Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 23(3), 303-311, 2017

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Coğrafi bilgi sistemi (CBS) kullanılarak sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi: Aksaray örneği

Evaluation of liquefaction risk using geographic information system (GIS): A case study in Aksaray

Murat KAVURMACI[1*]

[1]Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye.
muratkavurmaci@yahoo.com

Geliş Tarihi/Received: 14.01.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 12.04.2016 doi: 10.5505/pajes.2016.62534
* Yazışılan yazar/Corresponding author Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Son yüzyılda, hızla artan nüfus ve göç nedeniyle yeni yerleşim alanlarına olan talep ihtiyacı sürekli artmaktadır. Tarih boyunca hatalı yer seçimi büyük ölçekli felaketlere neden olmuştur. Özellikle 1999 Marmara ve 2011 Van depremleri sayısız insan ve milyonlarca dolar ekonomik kayba neden olmuştur. Depremlerin neden olduğu zararlar, mevcut yerleşim yeri planlarında zemin özelliklerinin yeterince göz önünde bulundurulmadığını göstermiştir. Bu çalışmada Aksaray ilinin sıvılaşma potansiyeli jeoteknik ve hidrojeolojik veriler yardımıyla Coğrafi Bilgi Sistemi teknikleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma alanındaki zeminlerin özelliklerini tespit edebilmek için jeoteknik sondajlardan 58 adet zemin örneği toplanmıştır. İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde Tokimatsu-Yoshimi yöntemi kullanılmıştır. Sıvılaşma riskinin belirlenebilmesi için farklı büyüklükte deprem senaryoları oluşturulmuş ve maksimum yatay yer ivmeleri hesaplanmıştır. Sıvılaşma risk haritalarının oluşturulmasında exponential (üssel) variogram modeli ve kriging interpolasyon yöntemi kullanılmıştır. Yüksek sıvılaşma riski içeren alanlar şehrin kuzeybatı, batı ve güney bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmanın sonuçları şehir ve bölge plancıları tarafından güvenli yerleşim alanlarının tespit edilmesinde kullanılabilir. Ayrıca sıvılaşma haritalarının kullanılması doğal afetlerin neden olduğu can ve mal kayıplarını azaltacaktır.

Anahtar kelimeler: Sıvılaşma, Coğrafi bilgi sistemi (CBS), Kriging yöntemi, Aksaray

Abstract

In the last century, the demand for new settlement areas increases continuously due to highly population and migration. Throughout history, the erroneous selection of a settlement location has led to large-scale disasters. In particular, earthquakes such as 1999 Marmara and 2011 Van have caused the loss of many lives and damage that cost millions of dollars. The destruction caused by earthquakes shows that the existing settlement plans do not attach sufficient importance to soil properties. In this study, liquefaction potential of the Aksaray city was evaluated using Geographical Information Systems (GIS) techniques depend on geotechnical and hydrogeological data. The 58 soil samples were collected from geotechnical drilling to investigate the soil characteristics of study area. The Tokimatsu-Yoshimi method was used to determine the liquefaction potential. To determine the liquefaction risk, earthquake scenarios with different magnitudes were simulated and maximum horizontal ground accelerations were calculated. The spatial distribution maps of liquefaction risk were created using the kriging interpolation method and exponential variogram model. It was seen that areas with high liquefaction risk were concentrated on the northwestern and southeastern regions of the city. The results of this study can be used by urban and regional planners as a guide in the selection of safe settlement areas. Furthermore, the use of the liquefaction maps will reduce human and economic losses due to natural disasters.

Keywords: *Liquefaction, Geographical information system (GIS), Kriging method, Aksaray*

1 Giriş

Son yüzyılda, hızla artan göç ve nüfus artışı nedeniyle gelişmekte olan ülkelerdeki yeni yerleşim alanlarına olan talep hızla artmaktadır. Bu talebi karşılamak için yanlış yerleşim yeri seçimleri tarih boyunca büyük ölçekli felaketlere yol açmıştır. Özellikle ülkemizde 1999 Marmara ve 2011 Van depremi gibi büyük ölçekli depremler sayısız kitlesel kayıplara ve maddi zararlara neden olmuştur. Hasarın boyutları sismik aktivitenin, üst yapının ve zeminin mühendislik özelliklerine bağlıdır [1],[2]. Dünyadaki birçok şehir taşıma gücü düşük zeminler üzerinde inşa edilmiştir [3],[4]. Türkiye sismik olarak aktif bir bölgedir ve depremlerin neden olduğu dinamik yüklerden kaynaklanan gerilimler, sığ derinliklerde yer alan taşıma gücü düşük zeminlerde, yıkıcı zemin davranışlarının gelişmesine yol açabilmektedir [5]. Bunlar; sıvılaşma, zemin tanelerinin sıkışması ve sıvılaşmaya bağlı olarak zeminin farklı türlerde yenilmesi şeklinde sınıflandırılabilir [5]. Üst yapıların inşasında yapı yüklerini güvenli bir şekilde zemine aktaran temel tipi seçimi için zemin özelliklerinin ve davranışlarının iyi analiz edilmesi gerekir [6]. Depremlerin neden olduğu yıkımlar zemin özelliklerinin ve davranışlarının yeterince dikkate alınmadığını göstermektedir.

Günümüzde birçok araştırmacı ve kamu kuruluşları güvenli yerleşim alanları için ideal lokasyonları belirlemek için yoğun çaba göstermektedir. Yerleşim yerlerinin doğru seçilmesi ve bu alanların doğal afetlerden korunması detaylı çalışma isteyen karmaşık bir süreçtir. Zemin özelliklerinin yanı sıra bölgenin jeomorfolojik ve hidrojeolojik özellikleri de zemin davranışları üzerine etki eden diğer önemli faktörlerdir [7],[8]. Bu faktörlerin sayısındaki yoğunluk ve çeşitlilik yer seçim sürecini daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Son yıllarda bu problemin çözümü için yer seçim sürecine etki eden faktörler Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve Çoklu Kriterli Karar Verme (ÇKKV) analizleri gibi alternatif çözüm ve değerlendirme teknikleri yardımıyla değerlendirilmiştir. Doğal risklerin belirlenmesi ve mekansal dağılımlarının doğru analiz edilebilmesi CBS teknikleri ile çok daha kolay ve güvenilirdir [9]. Ayrıca CBS riskleri ifade etmek ve alternatifler üretmek

bakımından da etkili bir uygulamadır. CBS konumsal veriyi diğer veri kaynaklarıyla birleştirebilir. Bu sayede veriler organize edilerek konumsal veriler bütünleştirilebilir.

CBS teknikleri birçok araştırmacı [10]-[18] tarafından yerleşim yerlerinin risk değerlendirme çalışmalarında özellikle sıvılaşma potansiyelinin dağılımının belirlenmesinde sıklıkla kullanılmıştır. [19] çalışmasında yerleşim alanlarının sıvılaşma potansiyelinin dağılımını CBS kullanarak haritalamıştır. [14],[20],[21] ise yaptıkları çalışmalarla yerleşim yerlerinin zemin özelliklerini ve sıvılaşma potansiyelini CBS kullanarak incelemişlerdir. İlk kez 1953 yılında Japon araştırmacılar tarafından ortaya atılan sıvılaşma sözcüğü, yeraltı su seviyesi altındaki zeminlerin dinamik yüklerden kaynaklanan gerilimler etkisiyle geçici olarak mukavemetlerini kaybederek, katı yerine viskoz sıvı gibi davranmalarıdır [22]. Sıvılaşarak kayma dayanımı kaybolan zeminde kayma gerilmeleri büyük şekil değiştirmelerine neden olur [23]. Zemin sıvılaşması deprem esnasında ciddi hasarlara neden olabilir [24]. Bundan dolayı güvenli yerleşim yerlerinin seçilme sürecinde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerden birisidir.

