

SIVILAŞMA RİSK HARİTALARI ve KARŞILAŞTIRILMASI: AFYONKARAHİSAR MERKEZİ ÖRNEĞİ

LIQUEFACTION RISK MAPS and COMPARISON: THE CASE OF AFYONKARAHİSAR CENTER

Engin NACAROĞLU¹, Selçuk TOPRAK², Eren ATAMAN³, Berk YAĞCIOĞLU⁴

ÖZET

Depremlerin yol açtığı zararların önemli bir kısmı zemin koşullarının doğru belirlenmemesi ve bu koşullara uygun önlemlerin alınmaması neticesinde oluşmaktadır. Geçmiş depremler incelendiğinde bu konunun önemi her defasında kanıtlanmakta ve gelecek depremler için ne yapılması konusuna ışık tutmaktadır. Yerel zemin koşullarının doğru şekilde belirlenmesi depremlerin hasar verici etkilerini azaltmada geoteknik açıdan belirleyici olmaktadır. Bunun için söz konusu bölgede standartlara uygun yapılan laboratuvar, arazi ve jeofizik deneylerden zemin özelliklerinin belirlenerek ilgili geoteknik hesapların yapılması gerekli ve zorunludur. Depremlerin yapılar üzerinde hasar oluşturan etkileri incelendiğinde sıvılaşma belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Zemin sıvılaşması neticesinde zeminde yanal yayılmalar ve yapılarda farklı etkiler gözlemlenmektedir. Örneğin, sıvılaşmanın gerçekleştiği bölgede bulunan yapılarda, yapının dayanımından bağımsız olarak zemin mukavemetinin kaybolması sonucu oturma, dönme, eğilme ve devrilme gibi olumsuz etkiler meydana gelmektedir. Bu çalışmada Afyonkarahisar ilinin belli bölgelerinde yapılmış standart penetrasyon testi (SPT) ve çeşitli laboratuvar deney sonuçlarından faydalanan sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) ve sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) hesaplanmıştır. Hesaplamalarda güncel sıvılaşma tetikleme yöntemleri kullanılmıştır. Hesaplanan sıvılaşma parametreleri yardımıyla sıvılaşma risk haritaları elde edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar ışığında, kullanılan farklı parametrelerin bölgede bulunan mevcut yapılar için risk değerlendirmeleri ve mikrobölgeleme açısından etkileri sunularak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deprem, sıvılaşma, mikrobölgeleme, coğrafi bilgi sistemleri

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Pamukkale Üniversitesi, enacaroglu@pau.edu.tr (Sorumlu yazar)

² Prof. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, stoprak@gtu.edu.tr

³ Lisansüstü Öğrenci, Pamukkale Üniversitesi, eataman16@posta.pau.edu.tr

⁴ Lisansüstü Öğrenci, Pamukkale Üniversitesi, byagcioglu13@posta.pau.edu.tr

ABSTRACT

A significant part of the damages caused by earthquakes is the result of not determining the ground conditions correctly and not taking appropriate measures for these conditions. When the damages in past earthquakes are examined, the importance of this issue is proven every time and it sheds light on what to do for future earthquakes. Accurate determination of local ground conditions is geotechnically decisive in reducing the damaging effects of earthquakes. For this, it is necessary and obligatory to determine the soil properties from the laboratory, field and geophysical tests carried out in accordance with the standards in the region of interest and to make the relevant geotechnical evaluations. When the damaging effects of earthquakes on structures are examined, liquefaction becomes prominent. As a result of soil liquefaction, lateral spreading on the ground and different effects on structures are observed. For example, in buildings located in the area where liquefaction occurs, adverse effects such as settlement, rotation, bending and overturning occur as a result of the loss of soil strength, regardless of the strength of the structure. In this study, liquefaction severity index (L_s) and liquefaction potential index (LPI) were calculated by using standard penetration test (SPT) and various laboratory test results in certain regions of Afyonkarahisar province. Current liquefaction triggering methods are used in the calculations. With the help of the calculated liquefaction parameters, liquefaction risk maps were obtained and comparisons were made. In the light of these comparisons, the effects of the different parameters used in terms of risk assessments and microzonation for existing structures in the region were presented and discussed.

