



Evaluating effect of electro – osmotic on mechanical properties of soft clay

Hadis Bibak¹, Navid Ganjian *¹, Jahangir Khazaei ², Amin Bahmanpour ¹

¹ Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT: One of the techniques of stabilization soil is the electrical method. In this method, stabilization of fine-grained soils, especially saturated clay soils, is done by reducing the thickness of the double water layer by establishing an electric current. In this study, to improve and stabilize soft clay soils, the electrokinetic injection method, which The index results of the studies showed that the use of this method increases the unconfined compressive strength from 98 kPa to 223 kPa, decreases the water content from 24 to 15/2 and the plasticity index from 24 to 10 and Soil porosity decreases from 0/675 to 0/443. The results of the chemical analysis confirm the correctness of the physical results in the scanning electron microscope images. According to the water content, Etterberg limits, unconfined compressive strength, and consolidation tests, it was determined that the best performance is related to the use of plate aluminum electrodes with a voltage of 1/5.

Review History:

Received: Sep. 05, 2023

Revised: Sep. 15, 2023

Accepted: Oct. 11, 2024

Available Online: Nov. 02, 2024

Keywords:

Soft Clay Soil

Electro - Osmosis

Electrod Material

Electrode Shape

1- Introduction

Electrokinetic stabilization is the application of applying direct current (DC) electric fields through a wet soil mass via a pair of electrodes to promote the migration of stabilizing agents into the soil of electric current to the soils. Electrokinetic stabilization includes electroosmosis, electrolysis, electrophoresis, and electromigration. Electroosmosis involves the transport of water through the voids in the soil. One of the methods of improving soft fine-grained soils is the electroosmosis [1, 2]. The improvement of soil during electrokinetic stabilization can occur either due to the electroosmotic consolidation or electrochemical changes such as pozzolanic reactions that lead to soil cementation and mineralogy changes, resulting in the strengthening of the soil [3]. The material of the electrode plays a major role in the efficiency of the electrokinetic stabilization method. The electrode used should be cheap, accessible, resistant to the heat generated during electric current, and resistant to corrosion [4]. Electric current is another factor in evaluating the effect of electrical improvement. An increase in electric current causes an increase in electroosmotic flow and, as a result, an improvement in soil resistance [5]. Using a plate electrode instead of a rod electrode will get better results due to its effect on the entire soil complex. While using the plate electrode, electro-osmotic current flows in the entire

soil, water drainage towards the cathode electrode increases, and on the other hand, a lot of heat is produced, and as a result, the moisture content of soil is further reduced [6, 7]. The aim of the current study is to observe the effect of electroosmosis method on the mechanical properties of soft clay by considering the influential variables and comparing them using laboratory tests.

2- Methodology

The Soil that is used in this study was a soft clay soil sample collected from Kermanshah Agricultural College. Following the experiments performed on the given soil, it was found that the soil type is fine-grained with low swelling ability. The experiment was carried out in a plexiglass chamber with dimensions of 50 x 30 x 20 cm³. Electrodes have been used in two mods, rods with dimensions of 15*5 cm² or plates with dimensions of 15*30 cm². The model used is shown in Figure 1. In this experiment, the voltage gradient of 1 v/cm and 1/5 of the soil mass using two types of aluminum electrodes (Al) and graphite (G) and rod shapes (R) and plates (P) has been applied to the soil sample in a period of 48 hours by connecting the electrodes to the power supply. After the 48-hour the electricity was cut off and the model was prepared for sampling for the intended tests. A total of 25 unconfined compressive strength tests, moisture

*Corresponding author's email: n.ganjian@srbia.ac.ir



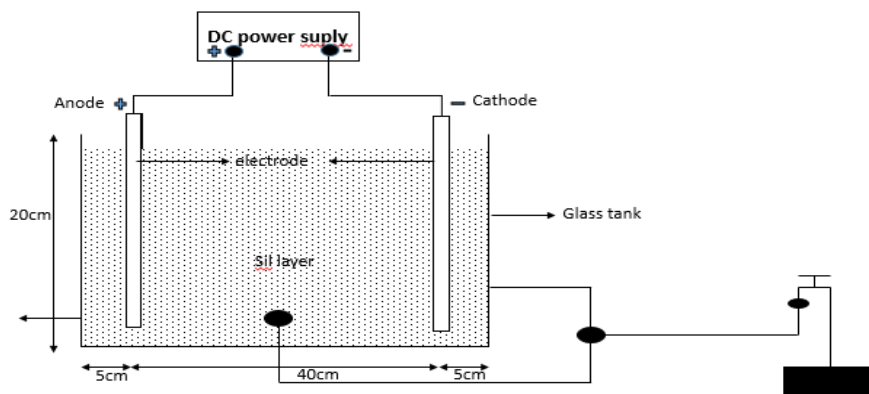


Fig. 1. Schematic of the electroosmosis system used in the experiment

content and etterberg limits (an untreated specimen, 24 specimens treated with three variables and near the anode, cathode and middle part) were performed and to check the degree of consolidation of clay from 4 samples (an untreated specimen and 3 specimens optimal treated) consolidation test was done based on the standard.

3- Discussion and Results

The results of the change in moisture content of soil in the case of using aluminum and graphite electrodes in two types of rod and plate in currents of 1 and 1/5 v/cm after 48 hours near the anode, cathode and middle part show that the moisture content decreases from the anode to the cathode because the electroosmotic flow is towards the cathode. Drying due to the heat created during of electric current and natural evaporation of water are also other effective factors in reducing soil moisture content [8]. The results of changes in the etterberg limits of soil samples show that the moisture content is between the plastic limit and the liquid limit. Only in three samples with plate aluminum electrodes with voltages of 1 and 1/5 V and with plate graphite electrodes with voltage of 1/5 V near the anode, the moisture content is lower than the plastic limit. The result shows that in the case of using a plate electrode at a higher voltage, due to the appropriate effect of this electrode on the soil sample, weakly bound water are not formed in the soil. In general, there is no free water in any of the samples after applying the electroosmotic flow. With the production of H^+ in the anode and due to the mobility 1/8 times higher than OH^- and also the direction of the electroosmotic flow towards the cathode, low pH values occur in a large part of the soil sample, especially in the vicinity of the anode [9, 10]. The negative charge of soil particles has increased and this increases soil PL. Ion exchange during electroosmosis replaces high ion capacity such as Al^{3+} and Fe^{3+} in the hydrated layer around soil particles. This factor reduces the thickness of the double

layer and the attraction between particles also reduces the value of PI. Many researchers have reported a reduction in plasticity index when using electroosmotic stabilization [11, 12]. The results of the UCS tests show that the strength of the untreated soil is lower than the treated samples because of the applying voltage and the movement of water in the soil and its drainage, as well as the generation of heat due to the electric current in the treated soil, the moisture content of soil decreased and this is one of the factors of increasing soil resistance. Dehydration, the suction created in the soil, soil consolidation, electrical transfer of ions due to changes in ion concentration, changes in the thickness of the double water layer, cement reactions, natural drying of the soil during the electric current, which causes exothermic reactions and as a result, changes in the soil structure. It is another factor that increases soil resistance [13]. The results obtained from the consolidation test show that the settlement values were better for the treated soil sample near the anode. The cations that enter the pore water pressure and move towards the cathode, by displacing the water around them, cause more water to come out and increase the strength. With the release of water by these cations, a negative suction pressure is applied to the voids between the soil and leads to the disappearance or smaller size of the pores. This issue has reduced the void ratio and thus increased the strength of the soil. In order to conduct the SEM test of two samples (an untreated specimen and a specimen treated with an aluminum plate electrode with an applied voltage of 1/5 v/cm) under were tested. Microstructural changes are related to two main mechanisms. First, ion exchange, which reduces the thickness of the double layer, resulting in the compression of silicate plates, and second, the exit of water from the pores of soil. These two phenomena happen less from the anode to the cathode. Capillarity creates negative pressure in the pores and causes the loss or reduction of the volume of the pores [4]. The results have shown that natural soil samples are composed of separate soil masses.

This may be due to water absorption by the clay particles, which become larger masses by absorbing water [10]. On the other hand, ion exchange during electroosmosis replaces high ions capacity such as Al^{3+} and Fe^{3+} in the fixed hydrated layer around soil particles. This factor reduces the thickness of the double layer and also the attraction between particles leads to the closure of the pores, strengthening the soil, and eventually dense soil is created.

4- Conclusions

In this research, the effect of various factors related to electroosmotic improvement conditions on mechanical properties has been investigated and the key results are summarized below:

- According to the electroosmotic flow from the anode to the cathode and the discharge of water, the moisture content of soil decreases, and with the movement of water and changes in the chemical structure due to the transfer of ions, the plastic index of the soil changes.
- Soil calcium ions and aluminum ions released from the electrode participate in the cementation process and improve soil strength.
- Electro-osmotic flow leads to negative pore pressure and causes soil integrity, this issue reduces porosity and, as a result, increases soil strength.
- The movement of cations which causes the movement of hydrated water around the cations, as well as the ion exchange which causes the replacement of high ions capacity, the thickness of the double layer is reduced and by increasing the attraction between particles, it reduces the value of PI and soil porosity. Therefore, the soil sample stabilized by the electrokinetic method has a denser composition.
- The best result is for the soil sample improved with an aluminum plate electrode with a voltage gradient of 1/5 v/cm, which compared to the untreated soil, the values of the plastic index and its void ratio are reduced by 58% and 35%, respectively, and the unconfined compressive strength is 128 % has increased.

References

- [1] M. Malekzadeh, J. Lovisa, N. Sivakugan, An overview of electrokinetic consolidation of soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34 (2016) 759-776.
- [2] J.G. Loch, A.T. Lima, P.J. Kleingeld, Geochemical effects of electro-osmosis in clays, *Journal of applied Electrochemistry*, 40 (2010) 1249-1254.
- [3] A. Estabragh, M. Naseh, A. Javadi, Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, *Applied Clay Science*, 95 (2014) 32-36.
- [4] T. Askin, D. Turer, Effect of electrode configuration on electrokinetic stabilization of soft clays, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(4) (2016) 322-326.
- [5] Y.-m. Liu, H.-f. Xu, Experimental study of the electrode material for electro-osmosis in mudflat sludge, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2017, pp. 012093.
- [6] H.A.M. Mahalleh, M. Siavoshnia, M. Yazdi, Effects of electro-osmosis on the properties of high plasticity clay soil: chemical and geotechnical investigations, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880 (2021) 114890.
- [7] A. Alibarootitabar, A. Ardakani, M. Mahmoudipour, Evaluation of the effect of voltage variation on the electro-osmosis dewatering of a silty soil using prefabricated vertical drains, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4) (2021) 512-518.
- [8] M.Y. Fattah, Q.G. Majeed, H.H. Joni, Comparison between methods of soil saturation on determination of the soil water characteristic curve of cohesive soils, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2) (2021) 101.
- [9] W. Wen, L. Jia, W. Zhao, H. Feng, D. Cao, J. Xie, T. Xu, M. Cui, W. Zhou, Q. Mei, Study on the effect of electrokinetic methods combined with and solidification/stabilization technique for remediation of Cu^{2+} -contaminated soil under different voltage gradients, *International Journal of Electrochemical Science*, 17(10) (2022) 221021.
- [10] H. Bibak, J. Khazaei, H. Moayedi, Investigating the effect of a new industrial waste on strengthening the soft clayey soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (2020) 1165-1183.
- [11] W. Abdullah, A. Al-Abadi, Cationic–electrokinetic improvement of an expansive soil, *Applied Clay Science*, 47(3-4) (2010) 343-350.
- [12] V. Kumar, The effect of electrokinetic stabilization (EKS) on peat soil properties at Parit Botak area, Batu Pahat, Johor, Malaysia, *Indian Journal of Science and Technology*, 11 (2018) 44.
- [13] H. Wu, L. Hu, Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite, *Applied Clay Science*, 101 (2014) 503-509.