Bu çalışmada İç Anadolu Bölgesi'nde yer alan Aksaray ili yerleşim merkezinin sıvılaşma potansiyeli ve sıvılaşma riskinin konumsal dağılımı CBS teknikleri kullanılarak araştırılmıştır. Tuz Gölü Fay Zonu (TGFZ) üzerinde yer alan Aksaray ili, eski göl çökelleri ve güncel alüvyon birimler üzerine kurulmuştur. TGFZ yaklaşık 200 km uzunluğunda, 2-25 km genişliğinde, Kuzeybatı (KB) gidişli, aktif, sağ yanal doğrultu atım bileşenli normal bir fay zonudur [25]. Normal faylar için önerilen görgül eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalarla, TGFZ segmentlerinin azami M=6.11–6.80 büyüklüğünde deprem üretebilecekleri ortaya konmuştur [25]. Bu makalenin ana amacı, inceleme alanında sıvılaşma riski açısından güvenli alanları belirlemektir. Araştırma kapsamında 2010 ve 2011 yılları arasında jeoteknik inceleme amacı ile açılan 58 araştırma sondajı verileri kullanılmıştır. İnceleme alanının sıvılaşma potansiyeli [26] tarafından önerilen sıvılaşma yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve CBS uygulamaları yardımıyla inceleme alanının farklı deprem büyüklüklerine göre sıvılaşma risk haritaları oluşturulmuştur. Bu çalışmanın sonuçları, belediye uygulamalarında, şehir ve bölge planlarının oluşturulmasında, il afet yönetim planlarının hazırlanmasında can ve mal güvenliği korumak için kullanılabilir. Ayrıca bu çalışma sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi ve riskin mekansal dağılımının belirlenmesi konularında araştırma yapacak sonraki araştırmacılara yol gösterici olacaktır.

2 Materyal ve metot

2.1 Problemin tanımlanması

Aksaray şehir merkezi, "ayrık katı bileşenleri arasında doğal çimento görevi üstlenecek bir bağlayıcı bulunmayan veya çok gevşek olarak bulunan bir bağlayıcının su etkisiyle ortamdan kolayca uzaklaştırarak, tanelerin serbest hale geçebildiği ayrık kayaçlar ve mineraller topluluğu" şeklinde [5] tarafından tanımlanan ve toprak zemin olarak adlandırılan birim üzerinde kurulmuştur. Mevsimsel olarak farklı akım sistemlerine sahip akarsuların yüksek kotlardan diğer birimlerin aşınması sonucu getirdiği gevşek, tutturulmamış çakıl, kum, silt ve kil boyu malzemeden oluşan birimin yaşı Holosen olup, oluşumu halen devam etmektedir.

TGFZ tarafından üretilecek farklı büyüklüklerdeki depremler sırasında oluşabilecek sismik dalgalar, suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminler içinden geçerken gevşek konumdaki kum taneciklerinin birbirine yakınlaşmasına neden olabilir. Dolayısıyla tanelerin temas noktalarındaki gerilimin taneleri çevreleyen suya aktarılması söz konusudur [5]. Bu ani ve kısa süreli dinamik hareketler zemin içerisindeki gözenek suyu basıncının aniden artmasını tetikleyebilir. Oluşabilecek hidrostatik basınç zemin tanelerini bir arada tutan temas kuvvetlerine etki ederek tanelerin birbirlerinden uzaklaşmasına ve zeminin taşıma gücünün azalmasına neden olabilir. Bu koşullar altında taşıma gücünü önemli ölçüde kaybeden zemin bir sıvı gibi davranarak yüzeye doğru hareket edecek ve yüzeyden çıkmaya başlayacaktır. İnceleme alanında oluşabilecek büyük ölçekli bir deprem sonucunda zeminin sergileyebileceği bu davranış biçimi "sıvılaşma" olarak tanımlanır [5],[27].

2011 nüfus sayımı verilerine göre inceleme alanı içerisinde 195990 kişi yaşamaktadır. İnceleme alanının jeolojik ve hidrojeolojik özelliklerine göre meydana gelebilecek büyük ölçekli bir deprem sonrası çok sayıda can ve mal kayıplarının yaşanması muhtemel görünmektedir. Bundan dolayı, inceleme alanının sıvılaşma potansiyelinin ve sıvılaşma riskinin dağılımının belirlenmesi oldukça önemlidir.

2.2 Çalışma alanı ve örnekleme

Çalışma alanı Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde 33° 59' ve 34° 02' Doğu boylamları ile 38° 23' ve 38° 21' Kuzey enlemleri arasında yer alır (Şekil 1). Deniz seviyesinden itibaren ortalama yüksekliği 980 m'dir. Değerlendirilen son 40 yıllık meteorolojik verilere göre, ortalama yıllık sıcaklığı 12.06 °C, ortalama yıllık yağış miktarı 339.8 kg/m^2, düzeltilmiş (potansiyel) buharlaşmanın yıllık miktarı 557.6 mm ve gerçek buharlaşma değeri 286.8 mm'dir. Yaz mevsimleri sıcak ve kurak, kış mevsimleri ise soğuk ve yağışlı geçer. Yaz aylarında buharlaşma oranı oldukça yüksektir. İnceleme alanı jeomorfolojik açıdan düz bir topografyaya sahip olup tektonizmayla ilişkili olarak doğu ve kuzeydoğuda yüksek kotlu tepelerle çevrilmiştir. İnceleme alanı içerisinde mevsimsel yağışlara bağlı olarak yüksek kotlu tepelerden eğimle birlikte gelişen episodik akarsuların dışında önemli bir akarsu ağı bulunmamaktadır. Bölgenin en önemli akarsuyu olan Melendiz çayı ise yerleşim merkezinin 15 km. doğusunda sulama ve içme amaçlı kurulan Mamasun barajı tarafından tutulmaktadır.



Şekil1: İnceleme alanı ve örnekleme noktalarının konum haritası.

Literatür çalışmaları, inceleme alanı ve çevresi hakkında önceki yıllarda gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilmiş jeolojik, hidrojeolojik ve jeoteknik verilerin toplanması ve değerlendirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar kapsamında inceleme alanına ait spot ve ikonos uydu görüntüleri temin edilerek inceleme alanının yerleşim yeri, endüstri alanları ve topoğrafik özellikleri gibi farklı veri grupları incelenmiştir. Çalışma kapsamında inceleme alanının zemin özelliklerini dikey ve yatay yönde belirleyebilmek amacı ile her birisi 20'er metre derinliğinde Eylül 2010 ve Ekim 2011 tarihleri arasında açılan elli sekiz adet jeoteknik araştırma sondajına ait veri grupları değerlendirilmiştir. Sondaj çalışmalarıyla eş zamanlı olarak alüvyon birimden akifer kalınlığı boyunca her 1.5 m'de bir sistematik numune alınmış ve zemin karakteristikleri Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Zemin Mekaniği Laboratuvarında yapılan deneylerle belirlenmiştir. Yeraltı su seviyesi arazide yerinde ölçülmüştür.

2.3 Jeolojik ve hidrojeolojik sistem

Çalışma alanında gözlenmemekle birlikte önceki çalışmalar dikkate alındığında bölgesel olarak çalışma alanının temelinde Orta Anadolu Kristalen Kompleksi olarak tanımlanan kaya birimi yer alır. Bu kompleks düzenli bir istif sunan Orta Anadolu Metamorfitleri ve bununla birlikte deformasyon ve metamorfizma geçirmiş Metamorfik Ofiyolitli karışık ve ensimatik yay magmatiklerinden oluşan Orta Anadolu Ofiyolitleri ile bu birimleri sıcak dokanakla kesen Orta Anadolu Granitoyitleri'nden meydana gelen kristalen kayalarla temsil edilir [28]. Bölgede Kretase'den başlayıp Orta Eosen sonuna kadar denizel ve Geç Eosen-Kuvaterner zaman aralığında karasal nitelikli sedimanter birimler çökelmiştir [29]. Havza ortasında ilksel sedimanter kalınlığının korunduğu yerlerde sedimanter istifin kompozit kalınlığının hemen hemen 2500 m civarında olabileceği düşünülmektedir [30].

