

Burhaniye (Balıkesir) Yerleşim Alanının Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Evaluations of Liquefaction Potential of Burhaniye (Balıkesir) Settlement Area

GÜLER ESİN¹, ŞENER CERYAN^{2*}

¹ Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

² Balıkesir Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Çağış Yerleşkesi, Balıkesir

Geliş (received) : 01 Temmuz (July) 2015

Kabul (accepted) : 27 Ağustos (August) 2015

ÖZ

Bu çalışmada, Türkiye’de birinci derece deprem bölgesinde yer alan Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanındaki zeminlerin sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmiştir. Bu amaçla, Burhaniye belediyesinin arşivinden temin edilen arazi ve deney sonuçlarını içeren jeolojik ve jeoteknik etüt raporlarından derlenerek hazırlanan veri tabanı kullanılmıştır. Söz konusu rapordan temin edilen 97 sondaj verisi kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuş ve bu veriler Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında değerlendirilmiştir. Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanı için eğim haritası, yeraltı suyu seviyesi ve yeraltı su derinlik haritaları, farklı derinlikler (3, 6, 9, 12 ve 15m) için düzeltilmiş SPT-N değerlerinin dağılımı haritaları hazırlanmıştır. Burhaniye (Balıkesir) yerleşim alanını etkileyecek diri fayların uzunlukları ve inceleme alanına olan uzaklıkları dikkate alınarak azalım ilişkisinden, olası en büyük yer ivmesi hesaplanmıştır. Söz konusu yerleşim alanını etkileyebilecek $M_w=7.2$ büyüklüğündeki olası deprem senaryosu ve en büyük ivmesinin 0.37g değeri kullanılarak Burhaniye yerleşim alanının sıvılaşmaya potansiyeli haritaları oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Sıvılaşma, alüvyon, SPT-N değeri, sıvılaşma potansiyeli, Burhaniye.

ABSTRACT

In this study, the liquefaction potential of the soil in Burhaniye (Balıkesir) settlement area in the first degree earthquake zone in Turkey were evaluated. For this purpose, the database prepared by compiling geological and the geotechnical reports including field and laboratory test data from Burhaniye municipal archives were used. The database was created by using 97 borehole data from the said reports and these data were evaluated by using Geographical Information System. Slope map, map of the underground water level maps, the depth of underground water maps, SPT-N value corrected distribution maps for different depths which are 3, 6, 9, 12 and 15 m. were prepared for Burhaniye (Balıkesir) settlement area. Considering the distance from the study area investigated and the length of the active faults affecting the Burhaniye (Balıkesir) settlement area, maximum ground acceleration was calculated by the attenuation relationship. The liquefaction susceptibility map of Burhaniye settlement area maps were created using earthquake scenario of $M_w=7.2$ affecting the said settlement area and the value of probable maximum ground acceleration, 0.37g.

Keywords: Liquefaction, alluvium, SPT-N value, the liquefaction potential, Burhaniye.

* Ş. Ceryan

e-posta: sceryan@balikesir.edu.tr

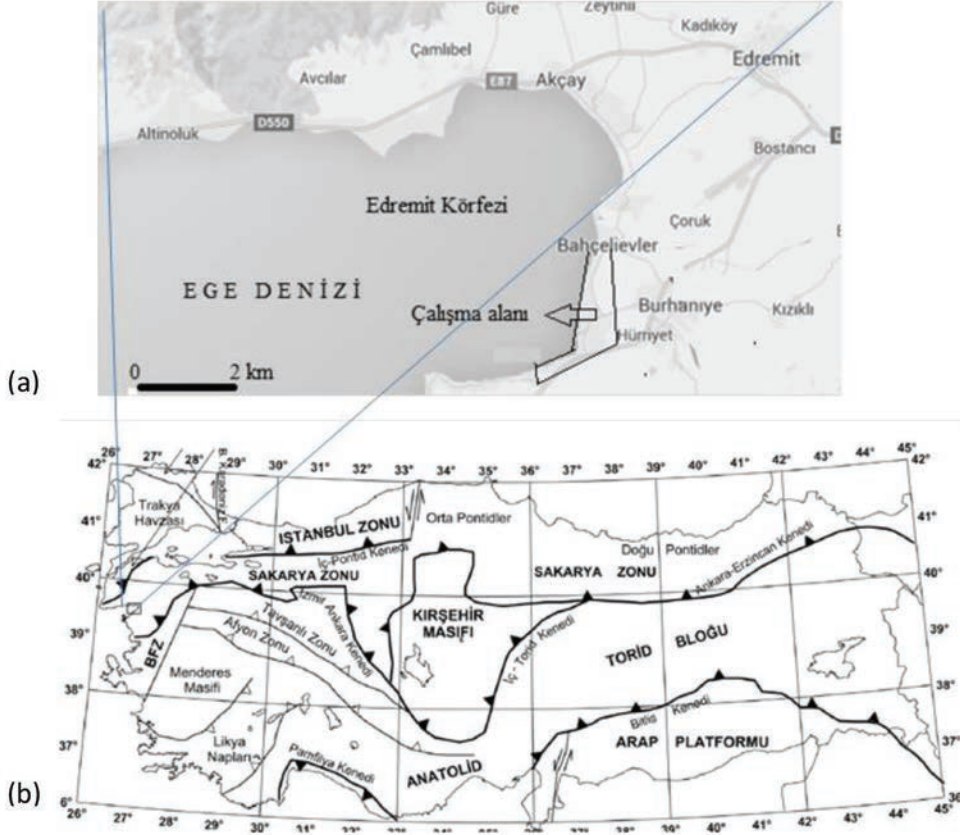
GİRİŞ

Ülkemizde de büyük can ve mal kaybına yol açan deprem tehlikelerine karşı güvenlik kavramını iki unsura sahiptir; birincisi potansiyel yıkıcı dinamik kuvvetlere karşı yapı güvenliği, ikincisi ise yapı ve yerinin dinamik (deprem) kuvvetler etkisindeki davranışdır. Depremler nedeniyle oluşan tehlikeyi azaltmak ve deprem yükleri altındaki yapıların güvenliğini sağlamak için, dinamik etkiler altındaki suya doygun ince taneli kumlu ve siltli zeminlerde oluşan sıvılaşma davranışını bilmek yerleşim amaçlı çalışmalarda önem kazanmaktadır. Zemin seviyelerinin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik ölçütleri 4 grup altında toplamak mümkündür. Bunlar; jeolojik ölçütler, jeomorfolojik ölçütler, zemin özellikleri ve ampirik sıvılaşma analizidir (Ulusay, 2010). Ampirik sıvılaşma analizi ölçütleri, suya doygun bir zeminde sıvılaşmanın gelişip gelişmeyeceğinin bir ölçüsü olan sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (FL) belirlenmesini esas almaktadır. Bu amaçla, zeminin tekrarlı yükler altındaki dayanımının dolaylı ifadesi olan tekrarlı dayanım oranı (CRR) ile depremin analizi yapılan noktada yaratacağı tekrarlı gerilim oranı (CSR) birbirlerine bölünür ve deprem büyüklüğüne bağlı bir düzeltme faktörü (MSF) ile çarpılarak FL elde edilmektedir. Zemin seviyesinin bir noktası için bulunan güvenlik sayıları tüm zemin profilinin sıvılaşma potansiyelini ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle söz konusu potansiyelin bulunması için değişik yaklaşımlar geliştirilmiştir (Iwasaki vd., 1982; Youd ve Perkins, 1987, Chen ve Juang, 2000; Juang vd. 2003; Sönmez, 2003, Çetin vd., 2004; Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005; Holzer, 2008).

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) ilk defa Iwasaki vd. (1978, 1982) tarafından bir zemin kolonunun sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek için önerilmiştir. Sönmez (2003) ve Iwasaki vd. (1978, 1982) tarafından önerilen yöntemde güvenlik faktörü katsayısı limit değerini 1 yerine 1.2 değerini olarak LPI metodu yeniden düzenlenmiştir. Chen ve Juang (2000) tarafından önerilen sıvılaşma olasılığına bağlı olarak sıvılaşabilirliği tanımlamaları yapılmış olup, bu sınıflamada F_L 'nin 1.411'in üzerinde olması durumunda, sıvılaşmaya yöne-

lik olarak “hemen hemen kesinlikle sıvılaşmaz” tanımı yerine sıvılaşma beklentisinin oldukça düşük olduğu ifadesine yer verilmiştir. Juang vd., (2003) tarafından sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) ile sıvılaşma olasılığı (P_L) arasında veriye dayalı olarak bir ilişki tanımlanmıştır. Lee vd. (2003) tarafından benzer bir amaçla Sıvılaşma Riski İndeksi (IR) tanımı yapılmıştır. IR tanımında Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen Sıvılaşma İndeksi (LI) eşitliğindeki güvenlik katsayısının yer aldığı bileşeni (P_L) ile yer değiştirmiştir. Ancak, araştırmacılar makalelerinde bazı değerlendirmeler yapmalarına karşın IR değerinin yorumlanmasına yönelik bir sınıflama yer almamaktadır. Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) “Sıvılaşma Riski İndeksi” yerine “Sıvılaşma Şiddeti İndeksi, I_s ” terminolojik olarak tercih etmişler ve I_s ’ye göre bir sınıflandırma da önemli işlerdir.

