

## Correlation between electrical resistivity and shear strength parameters in construction sites located in Lali city, Khuzestan Province, Iran

Ahmad Neyamadpour<sup>1\*</sup>

1- Department of Geophysics, Masjed- Soleiman Branch, Islamic Azad University, Masjed- Soleiman, Iran

**Keywords:** Cohesion, Internal angle of friction, Electrical resistivity, Correlation, Regression

### 1-Introduction

Determining the geotechnical parameters of the soil is essential for the proper design of each building structure (Siddiqui and Osman, 2012). Sampling by drilling boreholes and performing geotechnical tests on them is the most common method for determining these parameters (Kazmi et al., 2016). Due to the large spatial and temporal variations in soil properties, high density sampling is required to accurately evaluate geotechnical parameters. However, this method is very costly and time-consuming (Siddiqui and Osman, 2013). Therefore, a non-destructive and rapid alternative method for assessing soil properties in the site of construction is very necessary. Geoelectric exploration has been widely used to determine the engineering and geological characteristics of site structures due to the speed of their work, their cost-effectiveness and their non-destructive nature.

This paper presents the results of a field study to develop the correlation between electrical resistivity and some geotechnical parameters such as cohesion (C), and internal angle of friction ( $\phi$ ) using laboratory analyzes of 84 samples obtained from drilling operations at the site of a residential building structure located in the city of Lali, located southwest of Iran.

### 2-Methodology

The study area is a flat ground with an approximate area of 4,800 square meters, which is considered as a site for the construction of a building structure. This land is located in the city of Lali, southwest of Iran. To perform this study, 7 boreholes were drilled up to a depth of approximately 28 meters. From each borehole, 12 samples were prepared by the Koken (core drilling rig) model RPD-30C-A2. The depth of the center of the samples in each borehole is 0.5, 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 8.0, 10.0, 13.0, 16.0, 20.0, 24.0, 28.0 meters. The temperature of each sample was measured after drilling. Then, samples were transferred to geotechnical laboratory to measure electrical resistivity, Cohesion (C) and internal angle of friction ( $\phi$ ). The geotechnical parameters were measured by the proposed methods in British Standard (BS). Regression operations were performed to determine the relationship of the parameters C and  $\phi$  with the electrical resistivity of the samples and a three-dimensional distribution of these parameters was displayed.

#### 2-1- Electrical resistivity tomography

Electrical resistivity tomography is one of the geoelectric methods that examines sub-surface structures. The main advantage of this method in comparison to other geoelectric methods is the simultaneous examination of lateral and vertical variations of electrical resistivity, high resolution, fast data capture and low cost (e.g., Loke et al, 2016). In this method, the electrical current (I) is injected by two metal electrodes (C1 and C2) on the studied ground and the electrical potential difference ( $\Delta v$ ) created at ground surface is measured by two other metal electrodes (P1 and P2). By choosing different values for distances of the current and potential electrodes, the values of the apparent electrical resistivity of a large number of sub-surface points can be determined using the following equation:

\*Corresponding author: dranpour@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.30485.2022

Received 2019-05-31

Accepted 2020-03-15

$$\rho = K \times \Delta v / I$$

(E.q.1)

In this relation, K is dependent on the position of the electrodes and their distance, and is called the geometric factor. The apparent electrical resistivity data must be converted to true electrical resistivity data using inversion operations.

## 2-2- Measuring the electrical resistivity of the samples in the laboratory

The ABEM Terrameter SAS 1000 device was used to measure electrical resistivity of the samples in the laboratory as well as field measurements. The electrode array used by this device was also dipole-dipole (Fig. 1). The distance between the C2-C1 and P1-P2 electrodes was 5 cm and the distance between the electrodes C1-P1 was 15 cm. Electrodes C2, C1, P1 and P2 are copper needles with a diameter of 1 mm and a length of 3 cm. They are in contact with the specimen through the holes embedded in the PVC container body. The setting of electrical resistivity measurement device is made in such a way that the maximum injected electrical current is 10 mA.

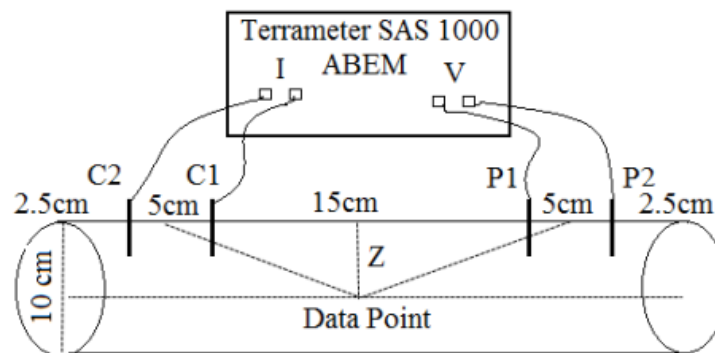


Fig. 1. Schematic of device to measure electrical resistivity of samples in laboratory using dipole - dipole array.

## 2-3- Correction of temperature effect on electrical resistivity measured in laboratory

The electrical resistivity measurements in the laboratory were performed on 84 samples from 7 drilled boreholes at 25 °C. The temperature of the samples that were measured locally and immediately after drilling ranged from 25 to 36 °C. In this study, the electrical resistivity measured at 25 °C in the laboratory was corrected according to the measured temperature of the samples in situ. The electrical resistivity of the samples after the temperature correction has a range of variations between 4.02 and 310 ohm.m, and the average electrical resistivity is 77.291 Ohm.m.

## 2-4- Soil investigation

A total of 84 soil samples taken from 7 boreholes (BH-1 to BH-7), were subjected to direct shear test and gravimetric water content was determined. The minimum, maximum, and average parameters of C and  $\phi$ , as well as the number of samples with the same lithology, are presented in Table 1.

Grain-size analysis shows that 63.1% of the total samples include soft clay ( $\rho \leq 25$  ohm.m) and compacted clay ( $75 \leq \rho \leq 180$ ) according to British Soil Classification System (BSCS). Based on grain-size distribution analysis, it can be concluded that Clayey Sand ( $\rho \geq 180$  ohm.m) and silt ( $45 \leq \rho \leq 55$ ) each make up 9.5% of the total. Silt-Clay ( $25 \leq \rho \leq 50$ ) and silt - sand ( $50 \leq \rho \leq 75$ ) lithology samples make up 10.7% and 7.2% of total samples, respectively. The electrical resistivity of each lithological category was measured directly in laboratory.

The average value of W show that the highest and lowest amount of the gravimetric water content are related to soft clay and clayey sand samples, respectively. Also, the average W of the silt - Clay samples is higher than the silt - sand samples, and both of these samples have larger gravimetric water content than silt samples.