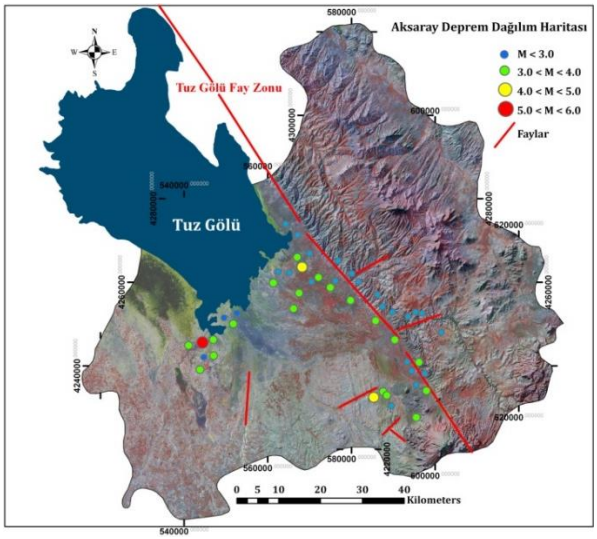
İnceleme alanını, dönemsel olarak değişik enerji sistemlerine sahip akarsuların yüksek kotlardan diğer birimlerin aşınması sonucu getirdiği gevşek, tutturulmamış, çakıl, kum, silt ve kil boyu malzemeden oluşmuş alüvyon oluşturur. Birim kötü boylanmalı, kahverengi, yeşilimsi, gri renklidir. Melendiz nehri mansap boyunca çökelen birim, KB-GD uzanımlı fay sistemlerinin batısında geniş yayılım gösterir. İnceleme alanı ve çevresinde gerçekleştirilen jeofizik ve sondaj çalışmalarından alüvyon kalınlığının 25 m ile 80 m arasında değiştiği belirlenmiştir. Stratigrafik ilişkilerine göre alüvyonun yaşı Holosen'dir. İnceleme alanının doğu kesiminde yer alan TGFZ çalışma alanındaki en önemli yapısal unsurdur.

İnceleme alanının doğusunda yer alan yüksek kotlu tepeler bölgenin beslenme alanını bölgede geniş bir alanı kaplayan Aksaray ovası ise boşalım eksenini oluşturur. Bu nedenle yeterli geçirgenlik kazanmış birimlerde muhtemel yeraltı suyu hareketi yerleşimin yoğun olduğu alana doğru olmaktadır. Bölgede gözlenen drenaj ağları, geçirimsiz birimler üzerinde genelde iyi gelişmiş ince dentritik, geçirimli ve orta geçirimli birimler üzerinde ise vadi yoğunluğu düşük kaba dentritik drenaj ağları şeklinde görülür. Yüksek kesimlerdeki küçük debili soğuk su kaynaklarının çoğu fay hatlarına bağlı olarak gelişen kırık sistemlerinden veya bağlantısız akiferlerden oluşmaktadır.

2.4 İnceleme alanının depremselliği

İnceleme alanı genç diri faylardan oluşan TGFZ üzerinde bulunmaktadır. TGFZ yaklaşık 200 km uzunluğunda, 2-25 km genişliğinde, Kuzeybatı (KB) gidişli, aktif, sağ yanal doğrultu atım bileşenli normal bir fay zonudur [25]. Sultanhanı, Hamamboğazı ve Uluırmak fay zonları bölgede aktif olan diğer tektonik unsurlardır. Bu faylar TGFZ'na dik konumlu olup KD-GB doğrultuludur. [25] yaptığı çalışmada Hasandağ ve Altunhisar dolaylarında meydana gelen depremlerin odak derinliklerinin TGFZ ve çevresinde meydana gelen depremlerin ortalama odak derinliğinden daha fazla olduğunu ve bu durumun bu bölgedeki depremlerin bir kısmının volkanik kökenli depremler olabileceğine vurgu yapmıştır. [25] aynı zamanda TGFZ segmentleri üzerinde yaptığı çalışmasında TGFZ'nun azami M=6.11–6.80 büyüklüğünde deprem üretebileceğini açıklamıştır.

İnceleme alanında meydana gelen aletsel dönem (1900 sonrası) depremleri, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Ulusal Deprem İzleme Merkezi'nden derlenmiştir. Çalışma alanı ve çevresinde 1924-2016 yılları arasında magnitüd >3 olan 23 deprem kayıt edilmiştir (Tablo 1). Bölgede inceleme alanı ve çevresinde aletsel dönemde kaydedilen depremlerin en büyüğü 1924 yılında kayıt edilen M=5.2 büyüklüğündeki Eskil (Aksaray) depremidir. Son yıllarda kayıt edilen en büyük depremler ise 2001 yılında Ulukışla (Aksaray) ve 2002 yılında Taşpınar (Aksaray) depremleridir. Her iki depremin de büyüklüğü 4.1'dir (Şekil2).



Şekil 2: Aksaray ilinde 1924-2016 yılları arasında meydana gelen depremlerin dış merkez dağılım haritası.

İnceleme alanının deprem riskinin tahmini için Poisson yöntemi kullanılmıştır. Sismik risk değerlendirmesi için magnitüd-frekans ilişkisi belirlenmiş, sismik risk değerleri ve tekrarlanma periyodu hesaplanmıştır. Magnitüdün fonksiyonu olarak depremlerin oluş frekansı incelendiğinde, genellikle doğrusal bir ilişki izlediği görülür ve bu ilişki,

$$\log N(m) = a - bM \quad (1)$$

Eşitliği ile ifade edilir. Burada M; magnitüdü, N; magnitüdü M veya daha büyük olan depremlerin oluş sıklığını, a ve b regresyon katsayılarını gösterir (Şekil 3).

Magnitüdü 4 olan bir depremin dönüş periyodu 4.94 yıl, magnitüdü 5 olan bir depremin dönüş periyodu 31 yıl, magnitüdü 5.5 olan bir depremin dönüş periyodu ise 80 yıl olarak hesaplanmıştır (Tablo 2). Magnitüdü 4 olan bir depremin 25 yılda olma ihtimali %99, magnitüdü 5.5 olan bir depremin 50 yıl içerisinde olma ihtimali ise %47'dir (Şekil 4).

Tablo 1: İnceleme alanı ve çevresinde 1924-2016 yılları arasında meydana gelen M≥3 olan deprem kayıtları.

No	Tarih	Zaman	D	M	Yer
1	15.01.2015	12:02	4.4	3.0	ACIPINAR(AKSARAY)
2	07.05.2013	20:37	1.5	3.6	ESKIL (AKSARAY)
3	06.12.2011	13:05	9.7	3	SEVINCLI (AKSARAY)
4	05.08.2011	13:54	9.3	3	AKHISAR (AKSARAY)
5	13.06.2011	11:30	5	3.9	ATAKOY (AKSARAY)
6	31.12.2010	10:24	5	3	TOPAKKAYA (AKSARAY)
7	04.08.2010	11:32	5	3.2	TOPAKKAYA (AKSARAY)
8	04.05.2010	12:34	8	3.2	KARATAS (AKSARAY)
9	21.01.2009	08:23	5	3.8	ESKIL (AKSARAY)
10	08.01.2009	22:58	7.5	3.3	ESKIL (AKSARAY)
11	01.10.2007	00:35	10	3.4	YESILOVA (AKSARAY)
12	19.08.2007	23:07	5	3.6	SAGLIK (AKSARAY)
13	06.01.2007	10:34	16.9	3	AKSARAY
14	30.08.2006	02:59	5	3.4	BAGLI (AKSARAY)
15	23.10.2004	14:20	10	3	INCESU (AKSARAY)
16	08.08.2004	18:58	15	3.1	ESKIL (AKSARAY)
17	11.07.2004	17:25	6	3.1	GULAGAC (AKSARAY)
18	01.11.2003	19:40	10	3.7	GULAGAC (AKSARAY)
19	07.03.2002	06:12	10	4.1	TASPINAR (AKSARAY)
20	11.03.2001	19:21	4	4.1	ULUKISLA (AKSARAY)
21	18.07.1999	10:51	0	3.6	ULUKISLA (AKSARAY)
22	11.03.1994	08:15	0	3.8	ULUKISLA (AKSARAY)
23	13.12.1924	18:53	30	5.2	ESKIL (AKSARAY)

D: Derinlik (km), M: Magnitüd.

