I_c	$q_{cIN,CS}$
1	2.497	55.594	2.221	83.810	2.527	57.930	2.315	60.401	2.300	85.778
2	2.647	40.526	2.636	46.060	2.761	34.142	2.976	81.592	2.749	49.026
3	2.677	45.581	2.656	51.322	2.639	43.317	2.728	47.354	2.816	50.257
4	2.618	59.124	2.739	48.866	2.826	87.983	2.928	99.675	2.653	58.941
5	2.951	80.530	2.656	101.631	2.886	88.781	2.909	97.188	2.684	49.053
6	2.684	51.567	2.890	106.565	2.835	92.547	2.661	48.495	2.613	51.000
7	2.773	75.153	2.706	50.525	2.807	52.609	2.933	51.183	2.968	50.193
8	2.801	101.581	2.745	67.603	2.770	70.546	2.838	70.714	2.842	66.940
9	2.925	79.141	2.787	51.817	2.909	58.565	3.000	57.521	2.891	60.008
10	2.934	126.403	3.127	49.104	3.135	48.674	3.160	49.620	3.111	50.108
11	2.744	108.325	2.666	78.145	2.820	77.096	2.654	33.855	2.271	84.289
12	2.547	192.207	2.919	81.708	2.650	81.065	2.816	62.914	2.416	106.108
13	2.504	65.221	3.317	43.280	3.200	40.221	3.171	41.042	2.646	37.564
14	3.174	122.374	3.169	45.140	3.168	43.649	3.179	43.013	3.150	40.235
15	3.250	123.281	3.399	40.935	3.345	40.301	3.362	40.669	3.348	42.935

z: derinlik

4.2. Zemin davranış tipi profili ve yeraltı suyu

Alüvyon malzemesinin zemin davranış sınıflaması Robertson (2016) tarafından önerilen yöntemle normalize koni uç direnci (Q_m) ve sürtünme oranı (F_r) verileri kullanılarak yapılmıştır. Her bir CPT lokasyonuna ait zemin

davranış tipinin derinlikle değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Buna göre çalışma alanında kil - siltli kil (3), killi silt (4), siltli kum (5), kum (6), çok sıkı kum - killi kum (8) ve çok sıkı ince daneli (9) zemin sınıflarında birimler yer almaktadır. Sondaj çalışmaları ışığında bölgedeki yeraltı suyu seviyesi 2 metre olarak belirlenmiştir.

**Şekil 6.** Çalışma alanındaki alüvyon malzemesinin zemin davranış tipi profili

4.3. Çalışma alanındaki zemin katmanlarının sınıflama potansiyeli

Daha önce de belirtildiği üzere çalışma kapsamında Bafra yöresinde 20 adet sondaj yapılmış ve bu sondajların 5 tanesinden örselenmemiş zemin örnekleri temin edilmiştir. Toplamda 75 adet sondaj örneği temin edilmiş olmasına rağmen çalışma alanındaki zeminlerin sınıflama potansiyeli hakkında ön bir değerlendirme yapmak amacıyla CPTu verileri yardımıyla hazırlanan zemin profillerinde kum-kum karışımları olarak

belirlenen derinliklerden alınan 20 adet örnek seçilmiştir. Seçilen bu örnekler üzerinde ASTM standartlarına uygun olarak ıslak elek, hidrometre, likit limit, plastik limit deneyleri yapılmış ve örneklerin doğal su muhtevaları tayin edilmiştir (ASTM, 2009, 2010, 2011). Daha sonra bu veriler Seed vd. (2003) tarafından önerilen plastisite – sınıflama potansiyeli grafiğine aktarılarak alüvyon malzemesinin sınıflama potansiyeli araştırılmıştır. Yapılan deneylere ait sonuçlar Tablo 2 ve 3'te verilmiştir.

Tablo 2. Örneklerin dane boyu dağılımları

Örnek No	Kil (%)	Silt (%)	Kum (%)	FC (%)	Örnek No	Kil (%)	Silt (%)	Kum (%)	FC (%)
1	30	58	12	88	11	50	38	12	88
2	32	43	25	75	12	22	67	11	89
3	31	59	10	90	13	18	59	23	77
4	18	54	28	72	14	34	56	10	90
5	28	63	9	91	15	38	50	12	88
6	30	58	12	88	16	32	59	9	91
7	42	47	11	89	17	33	53	14	86
8	50	43	7	93	18	21	56	23	77
9	63	29	8	92	19	26	60	14	86
10	52	39	9	93	20	29	61	10	90

FC: 200 no'lu elekten geçen ince daneli malzeme oranı.

