

Stabilization of Clay Soil by Electrokinetic Method with CaCl₂ Solution

MOHAMMAD MOGHADAS¹, ALI RAEESI ESTABRAGH^{2*}, JAMAL ABDOLAHI BAIK³, FATEMEH GHAZIANI⁴,
GHOLAMALI VAKILI⁵

1. MSc Student, Department of irrigation and reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 2. Associate Professor, Department of irrigation and reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 3. Lecturer, Department of irrigation and reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 4. Assistant Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
 5. Laboratory Technician, Department of irrigation and reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
- (Received: Dec. 31, 2017- Revised: Apr. 21, 2018- Accepted: May. 7, 2018)

ABSTRACT

In this research, laboratory studies were carried out to improve a clay soil by adding calcium ion through Electrokinetic method Experiments were performed in a special device using distilled water firstly, as the reference test and calcium chloride solution with the concentration of 0.25, 0.5, 1 and 1.5 molar secondly, as an anode reservoir fluid under the influence of 52-volt voltage during 7 days. During the experiment, the pH value was measured for electrolyte at the anode and cathode reservoir. Also, volume of water discharged from the cathode reservoir was measured at a given time interval. After the tests, shear strength of the soil was measured at different distances from the anode. The results showed that the calcium injection into the soil increases shear strength of the soil, and its amount depends on the concentration of calcium chloride solution, so shear strength increases by increasing concentration of the calcium chloride solution.

Key words: Electrokinetic, Soil stabilization, Ionic injection, Shear strength

تثبیت یک خاک رسی به روش الکتروکنتیک با استفاده از محلول کلسیم کلرید

محمد مقدس^۱، علی رئیسی استبرق^۲، جمال عبدالهیی بیک^۳، فاطمه غازیانی^۴ و غلامعلی وکیلی^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. مربی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. استادیار، گروه مهندسی علوم دامی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵. کارشناس آزمایشگاه، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۰/۱۰/۱۳۹۶ - تاریخ بازنگری: ۱/۲/۱۳۹۷ - تاریخ تصویب: ۱۷/۲/۱۳۹۷)

چکیده

در این پژوهش بهسازی یک خاک رسی با افزودن یون کلسیم به روش الکتروکنتیک در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌ها در یک دستگاه مخصوص ابتدا با استفاده از آب مقطر به عنوان آزمایش مرجع و سپس با محلول کلسیم کلرید با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار به‌عنوان مایع مخزن آند تحت تأثیر ولتاژ ۵۲ ولت در مدت ۷ روز مورد آزمایش قرار گرفت. در طول انجام آزمایش مقدار pH برای مایع مخزن آند و کاتد و نیز حجم آب خروجی از مخزن کاتد در فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. پس از اتمام آزمایش، مقاومت برشی خاک در فواصل مختلف از قطب آند مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. نتایج نشان داد تزریق یون کلسیم به داخل خاک موجب افزایش مقاومت خاک می‌شود و مقدار آن نیز وابسته به غلظت محلول کلسیم کلرید می‌باشد به گونه‌ای که افزایش مقاومت تابعی از افزایش غلظت محلول کلسیم کلرید است.

واژه‌های کلیدی: الکتروکنتیک، بهسازی خاک، تزریق یونی، مقاومت برشی

مقدمه

خاک‌های رسی نرم به علت عدم پایداری در برابر بار وارده، تراکم‌پذیری و نشست زیاد از گروه خاک‌های مسئله آفرین برای ساخت و ساز واحدهای مسکونی، تجاری و نظیر آن‌ها محسوب می‌شوند؛ لذا بهسازی آن‌ها به منظور طراحی پی‌های مناسب و اقتصادی که موجب تأمین پایداری سازه باشند، مورد توجه می‌باشد. بهسازی این خاک‌ها برای استفاده در احداث پروژه‌های عمرانی از روش‌های مکانیکی و شیمیایی امکان‌پذیر می‌باشد.

در روش مکانیکی، بهسازی از طریق تکنیک پیش بارگذاری صورت می‌پذیرد که فرایند آن با کاهش فشار آب حفره‌ای در طول زمان همراه است و نیاز به مدت زمان طولانی دارد. هرچند می‌توان برای کاهش مدت زمان آن از احداث

زهکش‌های عمودی استفاده نمود. از دیگر روش‌های بهسازی مکانیکی، می‌توان به مسلح‌سازی خاک اشاره نمود که به دو روش مسلح‌سازی معمول و تصادفی انجام می‌پذیرد. در روش مسلح‌سازی معمولی، صفحات ژئوتکستال با فواصل و جهت‌های خاص در سطوح مختلف خاک قرار داده می‌شوند. در روش مسلح‌سازی تصادفی نیز اختلاط خاک با درصد معینی از الیاف طبیعی و یا مصنوعی در طول‌های مختلف صورت می‌پذیرد که موجب بهبود خواص خاک می‌گردد (Prabakar and Sridhar, 2002; Tang et al., 2007; Estabragh et al., 2017). در روش‌های شیمیایی معمولاً مواد افزودنی مانند سیمان یا آهک با درصد مشخصی به خاک اضافه می‌شوند که بهبود خواص خاک بر اثر واکنش‌های شیمیایی بین این مواد و خاک صورت می‌گیرد (Bahar et al., 2004; Basha et al., 2005). در مجموع کاربرد روش‌های مذکور برای بهسازی خاک‌هایی که در محدوده زیرین یک سازه‌ی احداث‌شده یا در مجاورت آن قرار دارد

برای بهسازی خاک مورد استفاده قرار داد (Mohamad and Anita, 1998). پس از آن محققان دیگری نیز کاربرد موفقیت آمیزی از این روش در بهسازی خاک‌های رسی را گزارش نمودند (Chew et al., 2004; Rittirong et al., 2008; Estabragh et al., 2014). در سال‌های اخیر استفاده از مواد افزودنی (به عنوان الکتروولت) در بهسازی خاک‌های ریزدانه با روش الکتروکنیتیک مورد توجه قرار گرفته است. Alshwabkeh and Sheahan (2003) با تزریق فسفریک اسید و نیتریک اسید با روش الکتروکنیتیک، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی یک خاک رسی ریزدانه را گزارش نمودند. همچنین (Chien et al., 2009) برای بهسازی یک خاک رسی-سیلتی تزریق محلول‌های نمکی مختلف مانند کلسیم کلرید، سدیم کلرید و پتاسیم کلرید را مورد استفاده قرار دادند و بیان داشتند این روش باعث افزایش در مقاومت برشی زهکشی نشده و جریان الکترواسمزی می‌گردد. در خصوص استفاده از محلول کلسیم کلرید و تزریق یون کلسیم به خاک، محققان مختلف تأثیر مثبت این روش در بهسازی خاک را گزارش نمودند (Asavadorndej and Glawe, 2005; Chien et al., 2009; Abdullah and Al-Abadi, 2010; Ahmad et al., 2011). لیکن تحقیقات آنها شامل اثر مقایسه محلول کلسیم کلرید در یک غلظت مشخص با دیگر محلول‌های نمکی می‌باشد و یا در صورت بررسی اثر غلظت محلول، دامنه بررسی غلظت‌ها محدود و کم می‌باشد و یا بررسی پارامتر شیمیایی pH مورد توجه قرار نگرفته است؛ به این سبب در پژوهش حاضر غلظت‌های مختلف محلول کلسیم کلرید به منظور بهسازی خاک مورد آزمایش الکتروکنیتیک قرار گرفت. همچنین آزمایش بهسازی با الکتروولت آب مقطر نیز بر روی نمونه خاک انجام شد و سپس نتایج حاصل از آن به عنوان آزمایش مرجع با غلظت‌های مختلف محلول کلسیم کلرید مورد ارزیابی و بحث قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده

در این تحقیق از یک خاک رسی متشکل از ۲۶٪ ماسه، ۳۰٪ سیلت و ۴۴٪ رس استفاده گردید. آزمایش‌های شناسایی خواص فیزیکی و مکانیکی این خاک مطابق با استانداردهای ASTM صورت پذیرفت که نتایج مشخصات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آن به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. مطابق با نتایج آزمایش تراکم استاندارد، مقدار رطوبت بهینه ۱۸/۸٪ و وزن واحد حجم بیشینه $(17/4 \text{ kN/m}^3)$ برای این خاک بدست آمد. همچنین با استفاده از حدود آتربرگ

مطلوب نمی‌باشند (Charles and Watts, 2002; Alshwabkeh and Sheahan, 2003; Barker et al., 2004).