The results of direct shear test show that C and  $\phi$  values for soft clay and clayey sand samples respectively have the lowest and highest values among all samples. C and  $\phi$  values for compacted clay samples are greater than those for silt samples. Silt samples compare with silt - sand samples have higher mean value of  $\phi$  and lower mean value of C. The mean values of  $\phi$  and C parameters for silt samples are greater than those for silt - clay samples.

Table 1. The range of changes in parameters C and  $\phi$  for soil specimens.

Lithology	Soft Clay	Compacted Clay	Clayey Sand	Silt	Silty Clay	Silty Sand	
No. of Samples	28	25	8	8	9	6	
C(KPa)	Max.	28.818	42.452	54.119	31.38	28.468	35.287
	Min.	18.015	26.374	30.539	22.04	20.91	23.89
	Mean	20.683	34.317	41.847	26.346	24.342	28.025
$\phi(^{\circ})$	Max.	33.356	39.9	46.557	33.774	32.769	36.984
	Min.	22.019	29.638	30.249	27.665	25.261	26.847
	Mean	27.209	33.476	37.270	31.261	28.616	30.722

### 3- Results and discussion

Laboratory measurements related to geotechnical parameters (C, and  $\phi$ ) as well as electrical resistivity of 72 samples obtained from 6 boreholes (BH-1 to BH-6) were investigated to determine the empirical relation of electrical resistivity with any of the geotechnical parameters (W, C, and  $\phi$ ). The least-square regression method was used to develop a correlation between electrical resistivity and each of parameters W, C, and  $\phi$ . The functions of linear ( $y = ax + b$ ), logarithmic ( $y = a \ln(x) + b$ ), power ( $y = ax^b$ ) and polynomial ( $y = ax^2 + bx + c$ , and  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ) were used to perform regression operations and in each case the values of the coefficient of multiple determination ( $R^2$ ) and adjusted coefficient of multiple determination ( $R_a^2$ ) were calculated. In the case of the correlation between  $\rho$  and C for all soil sample and soft clay categories, the  $R^2$  coefficient for the power and polynomial functions is greater than the  $R^2$  coefficient for the linear function. However, because the difference between the coefficients  $R^2$  and  $R_a^2$  ( $R^2 - R_a^2 = 0.0031$  for all samples and  $R^2 - R_a^2 = 0.0268$ ) is lower than the other functions in the Linear function, so the following linear relation with the coefficients  $R^2 = 0.7769$  and  $R_a^2 = 0.7738$  was chosen as the most suitable correlation for all soil samples:

$$C = 1.005\rho + 20.4130 \quad (\text{E.q. 2})$$

The values of  $R^2 = 0.2953$  and  $R^2 - R_a^2 = 0.0352$  suggests a weak logarithmic relation between  $\rho$  and C for compacted clay category.

Table 4 shows a weak logarithmic relation between  $\rho$  and  $\phi$  for soft clay ( $R^2 = 0.0818$ ,  $R^2 - R_a^2 = 0.0317$ ) and compacted clay ( $R^2 = 0.1024$ ,  $R^2 - R_a^2 = 0.0449$ ) categories. Based on the results shown in Table 4, the following linear relationship with coefficients  $R^2 = 0.5372$  and  $R_a^2 = 0.5305$  was chosen as the best correlation between  $\rho$  and  $\phi$  for all soil samples category (Fig. 4c):

$$\phi = 0.0491\rho + 27.058 \quad (\text{E.q. 3})$$

It should be noted that the value of the  $R^2$  coefficient for the polynomial function is greater than the linear function, but since the  $R^2 - R_a^2$  value for the linear function (0.0067) is less than the polynomial function, the linear function was selected as the most suitable correlation. The value of  $R^2 - R_a^2$  for the exponential function is equal to the corresponding value for the linear function, but since the  $R^2$  coefficient for this function (0.5366) is less than the corresponding value for the Linear (0.5372) function, the Linear function was also chosen as the most suitable correlation between  $\rho$  and  $\phi$ .

#### 3-1- Validation of regression results

For the validation of relations (2), (3), and (4), the values of the parameters W, C, and  $\phi$  for the 12 samples obtained from the BH-7 borehole, which had not been used previously in the regression operation, were estimated ( $W_{\text{Estimated}}$ ,  $C_{\text{Estimated}}$  and  $\phi_{\text{Estimated}}$ ). Then, the obtained values were compared with the corresponding values measured in the laboratory ( $W_{\text{Measured}}$ ,  $C_{\text{Measured}}$ , and  $\phi_{\text{Measured}}$ ).

#### 4-Conclusions

The development of a correlation between the electrical resistivity and each of the three geotechnical parameters  $C$ , and  $\phi$  showed that a linear relationship exists between the electrical resistivity and the parameters  $C$  and  $\phi$ . Based on the regression analysis, there is a relatively strong correlation with the coefficient of 0.7769 between the electrical resistivity and the cohesion parameter. The results showed that the electrical resistivity relationship with each of parameters of cohesion and internal angle of friction is linear.

#### References

- Kazmi, D., Qasim, S., Siddiqui, F.I., Azhar, S.B., 2016. Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils. *International Journal of Engineering Science Invention* 5 (6), 33-35.
- Loke, M.H., 2016. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Siddiqui, F.I., Osman, S.B.A.B.S., 2013. Integrating Geo-Electrical and Geotechnical Data for Soil Characterization. *International Journal of Applied Physics and Mathematics* 2(2), 104-106.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Neyamadpour, A., 2021. Correlation between electrical resistivity and shear strength parameters in construction sites located in Lali city, Khuzestan Province, Iran. *Adv. Appl. Geol.* 10(4), 585-597.  
DOI: 10.22055/AAG.2020.30485.2022  
url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_15494.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_15494.html?lang=en)

## تعیین همبستگی بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامترهای مقاومت برشی در محل ساخت ساختمانی واقع در شهر لالی، استان خوزستان

احمد نیامدپور

گروه ژئوفیزیک، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی، مسجد سلیمان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۵

\* [dranpour@gmail.com](mailto:dranpour@gmail.com)

### چکیده

شیوه‌های متداول برای تعیین خواص ژئوتکنیکی خاک، معمولاً پرهزینه، مخرب و زمان بر هستند. مقاومت ویژه الکتریکی، یکی از ویژگی‌های خاک‌های زیرسطحی می‌باشد که بدون هرگونه تخریب خاک‌های زیرسطحی بسادگی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. توسعه یک همبستگی قابل قبول بین مقاومت الکتریکی و پارامترهای مقاومت برشی در محل ساخت سازه‌های ساختمانی بسیار سودمند است. در این مطالعه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت الکتریکی، یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توسعه داده شد. بر اساس آنالیز رگرسیون انجام شده، یک همبستگی نسبتاً قوی با ضریب همبستگی ۰٫۷۷۶۹ بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامتر چسبندگی وجود دارد. همچنین نتایج عملیات رگرسیون نشان دهنده یک همبستگی نسبتاً خوب (۰٫۵۳۷۲) بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامتر زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد. نتایج نشان دادند که رابطه مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برشی در محل ساخت ساختمانی واقع در شهر لالی، استان خوزستان بصورت خطی می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت الکتریکی، همبستگی، رگرسیون