Tablo 2 verileri incelendiğinde örneklerin ince daneli malzeme oranının %70'ten fazla olduğu görülmektedir. Örneklerin kil içerikleri %18-63 arasında, silt içerikleri %29-67 arasında, kum içerikleri ise %7-28 arasında değişmektedir. Hiçbir örnekte çakıl boyutunda malzeme bulunmamaktadır. Örnekler için dane boyu

dağılımı grafikleri, literatürde sınıflama potansiyeli gösteren zeminlerin dane boyu dağılımları ile kıyaslanmıştır (Şekil 7). Şekil 7'den de görülebileceği üzere örneklerin bir kısmına ait dane boyu dağılımları Potansiyel Sınıflama Aralığı bölgesine düşmektedir.

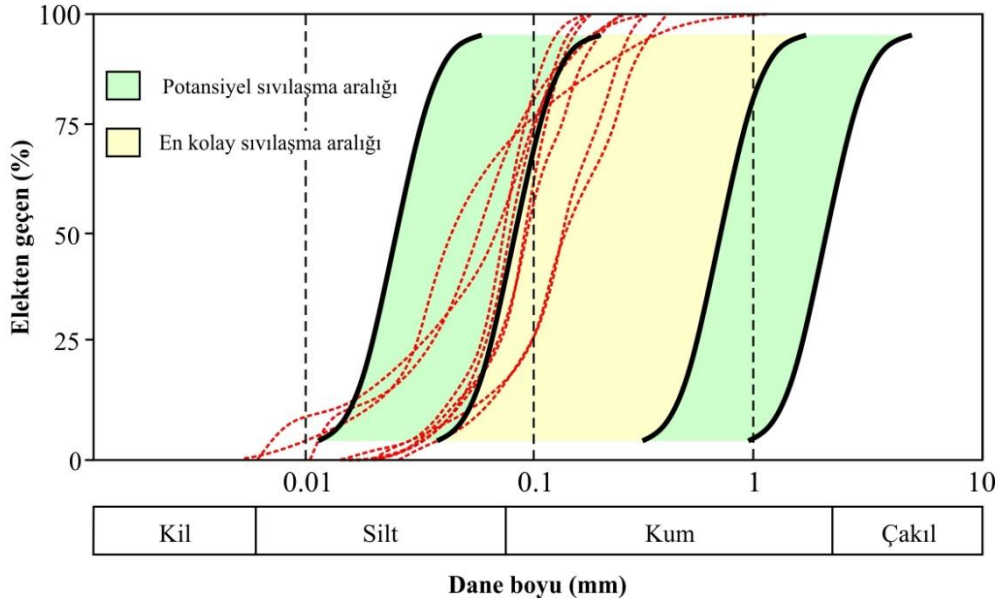
Tablo 3. Örneklerin Atterberg limitleri ve doğal su muhtevaları

Örnek No	PL (%)	LL (%)	PI (%)	W _n (%)	Örnek No	PL (%)	LL (%)	PI (%)	W _n (%)
1	21	41	20	30	11	34	57	23	39
2	20	32	12	33	12	22	34	12	27
3	19	46	27	30	13	25	38	13	30
4	27	41	14	22	14	22	34	12	25
5	23	40	17	33	15	29	62	33	38
6	24	35	11	28	16	26	54	28	34
7	22	46	24	29	17	32	53	21	38
8	29	58	29	33	18	26	45	19	34
9	32	74	42	28	19	23	35	12	29
10	31	75	44	33	20	21	43	22	30

LL: likit limit, PL: plastik limit, PI: plastisite indisi; W_n: doğal su muhtevası

Tablo 3 incelendiğinde örneklerin likit limitlerinin %32-75 arasında, plastik limitlerinin %19-34 arasında, plastisite indislerinin %11-44 arasında,

doğal su muhtevalarının ise %22-39 arasında değiştiği görülmektedir.

