

تأثیر روش الکترواسمزی همراه با تزریق کلریداسترانسیم بر خصوصیات مهندسی خاک‌های ریزدانه خمیری بستر راه

مقاله علمی - پژوهشی

حسین عزیزی میرمحل، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
مهدی سیاوش نیا*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
مریم یزدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: meh.siavoshnia@iauctb.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۸ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۵

صفحه ۱۳۴-۱۲۱

چکیده

خاک‌های رسی با خمیری زیاد از گروه خاک‌های مسئله‌دار برای احداث پروژه‌های مهندسی و به خصوص پروژه‌های راهسازی محسوب می‌شوند. یکی از روش‌های بهبود خاک‌های ریزدانه ناپایدار و نرم روش الکترواسمزی است. در این روش اعمال میدان الکتریکی به خاک باعث تغییراتی در ساختار خاک شده و خواص فیزیکی و شیمیایی خاک تغییر می‌کند. در سال‌های اخیر برای بهبود بازده این فرایند از عامل شیمیایی کمک گرفته می‌شود. در این مقاله اثر استفاده از روش الکترواسمزی همراه با تزریق محلول حاوی یون‌های استرانسیم بر خواص شیمیایی و ژئوتکنیکی خاک رس توسط آزمایش‌های مختلف بررسی شده است. به این منظور لایه ای از خاک با وزن مخصوص و درصد رطوبت خاک در محل، در یک محفظه متراکم گردید و جریان مستقیم (DC) با ولتاژهای ۰/۵، ۱ و ۲ به ازای هر سانتی‌متر توده خاک در دوره‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به نمونه خاک با و بدون افزودن محلول کلریداسترانسیم اعمال شد. الکتروود مورد استفاده فولاد ضد زنگ بود. نتایج مطالعات نشان داد استفاده از این روش سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش درصد رطوبت نمونه خاک اولیه می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند افزودن استرانسیم مقاومت فشاری و مقدار آب زهکشی شده از نمونه خاک را نسبت به حالت صرفاً جریان الکترواسمزی افزایش می‌دهد. نتایج آنالیز شیمیایی انجام انتقالات و تعویض‌های یونی و به طور کلی تغییر ترکیب شیمیایی خاک را نشان داد. این تغییرات شیمیایی منجر به تغییر ساختار و خواص خاک می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییرات میکروساختار خاک که شامل لخته شدن و اگلومره شدن ذرات خاک می‌شود را نشان داده و صحت نتایج فیزیکی را تایید می‌کند. همچنین نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا امکان تغییر ویژگی‌های خاک با این روش به گونه‌ای که برای استفاده به عنوان خاک بستر مناسب باشد را تایید کرد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی خاک، بستر راه، الکترواسمزی، خاک رس با خمیری زیاد، کلرید استرانسیم

۱-مقدمه

خصوص پروژه‌های راهسازی محسوب می‌شوند (Fang, 1990). این خاک‌ها به دلیل پراکندگی زیادشان در سطح زمین معمولاً در مسیر اجرای پروژه‌های مهندسی قرار می‌گیرند. چنانچه

خاک‌های رسی با خمیری زیاد به علت مقاومت و ظرفیت باربری کم، حساسیت و ناپایداری در برابر رطوبت و تراکم‌پذیری از گروه خاک‌های مسئله‌دار برای احداث پروژه‌های مهندسی و به

مسیر یک راه از مناطقی که دارای خاک‌های ضعیف باشد عبور کند طرح و اجرای زیرسازی و روسازی مستلزم استفاده از لایه‌هایی با مصالح متفاوت خواهد بود. این امر باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی و طولانی شدن زمان اجرای پروژه می‌شود. این موارد اغلب منجر به تغییر مسیر راه یا تعویض خاک می‌گردد. هر گاه به دلایلی از جمله مشکلات زیست محیطی امکان تغییر مکان پروژه و یا تعویض خاک نبوده و یا اینکه هزینه تعویض خاک مقرون به صرفه نباشد، روش تثبیت به عنوان یکی از راه‌های حل مشکلات مربوط به خاک در نظر گرفته می‌شود.

تثبیت خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مقاومتی یک خاک برای بهبود کیفیت خاک ضعیف گفته می‌شود. تثبیت خاک‌ها به طرق گوناگون نظیر روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیک، روش الکتریکی و یا ترکیبی از این روش‌ها امکان‌پذیر است (Hausmann, 1990). محققین بسیاری در مورد انواع این روش‌ها و عملکرد آن‌ها در بهبود مشخصات خاک رس تحقیق کرده‌اند و نشان داده‌اند که استفاده از این روش‌ها باعث افزایش مقاومت و سایر خصوصیات مهندسی این خاک‌ها می‌شوند (Asakereh, Tavasoli, & Safarzadeh, 2020; Ayeldeen & Kitazume, 2017; Ghaffarpour Jahromi & Noori, 2019; Rivera, Mejia de Gutierrez, Ramirez-Benavides, & Orobio, 2020).

یکی از روش‌های بهبود خاک‌های ریزدانه ناپایدار و نرم روش الکترواسمز است. اعمال جریان الکتریکی به خاک اشباع باعث می‌شود که آب و برخی از مولکول‌های جذب شده با بار مثبت به سمت کاتد یا قطب منفی حرکت کنند. اگر آب جمع شده در کاتد به وسیله پمپ از خاک خارج شود، در اثر کاهش محتوای آب خاک تحکیم یافته و مقاومت خاک افزایش خواهد یافت. این فرایند را "الکترواسمزی" یا "آب‌گیری الکتروسیستیکی" می‌نامند که روند حرکت آب و دیگر یون‌های مثبت در آن از طریق جریان برق تامین می‌شود. سازکار غالب استحکام بخشی در فرایند الکترواسمز خروج آب حفرات و ایجاد فشار منفی در خاک است. نصب سریع، سادگی کار و مختل نکردن سایر عملیات از جمله مزایای استفاده از این روش محسوب می‌شود.

تثبیت خاک به اصلاح و بهبود خواص فیزیکی و مقاومتی یک خاک برای بهبود کیفیت خاک ضعیف گفته می‌شود. تثبیت خاک‌ها به طرق گوناگون نظیر روش‌های مکانیکی، شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیک، روش الکتریکی و یا ترکیبی از این روش‌ها امکان‌پذیر است (Hausmann, 1990). محققین بسیاری در مورد انواع این روش‌ها و عملکرد آن‌ها در بهبود مشخصات خاک رس تحقیق کرده‌اند و نشان داده‌اند که استفاده از این روش‌ها باعث افزایش مقاومت و سایر خصوصیات مهندسی این خاک‌ها می‌شوند (Asakereh, Tavasoli, & Safarzadeh, 2020; Ayeldeen & Kitazume, 2017; Ghaffarpour Jahromi & Noori, 2019; Rivera, Mejia de Gutierrez, Ramirez-Benavides, & Orobio, 2020).

یکی از روش‌های بهبود خاک‌های ریزدانه ناپایدار و نرم روش الکترواسمز است. اعمال جریان الکتریکی به خاک اشباع باعث می‌شود که آب و برخی از مولکول‌های جذب شده با بار مثبت به سمت کاتد یا قطب منفی حرکت کنند. اگر آب جمع شده در کاتد به وسیله پمپ از خاک خارج شود، در اثر کاهش محتوای آب خاک تحکیم یافته و مقاومت خاک افزایش خواهد یافت. این فرایند را "الکترواسمزی" یا "آب‌گیری الکتروسیستیکی" می‌نامند که روند حرکت آب و دیگر یون‌های مثبت در آن از طریق جریان برق تامین می‌شود. سازکار غالب استحکام بخشی در فرایند الکترواسمز خروج آب حفرات و ایجاد فشار منفی در خاک است. نصب سریع، سادگی کار و مختل نکردن سایر عملیات از جمله مزایای استفاده از این روش محسوب می‌شود.