ارزیابی تأثیر بهسازی به روش الکترواسمزی بر خصوصیات مکانیکی خاک رس نرم

حدیث بی باک^۱، نوید گنجیان^{۱*}، جهانگیر خزایی^۲، امین بهمن پور^{۱b}

۱- دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

کلمات کلیدی:

خاک رس نرم
بهسازی الکترواسمزی
جنس الکتروود
شکل الکتروود

خلاصه: یکی از انواع روش‌های بهسازی خاک، روش الکتریکی است. در این روش تثبیت خاک‌های ریزدانه، به‌ویژه خاک‌های رسی اشباع، با کاهش ضخامت لایه آب دوگانه از طریق برقراری جریان الکتریکی انجام می‌شود. خاک رس نرم از جمله خاک‌های مسئله‌دار است، این خاک تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار دارد و احداث سازه بر روی آن‌ها همواره با خطر مواجه است. در این مطالعه به منظور بهسازی و تثبیت خاک‌های رسی نرم از روش تزریق الکتروکینتیکی، که یکی از روش‌های تثبیت در حالت برجا بوده و از لحاظ زمان و هزینه بسیار به صرفه است استفاده شده است. به این منظور، در شرایط آزمایشگاهی لایه‌ای از خاک با درصد رطوبت و وزن مخصوص در محل در محفظه‌ای به ابعاد $50 \times 30 \times 20$ cm در پنج لایه متراکم شده و جریان مستقیم (DC) با ولتاژهای ۱ و ۱/۵ به مدت ۴۸ ساعت اعمال گردیده است. الکترودهای مورد استفاده از جنس آلومینیوم و گرافیت و در دو حالت میله‌ای و صفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج شاخص مطالعات نشان داد که استفاده از این روش سبب افزایش مقاومت فشاری محدود شده از ۹۸ kpa به ۲۲۳ kpa به میزان ۱۲۸٪، کاهش درصد رطوبت از ۲۴ به ۱۵/۲ به میزان ۳۷٪، کاهش شاخص خمیری از ۲۴ به ۱۰ به میزان ۵۸٪ و کاهش تخلخل خاک از ۰/۶۷۵ به ۰/۴۴۳ نسبت به نمونه خاک بهسازی نشده می‌شود. نتایج تحلیل شیمیایی در بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صحت نتایج فیزیکی را تایید می‌نماید. با توجه به آزمایش‌های درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و تحکیم مشخص گردید بهترین عملکرد مربوط به استفاده از الکتروود آلومینیوم صفحه‌ای با ولتاژ ۱/۵ v/cm می‌باشد.

۱- مقدمه

(DDL) است. تحت یک گرادیان الکتریکی ایجاد شده در خاک، بخشی از لایه آب دوگانه که قابلیت حرکت دارد (لایه خارجی) به سمت الکتروود با بار منفی حرکت می‌کند. حرکت بخش خارجی لایه آب دوگانه در درون محیط متخلخل یک کشش ویسکوز بر آب حفره‌ای وارد می‌کند و در نتیجه موجب حرکت آب در درون خاک می‌شود. الکترواسمز با خارج کردن آب حفرات و ایجاد فشار منفی باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود [۲، ۳]. روش تزریق الکتروکینتیکی، از جمله محدود روش‌های تثبیت در حالت برجا است که از لحاظ زمان و هزینه بسیار به صرفه است [۴]. اثرات ترکیبی در تثبیت الکتروکینتیکی باعث تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود [۵]. [۶]. این روش کاربرد زیادی در مهندسی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی مانند تثبیت خاک، بهبود مقاومت، زهکشی خاک، اصلاح خاک، حذف یون‌های موجود در خاک، ظرفیت باربری دارد و محققین زیادی بر روی این موارد مطالعاتی انجام داده‌اند [۷-۱۲].

یکی از روش‌های بهبود خاک‌های ریزدانه ناپایدار و نرم روش الکترواسمز است. الکترواسمزی اولین بار توسط رئوس در سال ۱۸۰۷ کشف شد. رئوس با اعمال یک جریان مستقیم به مخلوط رس و آب مشاهده نمود که آب در لوله‌های موئین تحت اثر میدان الکتریکی به سمت قطب منفی (کاتد) حرکت می‌کند. در حالی که مفهوم بهسازی خاک با استفاده از روش الکترواسمزی به کاساگراند نسبت داده شده است [۱].

تثبیت الکتروکینتیکی شامل الکترواسموز، الکترولیز، الکتروفورز و مهاجرت الکترونی است که مسئول تغییرات درون خاک هستند. جریان الکترواسمزی در خاک‌های رسی در کنار سایر عوامل، عمدتاً به دلیل وجود لایه آب دوگانه (DDL) در اطراف ذرات خاک رس رخ می‌دهد. لایه آب دوگانه شامل یک لایه خارجی نسبتاً متحرک و یک لایه ثابت (لایه داخلی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n.ganjan@srbiau.ac.ir



می‌دهد و در نتیجه باعث بهبود مقاومت نمونه خاک می‌شود [۲۳]. استفاده از الکتروده صفحه‌ای به جای الکتروده میله‌ای با توجه به تاثیر آن بر روی کل مجموعه خاک نتایج بهتری را بدست خواهد آورد. حین استفاده از الکتروده صفحه‌ای از طرفی جریان الکترواسمزی در کل خاک جریان پیدا کرده، زهکشی آب به سمت الکتروده کاتد بیشتر شده و از طرف دیگر گرمای زیادی تولید شده و در نتیجه کاهش درصد رطوبت بیشتری به همراه دارد [۲۰، ۲۴]. روش الکترواسمزی به دلیل عدم نیاز به تعویض خاک و همچنین خشک کردن، تخریب، مخلوط کردن خاک و ملاحظات زیست محیطی نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک در راه‌ها می‌تواند به منظور تثبیت خاک‌های رسی مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. با توجه به مطالعات انجام گرفته در گذشته متغیرهای زیادی در فرآیند الکترواسمزی از جمله شکل الکترودهای مصرفی، نوع الکترودها، تغییر ولتاژ و .. تاثیرگذار هستند که هر کدام از این متغیرها باعث تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک می‌شوند [۱۰، ۱۱، ۱۹، ۲۲]. اما در این مطالعات اثر این متغیرها به صورت موردی و پراکنده بررسی شده‌اند، در حالی که بررسی و مقایسه اثرات ترکیبی آن‌ها هنوز به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. اگر متغیرهای اصلی از جمله شکل الکترودهای مصرفی، نوع الکترودها و همچنین تغییر ولتاژ به طور همزمان در موقعیت‌های مختلف الکتروده در بهسازی الکتروکینتیک به‌ویژه در خاک‌های اشباع که در آن‌ها اثر بهسازی الکتروکینتیک بیشتر است، با هم مقایسه و میزان تاثیر هر کدام از آن‌ها مشخص باشد می‌تواند باعث انتخاب الکتروده مناسب و ولتاژ بهینه و همچنین صرفه‌جویی در هزینه و زمان در این روش شود و زمانی که خاک با مقاومت بیشتری مورد نیاز باشد می‌توان با توجه به نیاز، شکل، نوع الکتروده و ولتاژ اعمالی را تغییر داد. تحقیق حاضر به تأثیر روش الکترواسمزی به عنوان یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک بر پارامترهای مقاومتی خاک رس نرم با در نظر گرفتن متغیرهای تأثیرگذار و مقایسه آن‌ها با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی می‌پردازد.

۲- الگوسازی تجربی

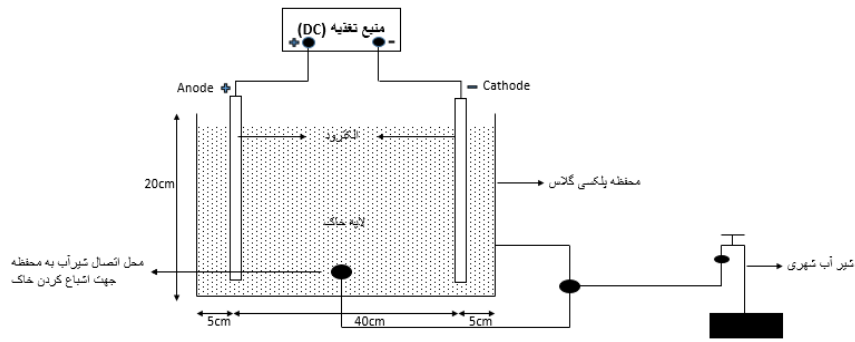
۲-۱- خاک مبنا

خاک مورد استفاده در این تحقیق خاک رس نرم است که با توجه به آزمایش تورم، دارای قابلیت تورم کم بوده و از عمق یک متری سطح زمین محل دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی واقع در شهر کرمانشاه تهیه شده است. نتایج حاصل از آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری برای طبقه‌بندی خاک مورد نظر در شکل ۱ در قالب نمودار دانه‌بندی نشان داده شده است. این خاک در سیستم رده‌بندی متحد در گروه خاک‌های رسی با خمیری

تحقیقات زیادی در این روش در زمینه بهبود مقاومت خاک رس انجام شده است. شانگ و همکاران^۱ به مقایسه تاثیر استفاده از جریان الکتریکی مستقیم (DC) و جریان الکتریکی غیر مستقیم (AC) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت، مقاومت برشی افزایش می‌یابد اما تاثیر استفاده از جریان الکتریکی مستقیم بیشتر است [۱۳]. او و همکاران^۲ به بررسی اثر تزریق محلول‌های نمکی بر روش الکترواسمزی پرداختند و مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک را با استفاده از آزمایش برش پره بدست آوردند. در این تحقیق مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک در مقایسه با مقاومت اولیه حدود ۴۰٪ افزایش یافت [۱۴]. ذرات رس دارای بار منفی هستند و عبور جریان باعث حرکت کاتیون‌ها در خاک شده و مواد را در سطح خاک جذب می‌کند و این امر باعث ایجاد سمنتاسیون، یکپارچگی و تراکم بیشتر خاک شده و نشست خاک را کاهش می‌دهد [۲، ۱۵-۱۸].

جنس الکتروده نقش عمده‌ای در کارایی روش تثبیت الکتروکینتیک ایفا می‌کند. الکتروده مورد استفاده باید ارزان، قابل دسترس، مقاوم در برابر حرارت تولید شده حین جریان الکتریکی و مقاوم در برابر خوردگی باشد [۱۹]. الکترودهای مختلفی از جمله مس، آهن، فولاد، آلومینیوم در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. وقتی الکتروده فلزی استفاده می‌شود توان تولیدی و سرعت جریان الکتریکی نسبت به نافلز مثل گرافیت بیشتر می‌شود. با این حال رسوب اکسیدهای فلزی مثل آهن و آلومینیوم باعث افت توان در الکترودها و خوردگی الکترودهایی مثل فولاد باعث کاهش کارایی این روش می‌شود. عزیزی و همکاران^۳ از الکتروده فولاد ضد زنگ و گرافیت برای بهسازی الکتریکی استفاده کردند که تاثیر فولاد بر افزایش مقاومت نسبت به گرافیت بیشتر بوده است [۱۹]. ليو و همکاران^۴ از الکترودهای آلومینیوم و مس برای بهبود مقاومت خاک استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که آلومینیوم نسبت به مس زهکشی بیشتر و مصرف انرژی کمتری دارد [۲۱]. جریان الکتریکی عامل دیگری در بررسی تاثیر بهسازی الکتریکی است. افزایش جریان الکتریکی باعث افزایش جریان الکترواسمزی و در نتیجه بهبود مقاومت خاک می‌شود [۲۲]. علی باروتی تبار و همکاران^۵ به بررسی تغییر ولتاژ بر نرخ آبیگری الکترواسمزی خاک لای همراه با زهکش عمودی پیش‌ساخته پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش ولتاژ موجب کاهش درصد رطوبت در نمونه خاک می‌گردد و حجم آب خروجی را افزایش

- 1 Shang et al
- 2 Ou et al
- 3 Azizi mir mahalleh et al
- 4 Liu and Xu
- 5 Alibarootitabar et al