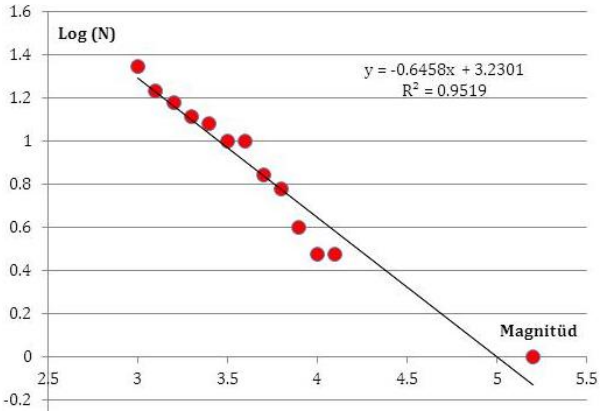
T yıllık bir gözlem aralığı için verilen herhangi bir M magnitüdlü depremin T yıl içinde oluşma riski,

$$R(m) = 1 - e^{-N(m)*T} \quad (2)$$

ve tekrarlanma periyodu,

$$Q = 1/N(m) \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanır.

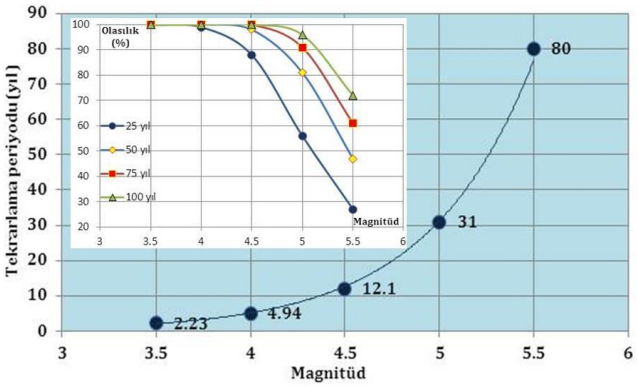


Şekil 3: Kümülatif frekanslardan magnitüd-frekans bağıntısı.

Tablo 2: (1924-2016) gözlem aralığında 3.0≤ M ≤5.5 için hesaplanan sismik risk ve tekrarlanma periyodu değerleri.

Mag./Per.	25 yıl %	50 yıl %	75 yıl %	100 yıl %	Q (YIL)
3.5	100	100	100	100	2.23
4	99	100	100	100	4.94
4.5	88	98	100	100	12.1
5	56	81	91	96	31
5.5	27	47	61	72	80

Q= Tekrarlanma periyodu.



Şekil 4: Çeşitli magnitüd büyüklüklerine ait dönüş periyotları ve aşılma olasılıkları.

15 m yüksekliğinde 5 katlı bir bina için inceleme alanının genel depremselliğine ait ortalama değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: İnceleme alanının depremselliğine ait ortalama değerler.

Zemin Grubu	-	D
Yerel Zemin Grubu	-	Z3
Etkin Yer İvme Katsayısı	A_0	0,1
Bina Önem Katsayısı	I	1
Spektrum Katsayısı	$S_{(T)}$	1,83
Spektrum Karakteristik Periyotları	T_A	0,15
	T_B	0,60
Bina Doğal Periyodu	T	0,75
Spektral İvme Katsayısı	$A_{(T)}$	0,18

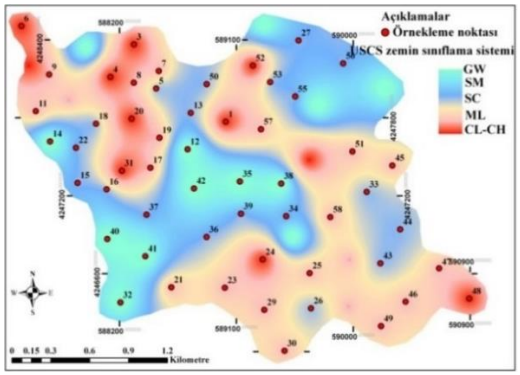
3 Sonuçlar ve tartışma

3.1 Jeoteknik değerlendirme

Araştırma sondaj verileri değerlendirildiğinde zemin genel olarak 15 m derinliğe kadar, kahverengi-gri rengin egemenliğinde, ağırlıklı olarak kumlu siltli kil, kil, siltli ince kum, kumlu silt, çakıllı kum ve çakıllardan oluşan heterojen bir dağılım gösterir (Şekil 5, Şekil 6). Bu dizilim alüvyonun çökelim ortamının türbülanslı ve taşkın sular tarafından oluşturulduğunu göstermektedir. Killer, zemin içerisinde düşey ve yanal geçişli olarak mercekler veya kısa bantlar şeklinde gözlenir. Birim genel olarak açık kahverengi yumuşak ve orta sıkışabilir özelliğe sahiptir. İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelini önemli ölçüde artıran siltler, zemin içerisinde üst yapılarının temelini taşıyan ilk seviyelerdir ve açık kahverengi-gri renk tonlarının karışımında gözlenir.

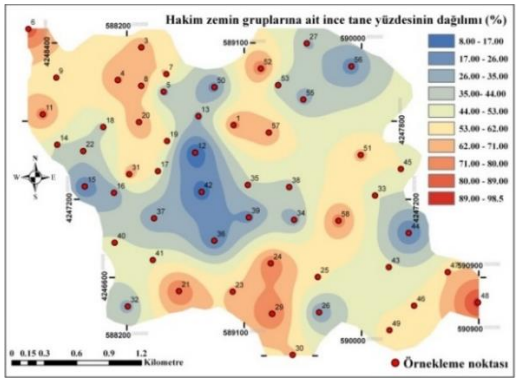


Şekil 5: Zemin örneklerinden görünüşler.



Şekil 6: İnceleme alanında zemin türlerinin dağılımı.

Zemin profili içerisinde ince gevşek seviyeler şeklinde gözlenen kumlar genelde açık gri renk tonlarında görülür. Çoğu zaman değişik oranlarda ince bantlar şeklinde kil ve silt türü birimlerle tedrici geçişlidir. İnceleme alanında genelde 7.5 m'den sonra görülmeye başlanan grimsi siyahımsı renkli iri köşeli volkanik çakıllar çoğu zaman araştırma kuyularının son metrelerini ihtiva ederler. İnceleme alanını oluşturan zeminler %47 iri taneli (GW-SM-SC), %53 ise ince tanelidir (ML-CL-CH) (Şekil 7).



Şekil 7: Zemin gruplarına ait ince tane yüzdelerinin dağılımı.

Çalışma alanının ortalama yeraltı suyu derinliği 4.5 m, ortalama su içeriği (W) % 25.2'dir (Tablo 4). Çalışma alanının ortalama emniyetli taşıma gücü SPT verileri kullanılarak [30] tarafından geliştirilen denkleme göre 1.32 kg/cm² olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanına ait ortalama SPT değerleri Tablo 5'te verilmiştir (Şekil 8, 9).

Tablo 4: İnceleme alanına ait zemin özelliklerinin istatiksel özeti.