این روش در پروژه‌های مختلفی شامل تقویت خاک‌های ریزدانه و نشست‌پذیر (Bergado, Balasubramaniam,)

جدول ۱. مشخصات خاک مورد استفاده

مقدار	استاندارد	مشخصه
CH	سیستم رده بندی متحد	طبقه بندی خاک
۲/۴۳	ASTM D854	وزن مخصوص (Gs)
۱/۷۶	ASTM D698	وزن مخصوص خشک ماکزیمم (gr/cm^3)
۳۲/۲۷	ASTM D2216	درصد رطوبت در محل (%)
۱۹/۹	ASTM D698	رطوبت بهینه (%)
۵۴	ASTM D4318	حد روانی (%)
۲۳	ASTM D4318	حد خمیری (%)
۳۱	ASTM D4318	شاخص خمیری (%)
۷۲	ASTM D1558-10	مقاومت فشاری (kPa)
۷/۶	ASTM D1883	نسبت باربری کالیفرنیا (%)

۲-۲- محلول کلریداسترانسیم

عامل تثبیت کننده انتخاب شده در این تحقیق کلریداسترانسیم (SrCl_2) با جرم مولی ۱۵۸/۵۳ (جرم بر مول) است. با استفاده از محلول کلریداسترانسیم بهره‌وری و کارایی یون‌های استرانسیم وارد شده به خاک تحت جریان الکترواسمزی نسبت به نمونه اولیه خاک و صرفاً اعمال جریان الکترواسمزی مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش مقدار ۵۰ (سی‌سی) محلول ۱ مولار کلریداسترانسیم از طریق لوله آند در طی زمان ۱ ساعت به خاک تزریق شده است.

۲-۳- طرح شماتیک و روش آماده سازی نمونه‌ها

مدل مورد استفاده در آزمایش در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش در یک محفظه از جنس پلکسی‌گلاس به ابعاد $20 \times 30 \times 50$ سانتی‌متر انجام گرفت. جنس الکتروود مورد استفاده به عنوان کاتد و آند، فولاد ضدزنگ با علامت اختصاری (S.S.) است. الکتروودها لوله‌هایی توخالی به قطر ۱۵ (میلی‌متر) و ارتفاع ۱۲ (سانتی‌متر) می‌باشند که برای حرکت آزادانه آب در دیواره آنها سوراخ ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در سیستم الکترواسمز مورد آزمایش، از شبکه خطی با ۲ جفت الکتروود استفاده شده است. فاصله الکتروودهای غیر

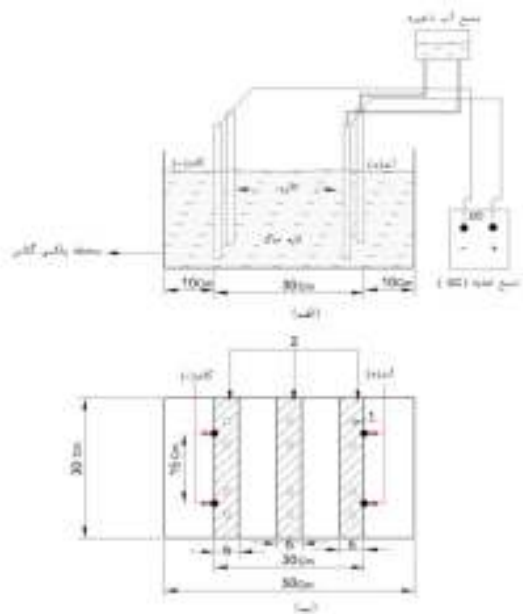
گزارشات محدودی نیز درباره یون دوظرفیتی منیزیم (Otsuki, Yodsudjai, & Nishida, 2007) وجود دارد ولی تا کنون درمورد تاثیر یون دوظرفیتی استرانسیم گزارشی مشاهده نشده است. استرانسیم (Sr) متعلق به گروه دوم جدول تناوبی (پایین عنصر کلسیم) و دارای ظرفیت دو است. این عنصر از نظر خواص فیزیکی و شیمیایی شباهت زیادی به کلسیم دارد. مقادیری از این عنصر در آب آشامیدنی و خاک به صورت طبیعی وجود دارد. وجود مقادیر پایین آن در آب آشامیدنی برای بدن مضر نیست و باعث تحکیم استخوان‌ها می‌شود. در واقع، از این عنصر در ساخت داروهای پوکی استخوان و نیز خمیر دندان‌ها استفاده می‌شود (Asjadi & Yaghooby, 2019). همچنین در صنعت نیز از استرانسیم و ترکیبات آن در لعاب سرامیک‌ها، بازیافت شکر از ملاس‌های چغندر قند و ساخت منورها استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن این موارد و نیز قیمت مناسب استرانسیم در مقیاس صنعتی، در این پژوهش برای اولین بار از محلول کلریداسترانسیم به عنوان افزودنی در فرایند الکترواسمز در تثبیت خاک‌های رسی با خمیری زیاد استفاده شد. تاثیر استرانسیم بر میزان خروج آب، درصد رطوبت، مقاومت فشاری خاک و نسبت باربری کالیفرنیا مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تغییرات میکروساختار خاک بررسی و با نتایج بخش‌های قبل مقایسه شد. همچنین با بررسی تغییرات توزیع عناصر مختلف پس از فرایند الکترواسمز، تغییرات شیمیایی ساختار خاک بررسی شد.

۲- روش‌ها و مصالح

۲-۱- خاک رس مورد استفاده

خاک رس مورد استفاده در این تحقیق از منطقه حسن رود شهرستان رودسر استان گیلان و از عمق ۱/۰ تا ۱/۵ متری برداشت شده است. بر اساس نتایج شناسایی، این خاک در سیستم رده بندی متحد در گروه خاک‌های رسی با خمیری (پلاستیسته) بالا (CH) قرار می‌گیرد. آزمایش‌های مقدماتی مطابق با استانداردهای ASTM به منظور شناسایی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

انجام شد. آزمایش CBR پس از گذشت ۲۸ روز از زمان اعمال جریان برای تمامی ولتاژها برای صرفاً ناحیه میانی خاک، بر روی نمونه خاک برداشت شده از قسمت میانی خاک پس از اتمام آزمایش و قطع جریان اعمالی انجام شد. تغییرات درصد رطوبت نمونه خاک رس (CH) بر روی نمونه‌های تهیه شده از اطراف کاتد، آند و قسمت میانی خاک در دوره‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بر اساس استاندارد ASTM-D2216 انجام شد. همچنین با استفاده از پمپ خلاء و مخزنی که به همین منظور تعبیه شده بود، میزان خروج آب از الکترودهای کاتد به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. برای بررسی تغییرات میکروساختار و مورفولوژی خاک از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و برای بررسی تغییرات توزیع عناصر مختلف پس از فرایند الکترواسمز از آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس استفاده شد. طرح شماتیک مربوط به موقعیت انجام آزمایش نفوذ و محل‌های نمونه برداری از نمونه خاک در اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. الف: نمایی شماتیک از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش ب: نمای بالای سیستم الکترواسمزی و موقعیت مکان نمونه گیری ۱: موقعیت انجام آزمایش نفوذسنج جیبی ۲: محل نمونه برداری در ناحیه اطراف کاتد، آند و قسمت میانی

هم‌نام از هم ۳۰ (سانتی‌متر) و فاصله الکترودهای هم‌نام ۱۵ (سانتی‌متر) انتخاب شد تا امکان ایجاد یکنواختی بین خطوط شبکه‌های خطی میدان الکتریکی به وجود آید. علاوه بر این در این حالت سطح مقطع بهینه‌ای از خاک تحت اثر میدان الکتریکی ایجاد شده قرار می‌گیرد (Akram N. Alshawabkeh, Yeung, & Bricka, 1999). بر اساس مطالعات مشابه انجام شده (Jayasekera & Hall, 2006) به منظور تسهیل و افزایش جریان الکترواسمزی در خاک مخزنی جهت تامین مداوم آب از طریق الکتروود آند تعبیه شده است. آب مورد استفاده آب لوله‌کشی شهری است. به منظور شبیه‌سازی با شرایط واقعی، نمونه‌های استفاده شده در تست‌ها بر اساس وزن مخصوص و درصد رطوبت خاک در محل آماده گردید. سپس نمونه خاک آماده شده پس از گذشت زمان ۲۴ ساعت از زمان عمل‌آوری طی سه لایه به گونه‌ای که ضخامت لایه خاک متراکم شده در حدود ۱۶ سانتی متر باشد در مخزن قرار داده شده است. پس از آن با تخلیه خاک محل الکترودها، الکترودها داخل خاک قرار داده شد. تمامی آزمایش‌ها در دمای طبیعی اتاق انجام شده و سطح خاک نیز در معرض هوای آزاد قرار داشته است. بعد از آماده کردن تجهیزات آزمایشگاهی، الکترودها به منبع تغذیه (DC) متصل شده و خاک مورد آزمایش به طور مداوم در معرض جریان برق مستقیم قرار گرفت. در این آزمایش ولتاژهای ۰/۵، ۱ و ۲ به ازای هر سانتی‌متر توده خاک در دوره‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به نمونه خاک اعمال شد. این برنامه آزمایش برای دو حالت اعمال جریان الکترواسمزی و اعمال جریان الکترواسمزی با تزریق محلول کلریداسترانسیم به طور مجزا انجام شد.