Burhaniye yerleşim alanı (Şekil 1) Kuvaterner yaşlı alüvyon üzerine kurulmuş olup, yerleşim alanı ve yakın çevrelerindeki jeoteknik amaçlı sondaj çalışmalarındaki verilere göre yeraltı su seviyesinin derinliği genellikle 6 m’den azdır. Bu bölge Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ)’nun güney kısmında yer almakta olup genel olarak bölge, kuzeyden KAFZ ve güneyden Ege Graben Sistemi’nin etkisi altındadır. Diğer bir deyişle yöre KAFZ ile Ege Bölgesi’nin açılma rejimi arasında bir geçiş zonu özelliği taşımaktadır. Burhaniye ilçesi yerleşim alanının bu jeolojik, hidrojeolojik ve tektonik özellikleri nedeniyle olası kuvvetli yer hareketleri sırasında sıvılaşma tehlikesi açısından değerlendirilmesinin yararlı olacağı görülmektedir. Bu çalışmada, Burhaniye belediye arşivindeki arazi ve laboratuvar deney sonuçlarını içeren jeolojik ve jeoteknik etüt raporları incelenmiş olup bu rapordan temin edilen 97 sondaj verisi (Şekil 2) kullanılarak bir veri tabanı oluşturulmuştur. Bu veriler ve sahanın sayısal yükseklik modeli Coğrafi Bilgi Sistemi ortamında değerlendirilmiştir. Esri ArcInfo (Versiyon 10.2) programı ile yapılan bu analizler sonucunda, inceleme alanındaki jeolojik birimlerin dağılımı, yeraltı su seviyesi ve derinliğinin durumu, farklı derinlikler için SPT-N değerlerinin ve zeminlerin göreceli sıklığının dağılımı elde edilmiştir. MTA’nın 2012 yılında güncellediği aktif fay haritasından yararlanarak inceleme alanını etkileyecek faylar belirlenmiş, olası deprem



Şekil 1. Türkiye'nin tektonik haritası (Okay vd. 1996) (a) ve çalışma alanı konumu (b).
Figure 1. Tectonic map of Turkey (Okay et al., 1996) (a) and the location of the study area (b).

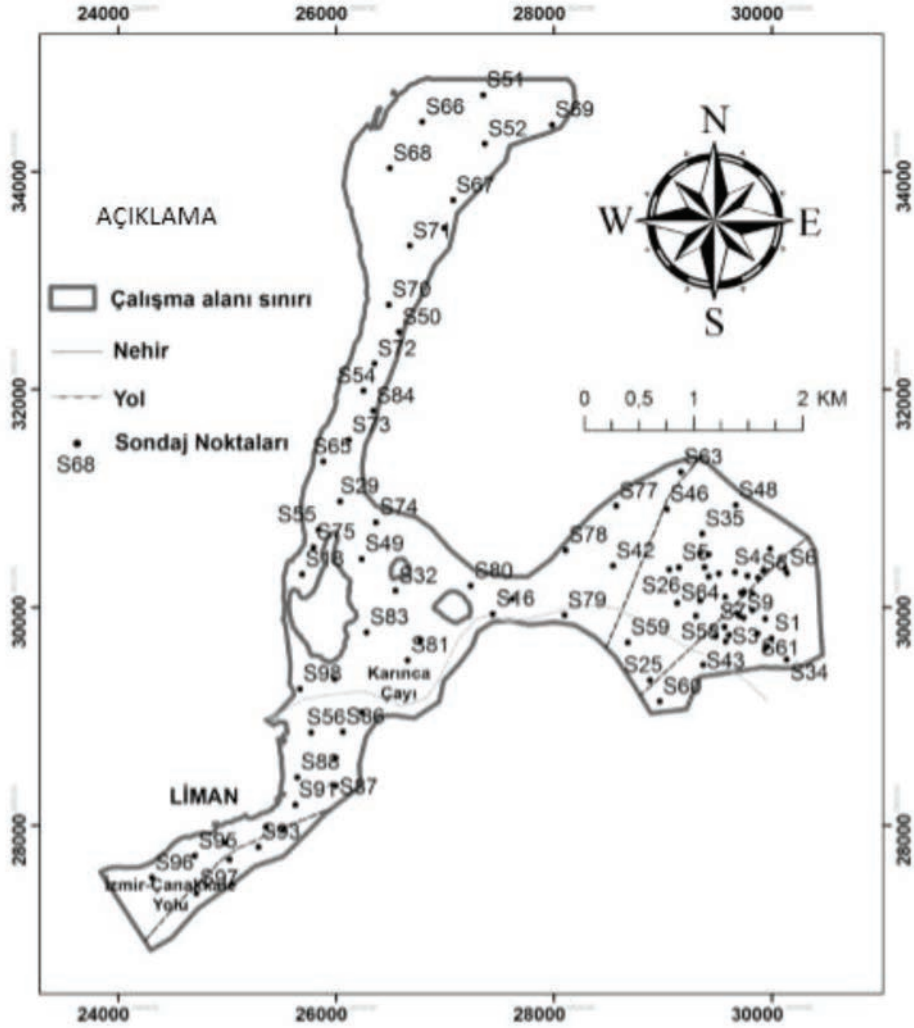
senaryoları için azalım ilişkilerinden yararlanılarak olası en büyük yatay yer ivmeleri hesaplanmıştır. İnceleme alanındaki zemin seviyelerinin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde Youd vd. (2001)'de önerilen yöntem izlenmiş olup hesaplamalarda Novaliq (Ver. 2.53) programı kullanılmıştır. Sondajların yapıldığı lokasyonlarda, zemin profilinin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde Sönmez (2003) tarafından önerilen yöntem esas alınmıştır. Bu çalışmada, bölgenin sayısal haritaları oluşturulurken sondaj lokasyonlarının olmadığı noktada ilgili değişken değerini bulmak için "Uzaklığın Karesi Yöntemi" (IDW; Inverse Distance Weighted) seçilmiştir.

İNCELEME ALANI VE YAKIN ÇEVRESİNİN JEOLJİK VE TEKTONİK ÖZELLİKLER

Alp - Himalaya Dağ oluşum sistemi içerisinde yer alan Türkiye'nin jeolojik yapısını, bir kaç

bölgede yüzeyleyen Pan-Afrikan temel ile Tetis Okyanusu'nun evrim süreci içerisinde oluşan kıtasal zonlar ile bunlar arasında yer alan okyanusal kenet kuşaklarının oluşturduğu paleotektonik zonlar şekillendirmektedir (Şekil 1). İnceleme alanı ve çevresini de kapsayan İç Pontid Kenedi güneyinde, Biga Yarımadası'ndan Doğu Karadeniz'e kadar uzanan, kıtasal kayaç topluluğu Sakarya Zonu'nu oluşturmaktadır (Duru vd. 2004).

Sakarya Zonu'nun temelindeki gnays, mermer ve metaperidotitlerden oluşan metamorfik masifler (Kazdağı, Uludağ ve Pulur masifleri) Her-siniyen orojenezinden etkilenmiştir. Bu masifleri tektonik dokanakla örten, düşük dereceli metamorfizmadan etkilenmiş ve yoğun deformasyona uğramış, içerisinde kireçtaşı blokları bulunduran Geç Paleozoik-Triyas yaşlı volkano-sedimanter kayaç toplulukları (Karakaya Kompleksi) yer almaktadır (Duru vd, 2004). Bu



