Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 31:4 (2016) 1027-1037

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Fethiye yerleşim alanındaki zeminlerin spt ve kayma dalga hızı verileriyle sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi

Adem Işık[1*], Nail Ünsal[1], Ayhan Gürbüz[1], Evren Şişman[2]

[1]Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06570 Maltepe, Ankara, Türkiye

[2] Focus Grup İnşaat Taahhüt Ltd. Çankaya, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Fethiye yerleşim alanın sıvılaşma potansiyelinin SPT ile belirlenmesi
- Fethiye yerleşim alanın sıvılaşma potansiyelinin kayma dalgası hızı ile belirlenmesi
- Sıvalaşma risk haritalarının hazırlanması

Makale Bilgileri

Geliş: 13.10.2015
Kabul: 24.02.2016

DOI:
10.17341/gummfd.12917

Anahtar Kelimeler:
Sıvılaşma,
standart penetrasyon deneyi,
kayma dalgası hızı

ÖZET

Türkiye deprem kuşağında yer alan ve deprem geçmişi olarak aktif bir tarihe sahip olan ülkedir. Sıvılaşma ülkemizde 1992 Erzincan depreminden sonra önemli hale gelmiş ve daha sonra 1999 Marmara ve Düzce depremlerinde de geniş olarak gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında Muğla ili, Fethiye ilçesi inceleme alanında senaryo bir deprem büyüklüğüne göre sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla bölgede 40 ayrı noktada Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve sismik kırılma deneyleri yapılmıştır. SPT ve sismik kırılma deneyleri çakışacak şekilde aynı noktalarda yapılması amaçlanmış ve böylece sonuçlar aynı noktada iki ayrı farklı yöntemle elde edilerek karşılaştırılmıştır. İnceleme alanında SPT darbe sayıları, yeraltı su seviyesi, ince dane oranı ve kayma dalgası hızı verilerine göre sıvılaşma analizi yapılarak sıvılaşma risk indeksine göre sıvılaşma risk haritaları hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Mw=7,0 büyüklüğünde senaryo bir deprem durumunda inceleme alanının büyük bir bölgesinde sıvılaşmanın olmayacağı veya düşük seviyede sıvılaşma olabileceği sonucuna varılmıştır.

Assessment of liquefaction potential of fethiye based on spt and shear wave velocity

H I G H L I G H T S

- Assessment of liquefaction potential of Fethiye based on SPT
- Assessment of liquefaction potential of Fethiye based on shear wave velocity
- The preparition of liquefaction severity maps

Article Info

Received: 13.10.2015
Accepted: 24.02.2016

DOI:
10.17341/gummfd.12917

Keywords:
Liquefaction,
Standard penetration test,
shear wave velocity

ABSTRACT

Turkey, located at an area of active seismic zone, has vast records of many earthquakes. The liquefaction phenomena have become crucial issue in Turkey since Erzincan Earthquake took place in 1992. Soil liquefaction was observed widely during Marmara and Duzce Earthquakes in 1999 as well. In this study, the liquefaction potential of vicinity of Fethiye village in Turkey was investigated via results of blow counts (N) of Standard Penetration Test (SPT) and velocity measurements of seismic refraction tests at 40 different locations in the investigated area under an earthquake magnitude (M_w) of 7.0. Liquefaction severity maps were prepared according to liquefaction severity index that is function of the input parameters such as SPT-N values, ground water level, fines content and shear wave velocity. The results of study reveal that the investigated area has either no potential liquefiable or low susceptibility liquefiable zones under M_w=7.0.

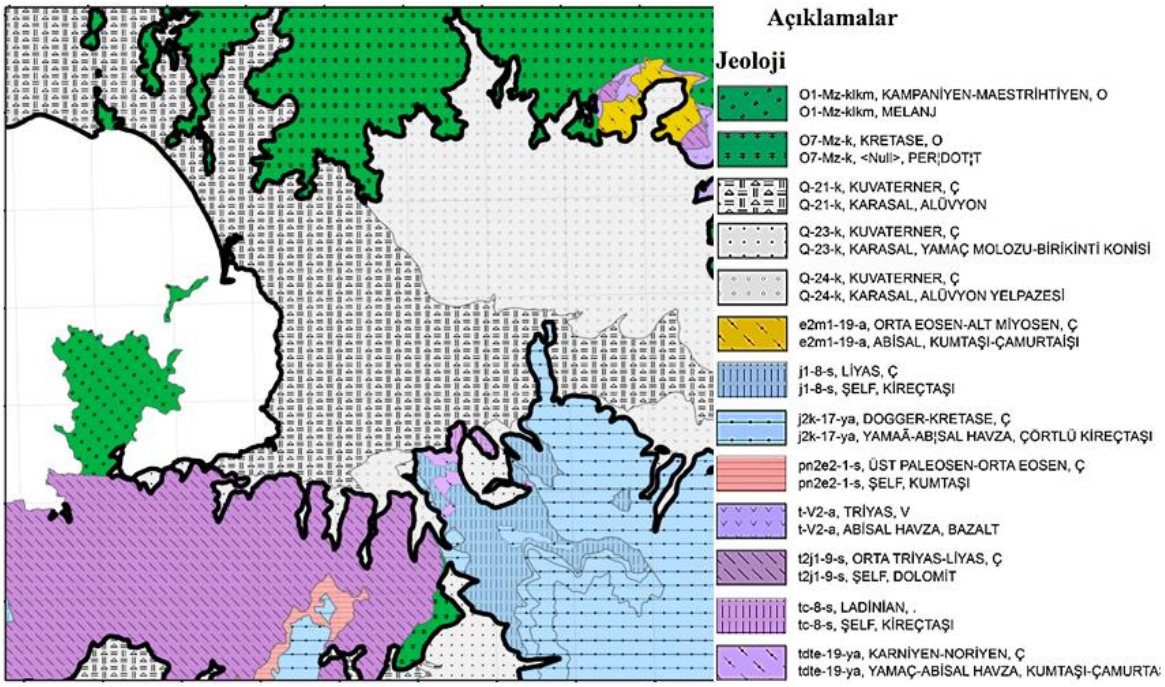
* Sorumlu Yazar/Corresponding author: isikadem@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3240