۲-۴- آزمایش‌های انجام شده

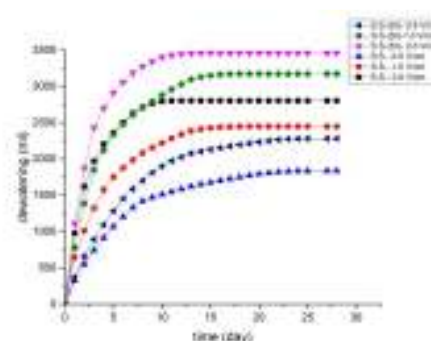
مقاومت فشاری خاک با آزمایش نفوذ بر روی نمونه خاک (ناحیه اطراف کاتد، آند و قسمت میانی) با استفاده از دستگاه نفوذسنج جیبی بر اساس استاندارد ASTM D1885-10 و در دوره‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه (چهار نقطه در هر ناحیه) به دست آمد. آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) به عنوان یکی از متداول‌ترین روش تعیین مقاومت نسبی خاک در راهسازی برای ارزیابی امکان پذیری استفاده از خاک مورد آزمایش به عنوان لایه بستر راه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D1883

۳- نتایج و بحث

۳-۱- خروج آب

شکل ۲ نتایج مقدار آب زهکشی شده از کاتد (قطب منفی) با استفاده از پمپ خلاء را در حین فرایند الکترواسمزی تحت ولتاژهای مختلف و مدت زمان اعمال جریان نشان می‌دهد. در تمامی ولتاژها بالاترین میزان نرخ خروج آب مربوط به بازه زمانی ۷ روز اول است و با گذشت زمان، تحت تمامی ولتاژهای اعمالی، حجم خروج آب با کاهش همراه بوده است. به طور میانگین برای تمامی ولتاژها بیش از ۷۵ درصد از کل حجم آب خروجی از نمونه خاک در ۷ روز اول مشاهده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود میزان حجم آب خروجی از خاک با افزایش ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه برای آزمایش با الکتروود فولادی ضدزنگ بدون افزودن محلول، افزایش ولتاژ اعمالی به خاک از ۰/۵ به ۱ و ۲ (ولت بر سانتی‌متر) به ترتیب موجب افزایش ۳۱ و ۵۰ درصدی میزان حجم خروجی آب می‌شود. این موضوع در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است (Yang, Jianting, Wen, & Chenchen, 2019). به طور کلی جریان الکترواسمزی در خاک‌های رسی در کنار سایر عوامل، عمدتاً به دلیل وجود لایه آب دوگانه (DDL) در اطراف ذرات خاک رس رخ می‌دهد.



شکل ۲. میزان تجمعی آب زهکشی شده از کاتد با (S.S.(Sr) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰/۵، ۱ و ۲-

به دلیل گرادیان الکتریکی ایجاد شده در خاک، بخشی از لایه آب دوگانه که قابلیت حرکت دارد (لایه نفوذی) 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 محیط خاک می‌شود (Jayasekera, 2015).

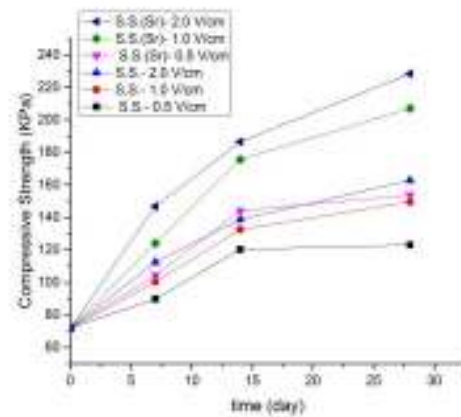
همچنین افزودن محلول کلریداسترانسیم به خاک موجب افزایش میزان حجم آب زهکشی شده نسبت به حالت صرفاً اعمال جریان الکترواسمزی می‌شود. برای آزمایش با الکتروود فولادی ضدزنگ افزودن محلول کلریداسترانسیم (ولتاژ اعمالی ۱ ولت بر سانتی‌متر) موجب افزایش ۳۰ درصدی میزان حجم خروجی آب نسبت به حالت صرفاً اعمال جریان الکترواسمزی می‌شود. به عبارت دیگر استرانسیم باعث افزایش حجم آب خروجی و سرعت فرایند الکترواسمز شده است. حضور یون‌های استرانسیم باعث افزایش رسانایی خاک می‌شود و این عامل باعث تسریع فرایند می‌گردد. از طرف دیگر از آنجا که Sr^{2+} ابتدای کار به سیستم افزوده شده قبل از تغییرات فاحش pH Sr^{2+} با حرکت به سمت کاتد بخشی از آب میان حفره‌ای را از سیستم خارج کرده و باعث کاهش زمان خروج آب در حضور Sr^{2+} و افزایش سرعت فرایند الکترواسمز شده است. به طور کلی فرایند آبیگری در جریان الکترواسمزی با گذشت زمان خاتمه می‌یابد که زمان خاتمه آن به میزان ولتاژ اعمالی به خاک ارتباط دارد. همانطور که مشاهده می‌شود افزایش ولتاژ اعمالی موجب کاهش زمان خاتمه فرایند آبیگری نمونه‌ها در هر دو حالت اعمال جریان الکترواسمزی با و بدون افزودن محلول می‌شود.

۳-۲- مقاومت خاک

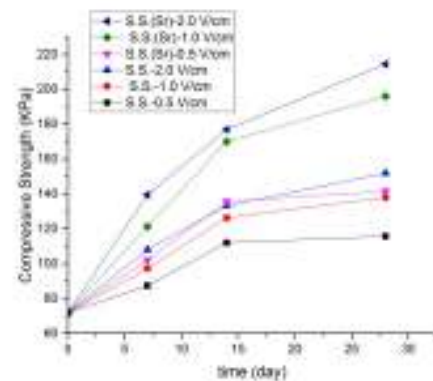
شکل‌های ۳، ۴ و ۵ مقاومت فشاری به دست آمده از آزمایش نفوذسنج جیبی را برای نمونه‌های تحت جریان الکترواسمز و جریان الکترواسمز با عامل تثبیت‌کننده تحت اعمال جریان‌های مختلف و زمان عمل آوری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در نواحی اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی نشان می‌دهد. گراف‌ها نشان می‌دهند که به طور کلی مقاومت فشاری با افزایش میزان ولتاژ اعمالی و گذشت زمان اعمال بار افزایش می‌یابد.

