

**Research Article****Identification of geological hazards of Zarand city using geotechnical and geophysical properties of soils**Mehdi Karami<sup>1\*</sup>, Iman Aghamolaie<sup>2</sup>, Nasser Hafezi Moghaddas<sup>3</sup>, Gholam Reza Lashkaripour<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate of Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

2- Ph.D. Invited Master of Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

3- Professor of Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

**Keywords:** Geological hazard, Three-dimensional model, Geotechnical and geophysical characteristics, Problematic soil, Zarand city**1- Introduction**

Many researchers have studied subsurface stratigraphy by approaching three-dimensional geological models in recent decades to overcome the complex nature of the subsurface. Specific three-dimensional spatial models have been developed in many urban areas to predict land conditions and reduce risk and uncertainty in urban planning. Despite technological advances in research, collecting complete subsurface information is still challenging. While geological and geotechnical surveys provide accurate information about separate areas, soil structures vary greatly. Geophysical methods can provide continuous two-dimensional or even three-dimensional spatial information. Since geophysical properties are affected by soil type, porosity, degree of saturation and environmental stress (Di Maio and Piegari, 2011; Piegari and Di Maio, 2013; Di Maio et al., 2014; Khan et al., 2018; Orozco et al., 2018). Other methods must match data obtained from geophysical activities. Hence, geological, geotechnical and geophysical studies can be helpful (Zarroca et al., 2014; Crawford et al., 2015; Giocoli et al., 2015; Khan et al., 2018; Rezaei et al., 2019). Also, geotechnical boreholes drilled to observe and study subsurface conditions are generally so far apart that it is practically impossible to know the subsurface conditions in the inter-borehole areas.

On the other hand, civil engineers must be aware of soil conditions in the areas between boreholes, depending on the project's location. In such cases, interpolation is a term used to solve the problem. Various interpolation methods such as Fourier series and inverse distance weighting have been defined, but since most of these techniques are entirely definitive, they cannot evaluate and estimate the error associated with estimation (Negreiros et al., 2008). Therefore, geostatistical methods have been fundamental due to their ability to estimate estimation errors. Furthermore, it is not very easy to characterize and analyze large volumes of soil data. Because due to spatial correlation, uncertainty and complexity of soil processes (Asa et al., 2012). Therefore, considering that Zarand city is a developing city, it sees the implementation of various development projects; providing basic information, zoning and modelling in urban engineering geological studies to identify geological and geotechnical hazards is necessary.

**2- Materials and methods**

The study of subsurface stratigraphy to overcome the complex nature of subsurface by constructing three-dimensional geological models has attracted the attention of many researchers in recent decades. In this study,

\* Corresponding author: mehdi\_geology1@yahoo.com

DOI: 10.22055/AAG.2021.34574.2150

Received 2020-08-06

Accepted 2021-08-15

geological, geotechnical and geophysical analyzes were used to construct three-dimensional soil models based on significant amounts of data collected from 29 electrical resistivity tomography (ERT) and 20 drilled boreholes in Zarand city. For this purpose, several techniques were used to investigate the spatial variability of geotechnical and geophysical parameters of the subsurface environment on a city-wide scale. By the statistical estimation of soil geotechnical and geophysical parameters (such as liquid limit (LL%), plasticity index (PI%), dry unit weight ( $\gamma_d$ ), shear strength (C,  $\phi$ ), modified standard penetration test (N1(60)) and electrical resistance land ( $\Omega m$ ) and the use of internal weighted moving average (Kriging) method were prepared for a statistical mean of data, two-dimensional maps and three-dimensional soil models were prepared. Finally, by combining field measurement, laboratory and three-dimensional models, the proposed method of this research was used to identify problematic soils.

X	Y	BH
451662	3410498	1
451496	3410579	2
451279	3410672	3
451034	3410837	4
450800	3410959	5
451571	3410226	6
451369	3409836	7
452157	3409248	8
453024	3408560	9
454181	3408317	10
455429	3407238	11
456332	3408049	12
457123	3409142	13
457915	3410706	14
458839	3410150	15
458107	3408560	16
458040	3407523	17
458479	3406727	18
459244	3407691	19
459944	3408875	20

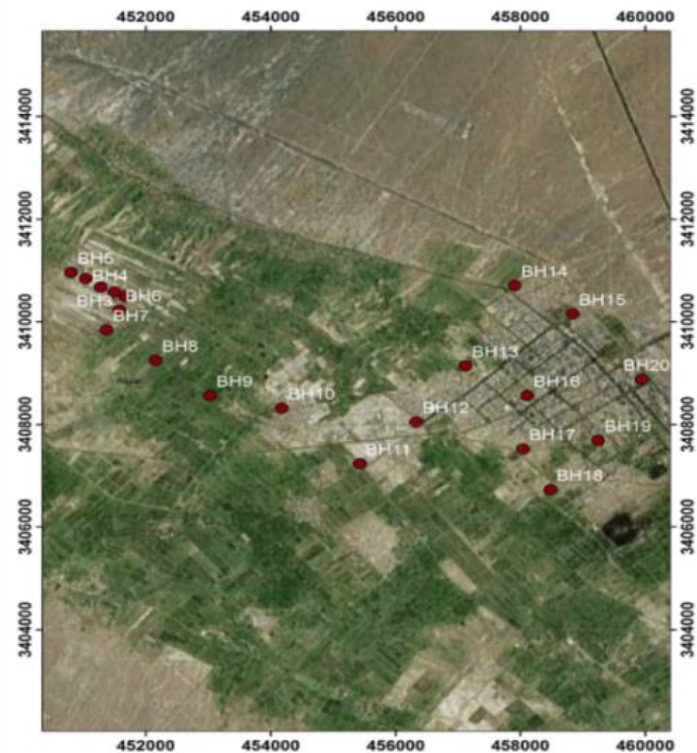


Fig. 1. Location of drilled boreholes.

Table.1. Statistical characteristics of soil geotechnical parameters.

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
LL (%)	00	39.10	26.2120	8.55077
PI (%)	00	18.95	7.9324	4.06416
W%	6.47	38.28	19.0307	8.92364
$\gamma_d$ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.89	1.6395	0.12656
C (kg/cm <sup>2</sup> )	0.07	0.87	0.4755	0.21090
$\phi^\circ$	20.50	41.90	29.9676	4.32021
N <sub>160</sub> (SPT)	10	56	29	13.11196

### 3- Discussion and conclusion

Based on three-dimensional models and sections created, the soils of Zarand are of CL, CL-ML, SC, SC-SM and ML types. Most of these soils are of CL type with interlayers of other. The type of soil is windy sand. In some horizons, these layers of wind sand are entirely smooth without any cementation and adhesion, and in some cases,



they are with silty and clay bonds, which are examined by zoning maps of the dominant soil texture, density, and ASTM (2002) standard care in the mid-range collapsible soli. Also, by combining soil texture zoning maps, moisture content, and electrical resistance levels up to an average depth of 4 meters according to the corrosion zoning map, the surface soils of Zarand city are mainly in the range of medium and severe corrosion. By examining the levels of electrical resistance and the three-dimensional model of electrical resistance up to a depth of 10 meters, according to BS-7361 standard and ASTM STP 1013 standard, with increasing depth, the electrical resistance of surface soils decreases and the intensity and corrosion range increase..

## References

- Asa, E., Saafi, M., Membah, J., Billa, A., 2012. Comparison of linear and nonlinear kriging methods for characterization and interpolation of soil data. *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE*, 8-11.
- ASTM D 5333., 2002. Standard test method for measurement of collapse potential of soils. *Annual book of ASTM Standards 04*, 1197–1199.
- ASTM STP 1013., 1989. *Effects of Soil Characteristics on Corrosion*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- BS 7361-1., 1991. *Cathodic Protection Part 1, Code of Practice for Land and Marine Applications*.
- Crawford, M.M., Zhu, J., Webb, S.E., 2015. Geologic, geotechnical, and geophysical investigation of a shallow landslide, eastern Kentucky. *Environmental & Engineering Geoscience* 21(3), 181–195.
- Di Maio, R., Piegari, E., 2011. Water storage mapping of pyroclastic covers through electrical resistivity measurements. *Journal of Applied Geophysics* 75, 196–202.
- Di Maio, R., Fabbrocino, S., Forte, G., Piegari, E. 2014. A three-dimensional hydrogeological– geophysical model of a multi-layered aquifer in the coastal alluvial plain of Sarno River (southern Italy). *Hydrogeology Journal* 22(3), 691–703.
- Giocoli, A., Stabile, T.A., Adurno, I., Perrone, A., Gallipoli, M.R., Gueguen, E., Norelli, E., Piscitelli, S., 2015. Geological and geophysical characterization of the southeastern side of the High Agri Valley (southern Apennines, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15, 315–323.
- Khan, U., Niaz, A., Basharat, M., 2018. Evaluating the geological structure of landslides through hydrogeological modeling of subsurface sections, using an integrated geophysical approach. *GRD Journals* 3(12), 6-11.
- Negreiros, J., Painho, M., Aguilar, F., 2008. Principles of deterministic spatial interpolators. *Polytechnical Studies Review* 6(9), 1-11.
- Orozco, A.F., Bucker, M., Steiner, M., Malet, J., 2018. Complex-conductivity imaging for the understanding of landslide architecture. *Engineering Geology* 243, 241–252.
- Piegari, E., Di Maio, R., 2013. Estimating soil suction from electrical resistivity. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 2369–2379.
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., Rezaei, H., 2019. Reconstruction of landslide model from ERT, geotechnical, and field data, Nargeschal landslide, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78(5), 3223-3237.
- Zarroca, M., Linares, R., Roqué, C., Rosell, J., Gutiérrez, F., 2014. Integrated geophysical and morphostratigraphic approach to investigate a coseismic translational slide responsible for the destruction of the Montclús village (Spanish Pyrenees). *Landslides* 11, 655–671.

### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Karami, M., Aghamolaie, I., Hafezi Moghaddas, N., Lashkaripour, G.R., 2022. Identification of geological hazards of Zarand city using geotechnical and geophysical properties of soils. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 407-423.

DOI: 10.22055/AAG.2021.34574.2150

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17037.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_17037.html?lang=en)

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## شناسایی مخاطرات زمین شناسی شهر زرنند با استفاده از خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی خاک‌ها

مه‌دی کرمی\*

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

ایمان آقاملایی

استاد مدعو، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان

ناصر حافظی مقدس

استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

غلامرضا لشکری پور

استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

\*mehdi\_geology1@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۶

## چکیده

مطالعه بر روی چینه‌شناسی زیرسطحی برای غلبه بر ماهیت پیچیده زیر سطح زمین با ساخت مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در بسیاری از مناطق شهری مدل‌های فضایی سه‌بعدی معینی تهیه شده‌اند که برای پیش‌بینی شرایط زمین، کاهش خطر و عدم اطمینان در برنامه‌ریزی شهری کاربرد دارند. در این پژوهش، از تجزیه و تحلیل‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از ۲۰ گمانه ژئوتکنیکی و ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک در گستره شهر زرنند استفاده شد. با تخمین آماری پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی خاک مانند حد روانی  $LL\%$ ، شاخص خمیری  $PI\%$ ، درصد رطوبت  $w\%$ ، وزن واحد حجم خشک  $\gamma_d$ ، مقاومت برشی خاک  $C, \phi^\circ$ ، مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده  $N(60)$  و مقاومت الکتریکی زمین  $\Omega m$  و بهره‌گیری از روش درون‌یابی میانگین متحرک وزن دار (کریجینگ)، نقشه‌های دوبعدی و توزیع فضایی سه‌بعدی خصوصیات خاک تهیه شدند که از آن‌ها برای شناسایی خاک‌های مسئله‌دار استفاده گردید. نتایج توزیع فضایی و برش‌های ایجاد شده لایه خاک تا عمق ۱۵ متر بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید نشان می‌دهد خاک‌های شهر زرنند از نوع  $CL, CL-ML, SC, SC-SM, ML$  می‌باشد و عمده این خاک‌ها از نوع  $CL$  بامیان لایه‌هایی از دیگر انواع خاک‌ها از جمله ماسه‌بادی است. در محدوده مورد مطالعه تلفیق نتایج بافت غالب خاک، وزن واحد حجم خشک و معیار آیین‌نامه (۲۰۰۲)  $ASTM$  نشان می‌دهد که این خاک‌ها در محدوده رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند. همچنین بر اساس نقشه خوردگی خاک که با بهره‌گیری از درصد رطوبت و سطوح هم مقاومت الکتریکی زمین تا عمق میانگین ۴ متر تهیه شد، خاک‌های سطحی مطابق با استاندارد  $BS-7361$  و استاندارد  $ASTM STP 1013$  عمدتاً در محدوده خوردگی متوسط و شدید ارزیابی شدند. در نهایت ارزیابی سطوح و توزیع فضایی سه‌بعدی مقاومت الکتریکی زمین تا عمق ۱۰ متر نشان داد که با افزایش عمق، میزان مقاومت الکتریکی خاک‌های سطحی کاهش و شدت و محدوده خوردگی خاک افزایش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** مخاطرات زمین‌شناسی، خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی، خاک مسئله‌دار، شهر زرنند

## مقدمه

(and Brown, 2009). پیشرفت در سرعت محاسبات، جمع‌آوری و کمی کردن داده‌های زمین‌شناسی محققان علوم زمین را قادر می‌سازد تا مدل‌های فضایی سه‌بعدی معینی از لایه‌های زیرسطحی در بسیاری از مناطق شهری تهیه کنند که برای پیش‌بینی شرایط زمین، کاهش خطر و عدم اطمینان در برنامه‌ریزی شهری کاربرد دارند (Kessler et al., 2009; Royse, 2010; De Beer et al., 2012). تحقیقات و مدل‌سازی‌های زمین‌شناسی مختلفی جهت شناسایی و ارزیابی مخاطرات

مطالعه شرایط چینه‌شناسی زیرسطحی<sup>۱</sup> برای غلبه بر ماهیت پیچیده زیر سطح زمین با ساخت مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است (Jones et al., 1993; Lemon and Jones, 2003; De Rienzo et al., 2008; Tonini et al., 2008; Hettiarachchi

1- Subsurface stratigraphy



فرایندهای تشکیل خاک است (Asa et al., 2012). بررسی‌های زمین‌شناسی و گمانه‌های ژئوتکنیکی می‌توانند اطلاعات دقیقی در مورد مناطق جدا از هم فراهم کنند، اما به دلیل پیچیدگی ساختارهای خاک جمع‌آوری اطلاعات کامل زیرسطحی به‌عنوان یک چالش برای زمین‌شناسان و مهندسان مطرح است. استفاده از روش‌های اکتشافی دیگر مانند روش‌های ژئوفیزیکی می‌تواند به شناخت بیشتر محیط زیرسطحی کمک کند. روش‌های ژئوفیزیکی اطلاعات پیوسته‌ای از فضای دوبعدی یا حتی سه‌بعدی ارائه می‌دهند و از آنجایی که ویژگی‌های ژئوفیزیکی زمین تحت تأثیر نوع خاک، تخلخل، درجه اشباع و تنش محیط هستند (Di Maio and Piegari, 2011; Piegari and Di Maio, 2013; Di Maio et al., 2014; Khan et al., 2018; Orozco et al., 2018)، لذا داده‌های به‌دست‌آمده از فعالیت‌های ژئوفیزیکی باید با روش‌های دیگر مطابقت داده شوند. از این رو بررسی‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی می‌تواند مفید باشند (Zarroca et al., 2014; Crawford et al., 2015; Giocoli et al., 2015; Khan et al., 2018; Rezaei et al., 2019). در این پژوهش، برای توسعه ایمن شهر زرنند، توزیع فضایی خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی با استفاده از نرم‌افزار RockWorks تعیین شد و در نهایت با تلفیق بررسی‌های مختلف زیرسطحی، مخاطرات زمین‌شناسی نیز ارائه گردید.

### زمین‌شناسی

شهر زرنند در شمال غربی استان کرمان و بر اساس تقسیم‌بندی واحدهای زمین‌ساختی ایران، در زون ایران مرکزی قرار گرفته است. قدیمی‌ترین سازندهای منطقه (سری‌های ریزو، دزو و داهو) از سنگ‌های آهکی، ماسه‌سنگ‌های آرکوزی و چرت‌های رادیولاریتی به سن پرکامبرین تشکیل شده است. رسوبات پالئوزوئیک و مزوزوئیک در اکثر مناطق دیده می‌شوند و سازندهای کرتاسه در بخش کوچکی در جنوب شرق منطقه وجود دارد. همچنین رسوبات نئوژن بیشتر از ماسه‌سنگ، مارن و تشکیلات کنگلومرایی تشکیل شده‌اند و رسوبات دوران چهارم به‌عنوان جوان‌ترین واحدهای منطقه در پادگانه‌های مختلف آبرفتی در دشت زرنند انباشته شده است. دشت زرنند در اثر چین‌خوردگی کیمبرین به وجود آمده است و تحت تأثیر گسل‌های کوه بنان در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