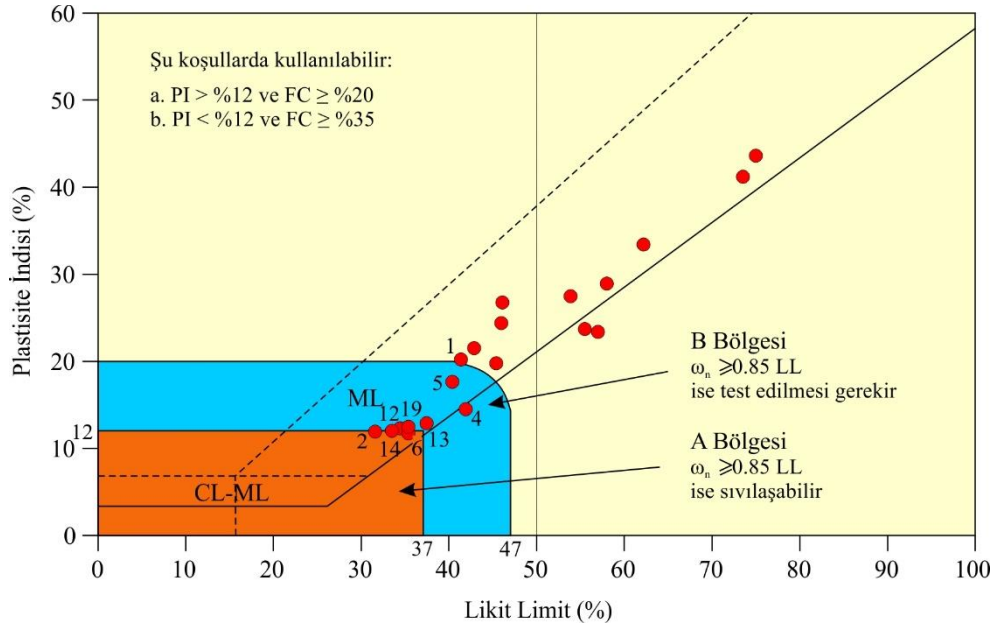


Şekil 7. Zemin örneklerinin dane boyu dağılımlarının literatürde sıvılaşma potansiyeli gösteren zeminlerin dane boyu dağılımları ile kıyaslanması (Balkema, 1997)

Seed vd. (2003) tarafından önerilen sıvılaşma potansiyeli grafiği sadece aşağıdaki koşullarda kullanılabilir:

- $PI > \%12$ ve $FC \geq \%20$
- $PI < \%12$ ve $FC \geq \%35$

burada FC, 200 no'lu elekten geçen ince daneli malzeme oranıdır. Tablo 2 ve 3 incelendiğinde 2 ve 6 numaralı örneklerin (b) şartını, diğer tüm örneklerin ise (a) şartını sağladığı görülmektedir. Örneklerin Seed vd. (2003) tarafından önerilen grafikteki dağılımları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Örneklerin Seed vd. (2003) tarafından önerilen plastisite - sıvılaşma potansiyeli grafiğindeki dağılımı

Plastisite - sıvılaşma potansiyeli grafiği incelendiğinde 1, 2, 4, 5, 6, 12, 13, 14 ve 19 numaralı örneklerin A ve/veya B bölgelerinde yer aldığı görülmektedir.

Şekil 7'de A veya B bölgelerinde yer alan zemin örneklerinin sıvılaşma potansiyeli hakkında ön değerlendirme yapabilmek için doğal su muhtevalarının likit limitlerinin 0.85 katına eşit veya fazla olması gerekmektedir ($W_n \geq 0.85 \cdot LL$).

Tablo 4 incelendiğinde 2 numaralı örneğin bu şartı sağladığı; 6, 12, 13 ve 19 numaralı örneklerin ise sınır değere çok yakın olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla çalışma alanındaki zemin katmanlarının sıvılaşma potansiyelinin detaylı bir şekilde analiz edilmesi gerektiği görülmektedir.

Tablo 4. Örneklerin sıvılaşma değerlendirmesinde kullanılan sınır koşul parametreleri

Örnek No	PI (%)	FC (%)	LL*0.85	W _n (%)	Örnek No	PI (%)	FC (%)	LL*0.85	W _n (%)
1	20	88	34.9	30	11	34	88	48.5	39
2	12	75	27.2	33	12	22	89	28.9	27
3	27	90	39.1	30	13	25	77	32.3	30
4	14	72	34.9	22	14	22	90	28.9	25
5	17	91	34.0	33	15	29	88	52.7	38
6	11	88	29.8	28	16	26	91	45.9	34
7	24	89	39.1	29	17	32	86	45.1	38
8	29	93	49.3	33	18	26	77	38.3	34
9	42	92	62.9	28	19	23	86	29.8	29
10	44	93	63.8	33	20	21	90	36.6	30