به عنوان نمونه میزان افزایش مقاومت خاک تحت جریان الکترواسمز در ناحیه اطراف آند تحت جریان ۰٫۵ (ولت بر سانتی متر) پس از ۲۸ روز برابر ۷۰ درصد است. افزایش میزان ولتاژ اعمالی به ۱/۰ (ولت بر سانتی متر) میزان افزایش را ۱۰۷ درصد و با تغییر ولتاژ به ۲/۰ (ولت بر سانتی متر) این میزان برابر ۱۲۵ درصد ثبت شده است. این موضوع در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است (Bergado et al., 2000). مهمترین دلیل تغییرات مقاومت در خاک ناشی از آبیگری، مکش ایجاد شده در خاک و تحکیم خاک است. همچنین انتقال الکتریکی یون‌ها به دلیل ایجاد تغییر در غلظت یونی، تغییر ضخامت لایه آب دوگانه و در نتیجه تغییر در ساختار خاک از دیگر عوامل افزایش مقاومت خاک می‌باشند. پدیده انتقال الکتریکی یون‌ها در ادامه به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که مشاهده می‌شود مقاومت فشاری در بازه‌های زمانی ۷ و ۱۴ روز با نرخ بیشتر و پس از آن با نرخ کمتر رشد می‌یابند. با این حال همچنان مقاومت خاک با نرخ کندتر در حال رشد است که دلیل آن انتقال یون‌ها از مناطق با غلظت بالاتر به نواحی با غلظت‌های پایین‌تر به دلیل گرادیان غلظت است. واکنش‌های سیمان‌مانند شدن و خشک شدن طبیعی خاک نیز می‌تواند موجب تغییرات در خاک شود (Jayasekera, 2015). این مراحل از نظر زمانی جدا از هم نیستند و در یک زمان ممکن است بیش از یکی از این مکانیزم‌ها در مقیاس میکروسکوپی انجام شود.

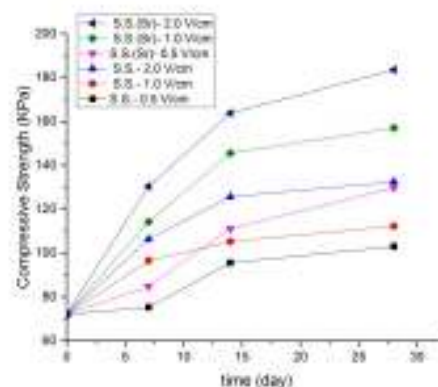
با افزودن محلول کلریداسترانسیم به عنوان عامل تثبیت‌کننده به خاک مشاهده می‌شود که برای تمامی ولتاژها میزان مقاومت خاک نسبت به خاک اولیه و نسبت به حالت بدون محلول افزایش پیدا کرده است. میزان افزایش مقاومت برای نمونه خاک اطراف الکتروآند تحت جریان الکترواسمزی با افزودن محلول تحت ولتاژ ۱/۰ ولت پس از ۲۸ روز، نسبت به خاک اولیه برابر ۱۸۷ درصد و نسبت به صرفاً اعمال جریان الکترواسمزی برابر ۳۸ درصد است. در بخش قبل گفته شد که حضور یون‌های استرانسیم با افزایش رسانایی خاک جریان الکترواسمز را تسریع می‌کنند. از طرف دیگر، وجود Sr^{2+} در آب خروجی و از طرفی توزیع آن در اطراف کاتد نشان دهنده حرکت قابل توجه این یون در خاک است. با حرکت یون‌های Sr^{2+} از سمت آند به کاتد تحت جریان الکترواسمزی، آب بین‌حفره‌ای بیشتری نسبت به



شکل ۳. تغییرات مقاومت فشاری در اطراف آند با (S.S.(Sr)) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰٫۵، ۱، ۲ و -



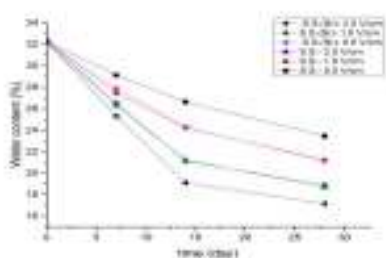
شکل ۴. تغییرات مقاومت فشاری در اطراف ناحیه میانی با (S.S.(Sr)) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰٫۵، ۱، ۲ و -



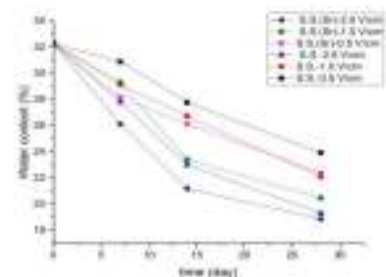
شکل ۵. تغییرات مقاومت فشاری در اطراف کاتد با (S.S.(Sr)) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰٫۵، ۱، ۲ و -

میانی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود به طور کلی با افزایش زمان و شدت جریان اعمالی، درصد رطوبت نمونه‌های خاک کاهش می‌یابد. این کاهش در زمان ۷ و ۱۴ روز با نرخ بیشتر و پس از آن با نرخ شیب کمتر تغییر می‌کند.

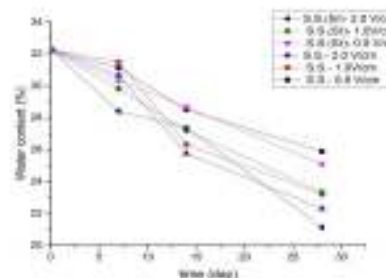
به عنوان نمونه میزان کاهش درصد رطوبت برای نمونه خاک اطراف آند تحت جریان ۱/۰ ولت پس از گذشت ۷ روز ۱۵ درصد، پس از ۱۴ روز ۲۵ درصد و پس از ۲۸ روز ۳۴ درصد کاهش را نسبت به نمونه اولیه خاک نشان می‌دهد. این موضوع در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است (Ou, Chien, & Wang, 2009).



شکل ۶. تغییرات درصد رطوبت در اطراف آند با (S.S.(Sr) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰/۱، ۰/۲ و -



شکل ۷. تغییرات درصد رطوبت در اطراف ناحیه میانی با (S.S.(Sr) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰/۱، ۰/۲ و -



شکل ۸. تغییرات درصد رطوبت در اطراف کاتد با (S.S.(Sr) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۰/۱، ۰/۲ و -

حالتی که تنها یون‌های موجود در خاک تحت جریان الکترواسمز حرکت می‌کردند از خاک خارج می‌شود و پدیده فشار منفی که باعث کوچکتر شدن یا از بین رفتن حفرات می‌شود تشدید می‌گردد. به همین دلیل مقدار الگومراسیون در حضور Sr^{2+} افزایش می‌یابد. افزایش الگومراسیون خاک باعث افزایش استحکام آن می‌شود. به دلیل غلظت بالا بخشی از استرانسیم می‌تواند در لایه دوگانه وارد شده و جایگزین سایر یون‌های با تحرک بیشتر بشود. این یون‌ها وارد آب بین‌حفره‌ای شده و با مهاجرت به سمت کاتد باعث افزایش آب خروجی و استحکام می‌شود. Sr^{2+} با بازی کردن محیط باعث رسوب زودتر کلسیم و آهن نسبت به حالت بدون حضور یون‌های استرانسیم شده و محصولات واکنش‌های رسوبی، خود عاملی برای افزایش استحکام هستند. خود استرانسیم نیز با تشکیل رسوبات باعث افزایش استحکام خاک می‌شود. البته همانطور که در بخش آنالیز عنصری بحث خواهد شد این عامل در بخش میانی و کاتد می‌تواند به عنوان عامل افزایش استحکام در نظر گرفته شود ولی در اطراف آند به دلیل اسیدی بودن ترکیب اتفاق نمی‌افتد.

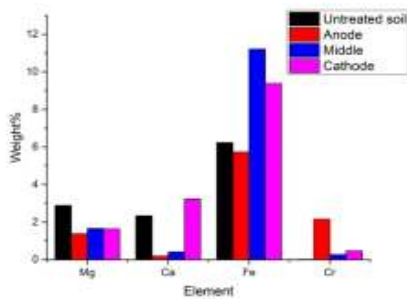
همچنین میزان افزایش مقاومت در اطراف قطب آند بیشتر از افزایش مقاومت در قطب کاتد است. تغییرات مقاومت فشاری برای نمونه تحت جریان الکترواسمز همراه با محلول با ولتاژ اعمالی ۲/۰ (V/cm) در ناحیه اطراف آند پس از گذشت ۷ روز برابر ۱۰۳ درصد، پس از گذشت ۱۴ روز ۱۵۹ درصد و پس از گذشت ۲۸ روز به میزان ۲۱۷ درصد افزایش یافته است. در حالیکه افزایش مقاومت برای ناحیه اطراف کاتد میزان افزایش به ترتیب برابر ۸۱، ۱۲۷، و ۱۵۵ درصد ثبت شده است. دلیل این موضوع را می‌توان به اعمال جریان از الکتروآند به سمت کاتد و در نتیجه میزان آب کمتر در منطقه اطراف آند و همچنین سیمانه شدن ناشی از رسوب یون‌های Fe آزاد شده به دلیل خوردگی الکترودهای فولادی نسبت داد.