### مواد و روش‌ها

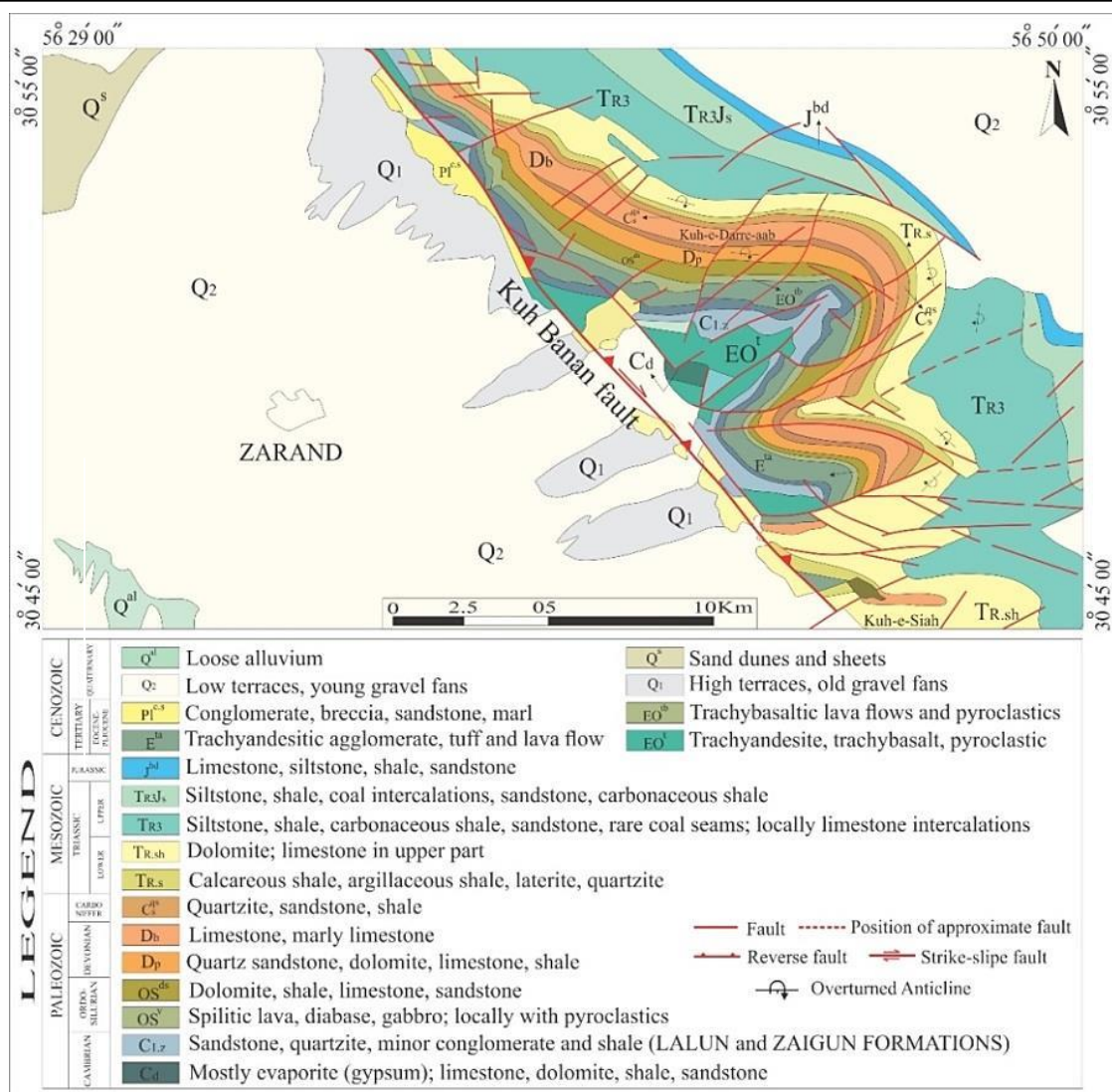
برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی خاک از داده‌های جمع‌آوری شده ۲۰ گمانه ژئوتکنیکی و ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک در گستره شهر زرنند استفاده شد. بدین منظور از تکنیک‌های متعددی جهت بررسی تغییرپذیری فضایی پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی محیط زیرسطحی در مقیاس گستره شهر استفاده گردید. در ابتدا یک بانک اطلاعاتی از خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی خاک تهیه گردید.

زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی در مناطق شهری در سراسر دنیا بکار گرفته شده است.

Skipper و همکاران (۲۰۰۵) ضمن شناسایی زمین‌شناسی رسوبات کواترنری شهر دابلین<sup>۲</sup> ایرلند، خصوصیات و مخاطرات خاک‌های رسی در این شهر را ارزیابی کردند. Karim و همکاران (۲۰۱۸) برای توسعه پایدار شهر بنگلادش که با یک چالش زمین‌شناسی مهندسی دشوار مواجه است با تفسیر مدل‌های زمین‌شناسی مهندسی، مخاطرات زمین‌ساختی این شهر را شناسایی کردند. De Donatis و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از نرم‌افزار 2D Move و 3D Move برای آنالیز و تجسم زمین‌شناسی و محیط‌زیست در منطقه فوسومبرونه<sup>۳</sup> ایتالیا توزیع فضایی را ارائه کردند. Kostic و همکاران (۲۰۰۷) با بهره‌گیری از نرم‌افزار Gocad به منظور تعیین توزیع حجم و ضخامت رسوبات گراول و ماسه کواترنری در منطقه اوشتراخ<sup>۴</sup> آلمان مدل سه بعدی زمین‌شناسی را ارائه کردند. Ford و همکاران (۲۰۰۸) در پژوهشی ارتباطات فضایی واحدهای زمین‌شناسی و توسعه منطقه دروازه تیمز لندن با استفاده از GSI3D را بررسی کرد. Zhao and Li (۲۰۱۰) از سیستم اطلاعات زمین‌شناسی برای کاربرد در مطالعات و برنامه‌ریزی شهری در بخش توسعه منتوگو<sup>۵</sup>، پکن بهره بردند. Touch و همکاران (۲۰۱۴) از نرم‌افزار GMS برای مدل‌سازی سه‌بعدی خصوصیات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، جهت بررسی خاک‌های زیرسطحی پنوم پن<sup>۶</sup> کامبوج بهره گرفت. Naseh و همکاران (۲۰۱۶) و Aghamolaie و همکاران (۲۰۱۹) به ترتیب از نرم‌افزار SGeMs برای تعیین مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی مهندسی شهر مشهد و کرمان استفاده کردند. هدف از تعیین مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی شهر مشهد، شناخت خصوصیات ژئوتکنیکی و توزیع فضایی این خصوصیات و هدف از تعیین مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی شهر کرمان علاوه بر شناخت خصوصیات ژئوتکنیکی بررسی رهمبندگی خاک است که با استفاده از معیارهای مختلف رهمبندگی خاک ارزیابی شده است.

برای ساخت مدل‌های سه‌بعدی در مناطق شهری، گمانه‌های ژئوتکنیکی که جهت مشاهده شرایط زیرسطحی حفر می‌شوند، عموماً دارای فواصل زیاد از هم می‌باشند به طوری که عملاً کسب اطلاعات زمین‌شناسی در محدوده‌های مابین گمانه‌ها میسر نیست. از سوی دیگر، مهندسان با توجه به محل پروژه نیازمند آگاهی از شرایط خاک در این مناطق می‌باشند. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های درون‌یابی مختلفی مانند سری فوریه، وزن دهی معکوس فاصله و کریجینگ به‌عنوان روش‌های مناسب از سوی محققین پیشنهاد شده‌اند. با این وجود، تعیین خصوصیات و آنالیز حجم عظیمی از داده‌های خاک بسیار دشوار است. علت این امر، همبستگی فضایی، عدم قطعیت و پیچیدگی

- 2-Dublin
- 3-wFossombrone
- 4- Ostrach
- 5- Mentougou
- 6- Phnom Penh



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه برگرفته از نقشه زمین شناسی زرند (Daneshmand et al., 1995).

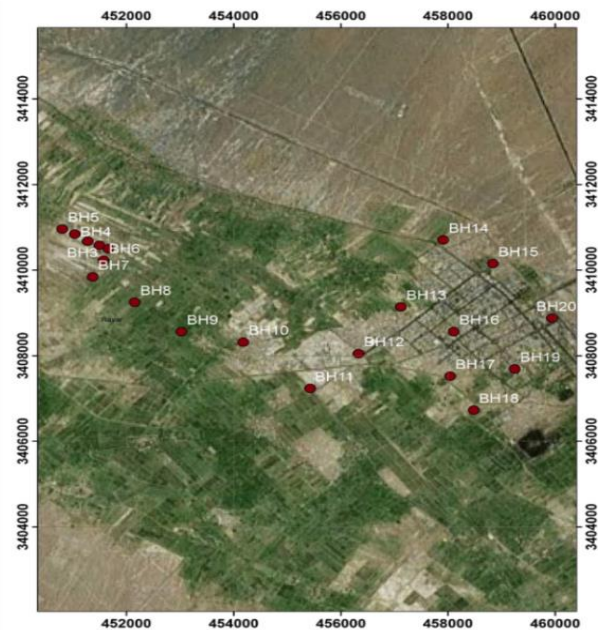
Fig. 1. Geological map of the study area, taken from the Zarand geological map (Daneshmand et al., 1995).

داده شده است. برای انجام کلیه تحلیل‌های آماری و مدل سازی در این پژوهش از نرم افزار Rockworks 17 و SPSS 25 استفاده شده است.

### نتایج و بحث

نتایج بررسی خصوصیات آماری پارامترهای ژئوتکنیکی برای ۲۰ گمانه حفاری شده در نهشته‌های شهر زرند در جدول ۱ و نسبت فراوانی کلاس‌های خاک بر اساس طبقه بندی یونیفاید (USCS) در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد بیشترین درصد فراوانی با ۵۵ درصد متعلق به خاک‌های رسی با خاصیت خمیری کم (CL) می‌باشد. همچنین حداکثر میزان حد روانی خاک منطقه (LL%) معادل ۳۹/۱۰ درصد و مقدار شاخص خمیری (PI%) برابر ۱۸/۹۵ درصد ارزیابی شد.