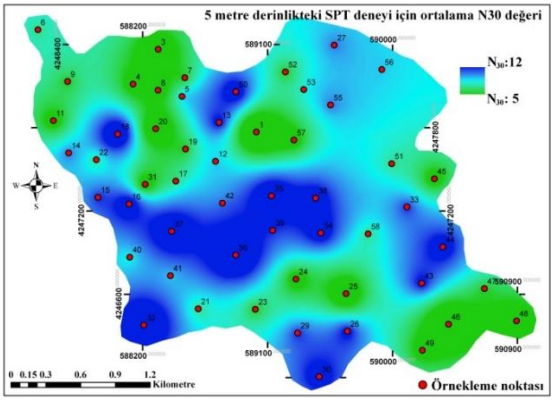
Parametre	Birim	Min.	Max.	Ort.	St. Sp
Yeraltı su seviyesi	metre	2.50	7.00	4.45	0.96
Birim hacim ağırlık	kN/m³	17.2	20.2	18.3	0.61
Su içeriği	%	9.31	45.9	25.2	9.24
Elek analizi (#4 Kalan)	%	0.21	67.0	10.7	14.6
Elek analizi (#200 Geçen)	%	0.20	98.5	52.7	25.8
Likit Limit	%	22.0	84.2	38.8	11.9
Plastik Limit	%	15.0	43.9	26.2	6.78
Plastisite İndisi	%	2.00	40.3	12.9	8.57
Zemin emniyet gerilmesi	kg/cm²	0.68	1.95	1.32	0.33
İnce tane yüzdesi	%	8.00	98.5	54.5	24.3
(Ms=6) FL		0.54	1.67	0.88	0.22
(Ms=6.5) FL		0.49	1.51	0.80	0.20
(Ms=7) FL		0.45	1.39	0.73	0.18
(Ms=7.5) FL		0.41	1.30	0.68	0.17

Ms: Senaryo deprem büyüklüğü, FL: Sıvılaşma güvenlik katsayısı.

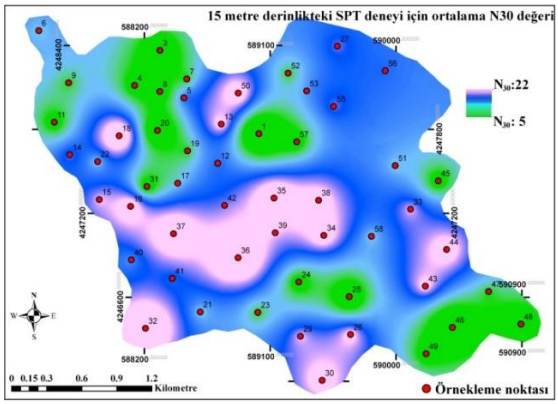
Tablo 5: İnceleme alanına ait ortalama SPT değerleri

Derinlik	S_{15}	S_{30}	S_{45}	N_{30}	N_{30}*	Min N_{30}*	Max N_{30}*
4.5-5.0	3	5	7	12	9.7	5.1	12.3
9.5-10.0	6	8	9	17	13.7	6.2	18.3
14.50-15.0	7	8	10	18	14.4	8.7	22.1
19.5-20.0	8	9	11	20	16.2	10.6	28.5

* düzeltilmiş N_{30}



Şekil 8: 5 m derinlikteki SPT N_{30} değerlerinin dağılımı.

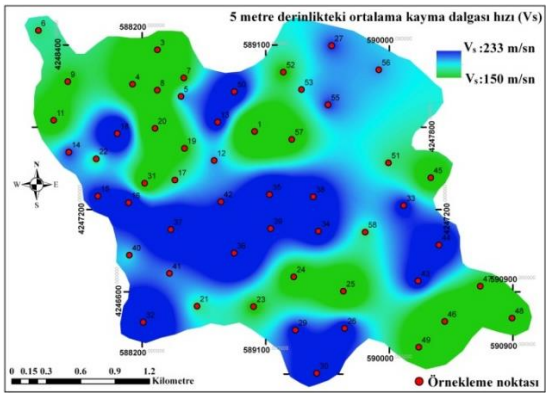


Şekil 9: 15 m derinlikteki SPT N_{30} değerlerinin dağılımı.

Her bir kuyu için zemin tabakalarının ortalama kayma dalgası hızları düzeltilmiş standart penetrasyon sayıları kullanılarak [31] tarafından verilen denklemle hesaplanmıştır.

$$Vs = 85.3^{*}N^{0.348} \quad (4)$$

Üst yapının temelinin oturacağı 5 m derinlikteki ortalama kayma dalgası hızları 149.3 m/s ile 233.2 m/sn arasında dağılım gösterir (Şekil 10). Bu değerler zeminin gevşek ve orta sıkı olduğunu göstermektedir.



Şekil 10: 5 m derinlikteki kayma dalgası hızının dağılımı.

3.2 İnceleme alanının sıvılaşma riskinin değerlendirilmesi

İnceleme alanının sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde [26] tarafından geliştirilen yöntem kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, zeminin devirsel gerilme direnci (τ_l/ $\sigma_0{}'$) depremden kaynaklanan devirsel gerime oranı (τ_d/ $\sigma_0{}'$) ile kıyaslanarak sıvılaşma potansiyeli emniyet katsayısı ile ifade edilmektedir. Başka bir deyişle, devirsel gerilme oranı devirsel gerilme direncinden büyük ise incelenen zemin seviyesinde uygulanan senaryo deprem şartlarında sıvılaşma beklenmelidir. Yöntemde kullanılan devirsel gerilme oranı;

$$\frac{\tau_d}{\sigma_0'} = 0.1(M-1)\frac{\propto_{max}}{g}\frac{\sigma_0}{\sigma_0'}(1-0.015z) \quad (5)$$

Bu bağıntıda;

M: senaryo deprem büyüklüğü, α_{max}: maksimum yatay yer ivmesi (cm/s^2), g:yerçekim ivmesi (981 cm/s^2), σ_0: toplam gerilme (kgf/cm^2), $\sigma_0{}'$:efektif gerilme (kgf/cm^2), z = derinlik (m)'dir.

Devirsel gerilme direnci ise;

$$\frac{\tau_l}{\sigma_0'} = aC_r\left[\frac{16\sqrt{N_a}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{N_a}}{C_s}\right)^n\right] \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada a, C_r, C_s ve n birer katsayı olup değerleri sırasıyla 0.45, 0.57, 80 ve 14'tür. N_a ise ince tane yüzdesine göre düzeltilmiş Standart Penetrasyon Deneyi (SPT-N) değeridir. İnce tane düzeltmesinden önce SPT-N değeri örtü kalınlığı düzeltmesine tabi tutulur. Bunun için ham SPT-N değeri (N)

$$N_{1=}\left(\frac{1.7}{\sigma_0'+0.7}\right)N \quad (7)$$

bağıntısı ile 1 kgf/cm^2'lik efektif örtü yüküne göre düzeltilmiş olur. Burada N_1, örtü yüküne göre düzeltilmiş SPT-N değeri ve $\sigma_0{}'$ efektif gerilmedir. Örnekleme dönemi süresinde halka ve otomatik tip şahmerdan düzenekleri kullanılmıştır. Teorik olarak 63.5 kg ağırlığındaki bir kütlenin 76 cm yükseklikten düşürülmesi ile 475 Joule enerji oluşmaktadır [32]. Ancak, kayıplardan dolayı tijlere aktarılan enerji bu değere ulaşamamaktadır [32]. [33] tarafından önerilen enerji düzeltmesi Halka tipi şahmerdanlar için %30-60, otomatik tip şahmerdanlar için %48-78'dir [32]. Tokimatsu-Yoshimi yönteminde dikkate alınan şahmerdan düzeneği vasıtası ile tijlere iletilen net enerji yaklaşık %63-72 arasındadır. Bu durumda, bu incelemede kullanılan sistemle elde edilen SPT-N değerlerine enerji düzeltmesi uygulanmamıştır. Devirsel derilme direnci formülündeki N_a değeri ise;

$$N_a = N_{1(60)} + \Delta N_f \quad (8)$$

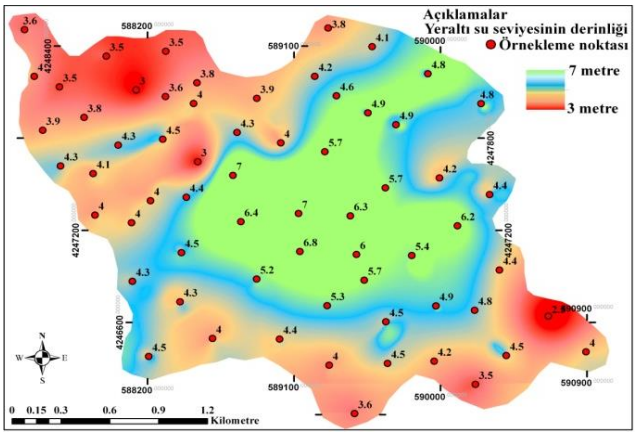
Eşitliği ile ifade edilir. Burada ΔN_f ince tane düzeltme katsayısıdır. Tablo 6 yardımıyla belirlenir.