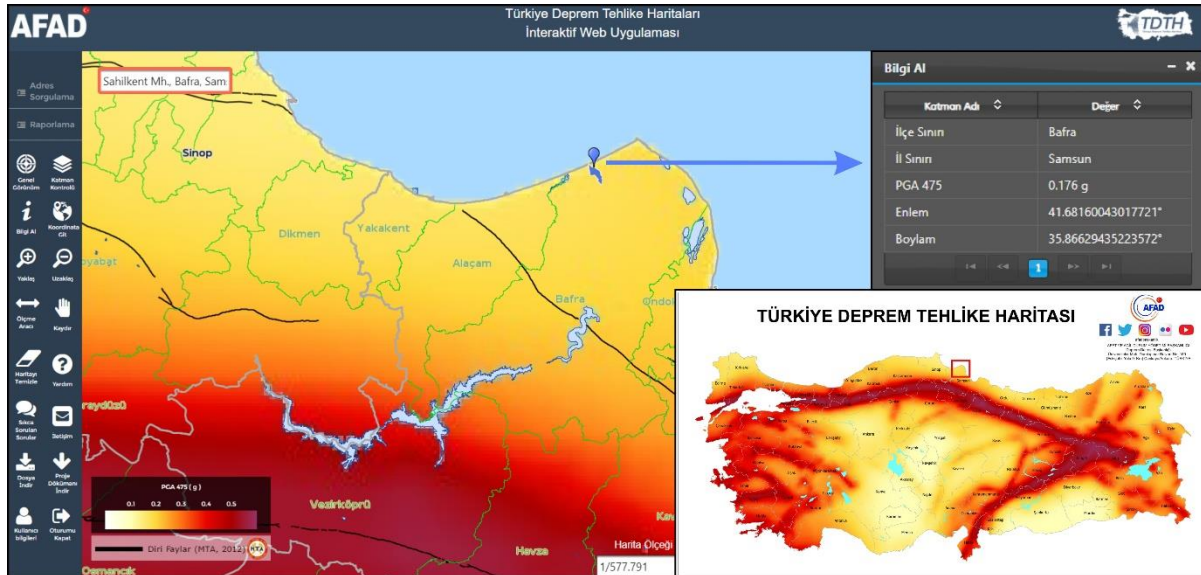
4.4. Sıvılaşma analizleri

Sıvılaşma potansiyeli incelemelerinin ilk aşamasında çalışma alanında yüzeylenen alüvyon malzemesinin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları [Robertson ve Wride \(1998\)](#) tarafından önerilen eşitlikle (Eş. 10) belirlenmiştir. Yapılan sıvılaşma analizlerinde çalışma alanındaki en büyük yatay yer ivmesi (PGA) değeri Türkiye Deprem Tehlike Haritası ([AFAD, 2019](#)) verilerine uygun şekilde 0.18g olarak alınmıştır (Şekil 9). Bu değer 0.2g'den düşük olduğu için aktif fay uzaklık düzeltmesi yapılmaksızın olduğu gibi kullanılmıştır ([Towhata,](#)

2008). Deprem büyüklüğü olarak Samsun'da gerçekleşen en büyük kayıtlı deprem olan 26 Kasım 1943 Ladik depremi (Ms=7.2) baz alınmıştır. Youd ve Idriss (2001) $6 < M_s < 8$ arasındaki deprem büyüklüklerinin doğrudan Mw skalasına dönüştürülerek kullanılabilirliğini belirtmiştir. Ms = Mw = 7.2 büyüklük için deprem büyüklüğü düzeltme faktörü (MSF) Eş. 11 kullanılarak:

$$MSF = 10^{2.24} / (7.2)^{2.56} = 1.11$$

olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Sahilkent yöresinin Türkiye Deprem Tehlike Haritası'ndaki yeri ve hesaplanan PGA değeri ([AFAD, 2019](#))

Zemin profiline ait güvenlik sayıları belirlendikten sonra [Iwasaki \(1978\)](#) tarafından önerilen yöntem

kullanılarak 15 metrelik zemin profilinin sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir:

$$LPI = \int_0^{15m} F \times w(z) dz \quad (12a)$$

Burada;

$$w(z) = 10-0.5z \quad (12b)$$

$$F = 0 \quad (FS > 1 \text{ ise}) \quad (12c)$$

$$F = 1 - FS \quad (FS < 1 \text{ ise}) \quad (12d)$$

LPI: sıvılaşma potansiyeli indeksi (bkz. Tablo 5),
z: metre cinsinden derinlik,
w: derinlik ağırlık düzeltme faktörüdür.

