



Mansuroğlu Mahallesi (Bayraklı-İzmir) Alüvyonel Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyeli
Liquefaction Potential of Alluvial Soils in Mansuroglu District (Bayrakli-Izmir)

Ekin Kıran^{1,*} , Cem Kınca^{1,2} 

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Müh. Anabilim Dalı, Tınaztepe Kampüsü, Buca-İzmir

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Müh. Bölümü, Tınaztepe Kampüsü, Buca-İzmir

• Geliş/Received: 18.03.2024 • Düzeltmiş Metin Geliş/Revised Manuscript Received: 11.05.2024 • Kabul/Accepted: 13.05.2024
• Çevrimiçi Yayın/Available online: 01.12.2024 • Baskı/Printed: 31.05.2025

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye Jeol. Bül. / Geol. Bull. Turkey

Öz: Sisam Depremi, Yunanistan Sisam Adası’nda Seferihisar Merkezine 23 km mesafede meydana gelmiştir. AFAD (2020) kayıtlarına göre 16 sn devam eden 6,6 moment büyüklüğündeki depremin etkisi çevre illerde hissedilmesine karşın en büyük etkiyi merkeze 60 km mesafedeki Bornova Ovasında (İzmir) göstermiştir. Deprem sonucunda 117 kişi hayatını kaybederken, 1.034 kişi yaralı olarak kurtulmuştur. Yıkılan bina sayısının ve kayıp insanların en fazla olduğu yer Bayraklı İlçesine bağlı Mansuroğlu Mahallesidir. Deprem sonucuları değerlendirildiğinde, üzerinde yapılan binanın kalitesinin yanında inşaa edildiği alanın jeoteknik özelliklerinin de binanın güvenliğinde büyük önem arz ettiği görülmüştür. Bu çalışmada, Bayraklı İlçesi Mansuroğlu Mahallesi’nin sıvılaşma etkileri bölgede yapılmış olan sondaj verileri üzerinden değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bayraklı (İzmir), Mansuroğlu mahallesi, sıvılaşma, Sisam Depremi, sondaj.

Abstract: The Sisam Earthquake occurred near the island of Samos, Greece, which is 23 km from Seferihisar town centre. According to AFAD (2020) records, the earthquake, recorded over 16 s, was felt in many surrounding areas but mostly on Bornova Plain. After the earthquake, 117 people died and 1034 people were injured. The highest number of demolished buildings and highest deaths were recorded in the Mansuroglu district of Bayrakli town. When evaluating the outcome of the earthquake, the geotechnical properties of the region where buildings are constructed is important, in addition to the quality of construction. In this study, the liquefaction effects in Mansuroglu district in Bayrakli were analysed based upon the results of drilling, made in the same region.

Keywords: Bayraklı (İzmir), drilling, , liquefaction, Mansuroglu Mahallesi, Sisam Earthquake.

GİRİŞ

Yıllardır artan nüfus yoğunluğu, kırsaldan kente göç, sanayileşme, artan ekonomik problemler sebebiyle ülke gündeminde olan kentleşme ve beraberinde gelen denetimde ve planlamadaki yetersizlik sebebiyle kontrolsüz yapılaşma giderek artmaktadır. Özellikle gerekli raporlamalar yapılmadan yürütülen kentsel dönüşüm

sonucunda değerli zirai alanları, sulama alanları ve kıyı alanları yapılaşmaya açılarak doğal afetler karşısında dirençsiz ortamlar oluşmuştur. Kentlerimizdeki yapılaşmanın büyük çoğunluğu artan nüfus ve yüksek değer talebi doğrultusunda gevşek ve zayıf zeminler üzerine oturmaktadır.

Sıvılaşma kavramı literatüre ilk olarak Hazen (1920) tarafından California Calaveras Barajının

* Yazışma / Correspondence: ekinkiran35@gmail.com

zemininde oluşan gerilmelerin sebebini açıklarken zeminlerin “Sıvılaştırılabilir” özelliğine bağlaması ile ortaya çıkarken, ilk “Sıvılaştırma” terimi Terzaghi (1925) tarafından ortaya atılmıştır. İlerleyen yıllardaki araştırmalara rağmen 1964 yılında 3 ay arayla yaşanan Niigata ve Alaska depremleri sonrasında kumlu tabakalarda sıvılaştırmadan kaynaklı yıkıcı yer kaymaları gözlemlenmiş, zemindeki yatay yayılma sonucunda yüzeyde çatlaklar oluşmuştur. Bu depremler sonucunda, sıvılaştırma kaynaklı oturmalar, yanıl yayılmalar, ötelenmeler ve devrilmeler gözlemlenmiştir (Ishihara ve Koga, 1981) (Şekil 1, Alaska Depremi (a), Niigata Depremi (b)).

Seed ve Idriss (1967), bölgede yaptıkları laboratuvar ve arazi incelemeleri sonucunda, binalardaki oturma ve devrilmelerin, bina temelleri altında yer alan kumlu zeminlerdeki sıvılaştırmadan kaynaklandığını ortaya koymuşlardır. Sıvılaştırma esnasında, daneli zeminlerde boşluk suyu basıncının yükselmesi ve bu nedenle efektif gerilmenin azalması sebebiyle, katı halden sıvı hale geçerek daneler yer değiştirmektedir. Özellikle yeraltı suyu tabakası altında yer alan bu tip zeminler, deprem sırasında, üzerindeki yapıları taşıyamayarak binaların devrilmelerine ve/veya oturmalarına sebep olmaktadır.

30 Ekim 2020 Sisam depreminin etkilerinin deprem merkezinden 70 km uzakta yer alan Bayraklı ve Bornova ilçelerinde yaşanması, depremin odak noktasının uzaklığından ziyade, proje aşamasında imar alanının ve bölgenin jeolojik ve jeoteknik parametrelerinin hesaplanmasının ve uygulama sırasında bu değerler üzerinden hesaplamaların yapılmasının gerekliliği açısından iyi bir örnektir. AFAD (2020) raporuna göre 6,6 Mw büyüklüğünde, Sisam Adası’nın kuzeyinde, Kuşadası Körfezi açıklarında meydana gelen depremin yıkıcı etkileri İzmir Körfezi’nin kıyı kesiminin alüvyonal zemininden kaynaklı büyütme değerleri sebebiyle Bayraklı ve Bornova İlçelerinde yıkıcı etkilerini göstermiştir. Bölgede yer alan ivmeölçer kayıtlarına göre, deprem anında İzmir İli Seferihisar İlçesinde bulunan 3536 no’lu istasyonda 0.050g olarak ölçülen ivme değeri, deprem merkezine 72 km uzaklıkta İzmir İli Bayraklı İlçesinde bulunan 3513 no’lu istasyonda 0.108g olarak kaydedilmiştir (AFAD, 2020). Bu depremde İzmir Valiliği ve AFAD verilerine göre deprem anında 7 bina tamamen yıkılırken, 117 kişi hayatını kaybetmiş, birçok bina orta – yüksek derecede hasar almış ve tedbiren daha sonrasında yıkılmıştır. Yıkılan bina sayısının en yüksek olduğu bölgelerden biri de İzmir’in Bayraklı İlçesine bağlı Mansuroğlu Mahallesi’dir.