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sıvılaşma, deprem sonucunda oluşan dinamik gerilmeler etkisi ile genellikle suya doygun granüle zeminlerde boşluk suyu basıncının artması ve efektif gerilmenin azalmasının bir sonucu olarak meydana gelmektedir. Depremler sırasında zemin tabakalarında meydana gelen sıvılaşma durumunun ortaya çıkmasıyla zemine gömülü yapılarda oturma, devrilme ve çeşitli hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu nedenle geoteknik deprem mühendisliğinde sıvılaşmaya neden olan faktörleri ve sıvılaşma potansiyelini belirlemek ve ayrıca oluşabilecek hasarları tahmin edilebilmek önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır. Sıvılaşma potansiyeli zeminlerin geoteknik özelliklerine, topoğrafyaya, depremselliğe, yeraltı su seviyesine ve jeolojik geçmişine bağlı olmaktadır [1]. İlk olarak sıvılaşma durumu 1964 yılında Niigata ve Alaska'da meydana gelen depremlerde geniş bir şekilde gözlenmiştir. Bu yıldan itibaren depreme maruz kalan birçok ülkede sıvılaşma çoğu araştırmalara konu olmuştur. Bu araştırmalar sonucunda, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi için deneysel ve olasılıksal hesaplamalara dayalı kullanılışlı ampirik yöntemler geliştirilmiştir [2]. Genellikle laboratuvar ve arazi deneylerine dayanan bu yöntemler sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde çok etkin olarak kullanılmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli, laboratuvarda dinamik üç eksenli, dinamik kesme, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri [3-8] arazide ise Standart Penetrasyon Deneyi (SPT), Koni Penetrasyon Deneyi (CPT) ve sismik deneyler yapılarak kayma dalgası hızına (V_s) bağlı olarak belirlenebilmektedir [9-14]. Bu çalışma kapsamında, Muğla ili Fethiye ilçesi 36,6218 – 36,6672 kuzey enlemleri ile 29,1032 – 29,2189 doğu boylamları arasında kalan ve ilçe merkezine yakın ve körfez şeridini kapsayan bölgelerde sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla 40 ayrı noktada SPT ve sismik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yapılan sondaj çalışmaları ile alınan zemin numunelerinin fiziksel özellikleri laboratuvarda yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde SPT deney verileri ile yapılan hesaplamalarda Seed and Idriss [9], sismik deney verileri ile yapılan hesaplamalarda ise Andrus ve Stoke [14] tarafından önerilen eşitlikler kullanılmıştır. Ancak sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde güvenlik katsayısının (*FS*) literatürde yapılan çalışmalar neticesinde tek başına yeterli olmadığı görülmüş [11, 15, 16] ve bunun için sıvılaşma risk indeksi (L_s) parametresi belirlenerek bölgenin sıvılaşma risk haritası hazırlanmıştır. Sıvılaşma risk indeksi [16], M_w=7,0 olan senaryo bir deprem büyüklüğüne göre belirlenmiş ve sonuçlar hazırlanan haritalar üzerinde gösterilmiştir.

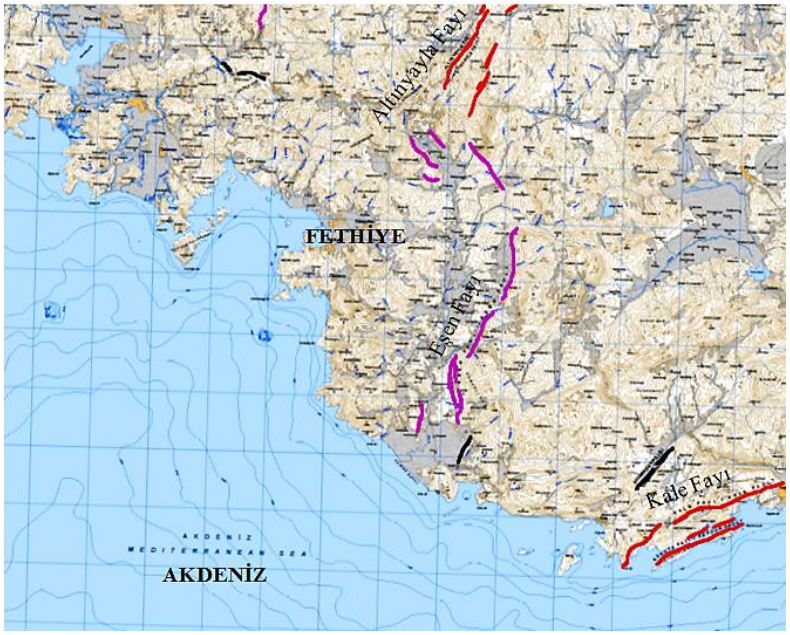
2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLOJİSİ (GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA)

Çalışma alanın bulunduğu İnceleme alanına ait genel jeoloji kesiti Şekil 1'de verilmiştir. Batı Toroslar'da Teke yarımadasının kuzeybatısında yer alan bölgede, Beydağları otoktonu ile Likya napları ve bunlar arasında, yanal yönlerde süreklilik sunan Yeşilbarak napı yüzeylenir. Bölgede tektonik pencereler halinde yüzeyleyen Beydağları otoktonu, Üst Kretase yaşlı Beydağları Formasyonu, Üst Paleosen-Orta Eosen yaşlı Dişitaştepe Formasyonu ve Alt Miyosen yaşlı Sinekçi Formasyonunu geniş yer kapsamaktadır. Beydağları otoktonu üzerinde tektonik örtü olarak bulunan Yeşilbarak napı, Gömbe ve Yavuz birimleri

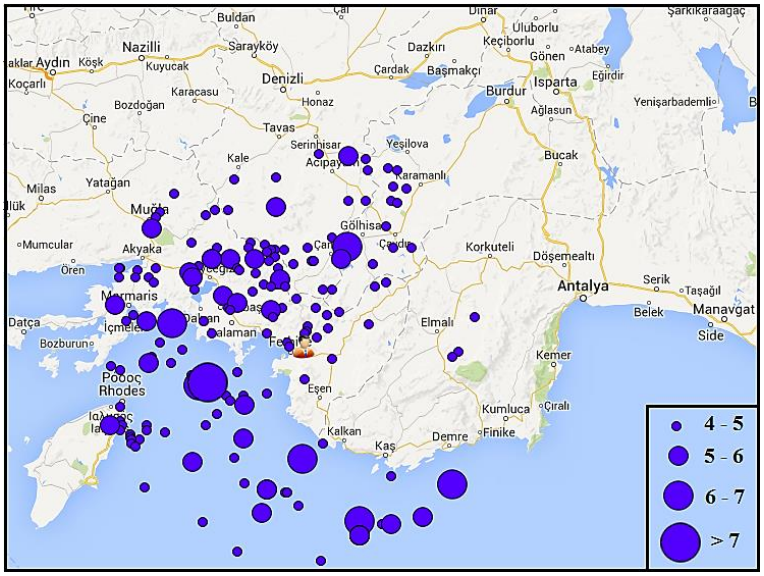


Şekil 1. Çalışma alanın genel jeolojisi (The geology of study area)