Keywords: *Earthquake, liquefaction, microzonation, geographic information systems*

1. GİRİŞ

Doğal afetler nedeniyle milyonlarca insan hayatı etkilenmekte, çok sayıda can kaybı ve yaralanmalar meydana gelmektedir. İlave olarak maddi büyük kayıplar yaşanmaktadır. Depremler, en çok zarar veren doğal afetlerin başında gelmektedir. Türkiye de geçmişte deprem kaynaklı hasarlarla birçok kez karşı karşıya kalmıştır. 1999 Kocaeli (İzmit), 1999 Düzce, 2011 Van depremlerinde yapılan çalışmaların sonucunda bu hasarların temel sebeplerinden birinin zemin problemlerinden kaynaklandığı belirlenmiştir (ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi, 2011; Erdik, 2000). Özellikle yer altı su seviyesi yüksek, gevşek kohezyonsuz zeminlerin bulunduğu alanlardaki binaların taşıyıcı unsurlarında herhangi bir hasar olmaksızın zemin koşulları nedeniyle farklı oturmalar yaptığı, devrildiği, yan yattığı gözlenmiştir (Holzer vd., 2000). Bununla birlikte deprem kaynağına yakın olmasına rağmen uygun geoteknik araştırmalar ışığında gerekli iyileştirmeler yapılan zeminlerin üzerinde bulunan yapılarda, yetersiz zemin çalışmalarının gerçekleştirildiği yapılardaki gibi hasarlar oluşmamıştır (Manav vd., 2019). Bu çalışmada Afyonkarahisar şehir merkezinde belirli bir bölgede geoteknik deprem mühendisliğinin önemli konularından biri olan zemin sıvılaşması, hesaplanan farklı sıvılaşma katsayıları yardımıyla elde edilen risk haritalarının kullanılmasıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sıvılaşma, yeraltı su seviyesi altındaki kohezyonsuz veya düşük kohezyonlu tabakaların deprem etkisiyle boşluk suyu basıncındaki artışa bağlı olarak mukavemetinin büyük oranda azalması olarak tanımlanabilmektedir. 1964 yılında meydana gelen Niigata ve Büyük Alaska depremleri ile literatüre giren sıvılaşma ile ilgili birçok önemli çalışma bulunmaktadır (Seed ve Idriss, 1971;

Iwasaki vd., 1982; Youd vd., 2001; Toprak ve Holzer, 2003; Holzer vd., 2002; Cetin vd., 2004; Sonmez ve Gokceoglu, 2005; Boulanger ve Idriss, 2014; Toprak vd., 2019). Şekil 1’de gösterilen Christchurch ve Tohoku depremleri sonucu oluşan sivilaşmaya bağlı hasarlar, yakın geçmişte meydana gelen en çarpıcı örneklerdendir (Cubrinovski vd., 2011; Yamaguchi vd., 2011; Bray vd., 2013; Jinguuji ve Toprak, 2017; Toprak vd., 2018). Sivilaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde farklı yöntemler bulunurken, günümüzde Standart Penetrasyon Testi (SPT) ve Konik Penetrasyon Testi (CPT) arazi deneylerinden faydalanılarak sivilaşma potansiyelinin değerlendirilmesi, en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir.