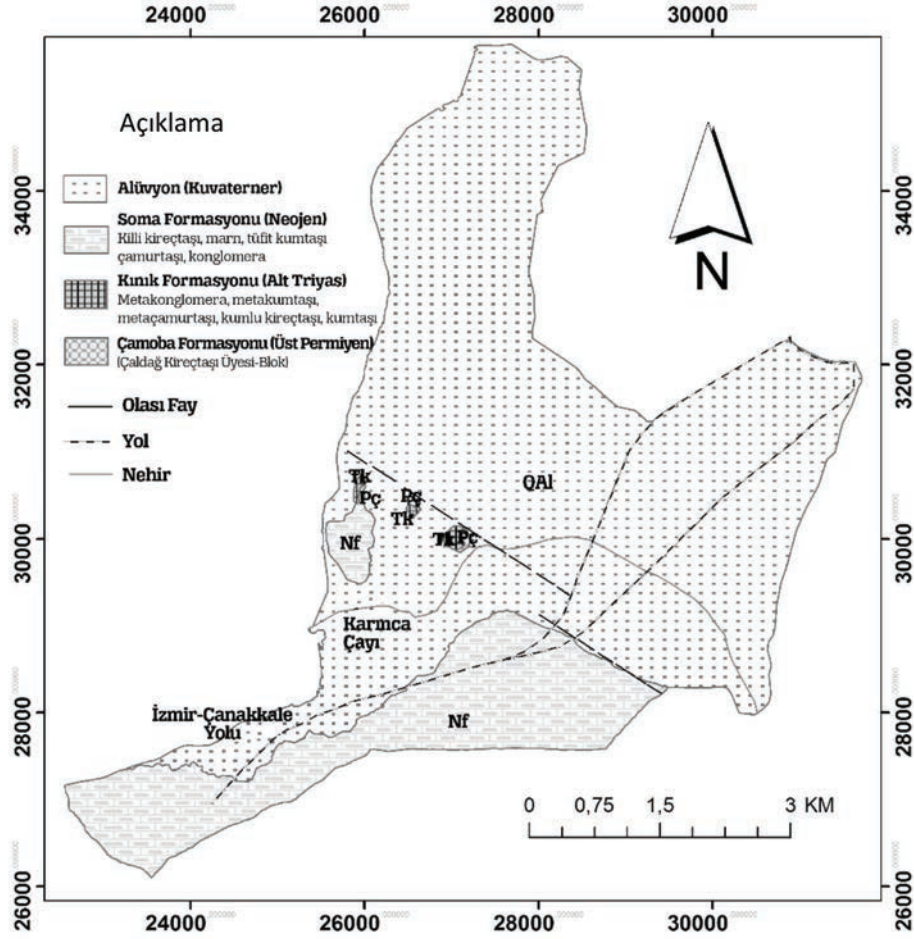
Şekil 2. Çalışma alanındaki sondaj lokasyonları.
Figure 2. Borehole locations in the study area.

kayaçlar üzerine Erken Jura-Eosen yaşlı karbonat ve filiş istifi transgresif olarak gelmektedir. Geç Paleozoik-Miyosen yaş aralığında Sakarya Zonu içerisinde yoğun granitik sokulumlar bulunmaktadır (Duru vd, 2004).

Burhaniye yerleşim alanında en yaşlı birim Kınık Formasyonu olarak adlandırılan (Akyürek, 1989), metakonglomera, metakumtaşı, metaçamurtaşı, kumlu kireçtaşı, kumtaşından oluşan ve içinde Permiyen yaşlı Çaldağ Kireçtaşı üyesine ait değişik boyutlarda bloklar içeren birimdir (Şekil 3). Kınık Formasyonu üzerinde, uyumsuz olarak killi kireçtaşı, marn, silttaşı, tüfit, kumtaşı, konglomera, ardalanması ve bu kaya türlerinin bir

veya birkaçının baskın olduğu kaya türlerinden oluşan Soma Formasyonu yer almaktadır (Şekil 3). Bu formasyonun üstünde uyumsuz olarak bulunan alüvyon, çalışma alanında çoğunlukla kumlu, bazen çakıllı ve yer yer de siltli olarak gözlenmiştir.

Balıkesir-Edremit hattının kuzeyinde kalan alan KAFZ'nun sağ atımlı hareketinin etkisi altında inceleme alanını da içine alan bölge güneybatıya doğru yelpaze gibi açılma rejimine sahiptir. Bu hattın güneyinde ise Batı Anadolu'nun K-G açılması sonucu oluşan yapısal unsurlar yer almaktadır (Ercan, 2010). Balıkesir-Bigadiç-Sındırgı ile Gediz, Bakırçay göçüntüleri bunlardan



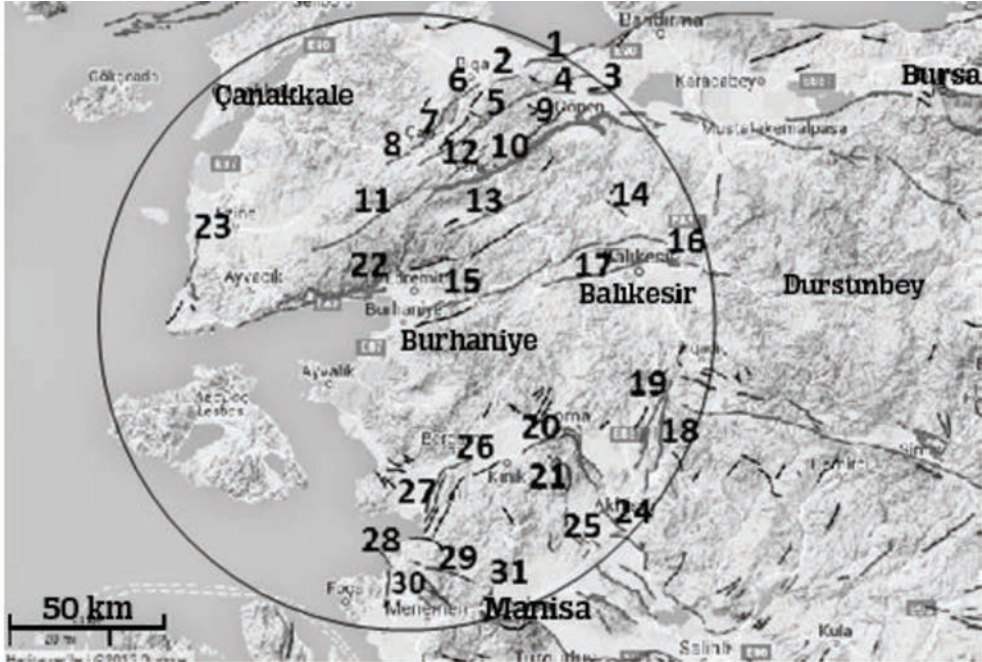
Şekil 3. Burhaniye yerleşim alanının jeoloji haritası (İçöz vd., 2000'den değiştirilmiştir.).
Figure 3. Geological map of the Burhaniye settlement area (revised from İçöz et al., 2000).

önemli olanlarıdır (Ercan, 2010; Emre vd., 2012). Ege Denizi'nde ise Pliyosen yaşlı K-G doğrultulu faylanmalar yaygındır. Balıkesir ve yakın çevresi, Batı Anadolu'nun K-G doğrultulu açılma rejiminin ürünü olan fayların ürettiği depremler ile Anadolu'nun batıya doğru ilerlemesi sonucu oluşan KAFZ'nun Marmara'daki kollarında gelişen depremlerden etkilenebilmektedir (Ercan, 2010; Emre vd., 2012).

Burhaniye yerleşim alanı için en kritik deprem senaryosunun belirlenmesinde MTA'nın 2012 yılında güncellediği Türkiye diri fay haritasından inceleme alanına en fazla 100 km uzağındaki diri faylar dikkate alınmıştır (Şekil 4). Söz konusu fayların potansiyel deprem büyüklüğünün belirlenmesi açısından uzunlukları ve olası

en büyük yatay ivmenin belirlenmesi açısından inceleme alanına uzaklıkları birlikte dikkate alındığında inceleme alanında Havran-Balıkesir Fay Zonu, Balıkesir Fayı, Edremit Fay Zonu ve Yenice-Gönen Fay Zonu'nun daha fazla öneme sahip oldukları görülmektedir. Bu amaçla yapılan ampirik hesaplamalar sonraki bölümlerde sunulmuştur.

Havran-Balıkesir Fay Zonu Biga yarımadası güneydoğusunda Balıkesir il sınırları içinde, Edremit Körfezi ile Kepsut arasında uzanan sağ yönlü doğrultu atımlı aktif fay sistemidir. Havran-Balıkesir arasında KD-GB uzanımlı olan fay sistemi, tepe noktası Balıkesir il merkezi kuzeyinde yer alan, güneye doğru geniş bir büküm yapar ve büküm doğusunda KB-GD doğrultu-



Şekil 4. Burhaniye yerleşim alanını etkileyen faylar (1: Sinekçi Fayı 2 Nolu Segmenti, 2: Sinekçi Fayı 3 Nolu Segmenti, 3: Gündoğan Fayı 1 Nolu Segmenti, 4: Gündoğan Fayı 2 Nolu Segmenti, 5: Sarıköy Fayı, 6: Biga-Çan Fay Zonu Biga Segmenti, 7: Biga-Çan Fay Zonu Yuvalar Segmenti, 8: Biga-Çan Fay Zonu Çan Segmenti, 9: Akçapınar Fayı, 10: Yenice-Gönen Fayı, 11: Evciler Fayı, 12: Bekten Fayı, 13: Pazarköy Fayı, 14: Şanlı Fayı, 15: Havran-Balya Fay Zonu, 16: Balıkesir Fayı Kepsut Segmenti, 17: Balıkesir Fayı Gökçeyazı Segmenti, 18: Gelenbe Fay Zonu Doğu Segmenti, 19: Gelenbe Fay Zonu Batı Segmenti, 20: Soma-Kırkağaç Fay Zonu, 21: Soma-Kırkağaç Fay Zonu, 22: Edremit Fay Zonu, 23: Kestanelbol Fayı, 24: Gediz Graben Fay Sistemi Akhisar Fayı, 25: Gediz Graben Fay Sistemi Mustafa Kemal Paşa Fayı, 26: Bergama Fayı, 27: Zeytindağ Fay Zonu 1 Nolu Segmenti, 28: Yenifoça Fayı, 29: Güzelhisar Fayı, 30: Menemen Fay Zonu, 31: Gediz Graben Fay Sistemi Muradiye Fayı) (MTA, 2012).