olmak üzere birbirinden farklı iki yapısal birimden oluşur. Yeşilbarak napının alt yapısal birimi olan Gömbe birimi, Üst Kretase yaşlı kireçtaşlarından oluşan Gebeler Formasyonu ve Üst Lütesityen-Burdigaliyen yaşlı kumtaşı ve şeyllerden oluşan Elmalı Formasyonu ile temsil edilir. Üst yapısal birim olan Yavuz birimi ise Üst Lütesiyen-Priaboniyen yaşlı kireçtaşı ara seviyeli kumtaşı, kiltaşı ve silttaşlarından oluşan Yavuz Formasyonu ile temsil edilir [17]. İnceleme alanı ve çevresinde Sarıtaş Formasyonu, Karapınar Formasyonu, Belenkavak Formasyonu, Ağaçlı Formasyonu, Babadağ Formasyonu, Marmaris Peridoditi ile Kuvaterner yaslı Eski alüvyon yelpazesi, Yamaç molozu ve birikinti konisi, Alüvyon yelpazesi, Plaj çökelleri ve Alüvyon birimleri yüzeylenmektedir. Fethiye ovasının bazı noktalarında yapılan sondaj çalışmalarında 180 m kalınlıkta alüvyon tabaka bulunmuş ve bu sondaj verilerine göre yeraltı suyunun hidrolik eğimi ovalardan denize doğru olduğu ve yeraltı su seviyesi mevsimsel olarak 0,05-5,62 m arasında değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir [18]. Mevsimsel olarak yeraltı su seviye değişimi denize yakın bölgelerde düşük olurken eteklere yakın kısımlarda ise yüksek olmaktadır.



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin diri fay haritası [21] (The seismogeological map of the Fethiye basin and its close vicinity)



Şekil 3. İnceleme alanın bulunduğu bölgede son yüzyılda meydana gelen depremler [23]
(Centers of the earthquakes and historical earthquakes of Fethiye province in the last century)

3. DEPREMSELLİK (TECTONIC SETTING)

İnceleme alanı depremsellik bakımından Türkiye'nin en aktif bölgelerinden biri ve çeşitli fayların etkisi altındadır. Anadolu levhası, Avrasya ve Arap levhasının etkisi ile Helenik Yaya doğru saatin tersi yönünde ve Afrika levhası ise Helenik Yay ve Kıbrıs Yayı boyunca Anadolu Levhasının altına doğru hareket etmektedir [19]. Helenik Yay ile Kıbrıs Yayı Fethiye-Burdur Fay Zonu (FBFZ) boyunca birleşir [20]. İnceleme yeri ana fay olan FBFZ etkisi altında olup ayrıca bölge, kuzeyinde Altınyayla Fay zonu, batıda ise Kale Fayı segmentlerinin etkisi altındadır (Şekil 2).

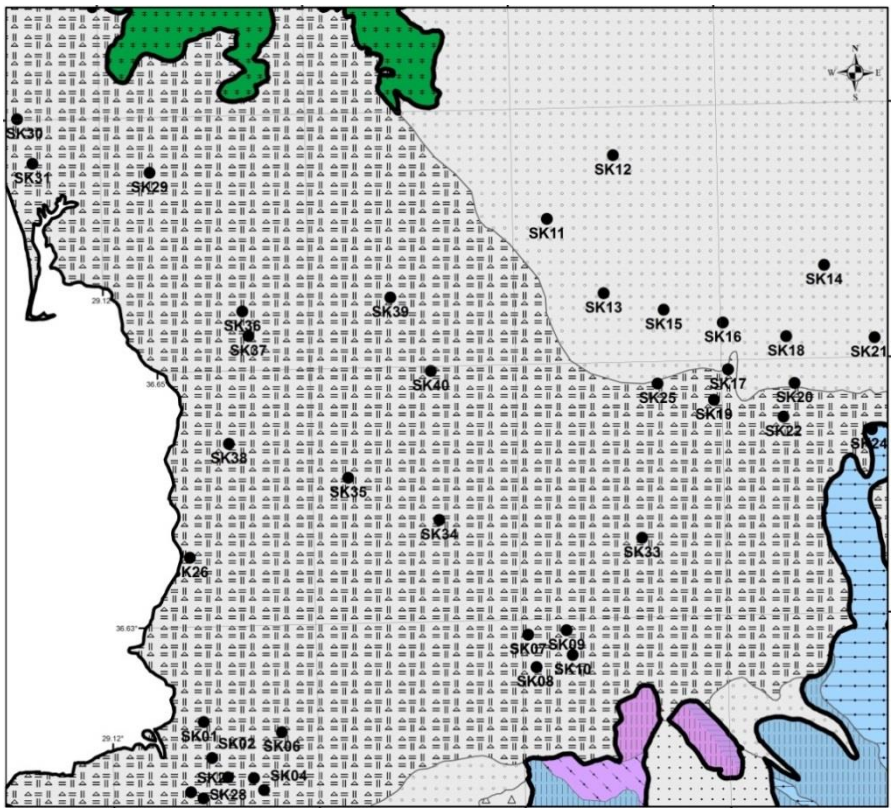
FBFZ Türkiye'nin güney batısında yer alan ve güneyde Fethiye'den başlayarak kuzeyde Çay- Şarkîkaraağaç'a kadar olan bölgede yaklaşık 300 km'lik bir hat boyunca uzanım gösteren sol oblik atımlı normal bir faydır. FBFZ tek yapısal bir çizgi halinde olmayıp birbirine paralel gelişmiş kesikli segmentlerden oluşmaktadır [22]. FBFZ etkisi altında olan İnceleme alanında geçmişten günümüze kadar birçok deprem kaydı mevcuttur (Şekil 3). Bunlardan en önemlisi 24-25 Nisan 1957 (M_w=6,9-7,1) ve 10 Haziran 2012 (M_w=6,0) depremleridir.