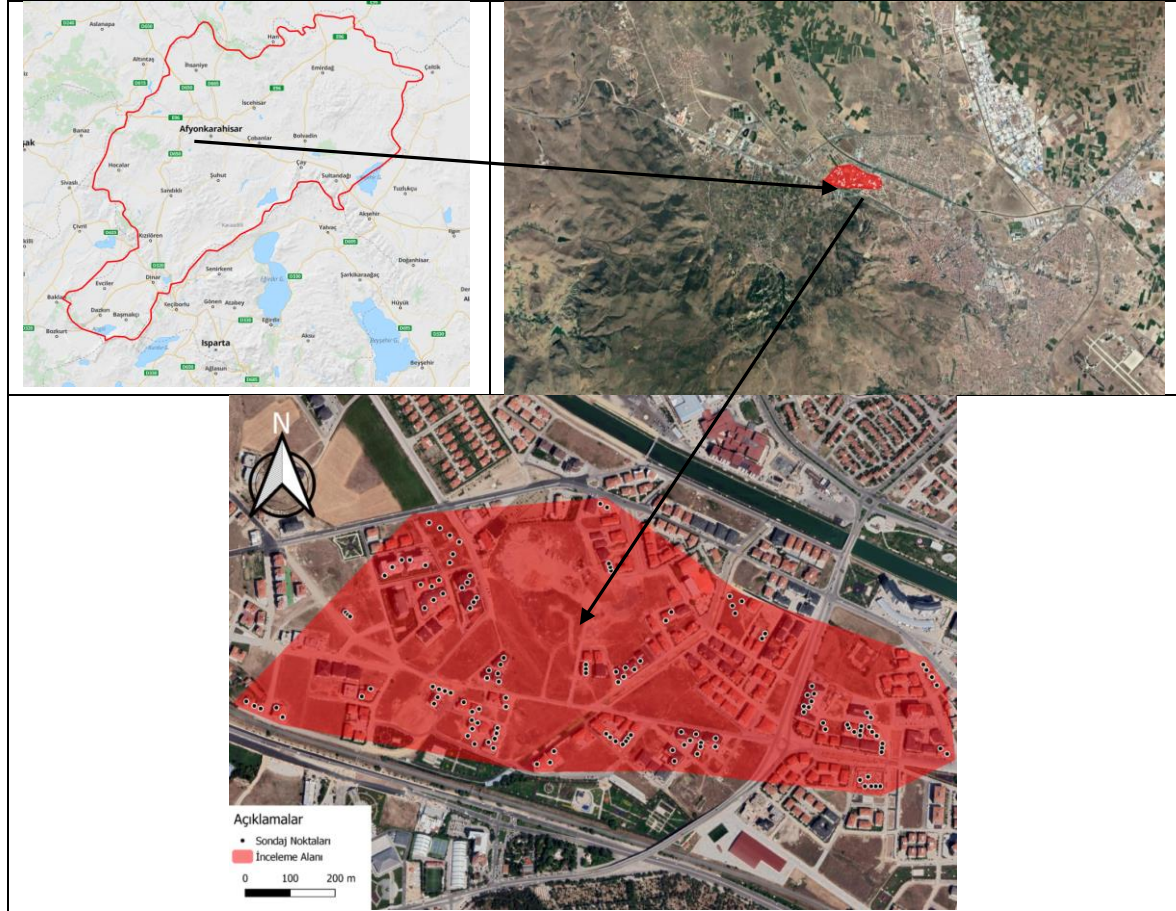
Şekil 1. Christchurch ve Tohoku depremlerinden kaynaklı sivilaşma örnekleri

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Çalışma Sahası ve Veriler

Çalışmada Afyonkarahisar Merkez İlçesi Selçuklu mahallesinde 2016-2021 yılları arasında yapılan 138 sondaj kuyusu verisinden yararlanılmıştır. Sondajların bulunduğu bölge 30° 30' ile 30° 41' doğu boylamları ve 38° 46' ile 38° 47' kuzey enlemleri içerisinde yaklaşık 0.66 km²'lik bir alanda yer almaktadır. Şekil 2’de çalışma sahası ve sondajlar verilmiştir. Sondajlarda derinlik boyunca her 1.5 m aralıkla SPT deneyleri uygulanmış, örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde üç eksenli basınç deneyi, kesme kutusu deneyi, doğal su içeriği, doğal birim hacim ağırlık, elek analizleri, kıvam limit, hidrometre ve konsolidasyon

deneyleri yapılmıştır. Sondajların büyük bir çoğunluğu (116 sondaj) 20 metre derinliğinde olup, 6 sondaj 15 m, 10 sondaj 25 m ve 6 sondaj 30 m derinliğindedir. Yer altı su seviyesi 3-6 metre arasında değişmektedir. Genel olarak inceleme alanında zemin profilinde 0-7 metre aralığında düşük ve yüksek plastisiteli kil bulunurken 7-20 metre aralığında ise killi kum ve siltli kum bulunmaktadır.



Şekil 1. İnceleme Alanı ve Sondajların Konumları

2.1. Sıvılaşma Analizleri

Literatürde farklı sıvılaşma potansiyeli belirleme yöntemleri bulunmaktadır. Çeşitli sıvılaşma parametreleri yardımıyla sıvılaşmanın değerlendirilmesi bu yöntemlerden biridir. Bu çalışmada kullanılan sıvılaşma indeksi (L_s) ve sıvılaşma potansiyeli katsayısı (LPI) parametreleri SPT'ye dayalı olarak hesaplanmıştır. Sıvılaşma tetikleme yöntemi olarak Boulanger ve Idriss (2014) kullanılmıştır. Sıvılaşma analizlerinde kullanılan deprem büyüklüğü ve en büyük yer ivmesi olarak 1 Ekim 1995 tarihli Dinar Depreminde ölçülen $M_w=6.5$ ve en büyük yatay yer ivmesi (a_{max}) $0.29g$ (Demirtaş, 1995), ile Utku vd. (2003)'e göre bölgede 100 yılda meydana gelebilecek maksimum büyüklük olan $M_w=7.3$ ve AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı (AFAD, 2018) tarafından oluşturulan deprem haritasına göre standart tasarım deprem yer hareketi olan DD-2 deprem yer hareketi düzeyine göre en büyük yatay yer ivmesi $0.33g$ kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Sıvılaşma analizlerinde SPT vuruş sayıları, ince dane içeriği, birim hacim ağırlıklar vb. geoteknik veriler kullanılmıştır.

Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_s)

Sonmez ve Gokceoglu (2005) tarafından önerilen sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.

$$L_s = \int_0^{20m} P_L(z) \cdot W(z) \cdot dz \quad (1)$$

$$F_L \leq 1.411 \text{ için ; } P_L = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_L}{0.96}\right)^{4.5}}$$

$$F_L > 1.411 \text{ için ; } P_L(z) = 0$$

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

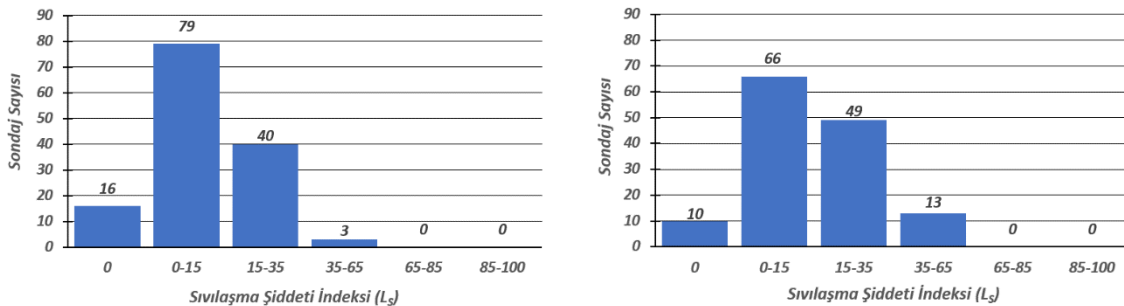
$$z \geq 20m \text{ için ; } W(z) = 0$$

P_L sıvılaşma olasılığı oranı, W ağırlıklı ortalama fonksiyonu, F_L sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, z zemin tabakasının orta noktasına metre cinsinden derinliğidir. Zeminlerin sıvılaşma riskinin sınıflandırılması hesaplanan sıvılaşma şiddeti indeksi Tablo 1’de verilmiştir (Sonmez ve Gokceoglu, 2005).

Tablo 1. Sıvılaşma riskinin L_s değerine göre sınıflandırılması (Sonmez ve Gokceoglu, 2005)

Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s)	Risk
0	Sıvılaşmaz
0 – 15	Çok düşük
15 – 35	Düşük
35 – 65	Orta
65 – 85	Yüksek
85 – 100	Çok Yüksek

Şekil 2’de farklı iki deprem durumu için ($M_w=6.5-a_{max}=0.29g$ ve $M_w=7.3-a_{max}=0.33g$) her bir sondajda hesaplanmış L_s değerlerinin dağılımı verilmiştir. L_s parametresine göre sondajlar incelendiğinde birinci deprem durumunda ($M_w=6.5-a_{max}=0.29g$) yaklaşık %12 sondajda sıvılaşma beklenmezken, %57 sondajda çok düşük, %29 sondajda düşük ve %2 sondajda sıvılaşma riski orta seviyede bulunmuştur. İkinci deprem durumunda L_s değerlerine göre ise sıvılaşma beklenmeyen sondaj oranı %7’ye, çok düşük sıvılaşma riski %48’e düşerken, düşük sıvılaşma riski %36’ya, orta seviye sıvılaşma riski %9’a yükselmiştir.



a) Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) değerlerine göre sondaj sayıları ($M_w=6.5 - a_{max}=0.29g$ durumu)

b) Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) değerlerine göre sondaj sayıları ($M_w=7.3 - a_{max}=0.33g$ durumu)

Şekil 2. Farklı iki deprem durumu için ($M_w=6.5-a_{max}=0.29g$ ve $M_w=7.3-a_{max}=0.33g$) sıvılaşma şiddeti (L_s) değerlerine göre sondaj sayıları

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI), Iwasaki vd. (1982) tarafından SPT verileri kullanılarak yüzeyden 20 m derinliğe kadar olan sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için geliştirilmiştir (Eşitlik 2).