شکل ۲. نمایی از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش

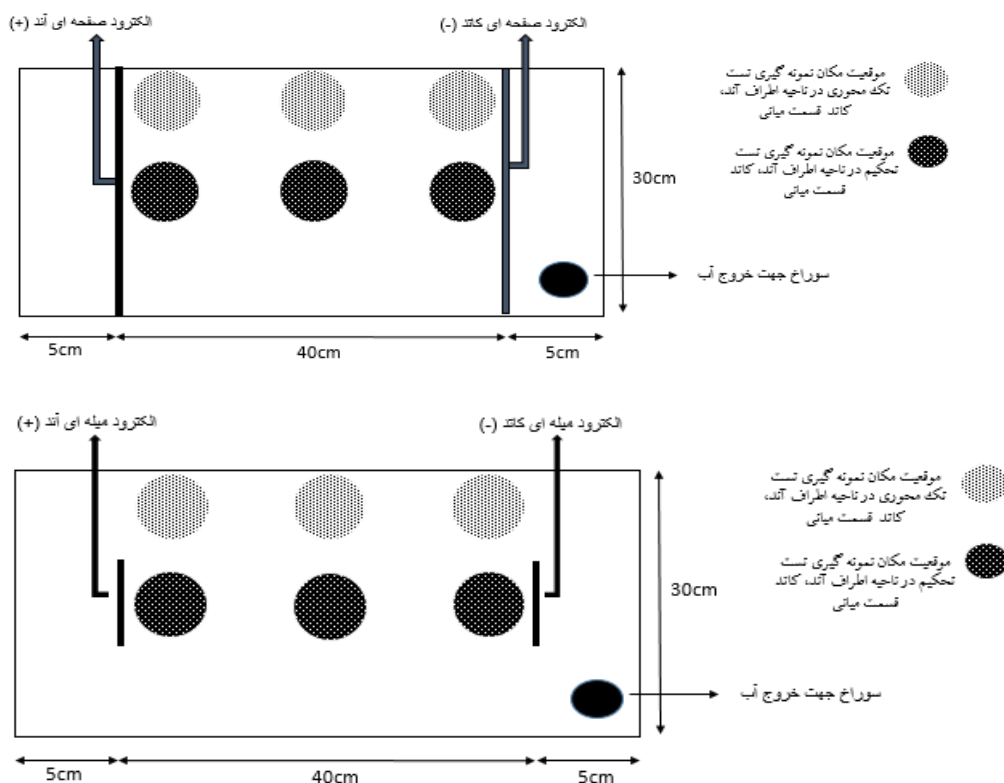
Fig. 2. Schematic configuration of electro-osmotic apparatus used in the experiment

در این آزمایش گرادیان ولتاژ 1 v/cm و $1/5$ توده خاک با استفاده از دو نوع الکتروود آلومینیوم (با علامت اختصاری AI) و گرافیت (با علامت اختصاری G) و اشکال میله‌ای (با علامت اختصاری R) و صفحه‌ای (با علامت اختصاری P) در دوره زمانی ۴۸ ساعت با اتصال الکتروودها به منبع تغذیه به نمونه خاک اعمال شده است. برای اعمال گرادیان ولتاژ انتخابی با توجه به حداکثر جریان تولیدی ایجاد شده توسط منبع تغذیه DC مورد استفاده (60 V) فاصله الکتروودها از هم 40 cm انتخاب شده است. جدول ۲ مشخصات آزمایشهای مقاومت فشاری محدود نشده انجام شده روی خاک رس مورد استفاده در این تحقیق را نشان میدهد. شکل ۴ تصاویری از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد. پس از اتمام دوره زمانی ۴۸ ساعت، جریان برق قطع شده و مدل برای نمونه‌گیری جهت آزمایشهای موردنظر آماده شد.

به‌منظور مطالعه اثرات جریان الکترواسمز در خاک و بررسی رفتار تنش - کرنش خاک، آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده (تک‌محوری) بر روی نمونه خاک (ناحیه اطراف کاتد، آند و قسمت میانی) براساس استاندارد ASTM - D2166 انجام شده است. جهت انجام آزمون مقاومت فشاری، 2 cm از سطح خاک برداشته شد و قالب تک‌محوری را برای نمونه‌گیری در قسمت موردنظر فشار داده و با استفاده از دستگاه بیرون آورنده نمونه، نمونه به آرامی خارج شده و جهت تست در دستگاه تک‌محوری قرار داده شد. در مجموع ۲۵ آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (۱ نمونه خاک بهسازی نشده، ۲۴ نمونه با سه متغیر و در نزدیک آند، کاتد و قسمت میانی) انجام شد. همچنین تغییرات درصد رطوبت و حدود اتربرگ به عنوان مهمترین

از ایجاد شیر با میله، با ضربه زدن به محفظة، شیر شروع به بسته شدن می‌کرد. سپس برای جلوگیری از بخار شدن آب درب محفظة بسته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شد. با اندازه‌گیری درصد رطوبت قبل از شروع بهسازی درجه اشباع خاک به ۹۰ درصد رسید. در این مرحله نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایشهای درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصورنشده، تحکیم و SEM بر روی خاک بهسازی نشده، گرفته شد. سپس برای انجام عملیات بهسازی الکتریکی، خاک مطابق مراحل قبلی آماده شد و پس از آن با تخلیه خاک محل الکتروودها، الکتروودها به صورت صفحه‌ای و میله‌ای [۱۷، ۲۳] داخل خاک قرار داده شد بعد از آماده کردن مدل، قرارگیری الکتروودها در داخل خاک و اشباع شدن نمونه، الکتروودها به منبع تغذیه جریان برق مستقیم (DC) متصل شده و خروج آب از سوراخی که در کف محفظة تعبیه شده انجام شد و خاک مورد آزمایش به طور مداوم در معرض جریان برق مستقیم قرار گرفته است. تمامی آزمایشها در دمای طبیعی اتاق انجام شده و سطح خاک نیز در معرض هوای آزاد قرار داشته است.

مدل مورد استفاده در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. آزمایش در یک محفظة از جنس پلكسى گلاس به ابعاد $50 \times 30 \times 20 \text{ cm}^3$ انجام گرفت. الکتروودها در دو حالت میله‌ای به ابعاد $5 \times 15 \text{ cm}^2$ و یا صفحه‌ای به ابعاد $15 \times 30 \text{ cm}^2$ استفاده شده‌اند و برای ایجاد شرایط حرکت آزادانه آب در دیواره الکتروودها سوراخ ایجاد شده است. ارتفاع الکتروودها به گونه‌ای انتخاب شده است که نمونه‌گیری برای انجام آزمایش مقاومت فشاری به سهولت انجام شود.



شکل ۳. نمای بالای سیستم الکترواسمزی و محل نمونه‌برداری اطراف آند، کاتد و قسمت میانی [۱۹] در دو حالت استفاده از الکتروده صفحه‌ای و میله‌ای

Fig. 3. Plan view of the electro-osmotic apparatus and the sampling location around the anode, cathode and the middle zone [19] in two state of using plate and rod electrodes

صفحه‌ای در جریان‌های 1 V/cm و $1/5$ بعد از گذشت ۴۸ ساعت در نزدیکی آند، کاتد و قسمت میانی را نشان می‌دهند.

با اعمال یک اختلاف پتانسیل الکتریکی با جریان مستقیم بر خاک، ذرات معلق باردار، یون‌ها و آب منفذی هر یک در مسیرهای خاص خود به حرکت درمی‌آیند. جریان الکترواسمزی از سمت آند به سمت کاتد است بنابراین مقدار کاهش درصد رطوبت از آند به سمت کاتد کاهش می‌یابد. خشک شدن در اثر گرمای ایجاد شده حین القای جریان الکتریکی و تبخیر طبیعی آب نیز از عوامل موثر دیگر در کاهش درصد رطوبت خاک است [۲۷].

تغییر در میزان درصد رطوبت یک فرآیند غالب حین اعمال جریان برق در خاک می‌باشد. پدیده الکترواسمزی با تغییر در مقدار و حجم آب زهکشی شده میزان درصد رطوبت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. البته دو عامل خشک شدن و تبخیر طبیعی با توجه به شرایط محیطی مانند رطوبت و دمای محیط نیز

خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه خاک رس بر روی نمونه‌های بدست آمده از اطراف کاتد، آند و قسمت میانی خاک به ترتیب براساس استاندارد (ASTM - D2216) و (ASTM - D4318) انجام و برای بررسی میزان تحکیم‌پذیری خاک رس از ۴ نمونه (۱ نمونه خاک بهسازی نشده، ۳ نمونه بهینه) آزمایش تحکیم براساس استاندارد (ASTM - D2435) صورت گرفت. پس از برداشتن ۲ cm از سطح خاک، حلقه‌های مربوط به آزمون تحکیم برای نمونه‌گیری در مدل قرار داده شد و جهت آزمایش در دستگاه تحکیم قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

نمودار شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب میزان تغییر درصد رطوبت خاک در حالت استفاده از الکتروده‌های آلومینیوم و گرافیت در دو نوع میله‌ای و

جدول ۲. مشخصات آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده

Table 2. Characteristics of unconfined compressive strength tests

نمونه ها	جنس الکتروود	شکل الکتروود	محل نمونه گیری	آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در ولتاژ اعمالی 1v/cm	آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در ولتاژ اعمالی 1/5v/cm
۱	Al	صفحه ای	نزدیکی آند	*	*
۲			قسمت میانی	*	*
۳			نزدیکی کاتد	*	*
۴		میله ای	نزدیکی آند	*	*
۵			قسمت میانی	*	*
۶			نزدیکی کاتد	*	*
۷	G	صفحه ای	نزدیکی آند	*	*
۸			قسمت میانی	*	*
۹			نزدیکی کاتد	*	*
۱۰		میله ای	نزدیکی آند	*	*
۱۱			قسمت میانی	*	*
۱۲			نزدیکی کاتد	*	*

** آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک طبیعی در قسمت میانی انجام گرفت.

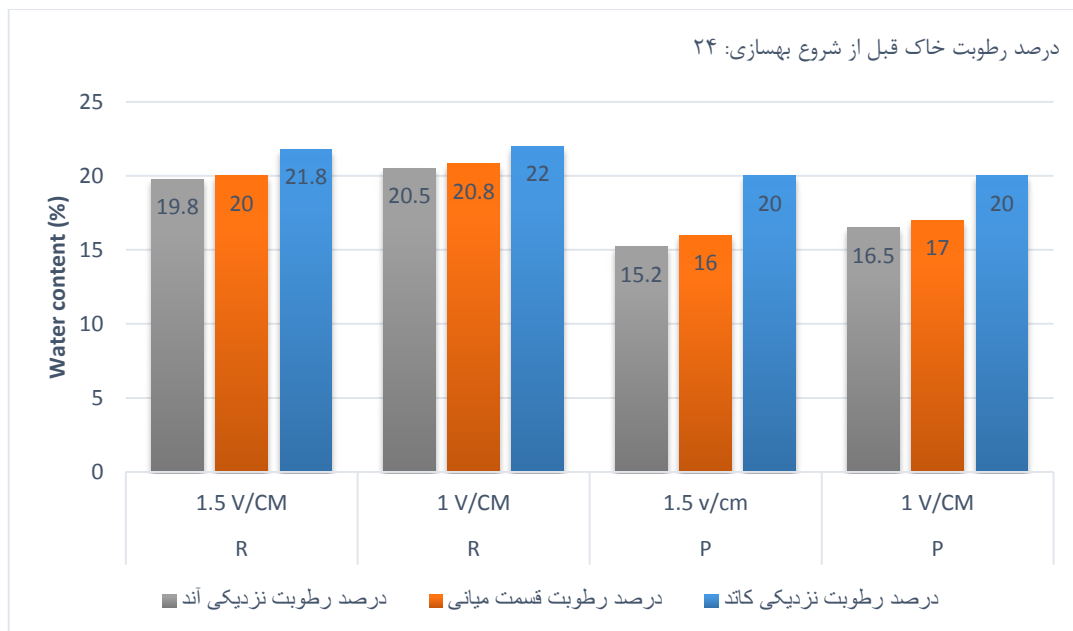
و در نتیجه گرمای بیشتری تولید می‌شود، نسبت به الکتروود میله‌ای که تنها یک مسیر خطی را مورد تاثیر قرار می‌دهد اثر بیشتری در کاهش درصد رطوبت کل مجموعه خاک دارد. با توجه به محل نمونه‌گیری خاک جهت آزمایش درصد رطوبت خاک در نزدیکی آند، کاتد و قسمت میانی خاک تاثیر شکل الکتروود کاملا مشخص می‌شود. همچنین هنگام استفاده از الکتروود آلومینیوم با اکسید این فلز، یون آلومینیوم با یونهای لایه دوگانه جایگزین شده و یونهای آزاد شده با شرکت در فرآیند الکترواسمزی باعث خروج آب بیشتر و کاهش بیشتر درصد رطوبت در خاک می‌شود. به عنوان نمونه درصد رطوبت برای نمونه‌هایی که از آلومینیوم صفحه‌ای به عنوان الکتروود استفاده شده است (با ولتاژ اعمالی برابر 1 v/cm) در نزدیکی آند ۱۸/۱ و در حالت استفاده از گرافیت صفحه‌ای ۲۰ می باشد که در مقایسه با خاک بهسازی نشده به ترتیب به میزان ۲۵٪ و ۱۷٪ بوده است.