Figure 4. The active faults affecting the Burhaniye settlement area (1: The second segment of Sinekçi Fault 2: The third segment of Sinekçi Fault, 3: The first segment of Gündoğan Fault, 4: The second segment of Gündoğan Fault, 5: The Sarıköy Fault, 6: The Biga segment of Biga-Çan Fault Zone, 7: The Yuvalar segment of Biga-Çan Fault Zone, 8: The Çan segment of Biga-Çan Fault Zone 9: The Akçapınar Fault, 10: The Yenice-Gönen Fault, 11: The Evciler Fault, 12: The Bekten Fault, 13: The Pazarköy Fault, 14: Şanlı Fault, 15: Havran-Balya Fault Zone, 16: The Kepsut segment of Balıkesir Fault, 17: The Gökçeyazı segment of Balıkesir Fault, 18: The East segment of Gelenbe Fault Zone, 19: The West segment of Gelenbe Fault Zone, 20: The first segment of Soma-Kırkağaç Fault Zone 21: The second segment of Soma-Kırkağaç Fault Zone, 22: The Edremit Fault Zone, 23: The Kestanelbol Fault 24: The Akhisar Fault (Gediz Graben Fault System), 25: The Mustafa Kemal Paşa Fault (Gediz Graben Fault System), 26: The Bergama Fault, 27: The first segment of Zeytindağ Fault Zone, 28: Yenifoça Fault 29: Güzelhisar Fault, 30: Menemen Fault Zone, 31: The Gediz Muradiye Fault (Graben Fault System) (MTA, 2012).

sunu kazanır. Söz konusu bölümü oluşturan faylar sağ yönlü doğrultu atımlı faylardır (Emre vd., 2012). Bu fay zonu Havran-Balya ve Balıkesir Fayı olmak üzere iki fayı içermektedir ya da kapsamaktadır gibi bir ifade daha doğru olur (Emre vd., 2012). Bu iki fay İvrindi-Balıkesir arasında ortalama 7-10 km genişlikte birbirine paralel uzanır. Tarihsel ve aletsel dönem kayıtlarında Havran-Balya fay'ında büyük depremler

geliştğine ilişkin bilgiler mevcut değildir (Emre vd., 2012). Balıkesir Fayı; İvrindi-Kepsut ilçeleri arasında D-B genel doğrultusunda güneye doğru iç bükey olarak uzanır (Emre vd., 2012).

Sağ yönlü doğrultu atımlı bir fay olan Balıkesir Fayı, Balıkesir kent merkezi yakın kuzeyinde, güneye iç bükey yaptığı bölümü ile karakteristiktir (Emre vd., 2012). Bu bölümü Balıkesir

Fayı'nı batı ve doğu olmak üzere iki segmente ayırır. Balıkesir Fayı'nın yaşı ve toplam atımı hakkında kesin veri yoktur. Balıkesir il yerleşkesine çok yakın oluşu nedeniyle fayın deprem tehlikesinin anlaşılması için yapılabilecek olan paleosismolojik araştırmalar önem taşımaktadır (Emre vd., 2012).

Edremit Fay Zonu Biga yarımadası güneyinde Edremit Körfezi ile Kazdağ Yükselimi arasında yer alır (Emre vd., 2012). Edremit Fay Zonu, karadaki geometrisi ve niteliğindeki değişimler dikkate alınarak Altınoluk ve Zeytinli olmak üzere iki ana segmente ayrılır. Altınoluk segmenti K80D genel doğrultuda uzanan düşük açılı bir normal fay ve bunun tavan bloğunda gelişmiş, zonal yapı sunan sentetik ve antitetik faylardan oluşur (Sarı vd., 2010; Emre vd., 2012). KD-GB genel gidişli Zeytinli segmenti ise yaklaşık 15 km uzunluktadır. Çizgisel gidişli tek bir faydan oluşan bu segment sağ yönlü doğrultulu atım bileşenli verev bir fay özelliği sergiler (Sarı vd., 2010; Emre vd., 2012).

Yenice-Gönen Fay Zonu Gönen doğusundaki Tütüncü ile Yenice ilçesi güneybatısı arasında toplam 67 km uzunluğunda olup, K65D genel doğrultuludur (Sarı vd., 2010; Emre vd., 2012). Magnitüdü 7.2 olan, 1953 yılı Yenice-Gönen depremiyle oluşmuş yüzey kırıkları Yenice-Gönen arasında ilk defa Herece (1985) tarafından detaylı olarak haritalanarak Yenice-Gönen Fayı olarak adlandırılmıştır (Sarı vd., 2010). Bu fay, Duru vd. (2007) tarafından hazırlanan 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları Balıkesir-İ18 paftasında ise sağ yanal atımlı diri fay olarak tanımlanmıştır (Sarı vd., 2010).

İNCELEME ALANININ VE YAKIN ÇEVRESİNİN TOPOĞRAFYA, YERALTISU DURUMU VE ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Burhaniye yerleşim alanında yükseklik kıyı kesimlerden iç kesimlere, doğuya doğru düzenli olarak artmakta olup 20 m düzeylerine ulaşmaktadır (Şekil 5a). İnceleme alanında kıyından 1 km kadar uzak alanlarda yükseklik 5 m'ye kadar çıkabilmektedir (Şekil 4a). Sıvılaşma açısından daha kritik öneme sahip alüvyon zeminlerin yayılım gösterdiği alanlarda eğim en fazla 5° iken

diğer alanlarda genellikle 5-15° arasında değişmektedir (Şekil 5b).

Bu çalışma kapsamında daha önce açılmış sondajlardan derlenen veri tabanı kullanılarak yapılan değerlendirmede; yeraltı su seviyesinin (YASS) topoğrafik yüzeye yaklaşık paralel olduğu ve sahilden doğuya doğru yüksekliğinin düzenli olarak artarak 12 m'ye ulaştığı görülmüştür (Şekil 5c). YASS'nin derinliği inceleme alanının sahil kısmında 3 m'den sığ iken bu kıyı kesiminin yaklaşık 1 km doğusunda kalan alanlarda ise 6 m'ye ulaşmaktadır (Şekil 5d).