Elde edilen LPI değerleri kullanılarak Tablo 5'e göre potansiyel sıvılaşmanın şiddeti belirlenmiştir.

Tablo 5. Hesaplanan LPI değerlerine göre sıvılaşma şiddetinin belirlenmesi (Iwasaki, 1978)

Sıvılaşmanın Şiddeti	LPI
Az – Yok	LPI = 0
Küçük	0 < LPI < 5
Orta	5 < LPI < 15
Büyük	15 < LPI

Yapılan sıvılaşma analizlerinde belirlenen CSR, CRR, FS_{7.2} ve LPI değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Çalışma alanındaki zemin katmanlarının tamamının sıvılaşma şiddetinin Az – Yok sınıfında olduğu sonucuna varılmıştır.

5. Tartışma ve sonuçlar

Bu çalışmada Samsun ili Bafra ilçesi Sahilkent yöresinde yüzeyleyen suya doymun kumlu-siltli alüvyon malzemesinin sıvılaşma potansiyeli araştırılmıştır. Bölgedeki zemin katmanlarının sıvılaşma potansiyeli hakkında ön bir değerlendirme yapabilmek amacıyla çalışma alanında 5 adet karotlu sondaj yapılmış ve örselenmemiş zemin örnekleri temin edilmiştir. Bu örnekler üzerinde indeks ve plastik özellik tayinleri yapılarak zemin katmanlarının sıvılaşma potansiyeli Seed vd. (2003) tarafından önerilen yöntemle belirlenmiş ve örneklerin bir kısmının 'Sıvılaşabilir', bir kısmının ise 'Test Edilmesi Gerekir' bölgelerinde yer aldığı görülmüştür. Bu bulgular göz önünde bulundurularak çalışma alanında 15 metre derinliğinde 5 adet CPTu deneyi yapılmış ve elde edilen verilerle Youd ve Idriss (2001) tarafından önerilen yöntemle göre sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Sıvılaşma analizleri Samsun ilinde gözlenen en büyük deprem olan 1943 Ladik

depremi (M_w=7.2) baz alınarak yapılmış ve PGA değeri 0.18g olarak alınmıştır.

Yapılan analizler sonucunda Sahilkent yöresinde 7.2 büyüklüğündeki bir deprem için herhangi bir sıvılaşma olayının gözlenmeyeceği sonucuna varılmıştır. Sondaj çalışmalarıyla alınan örnekler üzerinde yapılan indeks özellik tayinlerinden elde edilen veriler değerlendirildiğinde, alüvyon malzemesinin yüksek ince daneli malzeme (<0.005 mm) oranına sahip olmasının bu durumun en önemli nedeni olduğu görülmektedir. İnce daneli malzemelerin zemin malzemesinin kohezyonunu arttırdığı ve böylece zemine sıvılaşma olayına karşı fazladan dayanım kazandırdığı bilinmektedir (Youd ve Idriss, 2001). Bu durum Tablo 1'de açık olarak gözlenebilmektedir: tablodaki I_c değerlerinin büyük bir çoğunluğu 2.6'dan fazladır ki bu durum söz konusu zemin tabakasının kil sınıfında olduğu anlamına gelmektedir. Bölgede sıvılaşmaya karşı duyarlı temiz kum seviyeleri olmasına karşın bu seviyelerin kalın kil – siltli kil sınıfındaki tabakalar arasında yer alması sıvılaşma olayının beklenmemesinin bir başka nedenidir (Ishihara, 1985).