$$LPI = \int_0^{20m} F(z) \cdot W(z) \cdot dz \quad (2)$$

$$F_L < 1 \text{ için; } F(z) = 1 - F_L$$

$$F_L \geq 1 \text{ için; } F(z) = 0$$

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

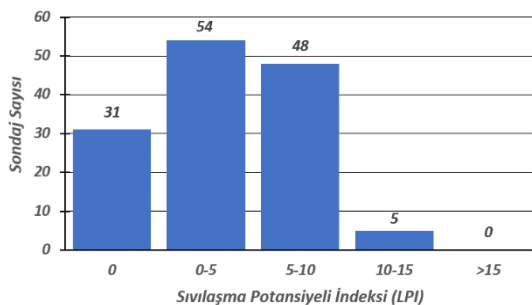
$$z \geq 20m \text{ için; } W(z) = 0$$

LPI sıvılaşma potansiyeli indeksi, $F(z)$ güvenlik katsayısının fonksiyonu olan sıvılaşma şiddeti, $W(z)$ ağırlıklı ortalama fonksiyonu, z zemin tabakasının orta noktasına metre cinsinden derinliğidir. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre zeminlerin sıvılaşma riskleri Tablo 2’de verilmiştir (Iwasaki vd., 1982). Toprak ve Holzer (2003) çalışması da CPT verileriyle gerçekleştirdikleri değerlendirmelerde benzer sonuçlara ulaşmıştır.

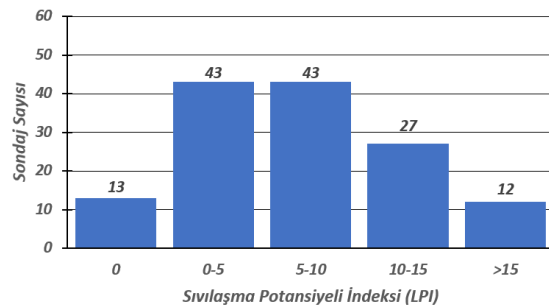
Tablo 2. Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sıvılaşma (Iwasaki vd., 1982)

Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI)	Risk
0	Çok düşük
0 – 5	Düşük
5 – 15	Yüksek
> 15	Çok Yüksek

Şekil 3’te farklı iki deprem durumu için ($M_w=6.5-a_{max}=0.29g$ ve $M_w=7.3-a_{max}=0.33g$) her bir sondajda hesaplanmış LPI değerlerinin dağılımı verilmiştir. LPI parametresine göre sondajlar incelendiğinde birinci deprem durumunda yaklaşık %22 sondajda çok düşük, %39 sondajda düşük, %39 sondajda yüksek sıvılaşma riski bulunmuştur. İkinci deprem durumunda ise %9 sondajda çok düşük, %31 sondajda düşük, %51 sondajda yüksek sıvılaşma riski durumuna sahip iken birinci deprem durumunda olmayan çok yüksek sıvılaşma riski durumu yaklaşık %9 sondajda görülmüştür.



a) Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları ($M_w=6.5 - a_{max}=0.29g$ durumu)



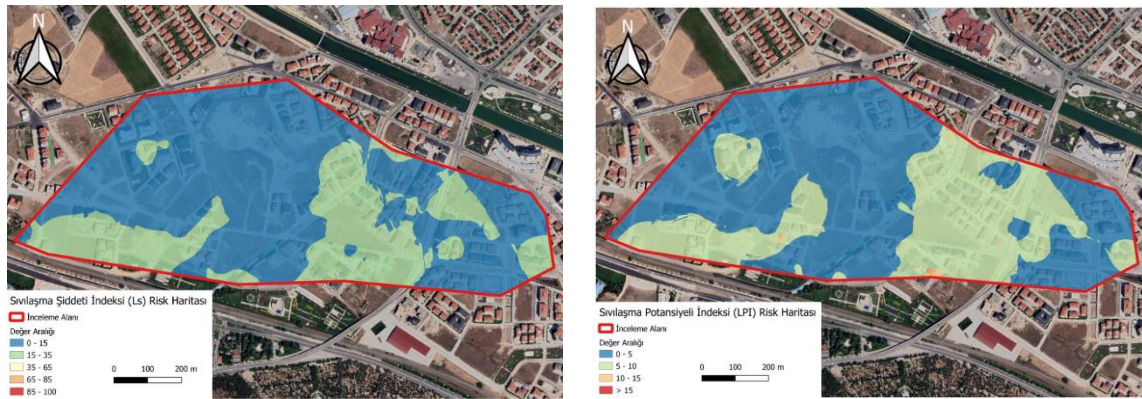
b) Sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları ($M_w=7.3 - a_{max}=0.33g$ durumu)