### مقدمه

Braga و همکاران (۱۹۹۹) یک کاوش مقاومت الکتریکی را در ساختار

زمین‌شناسی مشتمل بر رس و شن انجام دادند و یک همبستگی نسبتاً ضعیف را بین مقاومت الکتریکی و آزمون نفوذ استاندارد (SPT) تعیین کردند. Sudha و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از توموگرافی دوبعدی مقاومت الکتریکی رابطه بین SPT و مقاومت الکتریکی مربوط به دو مکان معین در کشور هند را تعیین کردند. Syed و همکاران (۲۰۱۱) رابطه میان مقاومت الکتریکی و برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، واحد وزن و ... را بر روی نمونه های همگنی از شن، سیلت و رس در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه کردند. مطالعه آنها یک همبستگی ضعیف بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی با مقاومت الکتریکی شن و سیلت و یک همبستگی نسبتاً خوب بین این دو پارامتر با مقاومت الکتریکی نمونه های رسی نشان داد.

این مقاله نتایج یک مطالعه میدانی برای توسعه همبستگی بین مقاومت الکتریکی و برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی از قبیل (C) چسبندگی و  $(\Phi)$  زاویه اصطکاک داخلی با استفاده از آنالیزهای آزمایشگاهی ۸۴ نمونه بدست آمده از عملیات حفاری در محل ساختگاه یک سازه مسکونی که در شهر لالی واقع در استان خوزستان که در جنوب غرب ایران قرار دارد را ارائه می‌دهد (شکل ۱). ابتدا یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و هر کدام از دو پارامتر ژئوتکنیکی ذکر شده توسط ۷۲ نمونه تهیه شده از ۶ گمانه توسعه داده می‌شود. سپس برای ارزیابی رابطه ریاضی بدست آمده از عملیات رگرسیون، مقادیر این پارامترهای

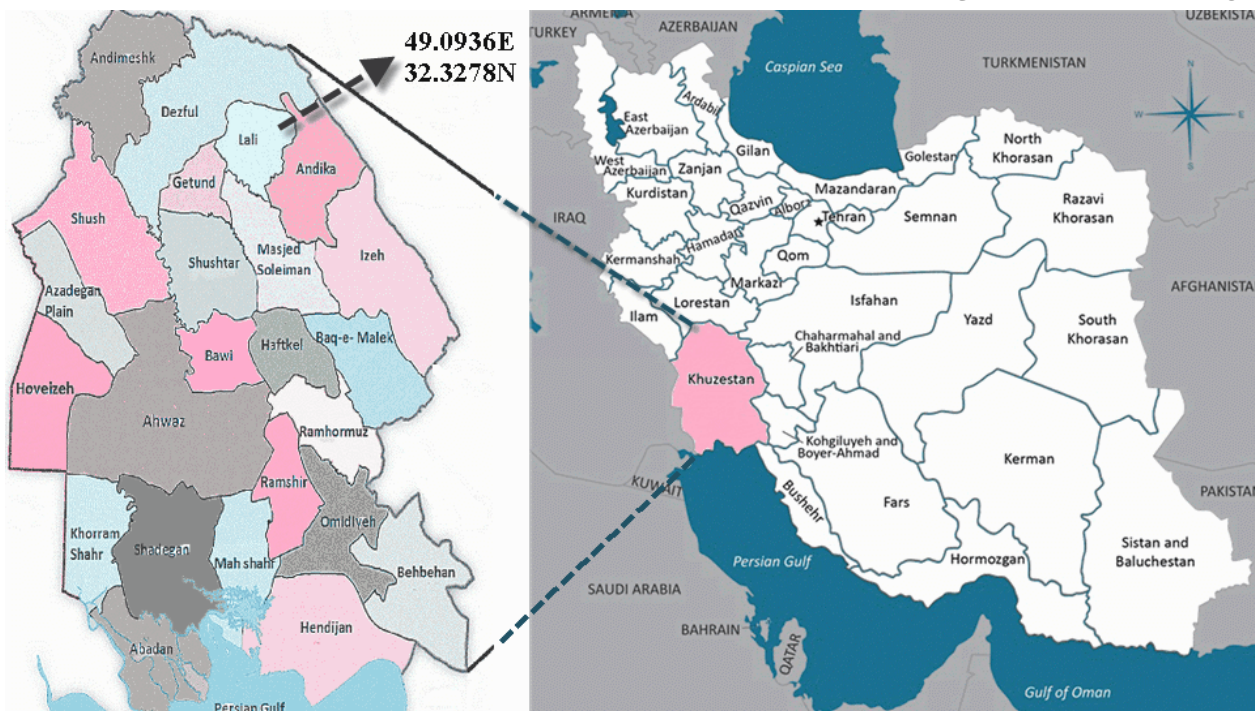
تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی خاک، برای طراحی مناسب هر سازه‌ای ضروری می‌باشد (Cosenza et al., 2006; Siddiqui and Osman, 2013). نمونه برداری توسط حفر گمانه و انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی روی آنها، متداولترین روش برای تعیین این پارامترها می‌باشد (Kazmi et al., 2016). با توجه به تغییرات مکانی و زمانی بسیار زیاد خواص خاک، نمونه برداری با تراکم بالا، جهت ارزیابی دقیق پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز است. با این وجود این روش بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشد (Pozdnyakova 1999). بنابراین یک روش جایگزین غیر مخرب و سریع برای ارزیابی خواص خاک در محل ساخت سازه‌ها بسیار ضروری است.

کاوش‌های ژئوالکتریکی بخاطر سرعت انجام کار، مقرون به صرفه بودن و ماهیت غیر مخربشان، بطور گسترده در تعیین خصوصیات مهندسی و زمین‌شناسی ساختگاه سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است (Samouelian et al., 2003).

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) یک تکنیک ژئوالکتریکی است که به بررسی تغییرات جانبی و قائم مقاومت الکتریکی ساختارهای زیرسطحی در دو یا سه بعد می‌پردازد. تعداد مطالعات اندکی تا کنون جهت تعیین یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های گوناگون انجام شده است.

ژئوتکنیکی برای نمونه‌های گمانه هفتم که قبلا در عملیات رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفتند توسط این رابطه تخمین زده شده و با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه می‌گردند. جهت افزایش دقت نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی از یک آرایش الکترودی معین

دوقطبی - دوقطبی) در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی استفاده می‌شود. آرایش الکترودی دوقطبی دوقطبی در توמוگرافی دوبعدی و سه بعدی مقاومت الکتریکی بسیار کاربرد دارد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان لالی در استان خوزستان.

Fig. 1. Geographical location of Lali city in Khuzestan Province.

### زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

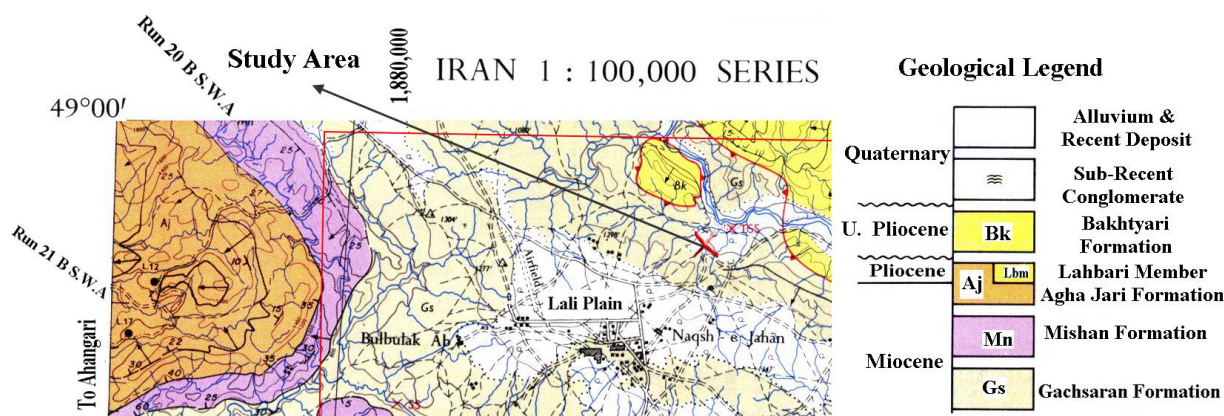
لهبری، کنگلومرای بختیاری و نهشته‌های آبرفتی عهد حاضر به ترتیب قدمت با سن های، کرتاسه ائوسن - پلیوسن و الیگوسن میوسن پلیوسن تا کواترنر می‌باشند. قابل ذکر است که محل مورد نظر در این مطالعه ناحیه کوچکی به مساحت ۴۸۰۰ متر مربع می باشد و بدیهی است که شامل همه سازندهای فوق الذکر نمی‌باشد (شکل ۲).

### روش کار

منطقه مورد مطالعه یک زمین مسطح به مساحت تقریبی ۴۸۰۰ متر مربع می‌باشد که بعنوان ساختمانی برای ساخت یک سازه در نظر گرفته شده است. این زمین در شهرستان لالی واقع در جنوب غرب ایران قرار دارد. برای انجام این مطالعه تعداد ۷ گمانه تا عمق تقریبی ۲۸ متر که موقعیت آنها در شکل ۳ نشان داده شده است حفر گردید. از هر گمانه تعداد ۱۲ نمونه توسط دستگاه نمونه گیری Koken (coredrilling Rig) مدل RPD-30C-A2 تهیه گردید. عمق مربوط به مرکز نمونه‌ها در هر گمانه ۰٫۵، ۱٫۵، ۳٫۰، ۴٫۵، ۶٫۰، ۸٫۰، ۱۰٫۰، ۱۳٫۰، ۱۶٫۰، ۲۰٫۰، ۲۴٫۰ و ۲۸٫۰ متر می‌باشد.

کمبرند چین‌خورده و راندگی زاگرس بخشی از کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا است که در حاشیه شمال خاوری صفحه عربستان قرار گرفته است (Berberian and King, 1981). این کمربند کوهزایی شامل ۹ تا ۱۴ کیلومتر از رسوبات کامبرین تا عهد حاضر می‌باشد که بر روی پی‌سنگ کامبرین قرار گرفته‌اند. تکامل ساختاری و زمین‌ساختی کمربند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی (۱) فرورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان به زیر پوسته قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، (۲) جاگیری و رورانش پوسته اقیانوسی تتیس جوان بر روی حاشیه صفحه آفری - عربی و توسعه افیولیت‌های زاگرس در اواخر کرتاسه، (۳) برخورد قاره ای - قاره ای صفحه آفری - عربی با صفحه ایران در اواخر کرتاسه به بعد صورت گرفته است (Alavi, 2004).

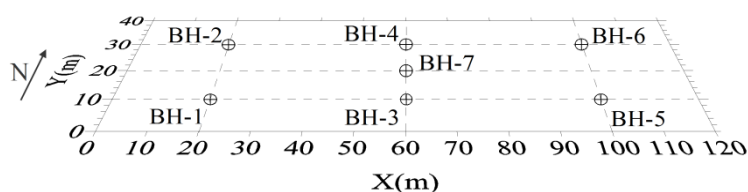
سازندهای منطقه مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل آهک های ایلام - سروک، سازند شیلی - آهکی پابده، سازند دولومیتی شهبازان، سازند مارنی - آهکی گورپی، لایه های گچ و مارن گچساران، تناوب لایه های مارنی - آهکی میشان، سازند ماسه سنگی - مارنی آغاجری، بخش



شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه.  
Fig. 2. Geological map of the study area.

پیشنهادی در شیوهنامه استاندارد بریتانیا (British Standard: BS) مورد اندازه گیری قرار گرفتند. سپس عملیات رگرسیون برای تعیین رابطه پارامترهای C و  $\phi$  با مقاومت الکتریکی نمونه‌ها انجام گردید.

دمای هر نمونه بلافاصله پس از حفر گمانه مربوطه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. سپس نمونه‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) به آزمایشگاه ژئوتکنیک منتقل گردیدند. پارامترهای ژئوتکنیکی ذکر شده توسط روش‌های



شکل ۳- نمای شماتیک از موقعیت گمانه‌های حفر شده در این مطالعه.  
Fig.3. Schematic location of drilled boreholes.

$$\rho = K \times \frac{\Delta v}{I} \quad (1)$$

در این رابطه  $K$  به نحوه قرار گرفتن الکترودها و فاصله آنها از همدیگر وابسته است و به آن فاکتور هندسی گفته می‌شود. مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده توسط رابطه (۱) بر این فرض استوار است که مواد تشکیل دهنده زیر سطحی همگن می‌باشند. با توجه به ناهمگن بودن مواد زیرسطحی در طبیعت، داده‌های مقاومت الکتریکی ظاهری باید توسط عملیات اینورژن و با استفاده از نرم افزارهایی نظیر RES2DINV یا RES3DINV به مقاومت الکتریکی حقیقی برگردانده شوند. در این مطالعه از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه استفاده شد، زیرا کاربرد وسیعی در عملیات داده‌برداری دوبعدی و سه بعدی مقاومت الکتریکی دارد. این آرایه الکترودی دارای پوشش داده‌های نسبتاً خوب در ابتدا و انتهای پروفیل می‌باشد و همچنین دارای وضوح افقی بسیار مناسبی است (Loke, 2016).