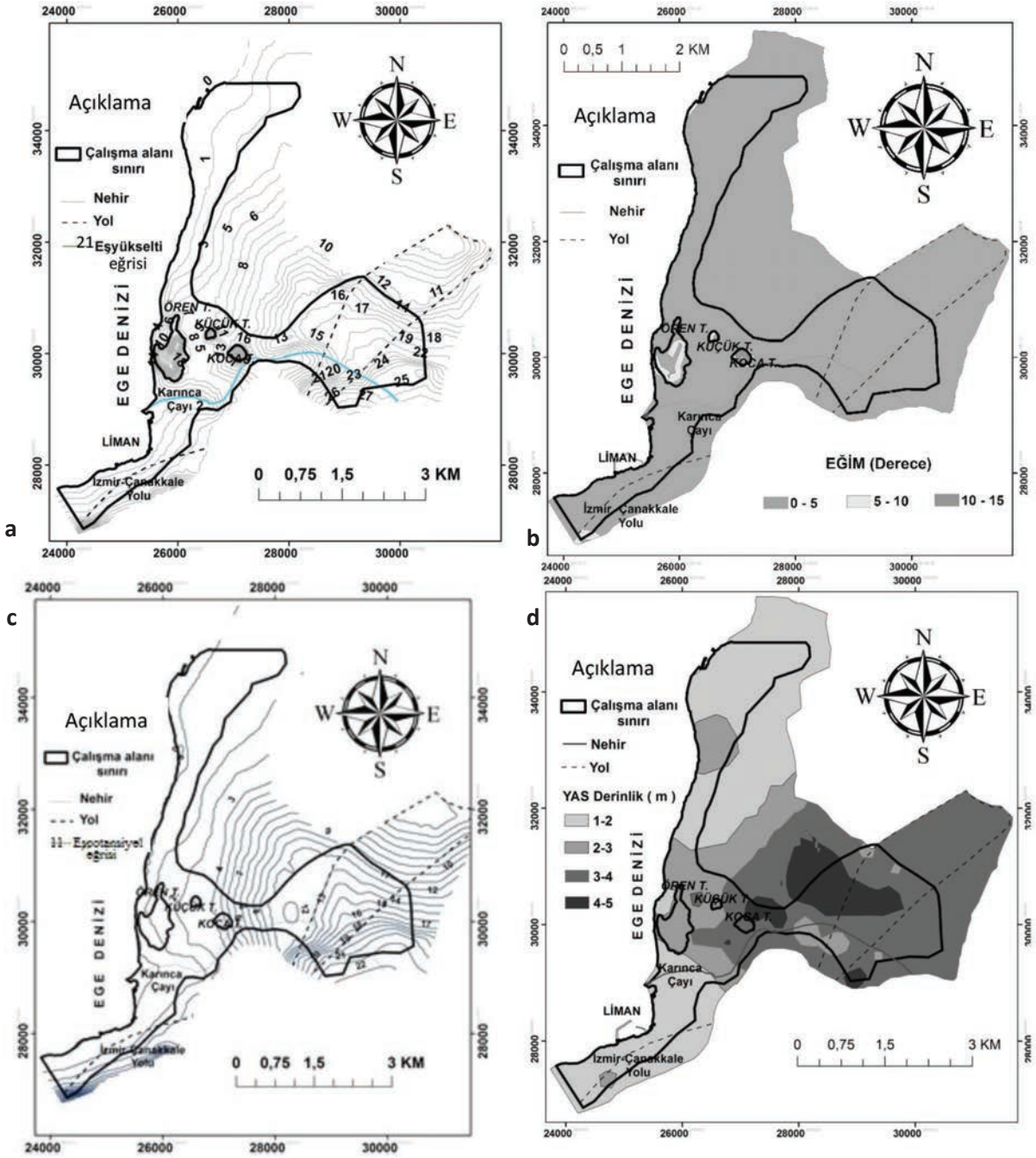
Burhaniye Belediyesi arşivinden sağlanan jeolojik ve jeoteknik etüt raporlarındaki verilere göre alüvyonu oluşturan zemin seviyeleri çoğunlukla kum, siltli kum ve kumlu silt olup yer yer çakıllı kum ve kumlu çakıllardan oluşmaktadır. İnceleme alanındaki alüvyon zeminlerin düzeltilmiş SPT-N değerleri CBS ortamında değerlendirilmiş ve topoğrafik yüzeyden 3, 6, 9, 12 ve 15 m derinlik için değişimini gösteren haritalar üretilmiştir (Şekil 6).

Düzeltilmiş SPT-N değerlerinin değişimini veren haritalar incelendiğinde, batıdan doğuya doğru bir zonlanmanın olduğu söylenebilmektedir (Şekil 6).

İNCELEME ALANI YAKIN ÇEVRESİ İÇİN SIVILAŞMA POTANSİYELİ HARİTASININ OLUŞTURULMASI

Burhaniye yerleşim alanının sıvılaşma potansiyeli haritası oluştururken sondaj lokasyonlarında zemin tabakalarının her biri için sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı (F_L) belirlendikten sonra zemin profilinin tümü için "Sıvılaşma İndeksi" nin hesaplanmasında Sönmez (2003)'de önerilen yöntem esas alınmış olup noktalar için Sıvılaşma İndeksi değeri IDW enterpolasyon yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, inceleme alanında yayılım gösteren alüvyondaki zemin tabakaları F_L 'nin hesaplanmasında Youd vd. (2001)'de verilen yöntem izlenmiştir. Bu yöntemde, Tekrarlı Gerilim Oranı (CSR), Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır;

$$CRS=0.65(\sigma_v/\sigma'_v)(a_{max}/g)r_d \quad (1)$$



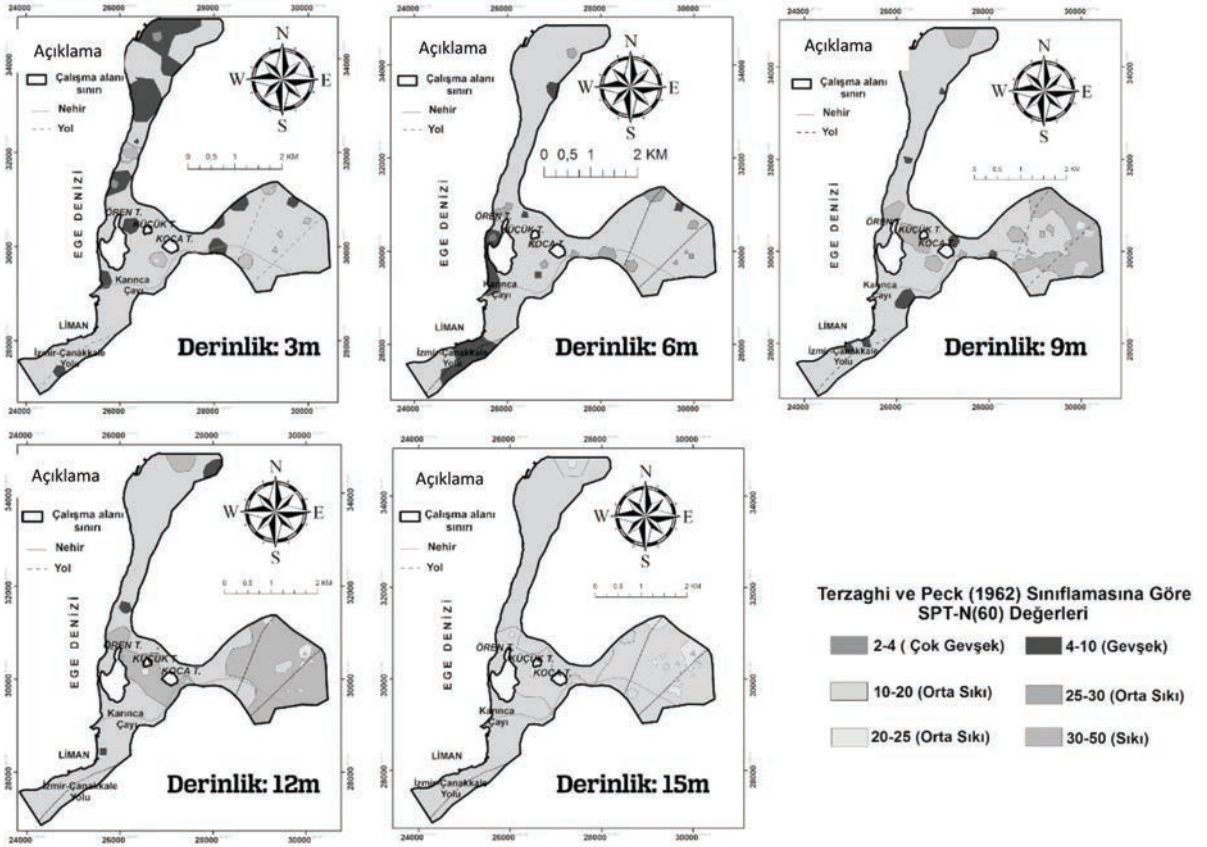
Şekil 5. Burhaniye yerleşim alanının topoğrafik haritası (a), eğim haritası (b), yeraltı su seviyesi haritası (c) ve yeraltı su derinliği haritası (d).

Figure 5. Topographical map (a), slope map (b) groundwater level map (c) and groundwater depth map (d) of the Burhaniye settlement area.

Burada a_{max} gal cinsinden maksimum yatay yer ivmesidir. r_d gerilme azaltma katsayısı, g ise gal cinsinden yer çekimi ivmesidir. σ_v ve σ/v ise sırasıyla düşey gerilme ve efektif düşey gerilmedir.

Youd vd. (2001) r_d için ortalama değerini aşağıda verilen eşitlikle belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Burada z metre cinsinden derinliktir.

$$r_d = \frac{(1.00 - 0.4113z^{0.5} + 0.0452z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 + 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \quad (2)$$



Şekil 6. Farklı derinliklerde düzeltilmiş SPT-N değerlerini gösteren harita.
Figure 6. The map representing the value of corrected SPT-N at different depths.