روش دیگری که در بهسازی خاک‌ها مد نظر است، استفاده از روش الکترواسمزی می‌باشد که با ایجاد جریان الکتریکی تحت تأثیر یک ولتاژ مشخص بین دو قطب قرار گرفته در خاک، باعث تخلیه آب و کاهش فشار آب حفره‌ای می‌گردد که در نتیجه افزایش مقاومت خاک را به همراه دارد. امروزه در بعضی از نقاط به دلیل شرایط ساختمانی موجود، روش‌های فوق برای بهسازی خاک امکان‌پذیر نمی‌باشد. در نتیجه از روش الکترواسمزی همراه با انتقال یون‌های مؤثر در بهسازی که تحت عنوان روش الکتروکنیتیک مرسوم است، استفاده می‌گردد. در این روش مواد تثبیت‌کننده (به عنوان مثال یون‌های کلسیم) از طریق محلول‌های نمکی با اعمال جریان الکتروسیسته به داخل توده خاک منتقل می‌شوند که با واکنش بین یون‌ها و ذرات خاک موجب بهبود خواص خاک و افزایش مقاومت آن می‌گردد. در فرآیند الکتروکنیتیک، بر اثر برقراری جریان مستقیم (DC) یک میدان الکتریکی به مجموعه آب و خاک اعمال می‌گردد که باعث رخ دادن سه فرآیند مهاجرت یونی، الکترواسمزی و الکتروفورز در این مجموعه می‌شود. مهاجرت یونی، انتقال یون‌ها در الکتروولت (مایع منفذی) می‌باشد که طی آن کاتیون‌ها به سمت کاتد (قطب منفی) و آنیون‌ها به سمت آند (قطب مثبت) حرکت می‌کنند. الکترواسمزی نیز حرکت آب در میان منافذ خاک و خروج آن از سمت کاتد می‌باشد. همچنین به حرکت یا تمایل به حرکت ذرات جامد خاک بر اثر میدان الکتریکی، الکتروفورز گویند. در واقع مقدار الکتروفورز بسیار ناچیز است و قسمت‌های اصلی الکتروکنیتیک شامل مهاجرت یونی و الکترواسمزی می‌باشد (Mohamedelhassan and Shang, 2003).

محققانی مانند (Mohamedelhassan and Shang, 2003)، (Alshwabkeh and Sheahan, 2003)، (Barker et al., 2004) و (Chien et al., 2009) معتقدند که این روش بهسازی برای خاک‌های با نفوذپذیری کم مناسب است، از طرفی به دلیل عدم نیاز به خاکبرداری و هزینه‌های مرتبط با عملیات تزریق در این روش، می‌توان آن را اقتصادی دانست. بنابراین می‌توان خواص فیزیکی و مکانیکی خاک را با تغییر در ترکیب شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده آن اصلاح نمود. Alshwabkeh and Sheahan (2003) و Liaki et al. (2008) از نتایج آزمایشگاهی خود نتیجه‌گیری نمودند که با استفاده از این روش، مقاومت خاک در سرتاسر طول آن افزایش می‌یابد و قابلیت کاربرد این روش برای بهسازی خاک در صحرا نیز وجود دارد. اولین بار کاساگرانده در سال ۱۹۴۹ روش الکترواسمزی را

و درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰، خاک مذکور مطابق با سامانه طبقه‌بندی متحد (Unified Soil Classification System)، رس با خواص خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) طبقه‌بندی می‌گردد.

آب مقطر

برای ساختن نمونه‌ها در رطوبت اشباع و همچنین به عنوان الکترولیت در مخازن آند و کاتد از آب مقطر با pH و EC به ترتیب ۷ و ۴۶/۶ (μs/cm) استفاده گردید.

محلول کلسیم کلرید

در مواردی که از محلول کلسیم کلرید به عنوان الکترولیت در مخزن آند استفاده می‌شد، با توجه به غلظت مورد نیاز مقدار مشخصی از کلسیم کلرید جامد با جرم مولی ۱۱۰/۹۹ (g/mol) در آب مقطر حل می‌شد و سپس محلول به مخزن آند منتقل می‌گردید.

دستگاه آزمایش

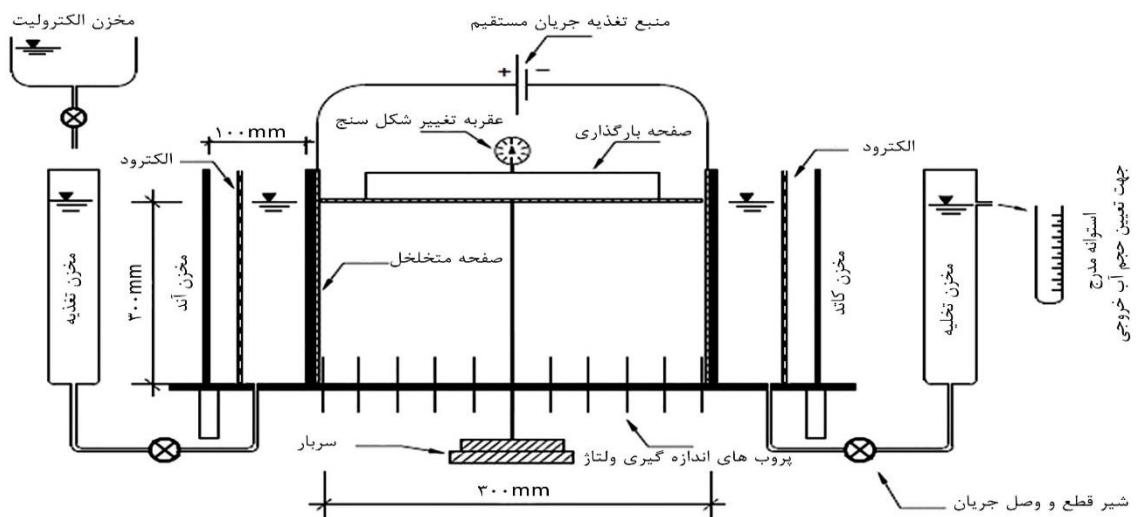
سلول الکتروشیمیایی مورد استفاده در این آزمایش از جنس پلکسی گلاس بوده که خاک در بخش میانی این سلول قرار داشت. در دو طرف این سلول محفظه‌های آنولیت و کاتولیت قرار داشتند که با صفحه‌های مشبک با بخش میانی در ارتباط بودند. همچنین الکترودهایی از جنس فولاد ضدزنگ برای اعمال جریان الکتریکی به مجموعه در این مخازن تعبیه گردید. این الکترودها برای سهولت عبور محلول الکترولیت به صورت مشبک بوده و برای تأمین ولتاژ به منبع تأمین‌کننده جریان مستقیم وصل می‌شدند. شکل (۱) تصویر شماتیک اجزای مختلف این دستگاه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
۴۶/۹۷	ASTM D-4318	حد روانی (%)
۲۵/۴۴	ASTM D-4318	حد خمیری (%)
۲۱/۵۳	ASTM D-4318	شاخص خمیری (%)
۱۵	ASTM D-427	حد انقباض (%)
۱۸/۸	ASTM D-698	رطوبت بهینه (%)
۱۷/۴	ASTM D-698	وزن واحد حجم خشک بیشینه (kN/m ³)
۲/۷	ASTM D-854	وزن مخصوص (G _s)

