Yerbilimleri, 2025, 46 (2), 77-101, 1674018

Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni (*Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University*

YERBİLİMLERİ
Bulletin for Earth Sciences

ISSN: 2687- 2978

Altınova Mahallesi Sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) Sıvılaşma Duyarlılığı

Liquefaction Susceptibility of Altınova District Coast (Ayvalık, Balıkesir)

ŞENER CERYAN [1*], AYŞEGÜL KILIÇ [2], SAMET BERBER [3], NURCİHAN CERYAN [4]

[1,3] Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

[2] İlbank Bursa Bölge A.Ş., Bursa

[4] Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir Meslek Yüksek Okulu, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

Geliş *(received)*: 11 Nisan (*April*) 2025 Kabul *(accepted):* 8 Temmuz (*July*) 2025

ÖZ

Balıkesir ili Ayvalık ilçesi (Türkiye) Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun güney kolu üzerinde yer almakta olup, tarihsel ve aletsel dönemde 1867 Edremit (M=7,0), 1919 Ayvalık-Sarmısaklı (M_w=7,2), 1944 Edremit (M_w=6,4) ve 1953 Yenice (M_w=7,2) depremleri meydana gelmiştir. Ayvalık ilçesi Altınova mahallesi sahilinde yeraltı suyu derinliği yüzeye yakın olup kumlu zeminler yayılım göstermektedir. Bu çalışmada Altınova mahallesi sahil kısmının (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma şiddeti haritaları üretilmiştir. Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı SPT-N değeri kullanan basitleştirilmiş prosedürle hesaplanmıştır. Bu çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının, sıvılaşma olasılıklarının ve düzeltilmiş SPT-N değerlerinin 4, 8, 12 ve 16 m'deki mekânsal dağılımları bulunmuştur. Sıvılaşma potansiyeli haritasına göre inceleme alanının % 11,8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanının %64,1'i "düşük", %20,5'i "orta", %3,6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında yer alan 4723 binadan 584'ü sıvılaşma olmayacak alanda, 3034'ü düşük sıvılaşma potansiyelli alanda, 909'u orta sıvılaşma potansiyelli alanda ve 196'sı yüksek sıvılaşma potansiyelli alanda bulunmaktadır. Bu çalışmada üretilen sıvılaşma şiddeti haritasına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3'ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3'ünde sıvılaşmanın "çok düşük şiddetli", %65'inde sıvılaşmanın "düşük şiddetli" ve %0,3'ünde "orta şiddetli" gelişeceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ayvalık, sıvılaşma potansiyeli indeksi, sıvılaşma şiddeti indeksi, zemin sıvılaşması

ABSTRACT

Balikesir province of Ayvalık district (Turkey) is located on the southern branch of the North Anatolian Fault Zone where earthquakes 1867 Edremit (M=7.0), 1919 Ayvalik-Sarmisakli (M_w= 7.2), 1944 Edremit (M_w=6.4) and 1953 Yenice (M_w= 7.2) occurred in the historical and the instrumental period. The groundwater depth is

shallow on the coast of Altınova neighborhood of Ayvalık district and sandy soil are widespread. In this study, liquefaction potential and liquefaction severity maps of the coastal part of Altınova district (Ayvalık, Balıkesir) were produced. The safety factor of the soil layers against liquefaction was calculated using the simplified procedure based on SPT-N value. Also, spatial distributions of safety factor against liquefaction, liquefaction probabilities and corrected SPT-N values of soil layers at 4, 8, 12 and 16 m were determined. According to the liquefaction potential map, it is seen that 11.8% of the study area will not liquefy. 64.1% of the study area has "low", 20.5% "medium" and 3.6% "high" liquefaction potential. Of the 4723 buildings in the study area, 584 are in areas where there will be no liquefaction, 3034 are in areas with low liquefaction potential, 909 are in areas with medium liquefaction potential and 196 are located areas with high liquefaction potential. According to the liquefaction intensity map, it is observed that in the event of a scenario earthquake, there will be no liquefaction in 1.3% of the study area, liquefaction will develop with "very low intensity" in 33.3%, liquefaction will develop with "low intensity" in 65% and "moderate intensity" in 0.3%.

Keywords: *Ayvalık, liquefaction potential index, liquefaction severity index, soil liquefaction*

https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1674018

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: cedoglu61@gmail.com

GİRİŞ

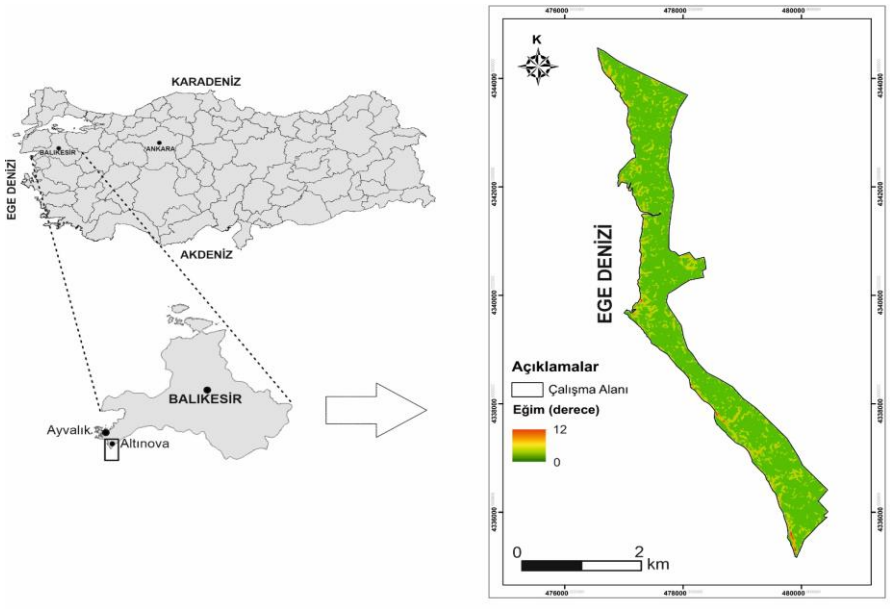
Sıvılaşma terimi ilk olarak Terzaghi ve Peck (1948) tarafından hafif örselenme nedeniyle akış şeklindeki yenilmelere neden olan çok gevşek kumların önemli dayanım kaybını tanımlamak için kullanılmıştır. Daha genel terimlerle, sıvılaşma, tekrarlı yükleme altında aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu nedeniyle doymuş gevşek kumlu zeminlerin hem makaslama dayanımının hem de sertliğinin azalması olarak tanımlanabilir (ElGhoraiby vd., 2020). 1964 Niigata (Japonya) ve Alaska (ABD) depremleriyle başlayarak, sismik zemin sıvılaşma davranışı jeoteknik deprem mühendisliğinde önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir (Ishihara ve Koga, 1981). Zemin sıvılaşması 1989 Loma Prieta depreminde (Seed vd., 1991), 1995 Büyük Hanshin depreminde (Tanaka, 2000), 1999 Chi-Chi depreminde (Hwang vd., 2003), 1999 Kocaeli-Adapazarı depreminde (Bray vd., 2004), Canterbury depreminde (Quigley vd., 2013), 2018 Orta Sulawesi depreminde (Orense vd., 2012) ve 2023 Kahramanmaraş depreminde (Türkiye) mühendislik yapılarında önemli hasarlara ve can kayıplarına neden olmuştur.

Zemin sıvılaşmasının depremlerin yıkıcı etkilerine katkıda bulunmasından bu yana, araştırmacılar sismik kaynaklı zemin sıvılaşmasını değerlendirmek için araştırmalar yapmaya başlamışlardır. Sismik zemin sıvılaşması tetikleme eğrileri ilk olarak Seed vd. (1984) tarafından Seed ve Idriss (1971)'de geliştirilen basitleştirilmiş prosedüre bağlı olarak tanıtılmıştır. Zeminlerin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için geliştirilmiş farklı yöntemler vardır (Anon, 2016). Bu yöntemler, gerilme tabanlı yaklaşımlar (Seed ve Idriss, 1971), deformasyon tabanlı yaklaşımlar (Dobry ve Abdoun, 2011), enerji tabanlı prosedürler (Kayabali vd., 2018, laboratuvar testleri (Hakam vd., 2016), hesaplamalı mekaniğe dayalı yöntemler (Rapti, 2016) ve dinamik yükleme altında gözenek basıncı oluşumunun saha ölçümüdür (Anon, 2016).

Literatürde, zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanım kapasitesini elde etmek için jeoteknik ve jeofizik deneyler de dahil olmak üzere çok sayıda arazi deneyi kullanılmıştır. Bunlar standart penetrasyon testi (SPT), koni penetrasyon testi (CPT), Becker penetrasyon testi (BPT), dilatometre testi (DT) ve mikrotremordür (Seed ve Idriss 1967, 1971; Dobry vd.,1981; Seed vd.,1984; Robertson ve Campanella, 1985; Seed ve De Alba, 1986; Stokoe vd., 1988; Tokimatsu ve Uchida, 1990; Stark ve Olson, 1995; Olsen, 1997; Robertson ve Wride, 1998; Andrus vd., 1999 ve Andrus ve Stokoe, 2000, Andrus vd., 2004; Uyanık ve Taktak, 2009; Beroya vd., 2009; Setiawan, 2011; Ghafghazi vd., 2017).

Çalışma sahası olan Balıkesir ili Ayvalık ilçesi Altınova mahallesinin sahil kısmı (Şekil 1) aletsel dönemde önemli mal ve can kayıplarına neden olan Kuzey Anadolu Fay Zonu'na ait güney kollarında yer alan Havran-Balıkesir fay zonuna ve Edremit fay zonuna yakın konumdadır. Altınova sahihinin Edremit fay zonuna uzaklığı 42,2 km, Havran-Balıkesir Fay zonuna uzaklığı 43,1 km'dir. Ayrıca Zeytindağ fay zonunun inceleme alanına uzaklığı 33,6 km, Bergama fayının uzaklığı da 36 km'dir. Öte yandan inceleme alanında genellikle kumlu alüvyon zeminler yayılım göstermektedir. Söz konusu alanda yeraltı suyu seviyesi de yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada Altınova mahallesi (Ayvalık, Balıkesir) sahil kısmının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılan SPT-N değerleri, yeraltı suyu seviyesi ve elek analizi sonuçları Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi tarafından 2017 yılında Balıkesir Büyükşehir Belediyesi için yaptığı "Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125,83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporunda verilen 96 adet sondaj logu ve bu sondajlara ait laboratuvar deney sonuçlarından alınmıştır.