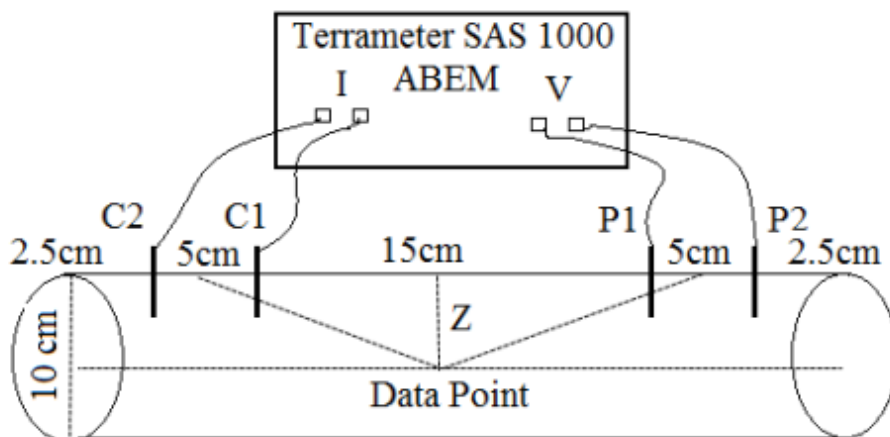
### توموگرافی مقاومت الکتریکی

توموگرافی مقاومت الکتریکی یکی از روش‌های ژئوالکتریکی است که به بررسی ساختارهای زیر سطحی می‌پردازد. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌های ژئوالکتریکی، بررسی همزمان تغییرات جانبی و قائم مقاومت الکتریکی، قدرت تفکیک زیاد، قابلیت برداشت سریع داده‌ها و هزینه اندک می‌باشد (e.g. Loke, 2016; Dahlin, 2001). در این روش جریان الکتریکی (I) توسط دو الکتروود فلزی (C1 و C2) در سطح زمین مورد مطالعه تزریق می‌شود و اختلاف پتانسیل الکتریکی ( $\Delta v$ ) ایجاد شده در سطح زمین توسط دو الکتروود فلزی دیگر (P1 و P2) اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۴).

در مطالعات صحرایی با افزایش فاصله الکترودها جریان الکتریکی، عمق کاوش نیز افزایش می‌یابد. با انتخاب مقادیر مختلف برای فاصله الکترودهای جریان و پتانسیل می‌توان مقادیر مقاومت الکتریکی ظاهری تعداد زیادی از نقاط زیرسطحی را با استفاده از رابطه زیر تعیین نمود:

مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی هستند اما در عملیات برداشت صحرائی و اندازه‌گیری خصوصیات الکتریکی زمین باید توجه داشت که مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده مقاومت ظاهری می‌باشد و قبل از بکارگیری در روابط همبستگی بدست آمده لازم است که مدلسازی معکوس توسط نرم‌افزارهای مربوط از قبیل RES2DINV انجام شود.

با توجه به کوچک بودن نمونه‌های برداشتی، ناهمگنی مورد بحث در بیشتر منابع پیرامون داده‌های صحرائی در چنین مقیاسی مورد نظر نمی‌باشد. بنابراین مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در این مقاله برای روی نمونه‌های آزمایشگاهی، همان مقدار مقاومت الکتریکی واقعی می‌باشد. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده به همین شکل قابل استفاده در ایجاد همبستگی با پارامترهای مقاومت برشی خاک



شکل ۴- نمای شماتیک از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در آزمایشگاه با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی - دوقطبی.

Fig. 4. Schematic of device to measure electrical resistivity of samples in laboratory using dipole - dipole array.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در آزمایشگاه برای ۸۴ نمونه تهیه شده از ۷ گمانه حفاری شده در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد صورت گرفت. دمای نمونه‌های تهیه شده که در محل و بلافاصله بعد از حفاری اندازه‌گیری شدند دارای گستره ای بین ۲۵ تا ۳۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با افزایش عمق نمونه‌ها، دمای آنها نیز بیشتر می‌گردد. افزایش دما، مقاومت الکتریکی خاک را به دلیل تحریک یونی کاهش می‌دهد (Kazmi et al. 2016). Campbell و همکاران (۱۹۴۸) نشان دادند که افزایش ۱ درجه سانتی‌گراد در دمای نمونه‌های خاک باعث افزایش رسانندگی الکتریکی آنها به اندازه ۰٫۲٪ می‌گردد. بنابراین مقاومت الکتریکی نمونه‌های خاک کاهش خواهد یافت. در این مطالعه مقدار مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در آزمایشگاه با توجه به دمای اندازه‌گیری شده نمونه‌ها در محل مورد تصحیح قرار گرفت. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها پس از تصحیح دما دارای گستره تغییرات بین ۴٫۰۲ تا ۳۱۰ اهم - متر می‌باشند و مقدار میانگین مقاومت الکتریکی ۷۷٫۲۹۱ اهم - متر می‌باشد.

#### بررسی آزمایشگاهی نمونه ای خاک

تعداد ۸۴ نمونه خاک که از ۷ گمانه (BH-1 to BH-7) تهیه شدند، مورد آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. مقادیر مینی‌م، ماگزیمم و میانگین پارامترهای C و  $\phi$  و همچنین تعداد نمونه‌های با

#### اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در آزمایشگاه

دستگاه Terrameter SAS 1000 ساخت شرکت ABEM کشور سوئد برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در آزمایشگاه مورد استفاده قرار گرفت. آرایه الکترودی مورد استفاده توسط این دستگاه نیز دوقطبی - دوقطبی انتخاب شد (شکل ۲). فاصله زوج الکترودهای C2-C1 و P1-P2 معادل ۵ سانتی‌متر و فاصله الکترودهای C1-P1 معادل ۱۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده برای نمونه‌ها توسط این آرایش الکترودی مربوط به عمق (Z) معادل ۴٫۸۱ سانتی‌متر بوده که تقریباً روی محور ظرف استوانه‌ای شکل حاوی نمونه قرار دارد (Loke 2016). الکترودهای C2، C1، P1 و P2 سوزن‌هایی مسی با قطر ۱ میلی‌متر و طول ۳ سانتی‌متر می‌باشند و از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در بدنه ظرف نگهدارنده نمونه‌ها که از جنس PVC می‌باشد، در تماس با نمونه قرار گرفتند. تنظیمات دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به‌گونه‌ای صورت گرفت که ماکزیمم جریان الکتریکی تزریق شده معادل ۱۰ میلی آمپر باشد.