خصوصیات ژئوتکنیکی شامل مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک از آزمایش‌های انجام شده در محل و یا آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های دست خورده و دست نخورده، از عمق صفر تا ۱۵ متری به دست آمده‌اند. پارامترهای مقاومت الکتریکی زمین از برداشت ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک تا عمق ۱۰ متر ارزیابی شدند. با تخمین آماری پارامترهای ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی خاک مانند حد روانی (LL%)، شاخص خمیری (PI%)، وزن واحد حجم خشک (γ<sub>d</sub>)، عوامل مقاومت برشی خاک (C, φ°)، مقاومت نفوذ استاندارد اصلاح شده (N<sub>60</sub>) و مقاومت الکتریکی زمین (Ωm) و بهره گیری از روش درون یابی میانگین متحرک وزن دار (کریجینگ)، نقشه‌های دوبعدی و توزیع فضایی سه بعدی خصوصیات ژئوتکنیکی تهیه شد. در نهایت از آن‌ها برای شناسایی خاک‌های مسئله دار در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. در شکل ۲ توزیع گمانه‌های حفاری شده در گستره شهر زرند نشان



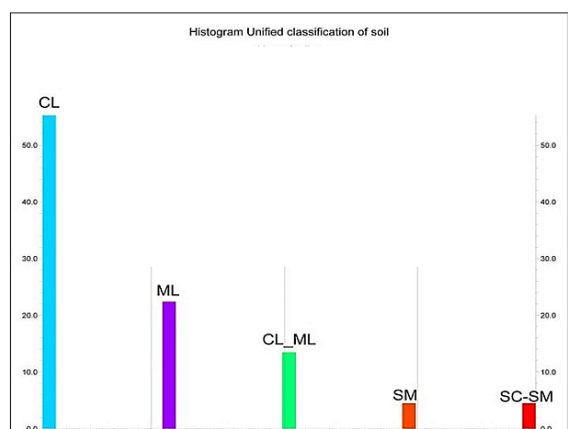
شکل ۲- موقعیت گمانه‌های حفاری شده.

Fig. 2. Location of drilled boreholes.

جدول ۱- خصوصیات آماری پارامترهای ژئوتکنیکی خاک برای ۲۰ گمانه.

Table 1. Statistical characteristics of soil geotechnical parameters for 20 boreholes.

	Sample	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Liquid limit (%)	96	00	39.10	26.21	8.55
Plasticity index (%)	96	00	18.95	7.93	4.06
Water content (%)	96	6.47	38.28	19.03	8.92
Dry Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	71	14.12	18.53	15.98	0.12
Cohesion (kPa)	85	6.86	85.3	46	0.21
Angle of internal friction (deg)	85	20.50	41.90	29.96	4.32
Standard penetration test (N <sub>60</sub> )	100	10	56	29	13.11

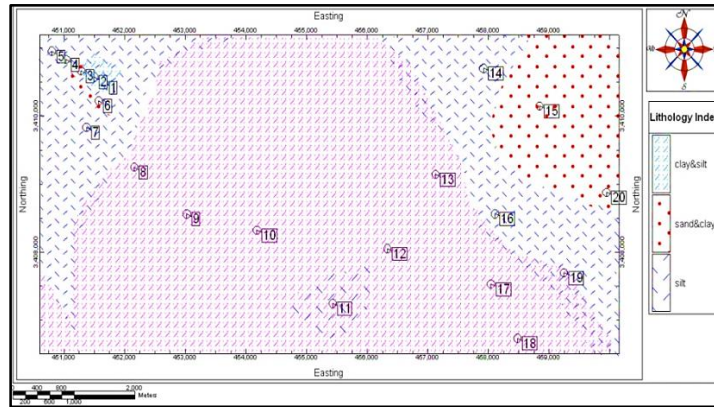


شکل ۳- هیستوگرام فراوانی طبقه‌بندی خاک بر اساس یونیفاید.

Fig. 3. Frequency histogram of soil classification based on Unified Soil Classification System.

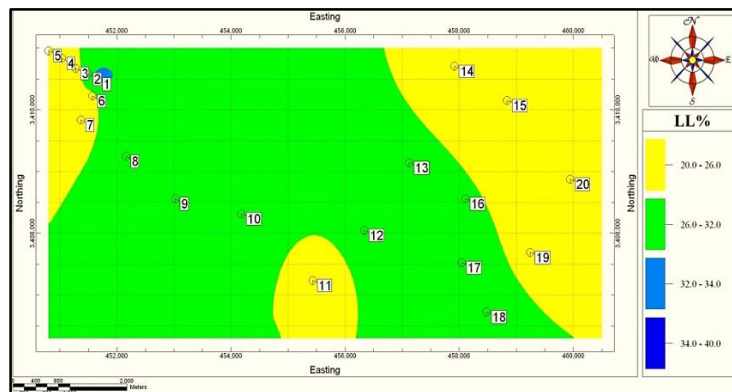
عمق میانگین ۴ با نقشه بافت غالب خاک مطابقت داده شد. درگام دوم بر اساس بررسی هیستوگرام و منحنی نرمال، داده‌های پرت حذف گردید و نقشه‌های خاک‌های سطحی شامل حد روانی، شاخص خمیری، درصد رطوبت، وزن واحد حجم خشک، عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده که در شکل‌های (۵ الی ۹) نشان داده شده است تهیه شد.

پس از بررسی‌های آماری، هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی در محدوده شهر زرند کلاس‌بندی و در قالب نقشه‌های دوبعدی و مدل‌های سه‌بعدی ارائه گردید. نقشه کلاس‌بندی بافت خاک تا عمق میانگین ۴ متر که در شکل ۴ نشان داده شده است. بافت غالب هر گمانه بر اساس نتایج آزمایش دانه‌بندی تعیین گردید. همچنین برای تهیه نقشه‌های خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، ابتدا داده‌های خصوصیات ژئوتکنیکی



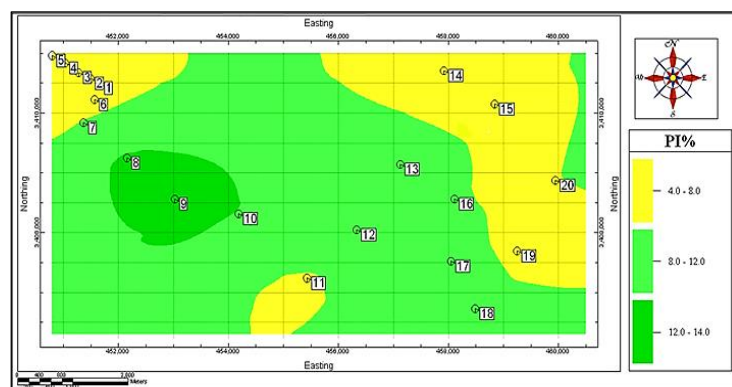
شکل ۴- نقشه کلاس‌بندی بافت غالب خاک تا عمق میانگین ۴ متر.

Fig. 4. Classification map of the dominant soil texture to an average depth of 4 meters.



شکل ۵- نقشه خصوصیات ژئوتکنیکی LL% تا عمق میانگین ۴ متر.

Fig. 5. Geotechnical properties map of LL% to an average depth of 4m.



شکل ۶- نقشه خصوصیات ژئوتکنیکی PI% تا عمق میانگین ۴ متر.

Fig. 6. Geotechnical properties map of PI % to an average depth of 4m.



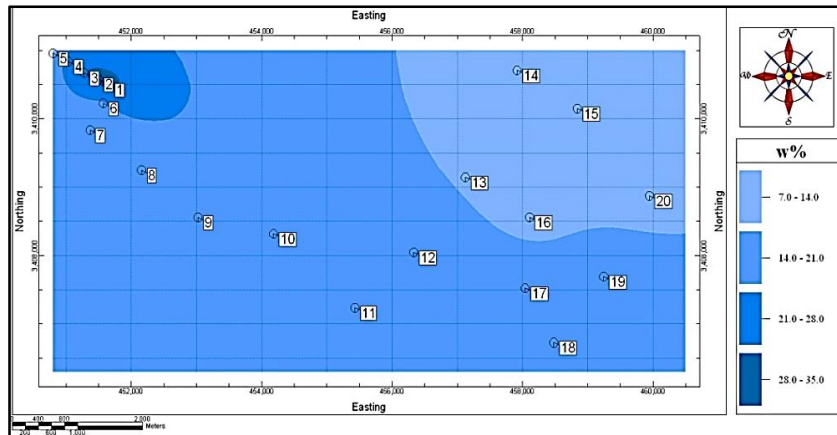

 شکل ۷- نقشه خصوصیات ژئوتکنیکی  $w\%$  تا عمق میانگین ۴ متر.

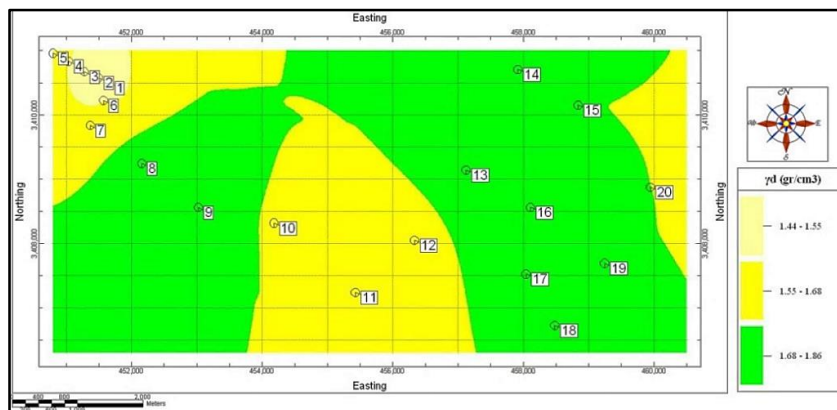
 Fig. 7. Geotechnical properties map of  $w\%$  to an average depth of 4m.