Şekil 1. İnceleme alanının yer bulduru haritası.

Figure 1. *Location map of the study area.*

Bu çalışmada önce topoğrafya, yeraltı suyu derinliği, zemin türü ve göreceliği sıkılığı sıvılaşma duyarlılığı açısından incelenmiş, daha sonra zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı Youd vd. (2001)' de verilen ve SPT-N değerine dayanan basitleştirilmiş prosedürün güncellenmiş hali ile hesaplanmıştır (Cetin vd., 2018a, Cetin vd., 2018b). Youd vd. (2001)'in standart modeline efektif örtü yükü düzeltme katsayısı, deprem büyüklüğü ölçeklendirme faktörü ve yamaç eğimi için düzeltme faktörü eklenerek güncelleme yapılmış olup (Cetin vd., 2018a) bu çalışmada çalışma arazisi düz olduğu için yamaç eğimi için düzeltme faktörü dikkate alınmamıştır.

Çalışmanın en son aşamasında ise sondaj yapılmış noktadaki zemin profillerinin Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi ve Sıvılaşma Şiddeti İndeksi değerleri hesaplanarak bunların mekânsal dağılımı bulunmuştur. Sıvılaşma Potansiyeli İndeksinin hesaplanmasında Sönmez (2003), Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) esas alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada, farklı sıvılaşma potansiyeline sahip alanlara düşen bina sayısı da bulunmuştur.

YÖNTEM

Sayısal yükseklik modelinin elde edilişi

Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova mahallesinin 12.5x12.5 metre çözünürlüğe sahip sayısal yükseklik modeli (DEM) https://search.asf.alaska.edu/#/ adresli internet sitesinden indirilmiştir. Çalışma alanının eş yükselti eğrileri ve eğim haritası bu sayısal yükseklik modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Eş yükselti eğrilerinin ve eğim haritasının elde edilmesinde ve bu çalışmada yapılan mekânsal analizlerde Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Laboratuvarında lisanslı kurulu olan ArcGIS (V. 10.3) programı kullanılmıştır.

Senaryo depreminin oluşturulması

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının bulunması için en büyük yatay yer ivmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle çalışma alanını içine alan bölgenin sismotektonik özellikleri göz önünde bulundurularak, sıvılaşma analizi için senaryo depremler deterministik olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, öncelikle çalışma alanının merkezinden en fazla 100 km uzaklıkta bulunan aktif fay ve fay zonları belirlenmiştir (Şekil 2). Daha sonra, Eşitlik 1 (Well ve Coppersmith, 1994) yardımıyla söz konusu fayların/fay zonlarının üretebileceği en büyük deprem büyüklüğü bulunmuştur (Tablo 1).

$$M_w = a + b\log(SRL) \quad (1)$$

a ve b katsayıları fay türüne bağlıdır. Doğrultu atımlı faylar için a=5,16 b=1,12, normal fay için a=4,86 b=1,32, ters fay için a=5,00 b=1,22 ve tüm fay türleri için a=5,508 b=1,16'dır (Wells ve Coppersmith, 1994).

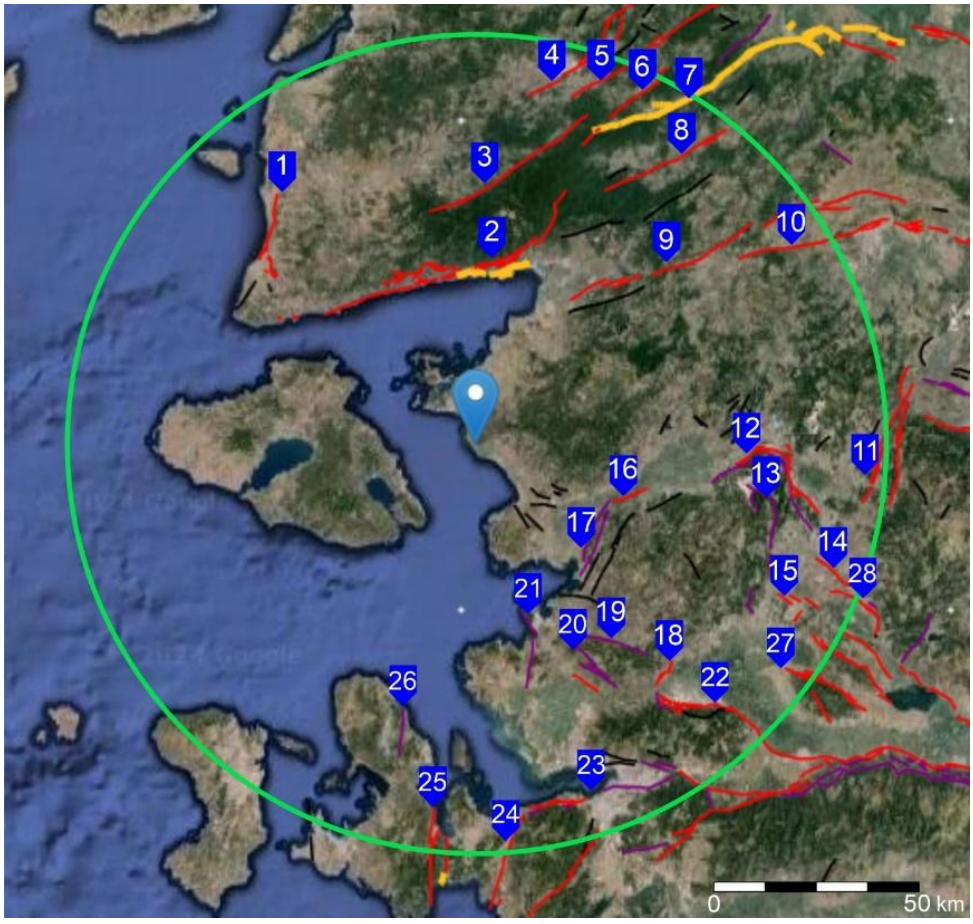
Bu çalışmada, yüzey kırığı uzunlukları (SRL, km), Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye aktif fay haritasından (MTA 2018) alınmıştır.

Senaryo depremin oluşturulmasının en son aşamasında, çalışma alanını etkileyecek fayların/fay zonlarının üretebileceği olası en büyük olası depremlerin çalışma alanında oluşturacağı en büyük yatay yer ivmesi bulunmuştur (Tablo 1). Literatürde en büyük yer ivmesini bulmak için verilen çok sayıda azalım ilişkisi vardır. Bu çalışmada en büyük yer ivmesini (a_{max}) bulmak için Ulusay vd. (2004) tarafından verilen aşağıdaki Eşitlik 2 kullanılmıştır.

$$a_{max} = 2{,}18\, e^{0{,}0218(33{,}3M_w - R_e + 7{,}8427S_A + 18{,}9282S)} \quad (2)$$

Eşitlikte, kaya için $S_A = 0$, $S_B = 0$, zemin için $S_A = 1$, $S_B = 0$ ve gevşek Zemin için için $S_A = 0$, S_B

= 1, Re aktif fayın inceleme alanına en yakın mesafesidir. Re değerleri MTA (2018)'nın aktif fay haritasında inceleme alanının fay izine en yakın olduğu uzaklık olarak alınmıştır.



Şekil 2. Altınova sahiline (Ayvalık, Balıkesir) en fazla 100 km uzaklıktaki faylar (Fay numaraları Tablo 1'de açıklanmıştır).

Figure 2. *Faults within 100 km of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir) (Fault numbers are explained in Table 1).*

Tablo 1. İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklığındaki fay ve fay zonları ile bunların üretebileceği deprem büyüklüğü ile en büyük yer ivmesi değerleri.

Table 1. *Faults and fault zones within a distance of 100 km from the study area, the earthquake magnitudes they can produce, and the maximum ground acceleration values.*

No	Fay/Fayzonu	Segment	Fay izi uzunluğu SRL(km)	Merkeze uzaklık, Re (km)	Deprem büyüklüğü Mw	En büyük yer ivmesi a_{max} (g)
1	Kestanbol fayı		21,8	65,56	6,63	0,0657
2	Edremit fay zonu		71,7	42,22	7,23	0,1689
3	Evciler fayı		46,4	58,68	7,01	0,1006
4	Biga-Çan fay zonu	Çan	19,9	86,52	6,59	0,0402
5	Sarıköy fayı		66,6	88,20	7,2	0,0603
6	Bekten fayı		16,2	87,17	6,48	0,0368
7	Yenice-Gönen fayı		88,1	78,03	7,34	0,0834
8	Pazarköy fayı		34,5	70,13	6,86	0,0703
9	Havran-Balya fay zonu		85.3	43,31	7,32	0,1758
10	Balıkesir fayı	Gökçeyazı	39.2	79,84	6,93	0,0596
11	Gelenbe fay zonu	Batı	36,5	98,72	6,89	0,0385
12	Soma-Kırkağaç fay zonu	2	31,7	64,30	6,82	0,0774
13	Soma-Kırkağaç fay zonu	3	39,3	69,07	6,93	0,0755
14	Gediz Graben fay sistemi	Akhisar fayı	11.9	88,79	6,33	0,0317
15	Gediz Graben fay sistemi	Ozanca fayı	4,9	82,66	5,88	0,0262
16	Bergama fayı		9.3	36,08	6,2	0,0915
17	Zeytindağ fay zonu	1	17,3	33,67	6,52	0,1210
18	Gediz Graben fay sistemi	Muradiye fayı	7,8	72,46	6,11	0,0388
19	Güzelhisar fayı		23	53,67	6,66	0,0868