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده

مقدار	واحد اندازه‌گیری	مشخصه
۷/۴۹		pH
۷/۶۱	(ds/m)	EC
۷۳/۵	(meq/Lit)	Na ⁺
۰/۰۴	(meq/Lit)	K ⁺
۸/۴۰	(meq/Lit)	Ca ²⁺
۴۰۹	(meq/Lit)	Mg ²⁺
۳۵/۶	(meq/Lit)	Cl ⁻
۰/۱	(meq/Lit)	CO ₃ ²⁻
۳۱/۱	(meq/Lit)	HCO ₃ ⁻
۵۰/۸	(meq/Lit)	SO ₄ ²⁻



شکل ۱- تصویر شماتیک سلول الکتروشیمیایی مورد استفاده

برای بارگذاری، سهولت در اعمال سربار و یکنواختی توزیع بار بر روی نمونه خاک بوده است. میزان نشست نمونه طی آزمایش با عقربه‌ی تغییر شکل‌سنج که روی صفحه‌ی بارگذاری تعبیه شده

بارگذاری از قسمت پایین دستگاه انجام می‌شود؛ به گونه‌ای که بار وارده از طریق میله‌ی نگه‌دارنده و صفحه‌ی بارگذاری به نمونه اعمال می‌شود. دلیل استفاده از این روش

مستقیم وصل شدند که به وسیله آن اختلاف پتانسیل الکتریکی به میزان ۵۲ ولت بین الکترودها برقرار شد.

پس از برقراری جریان اقدام به ثبت داده‌های مورد نظر در آزمایش در فواصل زمانی مشخص گردید. میزان نشست عمودی نمونه به وسیله تغییر شکل سنج ثبت می‌شد تا بتوان مقدار سطح مقطع واقعی عمود بر جریان الکترواسمزی (A) را در زمان‌های مختلف مورد محاسبه قرار داد. برای این کار ارتفاع نمونه با گذشت زمان به صورت پیوسته توسط تغییر شکل‌سنج اندازه‌گیری و برای محاسبه سطح در نظر گرفته می‌شد. برای اندازه‌گیری آب خروجی از سمت قطب کاتد نیز از استوانه مدرجی که در کنار روزهی نصب شده بر روی مخزن تخلیه قرار داشت، استفاده گردید. برای مشاهده و اندازه‌گیری میزان افت ولتاژ در طول نمونه‌ی خاک، ولتاژ هر پروب مطابق شکل (۱) به وسیله‌ی دستگاه مولتی‌متر دیجیتال اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن به منظور تعیین گرادیان الکتریکی (i_e) که برابر با نسبت اختلاف پتانسیل الکتریکی (ΔV) میان الکترودها به فاصله دو الکترودها می‌باشد، اختلاف پتانسیل الکتریکی میان الکترودها در فواصل زمانی مشخص به وسیله‌ی دستگاه مولتی‌متر دیجیتال اندازه‌گیری و گرادیان مربوطه محاسبه شد. همچنین برای بررسی تغییرات شیمیایی حادث شده در اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکترولیت‌های داخل مخازن آند و کاتد، مقدار pH در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن برای فراهم کردن جریان پیوسته الکترواسمز و جلوگیری از وقوع جریان معکوس، به دلیل اختلاف پتانسیل هیدرولیکی، در فواصل زمانی مشخص، تغییرات سطح الکترولیت در محفظه آند و کاتد کنترل و تثبیت گردید. بعد از مدت زمان ۷ روز جریان الکتریکی قطع شده و با آزمایش برش پره، مقاومت برشی زهکشی نشده نمونه در فواصل مشخص (۴، ۱۲، ۱۹ و ۲۶ سانتی‌متر از سمت آند) اندازه‌گیری گردید؛ علاوه بر آن، نمونه‌ای از مقطع میانی خاک درون محفظه دستگاه با دقت تهیه شد. سپس میزان درصد رطوبت و حدود خمیری و روانی برای چهار نقطه‌ی مذکور در این فواصل، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت.

در مرحله‌ی اول آزمایش‌ها، به‌عنوان آزمایش مرجع از آب مقطر به منظور الکترولیت در مخازن آند و کاتد استفاده شد. پس از آن در مرحله‌ی دوم اثر استفاده از محلول کلسیم کلرید به‌عنوان ماده افزودنی در آزمایش الکتروکنیتیک مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از محلول کلسیم کلرید با چهار غلظت مختلف ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار، در مخزن آند و آب مقطر در مخزن کاتد استفاده شد.

بود، اندازه‌گیری می‌شد.

به منظور اندازه‌گیری پتانسیل الکتریکی در طول نمونه خاک در هنگام عمل بهسازی، پروب‌هایی (Probe) به ارتفاع ۲ سانتی‌متر در قسمت میانی (محفظه اصلی خاک) در کف دستگاه و به فواصل معین تعبیه شد. از آنجا که مس یکی از فلزات مناسب برای انتقال جریان الکتروسیسته است، جنس این پروب‌ها از مس بدون پوشش انتخاب شد.

همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، مخزن‌های آند و کاتد به ترتیب به مخازن تغذیه و تخلیه متصل هستند. با ثابت نگه‌داشتن سطح مایع مورد استفاده در این مخازن از به وجود آمدن اختلاف پتانسیل هیدرولیکی جلوگیری به عمل می‌آمد. ضمن اینکه در جهت تعیین جریان الکترواسمزی خروجی، روزه‌ای در مخزن تخلیه در نظر گرفته شده بود.

تهیه نمونه

در این پژوهش، خاک انتخاب‌شده بدون ایجاد تراکم و با رساندن رطوبت آن به رطوبتی بیش از حد روانی تهیه گردید. بنابراین برای ساختن نمونه‌های آزمایشگاهی، رطوبت اولیه خاک طبیعی با افزودن آب مقطر به رطوبتی معادل با ۵۱٪ رسانده شد. مخلوط مذکور به مدت ۳ روز در محیطی که تبادل رطوبتی آن با محیط بیرون ناچیز بود، قرار داده شد. در این مدت همواره مخلوط تهیه شده با همزن دستی به هم زده شد تا مخلوط نهایی دارای رطوبت یکنواخت باشد؛ پس از آن رطوبت نمونه تعیین می‌شد و پس از حصول اطمینان از درست بودن میزان رطوبت خاک، نمونه تهیه‌شده به منظور انجام آزمایش الکتروکنیتیک در محفظه‌ی میانی دستگاه قرار می‌گرفت.