Şekil 1. a) 27 Mart 1964 Alaska Depremi (9,2 Mw), **b)** 16 Haziran 1964 Niigata Depremi (7,5 Mw), (Ishihara ve Koga, 1981).

Figure 1. a) March 27th, 1964 Alaska Earthquake (9.2 Mw), **b)** June 16th, 1964 Niigata Earthquake (7.5 Mw), (Ishihara and Koga, 1981).

Bu çalışmada, söz konusu sahada daha önceden yapılmış sondajlardan elde edilen SPT verileri Liao ve Whitman (1986)'a göre düzeltilmiştir. Bu veriler ile alanın Sıvılaşma Derecesi, öncelikle Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya atılan ve Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen “Dinamik Kayma Gerilmesi Kriteri (Fs)”ne göre ve sonrasında Iwasaki vd. (1982)'nin önerdiği ve Sönmez (2003) tarafından geliştirildiği “Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)” açısından değerlendirilmiştir.

BÖLGENİN JEOLJİSİ

İzmir'in genel jeolojik yapısı incelendiğinde, en altta kireçtaşı bloklarının kumtaşı-şeyl karmaşığı matriksi içerisinde bulunduğu Geç Kretase-Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı bulunmaktadır. İzmir-Ankara Zonu olarak da adlandırılan bu formasyon üzerine, Neojen yaşlı tortul ve volkanik kayalar uyumsuz olarak gelir (Erdoğan, 1990). En üstte ise Kuvaterner yaşlı gevşek taşlaşmamış iri taneli ve ince taneli zeminlerden oluşan alüvyonal tortullar gelir.

Neojen Yaşlı Tortullar (Nkt)

Neojen yaşlı gölsel tortullar, alttan üste doğru çakıltası, kumtaşı, silttaşı, kıltaşı, marn/killi kireçtaşları ve kireçtaşlarından oluşur. Kırıntılı ve kimyasal tortul kayaların üzerini andezitik ve dasitik bileşimli volkanik birimler örterek, alanda yüksek topoğrafya oluştururlar. Orta Miyosen'de ortaya çıkan bölgesel tektonizmanın etkisiyle graben-horst yapıları oluşmuştur. (Erdoğan, 1990).

Yamanlar Volkanitleri (Nyv)

İnceleme alanının kuzeyinde büyük bir yayılım gösteren Neojen yaşlı andezitik ve dasitik karakterdeki Yamanlar Volkanitleri Çiğli ve Karşıyaka'nın kuzey alanlarında yaygın olarak yüzlek verir.

Alüvyonal Tortullar (Qalv, Qym)

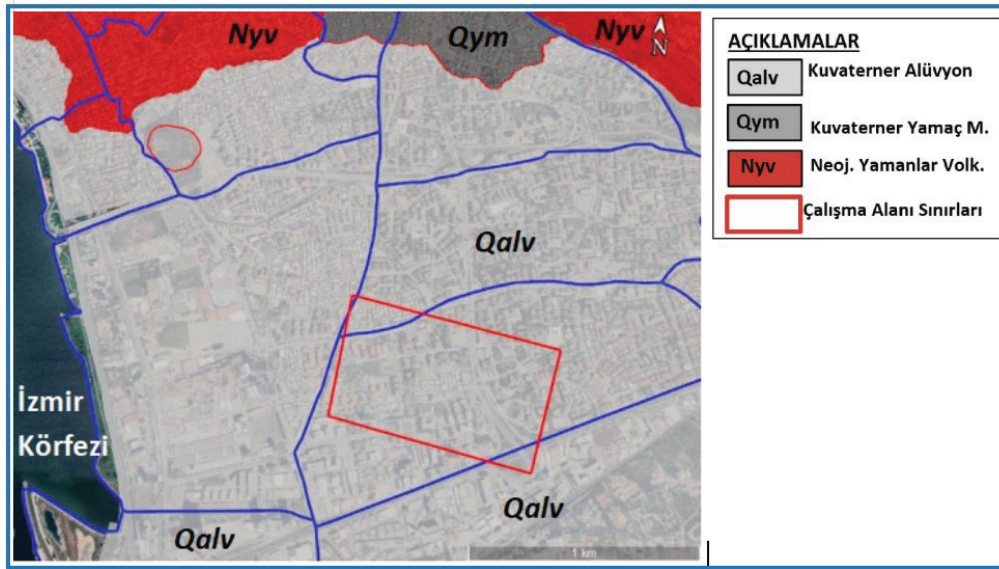
Çalışma alanında ana birim olan alüvyonal tortulların (Qalv) yerleşiminde İzmir Körfezi'nin oluşumu önem taşır. Körfez Orta Pleistosen'de eğim atımlı faylarla çöküntü havzası şeklinde oluşmuş, Gediz Deltası'nın Pleistosen'deki hareketi ile bugünkü halini almıştır (Başoğlu, 1975). Gediz deltası'nın üst seviyelerinde kumlu zeminler çok gevşek, derinlere doğru gevşek ve orta sıkılıklar sunarken killi zeminler çok yumuşak ve yumuşak kıvam durumu göstermektedir. Çakıllar ise genellikle andezit ve aglomera bileşimlidir. Bu bölgede yeraltı suyu seviyesi çok yüksektir. İzmir körfezinin doğusunu oluşturan düzlüklerde Bornova Çayı, Manda Çayı, Kocaçay Deresi ve Arap Deresi'nin alüvyonları mevcuttur (Şekil 2).