4. ARAZİ ÇALIŞMALARI (FIELD WORKS)

İnceleme alanının zemin özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 40 farklı noktada (Şekil 4) 6 m ile 18 m arasında değişen ve toplamda 412,5 m sondaj çalışması ve sismik kırılma deneyleri yapılmıştır. Yapılan sondajlar sonunda her 1,5 metrede Standart Penetrasyon Deneyleri (SPT) yapılmış ve darbe sayılarının (SPT-N) derinlikle değişimi belirlenmiştir. Darbe sayıları derinliğe göre 2 ile 39 arasında değişmektedir. Açılan sondaj kuyularından alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde laboratuvar deneyleri yapılarak numunelerin doğal birim hacim ağırlığını (γ_n), dane dağılımı ve buna bağlı olarak zemin sınıflandırmaları yapılmıştır. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (BZSS) göre bölgede genellikle hakim olan zemin sınıfı siltli-killi kum (SC-SM) ve siltli çakıl (GM) olarak belirlenmiştir. Yeraltı su seviyesi 0,50 ile 4,00 m arasında değişmektedir. Ayrıca çalışma alanında jeofon aralıkları 2-5 metre arasında değişen 40 adet serimde sismik kırılma deneyleri yapılarak kayma dalgası hızları (V_s) belirlenmiştir. Sondaj noktalarında yapılan deneyler ve alınan numunelerden zeminlere ait SPT-N darbe sayıları, kayma dalgası hızları, yeraltı su seviyesi, zemin sınıfı ve ince dane oranları Tablo 1'de verilmiştir. Yapılan sondaj ve sismik çalışmaların aynı koordinatlarda olması hedeflenmiş ve böylelikle farklı iki deney yöntemi ile elde edilen verilerden yapılacak olan analizlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır.

5. SIVILAŞMA POTANSİYELİNİN BELİRLENMESİ (ASSESSMENT OF LIQUEFACTION POTENTIAL)

Literatürde zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin araştırılması için yapılan çalışmalardan en önemlisi Seed ve Idriss [9] tarafından "basitleştirilmiş prosedür" adıyla



Şekil 4. Sondaj ve sismik çalışmaların yapıldığı noktalar (The location of boreholes and seismic works in study area)

Tablo 1. Arazi ve laboratuvar verileri (Field and laboratory data)

Sondaj No	Derinlik (m)	Yeraltı su seviyesi (m)	OrtalamaSPT-N	Ortalama kayma dalgası hızı (m/sn)	Zemin Sınıfı	İnce dane oranı (%)
SK-1	2-8,5	0,50	11	220	SM	28
SK-2	2-8,5	0,50	12,4	245	SM	26
SK-3	-	0,50	-	-	CL	-
SK-4	-	0,10	-	-	CL	-
SK-5	3,5-9	0,10	4,6	105	SM	19
SK-6	-	1,90	-	-	CH	-
SK-7	-	4,00	-	-	GW-GM	-
SK-8	-	4,00	-	-	GW-GM	-
SK-9	-	4,00	-	-	GW-GM	-
SK-10	-	4,00	-	-	GW-GM	-
SK-11	0-2	0,40	7	125	SM	15
SK-12	2-3,5	0,60	7	120	SC-SM	10
SK-13	3,5-5	1,00	6	130	SC-SM	10
SK-14	-	0,75	-	-	GC	-
SK-15	-	0,50	-	-	GM	-
SK-16	-	1,20	-	-	CL	-
SK-17	0-8	1,50	11,6	165	SC-SM	12
SK-18	0-8,5	0,80	8	155	SM	18
SK-19	-	3,20	-	-	CL	-
SK-20	2-3,5	2,80	11	165	SM	20
SK-21	0-4,5	2,00	11	165	SM	20
SK-22	2-3,5	0,90	9	135	SM	18
SK-23	4,5-6	1,20	11,6	140	SC-SM	10
SK-24	0-2,5	1,80	10	150	SC-SM	12
SK-25	0-4	3,00	13,3	170	SC-SM	11
SK-26	-	0,50	-	-	GC-GM	-
SK-27	0-2	0,50	3	110	SC-SM	5
SK-28	0-3,5	0,50	5	120	SM	17
SK-29	-	1,50	-	-	CH	-
SK-30	3-8,5	1,00	20	145	SC-SM	10
SK-31	3-8,5	1,00	25	165	SM	20
SK-32	-	2,00	-	-	GC-GM	-
SK-33	2-4,5	3,50	8	165	SM	15
SK-34	5-7	2,00	5	145	SM	20
SK-35	0-2	1,85	5	125	ML	15
SK-36	2-10,5	0,50	5,5	110	SC-SM	10
SK-37	-	0,50	-	-	GM	-
SK-38	2-6,5	0,50	4	100	SC-SM	5
SK-39	2-8,5	0,75	3	110	SW	15
SK-40	5,5-9	1,00	5,3	165	SC-SM	10

gerçekleştirilmiştir. Seed ve Idriss zeminlerin sıvılaşma potansiyelini temel olarak iki parametreye bağlamıştır. Birincisini deprem tarafından oluşabilecek devirsel yükün seviyesini gösteren Tekrarlı Gerilme Oranı (CSR) ve ikincisini ise zeminin sıvılaşmaya karşı direncini gösteren Tekrarlı Direnç Oranı (CRR) ile ifade etmiştir. Belirli bir derinlik için CSR [9]:

$$CSR = 0{,}65\left({}^{a_{maks}}/_{g}\right)\left({}^{\sigma_v}/_{\sigma_v'}\right) r_d \quad (1)$$

Burada α_{maks}, deprem kuvvetleri tarafından yeryüzünde oluşan pik yatay ivme, g, yerçekimi ivmesi, σ_v, düşey yönde toplam gerilme, σ_v', düşey yöndeki efektif gerilme, r_d ise gerilme azaltma sabiti olup çeşitli araştırmacılar tarafından farklı eşitlikler ile derinliğe bağlı olarak [9, 24] ve ayrıca yerçekimi ivmesine, deprem büyüklüğüne ve kayma dalgası hızına bağlı olarak Çetin ve diğ. [25] tarafından aşağıda verilen eşitlikler yardımı ile belirlenebilmektedir.

Buna göre r_d derinlik, deprem büyüklüğü, yerçekimi ivmesi ve kayma dalgası hızına bağlı olarak Eş. 2'deki gibi hesaplanabilir.

$$r_d\left(d, M_w, a_{maks}, V_{s,12m}^{*}\right) =$$

$$\frac{\left[1+\frac{-23{,}013-2{,}949.a_{maks}+0{,}999.M_w+0{,}0525.V^*_{s,12m}}{16{,}258+0{,}201.e^{0{,}341.[-d+0{,}0785.V^*_{s,12m}+7{,}586]}}\right]}{\left[1+\frac{-23{,}013-2{,}949.a_{maks}+0{,}999.M_w+0{,}0525.V^*_{s,40}}{16{,}258+0{,}201.e^{0{,}341.[0{,}0785.V^*_{s,12m}+7{,}586]}}\right]}$$

$$-0{,}0046(d-20)\pm\sigma_{\varepsilon_{rd}} \quad (2)$$

Burada $\sigma_{\varepsilon rd}$ ise r_d için standart sapma olup derinliğe bağlı olarak aşağıdaki gibi belirlenebilir (Eş. 3, Eş. 4).

