

تأثیر شدت بخشی با محلول کلسیم کلرید بر سازوکار الکترولیز و الکترواسمزی خاک رسی در فرآیند الکتروسینتیک

وحیدرضا اوحدی^{۱*}، آرمان محمدی^۲، امید رضا بهادری نژاد^۲

۱-استاد گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، عضو هیئت علمی وابسته دانشکده عمران، دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا

vahidouhadi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۹۹/۶/۲۷]

تاریخ دریافت: [۹۸/۵/۲۷]

چکیده

از الکتروسینتیک برای رفع آلودگی، افزایش زهکشی سیال حفره‌ای، و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های رسی استفاده می‌شود. در خاک-های حاوی کربنات به علت ظرفیت بافرینگ خاک، جبهه اسیدی به طور کامل شکل نمی‌گیرد و رفع آلودگی از خاک، زهکشی سیال حفره‌ای، و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک صورت نمی‌گیرد. همین موضوع سبب کاهش جریان الکترواسمزی و عدم عملکرد مناسب روش الکتروسینتیک می‌شود. یکی از روش‌های مقابله با این مشکل، استفاده از روش شدت بخشی است. هدف این پژوهش تعیین امکان افزایش جریان الکترواسمزی در به کارگیری روش شدت بخشی با استفاده از محلول کلسیم کلرید در فرایند الکتروسینتیک خاک رسی پرکربنات است. در این راستا نمونه رسی طبیعی پرکربنات تحت فرایند الکتروسینتیک در دو حالت بدون شدت بخشی و شدت بخشی شده با محلول کلسیم کلرید در غلظت‌های ۰/۲ و ۰/۵ مولار که به مخزن موجود در مجاورت الکترود آند اضافه شدند، آزمایش شد. نتایج حاکی از آن است که به دلیل حضور درصد قابل توجه کربنات کلسیم در خاک، نه تنها pH نهایی خاک در فرایند الکتروسینتیک کاهش نیافته بلکه حتی به علت حاکم شدن جبهه بازی در حضور کربنات کلسیم و کلسیم کلرید در سازوکار الکترولیز، مقادیر pH خاک افزایش یافته است. با این وجود در آزمایش‌ها شدت بخشی داده شده با محلول کلسیم کلرید، حضور یون کلسیم و افزایش فرایند انتقال الکترو یونی، سبب افزایش شدت جریان و بازده سازوکار الکترواسمزی شده است. به گونه‌ای که دبی الکترواسمزی نمونه شدت بخشی شده با ۰/۵ مولار کلسیم کلرید نسبت به نمونه بدون شدت بخشی در انتهای آزمایش افزایش قابل توجهی داشته است.

کلمات کلیدی: الکتروسینتیک، شدت بخشی، الکترواسمزی، الکترولیز، خاک رسی پرکربنات.

۱. مقدمه

فیزیکی-شیمیایی است. در این تکنولوژی خاک مورد مطالعه از طریق الکترودهای آند (مثبت) و کاتد (منفی) تحت اختلاف پتانسیل الکتریکی با شدت کم (جریان الکتریکی مستقیم) (DC) قرار می‌گیرد [1]. الکتروسینتیک به دو روش

الکتروسینتیک از روش‌های معمول برای بهبود ویژگی‌های مهندسی و رفع آلودگی از خاک در پروژه‌های ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی است. الکتروسینتیک یک پدیده‌ای

شدت جریان ثابت یا اختلاف پتانسیل ثابت استفاده می‌شود. در الکتروسیستیک چهار فرایند اصلی شامل الکترواسمزی (حرکت مولکول‌های آب بر اثر میدان الکتریکی)، الکترویونی (انتقال یون‌ها بر اثر جریان الکتریکی)، الکتروفورز (حرکت ذرات جامد بر اثر میدان الکتریکی) و الکترولیز (تجزیه مولکول‌های آب در اطراف الکترودها) صورت می‌گیرد [2].