عوامل تاثیرگذار بر درصد رطوبت خاک می‌باشند. افزایش جریان اعمالی با توجه به تولید انرژی الکتریکی بیشتر و گرما در خاک تحت درمان، تغییر در نوع و شکل الکتروودها با توجه به تفاوت در رسانایی الکتروودها می‌تواند بر درصد رطوبت تاثیر بگذارد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است کاهش درصد رطوبت در الکتروود آلومینیومی نسبت به الکتروود گرافیتی بیشتر بوده و این مسئله ممکن است به دلیل رسانایی بیشتر آلومینیوم نسبت به گرافیت، در نتیجه توان تولیدی و سرعت جریان الکتریکی بیشتر باشد و در نتیجه میزان خروج آب از خاک افزایش می‌یابد. عامل مهمتری که در تغییر نتایج مشخص است، استفاده از الکتروودهای صفحه‌ای نسبت به الکتروود میله‌ای می‌باشد. با توجه به اینکه در یک خاک که تحت بهسازی الکترواسمزی قرار گرفته است حین استفاده از الکتروود صفحه‌ای سطح بیشتری از خاک تحت تاثیر جریان الکتریکی قرار می‌گیرد، انرژی الکتریکی بیشتری از خاک جریان پیدا می‌کند



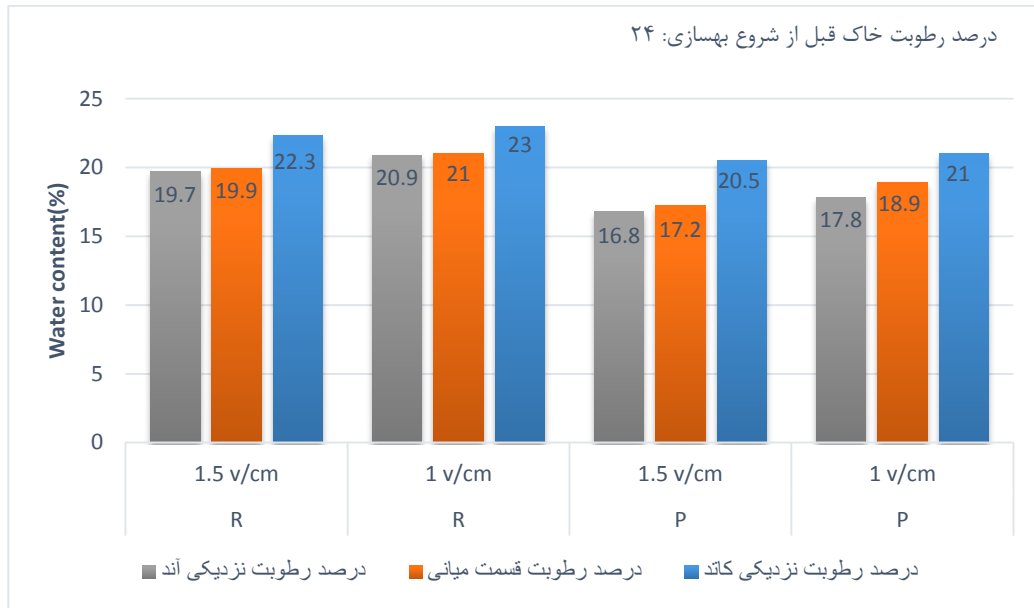
شکل ۴. تصاویری از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش در دو حالت استفاده از الکترود میله‌ای و صفحه‌ای

Fig. 4. Electroosmosis system used in the experiment in two states of using rod and plate electrodes



شکل ۵. تغییرات درصد رطوبت در حالت استفاده از الکترود آلومینیومی در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای

Fig. 5. Variation of water content for aluminum electrode in both plate and rod state



شکل ۶. تغییرات درصد رطوبت در حالت استفاده از الکترود گرافیتی در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای

Fig. 6. Variation of water content for r graphite electrode in both plate and rod state

رطوبت بیشتر از حد روانی باشد آب آزاد در خاک ظاهر شده و خاک به حالت روانی در می آید. پس از بهسازی الکترواسمزی حدود اتربرگ خاک برای نمونه خاک بهسازی نشده و خاک بهسازی شده به روش لکترواسمزی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد برای تمامی نمونه ها درصد رطوبت بین حد خمیری و حد روانی می باشد و فقط در سه نمونه بهسازی شده با الکترود آلومینیوم صفحه ای با ولتاژهای ۱ v/cm و ۱/۵ و با الکترود گرافیت صفحه ای با ولتاژ ۱/۵ v/cm در نزدیکی آند درصد رطوبت کمتر از حد خمیری می باشد. با بررسی این نتایج مشاهده می شود که در حالت استفاده از الکترود صفحه ای در ولتاژ بالاتر به دلیل تاثیر مناسب این الکترود بر نمونه ی خاک آب پیوندی ضعیف نیز در خاک تشکیل نشده است. به طور کلی پس از اعمال جریان الکترواسمزی در هیچ کدام از نمونه ها آب آزاد وجود ندارد، سان و همکارانش نیز در مطالعه خود که اثر اعمال جریان مستقیم بر نمونه خاک رس نرم را مورد بررسی قرار دادند به این نتیجه رسیدند که پس از اعمال جریان الکتریکی در خاک رس نرم آب آزاد وجود ندارد [۳۴].

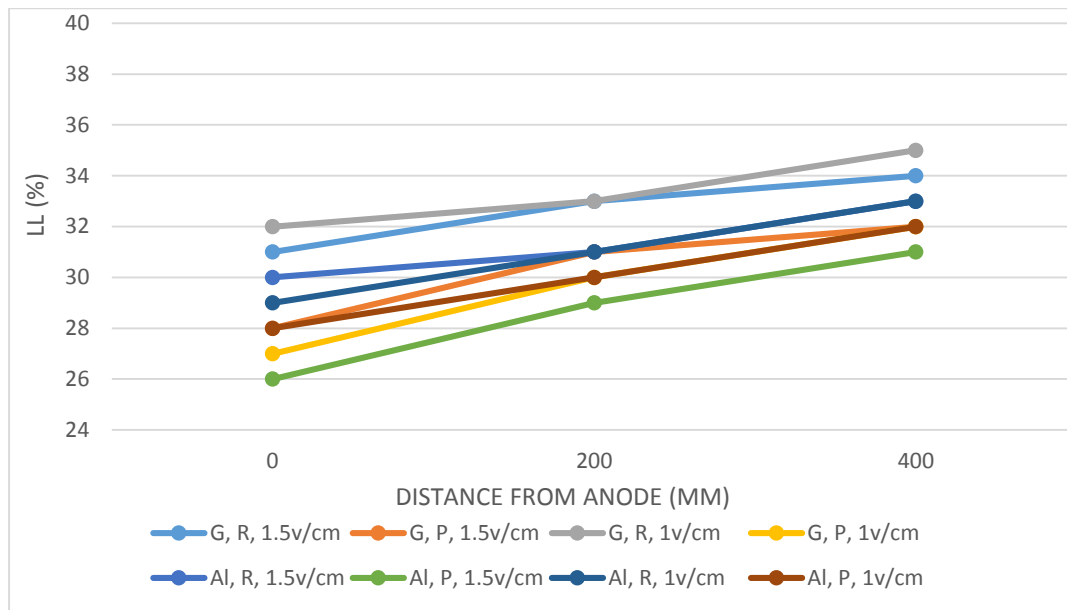
یکی از پدیده هایی که در روش الکتروکینتیک مشاهده می شود فرآیند الکترواسمزی است که به دلیل اعمال جریان در خاک آب موجود در حفرات

بیشترین میزان کاهش درصد رطوبت مربوط به حالت استفاده از الکترود آلومینیوم صفحه‌ای با جریان اعمالی ۱/۵ v/cm به مقدار ۵۸٪ در نزدیکی آند و کمترین میزان کاهش مربوط به حالت استفاده از الکترود گرافیت میله‌ای به مقدار ۱۳٪ در نزدیکی کاتد است. کاهش درصد رطوبت در بهسازی الکترواسمزی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۲۸-۳۳].

با آبیگری تحت جریان برق، فشار آب حفره‌ای منفی شده و مکش در تراوش آب در ساختار خاک ریزدانه توسعه می‌یابد. می‌توان گفت که تغییرات درصد رطوبت خاک‌های مورد آزمایش ناشی از ترکیب فرآیند آبیگری بر اثر جریان برق در خاک، تبخیر طبیعی و فرآیند خشک شدن ناشی از گرمای ایجاد شده توسط اعمال جریان به خاک می‌باشد.

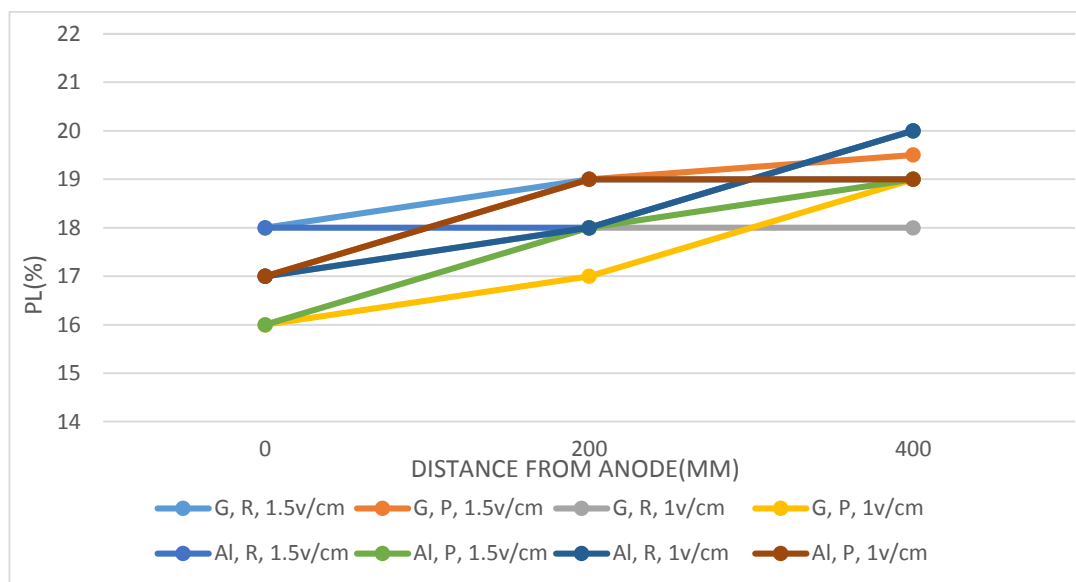
نمودار شکل‌های ۷-۹ تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌های خاک را تحت ولتاژهای ۱ v/cm و ۱/۵ در حالت استفاده از الکترودهای آلومینیومی و گرافیتی در دو حالت میله‌ای و صفحه‌ای نشان می‌دهند.