انجام آزمایش

برای انجام دادن آزمایش، ابتدا الکترودها در دو سمت محفظه‌ی اصلی به صورت قائم جاگذاری شدند. سپس خاک با رطوبت معادل ۵۱ درصد آماده شده و برای آزمایش داخل محفظه‌ی اصلی دستگاه ریخته شد. پس از آن خاک مورد نظر به مدت ۲ روز به همان حالت باقی‌ماند تا به فرم محفظه دستگاه درآید و درون آن تثبیت شود. در طی مدت زمان آزمایش برای جلوگیری از تبخیر، قسمت بالایی دستگاه به وسیله سرپوش نایلونی پوشانده شده بود. سپس، صفحه‌ی بارگذاری در محفظه‌ی اصلی بر نمونه خاک و تغییر شکل‌سنج روی صفحه‌ی بارگذاری قرار گرفت. در ابتدا سربار ۱ کیلوپاسکال به نمونه اعمال شد و تا ثابت شدن نشست خاک این مرحله ادامه پیدا کرد و پس از آن جریان الکتریکی به دستگاه متصل گردید. برای این کار الکترودها به وسیله سیم‌های رابط به منبع تغذیه جریان

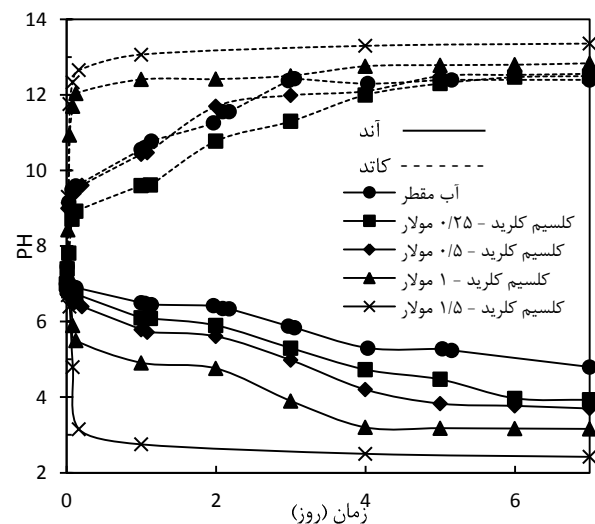
نتایج و بحث

pH

با اعمال ولتاژ مستقیم به محیط الکترولیت، واکنش‌های الکتروشیمیایی در محیط توسعه پیدا می‌کنند که مهم‌ترین آن‌ها تغییرات pH و تولید گاز و گرما در آن می‌باشد. واکنش‌های الکتروشیمیایی شامل واکنش‌های اکسایش و کاهش بوده که به ترتیب در قطب‌های مثبت و منفی رخ خواهد داد. روابط (۱) و (۲) به ترتیب واکنش‌های الکترولیز آب را طی واکنش اکسایش در آند و کاهش در کاتد نشان می‌دهد.



همان‌گونه که مشاهده می‌شود در قطب آند (مثبت) تولید یون هیدروژن (H^+) باعث اسیدی شدن محیط می‌شود و در سمت کاتد تولید یون هیدروکسید (OH^-)، محیط را بازی می‌کند (Acar et al., 1993). به همین منظور برای بررسی واکنش‌های رخ داده در محیط، pH الکترولیت مخازن آند و کاتد اندازه‌گیری شد. شکل (۲) تغییرات میزان pH را در این مخازن نشان می‌دهد.



شکل ۲- میزان pH در مخازن آند و کاتد در مدت زمان آزمایش

طبق شکل (۲) در مخزن آند مقدار pH اولیه الکترولیت‌ها در حدود ۷ می‌باشد که پس از برقراری جریان مقدار آن به تدریج کاهش یافته و برای نمونه آب مقطر به مقدار ۴/۸ می‌رسد. همچنین در محلول کلسیم کلرید با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار مقادیر pH بعد از اتمام آزمایش به میزان ۳/۹۳، ۳/۷، ۳/۱۶ و ۲/۴۲ کاهش می‌یابد. لذا می‌توان بیان نمود که افزایش در غلظت محلول باعث کاهش در مقدار pH طی

واکنش الکترولیز در مخزن آند خواهد شد. در مخزن کاتد نیز افزایش غلظت، افزایش pH را به همراه خواهد داشت به طوری که pH اولیه (۷) بعد از اتمام آزمایش، برای آزمایش‌های انجام شده با محلول کلسیم کلرید در غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار به ترتیب ۱۲/۵، ۱۲/۵۶، ۱۲/۸۴ و ۱۳/۳۶ می‌گردد. برای آب مقطر، مقدار pH بعد از اتمام آزمایش ۱۲/۴ می‌باشد.

تولید یون‌های H^+ و OH^- به ترتیب باعث ایجاد شرایط اسیدی و بازی در نزدیکی آند و کاتد می‌گردد که به واسطه‌ی مهاجرت یونی این یون‌ها، یک جبهه اسیدی و بازی بین این دو قطب ایجاد شده که تغییرات pH در طول نمونه خاک را به همراه دارد (Acar and Alshwabkeh, 1993). همچنین یون‌های هیدروکسید (OH^-) بوجود آمده در الکتروکود منفی (کاتد) که به سمت قطب مخالف در حرکت هستند در محیط‌هایی با pH بالا (قلیایی)، تمایل به واکنش با کاتیون‌های آزاد شده در اثر تبادل کاتیونی و تشکیل رسوبات هیدروکسید فلزی دارند (Mohamad and Anita, 1998).

آب خروجی

همان‌طور که بیان گردید آب خروجی از سمت کاتد، بیان‌کننده جریان الکترواسمزی عبوری از میان منافذ خاک می‌باشد. در شکل (۳) آب خروجی طی فرآیند الکترواسمز در شرایط استفاده از آب مقطر و کلسیم کلرید به عنوان الکترولیت با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که میزان آب خروجی در غلظت‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ مولار کلسیم کلرید از میزان آب خروجی هنگام استفاده از آب مقطر، به میزان قابل توجهی بیشتر است و افزایش غلظت محلول کلسیم کلرید در نمونه‌های ۱ و ۱/۵ مولار باعث کاهش میزان آب خروجی می‌گردد. میزان تجمعی آب خروجی در هنگام استفاده از آب مقطر به عنوان آزمایش مرجع طی مدت ۷ روز ۱۱۱۸ میلی‌لیتر است. در حالی که با استفاده از محلول کلسیم کلرید با غلظت‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار در مخزن آند، میزان آب خروجی به ترتیب ۲۰۷۵، ۲۵۴۰، ۸۲۰ و ۵۶۰ میلی‌لیتر می‌باشد. مشاهده می‌شود استفاده از محلول ۰/۵ مولار کلسیم کلرید به عنوان الکترولیت در آند باعث افزایش آب خروجی به میزان ۱۲۷٪، نسبت به استفاده از آب مقطر طی مدت زمان مشابه می‌گردد.