BÖLGENİN YAPISAL JEOLJİSİ

Batı Anadolu'nun tektoniği K-G yönlü açılmalı Neotektonizmanın bir sonucudur. Genel olarak bölgede bu açılmadan kaynaklı horst ve graben yapıları bulunmaktadır. Büyük Menderes ve Gediz Grabenleri bölgedeki en büyük tektonik yapılarıdır. İzmir merkezi, Gediz Grabeni'nin D-B yönlü tektonik bir çöküntü olan İzmir Körfezi ile çevrelenir. MTA tarafından bölgede yapılan araştırmalarda 13 adet aktif fay belirlenmiştir (Emre vd., 2005). Ancak alanda kuzeyden geçen Bornova Fayı ve güneyde yer alan İzmir Fayı'ndan söz etmek gerekir (Şekil 3).

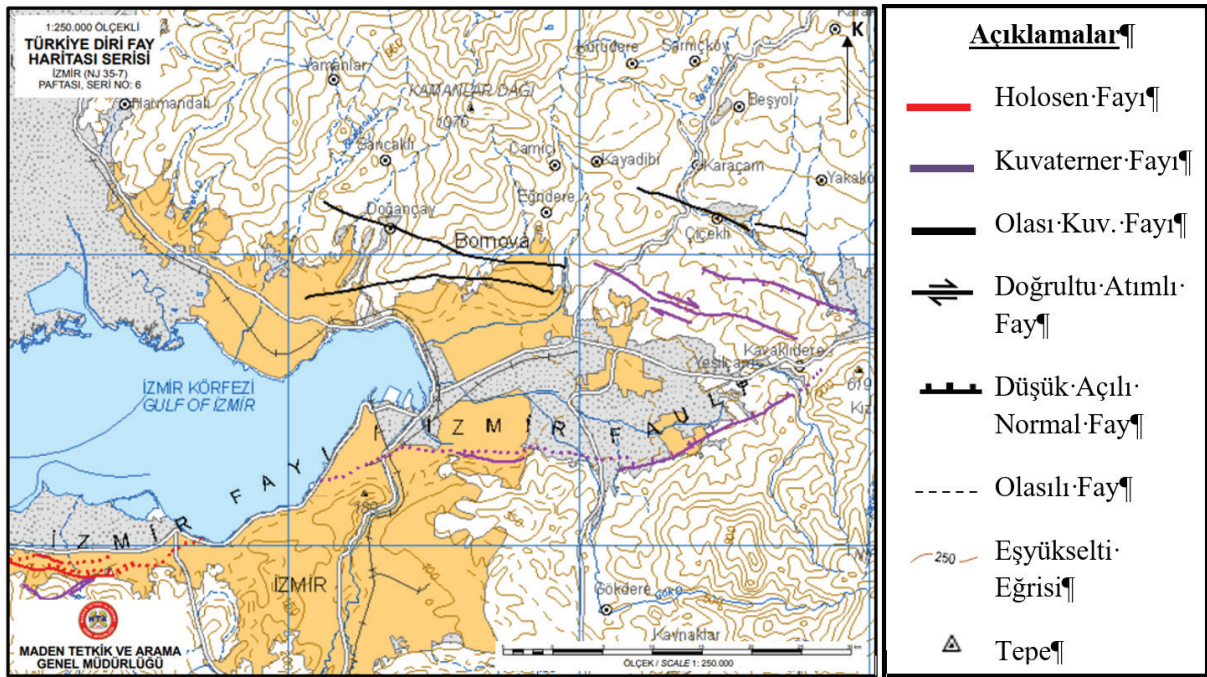
Bornova Fayı

Bornova Fayı, İzmir'in kuzeydoğusundaki Kemalpaşa ile Karşıyaka arasında uzanan KB-GD doğrultulu birbirine paralel iki faydan oluşmaktadır. Fayın batı kesimi Miyosen yaşlı Yamanlar Volkanitini keserken, doğuda yer alan bölümü Mesozoyik yaşlı temel kayalar ile Miyosen çökel kayaları keser. (Emre vd., 2005).



Şekil 2. İnceleme alanı ve yakın çevresinin genel jeolojisi (Kıncal, 2005’den değiştirilerek).

Figure 2. General Geology of the Study Area and Surroundings (Adapted from Kincal, 2005).



Şekil 3. İzmir ve Çevresindeki Aktif Fay Sistemleri (Emre vd., 2011’den değiştirilerek).

Figure 3. Active Fault System in İzmir and surroundings (Adapted from Emre et al., 2011)

İzmir Fayı

İzmir Fayı, İzmir Körfezi'ni güneyden denetleyen, D-B uzanımlı bir faydır. Fayın kuzey bloğunda yer alan Karaburun ve Bayraklı arasındaki bölüm deniz altında devam eder ve körfezin tabanını şekillendirir. Güzelbahçe ve Pınarbaşı arasında eğim atımlı normal fay niteliğinde olan İzmir Fayı, batı kesiminde Balçova ve Narlıdere olmak üzere iki segmente ayrılır. Araştırmalar neticesinde Holosen'de fayın aktif olduğu ve büyük depremlere kaynak oluşturabileceği görüşü hakimdir (Emre vd., 2005). İnceleme alanının kuzeyinde Bornova Fayı, güneyinde de İzmir Fayı bulunmaktadır.

30 EKİM SİSAM DEPREMİ ve BÖLGEDEKİ SONUÇLARI

İlk aşamada 30 Ekim Sisam Depremi' nin İzmir ve inceleme alanı üzerindeki etkilerini irdelemek gerekir. Bilindiği gibi 30 Ekim 2020 tarihinde merkezi Sisam Adası'nın yaklaşık 8 km kuzeyinde, Kuşadası Körfezi açıklarında meydana gelmiştir. AFAD (2020) verilerine göre 14,9 km derinlikte ve 6,6 büyüklüğünde gerçekleşen deprem (DEÜ, 2020) birçok kıyı kesimde hissedilmiş, Seferihisar İlçesi Sığacık mevkiinde tsunamiye yol açarken, merkezden 70 km mesafedeki İzmir şehir merkezinde 7 binanın deprem anında olmak üzere 54 binanın yıkılmasına, 40 adet acil yıkılacak bina, 676 adet ağır hasarlı yapının oluşmasına sebep olmuş ve deprem anında ve sonrasında 117 kişinin hayatını kaybetmesiyle sonuçlanmıştır (Yılmaz ve Şengöçmen, 2021). Depremden en çok etkilenen alan yıkımın ve kaybın en fazla olduğu Bayraklı İlçesine bağlı Adalet, Mansuroğlu ve Manavkuyu Mahalleleridir.

Makalede Mansuroğlu Mahallesi içerisindeki inceleme alanında deprem anında yıkılan iki bina, 36 kişinin hayatını kaybettiği Rıza Bey Apartmanı ve 30 kişinin öldüğü Emrah Bey Apartmanı da yer almaktadır.