آب موجود در خاک بر حدود اتربرگ تاثیر می‌گذارد. اگر درصد رطوبت خاک از حد پلاستیک کمتر باشد آب پیوندی محکم اطراف ذرات خاک رس را در حالت جامد و نیمه جامد را احاطه می‌کند. اگر درصد رطوبت بین حد پلاستیک و حد روانی باشد آب پیوندی ضعیف تشکیل می‌شود و اگر درصد



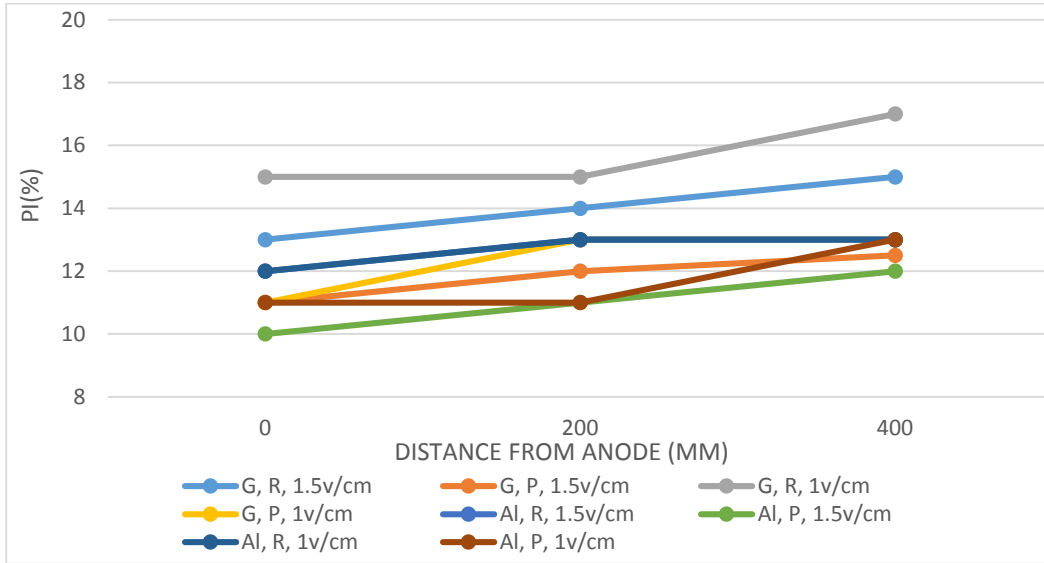
شکل ۷. تغییرات حد روانی با فاصله از آند مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت

Fig. 7. Variation of Liquid Limit (LL) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



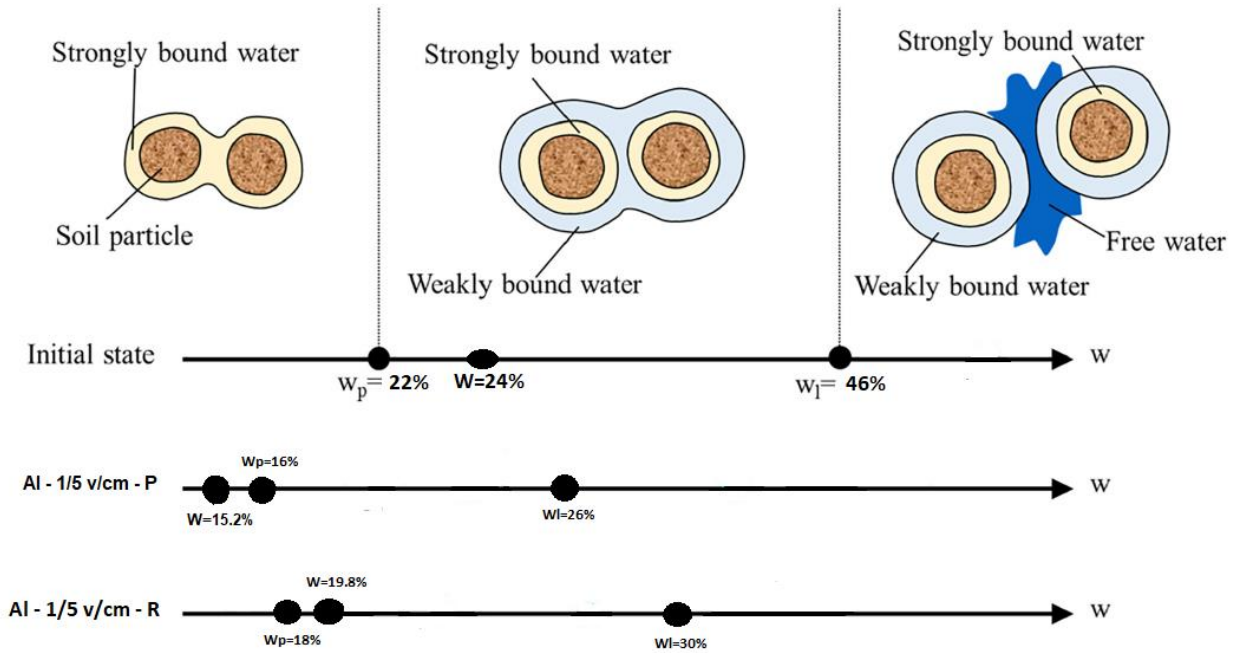
شکل ۸. تغییرات حد خمیری با فاصله از آند مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت

Fig. 8. Variation of Plastic Limit(PL) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



شکل ۹. تغییرات شاخص خمیری با فاصله از آند مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت

Fig. 9. Variation of Plasticity Index(PI) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



شکل ۱۰. حدود اتبرگ و درصد رطوبت برای نمونه های با الکترود آلومینیومی در نزدیکی آند در دو حالت الکترود صفحه ای و میله ای (ولتاژ ۱/۵ v/cm)

Fig. 10. Atterberg limits and water content for aluminum electrode near the anode in both plate and rod electrode states (voltage 1/5 v/cm)

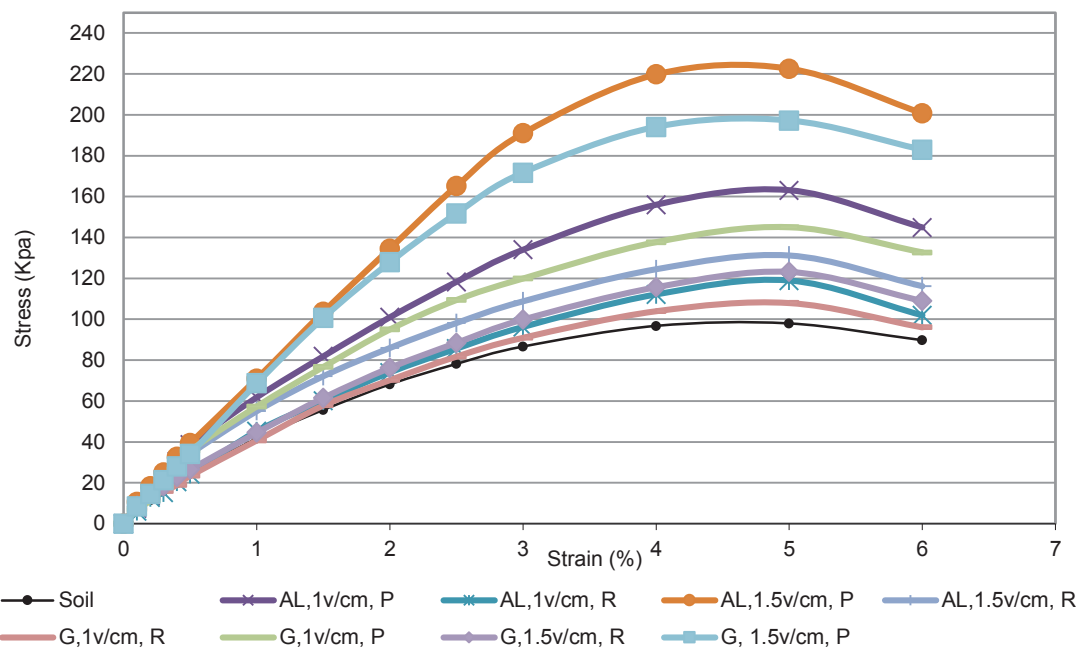
تبادل یونی در طول الکترواسمز باعث جایگزینی یون‌های ظرفیت بالا مانند Al^{3+} و Fe^{3+} در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و جاذبه بین ذرات نیز باعث کاهش مقدار PI می‌شود. محققان زیادی کاهش شاخص خمیری را هنگام استفاده از بهسازی الکترواسمزی گزارش داده‌اند [۳۶، ۳۷].

در تمامی حالات مقدار شاخص خمیری کاهش پیدا کرده و بیشترین مقدار کاهش شاخص خمیری مربوط به حالت استفاده از الکتروود آلومینیوم صفحه‌ای با اعمال جریان $1/5$ v/cm در نزدیکی الکتروود آند می‌باشد. این نتایج در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است [۳۸]. بهسازی الکترواسمزی با تاثیر بر میزان آب موجود در خاک و همچنین تغییر در ساختار شیمیایی خاک از طریق انتقال یون‌ها موجب تغییر در میزان شاخص خمیری خاک می‌شود.

نمودارهای ۱۱-۱۳ نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های خاک بهسازی نشده و خاک تحت ولتاژهای 1 v/cm و $1/5$ با الکترودهای آلومینیوم و گرافیت در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای در نواحی اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی را نشان می‌دهند.

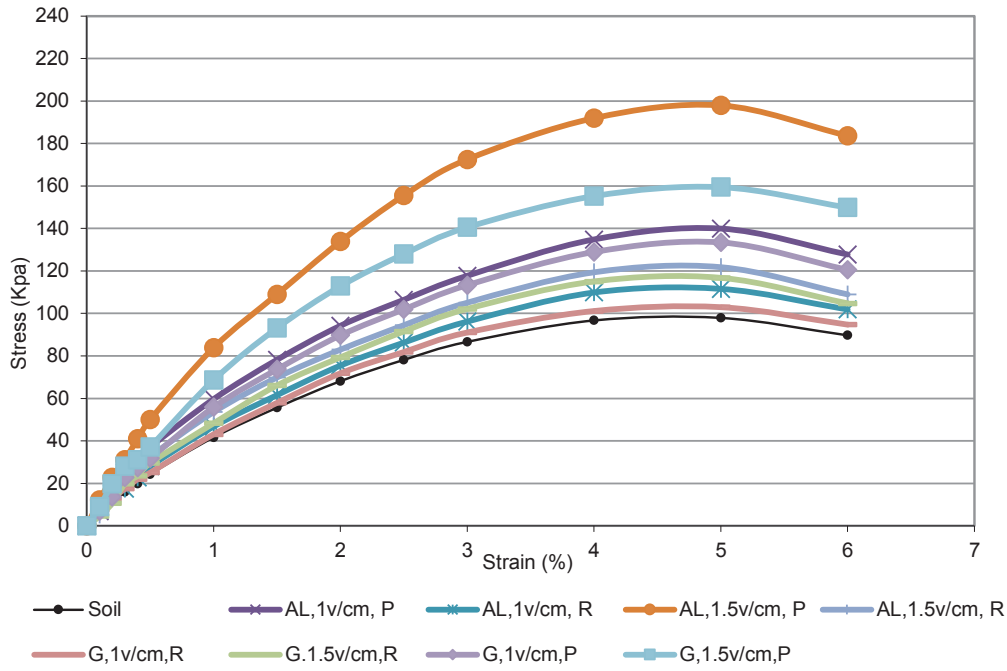
حرکت می‌کند. مقدار و محتوای آب درون خاک عمدتاً به دلیل پدیده فرارفت الکترواسمزی تغییر خواهد کرد. این امر مهم‌ترین عامل تاثیرگذار در حدود اتربرگ می‌باشد. پدیده تاثیرگذار دیگر در این فرآیند انتقال الکتریکی است که موجب حرکت ذرات باردار در حفرات در اثر اعمال جریان الکتریکی می‌باشد. انتقال الکتریکی یونها و اثرات متقابل آنها با مواد معدنی موجود در خاک رس به دلیل ایجاد تغییرات در مقادیر غلظت یونی (لایه آب دوگانه) و به وجود آمدن تغییرات دیگر در ساختار خاک رس به واسطه انتقال یون ها شاخص خمیری تغییر را تغییر می‌دهد. نتایج نشان داد با انجام بهسازی الکتریکی مقدار شاخص خمیری در سه قسمت مورد آزمایش نزدیکی آند، کاتد، قسمت میانی کاهش می‌یابد. کاهش در مقدار شاخص خمیری در تحقیقات قبلی نیز گزارش شده است [۳۵]. محققان دلیل این تغییر را به حضور یون‌های سدیم در خاک‌های با ساختار پراکنده و اثرات آن بر لایه آب دوگانه و فرآیندهای الکترواسمزی ارتباط داده‌اند [۱۹].

تولید H^+ در آند و OH^- در کاتد منجر به افزایش PH از آند به سمت کاتد می‌شود، بار منفی ذرات خاک افزایش یافته و همانطور که از شکل ۸ مشخص است، باعث افزایش PL خاک می‌شود.