#### تصحیح اثر دما بر مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه

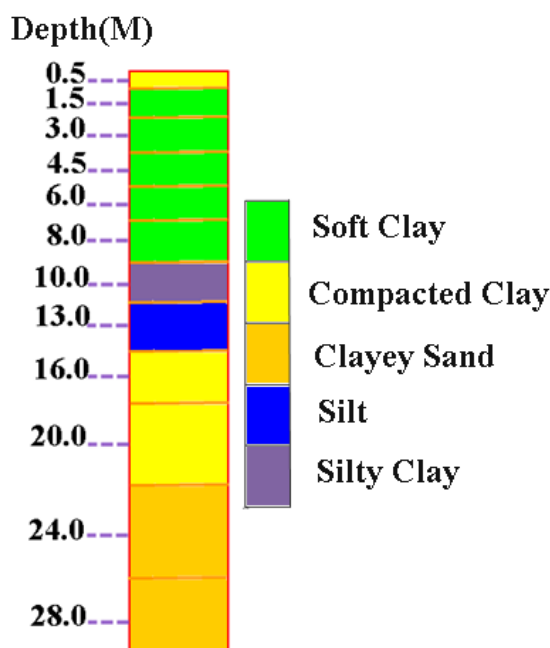


به خود اختصاص داده‌اند. قابل ذکر است که مقاومت الکتریکی هر کدام از این دسته‌بندی‌های لیتولوژی نمونه‌ها بطور مستقیم و قبل از انجام آزمایش‌های مکانیکی در آزمایشگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

نتایج آزمایش برش مستقیم نشان می‌دهد که مقادیر  $C$  و  $\phi$  برای نمونه‌های رس نرم کمترین مقدار و برای نمونه‌های شن رسی بیشترین مقدار را در میان تمام نمونه‌ها دارند. مقادیر  $C$  و  $\phi$  برای نمونه‌های رس متراکم از مقادیر مربوط به نمونه‌های سیلت بیشتر می‌باشد. نمونه‌های سیلت دارای مقدار میانگین  $\phi$  بیشتر و مقدار میانگین  $C$  کمتر نسبت به نمونه‌های شن سیلتی می‌باشند. مقدار میانگین پارامترهای  $\phi$  و  $C$  برای نمونه‌های سیلت از مقدار مربوط به نمونه‌های رس سیلتی بیشتر است.

لیتولوژی یکسان در جدول ۱ ارائه شده است. آنالیز اندازه ذرات که براساس سیستم طبقه‌بندی خاک بریتانیا (British Soil Classification System: BSCS) انجام شد، نشان می‌دهد که ۶۳٫۱٪ کل نمونه‌ها مشتمل بر رس نرم ( $\rho \leq 25 \text{ ohm.m}$ ) و رس متراکم ( $75 \leq \rho \leq 180$ ) می‌باشد. براساس آنالیز توزیع اندازه ذرات، هر کدام از نمونه‌های شن رسی ( $\rho \geq 180 \text{ ohm.m}$ ) و سیلت ( $45 \leq \rho \leq 55$ ) تقریباً ۹٫۵٪ از کل نمونه‌ها را تشکیل می‌دهند. پروفیل عمقی مربوط به مواد تشکیل دهنده گمانه BH-7 به‌عنوان نمونه در شکل ۵ ارائه شده است.

نمونه‌های با لیتولوژی سیلت - رس ( $25 \leq \rho \leq 50$ ) و سیلت - شن ( $50 \leq \rho \leq 75$ ) به ترتیب حدود ۱۰٫۷٪ و ۷٫۲٪ از کل نمونه‌ها را



شکل ۵- پروفیل عمقی مواد تشکیل دهنده گمانه BH-7.

Fig. 5. Geological depth profile of the study site based on BH\_7 borehole data.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوط به پارامترهای ژئوتکنیکی ( $C$  و  $\phi$ ) و همچنین مقاومت الکتریکی مربوط به ۷۲ نمونه بدست آمده از ۶ گمانه (BH-1 to BH-6) برای تعیین رابطه ریاضی مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای ژئوتکنیکی ( $C$  و  $\phi$ ) مورد بررسی قرار گرفتند. برای توسعه یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای  $C$  و  $\phi$  از روش کمترین مربعات در عملیات رگرسیون استفاده شد. برای انجام عملیات رگرسیون توابع خطی ( $y=ax+b$ )، لگاریتمی ( $y=a\ln(x)+b$ )، توانی ( $y=ax^b$ ) و چندجمله‌ای

## نتایج و بحث

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مربوط به پارامترهای ژئوتکنیکی ( $C$  و  $\phi$ ) و همچنین مقاومت الکتریکی مربوط به ۷۲ نمونه بدست آمده از ۶ گمانه (BH-1 to BH-6) برای تعیین رابطه ریاضی مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای ژئوتکنیکی ( $C$  و  $\phi$ ) مورد بررسی قرار گرفتند. برای توسعه یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی با هر کدام از پارامترهای  $C$  و  $\phi$  از روش کمترین مربعات در عملیات رگرسیون استفاده شد. برای انجام عملیات رگرسیون توابع خطی ( $y=ax+b$ )، لگاریتمی ( $y=a\ln(x)+b$ )، توانی ( $y=ax^b$ ) و چندجمله‌ای

جدول ۱- گستره تغییرات پارامترهای C و  $\phi$  برای نمونه‌های خاک تهیه شده از گمانه‌ها.  
Table 1. The range of changes in parameters C and  $\phi$  for soil specimens.

Lithology		Soft Clay	Compacted Clay	Clayey Sand	Silt	Silty Clay	Silty Sand
No. of Samples		28	25	8	8	9	6
C(KPa)	Max.	28.818	42.452	54.119	31.38	28.468	35.287
	Min.	18.015	26.374	30.539	22.04	20.91	23.89
	Mean	20.683	34.317	41.847	26.346	24.342	28.025
$\phi(^{\circ})$	Max.	33.356	39.9	46.557	33.774	32.769	36.984
	Min.	22.019	29.638	30.249	27.665	25.261	26.847
	Mean	27.209	33.476	37.270	31.261	28.616	30.722

بین  $\phi_E$  و  $\phi_M$  ( $R^2=0.6933$ ) برقرار می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که روابط (۲) و (۳) بصورت قابل قبولی جهت تخمین مقدار پارامترهای C و  $\phi$  کارآمد می‌باشند.

اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده برای هر کدام از پارامترهای C و  $\phi$  در شکل ۸ نشان داده شده است. میزان درصد خطای تخمین‌زدن در مورد پارامتر C کمتر از ۳،۲۰٪ و در مورد پارامتر  $\phi$  کمتر از ۳،۱۵٪ می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از روابط (۲) و (۳) در هر نقطه دلخواه زیر سطحی در منطقه مورد مطالعه که به کمک توموگرافی دو یا سه بعدی اندازه مقاومت الکتریکی آن تعیین شده است می‌توان مقادیر پارامترهای C و  $\phi$  را با دقت حدود ۸۰٪ تخمین زد.