YÖNTEMLER

SPT-N Düzeltmeleri

Sahada ASTM D1586'ya uygun olarak yapılan Standart Penetrasyon Deneyleri sonuçları üzerinde Robertson ve Wride (1998) (Çizelge 1)'in önerdiği derinlik, numune alıcı, sondaj çapı, enerji ve Liao ve Whitman (1986) (2) tarafından önerilen efektif gerilim düzeltmeleri ile Terzaghi ve Peck (1948) (3)'in yer altı suyu tabakası üstünde yer alan siltli kumlu zeminler için önerdiği düzeltmeler uygulanarak aşağıdaki $N'_{1,60}$ değerleri hesaplanmıştır (1).

$$N_{1,60} = N_{\text{arazi}} \cdot C_N \cdot C_R \cdot C_B \cdot C_E \cdot C_S, \text{ (Robertson ve Wride, 1998) , (TBDY, 2018) (1)}$$

C_R , Derinlik Düzeltme Katsayısı; C_S , Numune Alıcı Düz. Katsayısı C_B , Sondaj Çapı Düzeltme Katsayısı C_E , Enerji Düzeltme Katsayısı aşağıdaki çizelgeden karşılaştırma değerine göre bulunur.

Çizelge 1. SPT-N Düzeltmeleri için Abak (Robertson ve Wride, 1998)

Table 1. SPT-N Corrections (Robertson and Wride, 1998)

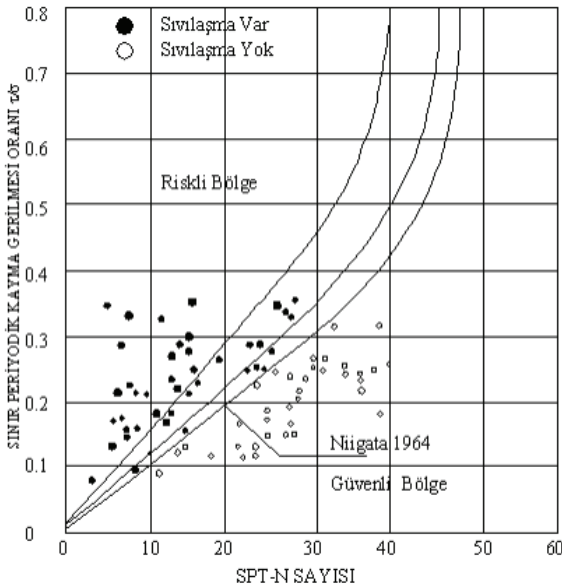
Düz. Kat.	Değişken	Değer
C_R	3m – 4m Aralığında	0,75
	4m – 6m Aralığında	0,85
	6m – 10m Aralığında	0,95
	10m'den daha derin	1,00
	Standart Numune Alıcı (iç tüpü olan)	1,00
C_S	İç Tüpü Olmayan	1,10-1,30
	Çap 65mm-115mm Ar.	1,00
C_B	Çap 150mm	1,05
	Çap 200mm	1,15
	Güvenli Tokmak	0,60-1,17
C_E	Halkalı Tokmak	0,45-1,00
	Otomatik Darbeli Tok.	0,90-1,60

C_N , Efektif Gerilim Düzeltme Katsayısı (Liao ve Whitman, 1986) için formül aşağıdadır (JMO, 2021). TBDY (2018)' de de yer alan bu formül killi zeminler için kullanılmamaktadır (Farrar ve Chitwood, 1999).

$$C_N = 9,78 \sqrt{\frac{1}{\gamma_v}} ; \gamma_v = \text{Effektif Gerilim (kg/cm}^2\text{)} \quad (2)$$

Sıvılaşma Güvenlik Faktörü (FS) ve Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)

Seed ve Idriss (1971), Niigata'da yaptıkları araştırmalar sonucunda bölgedeki birçok binada gözlemlenen devrilme, oturma ve yanal yatmaların, temel altlarında meydana gelen sıvılaşmadan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar deprem sonrasında yatayda meydana gelen kayma gerilmesinin, deprem öncesi düşey efektif gerilmeye oranının kumlu birimlerde sıvılaşmayı karakterize eden bir özellik olduğunu ispat etmişlerdir (Şekil 4).



Şekil 4. Niigata (1964) Deprem Sonuçlarının Sıvılaşma Açısından İrdelenmesi (Seed ve Idriss, 1971).

Figure 4. Analysis of Niigata (1964) Earthquake Results in terms of Liquefaction (Seed and Idriss, 1971).

Burada Güvenlik Faktörü (FS), Zeminden Kaynaklı Çevrimsel Gerilme Oranı'nın ($CRR_{7.5}$), Depremden Kaynaklı Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR)'na oranıdır ⁽³⁾. Zeminden

Kaynaklı Çevrimsel Direnç Oranı $CRR_{7.5}$, 7,5 büyüklüğündeki deprem için SPT değerine bağlı olarak değişen zeminin sıvılaşma direncidir. ⁽⁴⁾ (Seed ve Idriss, 1971).

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \quad (3)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - N_{1.60}} + \frac{N_{1.60}}{135} + \frac{50}{(10 * N_{1.60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (4).$$

Burada $N_{1.60}$, SPT-N Düzeltmeleri bölümünde açıklanan arazi N_{30} SPT-N değerleri üzerindeki düzeltmeler sonrası hesaplanan düzeltilmiş SPT-N değerleridir. Youd vd. (2001) tarafından siltli ve kumlu zeminlerde düzeltme sonrası 30 darbe üzeri zeminler «Sıvılaşamaz» olarak kabul edilir ve hesaplama dışında kalır.

Depremden Kaynaklı Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR), zemin kesitinde bir deprem esnasında oluşacak tekrarlı/devrimsel/periodyk kayma gerilmeleri oranıdır (5) (Seed ve Idriss, 1971).

$$CSR = 0,65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{v}{\gamma_v} \cdot r_d \quad (5)$$

a_{max} , g cinsinden en büyük yatay ivme değeri, (analizlerde 0.3g alınmıştır.)

γ_v , incelenen derinlikteki toplam düşey gerilmeyi,

γ'_v , incelenen derinlikteki efektif düşey gerilmeyi,

r_d , derinliğe bağlı gerilim düzeltme faktörünü belirtir (Liao ve Whitman, 1986).