20	Menemen fay zonu		8	56,31	6,13	0,0557
21	Yenifoça fayı		21	41,87	6,61	0,1086
22	Gediz Graben fay sistemi	Manisa fayı	46,3	77,44	7,01	0,0668
23	İzmir fayı		34,58	91,37	6,87	0,0443
24	Seferihisar fayı		25.97	92,40	6,72	0,0390
25	Gülbahçe fay zonu		24,58	91,04	6,69	0,0394
26	Mordoğan fayı		12,02	65,39	6,33	0,0530
27	Gediz Graben fay sistemi	Halitpaşa fayı	24,48	95,30	6,69	0,0358
28	Gediz Graben fay sistemi	Akselendi fayı	19,64	95,58	6,58	0,0329

SPT-N Değerlerinin Düzeltilmesi

SPT-N değeri zeminin göreceliği sıklığını ifade etmektedir bu nedenle söz konusu değere bağlı sıvılaşma analizleri geliştirilmiştir. Arazide ölçülen SPT-N değeri tij uzunluğu, örnekleme türü, kuyu çapı, çekiç türü (enerji oranı), örtü yükü basıncı ve zemindeki ince tane oranına karşı duyarlıdır, söz konusu bu faktörlerden etkilenirler. Bu nedenle sıvılaşma analizlerinde söz konusu bu faktörler dikkate alınarak düzeltilmiş SPT-N değeri kullanılmaktadır. Tij uzunluğu faktörü (C_R), örnekleme türü faktörü (C_S), kuyu çapı faktörü (C_B), çekiç türü (enerji oranı) faktörü (C_E) ve örtü yüküne (C_N) göre düzeltilmiş SPT-N değeri ($(N_{1)60}$) aşağıda verilen Eşitlik 3 (Youd vd., 2001) ile bulunmaktadır. $(N_1)_{60}$ değeri temiz kumlar (ince tane içermeyen kumlar) için hesaplanmaktadır.

$$(N_1)_{60} = C_R C_S C_B C_E C_N \quad (3)$$

$(N_1)_{60}$'ın belirlenmesi için düzeltme katsayılarının seçimi Robertson ve Wride (1998) tarafından verilen tablodan yapılmaktadır (Tablo 2).

İnce tane oranına (İTO) göre düzeltilmiş SPT-N değeri aşağıdaki eşitliklerden (Eşitlik 4) (Youd vd., 2001) bulunmaktadır.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta\,(\mathrm{N1})_{60} \quad (4a)$$

α=0 (İTO≲%5 için) (4b)

$$\alpha = \exp\left[1{,}76 - \left(\frac{190}{\text{İ}TO^2}\right)\right] \quad (4c)$$

(%5<İTO≲%35 için)

α=5 (İTO>%35 için) (4d)

β=1 (İTO≲%5 için) (4e)

$$\beta = \left[0{,}99 + \frac{\text{İ}TO^{1,5}}{1000}\right] \quad (4f)$$

(%5<İTO≲%35için)

β=1,2 (İTO>%35 için) (4g)

Tablo 2. Düzeltilmiş SPT-N değerinin ($(N_1)_{60}$) belirlenmesi için düzeltme katsayılarının seçimi (Robertson ve Wride, 1998).

Table 2. *Selection of correction coefficients for determining the corrected SPT-N value ((N1)60) (Robertson and Wride, 1998).*

Faktör	Ekipman değişkeni	Sembol	Düzeltme
Örtü yükü basıncı		C_N	$C_N=(Pa/\sigma'_v)^{0,5}$ (Liao ve Whitman 1986) $C_N \leq 2$ Pa=101kPa veya 1 atm σ'_v=Efektif düşey gerilme
Enerji oranı	1)Donut türü çekiç	C_E	0,5-1,0
	2-)Safety türü çekiç		0,7-1,2
	3-)Automatik-Trip Donut türü çekiç		0,8-1,3
Kuyu çapı	1-) 65 mm ile 115 mm	C_B	1,00
	2-)150 mm		1,05
	3-)200 mm		1,15
Tij uzunluğu	1-) 3m ile 4m	C_R	0,75
	2-)4m ile 6m		0,85
	3-)6m ile 10m		0,95
	4-)10m ile 30m		1,00
	5-)>30m		>1,00
Örnekleme türü	Standart örnekleyici	C_S	1,0
	İç gömlek kullanmadan		1,1-1,3

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının hesaplanması

Seed ve Idriss (1971) tarafından tanımlanan basitleştirilmiş prosedür, zemin tabakasının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde pratikte yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Daha sonra, basitleştirilmiş prosedür güncellenen verilere dayalı olarak iyileştirilmiştir (Seed, 1979; Seed vd., 1985; Youd vd., 2001; Cetin vd., 2002, 2004; Idriss ve Boulanger, 2004, 2008, 2010; Boulanger ve Idriss, 2012; Cetin vd., 2018a). Zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (F_L) hesaplanmasında temel olarak iki parametre dikkate alınır: (1) deprem olayının zemine verdiği tekrarlı yükleme oranının ifade eden tekrarlı gerilme oranı (CSR) ve (2) zemin tabakasının sıvılaşma tetiklemesine karşı dayanımını ifade eden tekrarlı dayanım oranı (CRR) (Eşitlik 5) $F_L \leq 1$ ise zemin sıvılaşmaya eğilimlidir ve $F_L > 1$ ise zemin sıvılaşmaya karşı dirençlidir (Youd vd., 2001).

$$F_L = \frac{CRR_{M=7,5}}{CSR_{M=7,5,\sigma'_v=1atm}} \quad (5)$$

Seed ve Idriss (1967), zemin profilindeki belirli bir derinlikteki tekrarlı gerilme oranını (CSR), maksimum döngüsel kesme gerilme oranının %65'ine eşit temsili bir değer olarak ifade ettiler (Eşitlik 6a). Seed ve Idriss (1971) ve Seed vd. (1975) tarafından önerilen basitleştirilmiş

yöntemde de düzgün tekrarlı kesme gerilmesini (CSR'yi) elde etmek için başlangıç formülü etkili örtü yükü gerilmesi kullanılarak normalleştirilmiştir (Eşitlik 6b). Daha sonra, belli büyüklükteki depremler için düzeltilmiş CSR değerlerini elde etmek için, Seed ve Idriss (1967) tarafından verilen formül, deprem büyüklüğüne göre değiştirilmiştir. Ayrıca, zeminin sıvılaşma potansiyelinin çevresel gerilmeye bağlı olduğu dikkate alınarak, Seed vd. (1983) örtü yükü gerilme düzeltme faktörünü önermişlerdir. Sonuç olarak CSR değeri M_w=7,5'den örtü yükü basınçları 1 atm'den farklı durumlar için düzeltilmiş duruma gelmiştir (Eşit 6c) (Cetin vd., 2018a).

$$CSR_{\sigma_v'} = 0{,}65\frac{\tau_{max}}{\sigma_v'} \quad (6a)$$

$$CSR_{\sigma_v'} = 0{,}65\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\frac{a_{max}}{g}r_d \quad (6b)$$

$$CSR_{M,\sigma_v'} = 0{,}65\frac{\sigma_v}{\sigma_v'}\frac{a_{max}}{g}r_d\frac{1}{MSF}\frac{1}{K_\sigma} \quad (6c)$$

Burada $CSR_{M,\sigma'v}$ özgün deprem büyüklüğü ve arazideki efektif gerilme için bulunan tekrarlı gerilme oranı, τ_{max} en büyük kesme gerilmesi, σ_v toplam düşey gerilme, σ'_v efektif düşey gerilme, r_d makaslama gerilmesi azaltma faktörü, a_{max} gal cinsinden en büyük yatay yer ivmesi, g yerçekimi ivmesi, MSF deprem büyüklüğü ölçekleme faktörü ve K_σ efektif örtü yükü için düzeltme faktörüdür.

Literatürde, zemin profilindeki esneklik düzeltmesini sağlayan kayma gerilimi azaltma faktörü ile ilgili birkaç ampirik ilişki verilmiştir (Seed ve Idriss, 1971; Imai vd., 1981; Seed vd., 1984; Seed vd., 1985; Liao ve Whitman, 1986; Golesorkhi, 1989; Idriss, 1999; Cetin vd., 2004; Kishida vd., 2009; Cetin vd., 2018b). Bu çalışmada Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen ve Liao ve Whitman (1986) tarafından yaklaşık olarak hesaplamaya dönüştürülen ilişki (Eşitlik 7) kullanılmıştır Eşitlik 7'de z metre cinsinden yer yüzeyinden itibaren derinliği göstermektedir.

$$r_d = \frac{(1{,}00 - 0{,}4113z^{0{,}5} + 0{,}0452z + 0{,}001753z^{1{,}5}}{(1{,}000 + 0{,}4177z^{0{,}5} + 0{,}05729z - 0{,}006205z^{1{,}5} + 0{,}001210z^2)} \quad (7)$$

Literatürde, MSF için çeşitli ilişkiler verilmiştir (Seed ve Idriss, 1982; Ambraseys, 1988; Arango, 1996; Youd ve Noble, 1997; Youd vd., 1997; Andrus ve Stokoe, 1997; Idriss, 1998, 1999; Youd vd., 2001; Boulanger ve Idriss, 2015). Bu çalışmada Idriss (1999) tarafından geliştirilen revize edilmiş büyüklük ölçekleme faktörü (Eşitlik 8) kullanılmıştır.

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

K_σ teriminin hesaplanmasında Hynes ve Olsen (1999) tarafından verilen formül (Eşitlik 9) kullanılmıştır.

$$K_\sigma = \left(\frac{\sigma_V'}{P_a}\right)^{(f-1)} \leq 1 \quad (9)$$

Burada P_a 1 atm basınçtır (101 kPa) σ'_v ise düşey efektif gerilmedir.