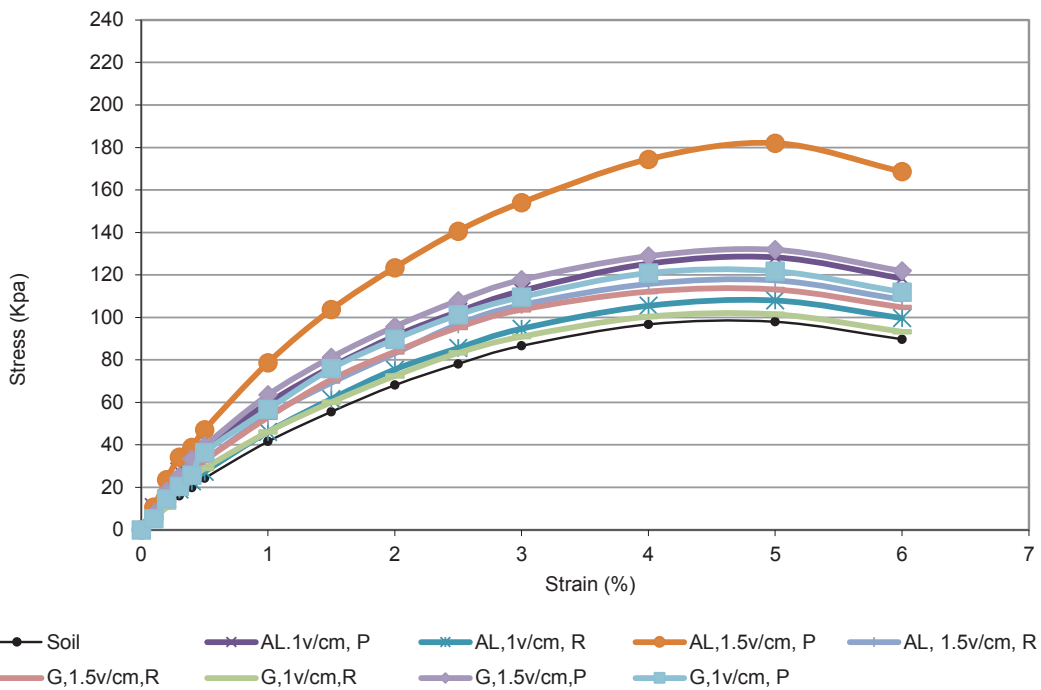
شکل ۱۱. نتایج مقاومت تک‌محوری مربوط به الکتروود آلومینیوم و گرافیت نزدیک آند

Fig. 11. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode near the anode



شکل ۱۲. نتایج مقاومت تک‌محوری مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت قسمت میانی

Fig. 12. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode in middle zone



شکل ۱۳. نتایج مقاومت تک‌محوری مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت نزدیک کاتد

Fig. 13. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode near the cathode

تاثیر اعمال جریان الکتریکی در طول ۴۸ ساعت بر افزایش مقاومت تک محوری نمونه بهسازی شده به ویژه در ناحیه آند مشهود است. همانطور که از نمودارها مشخص است. میزان مقاومت خاک بهسازی نشده از بقیه نمونهها کمتر است چرا که با اعمال ولتاژ و حرکت آب در خاک و زهکشی آن، همچنین تولید گرما در خاک به علت جریان الکتریکی درصد رطوبت کاهش یافته و همین امر یکی از عوامل افزایش مقاومت خاک می باشد. همچنین با توجه به جهت حرکت آب در خاک با اعمال جریان الکتریکی میزان مقاومت در نزدیکی آند از کاتد بیشتر است. به عنوان مثال، تحت گرادیان 1 v/cm با الکتروود گرافیت میله‌ای، نزدیک آند مقاومت از 98 kpa به 119 kpa و با گرادیان $1/5 \text{ v/cm}$ به 131 kpa می‌رسد این بررسی نشان میدهد میزان مقاومت در این نمونه با ولتاژ اعمالی 1 v/cm نسبت به نمونه خاک طبیعی 21% و با ولتاژ اعمالی $1/5 \text{ v/cm}$ به میزان 34% افزایش داشته است.

شکل الکتروود عامل دیگر در تغییر مقاومت فشاری بوده به این دلیل که در حالت استفاده از الکتروود صفحه‌ای تمام نمونه خاک تحت تاثیر جریان قرار گرفته، زهکشی آب بیشتر شده و درصد رطوبت بیشتری کاهش می‌یابد بنابراین مقاومت فشاری افزایش بیشتری پیدا می‌کند. رابطه مستقیم بین کاهش درصد رطوبت با افزایش مقاومت خاک توسط محققان گزارش شده است [۲].

به عنوان مثال خاک حین استفاده از الکتروود گرافیت میله‌ای با جریان 5 v/cm در قسمت میانی مقاومت فشاری از 98 kpa به 122 kpa به میزان 25% و در حالت استفاده از الکتروود صفحه‌ای مقاومت فشاری به 198 kpa رسیده است که به میزان 102% افزایش پیدا کرده است.

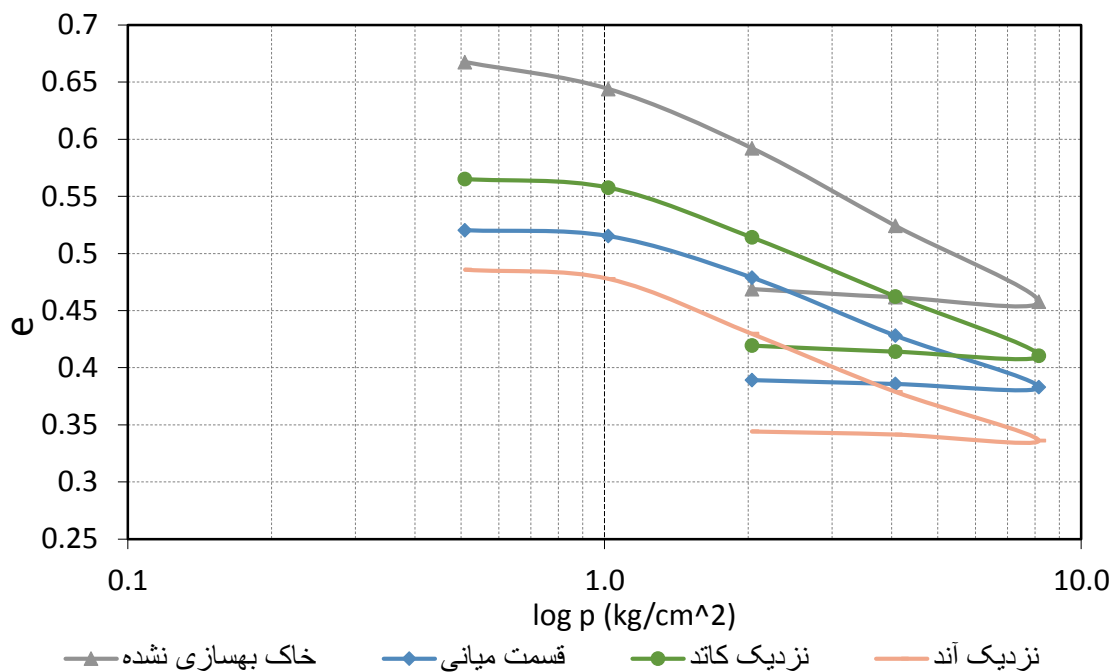
عامل مهم دیگر در این مطالعه که مورد بررسی قرار گرفته است، نوع الکتروود مصرفی می باشد. مطالعات محققان نشان می دهد که با توجه به رسانایی بیشتر آلومینیوم نسبت به گرافیت این الکتروود می تواند نتایج بهتری در بهسازی الکترواسمزی نشان دهد. همانگونه که از نمودارها مشخص است مقاومت خاک مورد بررسی حین استفاده از الکتروود میله‌ای با ولتاژ 5 v/cm در نزدیکی آند 34% و هنگامی که از الکتروود صفحه‌ای استفاده می شود 128% افزایش یافته است. بهترین نمونه برای افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه خاک حین استفاده از الکتروود آلومینیوم صفحه‌ای با ولتاژ 5 v/cm به مقدار 223 kpa می‌باشد. در سه قسمت نمونه‌گیری شده مقاومت فشاری افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر مربوط به محدوده آند است. این افزایش مقاومت با توجه به جهت جریان الکترواسمزی مورد انتظار بود. این نتایج در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است [۳۹].

انتقال کاتیون‌ها یکی از عوامل تغییر محتوای شیمیایی خاک است. سمنتاسیون یکی از واکنش‌هایست که باعث بهبود مقاومت خاک می‌شود. یون‌های کلسیم خاک و یون‌های آلومینیوم آزاد شده از الکتروود در فرایند سیمتاسیون شرکت کرده و باعث بهبود استحکام خاک می‌شود این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت خاک حین استفاده از الکتروود آلومینیومی نسبت به گرافیت باشد. پس از اعمال جریان الکتریکی در خاک با ایجاد ساختار تجمعی و لخته شده، نفوذپذیری خاک نیز افزایش پیدا می کند که این عامل تاثیر بسزایی در افزایش دفع آب از خاک بهسازی شده با استفاده از روش الکتروکینتیک دارد. مسیرهای موجود برای حرکت سیال و پتانسیل ایجاد میدان الکتریکی (رسانایی الکترواسمزی) با نزدیک تر شدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ساختار لخته شده افزایش یافته و میزان خروج آب از نمونه بیشتر می شود. بنابراین فرآیند الکترواسمزی خروج آب را از خاک تسریع بخشیده و زمان لازم برای تشکیل ساختار یکپارچه در خاک را کاهش می دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی این میزان کاهش، افزایش می یابد ایجاد ساختار تجمعی و لخته شده پس از اعمال جریان الکتریکی در تطابق با نتایج و کیلی و همکاران می باشد [۴۰].

آبگیری، مکش ایجاد شده در خاک، تحکیم خاک، انتقال الکتریکی یون‌ها به دلیل ایجاد تغییر در غلظت یونی، تغییر ضخامت لایه آب دوگانه، واکنش‌های سیمانی، خشک‌شدن طبیعی خاک و گرمای ایجاد شده حین جریان الکتریکی که باعث ایجاد واکنش‌های گرمازا شده و در نتیجه تغییر در ساختار خاک از دیگر عوامل افزایش مقاومت خاک می‌باشد [۱۶].

به‌منظور بررسی بیشتر اثر بهسازی الکترواسمزی بر رفتار خاک آزمایش تحکیم بر روی حالت‌های بهینه (نزدیکی کاتد، نزدیکی آند و قسمت میانی در حالت استفاده از الکتروود آلومینیومی صفحه‌ای با جریان ولتاژ $1/5 \text{ v/cm}$) انجام شد. محل انتخاب نمونهها در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نتایج آزمون تحکیم و در جدول ۳ مقادیر شاخص تراکم (Cc) و شاخص تورم (Cs) برای نمونه‌ی مورد بررسی آورده شده است.

با توجه به نتایج، مقادیر نشست برای نمونه خاک بهسازی شده در نزدیکی آند بهتر بوده است. کاتیون‌هایی که وارد آب بین حفره‌ای شده و به سمت کاتد حرکت می‌کند با جابجایی آب اطراف خود باعث خروج بیشتر آب و افزایش استحکام می‌شوند. با خروج آب توسط این کاتیون‌ها یک فشار مکشی منفی به حفره‌های بین خاک وارد شده و منجر به از بین رفتن یا کوچکتر شدن حفره‌ها می‌شود این مسئله باعث کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش استحکام خاک شده و از طرفی جریان آب لایه دوگانه تحت میدان



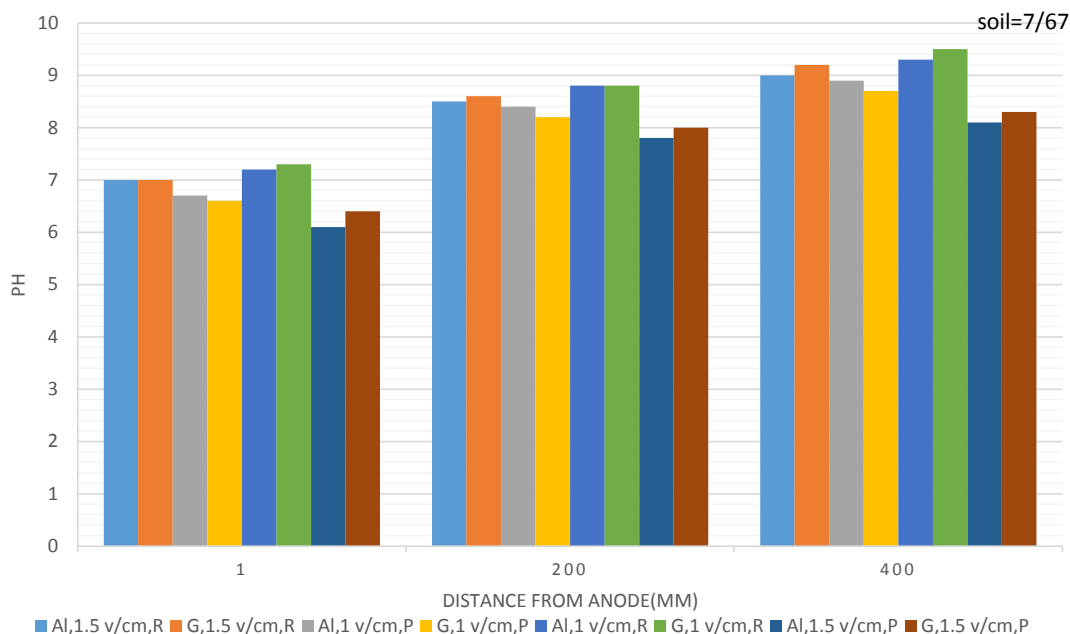
شکل ۱۴. نتایج آزمون تحکیم در شرایط استفاده از الکترود آلومینیومی صفحاتی با جریان ولتاژ ۱/۵ v/cm