Burada, $r_d = 1 - 0,00765 * z$ (Eğer $z \leq 9,15m$ ise)

$r_d = 1,174 - 0,0267 * z$ (Eğer $9,15 \leq z \leq 23m$ ise)

Seed ve Idriss (1971), tarafından önerilen eşitlik 7,5 büyüklüğündeki depremler için geçerliydi. Youd vd. (2001) tarafından, diğer büyüklükler için geçerli olmak üzere Magnitüd Ölçeklendirme Faktörü (Magnitud Scale Factor - MSF) formüle eklenmiştir. ⁽⁶⁾.

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (6)$$

FS değeri 1' den büyük ise «sıvılaşmaz», 1' den küçük ise «sıvılaşabilir» kabul edilmiştir (Seed ve Idriss, 1971), Ancak daha sonra Seed ve Idriss (1982) tarafından yapılan çalışmalarda, FS' nin kabul edilebilir değeri 1,25-1,5 olarak verilmiştir. Bu sebeple Iwasaki vd. (1982) tarafından Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (Liquefaction Potential Index-LPI) (7) geliştirilmiştir.

$$LPI = \int FS(z).w(z).dz \quad (7)$$

Iwasaki vd. (1982)' göre: FS(z)=0 (eğer FS ≥ 1.0) ve FS (z)= 1 – FS (eğer FS<1.0 ise)

w(z) , Sıvılaşma Potansiyeli Düzeltme Faktörü

z (derinlik) <20m ise w(z) = 10 – 0.5z ve z (derinlik) ≥ 20 m ise w(z) = 0 alınır.

Sönmez (2003) daha sonra formülü revize etmiştir. Buna göre;

FS ≥ 1,2 ise FS(z)=0 ;

1,2 > FS > 0,95 ise FS (z)= 2. 106e-18,427 ;

FS < 0,95 ise FS(z)= 1-FS alınır.

LPI Değerlerine göre sıvılaşma dereceleri Çizelge 2'de verilmiştir.

HESAPLAMALAR

Bu makale kapsamında kullanılan veriler söz konusu alanda Zem-Son Ltd. Şti. tarafından 2021

tarihinde yapılan İmara Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu'ndan yazılı izin alınarak kullanılmıştır.

Çizelge 2. Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) Değerine göre Sıvılaşma Dereceleri.

Table 2. Liquefaction Degree based on Liquefaction Potential Index (LPI) values.

LPI Değeri	Sıvılaşma Der.
0	Sıvılaşmaz
0 < LPI ≤ 2	Düşük
2 < LPI ≤ 5	Orta
5 < LPI ≤ 15	Yüksek
LPI > 15	Çok Yüksek

SONDAJ LOKASYONLARI

Bu çalışma kapsamında 30 Ekim 2020 Sisam Depremi'nden en çok etkilenen ve kaybın en fazla olduğu İzmir İli Bayraklı İlçesi Mansuroğlu Mahallesi içerisindeki TS EN ISO 22475-1 (2021)'e göre yapılan sondajlardan alınan değerler kullanılmıştır (Çizelge 3).

Zemin Sınıflaması

İlgili lokasyonlarda yapılan sondajlara ait numuneler TS EN 14688-2 (2018)'e göre değerlendirilmiş ve sıvılaşma eğilimi gösteren birimler ilgili derinlikler için Çizelge 4'e işlenmiştir. Youd vd. (2001)'e göre 20 m'nin altında sıvılaşma kabul edilmediğinden sıvılaşma hesaplamalarında 20 m baz alınmıştır. SK-16 nolu sondajda direkt kaya birime girildiğinden hesaplamalara dahil edilmemiştir.

Çizelge 3. İnceleme Alanında Açılan Sondajlara Ait Lokasyon Bilgileri.

Table 3. Locations of Boreholes Drilled in the Study Area.

Sondaj NO	X(m)	Y (m)	Sondaj Tarihi	Derinlik (m)	Sondaj No	X(m)	Y(m)	Sondaj Tarihi	Derinlik (m)
SK-1	515858,71	4256263,20	16.08.21	20,00	SK-9	516133,51	4256033,40	06.08.21	30,50
SK-2	515903,77	4256405,57	19.08.21	30,50	SK-10	516304,36	4256158,51	14.08.21	20,00
SK-3	516057,34	4256403,21	21.08.21	20,00	SK-11	516380,73	4256203,76	14.08.21	20,00
SK-4	516640,87	4256457,95	16.08.21	20,00	SK-12	516560,48	4256322,02	17.08.21	20,00
SK-5	516314,10	4256445,00	17.08.21	20,00	SK-13	516798,62	4256358,71	26.08.21	20,00
SK-6	516286,73	4256318,93	14.08.21	20,00	SK-14	516607,30	4256136,52	05.08.21	30,50
SK-7	515949,05	4256254,17	14.08.21	20,00	SK-15	516426,29	4255995,45	28.08.21	20,00
SK-8	515828,89	4256060,05	27.08.21	20,00	SK-16	516241,74	4255978,20	30.09.21	20,00

Çizelge 4. TS EN 14688'e göre sondajlardan elde edilen birimlerin sınıflandırılması.

Table 4. Classification of soils taken from boreholes based on TS EN 14688.

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SK-5	SK-6	SK-7	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	siSA	siSA	siSA			siSA			siSA	clSA	siSA				clSA
6.00	siL	siL				siL			siSA			clSA			clSA
7.50	siSA	siL	siSA					clSA	siSA	siL					clSA
9.00		siL			clSA			clSA	siSA	siL		siSA	siGr		siSA
10.50		siL			clSA			clSA	siSA			siSA	siSA		siSA
12.00								clSA				siL			siSA
13.50											siSA	siSA		siSA	siSA
15.00									siSA		siSA	clSA		siL	
16.50										siSA				siSA	
18.00								clSA				siL		siSA	clSA
19.50										siSA				siSA	

Çizelge 5. SPT-N Düzeltilmiş Değerleri.

Table 5. Corrected SPT-N Values.

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-5	SK-6	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	17	3	15		18		18	7	8				5
6.00	10	2			12		14			9			5
7.50	8	12	13			11	8	2					4
9.00		2		11		5	6	10		14	19		3
10.50		7		8		4				14	11		3
12.00						7				12			7
13.50									13	17		13	8
15.00							10		10	11		4	
16.50								7				6	
18.00						10				14		4	9
19.50								7				8	

Arazi SPT-N Düzeltmeleri

Çizelge 3'te belirtilen derinliklerde ASTM D1586 (2022)'e uygun olarak yapılmış Standart Penetrasyon Testi'ne ait düzeltilmemiş SPT-N₃₀ değerleri üzerinde yukarıda anlatılan düzeltme formülleri uygulanmış ve düzeltilmiş N_{1.60} değerleri aşağıdaki Çizelge 5'te verilmiştir.