Table 6: İnce tane yüzdesi düzeltmesi.

İnce Tane Yüzdesi (FC)	ΔN_f
0-5	0
6-10	İnterpolasyonla
>10	0.1 FC + 4

Sıvılaşma hesaplarında jeoteknik araştırma amaçlı açılan araştırma kuyularında her 1.5 m'de bir yapılan SPT sonuçları, incelenen zeminin doğal birim hacim ağırlığı, zeminin suya doygun birim hacim ağırlığı, ince tane yüzdeleri ve yeraltı suyu derinliği kullanılmıştır.

İnceleme alanı içerisinde açılan jeoteknik araştırma sondajlarında ortalama 3.0-7.5 m aralığında yeraltı suyu seviyesi ölçülmüştür (Şekil 11). Jeoteknik veriler değerlendirildiğinde inceleme alanının genel olarak D grubu zeminler içerdiği ve en üst zemin tabakası kalınlığı 10 m'den küçük olduğundan dolayı Z3 yerel zemin sınıfına sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 11: İnceleme alanında yeraltı su seviyesinin derinlik dağılımı.

İnceleme alanının sıvılaşma analizi hesaplamalarında kullanılan a_{mak} değerleri [34] tarafından önerilen 8 numaralı denklem kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda deprem odağı olarak TGFZ ve her bir araştırma kuyusunun TGFZ'na olan uzaklıkları dikkate alınmıştır. Yatay ivme hesaplamaları her bir kuyu için farklı deprem büyüklüklerine göre ayrı ayrı hesaplanmış ve inceleme alanı için ortalama değerleri alınmıştır. Yatay ivme değerleri Ms= 6, Ms= 6.5, Ms=7 ve Ms=7.5 için sırasıyla ortalama 0.34 g, 0.37 g, 0.39 ve 0.42 g olarak bulunmuştur. Araştırma kuyularının TGFZ' a çok yakın olması ivme değerlerinin yüksek çıkmasına neden olmuştur.

$$\ln PHA(g) = -4.141 + 0.868\,M - 1.09\ln[R + 0.606\exp(0.7M)] \quad (9)$$

eşitlikte; M=magnitüd, R= deprem odağına (TGFZ) olan uzaklığı (km) temsil etmektedir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısının (F_L) hesaplanmasında güvenlik katsayısı zeminin sıvılaşması için gereken tekrarlı gerilim oranının depremden kaynaklanan tekrarlı gerilim oranına bölünmesi ile hesaplanır.

$$F_L = (\tau_{av}/\sigma_0{}')_L/(\tau_{av}/\sigma_0{}')_d \quad (10)$$

Güvenlik katsayısı 1'in altında olan değerler muhtemel sıvılaşma potansiyeline sahip alanlar, güvenlik katsayısı 1'in üzerinde olan yerler ise muhtemel sıvılaşma potansiyeline sahip olmayan alanlar olarak değerlendirilmiştir.

Sıvılaşma analizi sonuçları incelendiğinde güvenlik katsayısı değerlerinin (F_L) 1'in oldukça altında çok düşük olduğu görülmektedir. En düşük ve en büyük güvenlik katsayısı değerleri 6, 6.5, 7 ve 7.5 büyüklüğündeki senaryo depremler için sırasıyla (0.54-1.7; 0.49-1.6; 0.45-1.4 ve 0.41-1.3) olarak hesaplanmıştır. İnceleme alanının ağırlıkça silt ve kum ağırlıklı sıkılaşmamış gevşek zeminlerden oluşması ve yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olması sıvılaşma riskini artırmıştır.

3.3 Sıvılaşma riskinin CBS kullanılarak değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında sıvılaşma güvenlik katsayısı verileri ArcGIS yazılımı ESDA (explatory spatial data analysis) araçları kullanılarak jeoistatistiksel açıdan değerlendirilmiş ve sıvılaşma risk haritalarının oluşturulmasında kriging interpolasyon yöntemi tercih edilmiştir. Kriging, verilerin birbirine bağımlı olması ilkesinden yola çıkarak ölçülmüş değerlerden ölçülmemiş noktaların tahmin edilebilmesi için kullanılan bir interpolasyon tekniğidir [35]. Veriler arasındaki mesafenin fonksiyonuna bağlı olarak örneklenmemiş bir noktadaki değeri hesaplamak aşağıda verilen eşitlikle mümkündür;

$$Z(x_o)=\sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(x_i) \quad (11)$$

Eşitlikle $Z(x_i)$: i lokasyonunda ölçülen değer, λ_i: i lokasyonunda ölçülen değer için ağırlık katsayısı, X_0: o lokasyonundaki tahmin edilecek değer, N: ölçülmüş değerler sayısıdır.

Bu yöntem mekansal değişimleri açıklamak için variogramlar kullanır. En büyük özelliği ise, sıvılaşma riskini değerlendirirken, riskin sürekliliği, etki mesafesi ve yönü gibi değişkenleri bir fonksiyon şeklinde ifade etmesidir. Diğer bir deyişle variogram γ(h), inceleme alanında sıvılaşma riskinin uzaklıkla nasıl değiştiğini gösteren bir eğridir ve aşağıdaki eşitlik ile gösterilir [36];

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (12)$$

γ(h): semi-variogram değeri, h: noktalar arası uzaklık (lag mesafesi), $z(x_i)$ ve $z(x_i + h)$: x noktasındaki değer ve bu noktadan h mesafedeki değer.

Bölgesel değişken, sıvılaşma riski açısından yoğun ve düşük bölgeler şeklinde geçişli bir yapı sergiliyorsa, variogram belirli bir uzaklıktan sonra artışını durdurur ve belirli bir değerde sabit kalır. Bu değere Tepe değeri (C), variogramın bu değeri aldığı uzaklığa da yapısal uzaklık (a) denir. Bu uzaklık kovaryansın sıfır olduğu ve fiziksel olarak bir örneğin etki zonu anlamına gelir. Etki zonu dışında örneklerin birbiriyle korelasyonu yoktur ve birbirlerinden bağımsızdırlar [37]. Variogram her zaman pozitif değerler aldığından seçilecek fonksiyonun da pozitif tanımlı bir fonksiyon olması gerekmektedir [38].

Bu çalışmada her bir örnekleme noktası için sıvılaşma değerleri kullanılarak ayrı ayrı deneysel variogramlar oluşturulmuştur. Daha sonra deneysel variogramlara uygun teorik modeller belirlenmiştir. Her bir sıvılaşma risk haritası için tepe değerli modeller (küresel model, exponential (üssel) model, gauss modeli ve linear modeli) test edilmiştir. Exponential (üssel) model hataların ortalama karekökü değerine göre sıvılaşma risk haritası için en uygun model olarak belirlenmiştir (Tablo 7). Exponential (üssel) model kullanılarak kriging interpolasyon yöntemi ile inceleme alanı için 3×3 m aralıklarla noktasal sıvılaşma risk değeri tahminleri yapılmış ve farklı deprem büyüklüklerine göre bölgenin sıvılaşma riski dağılım haritaları hazırlanmıştır (Şekil 12). Yapılan değerlendirmeler sonucunda sıvılaşma risk haritaları çok yüksek risk, yüksek risk, orta risk ve düşük risk olarak dört grupta sınıflandırılmıştır (Tablo 8).