Şekil 3. Farklı iki deprem durumu için ($M_w=6.5-a_{max}=0.29g$ ve $M_w=7.3-a_{max}=0.33g$) sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerlerine göre sondaj sayıları

Sıvılaşma Risk Haritaları

Coğrafi bilgi sistemleri (CBS), tehlikelerin belirlenmesi için risk değerlendirme sürecinin özellikle başlangıcında sıklıkla yardımına başvurulmuş araçlardandır. Hem mekânsal hem de mekânsal olmayan tehlike ve hasar görülebilirlik verileri CBS veri tabanlarında saklanabilir ve/veya çeşitli analizler yapılabilir. CBS, güçlü bir risk değerlendirme aracı olarak deprem, kasırga, sel vb. doğal afetlerden kaynaklanan mal ve can risklerini değerlendirmede kullanılmaktadır.

Sıvılaşmayla ilgili risk haritalarının temel amacı, belli noktalarda (sondaj konumları) çeşitli yöntemlerle hesaplanan sıvılaşma parametrelerinin uygun enterpolasyon yöntemine bağlı olarak incelenen sahanın geneline yayılması ile çalışma sahasındaki tüm bölgelerde veri elde edilmesini sağlamaktır. Bu çalışmada da inceleme alanındaki noktasal sıvılaşma parametre verilerinden araştırma bölgesinde tanımlı sürekli bir harita elde edilmiştir. Coğrafi bilgi sistemi yazılımı olarak ücretsiz ve açık kaynak coğrafi bilgi sistemi yazılımı QGIS (QGIS, 2022) kullanılmıştır. Enterpolasyon yöntemi olarak kriging yöntemi kullanılmıştır. Kriging yöntemi verileri belli olan bölgeler ile bilinmeyen bölgeler arasındaki hem mesafeyi hem de varyans derecesini dikkate alan bir geostatik yöntemdir. Kriging yüzeydeki değişkenlikleri açıklamak için örnek noktalar arasındaki mesafenin veya yönün etkisiyle özel bir korelasyon kullanır. Örneklenmemiş bölgelerde verilerin yapısal özelliklerini kullanarak optimum değerleri bulma yöntemidir (David, 1977). Şekil 4 ve Şekil 5'te iki farklı deprem durumu için hesaplanmış L_s ve LPI değerleri yardımıyla elde edilen sıvılaşma risk haritaları verilmiştir. Sondajlar yardımıyla elde edilen L_s sıvılaşma risk haritalarında birinci deprem durumuna göre çalışma alanının yaklaşık %68'luk kısmının çok düşük sıvılaşma riskine, %32'lik kısmının düşük sıvılaşma riskine sahip olduğu, orta seviye sıvılaşma riskine sahip alanların sıfıra yaklaşık olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4a). LPI sıvılaşma risk haritasında bölgenin %62'si düşük sıvılaşma %38'i yüksek sıvılaşma riskine sahiptir (Şekil 4b). Çok yüksek sıvılaşma riskine sahip yer sıfıra yakındır.

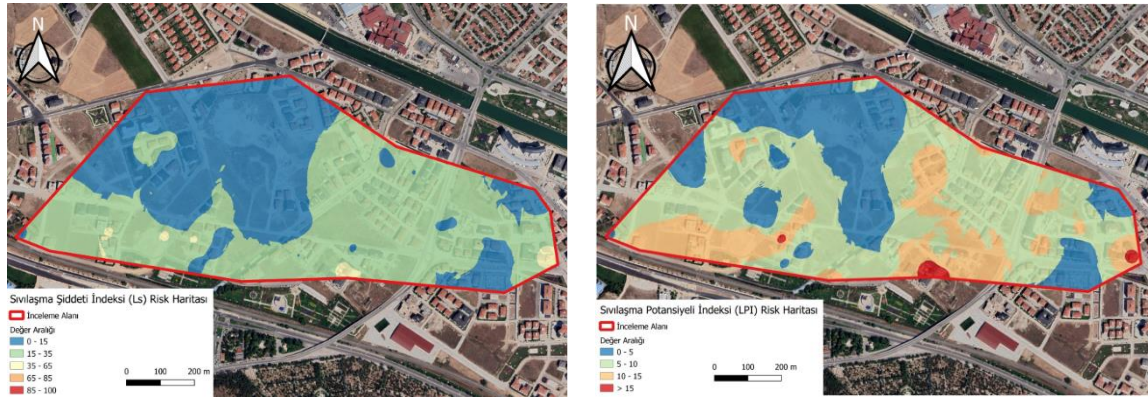


a) Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_s) Risk Haritası

b) Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) Risk Haritası

Şekil 4. Sıvılaşma Şiddeti (L_s) ve Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) Risk Haritaları
($M_w=6.5$ ve $a_{max}=0.29g$)