Sıvılaşma Güvenlik Faktörü (FS) Hesaplanması

Yukarıdaki bölümlerde açıklanan yöntemle göre Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya atılan ve Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen formül aşağıda verilmiştir.

Depremden kaynaklı çevrimsel gerilme oranı, $CRR_{7.5}$, Arazi SPT-N Düzeltmeleri başlığı altında belirtilen değerlere göre hesaplanmış Çizelge 6'da özetlenmiştir. Zeminden kaynaklı çevrimsel gerilme oranı, CSR, hesabında a_{max} , AFAD'ın (2024) interaktif deprem haritasından 0.30 g alınmıştır. Sondajlardaki yer altı suyu seviyeleri ve birim hacim ağırlıkları baz alınarak CSR hesaplanmış ve Çizelge 7'de verilmiştir. Magnitüd Ölçeklendirme Faktörü, Magnitud Scale Factor, bölgedeki en büyük depremler baz alınarak 7 büyüklüğüne göre 1.193 bulunmuştur. Buna göre hesaplanan derinliklere göre sıvılaşma güvenlik faktörü (Factor of Safety for Liquefaction) değerleri, Çizelge 8'de verilmiştir.

Tablo 6. Arazi Depremden Kaynaklı Çevrimsel Gerilme Oranı ($CRR_{7.5}$) Değerleri.

Table 6. Cyclic Resistance Ratio ($CRR_{7.5}$) Values for Liquefaction.

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-5	SK-6	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	0.18	0.06	0.16		0.19		0.19	0.09	0.09				0.08
6.00	0.11	0.05			0.13		0.15			0.11			0.07
7.50	0.10	0.13	0.14			0.13	0.10	0.06					0.06
9.00		0.05		0.09		0.07	0.08	0.11		0.15	0.20		0.06
10.50		0.09		0.09		0.07				0.15	0.12		0.06
12.00						0.09				0.13			0.09
13.50									0.14	0.18		0.14	0.09
15.00							0.11		0.12	0.12		0.07	
16.50								0.09				0.08	
18.00					0.12					0.15		0.06	0.10
19.50								0.09				0.09	

Çizelge 7. Arazi Zeminden Kaynaklı Çevrimsel Gerilme Oranı (CSR) Değerleri.

Table 7. Cyclic Stress Ratio (CSR) Values for Liquefaction.

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-5	SK-6	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	0.21	0.20	0.21		0.19		0.19	0.20	0.21				0.19
6.00	0.24	0.23			0.22		0.22			0.24			0.19
7.50	0.26	0.25	0.25			0.18	0.23	0.25					0.20
9.00		0.26		0.24		0.18	0.25	0.26		0.27	0.24		0.21
10.50		0.27		0.25		0.18				0.28	0.25		0.23
12.00						0.19				0.29			0.23
13.50									0.29	0.29		0.25	0.24
15.00							0.28		0.29	0.29		0.26	
16.50								0.29				0.26	
18.00					0.21					0.30		0.26	0.25
19.50								0.29				0.26	

Çizelge 8. Arazi Sıvılaşma Güvenlik Faktörü (FS) Değerleri.

Table 8. Factor of Safety (FS) Values for Liquefaction.

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-5	SK-6	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	1.00	0.34	0.91		1.19		1.00	0.50	0.53				0.48
6.00	0.56	0.27			0.72		0.81			0.51			0.45
7.50	0.46	0.61	0.67			0.81	0.49	0.27					0.38
9.00		0.23		0.47		0.48	0.39	0.52		0.64	0.99		0.32
10.50		0.40		0.45		0.44				0.65	0.58		0.30
12.00						0.55				0.55			0.45
13.50									0.58	0.74		0.68	0.46
15.00							0.47		0.48	0.50		0.31	
16.50								0.38				0.39	
18.00					0.65					0.61		0.30	0.49
19.50								0.67				0.43	

Çizelge 9. Sıvılaşma Potansiyel İndeksi -LPI Değerleri**Table 9.** Liquefaction Potential Index Values (LPI)

Der. (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-5	SK-6	SK-8	SK-9	SK-10	SK-11	SK-12	SK-13	SK-14	SK-15
4.50	0.00	7.68	1.00		0.00		0.00	5.85	5.43				6.03
6.00	4.61	7.65			2.93		1.97			5.09			5.76
7.50	5.04	3.62	3.09			1.74	4.80	6.88					5.84
9.00		6.31		3.16		4.26	5.07	3.95		3.00	0.12		5.62
10.50		4.26		3.92		3.98				2.50	2.98		4.99
12.00						2.67				2.68			3.30
13.50									2.04	1.24		1.54	2.84
15.00							1.98		1.94	1.87		2.58	
16.50								1.63				1.61	
18.00						0.53				0.59		1.06	0.76
19.50								0.24				0.22	
Toplam LPI	9.64	29.53	4.09	7.08	2.93	13.18	13.82	18.55	9.41	16.99	3.11	7.00	35.14

Çizelge 8’deki değerlerin tamamı Seed ve Idriss (1982)’de açıkladığı kabul edilebilir değerlerin altında ve “sıvılaşabilir” olarak kabul edilmesine karşın sonrasında Iwasaki vd. (1982) tarafından geliştirilen Sıvılaşma Potansiyel İndeksi -LPI, hesaplamasında farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) Hesaplaması

Sıvılaşma Güvenlik Faktörü (FS) ve Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) bölümünde Seed ve Idriss (1982) tarafından geliştirilmiş olan Sıvılaşma Faktörü (FS) yöntemine karşın Iwasaki vd. (1982) tarafından ortaya atılan ve sonrasında Sönmez (2003) tarafından geliştirilen Sıvılaşma Potansiyel İndeksi -LPI, Sıvılaşma Faktörü (FS) değerleri üzerinde uygulanmış ve Çizelge 9’deki değerler bulunmuştur.

Bu değerler Çizelge 2’de verilen Sıvılaşma Potansiyel İndeksi karşılaştırma tablosuna göre değerlendirildiğinde çalışma kapsamındaki sondaj noktalarından 4 tanesi “Çok Yüksek” kabul edilen 15’ in üstünde çıktığı görülmüştür.