Bu çalışmada f'nin bulunmasında Montgomery vd. (2012) tarafından önerilen doğrusal ilişki kullanılmıştır (Eşitlik 10 ve 11). C_d değeri 46 olarak alınmıştır (Idriss ve Boulanger, 2008). Eşitliklerde D_R göreceli sıkılık, $(N_1)_{60CS}$ ise ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değeridir.

$$f = 1 - \left(\frac{D_R}{2}\right) \quad 0{,}6 \leq f \leq 0{,}8 \quad (10)$$

$$D_R = \sqrt{\frac{(N_1)_{60,CS}}{C_d}} \quad (11)$$

Literatürde, zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı dayanım kapasitesi olan tekrarlı dayanım oranını (CRR) elde etmek için jeoteknik ve jeofizik deneyler de dahil olmak üzere çok sayıda arazi deneyi kullanılmıştır. Bu

çalışmada, M = 7,5 büyüklüğündeki depremler için CRR değeri, aşağıdaki ifade kullanılarak $(N_1)_{60CS}$'ye (ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT-N değerine) göre hesaplanmıştır (Youd vd. 2001) (Eşitlik 12).

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34-(N_1)60cs} + \frac{(N_1)60cs}{135} + \frac{50}{[10(N_1)60cs+45]^2} - \frac{1}{200} \quad (12)$$

Zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarının hesaplanması

Zemin profilinin Sıvılaşma Şiddeti İndeksini (Lee vd., 2003) hesaplayabilmek için zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarına (P_L) (Chen ve Juang, 2000, Juang vd., 2003) ihtiyaç vardır. Juang vd. (2003) zemin tabakalarının sıvılaşma olasılığını tahmin etmek için aşağıdaki denklemi (Eşitlik 13) önermişlerdir. P_L değeri zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı, F_L'nin bir fonksiyonu olarak sıfırdan bire kadar değişir (Tablo 3).

$$P_L = \frac{1}{1+(\frac{F_L}{0,96})^{4,5}} \quad (13)$$

Tablo 3. Chen ve Juang (2000) tarafından önerilen sıvılaşma olasılığının sınıflandırılması.

Table 3. *Classification of liquefaction probability proposed by Chen and Juang (2000).*

Olasılık (P_L) aralığı	Tanımlama	Güvenlik sayısı (F_L) aralığı
$0,85 \leq P_L < 1,00$	Sıvılaşacağı neredeyse kesin	$0,653 \geq F_L > 0,000$
$0,65 \leq P_L < 0,85$	Sıvılaşacağı çok muhtemel	$0,837 \geq F_L > 0,653$
$0,35 \leq P_L < 0,65$	Sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit	$1,102 \geq F_L > 0,837$
$0,15 \leq P_L < 0,35$	Sıvılaşacağı muhtemel değil	$1,411 \geq F_L > 1,102$
$0,00 \leq P_L < 0,15$	Sıvılaşmayacağı neredeyse kesin	$F_L > 1,411$

Zemin profilinin sıvılaşma potansiyeli indeksi değerlerinin bulunuşu

Sıvılaşmanın yer yüzeyindeki hasar verici etkisinin değerlendirilmesinde ilk yaklaşım Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilmiştir. Bu yaklaşımda ilk 20 m derinliğe kadar yer alan zemin tabakalarının kalınlığı, bu tabakaların yüzeye yakınlığı ve 1'den küçük olan sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı dikkate alınmıştır. Söz konusu çalışmada verilen Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi, (L_I) zemin profilinin sıvılaşma potansiyellerini vermekte olup aşağıdaki formüllerle elde edilmektedir (Eşitlik 14 ve 15). Iwasaki vd. (1982) L_I değerlerine dayanarak sıvılaşmanın şiddetini çok düşük ($L_I = 0$), düşük ($0 < L_I \leq 5$), yüksek ($5 < L_I \leq 15$) ve çok yüksek ($L_I > 15$) olarak sınıflandırmıştır.

$$L_I = \int_0^{20m} F(z)W(z)dz \quad (14)$$

$$F_L < 1{,}0 \text{ için } F(z) = 1 - F_L \quad \text{ve} \quad F_L \geq 1{,}0 \ için F(z) = 0 \tag{15}$$

$$z \leq 20m \ için \ W(z) = 10 - 0{,}5z \quad \text{ve} \quad z > 20m \ için \ W(z) = 0 \tag{15b}$$

Sönmez (2003) L_I hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında bazı sınırlamalar olduğunu ortaya koymuştur. Sönmez (2003) sınıflandırmaya "sıvılaştırılamaz" ve "orta" kategorileri ekleyerek ve marjinal olarak sıvılaşabilir ve sıvılaşamaz sınırının F_L = 1,2 eşik değerini dikkate alarak değişiklik yapmıştır. Bu sınır Iwasaki vd. (1982)'de F_L<1'dir. Söz konusu yazar sıvılaşma şiddetini "sıvılaşma yok" (L_I=0), "düşük" (0 < L_I ≤ 2), "orta" (2 < L_I ≤ 5), "yüksek" (5 < L_I ≤ 35) ve "çok yüksek" (L_I > 35) olarak sınıflandırmıştır. Sönmez (2003) tarafından yapılan çalışmada, F_L değerinin 0,95-1,2 aralığında olması durumunda söz konusu eşik değeri dikkate alınarak F(z) grafiği oluşturulmuştur (Eşitlik 16).

$$F_L \leq 0{,}95 \ için \ \ F(z) = 1 - F_L \tag{16}$$

$$0{,}95 < F_L \leq 1{,}2 \ için \ F(z) = 2x10^6 e^{-18{,}427F_L} \tag{16b}$$

$$F_L < 1{,}2 \ için \ F(z) = 0 \tag{16c}$$

Bu çalışmada Sıvılaşma Potansiyeli İndeksinin (L_I) hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez (2003) esas alınmıştır.

Sönmez (2003)'te zemin tabakasının sıvılaşmama sınırını F_L=1.2 alınırken Sönmez ve Gökçeoğlu (2005)'te bu sınır kabul görmemiş, yazarlar Chen ve Juang (2000) çalışmasına dayanarak F_L>1,411 için zemin tabakasının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin ifadesini kullanmışlardır.

Zemin profilinin sıvılaşma şiddeti indeksi değerlerinin bulunuşu

Lee vd. (2003) 1999 Chi-Chi depremi sırasında kapsamlı zemin sıvılaşmasının meydana geldiği Yuanlin bölgesinin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmişlerdir. Bu araştırmacılar, Juang vd. (2003) tarafından önerilen olasılık fonksiyonunu (Eşitlik 13) dikkate alıp Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen L_I indeksinin F(z) terimini P_L (Eşitlik 13) ile değiştirdiler ve ayrıca L_I'yi sıvılaşma risk indeksi (I_R) olarak (Eşitlik 17) yeniden adlandırmışlardır.

$$I_R = \int_0^{20m} P_L(z)W(z)dz \tag{17}$$

Lee vd. (2003) I_R'nin 20'den küçük değerlerini "düşük", 20 ile 30 arasındaki değerlerini "yüksek" ve 30'dan büyük değerlerini de "çok yüksek" olarak sınıflandırmışlardır. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) I_R'nin risk kavrammını karşılamadığı, sadece L_I gibi sıvılaşma haritalarının üretiminde kullanıldığına dikkat çekerek Lee vd. (2003) tarafından önerilen indeksin adının "Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_S)" olmasını önermişlerdir. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) L_S'nin hesaplanmasını aşağıdaki eşitliklerle yapılmasını önermişlerdir.

$$L_S = \int_0^{20m} P_L(z)W(z)dz \tag{18a}$$

$$z \leq 20m \ için \ W(z) = 10 - 0{,}5z \quad \text{ve} \quad z > 20m \ için \ W(z) = 0 \tag{18b}$$

$$F_L \leq 1{,}411 \ için P_L = \frac{1}{1+(\frac{F_L}{0{,}96})^{4{,}5}} \tag{18c}$$

$$F_L > 1{,}411 \ için \quad P_L = 0 \tag{18d}$$

Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) L_S değerine göre sıvılaşma şiddetini aşağıdaki gibi sınıflandırmışlardır (Tablo 4).

Tablo 4. Sıvılaşma Şiddeti İndeksine göre sınıflandırma (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005).

Table 4. *Classification according to Liquefaction Severity Index (Sönmez and Gökçeoğlu, 2005)*

L_S	Tanımlama
0,85≤ L_S <1,00	Çok yüksek
0,65≤ L_S <0,85	Yüksek
0,35≤ L_S <0,65	Orta
0,15≤ L_S <0,35	Düşük
0,00< L_S <0,15	Çok düşük
L_S=0	Sıvılaşma yok

Bu çalışmada, zemin profilinin Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin hesaplanmasında ve sınıflandırılmasında Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) dikkate alınmıştır.

Mekansal enterpolasyonların yapılışı

Jeoteknik özelliklerin ve ilgili parametrelerin mekansal dağılımlarını tahmin etmek için deterministik bir yöntem olan Mesafe Ağırlıklandırmanın Tersi (IDW) enterpolasyon

yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem iki nokta arasındaki ilişki ve benzerliğin aralarındaki mesafeye orantılı olduğu varsayımına dayanır. Shepard (1968) tarafından tanımlanan IDW'nin genel bir biçimi aşağıdaki şekilde verilmiştir (Eşitlik 19).

$$Z(x) = \sum_{i=1}^{n} \omega_i(x) z_i \,/\, \sum_{i=1}^{n} \omega_i(x), \quad \omega_i(x) = 1/d_i^p \tag{19}$$

Burada, x bir tahmin konumunu, x_i bir veri noktasını, d bilinen veri noktasından bilinmeyen tahmin noktasına olan mesafeyi, n toplam veri noktası sayısını ve p güç parametresini belirtir. Genellikle bu çalışmada olduğu gibi p=2 alınmaktadır. Jeoteknik özelliklerin ve ilgili parametrelerin mekansal dağılımları yönlendirme göstermediğinden bu çalışmada enterpolasyon yöntemi olarak IDW kullanılmıştır.