لذا می‌توان بیان داشت که در اثر تزریق محلول کلسیم کلرید ($CaCl_2$) با افزایش غلظت یون‌های Ca^{2+} ، مهاجرت یونی به سمت قطب کاتد نسبت به حالتی که تزریق صورت نمی‌گیرد، افزایش می‌یابد. ملکول‌های آب نیز در اثر تمایل به جذب شدن به این کاتیون‌ها (به دلیل قطبی بودن ملکول‌های آب) و

منفذی به واسطه جریان الکترواسمزی از سمت کاتد خارج می‌شود. میزان این جریان خروجی از توده خاک از رابطه تجربی (۳) قابل محاسبه است (Mitchell, 1993).

$$Q = K_e \cdot i_e \cdot A \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن Q دبی جریان خروجی، K_e ضریب نفوذپذیری الکترواسمزی، i_e گرادیان الکتریکی و A سطح مقطع خاک در جهت عمود بر جریان خروجی است. لازم به ذکر است گرادیان الکتریکی، حاصل تقسیم میزان اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو سمت نمونه خاک بر طول نمونه می‌باشد.

برای تفسیر جریان الکترواسمزی، استفاده از مدل هلمهلتز-اسموچولوسکی توسط محققین پذیرفته شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس این تئوری برقراری جریان الکتریکی باعث به حرکت درآمدن آب حفره‌ای در میان لوله‌های مؤین خاک می‌گردد و نفوذپذیری الکترواسمزی از تعادل میان نیروی الکتریکی و نیروی اصطکاک بین آب و جداره لوله‌های مؤین بدست می‌آید (Mitchell, 1993).

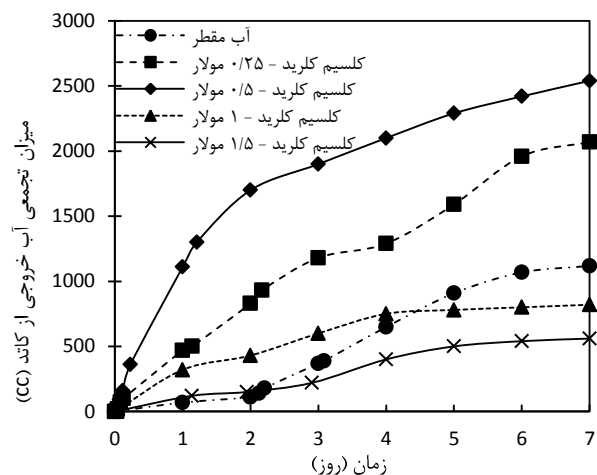
$$K_e = -\frac{n\varepsilon_w}{\mu} \phi_z \quad (\text{رابطه ۴})$$

نفوذپذیری الکترواسمزی طبق رابطه (۴) قابل محاسبه است که در آن n تخلخل خاک، ε_w ثابت دی‌الکتریک (گذردهی الکتریکی)، لزجت آب (الکترولیت) و ϕ_z پتانسیل زتا می‌باشد. لزجت و ثابت دی‌الکتریک دارای مقادیری تقریباً ثابت هستند و از دما و غلظت الکترولیت تاثیر می‌پذیرند، در نتیجه پتانسیل زتا نقش موثری در تعیین نفوذپذیری الکترواسمزی دارد (Chien et al., 2009).

پتانسیل زتا به پتانسیل الکتریکی اطراف یک ذره رس که سطح آن باردار است، گفته می‌شود. در حقیقت پتانسیل زتا، پتانسیل الکتریکی است که در سطح مشترک ذرات جامد و ملکول‌های مایع به منظور بیان حرکت نسبی ذرات تحت تأثیر ولتاژ اعمال شده، بکار می‌رود. شکل (۴) طرح شماتیکی از پتانسیل الکتریکی در لایه دوگانه پخشیده^۱ را بر اساس مدل استرن-گوی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، پتانسیل در لایه بیرونی با افزایش فاصله از سطح ذره کاهش می‌یابد تا جایی که به صفر می‌رسد (Shang, 1997).

می‌توان مقدار نفوذپذیری الکترواسمزی (K_e) را با توجه به فرمول (۳) و میزان آب خروجی محاسبه نمود. در نتیجه نفوذپذیری الکترواسمزی در مدت زمان آزمایش محاسبه گردید و نتایج آن در شکل (۵) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزودن محلول‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ مولار کلسیم کلرید

همچنین در اثر نیروی اصطکاک ایجادشده بین ملکول‌های آب و کاتیون‌های در حال حرکت، به میزان بیشتری به سمت کاتد جریان پیدا می‌کنند که در نتیجه باعث افزایش جریان الکترواسمزی می‌گردد (Acar et al., 1993). علاوه بر آن یون‌های Ca^{2+} به هنگام حرکت و مهاجرت یونی به سمت قطب کاتد، در قسمت‌هایی با pH قلیایی با OH^- تولید شده در اثر الکترولیز آب در کاتد، وارد واکنش شده و موجب تشکیل هیدرات کلسیم سیلکات و کلسیم هیدروکسید ($Ca(OH)_2$) می‌گردند که با رسوب در طول نمونه به تدریج شرایط سمنته شدن و کاهش جریان الکترواسمزی فراهم می‌گردد (Mitchell, 1993; Chien et al., 2014). به همین دلیل مشاهده می‌گردد که شدت تغییرات جریان الکترواسمزی در ساعت‌های اولیه بیشتر است و تقریباً پس از ۲ روز، روند تغییرات ملایم‌تر شده و از میزان آب خروجی نسبت به روزهای اولیه کاسته می‌شود.



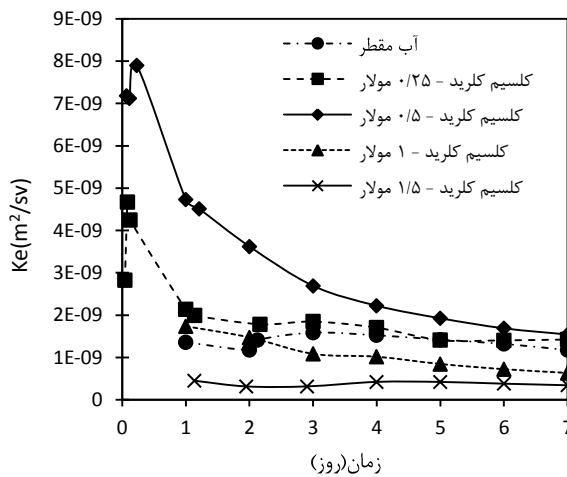
شکل ۳- میزان تجمعی آب خروجی از سمت کاتد

همچنین می‌توان بیان داشت که در غلظت‌های بالا به واسطه وجود یون‌های بیشتر کلسیم و همچنین وجود محیطی قلیایی‌تر (طبق شکل ۲)، میزان هیدرات کلسیم سیلکات و کلسیم هیدروکسید تولید شده افزایش می‌یابد و با رسوب در نمونه، مانع از عبور جریان می‌شود که در نتیجه جریان الکترواسمزی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. محققانی مانند (Mohamedelhasan and Shang, 2003), (Chien et al., 2009) و (Ahmad et al., 2011) نیز نتایج مشابهی را گزارش نمودند.

نفوذپذیری الکترواسمزی (K_e)

همانگونه که بیان گردید طی فرآیند الکتروکنتیک در اثر اعمال گرادیان الکتریکی در امتداد یک توده خاک رسی اشباع، آب

در نتیجه می‌توان بیان نمود با استفاده از محلول کلسیم کلرید در غلظت‌های ۱ و ۱/۵ مولار به واسطه‌ی الکترولیز بیشتر و محیط اسیدی در سمت آند (شکل ۲)، مقدار مطلق پتانسیل زتا ($|z \phi|$) کاهش یافته که کاهش میزان نفوذپذیری الکترواسمزی را به همراه دارد (شکل ۵). از طرفی در این دو غلظت از محلول (۱ و ۱/۵ مولار) با به وجود آمدن شرایط قلیایی‌تر در سمت کاتد (شکل ۲)، همانگونه که در قبل بیان شد، تشکیل و رسوب‌گذاری هیدرات کلسیم‌سیلکات و دیگر هیدروکسید فلزی به مقدار بیشتری انجام می‌شود که باعث کاهش جریان و نفوذپذیری الکترواسمزی می‌گردد (شکل ۴ و ۵). محققانی مانند (Vane and Zang 1995)، (Eykholt 1997) و (Chien *et al.*, 2009) نیز نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند.