$d < 12\,m$ ($\sim 40\,ft$) için,

$$\sigma_{\varepsilon_{rd}} = d^{0{,}850}\cdot 0{,}0198 \quad (3)$$

$d \geq 12\,m$ ($\sim 40\,ft$) için,

$$\sigma_{\varepsilon_{rd}} = 12^{0{,}850}\cdot 0{,}0198 \quad (4)$$

Basitleştirilmiş prosedüre göre yapılan sıvılaşma analizlerinde CSR oranı yaklaşımı düz serbest saha koşulları ve sığ çökeller için geçerlidir. Eğimli sahalarda ve ağır yapılar altındaki tabakalarda başlangıç kayma gerilmelerinin durumu sıvılaşma olasılığını etkilemektedir. Dolayısıyla başlangıç kayma gerilmeleri ve çevre basınçları dikkate alınarak Seed [26] tarafından aşağıda verilen düzeltmelerin yapılması önerilmiştir.

$$(CSR_{arazi})_{\alpha,\sigma} = (CSR_{arazi})_{\alpha=0,\sigma<100\ kPa}K_\alpha K_\sigma \quad (5)$$

Burada K_α değeri gevşek ve sığ çökeller için 1,0'den küçük, sıkı zeminler için 1,0'den büyük alınması önerilmektedir [27]. K_σ düzeltme faktörü ise Idriss ve Boulanger [28] tarafından aşağıda verilen Eş.6, Eş. 7 yardımı ile belirlenebilmektedir.

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma ln\left(\frac{\sigma'_{v0}}{P_a}\right) \quad (6)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18{,}9-2{,}55\sqrt{N_{1,60}}} \quad (7)$$

Burada σ'_{v0} düşey efektif gerilme, P_α atmosferik basınç (=100 kPa) ve $N_{1,60}$ ise düzeltilmiş SPT darbe sayısıdır. İnceleme alanının bulunduğu bölgede meydana gelen depremler göz önüne alındığında çalışma kapsamında sıvılaşma analizi bir senaryo deprem büyüklüğüne göre yapılmıştır. Geçmişte maruz kaldığı en büyük deprem büyüklüğü 7,1 olan inceleme alanı için senaryo deprem büyüklüğü 7,0 seçilmiş ve maksimum ivme (α_{maks}) Ulusay ve diğ. [29] tarafından Türkiye'deki depremler için geliştirilen Eş. 8 ile 0,24g olarak belirlenmiştir.

$$a_{maks} = 2{,}18e^{0{,}0218(33{,}3M_w-R_e+7{,}8427S_A+18{,}9282S_B)} \quad (8)$$

Burada M, deprem büyüklüğü, R_e ise deprem odak uzaklığına olan mesafe, S_A ve S_B arazi koşullarına bağlı parametreler olup kaya ortamları için S_A=S_B=0 ve zemin ortamları için S_A=1 ve S_B=0 alınır. Deprem odak uzaklığı bu çalışma kapsamında 25 km olarak alınmıştır. Çalışma alanın sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi amacıyla bölgede yapılan sondaj ve sismik deneyler sonucunda belirlenen verilere dayanarak Tekrarlı Direnç Oranı (CRR), hem Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) sonuçlarından elde edilen $(N_1)_{60}$ hem de sismik deneylerden elde edilen kayma dalgası hızına (V_s) göre belirlenmiştir. CRR belirlenmesinde ilk olarak SPT deneyi için düzeltilmiş vuruş sayıları ($(N_1)_{60}$) belirlenmiştir. $(N_1)_{60}$ sırasıyla C_N, jeolojik yük, C_R, sondaj çubuğu uzunluğu, C_S, kılıf, C_B, sondaj çapı ve C_E ise enerji düzeltme katsayılarına bağlı olarak Eş. 9'da verilmiştir. Buna göre $(N_1)_{60}$:

$$(N_1)_{60} = N_{arazi}C_N C_R C_s C_B C_E \quad (9)$$

C_N, jeolojik yük düzeltme faktörü Liao ve Whitman [30] tarafından geliştirilen Eş. 10 ile hesaplanır. Buna göre C_N:

$$C_N = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_v}} \quad (10)$$

Ayrıca SPT-N darbe sayıları zeminin ince dane oranına (FC) bağlı olarak aşağıda verilen eşitlik (Eş. 11-Eş. 14) yardımı ile düzeltilmesi önerilmektedir.

$$N_{1,60,C_s} = \alpha + \beta N_{1,60} \quad (11)$$

Burada,

FC ≤ %5 için $\alpha = 0$ ve $\beta = 1$ (12)

%5 < FC <%35 için $\alpha = exp\left(1{,}76-\frac{190}{(FC)^2}\right)$

$$\beta = \left[0{,}99+(\frac{FC}{1000})^{1{,}5}\right] \quad (13)$$

FC ≥ %35 için $\alpha = 1$ ve $\beta = 1{,}2$ (14)

olarak alınmaktadır. Bu durumda zeminin sıvılaşma direncini gösteren ve M_w=7,5 büyüklüğünde bir deprem için CRR Seed ve Idriss [9] tarafından $(N_1)_{60,cs}$ değerine göre Eş. 15 ile ifade edilmiştir. Buna göre CRR:

$$CRR = \frac{1}{34-(N_1)_{60,cs}} + \frac{(N_1)_{60,cs}}{135} + \frac{50}{\left[10*(N_1)_{60,cs}+45\right]^2} - \frac{1}{200} \quad (15)$$

Burada σ'_v, efektif düşey gerilme olup birimi kPa ile ifade edilir. Youd ve Idriss [31] tarafından önerilen C_E, C_R ve C_S düzeltme katsayıları bu çalışma kapsamında sırasıyla güvenli tokmak tipi için enerji düzeltme katsayısı, C_E=0,75, tij uzunluğu düzeltme katsayısı (C_R) tij uzunluğuna bağlı olarak sırasıyla 0,75, 0,85, 0,95 ve 1,00, kılıf düzeltme katsayısı standart tip numune alıcı için, C_S =1,0 olarak alınmıştır. Ayrıca Skempton [32] tarafından sondaj çapı kuyusuna göre sondaj çapı düzeltme katsayısı, C_B =1,0 alınmıştır. Andrus ve Stoke [14] sismik deneylerle elde edilen kayma dalgası hızına bağlı olarak sıvılaşma direncini

analitik, laboratuvar ve kısıtlı arazi çalışmaları sonucunda Eş. 16 yardımıyla bulunabileceğini belirtmiştir. Buna göre sıvılaşma direnci CRR(7):

$$CRR = a\left(\frac{V_{S1}}{100}\right)^2 + b\left(\frac{1}{V_{S1}^{*}-V_{S1}} - \frac{1}{V_{S1}^{*}}\right) \quad (16)$$