İkinci deprem durumunda ise L_s sıvılaşma risk haritalarında çalışma alanının çok düşük, düşük ve orta seviye sıvılaşma riskine ait oranlar sırasıyla yaklaşık %43, %56 ve %1'dir (Şekil 5a). LPI sıvılaşma risk haritasında ise %28'lik alan düşük, %71'lik alan yüksek, %1 lik alan ise çok yüksek sıvılaşma riskine sahiptir (Şekil 5b).



a) Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (L_s) Risk Haritası

b) Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) Risk Haritası

Şekil 5. Sıvılaşma Şiddeti (L_s) ve Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) Risk Haritaları ($M_w=7.3$ ve $a_{max}=0.33g$)

3. SONUÇLAR

Çalışmada Afyonkarahisar merkezinde bulunan Selçuklu Mahallesi'nde 2016-2021 yılları arasında yapılmış 138 sondaj yardımıyla sıvılaşma değerlendirmesi yapılmıştır. İlk etapta L_s ve LPI parametreleri her bir sondajda iki farklı deprem durumu için hesaplanmıştır. L_s parametrelerine göre sondajlar incelendiğinde birinci deprem durumunda çalışma alanının tamamına yakın kısmının sıvılaşma riski çok düşük veya düşük iken LPI parametresine göre yüksek sıvılaşma bölgesine sahip yaklaşık %38'lik bir alan bulunmaktadır. İkinci deprem durumunda ise beklenildiği üzere sondajlarda sıvılaşma riski artmıştır, özellikle LPI'a göre sondaj dağılımında yaklaşık %60 oranında sondajın yüksek veya çok yüksek sıvılaşma riskine sahip olduğu dikkat çekmiştir. Bölgenin genel olarak zemin profilinde 0-7 metre aralığında düşük ve yüksek plastisiteli kil bulunmasına rağmen 7-20 metre aralığında killi kum ve siltli kum tabakası, sıvılaşma yönünden özellikle ikinci deprem durumundan ciddi bir şekilde etkilenmektedir.