BULGULAR

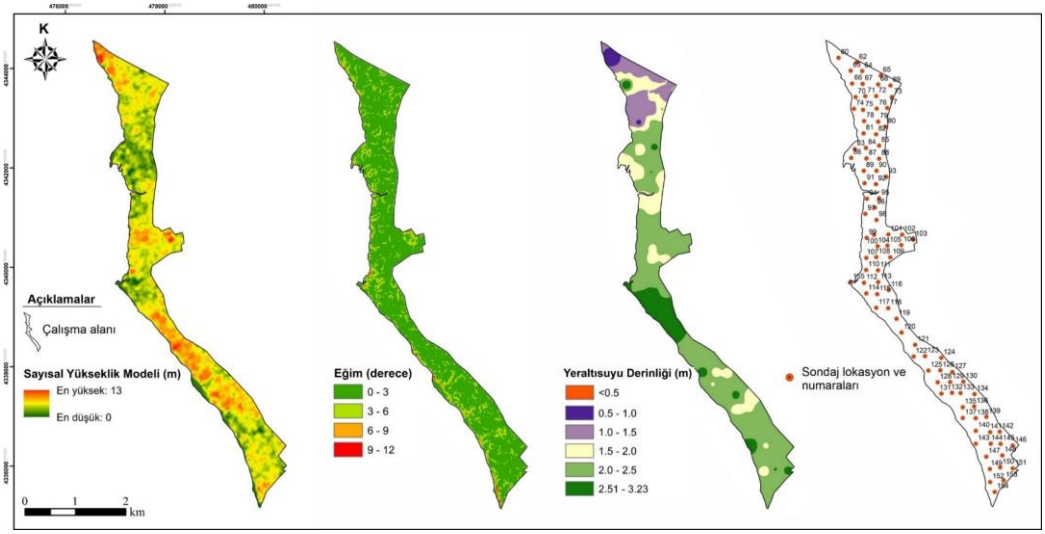
Sıvılaşma analizi için senaryo deprem

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının bulunması için en büyük yatay yer ivmesine ihtiyaç vardır (bakınız Eşitlik 6c). İnceleme alanına en fazla 100 km uzaklıktaki fayların/fay zonlarının (Şekil 3) üreteceği en büyük deprem büyüklüğü ve bu depremlerin inceleme alanında oluşturacağı en büyük yer ivmesi Eşitlikler 1 ve 2 ile hesaplanmıştır (Tablo 1). Tablo 1 incelendiğinde olası senaryolar arasında en tehlikeli senaryonun Havran-Balya fayına bağlı olarak gerçekleşeceği görülmektedir. Yapılan hesaplamalara göre Havran-Balya fayı M_w=7,3 büyüklüğünde deprem üreteceği ve bu deprem inceleme alanında 0,1758 g büyüklüğünde en büyük yer ivmesi oluşturacağı görülmüştür (Tablo 1). Bu nedenle zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi amax=0,1758 g olarak alınmıştır.

Topografya ve eğim

İnceleme alanının sayısal yükseklik modeli (DEM) Şekil 3'de verilmiştir. İnceleme alanında en düşük kot 0 m, en yüksek kot 13 m'dir. İncelene alanında deniz kıyısı 0 m kota sahip olup topoğrafya düzensiz olarak değişmektedir.

Eğim haritası DEM'den üretilmiştir (Şekil 3). İnceleme alanının eğimi 0 ile 12 derece arasında değişmektedir. İnceleme alanının %82,1'i 3 dereceden küçük, %16,6'sı 3 ile 6 derece arasında, %1,2'si 6 ile 9 derece arasında ve %0,1'i 9 ile 12 derece arasında eğime sahiptir.



Şekil 3. Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sayısal yükseklik modeli, eğim, yeraltı suyu derinliği ve sondaj lokasyon haritası.

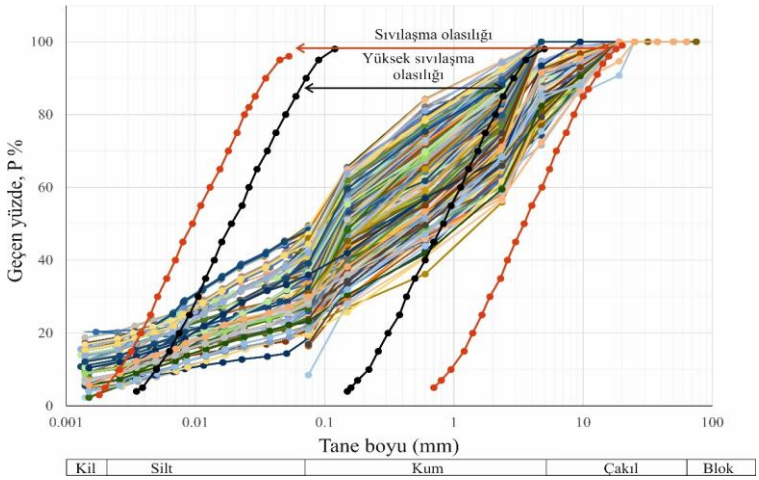
Figure 3. *Digital elevation model, slope, groundwater depth, and drilling location map of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir).*

Yeraltı suyu derinliği

İnceleme alanında yeraltı suyu derinliği 0,5 m ile 3,23 m arasında değişmektedir (Şekil 3). Yeraltı suyu derinlikleri Nisan 2016'da ölçülmüştür. Yeraltı suyu derinliği inceleme alanının %1,6'sında 0,5 ile 1,0 m arasında, %10,6'sında 1,0 ile 1,5 m arasında, %19,0'da 1,5 ile 2,0 m arasında, %52,7'sinde 2,0 ile 2,5 m arasında ve %11,1'in de 2,5 ile 3,23 m arasında değişmektedir (Şekil 3). Çalışma alanında deniz suyu girişimi için bir çalışma yapılmamıştır.

Zemin türü ve zemin sıklığı

İnceleme alanındaki yayılım gösteren alüvyon zeminin elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon iki tür zeminden oluşmaktadır (Şekil 4); Killi siltli kum ve az çakıl (çakıl %5-10, kum %51-56, silt %19-21 ve kil %18-20) ve çakıllı kum ve az silt (çakıl %15-24, kum %56-61, silt %13-14 ve kil %6-11). Tane dağılımı



Şekil 4. Tane boyu dağılımına bağlı olarak çizilen sıvılaşma potansiyeli seviyeleri (Tsuchida, 1970) ve çalışma alanındaki alüvyon zemine ait tane boyu dağılım eğrileri.

Figure 4. *Liquefaction potential levels drawn depending on grain size distribution (Tsuchida, 1970) and grain size distribution curves of the alluvial soil in the study area.*

dikkate alındığında söz konusu iki tür zemin de sıvılaşması olası zeminler grubuna girmektedir (Şekil 4).

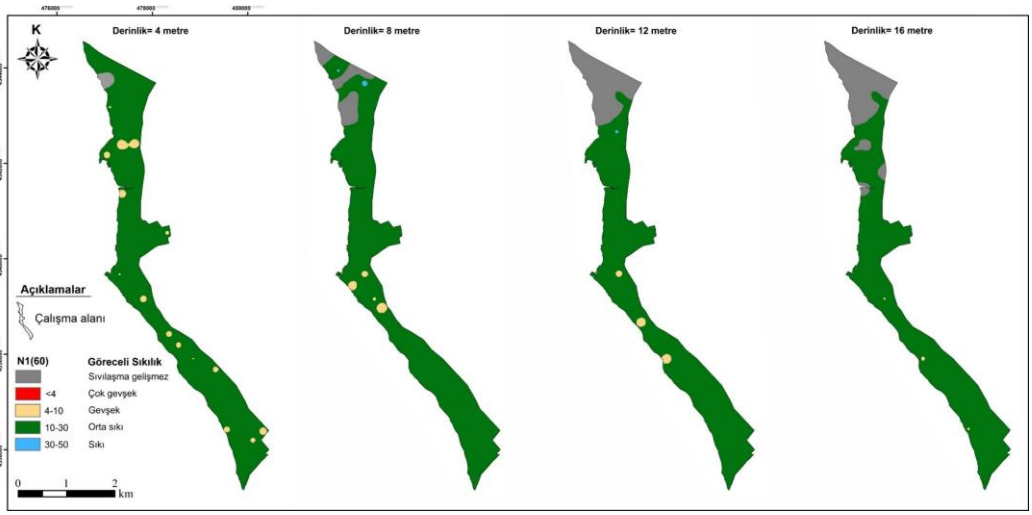
Sıvılaşmanın gelişiminde zeminin göreceli sıkılığı önemlidir. Sıvılaşma gevşek zeminlerde gelişmektedir. Zeminin göreceli sıkılığı arttıkça sıvılaşmanın gelişme olasılığı düşmektedir. Bu nedenlerle farklı derinliklerdeki (4, 8, 12 ve 16 m derinliklerdeki) zemin tabakalarının düzeltilmiş SPT- N değerinin ($(N_1)_{60}$ değerinin) mekânsal değişimi incelenmiştir (Şekil 5). Bu inceleme amacıyla oluşturulan haritalarda zeminlerin $(N_1)_{60}$ değerine göre göreceliği sıkılığının (Dr) sınıflandırılması için Duncan ve Buchignani (1976) sınıflaması esas alınmıştır (Tablo 5).

Tablo 5. Düzeltilmiş SPT-N değerine ($(N_1)_{60}$) göre göreceli sıkılığın (D_r) sınıflandırılması (Duncan ve Buchignani, 1976).

Table 5. *Classification of relative tightness (Dr) according to the corrected SPT-N value ((N1)60) (Duncan and Buchignani, 1976).*

$(N_1)_{60}$	Sıkılık Durumu	Dr (%)
0-4	Çok gevşek	0-15
4-10	Gevşek	15-35
10-30	Orta sıkı	35-65
30-50	Sıkı	65-85
>50	Çok sıkı	85-100

Düzeltilmiş SPT-N değerinin ($(N_1)_{60}$), zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının ve sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekânsal dağılımını gösteren haritalarda (Şekil 6, 7 ve 8) kaya birimlerinin yayılım gösterdiği alanlar "Sıvılaşma gelişmez" olarak tanımlanmıştır. Bu haritalarda 4 m derinlikte inceleme alanının %1,3'ünde, 8 m derinlikte %7,7'sinde, 12 m derinlikte %16,9'unda ve 16 m derinlikte %19,2'sinde sıvılaşmanın gelişmeyeceği görülmektedir (Şekil 6, 7 ve 8).