۳-۳- درصد رطوبت

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ میزان درصد رطوبت خاک را برای نمونه‌های تحت جریان الکترواسمز و جریان الکترواسمز با عامل تثبیت کننده با اعمال ولتاژ ۰/۱، ۱/۰ و ۲/۰ ولت و زمان اعمال جریان ۷، ۱۴، ۲۸ روز را در نواحی اطراف آند، کاتد و ناحیه

۳-۴- آنالیز شیمیایی

توزیع غلظت عناصر در بخش‌های مختلف خاک شامل کاتد، بخش میانی و آند در نمونه‌های خاک فراوری شده بدون حضور استرانسیم در شکل ۱۰ آورده شده است. آنالیز شیمیایی خاک بر روی نمونه خاک به دست آمده از اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی پس از گذشت ۲۸ روز از اعمال جریان ۲/۰ (ولت بر سانتی متر) انجام شد. این شکل افزایش قابل توجه غلظت آهن (Fe) و کروم (Cr) بعد از اتمام فرایند را نشان می‌دهد که به دلیل اکسیداسیون الکتروکود فولادی است. کروم در اطراف آند تجمع کرده و تنها درصد بسیار جزئی در سایر بخش‌ها دیده می‌شود. این عدم تحرک به ظرفیت بالای یون کروم و وزن بالای آن مربوط است. مقدار آهن نزدیک آند تقریباً برابر مقدار آهن در خاک اولیه است، ولی در سایر بخش‌ها غلظت نسبتاً بالایی از آن مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد آهن آزاد شده در اثر اکسیداسیون الکتروکود تحت جریان حرکت کرده و به سمت کاتد رفته است. در واقع افزایش غلظت یون آهن باعث مهاجرت این یون شده است. آهن مانند سایر فلزات در محیط بازی تمایل به رسوب به صورت اکسید یا هیدروکسید دارد و از طرفی واکنش هیدرولیز آب در کاتد و آند به ترتیب منجر به تولید H^+ و OH^- در سمت الکترودها می‌شود. بنابراین از سمت آند به کاتد محیط خاک بازی‌تر می‌شود. یون آهن با حرکت از سمت اسیدی به سمت بازی تمایل به رسوب پیدا می‌کند. بنابراین یون آهن با حرکت از سمت آند به کاتد تحت میدان الکتریکی در بخش میانی و کاتد به صورت هیدروکسید آهن رسوب می‌کند. تشکیل این رسوبات به عنوان یکی از فرایندهای جانبی افزایش استحکام خاک در فرایند الکترواسمز در نظر گرفته می‌شود.

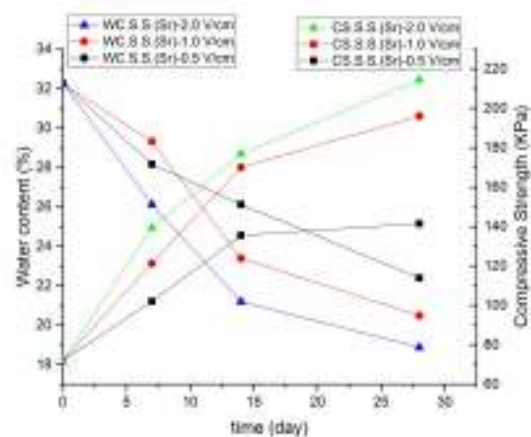


شکل ۱۰. توزیع غلظت عناصر در بخش‌های کاتد، بخش میانی و آند در نمونه‌های خاک فراوری شده بدون حضور استرانسیم

می‌توان گفت که تغییرات درصد رطوبت خاک‌های مورد آزمایش ناشی از ترکیب فرایند آبگیری بر اثر جریان برق در خاک، تبخیر طبیعی و فرایند خشک شدن ناشی از گرمای ایجاد شده توسط اعمال جریان به خاک است.

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد، افزودن محلول کلرید استرانسیم به خاک با افزایش میزان آب خروجی از نمونه باعث کاهش بیشتر در درصد رطوبت خاک نسبت به اعمال صرفاً جریان الکترواسمز به نمونه خاک می‌شود.

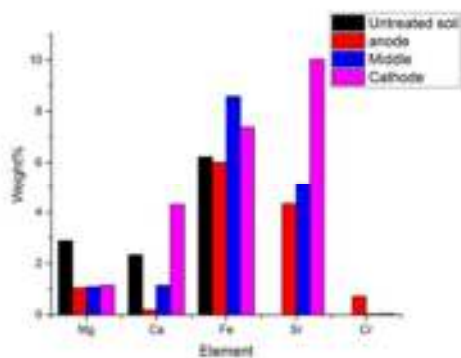
نمونه خاک اطراف آند تحت اعمال جریان ۲/۰ (ولت بر سانتی متر) پس از ۲۸ روز در حالت افزودن محلول کاهش ۶۶ درصدی را نسبت به نمونه خاک اولیه و کاهش ۱۰ درصدی را نسبت به اعمال جریان الکترواسمز بدون حضور یون‌های استرانسیم نشان می‌دهد. همچنین به دلیل جهت جریان الکترواسمز که از سمت آند به کاتد است، میزان کاهش درصد رطوبت در اطراف آند بیشتر از نمونه‌های به دست آمده در قطب کاتد است.



شکل ۹. تغییرات مقاومت فشاری و درصد رطوبت در اطراف ناحیه میانی با (S.S.(Sr)) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۱، ۰/۵ و ۲-

شکل ۹ نتایج مربوط به درصد رطوبت و مقاومت فشاری را با گذشت زمان را تحت اعمال جریان ۱/۰، ۰/۵ و ۲/۰ (ولت بر سانتی متر) برای نمونه تحت جریان الکترواسمز با عامل تثبیت‌کننده نشان می‌دهد. همانطور که در شکل قابل مشاهده است افزایش زمان و کاهش درصد رطوبت رابطه مستقیم با افزایش مقاومت فشاری خاک دارد.

خاک‌ها باشد برای مثال درصد سدیم اولیه در خاک مورد مطالعه این گروه بسیار بیشتر است. علاوه بر این همانطور که (Mitchell & Soga, 2005) اشاره کرده‌اند جایگزینی و تحرک یون‌ها به عواملی نظیر غلظت هر عنصر در خاک مربوط است و این به معنی اهمیت بالای ترکیب خاک مورد استفاده است. تاثیرات ولتاژ و ماده الکتروود را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. شکل ۱۱ توزیع غلظت عناصر مختلف بعد از فرایند الکترواسمز با تزریق یون استرانسیم را نشان می‌دهد. رفتار یون‌های آهن در حضور استرانسیم تغییر کرده است. وجود استرانسیم محیط را بازی‌تر می‌کند. و در نتیجه میزان خوردگی الکتروود فولادی کاهش می‌یابد. این پدیده در عملیات تجربی نیز با سالم‌تر بودن الکترودهای فولادی قابل مشاهده است. علاوه بر این، از آنجا که استرانسیم باعث بازی‌تر شدن سیستم می‌شود مقدار رسوب در بخش میانی بیشتر شده و در نتیجه غلظت آهن در بخش میانی افزایش می‌یابد. این موضوع در مورد کلسیم نیز مشاهده می‌شود. یون منیزیم در حضور استرانسیم رفتار مشابهی از خود نشان داده و از سمت آند به کاتد حرکت کرده و بخشی از آن همراه آب خروجی خارج شده است.