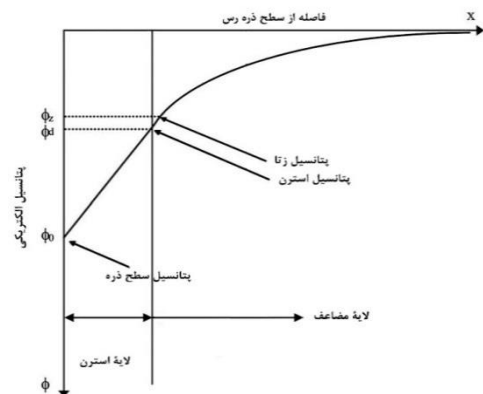
شکل ۵- نفوذپذیری الکترواسمزی

رطوبت و حدود آتربرگ

شکل (۶-الف) میزان رطوبت پس از اتمام آزمایش در فواصل مختلف از آند را نشان می‌دهد. میزان رطوبت اولیه نمونه‌ها قبل از شروع آزمایش ۵۱٪ بوده است. مشاهده می‌شود که در آزمایش مرجع با استفاده از الکترولیت آب مقطر در مخازن آند و کاتد، میزان درصد رطوبت در طول نمونه نسبت به حالت اولیه کاهش می‌یابد. کاهش رطوبت در طی فرآیند الکتروکنتیک می‌تواند یکی از پیامدهای فرآیند الکترواسمز در طول نمونه باشد (Rittirong *et al.*, 2008).

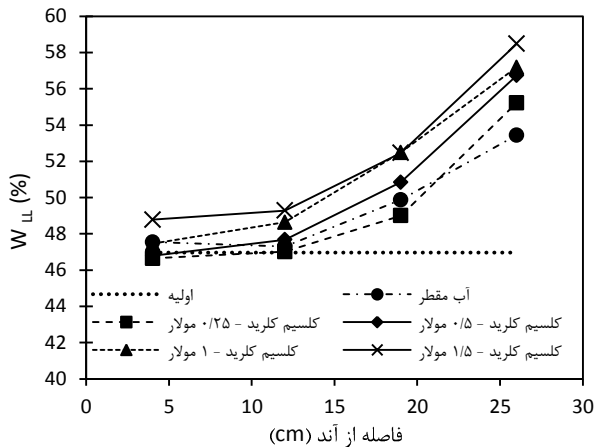
همچنین تزریق محلول کلسیم کلرید و وارد شدن یون کلسیم داخل خاک باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه پخشیده و چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌گردد (Mitchell and Soga, 2005). در نتیجه با کاهش فضای خالی منافذ موجود بین ذرات، میزان رطوبت نیز کاهش می‌یابد و این کاهش رطوبت با افزایش

نفوذپذیری الکترواسمزی افزایش می‌یابد. البته افزودن محلول ۰/۲۵ مولار کلسیم کلرید باعث افزایش قابل توجه در نفوذپذیری الکترواسمزی نمی‌گردد بلکه این افزایش تنها در روز اول آزمایش محسوس می‌باشد. در حالی که میزان نفوذپذیری الکترواسمزی هنگام استفاده از محلول ۰/۵ مولار کلسیم کلرید به میزان قابل توجهی بیشتر از حالت بدون تزریق یون کلسیم می‌باشد. البته این افزایش در مقدار نفوذپذیری، مربوط به روزهای اولیه می‌باشد و این مقدار پس از گذشت زمان ۷ روز تقریباً با میزان k_e در هنگام استفاده از آب مقطر در مخزن آند برابر می‌شود. مشاهده می‌گردد این نتایج با مشاهدات حاصل از آب خروجی طی جریان الکترواسمزی (شکل ۳) مشابه می‌باشد؛ بطوریکه شیب تغییرات نمودار میزان تجمعی آب خروجی نیز بعد از ۲ روز کاهش می‌یابد.



شکل ۴- تصویر شماتیک پتانسیل الکتریکی در لایه‌ی دوگانه و پتانسیل زتا

به‌طورکلی افزایش غلظت به واسطه جابجایی میزان بیشتری از یون‌ها، افزایش در آب خروجی و نفوذپذیری الکترواسمزی را به همراه خواهد داشت. لیکن طبق مدل هلمهلتز-اسموچولوسکی (رابطه ۴) پتانسیل زتا نقش موثری در تعیین نفوذپذیری الکترواسمزی دارد. پتانسیل زتا نیز خود به عواملی نظیر نوع کانی خاک رس، غلظت کاتیون‌های الکترولیت و pH محلول وابسته است (Hunter, 1981). از میان این عوامل، پارامتر pH بیشترین اثرگذاری بر پتانسیل زتا را دارد. در محیط‌های قلیایی‌تر با pH بالا، ذره میل کمتری به هم انباشتگی خواهد داشت و در نتیجه پتانسیل زتا کاهش می‌یابد (بیشتر منفی می‌گردد)؛ همچنین افزایش خاصیت اسیدی باعث می‌شود تا پتانسیل زتا افزایش یابد (عدد منفی کوچکتر) و در pHهای بسیار پایین پتانسیل زتا به سمت مقداری مثبت حرکت کند که باعث کاهش یا حتی توقف جریان الکترواسمزی به سمت کاتد می‌گردد (Eykholt and Daniel, 1994; West and Stewart, 1995).



شکل ۶ ج- حد روانی در طول نمونه

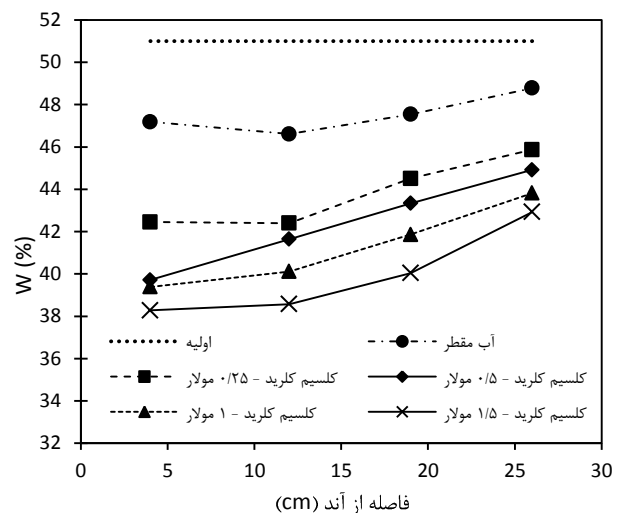
معمولا ساختمان خاک در هنگام رسوب‌گذاری شکل می‌گیرد و این ساختار به نوع مایع، کیفیت شیمیایی آن و کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی مواد معلق بستگی دارد. می‌توان گفت در این کار تحقیقاتی ساختمان خاک مورد استفاده به علت درصد رس کم، فلوکوله بوده است. در طی آزمایش الکتروکنتیک، عمل تبادل کاتیونی بین ذرات و آب منفذی جریان یافته موجب افزایش درجه فلوکوله شدن می‌گردد. همچنین پیدایش جبهه اسیدی و بازی در اطراف آند و کاتد و پیشروی آنها در این فرآیند موجب انحلال املاح و تشکیل املاح جدید می‌شود. این فرآیند همراه با حرارت تولید شده بخصوص در اطراف آند می‌تواند در تغییر ضخامت لایه مضاعف موثر باشد. بنابراین می‌توان گفت ایجاد حرارت، تبادل یونی و انحلال املاح موجب تغییرات جزئی حدود آتربرگ در اطراف آند می‌گردد. از طرفی محیط قلیایی، عدم وجود حرارت و تولید املاح جدید که پتانسیل جذب آب را دارند، موجب افزایش این حدود در اطراف کاتد می‌گردند. این نتایج با گزارش محققانی مانند Rittirong *et al.*, (Asavadorndeja and Glawe, 2005), (Abdullah and Al-Abadi, 2008), (Liaki *et al.*, 2008), و (2010) مشابه می‌باشد.