 شکل ۸- نقشه خصوصیات ژئوتکنیکی  $\gamma_d$  (gr/cm<sup>3</sup>) تا عمق میانگین ۴ متر.

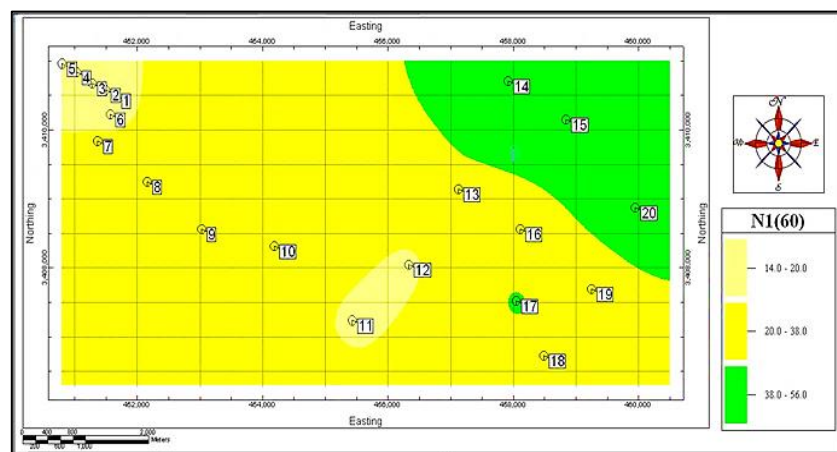
 Fig. 8. Geotechnical properties map of  $\gamma_d$ (gr/cm<sup>3</sup>) to an average depth of 4m.

 شکل ۹- نقشه خصوصیات ژئوتکنیکی  $N(60)$  تا عمق میانگین ۴ متر.

 Fig. 9. Geotechnical properties map of  $N(60)$  to an average depth of 4m.

که در آن  $\Delta e$  تغییر در نسبت تخلخل نمونه در اثر اشباع شدن و  $e_0$  نسبت تخلخل نمونه قبل از غرقاب کردن می‌باشد. جدول ۲ رده‌بندی شاخص رمبندگی آیین‌نامه ASTM را ارائه می‌دهد.

شکل ۱۱، پتانسیل رمبندگی تا عمق ۴ بر اساس نتایج به‌دست آمده از رابطه ۱ را نشان می‌دهد. بر این اساس خاک‌های شهر زرنند عمدتاً در محدوده رمبندگی کم و متوسط طبقه‌بندی می‌گردند.

از دیگر چالش‌های ژئوتکنیکی شهر زرنند، حضور خاک‌های خورنده است. خوردندگی خاک نوعی واکنش شیمیایی و الکتروشیمیایی بین خاک و اجسام مدفون در آن می‌باشد که سبب آسیب دیدن فلزات بدون پوشش و اجزای بتنی مدفون در آن می‌گردد ( Jones, 1993; Escalant, 1957). خوردندگی خاک وابستگی زیادی به خواص شیمیایی خاک دارد. ترکیب شیمیایی خاک در هر منطقه تابع شرایط زمین‌شناختی شامل جنس سنگ مادر و نوع فرایند هوازدگی و محیط تشکیل می‌باشد. به‌عنوان مثال خاک‌های حاصل از سنگ‌های دارای کانی پیریت، سولفور می‌باشند؛ درحالی‌که خاک‌های مربوط به سنگ‌های آهکی و دولومیتی قلیایی دارای PH کمتر از ۸/۵ هستند (Norin, 1998).

یکی از روش‌های ارزیابی خوردندگی خاک، اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی محیط است. روش‌های الکتریکی بر مبنای شارش جریان پایدار در زمین (جریان مستقیم یا متناوب) استوار می‌باشند. برای تهیه نقشه خصوصیات ژئوفیزیکی از تعداد ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک به روش ونر و چهار الکترودی با حداکثر طول فرستنده جریان  $ab = 30m$  در محدوده مورد مطالعه برداشت گردیده است. روش برداشت سونداژ زنی می‌باشد و با توجه به بررسی لایه‌های خاک تا عمق حداکثر ۱۰ متر، تفکیک عمق مورد مطالعه برابر فواصل الکترودی در نظر گرفته شده است؛ که بر روی سطح زمین با آرایش ونر به فواصل الکترودی ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸ و ۱۰ متری برداشت گردید. جدول ۳ مقادیر اندازه‌گیری ۱۶۲ مقاومت الکتریکی زمین بر حسب اهم‌متر ( $\Omega m$ ) در ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک برای عمق ۱۰ متر و شکل ۱۲ هیستوگرام فراوانی آن را نشان می‌دهد.

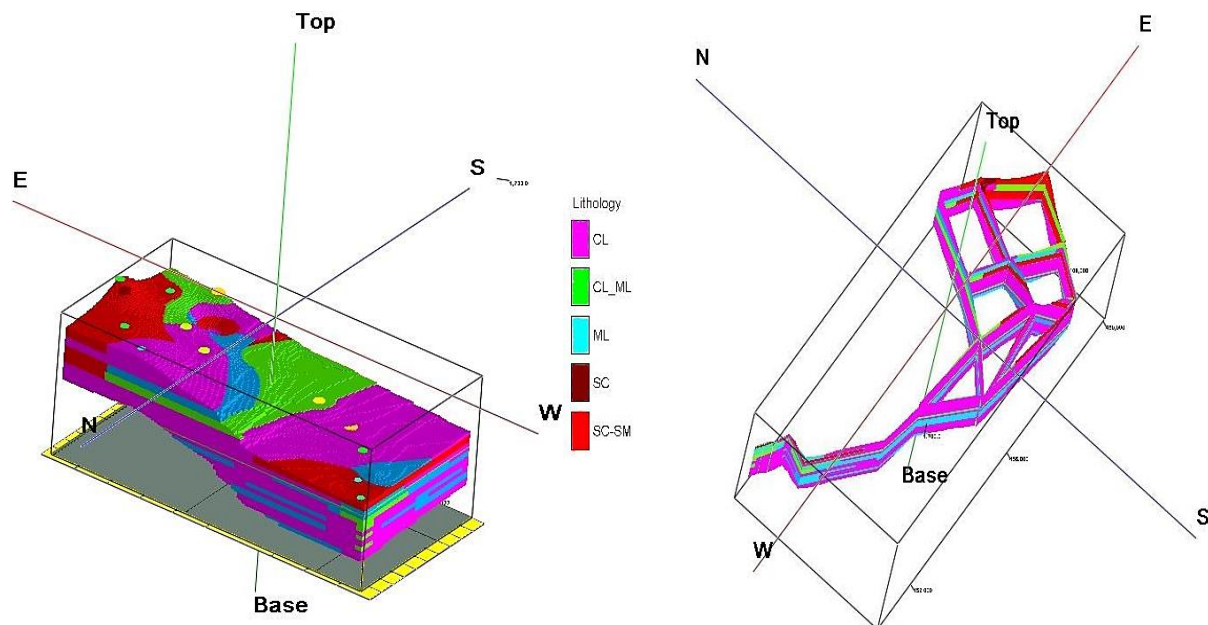
برای آگاهی از توزیع فضایی نوع خاک به روش یونیفاید از نرم‌افزار RockWorcks.17 استفاده شده است. بر اساس توزیع فضایی و برش‌های ایجاد شده به خوبی می‌توان به نحوه‌ی پراکنش لایه‌های مختلف خاک پی برد (شکل ۱۰). همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک‌های شهر زرنند از نوع CL، CL-ML، SC، SC-SM و ML می‌باشند که معرف شرایط محیط رسوبی مخروط افکنه جوان و ماسه‌بادی هستند. در محدوده شهر زرنند شیب زمین از دو طرف به سمت مرکز دشت (شهر زرنند) می‌باشد؛ که با نزدیک شدن به محدوده شهر و مرکز آن نهشته‌ها، ریزانه‌تر می‌شوند و در محدوده شهر خاک‌ها عمدتاً CL بامیان لایه‌هایی از دیگر نوع خاک‌هاست. در ستون چینه‌شناسی خاک‌های شهر زرنند ماسه‌بادی با ضخامت‌های متفاوت و در اعماق مختلف وجود دارند. این لایه‌ها در برخی افق‌ها بدون هیچ سیمان شدگی و در برخی موارد دارای سیمان رسی هستند. بر اساس نتایج آزمایش‌های تحکیم مضاعف در نمونه‌های اخذ شده از این لایه‌ها، رمبندگی متوسطی از خود نشان می‌دهند. در این پژوهش از معیار ASTM که نخست توسط هولتز ارائه و پیشنهاد شده است، برای ارزیابی و گسترش پتانسیل خاک‌های رمبند در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. در این استاندارد به منظور اندازه‌گیری قابلیت رمبندگی آزمایش تحکیم بر اساس پیشنهاد ASTM D5333 انجام می‌گیرد. به‌گونه‌ای که در این روش پس از آماده‌سازی نمونه دست‌نخورده (آزمایش تحکیم، ASTM D 2435)، تنش قائم تا ۲۰۰ کیلو پاسکال به‌صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده و با آب مقطر غرقاب شده و یک روز به همان حالت گذاشته می‌شود. سپس آزمایش تا رسیدن به بارگذاری حداکثر ادامه یافته و در طی انجام آزمایش تغییر شکل‌ها در هر مرحله ثبت می‌گردد. بر اساس معیار آیین‌نامه، شاخص رمبندگی با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$I_e = \frac{\Delta e \times 100}{1 + e_0} \quad (1)$$

جدول ۲- شاخص رمبندگی بر اساس آیین‌نامه ASTM.