Burhaniye yerleşim alanında yayılım gösteren alüvyonlarda zemin seviyelerinin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısını bulmak için gerekli maksimum yatay yer ivmesinin belirlenmesinde Ulusay vd. (2004) tarafından önerilmiş ivme azalım ilişkisi kullanılmıştır (Eşitlik 3).

$$a_{max} = 2.18e^{0.0218(33.3M_w - R_e + 7.8427S_A + 18.9282S_B)} \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitlikte a_{max} en büyük yer ivmesi, M_w moment büyüklüğü, R_e depremin merkez üstüne olan uzaklık, S_A ve S_B yerle zemin koşullarını tanımlayan sabitlerdir. Kaya olması durumunda $S_A = S_B = 0$, zemin koşullarında $S_A = 1$ ve $S_B = 0$, yumuşak zemin koşullarında ise $S_A = 0$ ve $S_B = 1$ 'dir (Ulusay vd., 2004).

İnceleme alanını etkileyecek en büyük yer ivmesini elde edebilmek için olası deprem senaryoları öngörülmüştür. Bu amaç için önce MTA'nın en son 2012'de güncellediği Türkiye diri fay

haritasından yararlanılarak söz konusu alana uzaklığı en fazla 100 km olan faylar seçilmiş (Şekil 3) ve daha sonra Wells ve Coppersmith (1994) tarafından önerilen eşitlik (Eşitlik 4) yardımıyla söz konusu fayların üretebileceği olası depremlerin Moment büyüklüğü (M_w) değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 1).

$$M_w = a + b \log(SRL) \quad (4)$$

Yukarıdaki eşitlikte, SRL beklenen yüzey kırığının (ya da tasarım depremini üretmesi beklenen fay segmentinin) uzunluğu km olup, a ve b katsayıları fayın türüne bağlıdır ve Çizelge 2'den alınmıştır.

Burhaniye yerleşim alanı için öngörülen deprem senaryolarına göre en büyük yer ivmesi inceleme alanının yaklaşık 8 km batısında yer alan Havran-Balya-Balıkesir Fayı Zonu'nun oluşturacağı

Çizelge 1. Burhaniye yerleşim alanını etkileyen aktif faylara göre olası deprem senaryolarının büyüklükleri.
 Table 1. The magnitude of possible scenario earthquakes and maximum ground acceleration based on the active faults affecting the Burhaniye settlement area.

No	Senaryo Deprem	Segment Adı	L (km)	Re (km)	Mw	a_{max} (gal)
1	Sinekçi Fayı	2	15.7	93.4	6.4	31.1
2	Sinekçi Fayı	3	9.4	84.6	6.2	31.2
3	Gündoğan Fayı	1	10.9	98.8	6.2	24
4	Gündoğan Fayı	2	12.5	90.4	6.3	30.5
5	Sarıköy fayı		66.6	51.6	7.1	131
6	Biga-Çan Fay Zonu	Biga	15.3	70.9	6.4	50.3
7	Biga-Çan Fay Zonu	Yuvalar	14.2	59.4	6.4	63
8	Biga-Çan Fay Zonu	Çan	19.9	51.5	6.5	84.5
9	Akçapınar Fayı		18.4	73.9	6.5	50.3
10	Yenice-Gönen fayı		88.1	40.4	7.3	185.7
11	Evciler Fayı		46.4	30.7	7	181.1
12	Bekten Fayı		16.2	49.2	6.4	82.4
13	Pazarköy Fayı		34.5	32.5	6.8	156.4
14	Şamlı Fayı		9.3	80.6	6	34
15	Havran-Balıkesir Fay Zonu		85.3	8	7.3	372
16	Balıkesir Fayı	Kepsut	27.3	90.3	6.7	40.7
17	Balıkesir Fayı	Gökçeyazı	39.2	51.1	6.9	109.3
18	Gelenbe Fay ZONU	Doğu	35.5	94.8	6.8	40.6
19	Gelenbe Fay Zonu	Batı	36.5	93	6.8	42.7
20	Soma-Kırkağaç Fay Zonu	1	31.7	64.3	6.8	75.8
21	Soma-Kırkağaç Fay Zonu	2	39.3	61.3	6.9	87.5
22	Edremit Fay Zonu		71.7	10.5	7.2	330
23	Kestanbol Fayı		21.8	64.2	6.6	66.3
24	Gediz Graben Fay Sistemi	Akhisar Fayı	11.9	93.3	6.3	28.1
25	Gediz Graben Fay Sistemi	Mustafa Kemal Paşa Fayı	4.9	92.8	5.8	20.5
26	Bergama Fayı		9.3	52.4	6	62.8
27	Zeytindağ Fay Zonu	1	17.3	51.1	6.5	81.1
28	Yenifoça Fayı		21	75.1	6.6	51.5
29	Güzelhisar Fayı		23	79.2	6.6	48.7
30	Menemen Fay Zonu		8	91.4	6.1	25.4
31	Gediz Graben Fay Sistemi	Muradiye Fayı	7.8	93.4	6.1	24

(a_{max} : en büyük yer ivmesi, L: Fay izi uzunluğu, M_w : moment büyüklüğü, R_e : depremin merkez üstüne olan uzaklık)

Çizelge 2. Fay segmenti yaklaşımı ile senaryo deprem büyüklüğünü veren eşitlikteki a ve b katsayıları (Wells ve Coppersmith, 1994).

Table 2. Coefficients a and b in the equation representing the scenario earthquake magnitude based on fault segment approach (Wells and Coppersmith, 1994).

Fay Türü	a katsayısı	b katsayısı
Doğrultu atımlı fay	5.16	1.12
Normal fay	4.86	1.32
Ters fay	5.00	1.22
Tüm fay türleri	5.08	1.16

$M_w=7.2$ büyüklüğündeki deprem için elde edilmiş olup, bu değer yaklaşık 0.37 g seviyesindedir.

Çalışma alanındaki zemin tabakalarının tekrarlı dayanım oranını bulmak için (CRR) aşağıda verilen eşitlik (Youd vd., 2001) kullanılmıştır.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60CS} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (5)$$

Burada $CRR_{7.5}$ $M_w=7.5$ büyüklüğündeki deprem için zeminin tekrarlı dayanım oranı, $(N_1)_{60CS}$ ise ince tane oranına göre yeniden düzeltilmiş SPT-N değeridir.

$(N_1)_{60CS}$ bulmak için gerekli düzeltme katsayıları Youd vd. (2001)' den alınmış olup bu değerlerin ince tane oranına (ITO) göre düzeltilmesi için aşağıda verilen eşitlikler (Youd vd., 2001) uygulanmıştır (Eşitlikler 6-12);

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + \beta(N_1)_{60CS} \quad (6)$$

$$\alpha = 0 \quad (ITO \leq \%5) \quad (7)$$

$$\alpha = \exp \left[1.76 - \left(\frac{190}{ITO^2} \right) \right] \quad (\%5 < ITO \leq \%35) \quad (8)$$

$$\alpha = 5.0 \quad (ITO > \%35) \quad (9)$$

$$\beta = 0 \quad (ITO \leq \%5) \quad (10)$$

$$\beta = \exp \left[0.99 - \left(\frac{ITO^{1.5}}{1000} \right) \right] \quad (\%5 < ITO \leq \%35) \quad (11)$$

$$\beta = 1.2 \quad (ITO > \%35) \quad (12)$$

Bu çalışmada 7.5 büyüklüğünden farklı büyüklükteki olası depremler için uygulanacak düzeltme faktörü için Seed ve Idriss (1971) tarafından verilen aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