مقاومت برشی

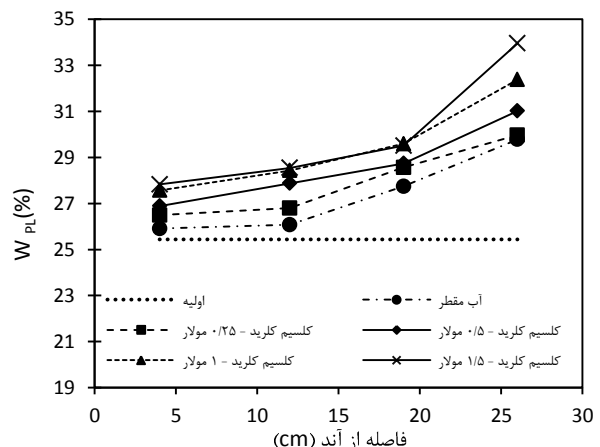
پس از اتمام زمان هر آزمایش، مقاومت برشی زهکشی نشده با آزمایش برش پره مستقیم، در چهار نقطه به فواصل مشخص از آند اندازه‌گیری شد (۴، ۱۲، ۱۹ و ۲۶ سانتی‌متر از سمت آند). نتایج نشان داد که افزودن کلسیم کلرید باعث افزایش قابل توجه در مقاومت برشی زهکشی نشده می‌گردد.

نتایج مقاومت برشی زهکشی نشده در شکل (۷) نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش مقاومت در منطقه نزدیک کاتد بیشتر می‌باشد و رابطه‌ی مستقیمی با

غلظت محلول رابطه مستقیم دارد. همچنین به دلیل تولید گرما از واکنش الکترولیز آب در قطب آند، میزان کاهش رطوبت در سمت آند نسبت به دیگر نقاط در طول نمونه بیشتر می‌باشد. شکل (۶ ب) حد خمیری برای نمونه خاک‌های آزمایش‌شده را نشان می‌دهد. مقدار اولیه حد خمیری برای خاک استفاده‌شده ۲۵/۴۴ درصد است. با انجام آزمایش الکتروکنتیک مقدار حدخمیری نسبت به حالت اولیه افزایش می‌یابد و این افزایش بیشتر در سمت کاتد مشاهده می‌شود. در آزمایش مرجع و بدون تزریق افزودنی رطوبت حد خمیری در فواصل ۴ و ۲۶ سانتی‌متری از آند به ترتیب ۲۵/۹ و ۲۹/۸ درصد می‌باشد. همچنین با تزریق یون کلسیم پس از اتمام آزمایش، حد خمیری با افزایش غلظت محلول کلسیم کلرید افزایش می‌یابد. شکل (۶ ج) مقادیر حد روانی برای نمونه خاک‌های آزمایش شده را نشان می‌دهد که افزایش غلظت محلول باعث افزایش حد روانی به خصوص در نزدیکی قطب کاتد می‌گردد.



شکل ۶ الف- میزان درصد رطوبت در طول نمونه



شکل ۶ ب- حد خمیری در طول نمونه

(Asavadorndeja and Glawe, 2005) همخوانی دارد. کاربرد این روش در شرایط واقعی به عواملی مانند نوع خاک، تخلخل، درجه اشباع، توپوگرافی، کاربرد زمین و عمق موردنظر خاک جهت بهسازی بستگی دارد. طراحی و اجرای این روش بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و شرایط ژئوتکنیکی منطقه می‌باشد. در مرحله عملیاتی، الکترودها در عمق مدنظر برای بهسازی نصب می‌شوند و بخش بالایی الکترودها که در تماس با زمین و خاک می‌باشد، عایق کاری شده تا از جریان اتصال کوتاه جلوگیری شود. فاصله الکترودها و ولتاژ اعمال شده نیز از عوامل مهم در اجرای این روش در محل می‌باشد. به طور معمول فاصله بین الکترودها حدود ۱ تا ۳ متر می‌باشد (Lo et al., 1991). همچنین ظرفیت سیستم تولید جریان الکتریسیته بر اساس هدایت الکتریکی خاک و آرایش الکترودها تعیین می‌گردد. محققانی مانند (Ho et al., 1999) شرایط طراحی را بیان نمودند. مزیت و اقتصادی بودن این روش نیز به علت آن است که در این روش به جابجایی خاک، اختلاط مواد افزودنی (مانند آهک و سیمان)، تراکم مجدد و یا عمل تزریق نیاز نمی‌باشد. همچنین برای سازه‌های ایجاد شده در محل هیچگونه مسئله‌ای رخ نخواهد داد.

نتیجه‌گیری

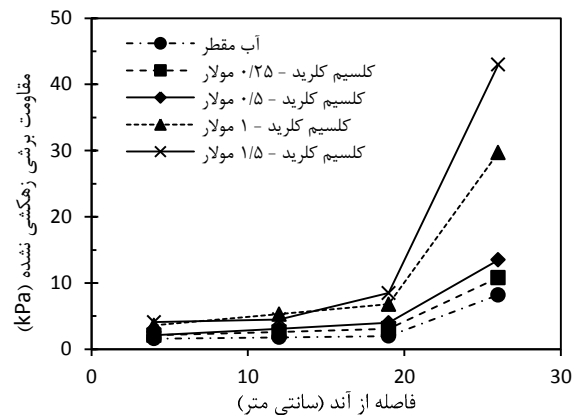
در این کار تحقیقاتی بهسازی یک خاک رسی (CL) از روش تزریق محلول کلسیم کلرید با غلظت‌های مختلف با روش الکتروکنیتیک تحت تأثیر ولتاژ ۵۲ ولت در زمان ثابت انجام گرفت که نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

مقدار pH در مخازن آند و کاتد تغییر می‌یابد که این تغییرات به ترتیب باعث اسیدی و قلیایی شدن محلول مخازن می‌گردد. میزان این تغییرات تابعی از غلظت محلول کلسیم-کلرید مورد استفاده می‌باشد.

در مدت زمان بهسازی، میزان آب خروجی از مخزن کاتد و مقدار نفوذپذیری الکترواسمزی (k_e) تغییر می‌یابد که مقدار آن تابعی از غلظت محلول الکترولیت مورد استفاده است.

مقاومت خاک بهسازی شده افزایش می‌یابد و برای یک غلظت ثابت از الکترولیت مورد استفاده، با افزایش فاصله از آند مقدار مقاومت برشی زهکشی نشده افزایش می‌یابد. برای غلظت‌های مختلف، افزایش مقاومت در یک فاصله خاص از آند، تابعی از افزایش غلظت می‌باشد.