Tablo 7: Sıvılaşma güvenlik katsayısı için variogram modelleri ve özellikleri.

Değişken	Variogram	N	S	a
(Ms=6) FL	Exponential	0.01	1.05	436
(Ms=6.5)FL	Exponential	0.02	1.03	397
(Ms=7)FL	Exponential	0.02	1.25	422
(Ms=7.5)FL	Exponential	0.03	1.13	385

N: Külçe etkisi, S:Tepe değeri, a: Yapısal uzaklık (metre).

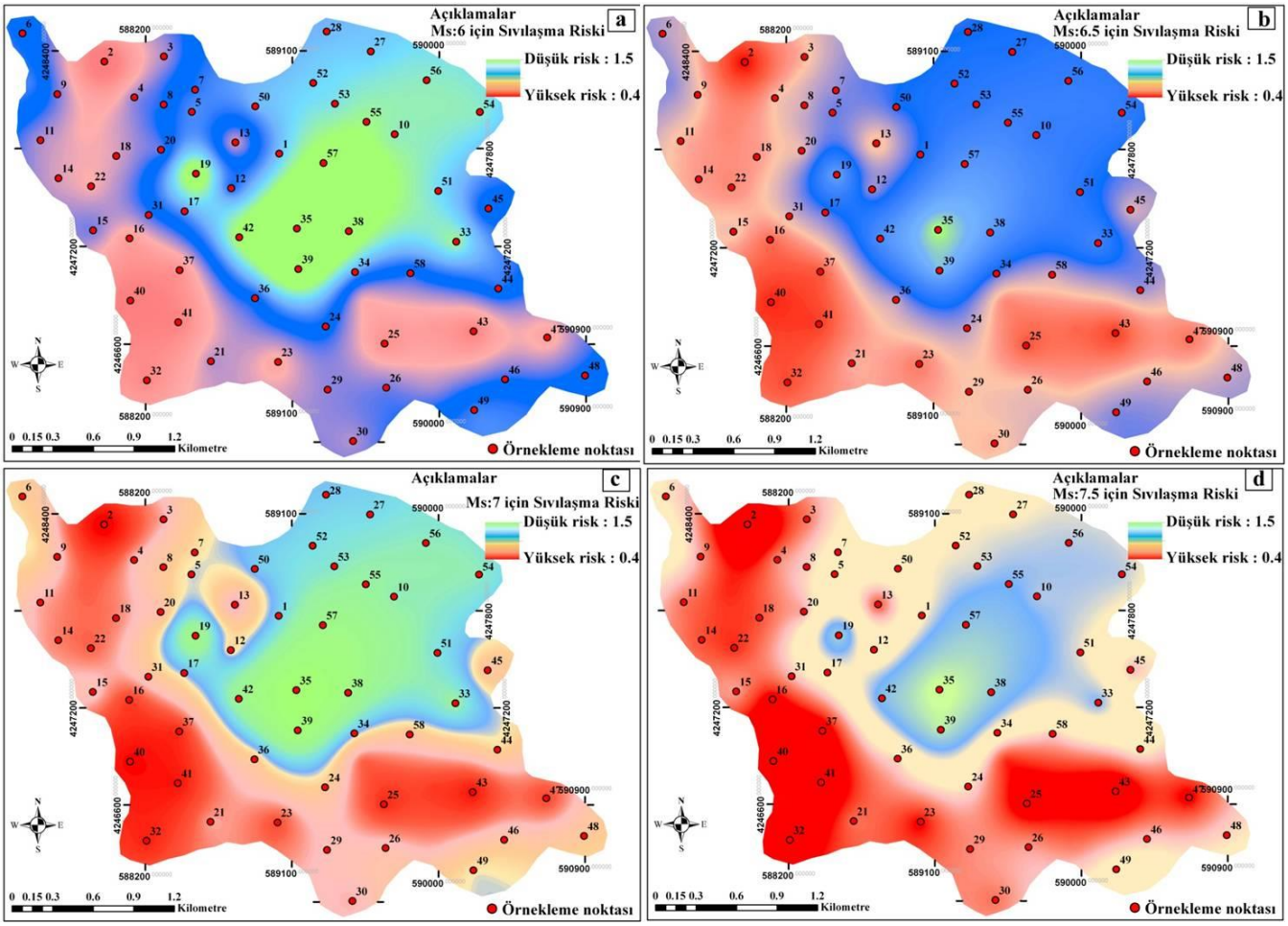
Sondajlardan yeraltı suyu derinlik ölçümlerini temsil eden noktasal değerlerden CBS ile interpolasyon yöntemi kullanılarak tüm çalışma sahası için raster biçiminde bir yeraltı suyu derinlik haritası elde edilmiştir. Ayrıca veri zarflama yöntemiyle sayısallaştırılan zemin türlerinin dağılımını gösterir zemin haritası interpolasyon yöntemi ile oluşturulmuştur.

Yüksek risk içeren alanlar inceleme alanının kuzeybatı, güneybatı ve güney bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Bu alanlar toplam alanın yaklaşık %32.3'nü temsil eder. Bu bölge genel olarak ince taneli kötü boylanmalı gevşek kum ve siltlerden oluşmuştur. Yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın olması bu bölgede sıvılaşma riskini artıran diğer bir etkendir. Deprem büyüklüğü arttıkça sıvılaşma riski de artacaktır. Düşük sıvılaşma riski içeren alanlar ise inceleme alanının doğu ve kuzeydoğusunda konumlanmıştır. Ms=7.5 büyüklüğünde deprem için düşük risk içeren alanlar toplam alanın yaklaşık %20.3'nü temsil eder. Batıya doğru gidildikçe mesafeye bağlı olarak sıvılaşma riski artma eğilimi gösterir. Yerleşim alanının %79.7'nun sıvılaşma riski açısından yüksek riskli sayılabilecek bölgede yer aldığı görülmektedir. İnceleme alanında en düşük yeraltı suyu derinliği kuzeybatı ve güneydoğuda gözlenmiştir ve bu derinlik iç kesimlere doğru artış gösterir. Oluşturulan sıvılaşma risk haritaları yeraltı suyu derinliği ve yerel zemin sınıfı ile uyumludur.

Bu çalışma kapsamında Aksaray ili imar planına esas yerleşim alanlarında olabilecek bir senaryo depremin bölgede yaratabileceği sıvılaşma potansiyeli, 58 adet jeoteknik araştırma sondajlarından elde edilen veriler kullanılarak değerlendirilmiştir. Yerleşim alanı genel olarak kumlu, siltli, siltli kumlu birimlerden oluşan zemin üzerinde kurulmuştur. Zeminlerin %53'i ince taneli; %47'si ise iri tanelidir. Sıvılaşma riskinin belirlenebilmesi için farklı büyüklüklerde (Ms=6, Ms=6.5, Ms=7.0 ve Ms=7.5) deprem senaryoları oluşturulmuştur. Buna göre bölgede ivme azalım ilişkilerine göre deprem senaryoları için maksimum yatay yer ivmeleri sırasıyla 0.34 g, 0.37 g, 0.39 ve 0.42 g olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8: İnceleme alanı için sıvılaşma risk değerlendirme tablosu.

Risk oranı	Sınıflama	Açıklama
FL < 0.6	Çok yüksek risk	Yerleşim yeri ve yüksek yapılaşma için aşırı sıvılaşma riski içerir
0.6– 0.8	Yüksek risk	Yerleşim yeri için genellikle uygun ancak zemin özellikleri zayıf, yüksek sıvılaşma riski içerir
0.8 – 1	Orta risk	Yerleşim yeri için uygun, yapılaşma için orta oranda sıvılaşma riski içerir
FL > 1	Düşük risk	Yerleşim yeri için uygun, yapılaşma için düşük oranda sıvılaşma riski içerir



Şekil 12: Farklı deprem büyüklüklerine göre sıvılaşma riskinin mekansal dağılım haritaları.