Burada V_{s1}, düşey efektif gerilmeye göre düzeltilmiş kayma dalgası hızı olup Eş. 17 ile belirlenmektedir.

$$V_{S1} = V_S\left(\frac{P_a}{\sigma_v'}\right)^{0,25} \quad (17)$$

Burada P_a, 100 kPa'a tekabül eden atmosferik basınç, σ'_v ise düşey efektif gerilme olup birimi kPa cinsindendir. V^*_{s1}, ince dane oranına (FC) bağlı olarak sıvılaşmanın oluştuğu üst limit kayma dalgası hızıdır. Kumlu zeminler için geliştirilen eşitlik için V^*_{s1};

İnce dane oranı (FC) ≤ 5 için;

$$V_{S1}^{*} = 215\ m/s \quad (18)$$

5 < FC < 35 için;

$$V_{S1}^{*} = 215 - 0{,}5(FC - 5) \quad (19)$$

FC > 35 için;

$$V_{S1}^{*} = 200\ m/s \quad (20)$$

Ayrıca eşitlikte geçen a ve b sabit değerler sırasıyla 0,022 ve 2,8 olup eğrileri en uygun şekilde konumlandırmak için geliştirilmiştir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (FS) Eşitlik 20 yardımı ile belirlenmektedir. Bu eşitlikte elde edilen güvenlik katsayısı 1'den büyük ise sıvılaşma beklenmez fakat 1'den küçük ise olası bir deprem için sıvılaşma beklenmektedir.

$$FS = \frac{CRR}{CSR}MSF \quad (21)$$

Eşitlik 21'de verilen *MSF*, deprem büyüklük düzeltme faktörü olup Idriss [33] tarafından geliştirilen eşitlik ile aşağıdaki gibi belirlenir.

Deprem büyüklüğü (M_w) > 5,2 için;

$$MSF = 6{,}9exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) - 0{,}06 \quad (22)$$

$M_w \leq$ 5,2 için;

$$MSF = 1{,}82 \quad (23)$$

Ancak tasarımda 1 gibi kritik bir güvenlik katsayısı dikkate alınmamaktadır ve FS=1 olması halinde sıvılaşma için denge durumu olsa bile bu durum yalnız teorik bir değer olarak kalmaktadır. Bir başka deyişle sıvılaşma analizlerinden bulunan güvenlik katsayıları tek başına yeterli olmayıp, sıvılaşma potansiyeli zemin tabakalarının kalınlığına ve yüzeyden olan derinliklerine de bağlı olmaktadır. Bu doğrultuda bir bölgenin sıvılaşma potansiyeli, daha gerçekçi yaklaşımlarda bulunabilmek için güvenlik katsayıları ve zemin tabaka kalınlıkları kullanılarak bir zemin profilinin sıvılaşma risk indeksi (L_s) parametresinin bulunmasıyla belirlenmektedir [15, 34-36]. İlk olarak sıvılaşma potansiyeli L_s parametresine bağlı olarak Iwasaki vd. [34] tarafından çok düşük, düşük, yüksek ve çok yüksek olmak üzere kategorize edilmiştir. Bu çalışmada sıvılaşma yok ve orta derece sıvılaşma kategorileri yer almadığından Sönmez ve Gökçeoğlu [16] tarafından yeniden düzenlenmiştir (Tablo 5).

Tablo 5. Sıvılaşma risk sınıflandırması [16]
(Liquefaction severity index classification)

L_S	Sıvılaşma Potansiyeli
$85 \leq L_S < 100$	Çok yüksek
$65 \leq L_S < 85$	Yüksek
$35 \leq L_S < 65$	Orta
$15 \leq L_S < 35$	Düşük
$0 < L_S < 15$	Çok düşük
$L_S = 0$	Sıvılaşma yok

Sönmez [15] bu konuda yaptığı ilk çalışmada, bir zemin tabakasında 20 m derinlik boyunca FS>1,2'den büyük olduğu durumda zeminin sıvılaşmayacağını öngörmüştür. Fakat bu tartışmaya açık bir konu olduğundan Sönmez ve Gökçeoğlu [16] diğer bir çalışmada sıvılaşma risk indeksi (L_s) parametresini belirlemek amacıyla Eş. 24'te verilen eşitliği önermişlerdir.

Buna göre L_s:

$$L_s = \int_0^{20} P_L(z)\, W(z) dz \quad (24)$$

Burada P_L sıvılaşma olasılığını veren bir parametredir. P_L sıfır ile bir arasında değişiklik gösteren ve güvenlik katsayısının bir fonksiyonu olup Eş. 25'te verilmiştir. Buna göre P_L:

$FS \leq 1{,}411$ için;

$$P_L = \frac{1}{1+\left({}^{FS}/_{0,96}\right)^{4,5}} \quad (25)$$

$FS > 1{,}411$ için;

$$P_L = 0 \quad (26)$$

Ayrıca Eş. 27'de verilen z zemin tabakasının orta noktasından zemin yüzeyine olan mesafedir.

Buna göre, *W(z);*

$z < 20\ m$ için;

$$W(z) = 10 - 0{,}5z \quad (27)$$

$z > 20\ m$ için;