غلظت محلول کلسیم کلرید دارد. به طور نمونه هنگام استفاده از آب مقطر میزان مقاومت برشی در فاصله ۲۶ سانتی‌متری از آند، ۸/۲ کیلوپاسکال است که این میزان در محلول‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ مولار کلسیم کلرید در مخزن آند به ترتیب به ۱۰/۸، ۱۳/۵، ۲۹/۷ و ۴۳ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد.



شکل ۷ - مقاومت برشی زهکشی نشده در طول نمونه

هنگامی که عامل کاتیونی Ca^{2+} برای بهسازی خاک در مخزن آند مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ یون‌ها به واسطه جریان اسمزی و مهاجرت یونی وارد نمونه خاک می‌شوند. این یون‌ها طی سه فرآیند، شامل تبادل کاتیونی، تشکیل املاح و رسوب‌گذاری می‌باشد، باعث افزایش در مقاومت فشاری خاک می‌گردند (Asavadorndeja and Glawe, 2005; Ahmad et al., 2011). با افزایش غلظت کاتیون‌های Ca^{2+} موجود در محیط خاک طی فرآیند الکتروکنیتیک همان‌گونه که در قبل بیان گردید ضخامت لایه دوگانه پخشیده کاهش می‌یابد که در نتیجه باعث تراکم بیشتر ذرات رس در یکدیگر و افزایش درجه فلوکوله شدن می‌گردد. این مسئله موجب افزایش مقاومت خاک رسی می‌شود (Acar et al., 1993; Alshawabkeh and Sheahan, 2003; Chien et al., 2009). علی‌رغم افزایش درجه فلوکوله شدن، بیشترین تأثیر بر افزایش مقاومت خاک مربوط به رسوب‌گذاری می‌باشد. می‌توان بیان داشت، تبادل کاتیونی و تشکیل هیدروکسیدهای فلزی و سیلکات کلسیم و رسوب‌گذاری آنها به ویژه در محیط‌های قلیایی (در نزدیکی کاتد) سهم عمده‌ای در افزایش مقاومت خاک دارند (Asavadorndeja and Glawe, 2005). نتایج بدست آمده با نتایج پژوهش دیگر محققان مانند (Alshawabkeh and Sheahan, 2003),

REFERENCES

- Abdullah, W. S. and Al-Abadi, A. M. (2010). Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil. *Applied Clay Science*, 47(3), 343-350.
- Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N. (1993). Principles of electrokinetic remediation. *Environmental science & technology*, 27(13), 2638-2647.
- Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N., & Gale, R. J. (1993).

- Fundamentals of extracting species from soils by electrokinetics. *Waste Management*, 13(2), 141-151.
- Ahmad, K. B., Taha, M. R., and Kassim, K. A. (2011). Electrokinetic treatment on a tropical residual soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(1), 3-13.
- Alshawabkeh, A. N. and Sheahan, T. C. (2003). Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 7(4), 177-185.
- Asavadorndeja, P. and Glawe, U. (2005). Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(3), 237.
- Bahar, R., Benazzoug, M., and Kenai S. (2004). Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cement and concrete composites*, 26(7), 811-820.
- Barker, J. E., Rogers, C. D. F., Boardman, D. I., and Peterson, J. (2004). Electrokinetic stabilisation: an overview and case study. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 8(2), 47-58.
- Basha, E., Hashim, R., Mahmud, H., Muntohar AS. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and Building Materials*, 19(6), 448-453.
- Charles, J.A. and Watts, K.s, (2002). Treated grounds engineering and performance. *London. Construction industry research and information association*, Report-C572.
- Chew, S. H., Karunaratne, G. P., Kuma, V. M., Lim, L. H., Toh, M. L., and Hee, A. M. (2004). A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(1), 17-35.
- Chien, S. C., Ou, C. Y., and Lo, W. W. (2014). Electro-osmotic chemical treatment of clay with interbedded sand. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 167(1), 62-71.
- Chien, S. C., Ou, C. Y., and Wang, M. K. (2009). Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil. *Applied clay science*, 44(3), 218-224.
- Estabragh, A. R., Naseh, M., and Javadi, A. A. (2014). Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. *Applied Clay Science*, 95, 32-36.
- Estabragh, A. R., Ranjbari S., Javadi A. A. (2017). Properties of Clay Soil and Soil Cement Reinforced with Polypropylene Fibers. *ACI Materials Journal*, 114(2)
- Eykholt, G. R. (1997). Development of pore pressures by nonuniform electroosmosis in clays. *Journal of Hazardous Materials*, 55(1-3), 171-186.
- Eykholt, G. R. and Daniel, D. E. (1994). Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil. *Journal of geotechnical engineering*, 120(5), 797-815.
- Ho, S. V., Athmer, C., Sheridan, P. W., Hughes, B. M., Orth, R., McKenzie, D., Brodsky, P. H., Shapiro, A., Thornton, R., Salvo, J. and Schultz, D. (1999 a). The Lasagna technology for in situ soil remediation. 1. Small field test. *Environmental Science & Technology*, 33(7), 1086-1091.
- Ho, S. V., Athmer, C., Sheridan, P. W., Hughes, B. M., Orth, R., McKenzie, D., Brodsky, P. H., Shapiro, A. M., Sivavec, T. M., Salvo, J. and Schultz, D. (1999 b). The Lasagna technology for in situ soil remediation. 2. Large field test. *Environmental Science & Technology*, 33(7), 1092-1099.
- Hunter, R.J. (1981). Zeta potential in colloid science: principles and applications. Academic, London.
- Liaki, C., Rogers, C. D., and Boardman, D. I. (2008). Physicochemical effects on uncontaminated kaolinite due to electrokinetic treatment using inert electrodes. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 43(8), 810-822.
- Lo, K. Y., Ho, K. S. and Incullet, I. I. (1991). Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 74-83.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*.
- Mitchell, J.K. 1993. *Fundamentals of soil behavior*. 2nd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Mohamad, A.M.O. and Anita, H.E. (1998). *Geoenvironmental engineering*, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Mohamedelhasan, E. and Shang, J. Q. (2003). Electrokinetics-generated pore fluid and ionic transport in an offshore calcareous soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6), 1185-1199.
- Prabakar, J. and Sridhar, R. (2002). Effect of random inclusion of sisal fibre on strength behaviour of soil. *Construction and Building Materials*, 16(2), 123-131.
- Rittirong, A., Douglas, R. S., Shang, J. Q., and Lee, E. C. (2008). Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains. *Geosynthetics International*, 15(5), 369-381.
- Shang, J. Q. (1997). Zeta potential and electroosmotic permeability of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(4), 627-631.
- Tang, C., Shi, B., Gao, W., Chen, F., Cai, Y. (2007). Strength and mechanical behavior of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(3), 194-202.
- Vane, L. M. and Zang, G. M. (1995). Electrokinetic soil remediation: Impact of aqueous phase properties on soil surface charge and electroosmotic efficiency (No. CONF-9504110). *Environmental Protection Agency*, Cincinnati, OH (United States).
- West, J.L. and Stewart, D.I. (1995). Effects of zeta potential on soil electrokinetics. In Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics: Proceedings of Geoenvironment 2000. Vol. 2. Edited by Y.B. Acar and D.E. Daniel. *American Society of Civil Engineers, Geotechnical Special Publication*, 46, pp. 1535-1549.