Fig. 14. Results of consolidation test for plate aluminum electrode with voltage 1/5 v/cm

جدول ۳. مقادیر شاخص تراکم و تورم حاصل از آزمایش تحکیم

Table 3. Compaction Index and swelling Index from Consolidation Test

نمونه	e0	شاخص تراکم (Ce)	شاخص تورم (Cs)
خاک بهسازی نشده	۰/۶۷۵	۰/۲۱	۰/۰۲۴
نزدیکی کاتد	۰/۵۹۲	۰/۱۷	۰/۰۱۸
قسمت میانی	۰/۵۲۴	۰/۱۵	۰/۰۱۱
نزدیکی آند	۰/۴۴۳	۰/۱۴	۰/۰۰۹



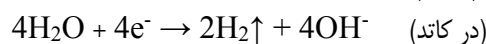
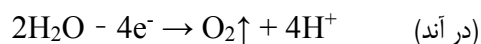
شکل ۱۵. تغییرات pH خاک با فاصله از آند

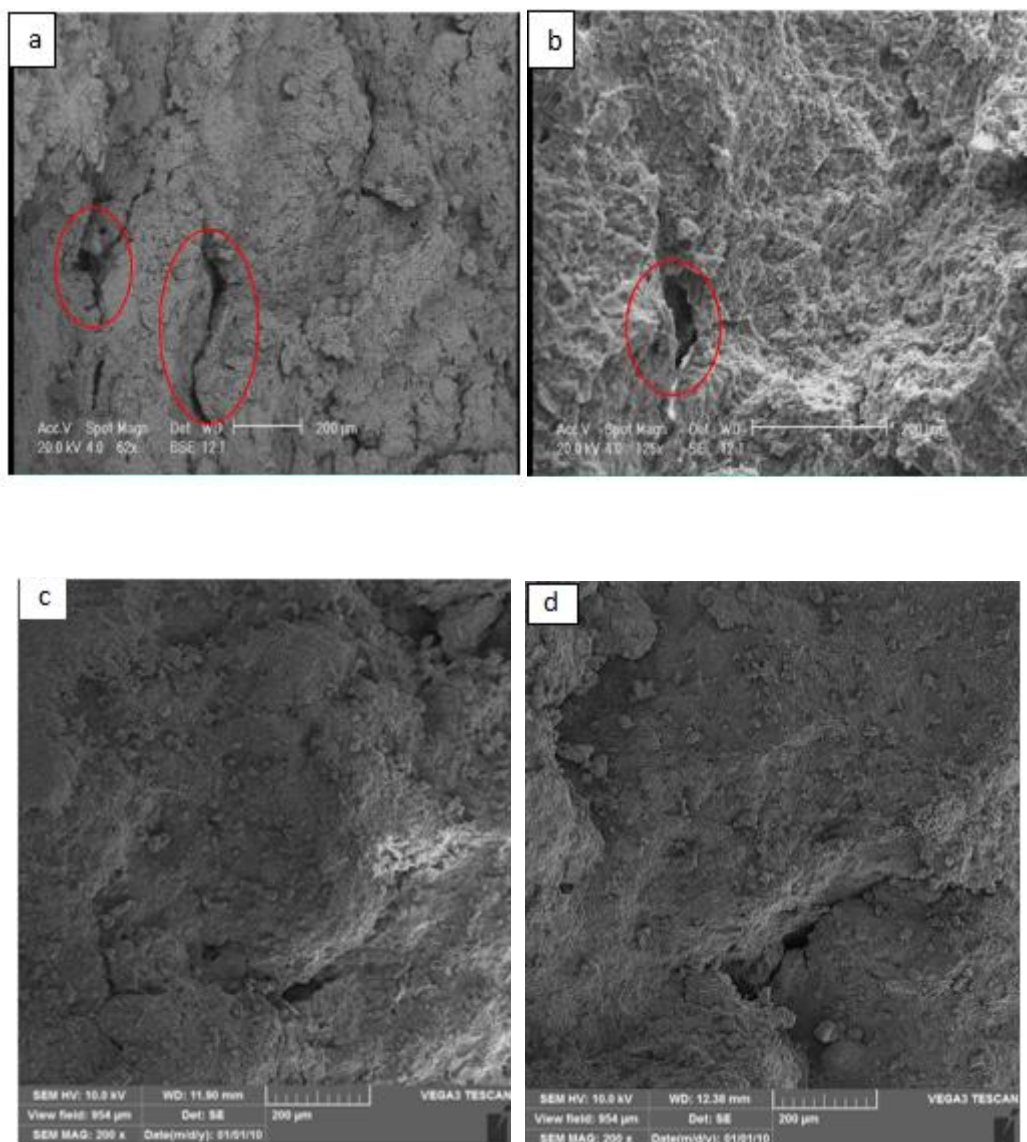
Fig. 15. Variation of pH with distance from the anode

با تولید H^+ در آند و با توجه به تحرک $1/8$ برابری بیشتر از OH^- و همچنین جهت حرکت جریان الکترواسمزی به سمت کاتد مقادیر PH پایین در بخش زیادی از نمونه خاک به ویژه در مجاورت آند رخ می دهد. پارامتر PH بیشترین اثرگذاری بر پتانسیل زتا دارد. در محیط های قلیایی تر با PH بالا، ذره میل کمتری به هم انباشتگی خواهد داشت و در نتیجه پتانسیل زتا کاهش می یابد (بیشتر منفی می گردد)، همچنین افزایش خاصیت اسیدی باعث می شود تا پتانسیل زتا افزایش یابد (عدد منفی کوچکتر) و در PH های بسیار پایین پتانسیل زتا به سمت مقداری مثبت حرکت کند که باعث کاهش و حتی توقف جریان الکترواسمزی به سمت کاتد می گردد. هرچه پتانسیل زتا منفی تر باشد نفوذپذیری خاک بیشتر می شود، اثر PH بر پتانسیل زتا در مطالعه ساجی یاما و همکاران نیز مورد بررسی قرار گرفته است همچنین کاهش PH در آند در تطابق با نتایج سان و همکارانش می باشد [۴۶، ۴۵]. وجود رسوبات سبز و قرمز رنگ در اطراف آند به علت رخ دادن اکسیداسیون در اطراف آند می باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۵، PH اولیه خاک بهسازی نشده $7/67$ بوده است که کمترین آن مربوط به نمونه الکترواد صفحه ای آلومینیومی با ولتاژ $1/5$ v/cm در اطراف آند با مقدار $6/1$ و با توجه به انتقال بیشتر H^+ در آند به دلیل صفحه ای بودن الکترواد و جنس آلومینیوم آن و ولتاژ بیشتر و بیشترین آن مربوط به نمونه الکترواد میله ای گرافیتی با ولتاژ $1/5$ v/cm در اطراف کاتد با مقدار $9/5$ می باشد. این نتایج در تطابق با محققان

الکتریکی از آند به سمت کاتد بوده این عامل باعث افزایش شدت جریان به سمت کاتد و در نتیجه افزایش تراکم و مقاومت خاک می شود. علاوه بر این، اکسیداسیون الکترواد آلومینیوم باعث قرار گرفتن یونهای آلومینیوم در لایه دوگانه شده و یونهای متحرک و کوچکتر را از لایه دوگانه خارج میکنند. یونهای آزاد شده در فرآیند الکترواسمزی شرکت کرده و مقدار آب بیشتری را از خاک خارج میکنند. همانطور که از نمودار مشخص است بهسازی الکتریکی باعث کاهش نسبت تخلخل و در نتیجه کاهش نشست خاک می شود و با توجه به جهت حرکت جریان الکترواسمزی بهبود خاک در نزدیکی آند بیشتر است.

با توجه به نتایج بدست آمده برای شاخص تراکم و همچنین شاخص تورم با اعمال جریان الکترواسمزی و در نتیجه کاهش مقدار نشست شاخص تراکم و شاخص تورم زیادی کاهش پیدا کرده است [۴۴-۴۱]. همانطور که از جدول ۳ مشخص است میزان شاخص تورم و نسبت تخلخل در نزدیکی آند نسبت به نمونه خاک بهسازی نشده به ترتیب به میزان 62% و 35% کاهش یافته است. در طول بهسازی الکتریکی، یون های هیدروژن و اکسیژن در اطراف آند و یون های هیدروکسیل در اطراف کاتد در نتیجه فرآیند الکترولیز صورت می گیرد. واکنشهای شیمیایی که در آند و کاتد رخ میدهد به صورت زیر است (۲):





شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی قبل (a و b) و بعد از بهسازی الکتروکینتیکی (c و d)

Fig. 16. SEM image before (a and b) and after after electrokinetic stabilization (c and d)

پس از اتمام دوره زمانی ۴۸ ساعت، و قطع جریان برق از اطراف الکترود آند) تحت آزمایش SEM قرار گرفتند. مطالعه ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی برای تایید نتایج آزمایش انجام میگردد. این آزمایش جهت مقایسه نمونه خاک بهسازی نشده و نمونه با حالت بهینه (الکترود صفحه ای آلومینیوم با ولتاژ اعمالی ۱/۵ v/cm) انجام گرفته است. تغییرات میکروساختار به دو سازکار اصلی مرتبط است. اول تعویض یونی که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه فشرده شدن صفحات سیلیکاتی می‌شود و دوم خروج آب از حفرات. که این دو پدیده از سمت آند به کاتد کمتر اتفاق می

دیگر است [۴۷، ۱۸]. در این نمودار روند کاهش PH از کاتد به سمت آند را نشان می دهد. همانگونه که از نمودارها نیز مشخص است تغییرات PH نسبت به خاک اولیه به ویژه در نزدیکی آند و در بخش هایی از قسمت میانی چشمگیر نمی باشد که احتمالاً به دلیل کم بودن جریان الکتریکی، واکنش های الکترولیز با شدت زیاد صورت نگرفته و مهاجرت یونی خیلی سریع انجام نشده است بنابراین مقادیر PH تغییر آنچنانی نداشته است.

در شکل ۱۶ دو نمونه (یک نمونه خاک بهسازی نشده، یک نمونه خاک بهسازی شده با الکترود صفحه ای آلومینیومی با ولتاژ اعمالی ۱/۵ v/cm

کاهش درصد طوبت خاک با افزایش مقاومت رابطه مستقیمی دارد با توجه به جهت جریان مقاومت از کاتد به آند افزایش پیدا کرد. انتقال کاتیون‌ها باعث تغییر در محتوای شیمیایی خاک می‌شود. یون‌های کلسیم خاک و یون‌های آلومینیوم آزاد شده از الکتروود در فرایند سم‌تاسیون شرکت کرده و باعث بهبود استحکام خاک می‌شود این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت خاک حین استفاده از الکتروود آلومینیومی نسبت به گرافیت باشد. جریان الکترواسمزی منجر به فشار منفذی منفی شده و منافذ را از بین برده و باعث یکپارچگی خاک می‌شود این مسئله باعث کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش استحکام خاک می‌شود. تغییر ساختار و بافت نمونه‌های خاک رس بهسازی شده با الکتروود صفحه‌ای آلومینیومی با گرادیان ولتاژ $1/5 \text{ v/cm}$ در مقایسه با خاک شاهد مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که با توجه به حرکت کاتیونی که باعث حرکت آب هیدراته اطراف کاتیون‌ها شده همچنین تبادل یونی که باعث جایگزینی یون‌های با ظرفیت بالا می‌شود ضخامت لایه دوگانه کاهش یافته و با افزایش جاذبه بین ذرات تخلخل کاهش می‌یابد بنابراین نمونه خاک تثبیت شده به روش الکتروکینتیک دارای ترکیب متراکمتری می‌باشد. درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت خاک و نشست تمامی نمونه‌ها در این تحقیق بهبود یافته‌اند اما در حالت استفاده از الکتروود صفحه‌ای بهترین نتایج بدست آمده‌اند که این به دلیل تاثیر جریان بر کل نمونه خاک و افزایش تولید گرما جهت تبخیر آب در مقابل الکتروود میله‌ای است. بهترین نتیجه برای نمونه خاک بهسازی شده با الکتروود صفحه‌ای آلومینیومی با گرادیان ولتاژ $1/5 \text{ v/cm}$ است که در مقایسه با خاک بهسازی نشده مقادیر شاخص خمیری و نسبت تخلخل آن به ترتیب 58% و 35% کاهش و مقاومت فشاری محدود نشده 128% افزایش یافته است.