### نتیجه‌گیری

حفر ۷ گمانه تا عمق ۲۸ متر و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی، C و  $\phi$  در محل مورد مطالعه نشان داد که حدود ۶۳،۱٪ از نمونه‌ها از رس نرم و رس فشرده تشکیل شده‌اند. سیلت، شن سیلتی، رس سیلتی و شن رسی نیز هر کدام بترتیب ۹،۵٪، ۹،۵٪، ۷،۲٪ و ۱۰،۷٪ از کل نمونه‌های را تشکیل داده‌اند. توسعه یک همبستگی بین مقاومت الکتریکی و هر کدام از دو پارامتر ژئوتکنیکی C و  $\phi$  نشان داد که در مورد همبستگی بین مقاومت الکتریکی و پارامترهای C و  $\phi$  یک رابطه خطی به عنوان مناسب‌ترین تابع ریاضی تعیین گردید. بر اساس آنالیز رگرسیون انجام شده، یک همبستگی نسبتاً قوی با ضریب همبستگی ۰،۷۷۶۹ بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامتر چسبندگی وجود دارد. همچنین نتایج عملیات رگرسیون نشان دهنده یک همبستگی نسبتاً خوب (۰،۵۳۷۲) بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامتر زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.

بر اساس نتایج ارائه شده در مورد همبستگی بین مقاومت الکتریکی و پارامتر C مقدار ضریب  $R^2$  در مورد تابع‌های توانی و چندجمله‌ای از ضریب  $R^2$  برای تابع خطی بیشتر می‌باشند اما چون اختلاف بین ضرایب  $R^2$  و  $Ra^2$  ( $R^2-Ra^2=0.0031$ ) در مورد تابع خطی نسبت به دیگر توابع کمتر می‌باشد بنابراین رابطه خطی با ضرایب  $R^2=0.7769$  و  $Ra^2=0.7738$  به‌عنوان مناسب‌ترین همبستگی انتخاب گردید (شکل ۶). (a)

$$C=1.005\rho+20.4130 \quad (2)$$

بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۲ رابطه خطی زیر با ضرایب  $R^2=0.5372$  و  $Ra^2=0.5305$  به‌عنوان بهترین همبستگی بین  $\phi$  و مقاومت الکتریکی انتخاب گردید (شکل ۶b).

$$\phi=0.0491\rho+27.058 \quad (3)$$

قابل ذکر است که مقدار ضریب  $R^2$  برای تابع چندجمله‌ای نسبت به تابع خطی بیشتر می‌باشد اما چون مقدار  $R^2-Ra^2$  برای تابع خطی (۰،۰۰۶۷) نسبت به تابع چندجمله‌ای کمتر می‌باشد، تابع خطی به‌عنوان مناسب‌ترین همبستگی انتخاب شد. مقدار  $R^2-Ra^2$  برای تابع نمایی با مقدار متناظر برای تابع خطی برابر است اما چون ضریب  $R^2$  در مورد این تابع (۰،۵۳۶۶) کمتر از مقدار متناظر برای تابع خطی (۰،۵۳۷۲) می‌باشد، همچنان تابع خطی به‌عنوان مناسب‌ترین همبستگی بین مقاومت الکتریکی و پارامتر  $\phi$  انتخاب گردید.

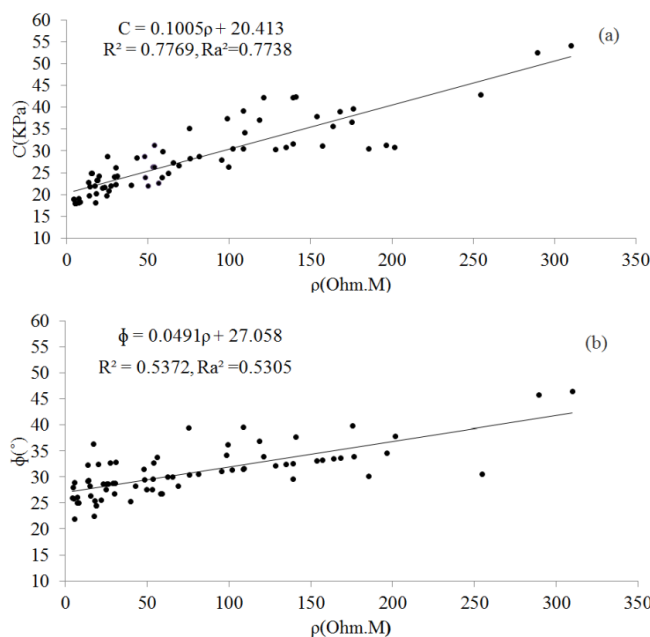
### اعتبارسنجی نتایج رگرسیون

جهت اعتبارسنجی روابط (۲) و (۳) مقدار پارامترهای C و  $\phi$  برای ۱۲ نمونه بدست آمده از گمانه BH-7 که قبلاً در عملیات رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفته بودند، تخمین زده شدند ( $C_E$  و  $\phi_E$ ). سپس اعداد بدست آمده با مقادیر متناظر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ( $C_M$  و  $\phi_M$ ) مقایسه شدند (شکل ۷b و a). باتوجه به شکل ۴ یک همبستگی قوی بین  $C_E$  و  $C_M$  ( $R^2=0.8814$ ) و همچنین یک همبستگی خوب

جدول ۲- خلاصه‌ای از نتایج آنالیز رگرسیون را نشان می‌دهد. توابع نمایی ( $y = ae^{-bx}$ ), خطی ( $y = ax + b$ ), لگاریتمی ( $y = a \ln(x) + b$ ), توانی ( $y = ax^b$ ), چندجمله‌ای ( $y = ax^2 + bx + c$  و  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ) در آنالیز رگرسیون مورد استفاده قرار گرفتند.

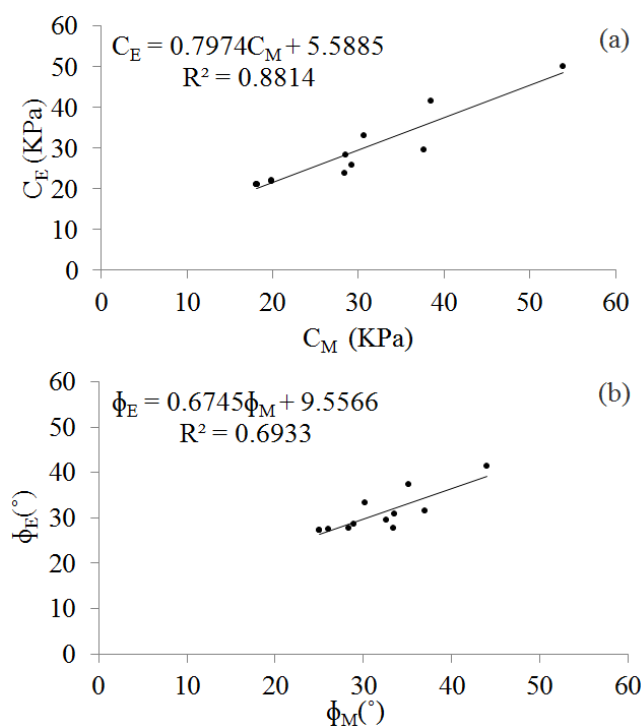
Table 2. Summary of regression analysis results. Exponential ( $y = ae^{-bx}$ ); Linear ( $y = ax + b$ ); Logarithmic ( $y = a \ln(x) + b$ ); Power ( $y = ax^b$ ); Polynomial ( $y = ax^2 + bx + c$  and  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ) were used in this study as curve approximation.