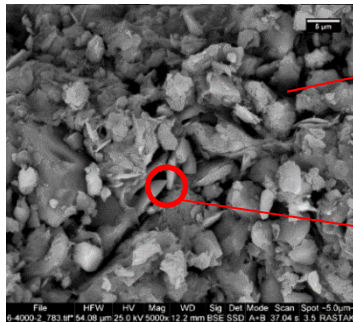


شکل ۱۱. توزیع غلظت عناصر در بخش‌های کاتد، بخش میانی و آند در نمونه‌های خاک فراوری شده با تزریق استرانسیم

Sr^{2+} هم از سمت آند به سمت کاتد جریان پیدا کرده و در تمام بخش‌ها توزیع شده است. مقدار آن در آند کمتر و در بخش میانی و پایانی بیشتر است. دلیل آن افزایش pH از سمت آند به کاتد و رسوب Sr^{2+} در بخش میانی و پایانی است. آزمایش جذب اتمی نشان داد بخشی از Sr^{2+} در آب خروجی وارد شده است. به نظر می‌رسد Sr^{2+} در هر سه مکانیسم نقش داشته

مقدار کلسیم بعد از فرایند الکترواسمز، اطراف آند فولادی بسیار اندک و مقدار آن در کاتد بسیار بیشتر است که اولی به دلیل تحرک زیاد این یون و دومی به دلیل رسوب این یون در اطراف کاتد است. منیزیم (Mg) توزیع یکنواختی بعد از فرایند دارد ولی مقدار آن پس از اتمام فرایند کمتر از مقدار اولیه است. این پدیده نشان‌دهنده خروج این یون همراه آب خروجی است. لایه‌های سیلیکات خاک کاتیون‌های مختلف را در لایه دوگانه خود جذب می‌کند. یون‌های جذب شده می‌توانند با سایر یون‌ها جایگزین شوند. قدرت جایگزینی به ظرفیت، غلظت و شعاع هیدراسیون یون‌ها بستگی دارد. در شرایط برابر یون‌های با بار بیشتر جایگزین یون با بار کمتر می‌شوند. در مورد این مطالعه با در نظر گرفتن نتایج ذکر شده به نظر می‌رسد، یون‌های با بار بالاتر جایگزین Ca^{2+} و Mg^{2+} می‌شوند. کلسیم و منیزیم آزاد شده و وارد آب بین‌حفره‌ای شده و یون‌های با بار بالاتر در لایه دوگانه باقی می‌مانند. کلسیم و منیزیم آزاد شده پس از ورود به آب بین‌حفره‌ای به سمت کاتد انتقال می‌یابد و بخشی از آب بین‌حفره‌ای را همراه خود انتقال می‌دهند. با خروج آب بین‌حفره‌ای توسط یون‌ها، فشار منفی در حفرات ایجاد شده و حفرات از بین می‌روند. همانطور که در بخش‌های قبلی بیان شد این فرایند مهمترین مکانیزم افزایش مقاومت خاک در این روش است. فرایند از بین رفتن حفرات در تصاویر میکروسکوپی بخش بعدی به وضوح قابل مشاهده است. یون منیزیم همراه آب خروجی از خاک خارج می‌شود. ولی کلسیم رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. همانطور که در بخش قبل گفته شد خاصیت بازی خاک از سمت آند به کاتد افزایش می‌یابد. با انتقال یون کلسیم از سمت اسیدی به سمت بازی، این یون تمایل به رسوب پیدا می‌کند. با در نظر گرفتن غلظت کلسیم در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که بخشی از کلسیم سمت کاتد رسوب می‌کند. در عمل نیز سفید شدن خاک اطراف کاتد نشان‌دهنده حضور این رسوبات است. هر چند این نتایج در رابطه با ماهیت مهاجرت یون و تغییرات شیمیایی با سایر مطالعات سازگار است، ولی تفاوت‌هایی نیز وجود دارد (Zhang et al., 2017). برای مثال در مطالعه اشاره شده، افزایش غلظت کلسیم در اطراف آند را گزارش کرده‌اند و تحرک کم این یون که مخالف این موضوع در این مطالعه دیده شده است. این تفاوت می‌تواند به دلیل تفاوت نوع

مورفولوژی حاصل برهمکنش خاک و آب است. لایه‌های سیلیکات دارای تماس



حفره بین ذرات خاک
برخورد لبه به صفحه

شکل ۱۲. تصویر میکروسکوپی خاک اولیه با بزرگنمایی ۵۰۰۰

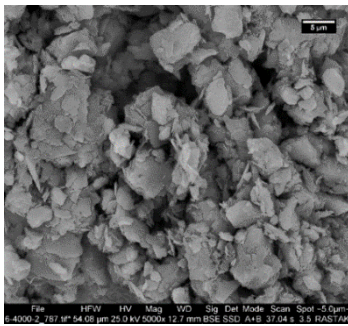
صفحه به صفحه یا لبه به صفحه هستند و حفره‌های واضح بین ذرات خاک قابل مشاهده است. شکل ۱۳ مورفولوژی خاک بعد از فرایند الکترواسمز بدون محلول را نشان می‌دهد. تغییرات واضحی در میکروساختار به چشم می‌خورد. در بخش آند و میانی، لخته شدن و آگلومراسیون خاک کاملاً مشخص است و بیشتر آگلومرها تماس صفحه به صفحه دارند تا صفحه به لبه.

است. یعنی بخشی از آن در لایه دوگانه جایگزین شده و باعث آزاد شدن یون‌های کوچکتر می‌گردد. این یون‌ها آب بین‌حفره‌ای را از سمت آند به سمت کاتد منتقل کرده و موجب افزایش حجم آب خروجی می‌شود. بخشی از آن رسوب کرده و در نهایت استرانسیم از سمت آند به سمت کاتد حرکت کرده، آب بین حفره‌ای را با خود منتقل و همراه آب خروجی از سیستم خارج می‌شود. همه این موارد باعث افزایش استحکام خاک می‌گردد.

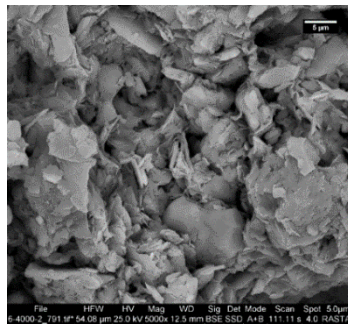
۳-۵- تغییرات میکروساختار خاک

برای به دست آوردن جزئیات درباره تغییرات میکروساختار خاک در فرایند الکترواسمز از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. مورفولوژی خاک اولیه در شکل ۱۲ دیده می‌شوند.

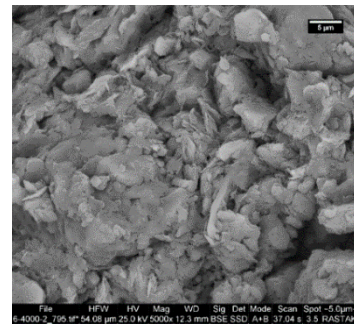
تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه خاک به دست آمده از اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی پس از گذشت ۲۸ روز از اعمال جریان ۲/۰ (ولت بر سانتی متر) به دست آمد. این



ج

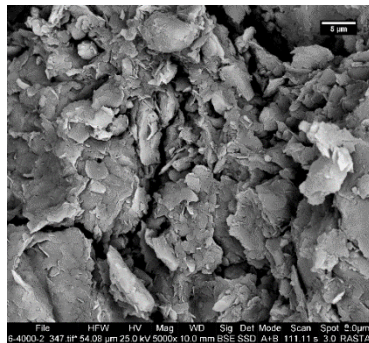


ب

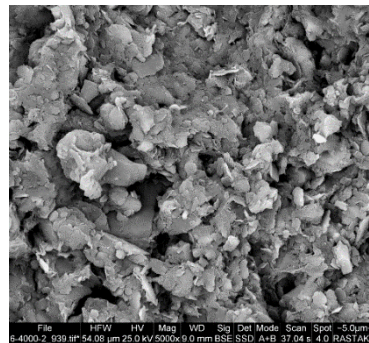


الف

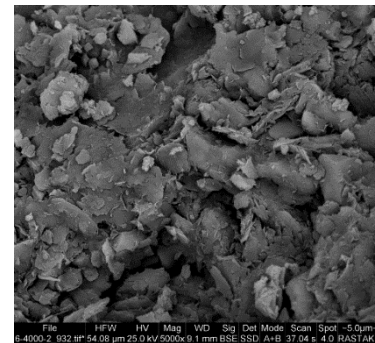
شکل ۱۳. تصاویر میکروسکوپی از نمونه خاک برای آزمایش صرفاً جریان الکترواسمز الف- اطراف آند ب-بخش میانی ج- اطراف کاتد