Şekil 5. Düzeltilmiş SPT-N değerinin ($(N_1)_{60}$) farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 5. Spatial distribution of corrected SPT-N value ((N1)60) at different depths.

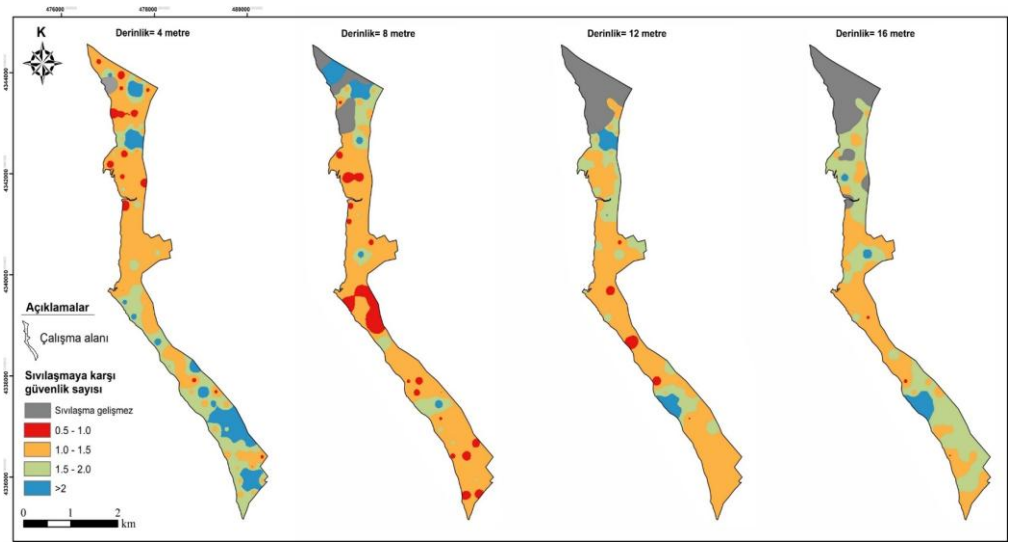
Farklı derinlikte zeminin göreceli sıkılığının mekânsal dağılımının gösterildiği haritalarda "Çok gevşek" ve Çok sıkı" tür zeminlerin yer almadığı görülmektedir. 4 m derilikte inceleme alanının %3,4'ünde "gevşek", %95,3'ünde "orta sıkı" ve %0,0'ında "sıkı" zeminler, 8 m derinlikte inceleme alanının %1,3'ünde "gevşek", %90,8'inde "orta sıkı" ve %0,2'sinde"sıkı" zeminler, 12 m derinlikte inceleme alanının %1,2'sinde "gevşek", %81,8'inde "orta sıkı" ve % 0,1'inde "sıkı" zeminler ve 16 m derinlikte inceleme alanının %0,1'inde "gevşek", %98,7'sinde "orta sıkı" ve %0,0'ında "sıkı" zeminler yayılım göstermektedir (Şekil 5).

Zemin tabakalarının suvulaşmaya karşı güvenlik sayısının ve sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekansal dağılımı

Zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının farklı derinliklerdeki mekânsal dağılımını gösteren haritalar incelediğinde; 4 m derinlikte inceleme alanının % 3,7'sinde F_L'nin 0,5-1,0 arasında, %54,1'inde FL'nin 1,0-1,5 arasında, %26,5'inde F_L'nin 1,5-2,0 arasında değiştiği, %14,4'ünde F_L'nin 2,0'dan büyük olduğu, 8 m derinlikte inceleme alanının % 9,6'sında F_L'nin 0,5-1,0 arasında, %65'inde F_L'nin 1,0-1,5 arasında, % 11,9'unda F_L'nin

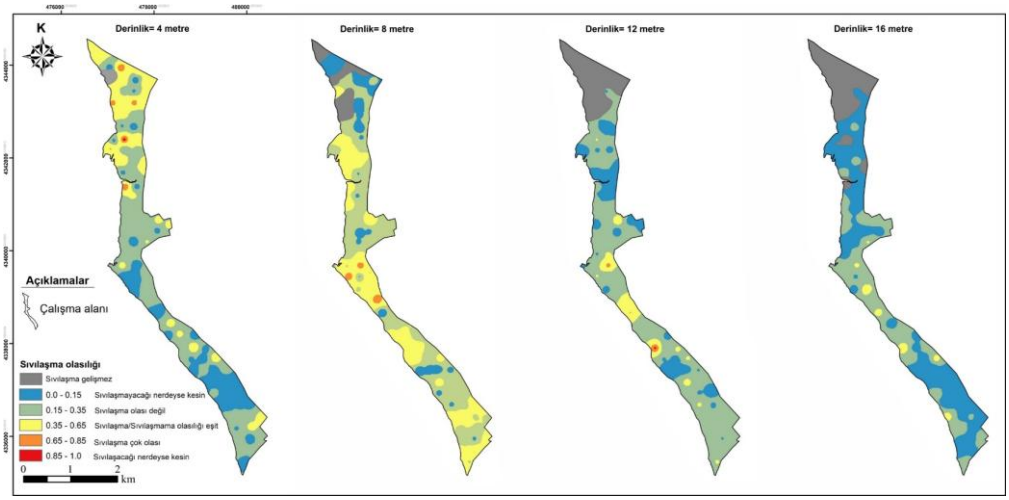
1,5-2,0 arasında değiştiği, %5,8'inde F_L'nin 2,0'dan büyük olduğu görülmüştür (Şekil 6). 12 m derinlikte inceleme alanının %1,9'unda F_L 0,5-1,0 arasında, %62,2'sinde F_L 1,0-1,5 arasında, %14,3'ünde F_L 1,5-2,0 arasında değişmekte ve %4,8'inde ise F_L>2,0'dır. 16 m derinlikte inceleme alanının %0,1'inde F_L 0,5-1,0 arasında, %41,7'sinde F_L 1,0-1,5 arasında, %35'inde F_L 1,5-2,0 arasında değişmekte ve %4'ünde ise F_L> 2,0'dır (Şekil 6).

Zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarının farklı derinlikteki mekânsal dağılımına göre; 4 m derinlikte inceleme alanının %21,9'unda zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %52,3'ünde sıvılaşacağı muhtemel değil, %23,3'ünde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit, %1,1'inde sıvılaşacağı çok muhtemel, %0,1'inde sıvılaşacağı neredeyse kesin durumdadır (Şekil 6). 8 m derinlikte inceleme alanının %11,3'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %46,8'inde sıvılaşacağı muhtemel değil, %33,2'sinde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit, %1'inde sıvılaşacağı çok muhtemeldir. 12 m derinlikte inceleme alanının %17,4'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %58,2'sinde sıvılaşacağı muhtemel değil, %7'sinde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit ve %0,4'ünde sıvılaşacağı çok muhtemel durumdadır. 16 m derinlikte inceleme alanının %45,4'ünde zemin tabakalarının sıvılaşmayacağı neredeyse kesin, %33,1'inde sıvılaşacağı muhtemel değil ve %2.3'ünde sıvılaşma/sıvılaşmama olasılığı eşit durumdadır (Şekil 7).



Şekil 6. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (FL) farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 6. *Spatial distribution of the factor of safety against liquefaction (FL) at different depths.*

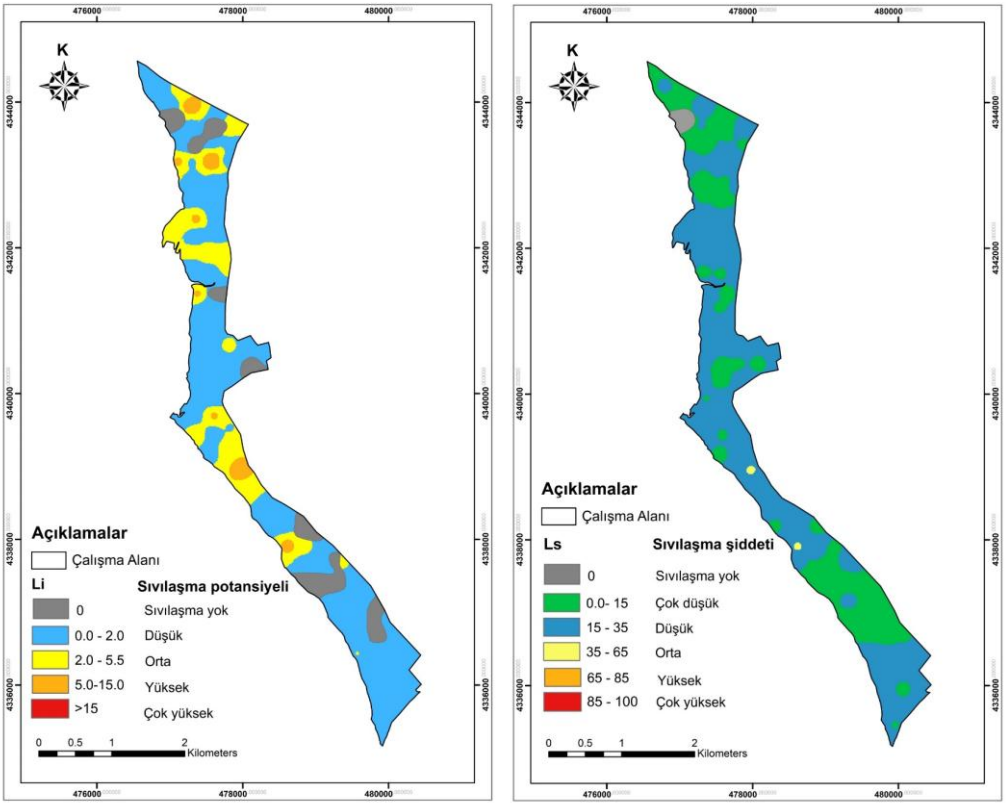


Şekil 7. Zemin tabakalarının sıvılaşma olasılıklarının farklı derinliklerde mekânsal dağılımı.