Geotechnical Parameter	Trend Type	Coefficients of Equation	R <sup>2</sup>	Ra <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> - Ra <sup>2</sup>
C	Exponential	a=21.877, b= 0.0029	0.7501	0.7465	0.0036
	Linear	a=0.1005, b=20.4130	0.7769	0.7738	0.0031
	Logarithmic	a=6.0163, b=5.0952	0.6965	0.6921	0.0080
	Polynomial	a=-8× 10 <sup>-5</sup> , b=0.1190, c=19.8263	0.7806	0.7742	0.0064
		a=3× 10 <sup>-6</sup> , b=-1.4× 10 <sup>-3</sup> , c=0.2590, d=17.2939	0.8164	0.8083	0.0557
	Power	a=10.7600, b=0.2413	0.7501	0.7465	0.0036
ϕ	Exponential	a=27.3503, b=0.0015	0.5366	0.5299	0.0067
	Linear	a=0.0491, b=27.0580	0.5372	0.5305	0.0067
	Logarithmic	a=2.8776, b=19.8130	0.4611	0.4534	0.0077
	Polynomial	a=8× 10 <sup>-6</sup> , b=0.0471, c=27.123	0.5373	0.5239	0.0134
		a=2× 10 <sup>-6</sup> , b=-8.5× 10 <sup>-4</sup> , c=0.1371, d=25.4934	0.5802	0.5617	0.0185
	Power	a=20.9759, b=0.0989	0.4788	0.4717	0.0074



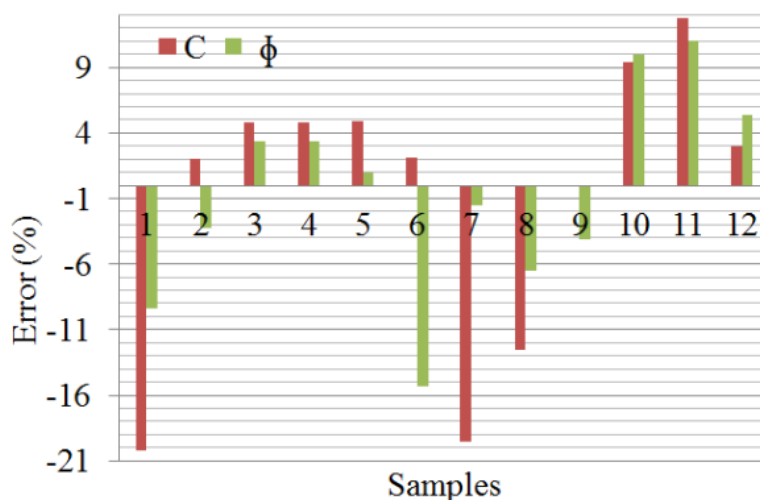
شکل ۶- رابطه بین مقاومت الکتریکی و پارامترهای ژئوتکنیکی ϕ (a) و C (b) مربوط به ۷۲ نمونه بدست آمده از ۶ گمانه (BH-1 تا BH-6).

Fig. 6. Diagram shows the relationship between the electrical resistivity and the geotechnical parameters ϕ (a) and C (b) for 72 samples obtained from 6 borholes (BH-1 to BH-6).



شکل ۷- همبستگی بین مقادیر تخمین زده شده ( $C_E$  و  $\phi_E$ ) توسط عملیات رگرسیون و مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ( $C_M$  و  $\phi_M$ ) برای ۱۲ نمونه بدست آمده از گمانه BH-7 که قبلاً در عملیات رگرسیون مورد استفاده قرار نگرفته بودند را نشان می‌دهد.

Fig. 7. Diagram shows the correlation between estimated values by regression operation ( $C_E$  and  $\phi_E$ ) and measured values in the laboratory ( $C_M$  and  $\phi$ ) for 12 samples obtained from BH-7 previously were not used in the regression operation.



شکل ۸- اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده برای هر کدام از پارامترهای C و  $\phi$  مربوط به ۱۲ نمونه بدست آمده از گمانه BH-7.  
Fig.8. The difference between the estimated and measured values for each of the parameters C and  $\phi$  related to the 12 samples obtained from the BH-7 borehole.

#### منابع

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. American Journal of Science 304, 1-20.
- Berberian, M., King G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18, 210-265.

- Braga, A., Malagutti, W., Dourado, J., Chang, H., 1999. Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. *Journal of Environmental Engineering Geophysics* 4, 123–130.
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Jun Cui, Y., Tabbagh, A., Charlery, Y., 2006. Correlations between geotechnical and electrical data: a case study at Garchy in France. *Journal of Applied Geophysics* 60(3–4), 165–178.
- Campbell, R.B., Bower, C.A., Richards, L.A., 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Science Society of America* 13, 66-69.
- Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. *Computer and Geosciences* 27, 1019–1029.
- Kazmi, D., Qasim, S., Fahad Irfan Siddiqui, F.I., Azhar, S.B., 2016. Exploring the Relationship between Moisture Content and Electrical Resistivity for Sandy and Silty Soils. *International Journal of Engineering Science Invention* 5 (6), 33-35.
- Loke, M.H., 2016. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Pozdnyakova, L., 1999. *Electrical properties of soils*. University of Wyoming, Laramie.
- Pozdnyakova, L., Pozdnyakov, A., Zhang, R., 2001. Application of geophysical methods to evaluate hydrology and soil properties in urban areas. *Urban Water* 3(3), 205–216.
- Pozdnyakova, A., Pozdnyakova, L., 2001. Electrical fields and soil properties. In: 17th World Congress of Soil Science, Thailand, 14–21 August 1558.
- Samouelian, A., Cousin, I., Richard, G., Tabbagh, A., Bruand, A., 2003. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. *Soil Science Society of American Journal* 67(5), 1319–1326.
- Syed B.S.O., Fikri M.N., Siddiqui F.I., 2011. Correlation of electrical resistivity with some soil parameters for the development of possible prediction of slope stability and bearing capacity of soil using electrical parameters. *Pertanika Journal of Science Technology* 22, 139-152.
- Siddiqui, F.I., Osman, S.B.A.S., 2012. Simple and multiple regression models for relationship between electrical resistivity and various soil properties for soil characterization. *Environmental Earth Science* 70, 259-267.
- Sudha K., Israil M., Mittal S., Rai J., 2009. Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67(1), 74–79.