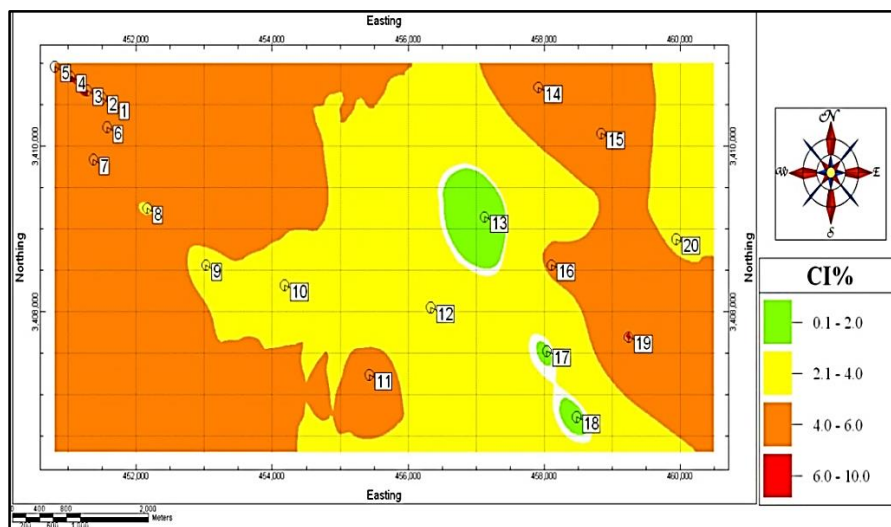
Table 2. Collapsibility intensity according to ASTM regulations.

Intensity of collapsible	( $I_e$ ) %
Non collapsible	0
A little collapsible	0.1-2
Medium collapsible	2.1-6
Much collapsible	6.1-10
Severe collapsible	10>



شکل ۱۰- توزیع فضایی لایه‌های خاک بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید تا عمق میانگین ۱۵ متر.

Fig. 10. Three-dimensional spatial distribution of soil layers according to Unified Soil Classification System to an average depth of 15 meters.



شکل ۱۱- نقشه شاخص رمبندگی CI% تا عمق ۴ متر.

Fig. 11. Map of collapsibility index CI% to an average depth of 4m.

جدول ۳- خصوصیات آماری مقاومت الکتریکی زمین بر حسب ( $\Omega m$ ) در ۲۹ سونداژ ژئوالکتریک.

Table 3. Statistical characteristics of soil electrical resistance in  $\Omega m$  in 29 geoelectric soundings.

	N	Min	Max	Mean	Std. Deviation
m $\Omega$	162	1.44	242	26.24	41.04532

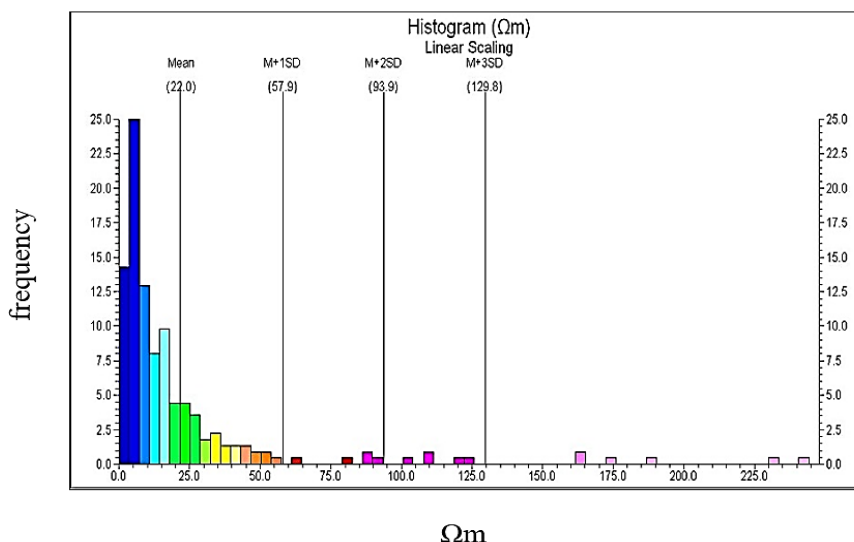

 شکل ۱۲- هیستوگرام فراوانی مقاومت الکتریکی ( $\Omega m$ ) در ۲۹ سنداژ ژئوالکتریک.

 Fig. 12. Frequency histogram of electrical resistance ( $\Omega m$ ) in 29 geoelectric soundings.

استانداردهای مختلفی برای تعیین خوردگی خاک بر اساس مقاومت الکتریکی وجود دارد که از آن میان می‌توان استانداردهای ASTM, BS را نام برد. بر اساس استاندارد BS-7361 خاک‌ها از نظر خوردگی به چهار رده تقسیم می‌شوند (جدول ۴)؛ و بر اساس ASTM (جدول ۵) - تعیین رده خوردگی خاک بر اساس استاندارد (BS-7361).

استانداردهای مختلفی برای تعیین خوردگی خاک بر اساس مقاومت الکتریکی وجود دارد که از آن میان می‌توان استانداردهای ASTM, BS را نام برد. بر اساس استاندارد BS-7361 خاک‌ها از نظر خوردگی به چهار رده تقسیم می‌شوند (جدول ۴)؛ و بر اساس ASTM (جدول ۵) - تعیین رده خوردگی خاک بر اساس استاندارد (BS-7361).

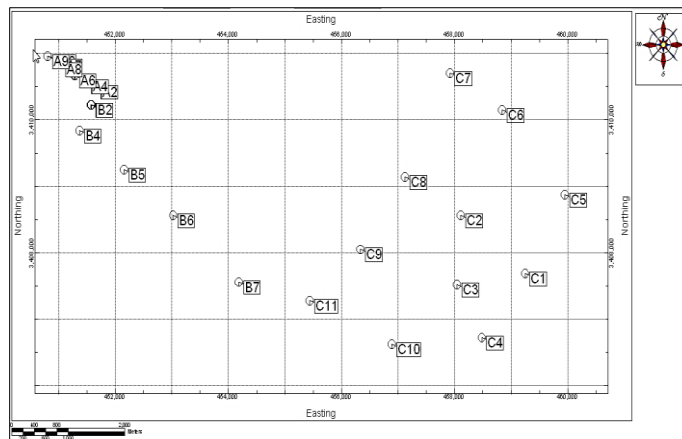
جدول ۴- تعیین رده خوردگی خاک بر اساس استاندارد (BS-7361).  
Table 4. Determination of soil corrosion class according to the standard (BS-7361).

Corrosive Classification	Soil electrical resistance ( $\Omega m$ )
severely corrosive	0-10
Corrosive	10-50
moderately corrosive	50-100
slightly corrosive	>100

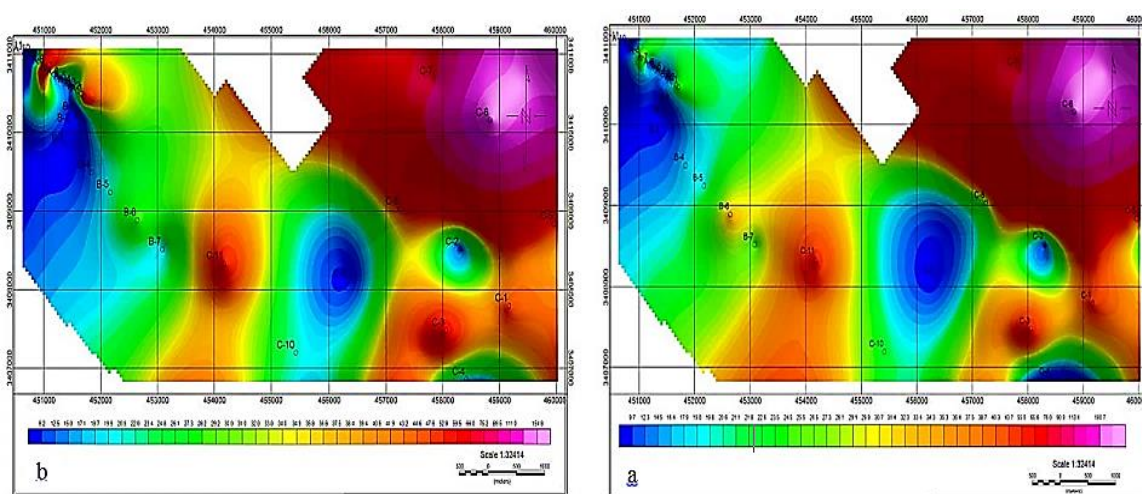
جدول ۵- تعیین رده خوردگی خاک بر اساس استاندارد (ASTM STP 1013).  
Table 5. Determination of soil corrosion class according to standard (ASTM STP 1013).