SONUÇLAR

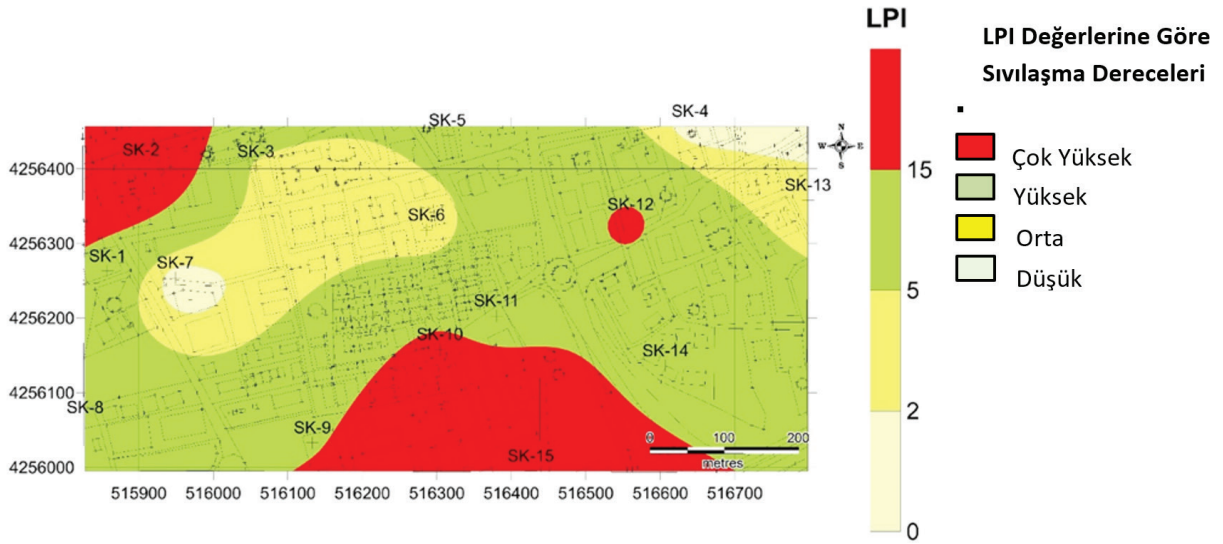
Bornova havzasını kuzeyde Bornova Fayı ile Neojen yaşlı Yamanlar Volkanitleri sınırlarken güneyde ise İzmir Fayı ile Neojen Kireçtaşları sınır oluşturmaktadır. Geç Miyosen’de oluşan graben sisteminin parçası olan bu iki fay etkisiyle havza yükselmeye başlamış, Kuvaterner boyunca Gediz Nehri’nin getirdiği alüvyonlar ile dolmuştur (Karadaş ve Öner, 2021). AFAD (2020) verilerine göre deprem anında Seferihisar merkezinde ivmeölçerler tarafından 0050g olarak kaydedilen ivme, Bayraklı merkezinde 0.108g olarak kaydedilmiştir. Bunun başlıca sebebi Seferihisar ve Bornova İlçeleri arasında yer alan alüvyon birimlerinin yüksek zemin büyütme katsayılarıdır. Alüvyon zeminde ilerleyen deprem dalgalarının enerji düzeyi kaya zemine geçtiklerinde 25/1000’ düşer ve bu azalma kaya içerisinde ilerlerken devam eder (Yılmaz vd., 2022). Özellikle Sisam Depremi sonrası İzmir genelinde yapılaşmanın ovoidan dağlık bölgelere kaymasının sebebi, bu sonucun bölgede yaşayanlar tarafından bizzat tespit edilerek konut taleplerinin değişmesidir.

Yerinde kentsel dönüşüm projeleri yapılırken, özellikle Sisam Depremi’nin yıkıcı etkilerinin yoğun yaşandığı İzmir İli Bornova, Bayraklı

gibi ilçelerde mevcut zemin koşulları dikkatli bir şekilde incelenmeli, yapı tasarımında depremin zemin üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır. Bunlardan en önemlisi yapı üzerindeki yıkıcı etkisi sebebiyle mevcut zeminin sıvılaşma potansiyelidir.

Çalışma kapsamında bu amaçla Depremın yıkıcı etkisinin en yüksek olduğu ve en yüksek can kaybının yaşandığı Bayraklı İlçesi Mansuroğlu Mahallesi içerisinde yer alan çalışma alanının, bölgede açılan sondajlardan elde edilen veriler

ışığında Seed ve İdriss (1971) yöntemine göre sıvılaşma potansiyeli incelenmiştir. Bu bağlamda söz konusu alan için hesaplanan Sıvılaşma İndeksi -LPI değerleri kullanılarak haritalama yapıldığında 30 Ekim 2020 Sisam Depremi'nde yıkılan Emrah Apartmanı ve Rızabey Apartmanı lokasyonlarında değerlerin çok yüksek çıktığı, bu yıkımların nedenleri arasında sıvılaşmanın da diğer yöntemler ile karşılaştırılarak detaylı incelenmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI) Değerlerine Göre Arazi Zonlama Haritası

Figure 5. Zoning Map of Liquefaction Potential Index (LPI) Values

KATKI BELİRTME

Çalışma alanında yer alan birimlere ait jeoteknik verilerin elde edilmesi hususunda yaptıkları sondajlara ait logları paylaşarak destek sağlayan Zem-Son Limited Şirketi çalışanlarına ve yöneticilerine ayrıca bilgi ve tecrübelerini paylaşan Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Geoteknik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Prof. Dr. Alper SEZER'e teşekkür ederiz.

ORCID

Ekin KIRAN <https://orcid.org/0009-0000-6688-4599>

Cem KINCAL <https://orcid.org/0000-0002-3279-4170>

EXTENDED SUMMARY

Disasters continue to occur linked to continental plate tectonics, while the kind of disaster varies according to the region in which it occurs. Turkey

has a special place due to containing the active fault zones of the North Anatolian Fault Zone and East Anatolian Fault Zones. There is an expansion between the two zones and horst-graben systems have developed in the Aegean Region in this way. These systems cause many earthquakes and many faults, which have been researched by scientists. İzmir is the city most affected in the Aegean region.

Liquefaction, which was named firstly by Hazen in 1920, entered the scientific literature after the explanation of outcomes of the Niigata and Alaska Earthquakes as being due to liquefaction by Seed and Idriss in 1967. This term was demonstrated much more clearly after the Kocaeli Earthquake in 1999. Many collapsed and overturned buildings were observed and these were explained by liquefaction due to the fine-grained soil on the coast of the bay.