Tablo 6. CPTu lokasyonlarında her bir metre için hesaplanan sıvılaşma potansiyeli değerleri

z (m)	CPTu-1					CPTu-2					CPTu-3					CPTu-4					CPTu-5				
	CSR	CRR	FS _{7.2}	LPI	SŞ	CSR	CRR	FS _{7.2}	LPI	SŞ	CSR	CRR	FS _{7.2}	LPI	SŞ	CSR	CRR	FS _{7.2}	LPI	SŞ	CSR	CRR	FS _{7.2}	LPI	SŞ
1	0.041	0.096	2.60	0	Az-Yok	0.031	0.135	4.83	0	Az-Yok	0.031	0.098	3.51	0	Az-Yok	0.032	0.100	3.47	0	Az-Yok	0.025	0.139	6.17	0	Az-Yok
2	0.046	0.084	2.03	0	Az-Yok	0.035	0.088	2.79	0	Az-Yok	0.044	0.078	1.96	0	Az-Yok	0.033	0.131	4.41	0	Az-Yok	0.032	0.091	3.15	0	Az-Yok
3	0.054	0.088	1.81	0	Az-Yok	0.042	0.093	2.45	0	Az-Yok	0.051	0.086	1.88	0	Az-Yok	0.040	0.089	2.48	0	Az-Yok	0.040	0.092	2.55	0	Az-Yok
4	0.053	0.099	2.08	0	Az-Yok	0.044	0.091	2.30	0	Az-Yok	0.048	0.143	3.31	0	Az-Yok	0.040	0.172	4.77	0	Az-Yok	0.043	0.099	2.55	0	Az-Yok
5	0.050	0.129	2.86	0	Az-Yok	0.038	0.178	5.19	0	Az-Yok	0.038	0.145	4.24	0	Az-Yok	0.035	0.165	5.23	0	Az-Yok	0.040	0.091	2.53	0	Az-Yok
6	0.040	0.093	2.59	0	Az-Yok	0.034	0.193	6.30	0	Az-Yok	0.035	0.154	4.88	0	Az-Yok	0.033	0.090	3.03	0	Az-Yok	0.036	0.092	2.84	0	Az-Yok
7	0.037	0.113	3.39	0	Az-Yok	0.033	0.092	3.10	0	Az-Yok	0.034	0.094	3.06	0	Az-Yok	0.033	0.092	3.10	0	Az-Yok	0.035	0.092	2.92	0	Az-Yok
8	0.037	0.177	5.31	0	Az-Yok	0.034	0.109	3.56	0	Az-Yok	0.034	0.113	3.69	0	Az-Yok	0.034	0.113	3.69	0	Az-Yok	0.035	0.108	3.43	0	Az-Yok
9	0.036	0.126	3.89	0	Az-Yok	0.033	0.093	3.13	0	Az-Yok	0.035	0.099	3.14	0	Az-Yok	0.034	0.098	3.20	0	Az-Yok	0.036	0.100	3.09	0	Az-Yok
10	0.035	0.268	8.50	0	Az-Yok	0.033	0.091	3.06	0	Az-Yok	0.035	0.091	2.89	0	Az-Yok	0.035	0.091	2.89	0	Az-Yok	0.036	0.092	2.84	0	Az-Yok
11	0.034	0.140	4.57	0	Az-Yok	0.032	0.124	4.31	0	Az-Yok	0.033	0.123	4.14	0	Az-Yok	0.034	0.078	2.54	0	Az-Yok	0.034	0.136	4.44	0	Az-Yok
12	0.031	0.740	26.5	0	Az-Yok	0.029	0.131	5.02	0	Az-Yok	0.030	0.130	4.81	0	Az-Yok	0.031	0.103	3.69	0	Az-Yok	0.031	0.191	6.84	0	Az-Yok
13	0.028	0.106	4.21	0	Az-Yok	0.028	0.086	3.41	0	Az-Yok	0.029	0.084	3.22	0	Az-Yok	0.029	0.084	3.22	0	Az-Yok	0.029	0.081	3.10	0	Az-Yok
14	0.027	0.152	6.25	0	Az-Yok	0.027	0.088	3.62	0	Az-Yok	0.028	0.086	3.41	0	Az-Yok	0.028	0.086	3.41	0	Az-Yok	0.028	0.084	3.33	0	Az-Yok
15	0.026	0.153	6.53	0	Az-Yok	0.026	0.084	3.59	0	Az-Yok	0.027	0.084	3.45	0	Az-Yok	0.027	0.084	3.45	0	Az-Yok	0.027	0.086	3.54	0	Az-Yok