$$W(z) = 0 \quad (28)$$

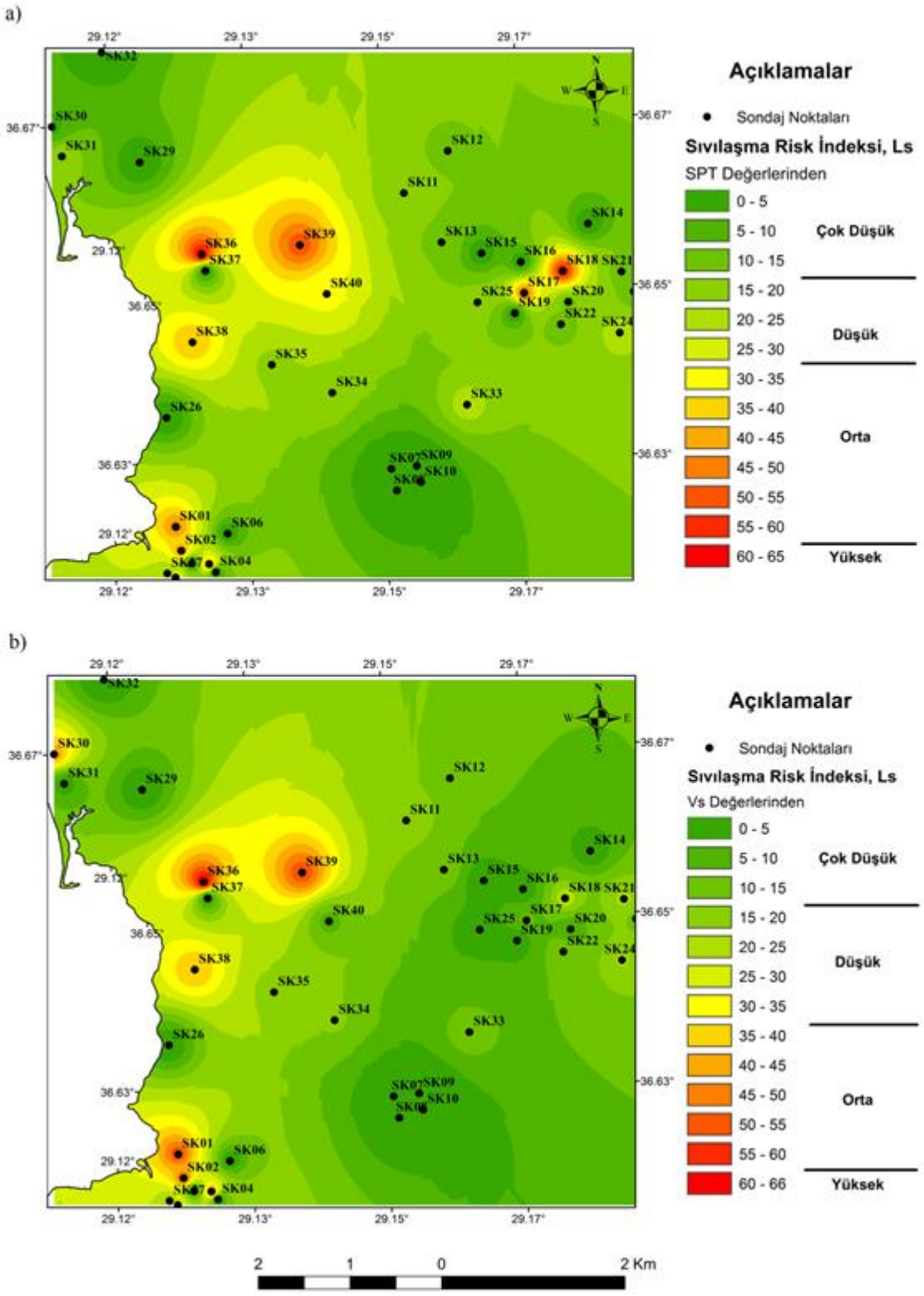
6. FETHİYE YERLEŞİM ALANININ SIVILAŞMA RİSK HARİTASININ OLUŞTURULMASI (LIQUEFACTION SEVERITY MAP OF THE FETHİYE CITY CENTER)

SPT ve sismik kırılma deneyleri sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda büyüklüğü 7,0 (M_w=7,0) olan bir senaryo deprem büyüklüğüne göre sıvılaşma risk haritası oluşturulmuştur. Sıvılaşma risk haritasının oluşturulmasında belirlenen sıvılaşma risk indeksi 40 ayrı nokta için Tablo 6'da verilmiştir. Tablo 6'da belirlenen bilgiler ışığında Şekil 6a ve 6b'de sıvılaşma risk haritası hem SPT hem de sismik kırılma deney sonuçlarına göre hazırlanmıştır.

Tablo 6 ve Şekil 6a ve 6b'de görüldüğü gibi inceleme alanında 7,0 büyüklüğünde oluşacak senaryo bir deprem için sıvılaşma riski her iki deney sonuçlarına göre genellikle düşük ve sıvılaşma yok seviyesindedir.

Tablo 6. İnceleme alanı için sıvılaşma risk indeksi değerleri ve durumu (Liquefaction severity index of Fethiye province)

Sondaj No	Yeraltı su seviyesi (m)	Sıvılaşma			
		SPT		Sismik deney	
		L_S	Durumu	L_S	Durumu
SK1	0,50	46,7	Orta	54,3	Orta
SK2	0,50	44,3	Orta	51,2	Orta
SK3	0,50	0	Yok	0	Yok
SK4	0,10	0	Yok	0	Yok
SK5	0,10	46,8	Orta	47,4	Orta
SK6	1,90	0	Yok	0	Yok
SK7	4,00	0	Yok	0	Yok
SK8	4,00	0	Yok	0	Yok
SK9	4,00	0	Yok	0	Yok
SK10	4,00	0	Yok	0	Yok
SK11	0,40	17,2	Düşük	18,8	Düşük
SK12	0,60	14,0	Çok düşük	14,4	Çok düşük
SK13	1,00	14,2	Çok düşük	14,4	Çok düşük
SK14	0,75	0	Yok	0	Yok
SK15	0,50	0	Yok	0	Yok
SK16	1,20	0	Yok	0	Yok
SK17	1,50	52,2	Orta	16,1	Düşük
SK18	0,80	62,4	Orta	30,2	Düşük
SK19	3,20	0	Yok	0	Yok
SK20	2,80	13,0	Çok düşük	5,3	Çok düşük
SK21	2,00	14,0	Çok düşük	22,2	Düşük
SK22	0,90	11,8	Çok düşük	14,1	Çok düşük
SK23	1,20	12,7	Çok düşük	14,3	Çok düşük
SK24	1,80	22,7	Düşük	20,6	Düşük
SK25	3,00	17,4	Düşük	0,9	Çok düşük
SK26	0,50	0	Yok	0	Yok
SK27	0,50	19,0	Düşük	18,9	Düşük
SK28	0,50	31,0	Düşük	31,7	Düşük
SK29	1,50	0	Yok	0	Yok
SK30	1,00	4,3	Çok düşük	44,2	Orta
SK31	1,00	20,2	Düşük	0,5	Çok düşük
SK32	2,00	0	Yok	0	Yok
SK33	3,50	23,0	Düşük	14,1	Çok düşük
SK34	2,00	18,8	Düşük	15,9	Düşük
SK35	1,85	18,9	Düşük	18,5	Düşük
SK36	0,50	66,3	Yüksek	66,6	Yüksek
SK37	0,50	0	Yok	0	Yok
SK38	0,50	39,8	Orta	39,9	Orta
SK39	0,75	54,0	Orta	54,1	Orta
SK40	1,00	31,7	Düşük	14,3	Çok düşük



Şekil 6. Sıvılaşma risk haritası (a) SPT verilerine göre (b) Kayma dalgası verilerine göre
(Liquefaction severity map (a) From SPT (b) From Shear wave velocity)