Another remarkable earthquake was recorded on October 30th, 2020 between Samos Island/ Greece and Kusadasi Bay/Turkey. It was recorded as 6.9 magnitude, 23 km from Seferihisar/Izmir town centre and at 16.9 km depth. The lowest degree tsunami occurred along the Seferihisar seaside. But the biggest damage was observed 70 km from the epicentre of the earthquake, in Bornova Basin which is filled with Gediz River deposits. After the 15 s earthquake, 6 buildings were demolished soon after the earthquake and 54 later. In total, 117 people died because this earthquake. Adalet, Mansuroglu and Manavkuyu towns were the most affected areas in İzmir. Most of them were constructed before the Building Earthquake Regulation, 2018, which made soil investigation reports mandatory before static design and also enforced new construction techniques such as geotechnical improvements for foundations, ready-mixed concrete, and reinforced steel.

This article was based on the analysis of building damage and causes of demolition in this area using one of the liquefaction calculation methods. The method is based on the SPT-N

liquefaction method developed by Seed and Idriss (1967). After this analysis, the liquefaction potential index (LPI) values were observed to be higher under two buildings demolished by this earthquake.

KAYNAKÇA / REFERENCES

- AFAD (2020). 30 Ekim 2020 Sisam Adası (İzmir Seferihisar Açıkları) Mw 6.6 Depremi Raporu, Afet ve Acil Durum Dairesi Başkanlığı.
- AFAD (2024). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>. Afet ve Acil Durum Dairesi Başkanlığı.
- ASTM D1586 (2022). *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. American Society for Testing and Materials.
- Başoğlu, Ş. (1975). İzmir İç Körfezinin Hidrografisi ve Sedimentolojisi [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. E.Ü.D.B.E., İzmir.
- DEÜ (2020). 30 Ekim 2020 Sisam (Samos) Depremi (Mw. 6.9) Değerlendirme Raporu. Dokuz Eylül Üniversitesi Deprem Araştırma ve Uygulama Merkezi, İzmir.
- Dobry, R., Powell, D.J., Yokel, F. Y. & Ladd, R. S. (1981). Geotechnical aspect. liquefaction potential of saturated sand– the stiffness method. *Proceeding of the Seventh world Conference on Earthquake Engineering*, Istanbul, Turkey.
- Emre, Ö., Özalp, S. ve Duman, T. Y. (2011). *1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, İzmir (NJ35-7) Paftası, Seri No:6*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Emre, Ö., Özalp, S., Doğan, A., Özaksoy, V., Yıldırım, C. ve Göktaş, F. (2005), İzmir ve Yakın Çevresinin Diri Fayları ve Deprem Potansiyelleri, (Rapor No 10754). Maden Teknik Arama Jeolojik Etüdler Dairesi.
- Erdoğan, B. (1990). İzmir-Ankara zonunun İzmir ile Seferihisar arasındaki bölgede stratigrafik özellikleri ve tektonik evrimi. *TPJD Bülteni*, 2(1), 1-20.

- Farrar, J. A. & Chitwood, D. (1999). *CME Automatic Hammer Operations*. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Earth Sciences and Research Laboratory, Dam Safety Office, DSO-99-03.
- Hazen, A. (1920). Hydraulic fill of dams. *ASCE Transactions*, 83, 1713-1745.
- Ishihara, K. & Koga, Y. (1981). Case Studies of Liquefaction in The 1964 Niigata Earthquake. *Soils and Foundation*, 21, (3), 35-52.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuo, F., Watanabe, S., Yasuda, S., Sato, H. (1992). *Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods*, Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation, Seattle, 1319-1330.
- JMO, (2021). *2018 Bina Deprem Yönetmeliği ile Uyumlu SPT-N Düzeltmesine İlişkin Hesap Cetveli Kullanım Klavuzu*, Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.
- Karadaş, A. ve Öner, E. (2021). 30 Ekim 2020 Sisam Depreminin İzmir-Bayraklı’ da Yol Açtığı Hasar Üzerinde Bornova Ovasının Alüvyal Jeomorfolojisinin Etkileri. *Coğrafya Dergisi*, 42, 139-153.
- Kıncal, C. (2005). İzmir İç Körfezi Çevresinde Yer Alan Birimlerin Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Uzaktan Algılama Teknikleri Kullanılarak Mühendislik Jeolojisi Açısından Değerlendirilmesi, [Doktora Tezi]. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Liao, S. S. C. & Whitman, R. V. (1986). *Overburden Correction Factors for SPT in Sand*, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 112(3), 373-377.
- Robertson, P. K., Wride, C. E. (1998), Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using Cone Penetration Test. *Canada Geotechnical Journal*, 35(3), 442-459.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1967). Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake. *JSMFD, ASCE*, 93(SM3), 83 – 108.
- Seed, H. B. & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(9), 1249-1273.
- Seed, H. B., Idriss, I.M, 1982, *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA, pp 134.
- Sönmez, H. (2003). Modification of the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegöl, Turkey). *Environmental Geology*, 44, 862-871.
- TBDY (2018), *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*.
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbeumechanik auf Badepysikalischer Goundlage*. Vienna, Deuticke.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1948). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley and Sons, New York, 664 pp.
- TS EN ISO 14688-2 (2018), *Geoteknik etüt ve deneyler - Zeminlerin tanımlanması ve sınıflanması - Bölüm 2: Sınıflandırma prensipleri*. Türk Standartları Enstitüsü
- TS EN ISO 22475-1 (2021). *Jeoteknik etüt ve deneyler - Numune alma yöntemleri ve yeraltı suyu ölçümleri - Bölüm 1: Zemin, kaya ve yeraltı suyundan numune alınmasındaki teknik prensipler*, Türk Standartları Enstitüsü
- Yılmaz, Ö. ve Şengöçmen, B. (2021). *30 Ekim 2020 Sisam Depremi ve İzmir’e Etkileri*, Türkiye Jeoloji Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Yayın no.141, 59 s.
- Yılmaz, İ., Yılmaz, Ö. ve Leventeli, Y. (2022). Depremler Kayada Yıkılmaz ve Ovalar Stratejik Ürün Kaynağıdır. *Geosound (Yerbilimleri) Dergisi*, 55(1), 165-189.
- 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, 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 NCEER/NSF workshops on evaluation

of liquefaction resistance of soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(4), 297-313.

Zem-Son, (2021). İzmir İli, Bayraklı İlçesi'nde Yaklaşık 455 Hektar Alanda 1/5000 Ölçekli Nazım İmar Planına Esas ve 1/1000 Ölçekli Uygulama İmar Planına Esas Mikrobölgeleme Etüt Raporu, 355 s.