SŞ: Sıvılaşma şiddeti

Katkı Belirtme

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2019-8434 ve FDK-2019-8228 kodlu projeler ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- AFAD. (2018). Türkiye Deprem Tehlike Haritası. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Erişim adresi: <https://www.turkiye.gov.tr/afad-turkiye-deprem-tehlike-haritalari>
- Ambraseys, N. N. (1988). Engineering seismology. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 17, 1-105. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290170102>.
- Andrus, R. D. and Stokoe, K. H. II. (1997). Liquefaction resistance based on shear wave velocity. *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils* (ss. 89-128). New York.
- Arango, I. (1996). Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(11), 929-936. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:11\(929\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:11(929))
- Ateş, A. (2017). Gölyaka (Düzce) imara esas yerleşim alanındaki zeminlerin SPT ve sismik hız verileriyle sıvılaşma riskinin araştırılması. *Politeknik Dergisi*, 20(4), 753-763. <https://doi.org/10.2339/politeknik.368977>
- ASTM. (2009). Standard Test Methods For Particle-Size Distribution (Gradation) Of Soils Using Sieve Analysis. *ASTM D6913-04(2009)e1*, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2010). Standard Test Methods For Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index Of Soils. *ASTM D4318-10e1*, West Conshohocken, PA.
- ASTM. (2011). Standard Practice For Classification Of Soils For Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM D2487-11*, West Conshohocken, PA.
- Begemann, H. K. (1965). The friction jacket cone as an aid in determining the soil profile. *Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. I* (ss. 17-20). Toronto.
- Bilge, H. T. ve Çetin, K. Ö. (2017). Silt-Kil Karışımı Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyellerinin Belirlenmesi. *4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı* (ss. 11-19). Eskişehir.
- Bol, E., Önalp, A., Arel, E., Sert, S. and Özocak, A. (2010). Liquefaction of silts: the Adapazari criteria. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(4), 859-873. <https://doi.org/10.1007/s10518-010-9174-x>
- Bray, J. D., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T. L., Stewart, J. P., Seed, R. B., Cetin, O. K., Bol, E., Baturay, M. B., Christensen, C., and Karadayilar, T. (2004). Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(7), 673-685. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:7\(673\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(673))
- Davis, T. N. (1960). A field report on the Alaska earthquakes of April 7, 1958. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 50(4), 489-510.
- Dipova, N. ve Cangir, B. (2017). Lara-Kundu (Antalya) düzlüğünün sıvılaşma şiddeti indeksine (LSI) dayalı sıvılaşma haritası. *Geological Engineering Journal/Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 41(1), 31-46. <https://doi.org/10.24232/jmd.311839>
- Dobry, R., Stokoe, K. H., Ladd, R. S. and Youd, T. L. (1981). Liquefaction susceptibility from S-wave velocity. *ASCE National Convention* (ss. 1-8). New York.
- Dobry, R., Thevanayagam, S., El-Sekelly, W., Abdoun, T. and Huang, Q. (2019). Large-scale modeling of preshaking effect on liquefaction resistance, shear wave velocity, and CPT tip resistance of clean sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), 04019065. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002080](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002080)
- Duman, E. S. (2013). *Erzincan il merkezi ve çevresindeki zeminlerin standart penetrasyon deneyi verileri kullanılarak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Ersoy, A. F. and Karaca, Z. (2019). Determination of groundwater parameters for drinking and agricultural use in the coastal region of engiz aquifer system, Samsun (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences*, 12(6), 198. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4365-5>
- Ertek, M. K. (2015). *Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve oturmalara etkisinin incelenmesi: Atakum örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