Corrosive Classification	Soil electrical resistance ( $\Omega m$ )
Severely Corrosive Very	0-9
Severely Corrosive	9-23
Moderately Corrosive	23-50
Mildly Corrosive	50-100
Very Mildly Corrosive	>100

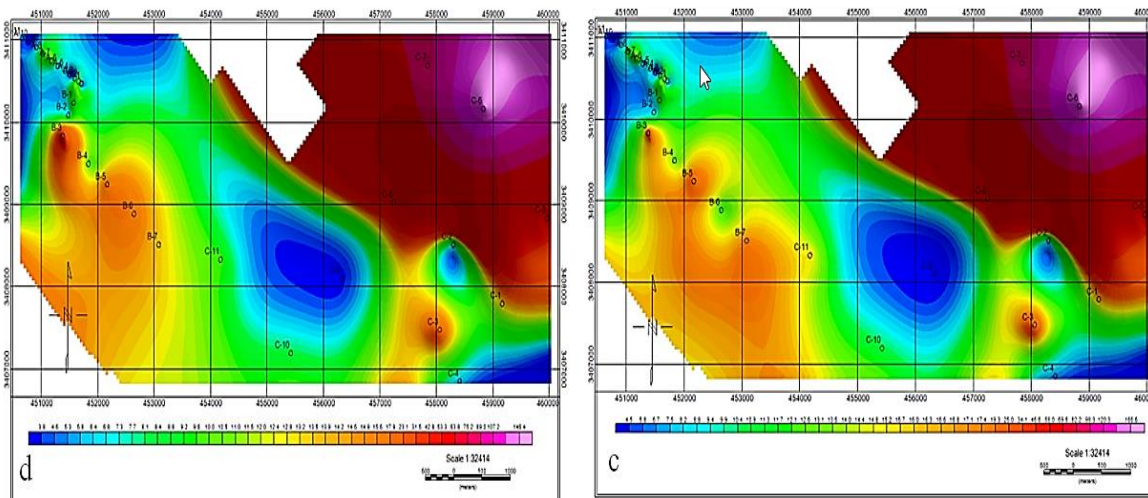




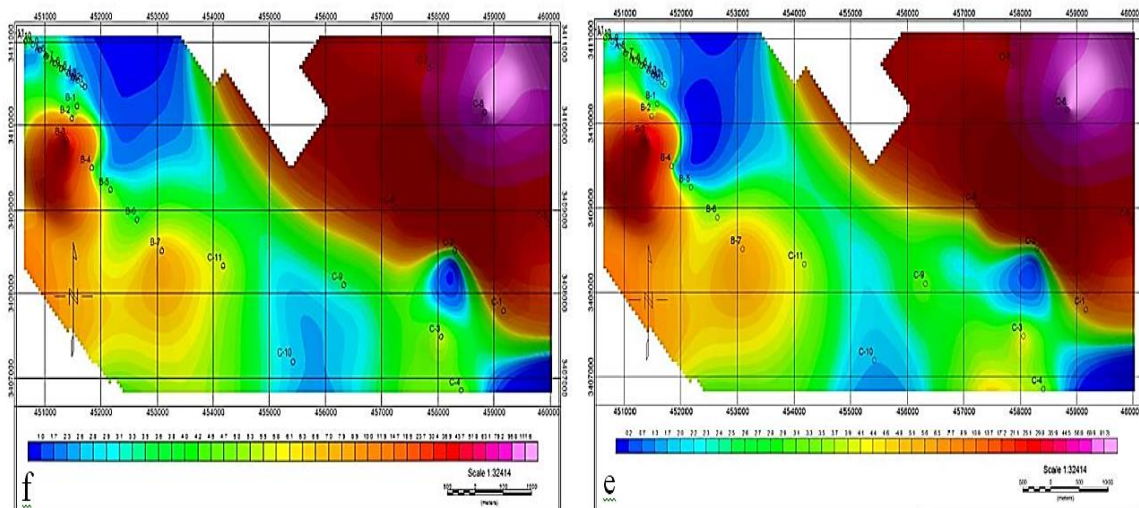
شکل ۱۳- موقعیت نقاط برداشت ژئوالکتریک.  
Fig. 13. Location of geoelectric stations.



شکل ۱۴- سطوح هم مقاومت الکتریکی در عمق (a) ۱ متر و (b) ۲ متر.  
Fig. 14. Same electrical resistance levels at depth of (a) 1m and (c) 2m.

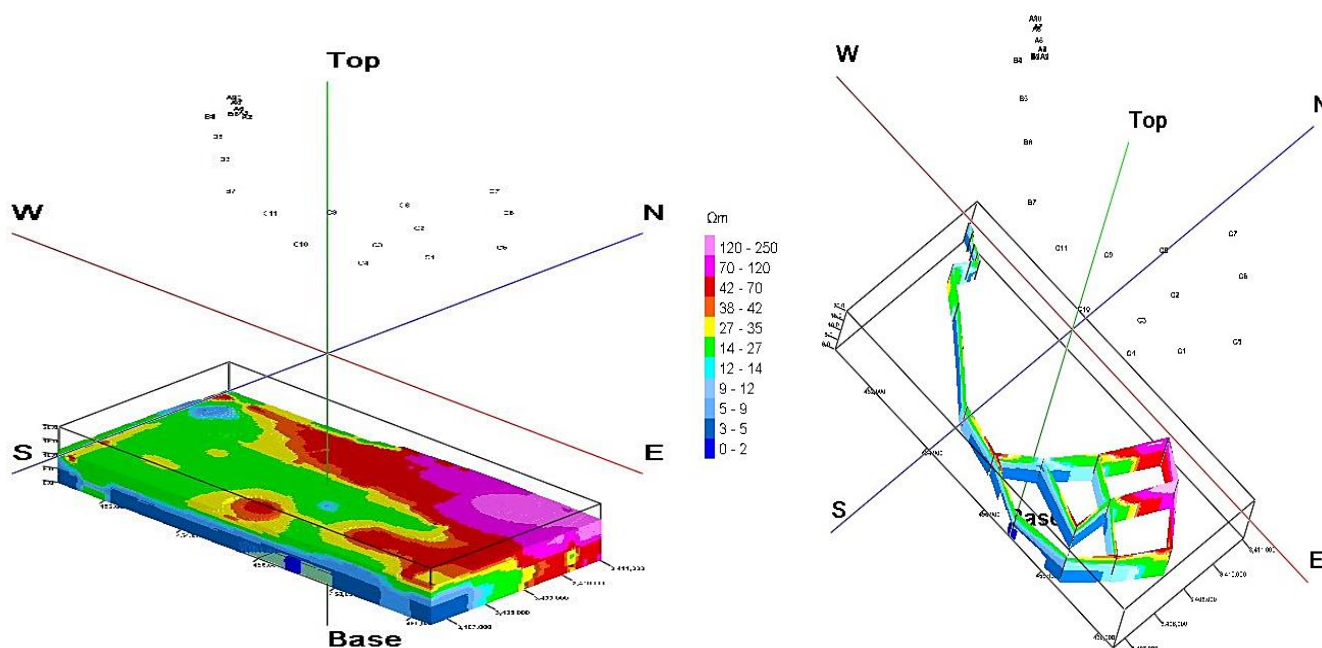


شکل ۱۵- سطوح هم مقاومت الکتریکی در عمق (c) ۴ متر و (d) ۶ متری.  
Fig. 15. Same electrical resistance levels at depth of (c) 4m and (d) 6m.



شکل ۱۶- سطوح هم مقاومت الکتریکی در عمق (e) ۸ متری و (f) ۱۰ متری.

Fig. 16. Same electrical resistance levels at depth of (e) 8m and (f) 10m.

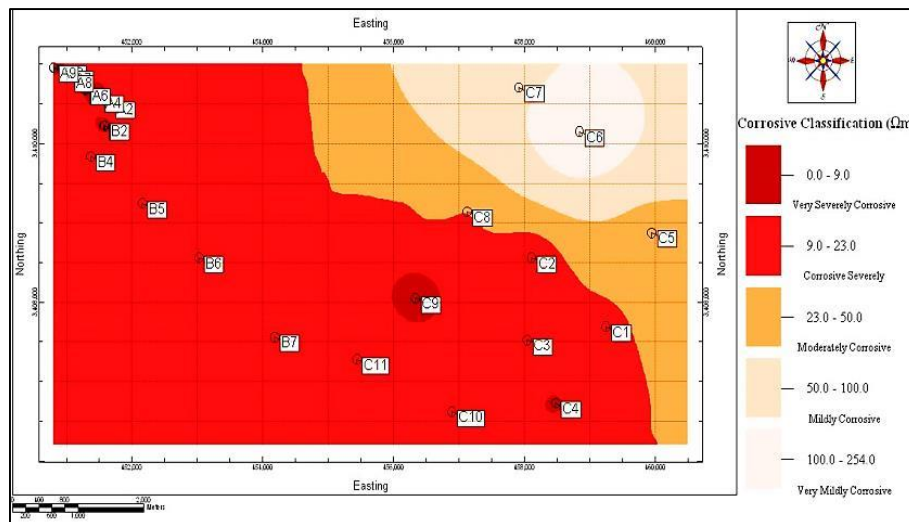


شکل ۱۷- توزیع فضایی مقاومت الکتریکی خاک برحسب ( $\Omega m$ ) تا عمق میانگین ۱۰ متر

Fig. 17. Three-dimensional spatial distribution of geophysical properties in  $\Omega m$  to an average depth of 10 meters.