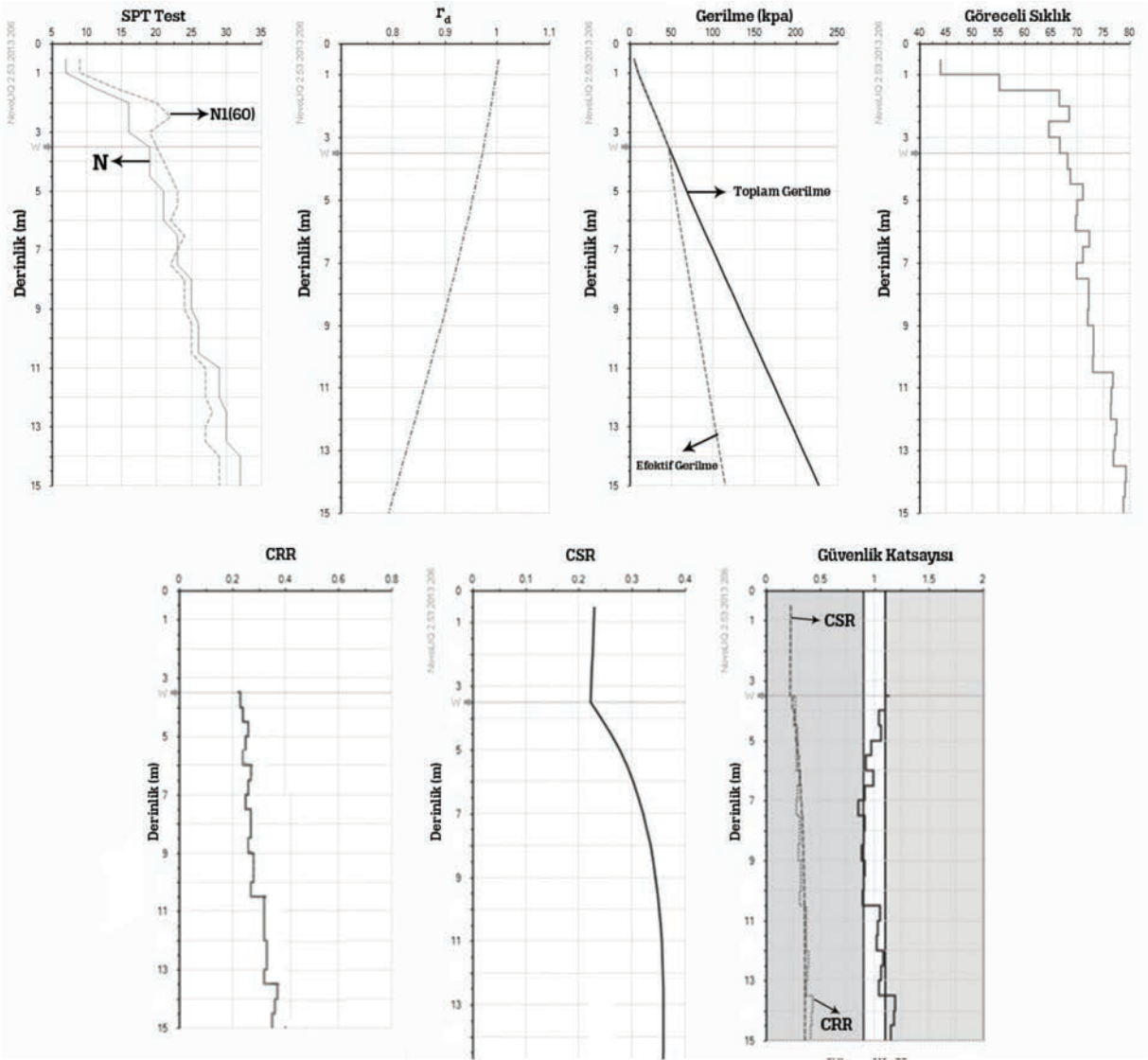
$$MSF = \left(\frac{10^{2.24}}{M^{2.56}} \right) \quad (13)$$

Burhaniye yerleşim alanında yayılım gösteren alüvyondaki zemin seviyelerinin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının bulunmasında NovoLiq (Ver: 2.53) programı kullanılmış olup programın çıktısına örnek olarak 36 nolu sondaj için hesaplanan değerlerin zemin profili boyunca değişimi Şekil 7'de verilmiştir.

Zemin seviyelerinin sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı yüzeyden derine doğru profil boyunca farklılıklar sunmakta olup tek başına sıvılaşmanın yüzeydeki etki derecesini değerlendirilmesinde yetersizdir (Sönmez, 2003). Bu nedenle, farklı araştırmacılar tarafından zemin profilinin tümünü ifade edebilecek sıvılaşma şiddetini veren bazı yaklaşımlar önermişlerdir (Iwasaki vd., 1982; Sönmez, 2003; Sönmez ve Gökçeoğlu 2005; Holzer, 2008).

Iwasaki vd. (1982) sondaj lokasyonu için yüzeyden 20 m derinliğe kadar sıvılaşmanın şiddetinin değerlendirilmesi için aşağıda verilen eşitlikle (Eşitlik 14) bulunan "Sıvılaşma İndeksi, L_1 " ni önermiştir.

$$L_1 = \int_{Z=0}^{Z=20} W(z)F(z)dz \quad (14)$$



Şekil 7. Sıvılaşma potansiyeli temsil eden güvenlik faktörünü elde etmek için kullanılan Novaliq programının çıktısı. Figure 7. The output of the Novaliq program used to obtain safety factor representing liquefaction potential.

Burada sıvılaşabilirliği araştırılan tabaka derinliği, $z \geq 20$ olduğunda $W(z)=0$ ve $z < 20$ olduğunda ise $W(z)=10-0.5z$ dir. Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı $F_L < 1.0$ olduğunda $F(z)=1-F_L$ diğer durumlarda $F(z)=0$ dir.

Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen Sıvılaşma İndeksinin iki önemli sınırlaması bulunmaktadır (Sönmez 2003); a) Sıvılaşma potansiyeli olmayan ($F_L > 1$) alanlar ayırtanamaz ve b) Orta sıvılaşma potansiyeli tanımlamada yer alma-

maktadır. Bu iki sınırlamayı aşmak için Sönmez (2003), Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen yaklaşımda, yüzeyden 20 m derinliğe kadar tüm seviyelerde $F_L > 1.2$ 'den büyük olması koşulunda sondaj lokasyonu için Sıvılaşma İndeksi $L_1=0$ olmakta ve yeni sınıflamaya göre "Sıvılaşma yok" tanımı yapılmaktadır (Eşitlikler 15-20). Ayrıca, "orta" tanımı da yapılan yeni öneri ile sınıflamaya dahil edilmiştir (Çizelge 3) (Sönmez, 2003). İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelini bulmak için Sönmez (2003) tarafından verilen aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

Çizelge 3. Sıvılaşma İndeksi sınıflaması (Sönmez, 2003).
Table 3. Liquefaction Index classification (Sönmez 2003).

Sıvılaşma İndeksi	Tanımlama
0	Sıvılaşma yok
0-2	Düşük
2-5	Orta
5-15	Yüksek
>15	Çok Yüksek

$$L_1 = \int_{z=0}^{z=20} W(z)F(z)dz \quad (15)$$

$$z < 20 \text{ m} \quad W(z) = 10 - 0.5z \quad (16)$$

$$z \geq 20 \text{ m} \quad W(z) = 0 \quad (17)$$

$$F(z) = 0 \quad F_L \geq 1.2 \quad (18)$$

$$F(z) = 2 \times 10^6 e^{-18.427F_L} \quad 12 > F_L > 0.95 \quad (19)$$

$$F(z) = 1 - F_L \quad F_L < 0.95 \quad (20)$$

Bu çalışma sonucunda elde edilen Burhaniye yerleşim alanının sıvılaşma potansiyeli haritasında (Şekil 8) kıyıda orta ve iç kesimlere doğru (doğuya doğru) bir zonlanmanın olduğu, aynı yönde sıvılaşma şiddeti indeksinin de azaldığı görülmektedir.

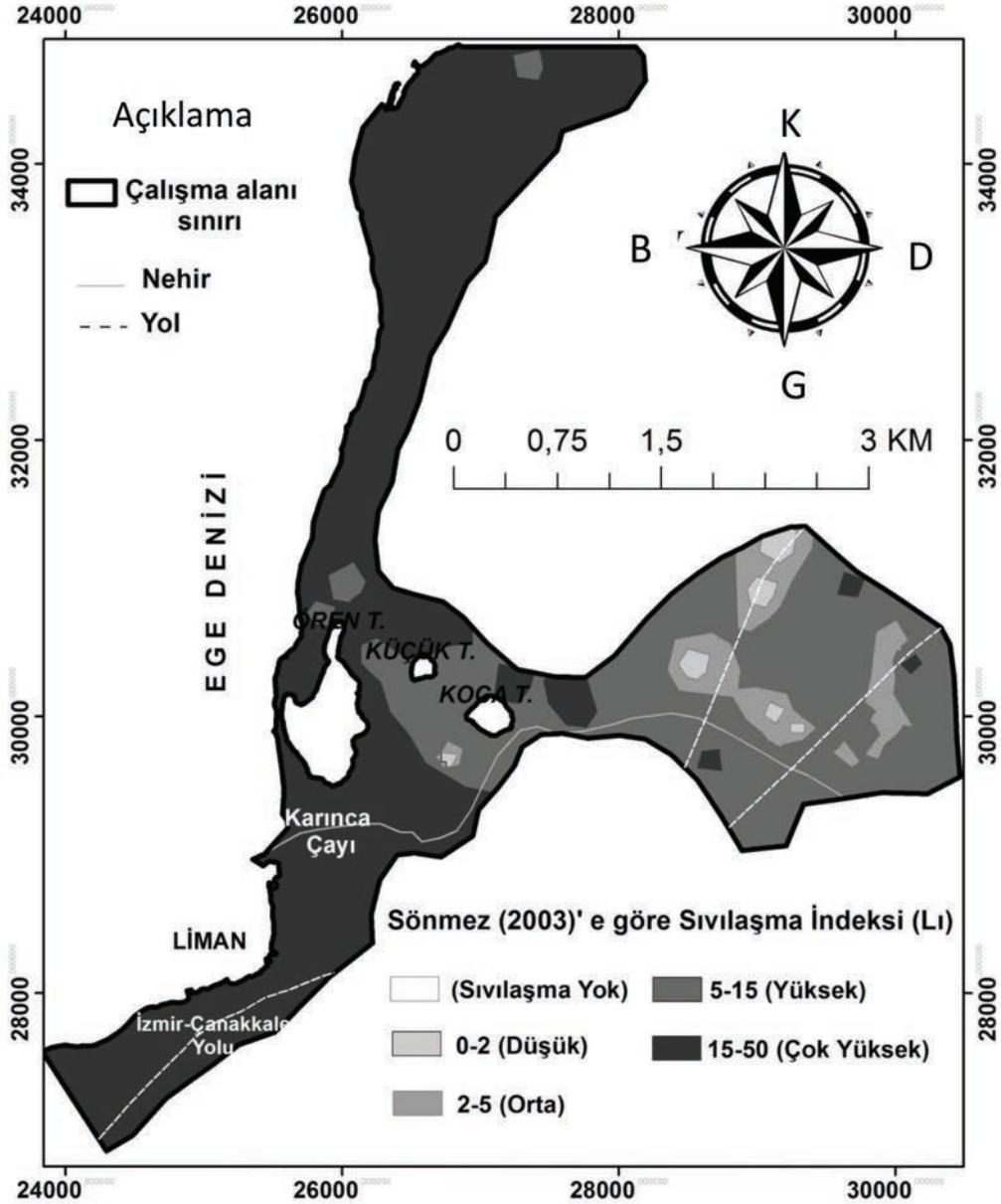
İnceleme alanında, kıyı boyunca “Çok Yüksek” sıvılaşma şiddeti değerinin orta kesimlere gidildikçe “Yüksek” şiddete, orta kesimlerden doğuya doğru devam ettikçe yine “Yüksek” ve yer yer de “Orta” ve “Düşük” sıvılaşma şiddeti değerine düştüğü görülmektedir. Burhaniye yerleşim alanının yaklaşık %48’i “çok yüksek”, %42’i “yüksek”, %7’i “orta” ve %3’ü düşük sıvılaşma şiddetine sahiptir.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Burhaniye yerleşim alanının jeolojik, hidrojeolojik ve tektonik özellikleri nedeniyle, olası kuvvetli yer hareketleri sırasında sıvılaşma tehlikesi al-