- Esin, G. (2015). *Coğrafi bilgi sistemi kullanılarak Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanının sıvılaşma duyarlılık haritasının oluşturulması*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Huizinga, T. K. (1942). *Grondmechanica (Soil Mechanics)*. Amsterdam: VTK Leuven.
- Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ss. 321-376). San Francisco.
- Işık, A., Ünsal, N., Gürbüz, A. ve Şişman, E. (2016). Fethiye yerleşim alanındaki zeminlerin spt ve kayma dalga hızı verileriyle sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(4), 1027-1037. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.278458>
- Iwasaki, T. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japon. *Proc. Second Int. Conf. Microzonation Safer Construction Research Application* (ss. 885-896). San Francisco.
- Iwasaki, T., Arakawa, T. and Tokida, K. I. (1984). Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(1), 49-58. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90027-5](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90027-5)
- Kurnaz, T. F. and Kaya, Y. (2019). A novel ensemble model based on GMDH-type neural network for the prediction of CPT-based soil liquefaction. *Environmental Earth Sciences*, 78(11), 339. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8344-7>
- Liao, S. S. and Whitman, R. V. (1986). *A catalog of liquefaction and non-liquefaction occurrences during earthquakes*. Massachusetts: Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Marcuson, W. F. III. (1978). Definition of terms related to liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, 104(9), 1197-1200.
- Ntritsos, N. and Cubrinovski, M. (2020). A CPT-based effective stress analysis procedure for liquefaction assessment. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131, 106063. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106063>
- Önalp, A. ve Arel, E. (2002). Siltlerin sıvılaşma yeteneği: Adapazarı kriteri. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Dokuzuncu Ulusal Kongresi* (ss. 363-372). Ankara.
- Öztürk, S. (2016). *Sıvılaşmaya karşı jet grout yöntemi ile zemin iyileştirilmesi: Samsun-Tekkeköy örneği*. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Plantema, G. (1948). Construction and method of operating a new deep sounding apparatus. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (ss. 277). Rotterdam.
- Balkema, A. A. (1997). *Handbook on Liquefaction Remediation on Reclaimed Land*. Rotterdam: Taylor and Francis.
- Robertson, P. K. (1990). Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(1), 151-158. <https://doi.org/10.1139/t90-014>
- Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (cpt)-based soil behaviour type (sbt) classification system—an update. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(12), 1910-1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1985). Liquefaction potential of sands using the CPT. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(3), 384-403. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:3\(384\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:3(384))
- Robertson, P. K. and Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459. <https://doi.org/10.1139/t98-017>
- Seed, H. B. and De Alba, P. (1986). Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands. *Proceedings of Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering (In Situ '86)* (ss. 281-302). Blacksburg, ABD.
- Seed, R. B., Cetin, K. Ö., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E. and Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. *26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar* (ss. 1-72) California.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 97, 1249-1273.
- Seed, H. B. and Wilson, S. D. (1967). *The turnagain heights landslide, Anchorage, Alaska (No. 9)*. Berkeley (ABD): University of California, Department of Civil Engineering, Institute of Transportation and Traffic Engineering.

- Seed, H. B. and Idriss, I. (1982). *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes: engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records*. Oakland (ABD): Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B. Igancio, A., Alberto, G. M., Ascoli, R. G. and Chan, C. K. (1981). Earthquake-induced liquefaction near Lake Amatitlan, Guatemala. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 107, 501-518.
- Senneset, K. and Janbu, N. (1985). Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests. Chaney, R. ve Demars, K. (Ed.), *Strength Testing of Marine Sediments: Laboratory and In-situ Measurements*. West Conshohocken: ASTM International.
- Sert, S., Özocak, A. and Bol, E. (2018). Sıvılaşma bölgelerinde sıvılaşmaz üst tabaka kalınlığının iyileştirme gereksinimine etkisi. *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 1301-1312. <https://doi.org/10.33793/acperpro.01.01.202>
- Shibata, T. and Teparaksa, W. (1988). Evaluation of liquefaction potentials of soils using cone penetration tests. *Soils and Foundations*, 28(2), 49-60. https://doi.org/10.3208/sandf1972.28.2_49
- Sönmez, B., Dağdelenler, G., Özcan, N.T., Ercanoğlu, M. ve Sönmez, H. (2015). Yapay sinir ağı kullanılarak CPT tabanlı sıvılaşma değerlendirme abağının geliştirilmesi. *Yerbilimleri*, 36(2), 45-59.
- Stark, T. D. and Olson, S. M. (1995). Liquefaction resistance using cpt and field case histories. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), 856-869. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1995\)121:12\(856\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(856))
- Temizel, I., Arslan, M., Yücel, C., Abdioğlu, E. and Ruffet, G. (2016). Geochronology and geochemistry of eocene-aged volcanic rocks around the bafra (samsun, n turkey) area: constraints for the interaction of lithospheric mantle and crustal melts. *Lithos*, 258, 92-114. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.04.023>
- Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Heidelberg: Springer Science & Bussines Media
- Turoğlu, H. (2010). Kızılırmak deltası ve yakın çevresinin jeomorfolojik özellikleri ve insan yaşamındaki etkileri. *Anadolu Araştırmaları*, 19, 1-26.
- Youd, T. L. and 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*, 127(4), 297-313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2001\)127:4\(297\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:4(297))
- Youd, T. L., Harp, E. L., Keefer, D. K. and Wilson, R.C. (1985). The borah peak, idaho earthquake of October 28, 1983 Liquefaction. *Earthquake Spectra*, 2(1), 71-89.