Bu tür risk haritalarının, risk değerlendirme süreçlerinde hızlı, etkili ve yararlı olduğu düşünülmektedir. İncelenen alanının tümünün, belli noktalardaki verilerin enterpolasyonu yardımıyla değerlendirmesini yaparken verilerin hemen her bölgede yeterli sayıda olması enterpolasyonun anlamlı ve başarılı olması için büyük önem taşımaktadır. Gelecek çalışmalarda sıvılaşma analizleri farklı güncel parametreler ve sonlu elemanlar tabanlı yazılımlar ile yapılarak sonuçlar karşılaştırılacaktır. Ayrıca mikrobölgeleme çalışmalarına altlık hazırlanacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Pamukkale Üniversitesi 2022FEBE019 numaralı yüksek lisans tez projesi kapsamında desteklenmektedir. Ayrıca çalışmada kullanılan verileri tarafımıza sağlayan 3DM Jeoloji Mühendisliğe teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) (2018), "Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması", <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>.
- Boulanger, R. W., Idriss, I. M. (2014), "CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures", Report No: UCD/CGM-14/01.
- Bray, J. D., O'Rourke, T. D., Cubrinovski, M., Zupan, J. D., Jeon, S. S., Taylor, M., Toprak, S., Hughes, M., van Ballegooy, S., Bouziou, D. (2013). "Liquefaction impact on critical infrastructure in Christchurch" USGS Technical Report, 22 March 2013.
- Cetin, K. O., Youd, T. L., Seed, R. B., Bray, D. B., Stewart, J. P., Durgunoglu, H. T., Lettis, W. and Yilmaz, M. T. (2004), "Liquefaction-Induced Lateral Spreading at Izmit Bay During the Kocaeli (Izmit)-Turkey Earthquake" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 130(12), 1300-1313.
- Cubrinovski, M., Green, R.A., Wotherspoon, L. (2011). "Geotechnical Reconnaissance of the 2011 Christchurch Earthquake", GEER Technical, Report No: GEER-027.
- David, M. (1977), "Geostatistical Ore Reserve Estimation", Elsevier Scientific Publishing Company.
- Demirtaş, R., Karakisa, S., Demir, M., Iravul, Y., Baran, B., Bağcı, G., Yatman, A., Zünbül, S., Yılmaz, R. (1995) "1 Ekim Dinar Depremi", Afet İşleri Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanlığı, Sismoloji Şube Müdürlüğü, Ankara.
- Erdik, M. (2000) "Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes", Proceedings of the 3rd International Workshop on Structural Control, 149-186.
- Holzer T. L., Barka A. A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J. H., Ellsworth W. L., Fumal T., Gross J. L., Langridge R., Lettis W. R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R. S., Ozel O., Parsons T., Phan L. T. , Rockwell T., Safak E., Stein R. S., Stenner H., Toda S. and Toprak S. (2000) "Implications For Earthquake Risk Reduction in The United States From The Kocaeli, Turkey Earthquake of August 17, 1999", United States Geological Survey (USGS) Circular 1193, 1-64.
- Holzer, T. L., Toprak, S., Bennett, M. J. (2002), "Liquefaction Potential Index and Seismic Hazard Mapping in the San Francisco Bay Area, California", Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Theme: Urban Earthquake Hazard, Boston, MA, July 21-25.
- Iwasaki, T., Arakawa, T., Tokida, K. (1982), "Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction During Earthquakes", Proc. Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, 925-939.
- Jinguuji M. and Toprak S. (2017), "A Case Study of Liquefaction Risk Analysis Based On The Thickness And Depth of the Liquefaction Layer Using CPT And Electric Resistivity Data in The Hinode Area, Itako City, Ibaraki Prefecture, Japan", Exploration Geophysics, Vol 48(1), 28-36.
- Manav, Y., Toprak, S., Karakaplan, E. and Inel, M. (2019), "Soil Improvement to Counter Liquefaction by Colloidal Silica Grout Injection" Journal of Environmental Protection and Ecology, Vol 20(1), 135-145.
- ODTÜ Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (2011), "23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van Depremi Sismik ve Yapısal Hasara İlişkin Saha Gözlemleri" Report No: METU/EERC 2011-04.
- QGIS Development Team (2022), "QGIS Geographic Information System", Open Source Geospatial Foundation Project, <http://qgis.osgeo.org>.

- Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), “Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol 97(9), 1249-1273.
- Sönmez, H. and Gökçeoğlu, C. (2005), “A liquefaction Severity Index Suggested For Engineering Practice”, Environmental Geology, Vol 48, 81-91.
- Toprak, S. and Holzer, T. L. (2003), “Liquefaction Potential Index: Field Assessment”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 129(4), 315-322.
- Toprak, S., Nacaroglu E., Koc A. C., O'Rourke T. D., Hamada M., Cubrinovski M. and Ballegooy S. (2018), “Comparison of Horizontal Ground Displacements in Avonside Area, Christchurch from Air Photo, Lidar and Satellite Measurements Regarding Pipeline Damage Assessment”, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol 16(10), 4497–4514.
- Toprak, S., Nacaroglu, E., Van Ballegooy, S., Koc, A. C., Jacka, M., Manav, Y., Torvelainen, E., O'Rourke and T. D. (2019), “Segmented Pipeline Damage Predictions Using Liquefaction Vulnerability Parameters” Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol 125.
- Utku, M., Danışman, M. A., Akyol, N., ve Akçığ, Z. (2003) “Afyon ve Çevresi'nin Depremselliği: 03 Şubat 2002 Çay Depremi Eş Şiddet Haritası ve Deprem Riski” Jeoloji Mühendisliği Dergisi, Vol 27(2), 18-34.
- Yamaguchi, A., Mori, T., Kazama, M. and Yoshida, N. (2012), “Liquefaction in Tohoku district during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake”, Soils and Foundations, Vol 52(5), 811-829.
- 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. and Stokoe, K. H. (2001), “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report form the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 127(10), 817-833.

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
a_{max}	En büyük yatay yer ivmesi	P_L	Sıvılaşma olasılığı oranı
F	Sıvılaşmaya karşı güvenliğe bağlı katsayı	W	Derinlik ağırlık faktörü
F_L	Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı	z	Derinlik
M_w	Deprem moment büyüklüğü		