منابع

- [1] I.L. Casagrande, Electro-osmosis in soils, Geotechnique, 1(3) (1949) 159-177.
- [2] S. Jayasekera, Electrokinetics to modify strength characteristics of soft clayey soils: a laboratory based investigation, Electrochimica Acta, 181 (2015) 39-47.
- [3] A. Estabragh, M. Naseh, A. Javadi, Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, Applied Clay Science, 95 (2014) 32-36.
- [4] M. Malekzadeh, J. Lovisa, N. Sivakugan, An overview

افتند. مویبندی، فشار منفی در حفرات ایجاد کرده و باعث از بین رفتن و یا کاهش حجم حفرات می‌شود [۴۸]. تخلخل‌های موجود در خاک از جمله پارامترهای بسیار تعیین کننده و تاثیرگذار بر استحکام آن می‌باشد. همانگونه که در تصاویر a و b مشاهده می‌شود (مناطق مشخص شده) اندازه تخلخل‌ها در نمونه خاک تثبیت نشده بسیار بزرگ است و وجود تخلخل‌هایی با این ابعاد به شدت مقاومت خاک را کاهش می‌دهد. با مقایسه تصاویر a و b با تصاویر c و d به خوبی می‌توان تفاوت و تغییر در ابعاد تخلخل‌ها را بعد از تثبیت خاک مشاهده کرد. تغییراتی که لخته شدن و آگلومراسیون در آن‌ها به وضوح مشخص است این فرآیندها در تصاویر بعد از بهسازی کاملا نمایان است. نتایج نشان داده است که نمونه خاک طبیعی از توده‌های خاک جدا از هم تشکیل شده‌اند. این ممکن است به دلیل جذب آب توسط ذرات رس باشد، این ذرات با جذب آب به توده‌های بزرگتری تبدیل میشوند. از سوی دیگر تبادل یونی در طول الکترواسمز باعث جایگزینی یون‌های ظرفیت بالا مانند Al^{3+} و Fe^{3+} در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و همچنین جاذبه بین ذرات باعث کاهش تخلخل خاک شده و بنابراین نمونه خاک بهسازی شده دارای ترکیب متراکم می‌باشد.

با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق و مقایسه آن با مطالعات پیشین ارائه شده در مقدمه نتایج نشان‌دهنده بهبود شرایط مقاومتی خاک است همچنین نتایج SEM نشان دهنده کاهش حفرات موجود در خاک بعد از بهسازی الکتروکینتیکی می‌باشد که این امر می‌تواند صحت نتایج فیزیکی را تایید کند.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر عوامل مختلف مرتبط با شرایط بهسازی الکترواسمزی بر پارامترهای مقاومتی خاک پرداخته شده است. به این منظور، از الکتروودهای با جنس گرافیت و آلومینیوم به دو صورت صفحه‌ای و میله‌ای در گرادیان ولتاژهای 1 v/cm و $1/5$ سانتی‌متر برای بهسازی خاک رس اشباع استفاده شد. با توجه به جهت جریان الکترواسمزی از آند به کاتد و تخلیه آب درصد رطوبت کاهش پیدا کرد و با حرکت آب و تغییر در ساختار شیمیایی به واسطه انتقال یون‌ها شاخص خمیری خاک تغییر کرد. تبادل یونی در طول الکترواسمز باعث جایگزینی یون‌های با ظرفیت بالا در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه شده و جاذبه بین ذرات نیز باعث کاهش مقدار PI شد.

- stabilized bentonite, *Applied Clay Science*, 101 (2014) 503-509.
- [16] V. Jeyakanthan, C. Gnanendran, S.-C. Lo, Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 48(12) (2011) 1788-1802.
- [17] M. Malekzadeh, N. Sivakugan, One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud, *Marine Georesources & Geotechnology*, 35(5) (2017) 603-609.
- [18] T. Askin, D. Turer, Effect of electrode configuration on electrokinetic stabilization of soft clays, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(4) (2016) 322-326.
- [19] H.A.M. Mahalleh, M. Siavoshnia, M. Yazdi, Effects of electro-osmosis on the properties of high plasticity clay soil: chemical and geotechnical investigations, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 880 (2021) 114890.
- [20] J. Zhou, Y.L. Tao, C.J. Xu, X.N. Gong, P.C. Hu, Electro-osmotic strengthening of silts based on selected electrode materials, *Soils and Foundations*, 55(5) (2015) 1171-1180.
- [21] Y.-m. Liu, H.-f. Xu, Experimental study of the electrode material for electro-osmosis in mudflat sludge, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 2017, pp. 012093.
- [22] C. Yuan, C.-h. Weng, Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient, *Advances in Environmental research*, 7(3) (2003) 727-732.
- [23] A. Alibarootitabar, A. Ardakani, M. Mahmoudipour, Evaluation of the effect of voltage variation on the electro-osmosis dewatering of a silty soil using prefabricated vertical drains, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4) (2021) 512-518.
- [24] Z. Xue, X. Tang, Q. Yang, Influence of voltage and temperature on electro-osmosis experiments applied on marine clay, *Applied Clay Science*, 141 (2017) 13-22.
- [25] J. Akansha, S. Thakur, M.S. Chaithanya, B.S. Gupta, S. Das, B. Das, N. Rajasekar, K. Priya, Technological and economic analysis of electrokinetic remediation of electrokinetic consolidation of soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 34 (2016) 759-776.
- [5] P. Asavadorndeja, U. Glawe, Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method, *Bulletin of engineering geology and the environment*, 64 (2005) 237-245.
- [6] J.G. Loch, A.T. Lima, P.J. Kleingeld, Geochemical effects of electro-osmosis in clays, *Journal of applied Electrochemistry*, 40 (2010) 1249-1254.
- [7] S.R. Kaniraj, J. Yee, Electro-osmotic consolidation experiments on an organic soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(4) (2011) 505-518.
- [8] S. Jayasekera, S. Hall, Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments, *Geotechnical and Geological Engineering*, 25 (2007) 1-10.
- [9] D. Tjandra, P.S. Wulandari, Improving marine clays with electrokinetics method, *Civil Engineering Dimension*, 9(2) (2007) 98-102.
- [10] H. Shoghi, M. Ghazavi, N. Ganjian, Pilot-scale electrokinetic treatment of dispersive soil and feasibility study of sodium ion transport across the soil by electric field relocation, *Arabian Journal of Geosciences*, 12 (2019) 1-7.
- [11] F. Cheng, S. Guo, H. Zeng, B. Wu, Effect of electrokinetic process on in situ stabilization and detoxification of arsenic-contaminated soil with high content of calcium, *Environmental Research*, 241 (2024) 117504.
- [12] S. Ge, J. Zang, Y. Wang, L. Zheng, X. Xie, Combined stabilization/solidification and electroosmosis treatments for dredged marine silt, *Marine Georesources & Geotechnology*, 39(10) (2021) 1157-1166.
- [13] J.Q. Shang, W.A. Dunlap, Improvement of soft clays by high-voltage electrokinetics, *Journal of geotechnical engineering*, 122(4) (1996) 274-280.
- [14] C.-Y. Ou, S.-C. Chien, Y.-G. Wang, On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions, *Applied Clay Science*, 44(1-2) (2009) 130-136.
- [15] H. Wu, L. Hu, Microfabric change of electro-osmotic

- [36] V. Kumar, The effect of electrokinetic stabilization (EKS) on peat soil properties at Parit Botak area, Batu Pahat, Johor, Malaysia, *Indian Journal of Science and Technology*, 11 (2018) 44.
- [37] C. Liaki, C. Rogers, D. Boardman, Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes, *Journal of applied electrochemistry*, 40 (2010) 1225-1237.
- [38] A. Wahab, Z. Embong, S.A.A. Tajudin, Q.U. Zaman, H. Ullah, The electrokinetic stabilization (EKS) impact on soft soil (peat) stability towards its physical, mechanical and dynamic properties at Johor state, Peninsular Malaysia, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 123 (2021) 103028.
- [39] D. Bergado, A. Balasubramaniam, M. Patawaran, W. Kwunpreuk, Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 4(4) (2000) 153-163.
- [40] A.H. Vakili, R. Narimousa, M. Salimi, M.S. Farhadi, M. Dezh, Effect of freeze-thaw cycles on characteristics of marl soils treated by electroosmosis application, *Cold Regions Science and Technology*, 167 (2019) 102861.
- [41] A. Flora, S. Gargano, S. Lirer, L. Mele, Effect of electrokinetic consolidation on fine grained dredged sediments, *Procedia Engineering*, 158 (2016) 3-8.
- [42] G. Lefebvre, F. Burnotte, Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes, *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2) (2002) 399-408.
- [43] Y. Shen, W. Shi, S. Li, L. Yang, J. Feng, M. Gao, Study on the Electro-Osmosis Characteristics of Soft Clay from Taizhou with Various Saline Solutions, *Advances in Civil Engineering*, 2020(1) (2020) 6752565.
- [44] A. Hosseini, S.M. Haeri, S. Mahvelati, A. Fathi, Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5) (2019) 1055-1065.
- [45] Z. Sun, Y. Qing, C. Zhang, B.D. Eugene, Electroosmosis of contaminated soil: A global perspective and its application in Indian scenario, *Heliyon* (2024).
- [26] M.Y. Fattah, Q.G. Majeed, H.H. Joni, Comparison between methods of soil saturation on determination of the soil water characteristic curve of cohesive soils, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2) (2021) 101.
- [27] L. Zhang, L.-p. Jing, N.-w. Wang, C. Fang, Y.-q. Li, Z.-d. Shan, Electro-Osmosis Chemical Treatment of High-Salinity Soft Marine Soils: Laboratory Tests, *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1) (2017).
- [28] J. Wang, H. Fu, F. Liu, Y. Cai, J. Zhou, Influence of electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of a dredged slurry, *Canadian Geotechnical Journal*, 55(1) (2018) 147-153.
- [29] Z. Sun, W. Tan, J. Gong, G. Wei, Electrokinetic Remediation of Zn-Polluted Soft Clay Using a Novel Electrolyte Chamber Configuration, *Toxics*, 11(3) (2023) 263.
- [30] S.R. Kaniraj, H. Huong, J. Yee, Electro-osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(3) (2011) 277-295.
- [31] Z. Sun, J. Geng, C. Zhang, Q. Du, Electrokinetic Remediation of Cu-and Zn-Contaminated Soft Clay with Electrolytes Situated above Soil Surfaces, *Toxics*, 12(8) (2024) 563.
- [32] Z. Sun, S. Xu, C. Zhang, J. Geng, Y. Gu, Electroosmotic strengthening of soft clay under different electrification modes, *Energy Science & Engineering* (2024)..
- [33] H. Jin, L. Zhang, B. Wang, C. Fang, L. Wang, Effects of electrode materials and potential gradient on electro-osmotic consolidation for marine clayey soils, *Frontiers in Earth Science*, 12 (2024) 1260045.
- [34] Z. Sun, C. Zhang, B. Demarscho Eugene, X. He, Electroosmotic flow in soft clay and measures to promote movement under direct current electric field, *Plos one*, (4) (2024)19 .0302150.
- [35] W. Abdullah, A. Al-Abadi, Cationic–electrokinetic improvement of an expansive soil, *Applied Clay Science*, 47(3-4) (2010) 343-350.

- stabilization technique for remediation of Cu²⁺-contaminated soil under different voltage gradients, *International Journal of Electrochemical Science*, 17(10) (2022) 221021.
- [48] H. Bibak, J. Khazaei, H. Moayedi, Investigating the effect of a new industrial waste on strengthening the soft clayey soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, 38 (2020) 1165-1183.
- and electrophoresis in soft clay under direct current electric field, *Heliyon*, 10(7) (2024).
- [46] Y. Sugiyama, N. Hashimoto, C. Couture, D. Takano, Electrochemical perspective on the applicability of electroosmosis for clay consolidation, *Journal of Applied Electrochemistry*, 54(5) (2024) 1057-1073.
- [47] W. Wen, L. Jia, W. Zhao, H. Feng, D. Cao, J. Xie, T. Xu, M. Cui, W. Zhou, Q. Mei, Study on the effect of electrokinetic methods combined with and solidification/

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Bibak, N. Ganjian, J. Khazaei, A. Bahmanpour, Evaluating effect of electro – osmotic on mechanical properties of soft clay, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(12) (2025) 1533-1556.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22652.8016](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22652.8016)