Figure 7. *Spatial distribution of liquefaction probabilities of soil layers at different depths.*

Altınova sahilinin sıvılaşma potansiteli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası

Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) sondaj yapılmış yerdeki zemin profilleri için hesaplanmış Sıvılaşma Potansiyeli İndeksinin mekânsal dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. Bu harita incelendiğinde, toplam alanın %11,8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanında toplam alanın %64,1'i "düşük", %20,5'i "orta", %3,6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında "çok yüksek" sıvılaşma potansiyeli olan alan bulunmamaktadır (Şekil 8). Sondaj yapılan yerdeki zemin profilleri için hesaplan Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin mekânsal dağılımına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3'ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3'ünde sıvılaşmanın "çok düşük şiddetli", %65'inde sıvılaşmanın "düşük şiddetli" ve %0,3'ünde "orta şiddetli" gelişeceği görülmektedir. Sıvılaşma şiddeti haritasına göre inceleme alanında sıvılaşmanın "yüksek şiddetli" ve "çok yüksek şiddetli" gelişebileceği alanlar bulunmamaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Altınova sahilinin (Ayvalık, Balıkesir) sıvılaşma potansiyeli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası.

Figure 8. *Liquefaction potential map and liquefaction intensity map of the Altınova coast (Ayvalık, Balıkesir).*

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada çalışma sahası olan Ayvalık ilçesi (Balıkesir) Altınova mahallesinin sahil kısmının sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Çalışma sahası 6,32 km^2'lik alanı kapsamaktadır

Bu çalışmada, çalışma alanına en fazla 100 km uzağındaki faylar dikkate alınarak oluşturulan senaryo depremlere göre, zemin sıvılaşması açısından en tehlikeli depremi Havran-Balıkesir fay zonuna bağlı Havran-Balya fayının üreteceği, söz konusu bu depremin M_w=7,3 büyüklüğünde olacağı ve inceleme alanında 0,1758 g büyüklüğünde en büyük yer ivmesi oluşturacağı görülmüştür. Bu nedenle, bu çalışmada zemin tabakalarının sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı hesaplanırken en büyük yer ivmesi amax=0,1758 g olarak alınmıştır.

İnceleme alanı olan Altınova sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) alüvyon zemin yayılım göstermektedir. Elek analizi sonuçlarına göre söz konusu alüvyon killi siltli kum ve az çakıl ve çakıllı kum ve az silt türü zeminlerden oluşmaktadır. Her iki zemin türü de sıvılaşması olası zeminlerdir.

İnceleme alanında yeraltı suyu derinliği sıvılaşmanın gelişebileceği derecede düşüktür. Yeraltı suyu derinliği çalışma alanının %1,6'sında 0,5 ile 1,0 m arasında, %10,6'sında 1,0 ile 1,5 m arasında, %19,0'da 1,5 ile 2,0 m arasında, %52,7'sinde 2,0 ile 2,5 m arasında

ve %11,1'in de 2,5 ile 3,23 m arasında değişmektedir.

Bu çalışmada inceleme alanında yer alan 96 sondajın bulunduğu noktadaki zemin profillerinin sıvılaşma potansiyeli indeksi (L_I) hesaplanmış ve L_I'nin mekânsal dağılımı bulunmuştur. Bu sıvılaşma potansiyeli indeksi haritasına göre inceleme alanının %11,8'inde sıvılaşma olmayacağı görülmektedir. İnceleme alanının %64,1'i "düşük", %20,5'i "orta", %3,6'sı "yüksek" sıvılaşma potansiyeline sahiptir. İnceleme alanında "çok yüksek" sıvılaşma potansiyeli olan alan bulunmamaktadır.

İnceleme alanı olan Ayvalık Mahallesi sahilinde (Ayvalık, Balıkesir) toplam 4723 tane bina bulunmaktadır. Bina bilgisi OpenStreetMap sitesinden(https://www.openstreetmap.org/#map= 14/39,21796/26,76673) alınmıştır. 4723 binadan 584'ü sıvılaşma olmayacak alanda, 3034'ü düşük sıvılaşma potansiyelli alanda, 909'u orta sıvılaşma potansiyelli alanda ve 196'sı yüksek sıvılaşma potansiyelli alanda bulunmaktadır.

Sıvılaşma Şiddeti İndeksinin mekânsal dağılımına göre senaryo depremin gerçekleşmesi durumunda inceleme alanının %1,3'ünde sıvılaşma olmayacağı, %33,3'ünde sıvılaşmanın "çok düşük şiddetli", %65'inde sıvılaşmanın "düşük şiddetli" ve %0,3'ünde "orta şiddetli" gelişeceği görülmektedir. Sıvılaşma şiddeti haritasına göre inceleme alanında sıvılaşmanın "yüksek şiddetli" ve "çok yüksek şiddetli" gelişebileceği alanlar bulunmamaktadır. İnceleme alanının sıvılaşma şiddeti haritası dikkate alındığında, sıvılaşmanın olmayacağı alanda 83 binanın, çok düşük şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda 1531 binanın, düşük şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda 3070 binanın ve orta şiddette sıvılaşmanın gelişeceği alanda da 39 binanın bulunduğu görülmüştür.

Bu çalışmada üretilen sıvılaşma potansiyeli haritası ve sıvılaşma şiddeti haritası inceleme alanının mekânsal planlamasında bir altlık olarak kullanılabilir. İnceleme alanında orta ve yüksek sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda bina yapılmamalı mevcut binalarda boşaltılmalı veya zemin iyileştirilmesi yapılmalıdır. Düşük sıvılaşma potansiyeline sahip alanlarda zemin iyileştirilmesi yapıldıktan sonra bina yapımına izin verilmelidir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar değerli yorumları için hakemlere teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

Ambraseys, N.N., 1988. Engineering seismology. Earthquake Engrg. and Struct. Dynamics 17:1–105

Analiz Mühendislik İnşaat Sondajcılık Madencilik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, 2017. Balıkesir İli Ayvalık İlçesi 3125.83 Hektarlık Alanın İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu, İstanbul

Andrus, R.D., Piratheepan, P., Ellis, E., Zhang, J., Juang, C.H., 2004. Comparing liquefaction evaluation methods using penetration-Vs relationships. Soil Dyn. Earthq. Eng. 24(9–10): 713–721. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.06.001

Andrus, R.D. & Stokoe, K.H., 1997. Liquefaction resistance based on shear wave velocity. NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Technical Report NCEER-97-0022

Andrus, R.D. & Stokoe, K.H., 2000. Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity. J Geotech Geoenviron Eng ASCE 126(11):1015–1025. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015)

Andrus, R.D., Stokoe, K.H., Chung, R.M., 1999. Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedure, NISTIR 6277. Natl Inst Stand Technol, Gaithersburg

Anon, 2016. State of the art and practice in the assessment of earthquake-ınduced soil liquefaction and ıts consequences. A report of The National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, The National Academies Press, Washington, DC, pp.297. https://doi.org/10.17226/23474

Arango, I., 1996. Magnitude scaling factors for soil liquefaction evaluations. J Geotech Eng 122(11):929-936. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:11(929)

Beroya, M.A.A., Aydin, A., Tiglao, R., Lasala, M., 2009. Use of microtremor in liquefaction hazard mapping. Engineering Geology 107 140–15. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.009

Boulanger, R.W. & Idriss, I.M., 2012. Probabilistic standard penetration test–based lique¬faction–triggering procedure. J Geotech Geoenviron 138(10):1185–95. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000700

Boulanger, R.W. & Idriss, I.M., 2015. Magnitude scaling factors in liquefaction triggering procedures. Soil Dyn Earthq Eng 79(B):296-303. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.01.004

Bray, J.D., Sancio, R.B., Durgunoglu, T., Onalp, A., Youd, T.L., Stewart, J.P., Seed, R.B., Cetin, O.K., Bol, E., Batuary, M.B., Christensen, C., Karadayilar, T., 2004. Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazari, Turkey. J Geotech Geoenviron Eng 130(7):673 685. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:7(673

Ceryan, S. ve Ceryan, N., 2021. A new index for microzonation of eathquake prone settlement area by considering liquefaction potential and fault avoidance zone: an example casefrom Edremit (Balıkesir, Turkey). Arabian Journal of Geosciences (14), 1-21. https://doi.org/10.1007/s12517-021-08573-3

Ceryan, S., Pijush, S., Samed, O.S., Berber, S., Tudes, G.S., Elci, H., Ceryan, N., 2023. Soil Liquefaction usceptibility of Akcay Residential Area (Biga Peninsula, Turkey) Close to North Anatolian Fault Zone. Journal of Mining and Environment, 14(4),1141-1153. 10.22044/jme.2023.13145.2395

Cetin, K.O., Der Kiureghian, A., Seed, R.B., 2002. Probabilistic Models for the Initiation of Seismic Soil Liquefaction. Structural Safety 24:67-82. https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00036-X

Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgac, M., Chowdhury, K., 2018a. SPT-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction triggering hazard. Soil Dyn Earthq Eng. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.09.012

Cetin, K.O., Seed, R.B., Kayen, E.K., Moss, R.E.S., Bilge, H.T., Ilgaz, M., Chowdhury, K., 2018b. Examination of differences between three SPT-based seismic soil liquefaction triggering relationships. Soil Dyn Earthq Eng 113:75–86.

https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.013

Cetin, K.O., Seed, R.B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., Moss, R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. J Geotech Geoenviron Eng 130(12):1314–1340. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1314

Chen, C.J. & Juang, C.H., 2000. Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods. In: Mayne PW, Hryciw R (eds) Innovations and applications in geotechnical site characterization, Vol. 97. Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, pp 49–64

Dobry, R., Stokoe, K.H., Ladd, R.S., 1981. Liquefaction susceptibility from S-wave velocity, In: Proceedings of the ASCE national convention. In situ tests to evaluate lique¬faction susceptibility, ASCE, New York

Dobry, R., Abdoun, T., 2011. An investigation into why liquefaction charts work: A necessary step toward integrating the states of art and practice. Pp. 1344 in Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 10-13 January, Santiago, Chile. Ishihara Lecture.