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve sıvılaşma risk haritasının hazırlanması amacıyla sıvılaşma risk indeksi Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından önerildiği gibi belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında Türkiye'nin güneybatısında ve sismik olarak hareketli bir bölgede yer alan İnceleme alanı için oluşacak senaryo bir deprem büyüklüğüne (M_w=7,0) göre sıvılaşma analizi yapılmıştır. Dolayısıyla SPT ve sismik kırılma deneyleri sonucunda belirlenen sıvılaşma risk indeksine göre yerleşim alanın bulunduğu bölge genel olarak düşük, çok düşük ve sıvılaşma yok seviyede sıvılaşma riski oluşturmaktadır. Aynı bölgede yapılan SPT ve sismik kırılma deneyleri sonucunda belirlenen sıvılaşma risk indeksleri genel olarak birbirleriyle uyumludur. Sıvılaşma risk indeksinin yüksek olduğu bölgelerde sıvılaşan zemin tabakasının kalınlığı diğer bölgelere göre daha yüksektir. Ayrıca inceleme alanın jeolojik durumu göz önüne alındığında sıvılaşma risk indeksi değerleri karasal alüvyon çökellerinde daha yüksek değerlere ulaşmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Youd T.L., Perkins D.M., Mapping liquefaction-induced ground failure potential, Journal of Geotech Eng Div., 104 (4), 443–446, 1978.
2. Kramer S.L., Mayfield R.T., Return period of soil liquefaction, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 133 (7), 802–813, 2007.
3. Kramer S.L., Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics, 1996.
4. Ishihara K., Soil behaviour in earthquake geotechnics, The Oxford Engineering Science Series, Oxford, 1996.
5. Liu H., Qiao T., Liquefaction potential of saturated sand deposits underlying foundation of structure, Proceeding of 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, 3, 199-206, 1984.
6. Elgamal A.W., Dobry R., Adalıer K., Small-scale Shaking Table Tests of Sturated Layered Sand-Silt Deposits, 2nd U.S-Japan Workshop on Soil Liquefaction, Buffalo, N.Y., NCEER Rep. No. 890032, 233-245, 1989.
7. Lambe P.C., Dynamic Centrifuge Modelling of a Horizontal Sand Stratum, Sc.D Thesis, Dept. Of Civil Engineering, Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass. USA, 1981.
8. Husmand B., Scott F., Crouse C.B., Centrifuge Liquefaction Tests in a Laminar Box, Geotechnique, 38 (2), 253-262, 1988.
9. Seed H.B., Idriss I.M., Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential,. Journal of Soil Mech. Foundation Div., ASCE, 97 (9), 1249–73, 1971.
10. Tokimatsu K., Yoshimi Y., Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content, Soils and Foundations, 23 (4), 56–74, 1983.
11. Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Soil liquefaction potential evaluation with use of the simplified procedure, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, 209–214, 1981.
12. Suzuki Y., Koyamada K., Tokimatsu K., Prediction of liquefaction resistance based on CPT tip resistance and sleeve friction, Proceedings XIV International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Germany, 603–606, 1997.
13. Stokoe K.H., Roesset J.M., Bierschwale J.G., Aouad M., Liquefaction Potential of Sands from Shear wave Velocity, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, 3, 213-218, 1988.
14. Andrus R.D., Stokoe II KH., Liquefaction resistance of soils from shear wave velocity, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 126 (11), 1015–25, 2000.
15. Sönmez H., Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey), Environmental Geology, 44 (7), 862–871, 2003.
16. Sönmez H., Gökçeoğlu C., A liquefaction severity index suggested for engineering practice, Environmental Geology, 48, 81–91, 2005.
17. Şenel M., Fethiye L8 Paftası, Maden Tetkik ve Arama Gen. Müd. Jeoloji Etüt. Dai., L8 Paftası:1–21, 1997.
18. Tansuğ Z., Öztunalı A., Fethiye ve civarı hidrojeolojik etüd raporu, Devlet Su İşleri Genel Müdürlügü, 1–35, 1977.
19. Şengör A.M.C., Yılmaz Y., Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach, Tectonophysics, 75, 181-241, 1981.
20. Barka A., Reilinger R., Şaroğlu F., Sengör,A.M.C., The Isparta Angle: Its evolution and importance in the tectonics of the eastern Mediterranean region, Proceedings of International Earth Sci. Collog. Aegean Region, 3-17, 1995.
21. Maden Teknik Arama Genel Müdürlüğü, Türkiye Diri Fay Haritası, http://www.mta.gov.tr/mta_web/dirifay1.asp, 2006.
22. Yağmurlu F., Burdur fayının sismotektonik özellikleri, Batı Anadolu'nun Depremselliği Sempozyumu, İzmir, 143-151, 2000.
23. Reilinger R., Mc Clusky S., E. Mediterranean GPS Consortium, GPS constraints on continental deformation in the eastern Mediterranean and Caucasus region, Geophysical Research Abstracts, 5, 2003.
24. Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D., Arango I., Castro G., Christian J.T., Dobry R., Liam Finn W.D., Harder L.F.Jr., Hynes M.E., Ishihara K., Koester J.P., Laio S.S.C., Marcuson WF III., Martin G.R., Mitchell J.K., Moriwaki Y., Power M.S., Robertson P.K., Seed R.B., Stokoe K.H., 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 Eng., 127 (10), 817–833, 2001.
25. Çetin K.Ö., Seed R.B., Nonlinear Shear Mass Participation Factor, rd for Cyclic Shear Stress Ratio

Evaluation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 103-113, 2004.

26. Seed H.B., Idriss I.M., Arango I., Evaluation of liquefaction potential using field performance data, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 109 (3), 458-482, 1983.

27. Seed R.B., Harder L.F., SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength, H. Bolton Seed Memorial Symposium, University of California, Berkeley, 2, 351-376, 1990.

28. Idriss I.M., Boulanger R.W., Semi-emprical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, 115-130, 2006.

29. Ulusay R., Tuncay E., Sonmez H., Gokceoglu C., An attenuation relationship based on Turkish strong motion data and iso-acceleration map of Turkey, Engineering Geology**,** 74, 265–291. 2004.

30. Liao S.S., Whitman R.V., Overburden correction factors for SPT in sand, Journal of Geotechnical Engineering, 112 (3), 373-377, 1986.

31. Youd T.L., Idriss I.M., Summary Report, Proc. of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER Report No 97-0022, 1997.

32. Skempton A.W., Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation, Geotechnique, 36 (3), 425-447, 1986.

33. Idriss I.M., Presentation notes: An update of the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential, TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction Anal., Publ. No FHWARD- 99-165, Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1999.

34. Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S., Sato H., Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods, Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, 3, 1319–1330, 1982.

35. Chen C.J., Juang C.H., Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods, Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization, 97. Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, 49–64, 2000.

36. Juang C.H., Yuan H., Lee D.H., Lin P.S., A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng., 129 (1), 66–80, 2003.