شدید ارزیابی شدند. همچنین بررسی سطوح مقاومت الکتریکی و توزیع فضایی سه بعدی مقاومت الکتریکی تا عمق ۱۰ متر، نشان داد که با افزایش عمق میزان مقاومت الکتریکی خاک‌های سطحی کاهش و شدت و محدوده خوردگی خاک افزایش می‌یابد.

با بررسی نقشه‌های درصد رطوبت و سطوح هم مقاومت الکتریکی تا عمق میانگین ۴ متر نقشه خوردگی خاک‌های سطحی شهر زرنند تهیه شد (شکل ۱۸). خاک‌های سطحی مطابق با استاندارد BS-7361 و استاندارد ASTM STP 1013 عمدتاً در محدوده خوردگی متوسط و



شکل ۱۸- نقشه خوردگی خاک تا عمق میانگین ۴ متر.

Fig. 18. Soil corrosion map to an average depth of 4m.

همچنین بر اساس نقشه خوردگی خاک شهر زرنده که با تلفیق درصد رطوبت و سطوح هم مقاومت الکتریکی زمین تا عمق میانگین ۴ متر تهیه شد، خاک‌های سطحی مطابق با استاندارد BS-7361 و استاندارد ASTM STP 1013 عمدتاً در محدوده خوردگی متوسط و شدید ارزیابی شدند. بررسی سطوح مقاومت الکتریکی و توزیع فضایی سه‌بعدی مقاومت الکتریکی تا عمق ۱۰ متر نشان داد که با افزایش عمق، میزان مقاومت الکتریکی خاک‌های سطحی کاهش و شدت و محدوده خوردگی خاک افزایش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

بررسی توزیع فضایی و برش‌های ایجاد شده لایه خاک بر طبق طبقه‌بندی یونیفاید نشان می‌دهد خاک‌های شهر زرنده از نوع CL، CL-، ML، SC، SC-SM و ML می‌باشد و عمده این خاک‌ها از نوع CL با میان لایه‌هایی از دیگر نوع خاک‌ها از جمله ماسه‌بادی است. این لایه‌های ماسه‌بادی در برخی افق‌ها بدون هیچ سیمان شدگی و چسبندگی حالت کاملاً روان دارند و در برخی موارد با سیمان رسی می‌باشند که مطابق با نقشه‌های کلاس‌بندی بافت غالب خاک، وزن واحد حجم خشک و معیار آیین‌نامه (۲۰۰۲) ASTM در محدوده رمبندگی متوسط قرار می‌گیرند.

### منابع

- Aghamolaie, I., Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M. Hafezi Moghadas, N., 2019. 3D geotechnical modeling of subsurface soils in Kerman city, southeast Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 1385–1400.
- Asa, E., Saafi, M., Membah, J., Billa, A., 2012. Comparison of linear and nonlinear kriging methods for characterization and interpolation of soil data. *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, 11- 8.
- ASTM D 5333., 2002. Standard test method for measurement of collapse potential of soils. *Annual book of ASTM Standards* 04, 1197–1199.
- ASTM D2435/D2435., 2020. Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading.
- ASTM STP 1013., 1989. Effects of Soil Characteristics on Corrosion. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- BS 7361-1., 1991. Cathodic Protection Part 1: Code of Practice for Land and Marine Applications.
- Crawford, M.M., Zhu, J., Webb, S.E., 2015. Geologic, geotechnical, and geophysical investigation of a shallow landslide, eastern Kentucky. *Environmental and Engineering Geoscience* 21(3), 181–195.
- Daneshmand, V., Mosavvari, F., Mahmudi Gharaii, M.H., Ghasemi, A., 1995. Zarand Geological map 1:100000 Geological Survey and Mineral Exploration Organization (in Persian).
- De Beer, J., Price, S.J., Ford, J.R., 2012a. 3D modeling of geological and anthropogenic deposits at the world Heritage Site of Bryggen in Bergen, Norway. *Quatern International* 251, 107-116.
- De Rienzo, F., Oreste, P., Pelizza, S., 2008. Subsurface geological–geotechnical modelling to sustain underground civil planning. *Engineering Geology* 96, 187–204.



- Di Maio, R., Fabbrocino, S., Forte, G., Piegari, E., 2014. A three-dimensional hydrogeological– geophysical model of a multi-layered aquifer in the coastal alluvial plain of Sarno River (southern Italy). *Hydrogeology Journal* 22(3) 691–703.
- Di Maio, R., Piegari, E., 2011. Water storage mapping of pyroclastic covers through electrical resistivity measurements. *Journal of Applied Geophysics* 75, 196–202.
- Escalante, E., 1957. Concert of underground corrosion, National Bureau of Standard 4- No/579, reprinted by NACE
- Ford, J., Burke, H., Royse, K., Mathers, S., 2008. The 3d geology of London and the Thames gateway: A modern approach to geological surveying and its relevance in the urban environment. In 2nd European Conference of International Association of Engineering Geology, Euroengeo 2008, Madrid, Spain.
- Giocoli, A., Stabile, T.A., Adurno, I., Perrone, A., Gallipoli, M.R., Gueguen, E., Norelli, E., Piscitelli, S., 2015. Geological and geophysical characterization of the southeastern side of the High Agri Valley (southern Apennines, Italy). *Nat. Natural Hazards and Earth System Sciences* 15, 315–323.
- Hettiarachchi, H., Brown, T., 2009. Use of SPT blow counts to estimate shear strength properties of soils: energy balance approach. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental* 135, 830–834.
- In Berg, R., Mathers, S., Kessler, H., Keefer, D., 2011. Synopsis of Current Three-dimensional Geological Mapping and Modeling in Geological Survey Organizations, Illinois State Geological Survey and British Geological Survey, 42–47.
- Jones, N.L., Wright, S.G., 1993. Subsurface characterization with solid models. *J.Geotechnical. Engineering*. 119, 1823–1839.
- Karim P.G.M.F., 2018. The Challenges of Geotechnical Exploration for a Sustainable Urban Development and Engineering Geological Risk Reduction in Bangladesh, International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG).
- Kessler, H., Mathers, S., Sobisch, H.-G., 2009. The capture and dissemination of integrated 3D geospatial knowledge at the British Geological Survey using GSI3D\_ software and methodology. *Computers & Geosciences* 35, 1311-1321.
- Khan, U., Niaz, A., Basharat, M., 2018. Evaluating the geological structure of landslides through hydrogeological modeling of subsurface sections, using an integrated geophysical approach. *GRD Journals* 3(12).
- Kostic, B., Suess, M., Aigner, T., 2007. Three-dimensional sedimentary architecture of quaternary sand and gravel resources: A case study of economic sedimentology (SW Germany). *International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau)* 96, 743–767.
- Lemon, A.M., Jones, N.L., 2003. Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections. *Computers & Geosciences* 29, 547–555.
- Nasseh, S., Hafezi Moghaddas, N., Ghafoori, M. et al., 2018. Investigation of spatial variability of SPT data in Mashhad City (NE Iran) using a geostatistical approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 77, 441–455.
- Norin, M., 1998. Groundwater and soil properties in an urban environment and their effects on the corrosion of soil buried constructions of carbon, steel and zinc. Department of Geology. Chalmers University of Technology, Goteborg.
- Orozco, A.F., Bucker, M., Steiner, M., Malet, J., 2018. Complex-conductivity imaging for the understanding of landslide architecture. *Engineering Geology* 243, 241–252.
- Piegari, E., Di Maio, R., 2013. Estimating soil suction from electrical resistivity. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 2369–2379.
- Rezaei, S., Shooshpasha, I., Rezaei, H., 2019. Reconstruction of landslide model from ERT, geotechnical, and field data, Nargeschal landslide, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78(5), 3223-3237.
- Royse, K.R., 2010. Combining numerical and cognitive 3D modelling approaches in order to determine the structure of the Chalk in the London Basin. *Computer Geosciences* 36, 500-511.
- Skipper, J., Follett B., Menkiti C.O., Long M., Clark-Hughes J., 2005. The engineering geology and characterization of Dublin Boulder Clay", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 38, 171-187
- Tonini, A., Guastaldi, E., Massa, G., Conti, P., 2008. 3D geo-mapping based on surface data for preliminary study of underground works: a case study in Val Topina (Central Italy). *Engineering Geology* 99, 61-69.
- Touch, S., Likitlersuang, S., Pipatpongsa, T., 2014. 3D geological modeling and geotechnical characteristics of Phnom Penh subsoils in Cambodia. *Engineering Geology* 178, 58-69.



- Yousefi, M., 1999. Investigation of Quantitative and Qualitative Developments of Zarand Plain Aquifer, Research Project of Water Resources Research Center, Water Resources Management Organization of Iran.
- Zarroca, M., Linares, R., Roqué, C., Rosell, J., Gutiérrez, F., 2014. Integrated geophysical and morphostratigraphic approach to investigate a coseismic translational slide responsible for the destruction of the Montclús village (Spanish Pyrenees). *Landslides* 11, 655–671.
- Zhao, Y., Li, J., 2010. The application of the three-dimensional geological model in the exploration of mentougou new town. *Applied Techniques* 5, 1–6.