Duncan, J.M. & Buchignani, A.L., 1976. An Engineering Manual for Settlement Studies, Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institue and State University

ElGhoraiby, M.A., Park, H., Manzar, M.T., 2020. Stress-strain behavior and liquefaction strength characteristics of Ottawa F65 sand. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 138, 106292. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106292

Esin, G. ve Ceryan, S., 2015. Burhaniye Balıkesir yerleşim alanının sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi. Yerbilimleri, 36(2), 81-96. https://doi.org/10.17824/yrb.47475

Ghafghazi, M., DeJon, J.T., Sturm, A.P., Temple, C.E., 2017. Temple ınstrumented becker penetration Test. II: iBPT-SPT correlation for characterization and liquefaction assessment of gravelly soils. J Geotech Geoenviron Eng 1-35. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000171

Golesorkhi, R., 1989. Factors influencing the computational determination of earthquake-induced shear stresses in sandy soils [Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of philosophy]. University of California at Berkeley

Hakam, A., Ismail, F.A., Fauzan, F., 2016. Liquefaction potential assessment based on laboratory test. International Journal of Geomate 11(26):2553-2557

Hwang, J.H., Yang, C.W., Chen, C.H., 2003. Investigations on soil liquefaction during the Chi-Chi earthquake, Soils and Foundations 43(6), 107-123. DOI: 10.3208/sandf.43.6_107

Hynes, M.E., Olsen, R.S., 1999. Influence of confining stress on liquefaction resistance. Proc., Int. Workshop on Phys. And Mech. Of Soil Liquefaction, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.

Idriss, I.M., 1998. Evaluation of liquefaction potential, Consequences and Mitigation--An Update," Presentation notes for

Geotechnical Society Meeting, Vancouver, Canada

Idriss, I.M., 1999. An update of the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, Presentation notes for Transportation Research Board Workshop on New Approaches to Liquefaction Analysis, Washington, D.C.

Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2004. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes In: Doolin D, editor. Proceedings of 11th international conference on soil dynamics and earthquake engineering and 3rd International conference on earthquake geotechnical engineering, 1. Stallion Press 1:32–56. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.023

Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA

Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2008. Soil liquefaction during earthquakes, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

Idriss, I.M. & Boulanger, R.W., 2010. SPT-Based liquefaction triggering procedures. Report No. UCD/CGM-10-02. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis. 259 pp

Imai, T., Tonouchi, K., Kanemori, T., 1981. The simple evaluation method of shear stress generated by earthquakes in soil ground, report no 3. Bur Pract Geol Investig 1981:39–58

Ishihara, K., & Koga, Y., 1981. Case studies of liquefaction in the 1964 Niigata Eartquake, Soil snd Foundation, 21(3):34-52.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. 3rd International Earthquake Microzonation Conf 1319–1330

Juang, C.H., Yuan, H., Lee, D.H., Lin, P.S., 2003. A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. J Geotech Geoenviron Eng 129 (1):66– 80

Kayabali, K., Yilmaz, P., Fener, M., Akturk, O., Habibzada, F., 2018. Assessment of soil liquefaction using the energy approach. Bulletin of the Mineral Research and Exploration 156:193-204. https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.351257

Kishida, T., Boulanger, R.W., Abrahamson, N.A., Driller, M.W., Wehling, T.M., 2009. Seismic response of levees in Sacramenyo-San Joaquin Delta. Earthquarce Spectra, 25(3):557-582. https://doi.org/10.1193/1.3157259

Lee, D.H., Ku, C.S., Yuan, H., 2003. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin. Taiwan Eng Geol 71:97–117. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00128-5

Liao, S., Whitman, R.V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. J Geotech Eng 112(3):373–7. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:3(373

Montgomery, J., Boulanger, R.W., Harder, L.F., 2012. Examination of the Kσ overburden correction factor on liquefaction resistance. Report No. UCD/CGM-12-02, Center for

Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Davis, California, pp.42. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001172

MTA, 2018. Maden Tektik ve Arama Genel Müdürlüğü diri fay haritası. https://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx

Olsen, R.S., 1997. Cyclic liquefaction based on the cone pen-etrometer test. In: Youd TL, Idriss I M (eds) National center for earthquake engineering research, Proceedings of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resis¬tance of soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, Buffalo, pp 225–276

Orense, R.P., Pender, M.J., Wotherspoon, L.M., 2012. Analysis of soil liquefaction during the Recent Canterbury (New Zealand) earthquakes. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA 43(2), 8-17, ISSN 0046-5828. https://doi.org/10.14456/seagj.2012.20

Quigley, M.C., Bastin, S., Bradley, B.A., 2013. Recurrent liquefaction in Christchurch, New Zealand, during the Canterbury earthquake sequence. Geology 41(4):419–422. https://doi.org/10.1130/G33944.1

Rapti, I., 2016. Numerical modeling of liquefaction-induced failure of geostructures subjected to earthquakes (Doctoral dissertation, Université Paris-Saclay-CentraleSupélec).

Robertson, P.K. &, Campanella, R.G., 1985. Liquefaction potential of sands using the CPT. J Geotech Eng 111:384–403

Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Can Geotech J 35(3):442–459

Seed, H., Bolton, K.M., Clarence, K.C., 1975. Influence of seismic history on the liquefaction characteristics of sands. Report No, EERC 75-25, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley

Seed, H.B., 1979. Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. J. Geotechnical Eng. Div, ASCE 105(GT2), 201–55

Seed, H.B. & De Alba, P., 1986. Use of SPT and CPT tests for evaluating the liquefaction resistance of sands, use of in situ tests in geotechnical engineering, Geotechnical Special Publication 6, ASCE

Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1967. Analysis of liquefaction: Niigata earthquake. Proc., ASCE, 93(SM3):83-108

Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE 97 (SM9, Proc. Paper 8371) 1249-1273

Seed, H.B. & Idriss, I.M., 1982. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 134

Seed, H.B., Idriss, I.M., Arango, I., 1983. Evaluation of liquefaction potential using field performance data. J Geotech Eng Div, 10.1061/ (ASCE)0733-9410(1983)109:3(458), 458–482

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. Jr, Chung, R., 1984. The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. Earthquake Engineering Research Center, University of California,

Berkeley, Report No. UCB/EERC-84/15, 50 pp.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. Jr, Chung, R., 1985. Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations, J Geotech Eng 111(12):1425-1445

Seed, R.B., Dickenson, S.E., Idriss, I.M., 1991. Principal geotechnical aspects of the 1989 Loma Prieta earthquake. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering 31(1):1-26.

Setiawan, B., 2011. Assessing liquefaction potential of soils utilising ın-situ testing. Master of Engineering Science Thesis, School of Civil, Environmental and Mining Engineering, University of Adelaide

Shepard, D., 1968. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In Proceedings of the 23rd ACM National Conference, 517–524

Sönmez, H., 2003. Modification of the liquefaction potential index and liquefaction sus¬ceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol, Turkey). Environ Geol 44(7):862–871. https://doi.org/10.1007/s00254-003-0831-0

Sönmez, H., Gökçeoğlu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. Environ Geol 48(1):81–91. https://doi.org/10.1007/s00254-005-1263-9

Sözbilir, H., Özkaymak, Ç., Uzel, B., Sümer, Ö., Eski, S., Tepe, Ç., 2016b. Paleoseismology of the Havran-Balıkesir Fault Zone: Evidence for past earthquakes in the strike- slip-dominated contractional deformation along the southern branches of the North Anatolian fault in northwest Turkey. Geodinamica Acta, 28(4), 254–272. https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1171111

Sözbilir, H., Sümer, Ö., Özkaymak Ç., Uzel, B., Güler, T., Eski, S., 2016a. Kinematic analysis and paleoseismology of the Edremit Fault Zone: evidence for past earthquakes in the southern branch of the North Anatolian Fault Zone, Biga Peninsula, NW Turkey. Geodinamica Acta, 28(4): 273–294. https://doi.org/10.1080/09853111.2016.1175294

Stark, T.D., Olson, S.M., 1995. Liquefaction resistance using CPT and field case histories. Journal of Geotechnical Engineering 121(12). https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1995)121:12(856)

Stokoe, L.H., Roesset, J.M., Biershwale, J.G., Aouad, M., 1988. Liquefaction potential of sands from shear wave velocity. In: Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, vol. III, 213–218

Tanaka, Y., 2000. The 1995 Great Hanshin earthquake and liquefaction damages at reclaimed lands In Kobe Por. International Society of Offshore and Polar Engineers 10(1), 1-9, ISOPE-00-10-1-064.

Terzaghi, K., Peck, R.B., 1948. Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley.

Tokimatsu, K. & Uchida, A., 1990. Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity. Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foudation Engineering, 30, 2:33-42

Tsuchida, H., 1970. Prediction and countermeasure against liquefaction in

sand deposits Sem. of the Port and Harbor Research Institute.

Ulusay, R., Tuncay, E., Sönmez, H., Gökçeoglu, C., 2004. An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey. Engineering Geology, 74(3/4),265-291. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.04.002

Uyanık, O., Taktak, A.G., 2009. A new method for liquefaction analysis from shear wave velocity and predominant resonance period. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13-1 74-81

Wells, D. & Coppersmith, K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface dislacement. Bulletin of the Seismological Society of America, 84:974-1002

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Jr, Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.SC,. Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEERINSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils, J Geotech Geoenviron Eng 127(10):817-833

Youd, T.L. & Noble, S.K., 1997. Liquefaction criteria based on statistical and probabilistic analyses. Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, December 31:201-205

Youd, T.L., Willey, P.S., Gilstrap, S.D., 1997. Liquefaction hazard screening for Utah highway bridges: Fnl Rprt, UDOT Task Order 7RE0383 SPR-0012(018), Cntrct No. 93-8476, and FHWA (NCEER) Proj DTFH61-92-C-00106, Task 106-F-6.1