tında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, söz konusu alanın Burhaniye Belediyesi tarafından yaptırılmış jeoteknik sondajlar, yerinde yapılmış standart penetrasyon deneyi (SPT) verileri esas alınarak sıvılaşma duyarlılık haritaları üretilmiştir. Burhaniye yerleşim alanının sıvılaşmaya karşı duyarlılığı Sönmez (2003) ve Lee vd., (2003)’nin yaklaşımlarına göre sıvılaşma şiddeti indeksleri hesaplanmıştır. Sıvılaşma duyarlılık haritaları üretilmiştir. Sönmez (2003)’in yöntemine göre hesaplanan Sıvılaşma İndeksi ve sınıflamasına göre oluşturulan harita incelendiğinde, inceleme alanının yaklaşık %48’i “çok yüksek”, %42’i “yüksek”, %7’i “orta” ve %3’ü düşük sıvılaşma şiddetine sahip olduğu görülmektedir. Burhaniye mevcut yerleşim alanındaki arazilerin yeniden değerlendirilmesinde ve arazi kullanım kararları verilirken bu çalışmada ortaya konan sıvılaşmaya karşı duyarlılık haritası temel teşkil edebilir.

Burhaniye yerleşim alanını etkileyecek olası bir depremin oluşturacağı riski azaltmak için her bir mikro bölgenin, özellikle sıvılaşma potansiyeli yüksek ve çok yüksek olan bölgelerdeki bina stoğunun durumunun; kullanım niteliğinin, depremdeki davranışlarının, hasar görülebilirlik oranlarının, binadaki yaşayan kişi ve binanın değerinin belirlenmesi gerekir. Bu belirlemeden sonra olası deprem senaryolarına göre can ve mal kaybını azaltacak önlemlerin de yer aldığı bir afet programının hazırlanması gerekmektedir. Tüm bu çalışmaların I. Derece Deprem Bölgesi’nde yer alan Balıkesir ili büyükşehir sınırları içerisinde kalan tüm alanlar için yapılması gerekmektedir.



Şekil 8. Burhaniye yerleşim alanının sıvılaşma potansiyeli haritası.

Figure 8. Liquefaction potential map of the Burhaniye settlement area.

KAYNAKLAR

Akyürek, B., 1989. 1:100.000 ölçekli açın-sama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları serisi, Ayvalık G3 paftası. M.T.A. Genel Müd. Yayınları, 97, 9, 1249-1273.

Chen, C.J. ve 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, Geotechnical Special Publication, ASCE, Reston, 97, 49-64.

Çetin, K.O., Seed, R.B., Kiureghian, A.D., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Kayen, R.E., ve Moss, R.E.S., 2004. Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil

- liquefaction potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130, 12, 1314-1340.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Şentürk, Y., Yavaş, F. ve Kar, H. 2004. New results on the lithostratigraphy of the Kazdağ Massif in northwest Turkey. *Turkish journal of Earth Sciences' A special issue commemorating, Okan Tekeli'*, 177-186.
- Duru, M., Pehlivan, Ş., Dönmez, M., Ilgar, A., ve Akçay, E.A. 2007. 1/100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları Bandırma-İ18 Paftası, MTA, 102.
- Emre, Ö., Doğan, A. ve Yıldırım, C., 2012. Biga Yarımadasının diri fayları ve deprem potansiyeli. (eds: E. Yüzer and G. Tunay). *Biga Yarımadasının Genel ve Ekonomik Jeolojisi*, 28, Ankara: Pozitif Matbaacılık Ltd. Sti., 163-191.
- Ercan, Ö.A., 2010. Balıkesir'in deprem sakınımları ile kentsel tasarım yönelimi, çağdaş jeofizikle yerinceleme çalışmaları. *Balıkesir Kent Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, EMOYayın No: SK/2011/3, Balıkesir, 21-46.
- Herece, E., 1985. The Yenice-Gonen earthquake of 1953 and some examples of recent tectonic events in the Biga Peninsula of northwest Turkey. MSc. Thesis, Penn State Universty, ABD.
- Holzer, T., 2008. Probabilistic liquefaction hazard mapping. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, IV, 1-32.
- İçöz, E., Karadeniz, D. Arslaner, B., Bostancı, B. ve Türk, N., 2000. Burhaniye (Balıkesir) Yerleşim Alanının Jeolojik- Jeofizik- Jeoteknik Etüd Raporu (Yayınlanmamış).
- Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. I., ve Yasuda, S., 1978. A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan. *Proc. 2nd International Conference on Microzonation*, 885-896.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., ve Sato, H., 1982. Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation*, Seattle, 3, 1319-1330.
- Juang, C.H., Yuan, H., Lee, D.H. ve Lin, P.S., 2003. A simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129, 1, 66-80.
- Lee, D.H., Ku, C.S. ve Yuan, H., 2003. A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin. *Taiwan Engineering Geology*, 71, 97-117.
- MTA, 2012. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Türkiye. <http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx>, 15 Mayıs 2015.
- Okay, A., Satır, M., Maluski, H., Siyako, M., Metzger, R., ve Akyüz, H.S., 1996. Paleozoic and Neo-Tethyan events in northwest Turkey: Geological and geochronological constraints: Yin, A. and Harrison, T.M., eds. *Tectonic Evolution of Asia*: 420-44
- Sarı, R., Tufan, E.A., ve Yenigün, K.G., 2010. Kentimizin heyelan, deprem ve taşkın alanları açısından irdelenmesi. *Balıkesir Kent Sempozyumu Bildiriler Kitabı* EMO Yayın No: SK/2011/3, Balıkesir, 139-150.
- Seed, H.B. ve Idriss, I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 97, 9, 1249-1273.
- Sönmez, H. ve Gökçeoğlu, C., 2005. A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48, 81-91.
- Sönmez, H., 2003. Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegöl-Turkey). *Environmental Geology*, 44,7, 862-871.
- Ulusay, R., 2010. *Uygulamalı Jeoteknik Bilgiler (Practical Information for Geotechnical Applications-Updated-Expanded 5th Edition)*. Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Güncellenmiş ve Genişletilmiş 5. Baskı, Yayın No. 38, 458 sayfa.

- Ulusay, R., Tuncay, E., Sonmez, H. and 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.
- Wells, D., ve Coppersmith, K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84, 974-1002.
- Youd, T.L. ve Perkins, D.M., 1987. Mapping of liquefaction severity index. *Journal of Geotechnical Engineering*, 113, 11, 1374-1392.
- 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., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., ve Stokoe II, K.H., 2001. Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 817-833.