و

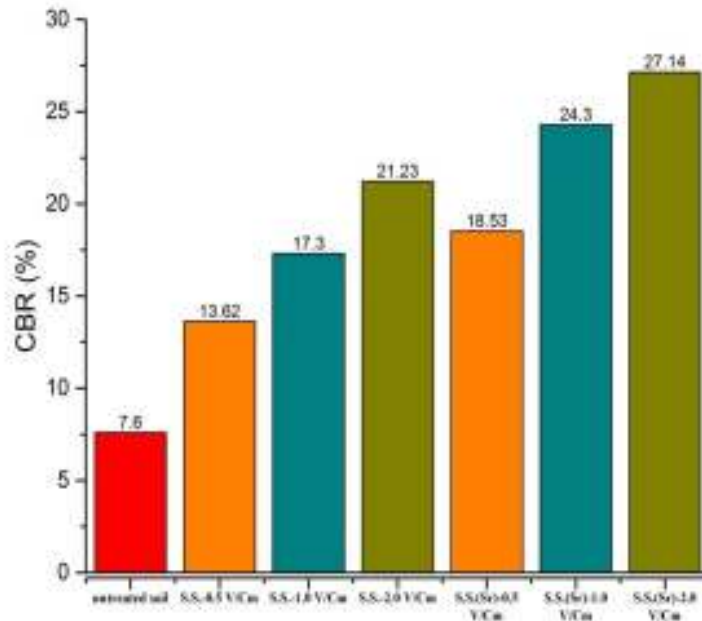


ه



د

شکل ۱۴. تصاویر میکروسکوپی نمونه خاک آزمایش الکترواسمزی با تزریق محلول استرانسیم الف- اطراف آند ب-بخش میانی ج- اطراف کاتد



شکل ۱۵. نتایج آزمایش (CBR) اشباع پس از ۲۸ روز از زمان اعمال جریان با (S.S.(Sr)) و بدون (S.S.) تزریق محلول استرانسیم - ولتاژهای ۱،۰/۵ و ۲-.

نشان می‌دهد. در این تحقیق پس از اتمام اعمال جریان الکترواسمزی، ابتدا درصد رطوبت بهینه نمونه خاک برداشت شده از قسمت میانی خاک توسط آزمایش تراکم به دست آمد و سپس نمونه خاک با درصد رطوبت بهینه در قالب CBR تراکم شد. نمونه‌های تهیه شده به مدت ۹۶ ساعت در آب قرار گرفته و سپس تحت آزمایش CBR قرار گرفتند. همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی استفاده از روش الکترواسمزی منجر به افزایش CBR خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری نمونه خاک و بهبود کیفیت آن نسبت به خاک اولیه و همچنین اصلاح درجه بندی خاک از ضعیف به نسبتاً خوب جهت استفاده در لایه بستر و بستر روسازی راه می‌شود (Bowles, 1992).

به عنوان نمونه برای خاک تحت جریان الکترواسمز با ولتاژ ۲/۰ (ولت بر سانتی‌متر) افزایش ۱۷۹ درصدی CBR نسبت به نمونه خاک اولیه مشاهده می‌شود. که این نتایج در تطابق با نتایج به دست آمده از نتایج مقاومت فشاری خاک می‌باشند. همچنین افزودن محلول کلرید استرانسیم باعث افزایش CBR به میزان ۲۵۷ درصد نسبت به خاک اولیه و ۲۷ درصد نسبت به حالت صرفاً اعمال جریان الکترواسمز می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده و با توجه به اینکه آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا از

این ذرات کاملاً چگال بوده و تراوایی بسیار کمی دارند. آگلومراسیون و کاهش تخلخل در کاتد کمتر از دو بخش دیگر است. همانطور که قبلاً اشاره شد تغییرات میکروساختار به دو سازکار اصلی مرتبط است. اول تعویض یونی که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه فشردگی صفحات سیلیکاتی می‌شود و دوم خروج آب از حفرات. مویبندی فشار منفی در حفرات ایجاد کرده و باعث از بین رفتن و یا کاهش حجم حفرات می‌شود. این دو پدیده از سمت آند به کاتد کمتر اتفاق می‌افتد و در نتیجه تغییرات میکروساختار از سمت آند به سمت کاتد کاهش می‌یابد. شکل ۱۴ مورفولوژی خاک بعد از فرایند الکترواسمز با تزریق محلول را نشان می‌دهد. با افزودن یون‌های استرانسیم همانطور که در بخش‌های قبل گفته شد، خروج آب زهکشی بیشتر و فشردگی شدن و آگلومره شدن خاک نیز بیشتر می‌شود. این موضوع در تصاویر میکروسکوپی نیز مشاهده می‌شود.

۳-۶- نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

شکل ۱۵ درصد CBR اشباع خاک را برای نمونه‌های تحت جریان ۱،۰/۵ و ۲/۰ (V/cm) را پس از ۲۸ روز اعمال جریان

می‌گردد. یون‌های استرانسیم با افزایش رسانایی خاک، شرکت در جریان الکترواسمز و انتقال بخشی از آب بین حفره‌ای از سمت آند به کاتد و شرکت در واکنش‌های رسوبی و در نهایت بازی کردن محیط خاک بر فرایند الکترواسمز تاثیر دارد.

- نتایج آنالیز شیمیایی انجام انتقالات و تعویض‌های یونی و به طور کلی تغییر ترکیب شیمیایی خاک را نشان داد. این تغییرات شیمیایی منجر به تغییر ساختار و خواص خاک می‌شود. در اثر اکسید شدن الکتروود فولادی مقداری یون آهن بعد از عملیات الکترواسمز وارد خاک شده است. از طرف دیگر استرانسیم از سمت آند به سمت کاتد انتقال پیدا کرده و بخشی از آن همراه آب خروجی خارج شده و بخشی نیز رسوب کرده است.

- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی تغییرات میکروساختار خاک شامل لخته شدن و آگلومره شدن ذرات خاک را نشان داده و صحت نتایج فیزیکی را تایید می‌کند. مقدار حفرات موجود در خاک با عملیات الکترواسمز کاهش پیدا کرده است.

- همچنین نتایج آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا به عنوان یکی از متداول‌ترین روش تعیین مقاومت نسبی خاک در راهسازی برای ارزیابی امکان پذیری استفاده از خاک مورد آزمایش به عنوان لایه بستر راه‌ها، نشان دهنده افزایش ظرفیت باربری نمونه خاک و همچنین کیفیت آن پس از تثبیت به روش الکترواسمز است.

۵- مراجع

- Alshwabkeh, A. N., Sheahan, & C., T., (2003), "Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields". Ground Improvement. Vol. 7, No. 4. pp. 177-185.
- Alshwabkeh, A. N., Yeung, A. T., & Bricka, M. R., (1999), "Practical Aspects of In-Situ Electrokinetic Extraction". Journal of Environmental Engineering, Vol. 125, No. 1. pp. 27-35.
- Asakereh, A., Tavasoli, O., & Safarzadeh, I. (2020), "Microstructural investigation of fine-grained soil improvement by mixing of Nano-clay and lime" Journal of Transportation Research", Vol. No., pp. (in Persian).