Sıvılaşma analiz sonuçları incelendiğinde Ms=6.0 ve Ms=6.5 deprem büyüklükleri için yapılan sıvılaşma analiz sonuçlarından çalışma alanının özellikle kuzeydoğu ve merkez bölgelerde sıvılaşma riskinin düşük olduğu, diğer alanların ise yüksek sıvılaşma riski altında olduğu belirlenmiştir.

Özellikle risk içeren üst yapılar sıvılaşma riski olan alanlarda yapılmamalıdır. Yüksek sıvılaşma riski olan alanlarda yapılacak yapılaşmalarda jeoteknik parametreler ayrıntılı olarak belirlenmeli ve özellikle sıvılaşmaya yönelik dinamik sıkıştırma (kompaksiyon), vibroflotasyon, zemin enjeksiyonu, sıkıştırma kazıkları ve yeraltı suyu drenaj teknikleri gibi önlemler alınmalıdır.

4 Teşekkür

Araştırma sondajlarının açılmasına katkı sağlayan ÖZ-EL Mühendislik ve Müşavirlik Şirketi ile arazi ve laboratuvar deneylerinin gerçekleşmesine olanak sağlayan Aksaray Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

5 Kaynaklar

[1] Atabey E. *Deprem*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Eğitim Serisi, Ankara, Türkiye, 2000.

[2] Aydoner C, Maktav D. "Settlement suitability analysis in terms of earthquake". *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 6(1), 53-62, 2013.

[3] Montoya L, Masser I. "Management of natural hazard risk in Cartago, Costa Rica". *Habitat International*, 29(3), 493-509, 2005.

[4] Degerliyurt M. "Settlement suitability analysis of local ground characteristics in Iskenderun: A case study". *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 120, 637–644, 2014.

[5] Ulusay R. "Zemin sıvılaşması". *Mavi Gezegen Yerbilim Dergisi*, 2, 47-56, 2000.

[6] Kurnaz TF, Ramazanoglu S. "The interrogation of settlement suitability by using GIS, a case study in Esenler (Istanbul)". *Sakarya University Journal of Science*, 18(3), 171-182, 2014.

[7] Santamarina JC, Klein KA, Fam MA. *Soils and Waves: Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring.* 1nd ed. New Jersey, USA, John Wiley and Sons, 2001.

[8] Mitchell JK, Soga K. *Fundamentals of soil behavior.* 3rd ed. New Jersey, USA, John Wiley and Sons, 2005.

[9] [9] Zarif İH, Özçep F, Seyyar T. "Yalova'daki alüvyon zeminlerin sıvılaşma tehlike analizi". *16. Uluslararası Jeofizik Kongresi*, Ankara, Türkiye, 7-10 Aralık 2004.

[10] Özvan A, Kaplan C, Çiftçi Y. "Van İli yerleşim alanının sıvılaşma potansiyeli". *55. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 11-15 Mart 2002.

[11] Bol E, Önalp A. "Siltlerin sıvılaşabilirliği ve Adapazarı sıvılaşma haritası". *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 16-17 Eylül 2004.
[12] Tün M, Avdan U, Altan M, Ayday C. "Comparison of CPT based liquefaction potential and shear wave velocity maps by Using 3-dimensional GIS". *7th AGILE Conference on Geographic Information Science*, Heraklion, Greece, 29 April, 2004.
[13] Çetin KÖ, Yunatcı AA, Çağlı S, Gülkokar T, Aktaş R, Altınışık F, Çelik S, Arabacı HM, Çekmeceli M. "Bursa şehri için CBS destekli olasılıksal sismik tehlike analizi ve sıvılaşma risk haritası oluşturulması". *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Onuncu Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 16-17 Eylül 2004.
[14] Karaca Ö. Fethiye yerleşim alanı zeminlerinin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi ve jeoteknik haritalarınnın coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak hazırlanması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2007.
[15] Özaydın K. "Zeminlerde sıvılaşma". *6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim 2007.
[16] Sönmez ME. "Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı deprem hasar riski analizi: Zeytinburnu (İstanbul) örneği". *Türk Coğrafya Dergisi*, 56, 11-22, 2011.
[17] Sönmezer YB, Çeliker M, Kılınç MY. "Kırıkkale ili bahçelievler ve fabrikalar mahallelerinin sıvılaşma potansiyelinin coğrafi bilgi sistemlerinde analizi". *International Journal of Engineering Research and Development*, 4(1), 33-40, 2012.
[18] Bayrakcı E, Pekkan E, Avdan U, Güney Y. "Coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak sondaj derinliğinin sıvılaşma analizine etkisinin belirlenmesi (Eskişehir Örneği)". *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2), 50-60, 2013.
[19] Siyahi B, Erdik M, Şeşetyan K, Demircioğlu MB, Akman H. "Sıvılaşma ve şev stabilitesi hassaslığı ve potansiyeli haritaları: İstanbul örneği". *5. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 26-30 Mayıs 2003.
[20] Sünbül AB. Adapazarı Zeminlerinde Sıvılaşma Unsurlarının Belirlenmesine ve Sıvılaşmanın Önlenmesi için Çözümler geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2004.
[21] Özçep F, Aşçı M, Karabulut S, Alpaslan N, Yas T. "Zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin farklı yöntemlerle değerlendirilmesi". *Uygulamalı Yerbilimleri*, 3(2), 11-22, 2004.
[22] Jefferies M, Been K. *Soil Liquefaction: A Critical State Approach*. 2nd ed. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006.
[23] Mollamahmutoğlu M, Babuçcu F. *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*. 1. Baskı. Ankara, Türkiye, Gazi Kitabevi, 2006.
[24] Önalp A, Arel E. "Siltlerin sıvılaşma yeteneği: adapazarı kriteri". *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi*, Eskişehir, Türkiye, 21-22 Ekim 2002.
[25] Kürçer A, Gökten YE. "Tuz gölü fay zonunun neotektonik dönem özellikleri, depremselliği, geometrisi ve segment yapısı". *MTA Dergisi*, 149(149), 19-69, 2014.
[26] Tokimatsu K, Yoshimi Y. "Empricial corralation of soil liquefaction based on SPT-N value and fines content", *Soil and Foundations*, 23(4), 56-74, 1983.
[27] Yatman ZÖ. Sıvılaşma sonucu oluşan zemin yetersizliklerinin irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye, 2006.
[28] Göncüoğlu MC, Dirik K, Erler A, Yalınız K, Özgül L, Çemen İ. "Tuzgölü havzası batı kısmının temel jeolojik sorunları". Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı, Ankara, Türkiye, 3753, 1996.
[29] Arıkan Y. "The geology and petroleum prospects of the Tuz Gölü Basin". *Bulletin of the Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 85, 17-44, 1975.
[30] Meyerhof GG. "The ultimate bearing capacity of foudations". *Geotechnique*, 2(4), 301-332, 1951.
[31] Ohta Y, Goto N. "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(2), 167-187, 1978.
[32] Çobanoğlu İ, Çelik SB. "Standart penetrasyon testinde (SPT) uygulama kaynaklı hataların zemin araştırma sonuçlarına etkisi". *DSİ Teknik Bülteni*, 103, 31-39, 2008.
[33] Youd TL, Idriss IM. "NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Proceedings of the NCCER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". National Center for Earthquake Engineering Research, Technical Report: 97-0022, 1997.
[34] Campbell KW. "Near-source attenuation of peak horizontal acceleration". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), 2039-2070, 1981.
[35] Aldworth J. Spatial Prediction, Spatial Sampling, and Measurement Error. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Iowa, USA, 1998.
[36] Oliver MA. "Kriging: A method of interpolation for geographical information systems". *International Journal of Geographic Information Systems*, 4(3), 313-332, 1990.
[37] Tercan AE, Saraç C. *Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeoistatistiksel Yöntemler*. Ankara, Türkiye, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 1998.
[38] Clark I. *Practical Geostatistics*. London, Britain, Applied Science Publishers, 1979.