آزمایشات متداول برای تعیین مشخصات لایه‌های خاک در راهسازی است، می‌توان گفت که این روش به دلیل عدم نیاز به تعویض خاک و همچنین خشک کردن، تخریب و مخلوط کردن خاک نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک در راه‌ها می‌تواند به منظور تثبیت خاک‌های رسی با خمیری زیاد مورد استفاده قرار گیرد. از سوی دیگر به دلیل اینکه هدف از افزودن استرانسیم افزایش رسانایی خاک و شرکت این یون در فرایندهای الکترواسمز است، افزودن مقدار اندک نمک کلرید استرانسیم برای این هدف کافی بود. تاثیر قابل توجه افزودن مقادیر ناچیز محلول حاوی یون‌های فلزات بر روی حجم آب خروجی و استحکام خاک توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (Ou et al., 2009). مقدار استرانسیم افزوده شده به خاک در این پژوهش در حد $10^{-4} \times 1/87$ درصد وزنی نمونه خاک اولیه است که در مقایسه با سایر مواد افزودنی در روش‌های دیگری که به منظور تثبیت خاک به کار می‌رود، بسیار ناچیز است. که این موضوع با در نظر گرفتن مقدار کم مواد خارجی افزوده شده به خاک اولیه می‌تواند به عنوان یک مزیت از دیدگاه زیست محیطی برای روش الکترواسمزی باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر استفاده از روش الکترواسمزی همراه با عامل تثبیت‌کننده کلرید استرانسیم بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی خاک رس با خمیری زیاد با اعمال جریان مستقیم (DC) با ولتاژهای ۰/۵، ۱ و ۲ به ازای هر سانتی‌متر توده خاک در دوره‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه به نمونه خاک مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

- نتایج به دست آمده نشان‌دهنده افزایش مقاومت فشاری و کاهش میزان درصد رطوبت خاک اولیه در اثر استفاده از روش الکترواسمزی است. میزان تغییرات تابع میزان ولتاژ اعمالی و زمان عمل‌آوری نمونه خاک است.

- تزریق کلرید استرانسیم به خاک موجب افزایش حجم آب زهکشی‌شده از نمونه خاک، افزایش مقاومت فشاری و کاهش درصد رطوبت نسبت به حالت صرفاً اعمال جریان الکترواسمزی

- soils using electrochemical treatments". *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 25. No. 1. pp. 1-10.
- Mitchell, J. K., & Soga, K., (2005), "Fundamentals of Soil Behavior: Wiley".
- Mohamedelhasan, E., & Shang, J. Q., (2003), "Electrokinetics-generated pore fluid and ionic transport in an offshore calcareous soil". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40. No. 6. pp. 1185-1199.
- Otsuki, N., Yodsudjai, W., & Nishida, T. (2007), "Feasibility study on soil improvement using electrochemical technique".
- Ou, C.-Y., Chien, S.-C., & Wang, Y. G., (2009), "On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions", *Applied Clay Science*. Vol. 44. No. 1. pp. 130-136.
- Ozkan, S., Gale, R. J., & Seals, R. K., (1999), "Electrokinetic stabilization of kaolinite by injection of Al and PO₄³⁻ ions". Vol. 3. No. 4. pp. 135-144.
- Rivera, J. F., Mejía de Gutiérrez, R., Ramirez-Benavides, S., & Orobio, A., (2020), "Compressed and stabilized soil blocks with fly ash-based alkali-activated cements". *Construction and Building Materials*. Vol. 264, No., pp. 120285.
- Shariatmadari, N., Falamaki, A., & Noorzad, A. (2010), "Soil Improvement By Electrokinetic Injection", *Amirkabir Journal Of Civil Engineering*. Vol. 42, No. 2. pp. 95-102., (in Persian).
- Thepsithar, P., & Roberts, E. P. L., (2006), "Removal of Phenol from Contaminated Kaolin Using Electrokinetically Enhanced In Situ Chemical Oxidation", *Environmental Science & Technology*. Vol. 40. No. 19. pp. 6098-6103.
- Yang, S., Jianting, F., Wen, S., & Chenchen, Q. (2019), "Effects of Voltage Gradients on Electro-Osmotic Characteristics of Taizhou Soft Clay", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 14. No. 3. pp. 2136-2159.
- Zhang, L., Jing, L.-p., Wang, N.-w., Fang, C., Li, Y.-q., & Shan, Z. d., (2017), "Electro-Osmosis Chemical Treatment of High-Salinity Soft Marine Soils: Laboratory Tests". *The Open Civil Engineering Journal*. Vol. 11. No., pp. 109-120.
- Asjadi, F., & Yaghooby, M., (2019), "Strontium modified hydroxyapatite: a review on structure, synthesise method and biomedical applications". *Journal of Iranian Ceramic*. Vol. 54, No., pp. 60-71, (in Persian).
- Ayeldeen, M., & Kitazume, M., (2017), "Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay". *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 45, No. 6. pp. 592-602.
- Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Patawaran, M. A. B., & Kwunpreuk, W., (2000), "Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains". Vol. 4. No. 4, pp. 153-163.
- Bowles, J. E., (1992), "Engineering Properties of Soils and Their Measurement: McGraw-Hill".
- Chappell, B. A., & Burton, P. L., (1975), "Electro-Osmosis Applied to Unstable Embankment", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. Vol. 101, No. 8, pp. 733-740.
- Chien, S.-C., Ou, C.-Y., & Wang, M.-K. (2009), "Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil". *Applied Clay Science*, Vol. 44. No. 3, pp. 218-224.
- Chien, S.-C., Ou, C.-Y., & Wang, Y. H., (2011), "Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: laboratory tests". *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. Vol. 34. No. 7, pp. 863-875.
- Fang, H. Y., (1990), "Foundation Engineering Handbook: Springer US".
- Ghaffarpour Jahromi, S., & Noori, A., (2019), "Effect of Environment Acidity on Mechanical and Volumetric Properties of Expansive Soil of Subgrade", *Journal of Transportation Research*", Vol. No., pp., (in Persian).
- Gray, H., (1970), "Electrochemical Hardening of Clay Soils". *Géotechnique*. Vol. 20. No. 1. pp. 81-93.
- Hausmann, M. R., (1990), "Engineering Principles of Ground Modification: McGraw-Hill".
- Jayasekera, S., (2015), "Electrokinetics to modify strength characteristics of soft clayey soils: a laboratory based investigation". *Electrochimica Acta*. Vol. No.181. pp. 39-47.
- Jayasekera, S., & Hall, S., (2006), "Modification of the properties of salt affected

Improving Engineering Properties of High Plasticity Clay Soils Using Electro-osmosis with the Injection of Strontium Chloride

Hossein Azizi Mir Mahalleh, Ph.D., Grad., Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Mehdi Siavoshnia, Assistant Professor, Faculty of Engineering, Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Maryam Yazdi, Assistant Professor, Faculty of Engineering, Central Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

E-mail: meh.siavoshnia@iauctb.ac.ir

Received: October 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

High plasticity clay soils are one of the problematic soils for engineering projects, especially for road construction. Electro-osmosis is one of the methods for improving the characteristics of the soft and fine grained soils. In this method applying the electric field cause changes in microstructure of the soil and modify the physical and chemical properties of the soil. Injecting chemical solution into soil during the electro-osmosis process adopted for enhance the efficiency of the treatment in recent years. The effect of injection of strontium solutions on chemical and geotechnical characteristics of soil was investigated. A layer of the soil was impacted in a tank for obtaining density and field moisture content. Direct current was applied through the soil under voltage gradients of 0.5, 1, and 2 (V/cm) for periods of 7, 14, and 28 days, with and without the injection of strontium solution. Stainless steel electrode was exerted for treatment. The results demonstrated the increases in compressive strength and reduction of the moisture content of the soil. From the results it is noted that injecting strontium increases the compressive strength and volume of drained water compare to electro-osmosis process in absence of strontium. Chemical analysis of the soil before and after the treatment identifies the ionic migration, ionic exchanges and changes in chemical composition of the soil. These chemical changes lead to changes in structure and properties of the soil. The scanning electron microscopy (SEM) images exhibited the changes of the microstructures including flocculation and agglomeration and confirm the validity of physical results. At last, the result of California bearing ratio (CBR) showed that electro osmosis chemical treatment is feasible method to increase the properties of the soil to meet the requirements for subgrade constructions.

Keywords: Electro-Osmosis Processing, Soil Stabilization, Plastic Soil, Chemical Treatment, Strontium Chloride