در سال ۱۹۴۹ میلادی، کاساگراند از روش الکتروسیستیک برای تحکیم خاک‌ها و پایداری شیب‌های خاکی استفاده نمود [3]. در پنجاه سال اخیر، پژوهشگران تحقیقات وسیعی را در خصوص ارزیابی قابلیت روش الکتروسیستیک برای بهبود خواص و رفتار مهندسی خاک انجام داده‌اند. بیشتر این مطالعات در خاک‌های رسی صورت گرفته است. در مهندسی ژئوتکنیک از این روش برای بهبود خواص مکانیکی خاک‌های رسی [4]، تحکیم خاک‌های رسی [5]، زه‌کشی و رسوب تعلیق‌های رقیق رسی [6]، و افزایش پایداری خاکریزها و شیب‌ها [4-5] استفاده شده است. بیشتر کاربردهای ژئوتکنیکی الکتروسیستیک بر مفهوم الکترواسمزی استوار است [4-6]. در مهندسی ژئوتکنیک زیست محیطی از این روش به عنوان یک روش کارآمد در رفع آلودگی خاک‌ها استفاده می‌شود. به گونه ای که از این روش در رفع آلودگی فلزات سنگین^۱ و رفع آلودگی‌های آلی و رادیواکتیو نیز استفاده می‌شود [6]. مطالعات جدیدی در زمینه بهبود مکانیکی و رفتاری خاک‌ها با استفاده از تأثیر همزمان روش الکتروسیستیک به همراه برخی از محلول‌های شیمیایی صورت گرفته است. در این حالت، فرایند الکتروسیستیک با قرار دادن الکترولیت‌ها در pH خاص و یا با تزریق مواد شیمیایی به درون محفظه الکترودها از جمله آند و کاتد، تقویت می‌شود که این فرایند شدت بخشی یا تزریق الکتروسیستیک نامیده می‌شود [7]. تزریق یون پتاسیم در خاک بستر یک بزرگراه به منظور اصلاح رفتار تورمی [8]، تثبیت خاک‌های نرم و افزایش مقاومت برشی به میزان ۵۶۰ درصد نسبت به خاک مبنای با تزریق اسیدفسفریک از کاتد [9] از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه است. در برخی مراجع، خاک‌های حاوی بیش از ۸ درصد و در برخی مراجع خاک‌های حاوی بیش از ۱۰ درصد کربنات به عنوان خاک‌های پرکربنات

تعریف شده‌اند [6]. علت این موضوع تأثیر قابل توجه این میزان کربنات بر رفتار مهندسی خاک است. کربنات‌ها به علت سازوکار ذکر شده، در عملکرد مثبت الکتروسیستیک ایجاد اختلال می‌کنند. با وجود پژوهش‌هایی که در زمینه تزریق الکتروسیستیک (شدت بخشی) صورت گرفته است [10]؛ اما به موضوع تأثیر محلول کلسیم کلرید بر کارایی سازوکارهای الکترولیز و الکترواسمزی در خاک‌های پر کربنات توجه کمتری شده است.

پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که عوامل مختلفی بر کارایی روش الکتروسیستیک در خاک‌های رسی تأثیرگذار است که یکی از مهمترین آن‌ها، کانی‌های موجود در خاک و اجزاء سازنده خاک است [10]. در خاک‌های رسی حاوی کربنات به علت ظرفیت بافرینگ خاک، جبهه اسیدی بطور کامل شکل نمی‌گیرد و به علت عدم وقع کامل الکترولیز و الکترواسمزی در خاک‌های پرکربنات توجه کمتری شده است. بر این اساس، هدف از این پژوهش تعیین امکان افزایش جریان الکترواسمزی در بکارگیری روش شدت بخشی با استفاده از محلول کلسیم کلرید در فرایند الکتروسیستیک خاک رسی پرکربنات است. از آنجا که این پژوهش بر فرایندهای موثر بر افزایش جریان الکترواسمزی تأکید دارد نتایج این پژوهش در پروژه‌های اجرایی الکتروسیستیک برای رفع آلودگی، تحکیم، و بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک‌های رسی کاربرد دارد.

۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش از یک نمونه خاک رسی طبیعی حاوی ۲۵ درصد کربنات استفاده شده است. نمونه خاک مورد نظر از دشت قزوین، جاده قزوین-بوئین‌زهره، اخذ شده است. ویژگی‌های ژئوتکنیکی و ژئوتکنیک زیست محیطی این خاک در جداول (۱ و ۲) آورده شده است.

جدول ۱. برخی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک رسی طبیعی.

Properties	Quantity measured
Soil classification	CL
LL (%)	49
PI (%)	24
W _{Opt} (%)	20
γ _{dmax} (g/cm ³)	1.96
G _s	2.6

Table 1. Some of the geotechnical properties of the natural clay.

1 Heavy Metals

ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استفاده از روش باریم کلرید اصلاح شده اندازه گیری شد [12]. اندازه گیری سطح مخصوص (SSA) با استفاده از روش اتیلن گلیکول مونو اتیل اتر (EGME) بر طبق روش بیان شده به وسیله التناوی و آرنولد (۱۹۷۳) تعیین شد [13]. درصد کربنات خاک با استفاده از روش تیتراسیون [14] و pH خاک به وسیله pH متر مدل (HANNA-Hi 9321) در نمونه های محلول ۱:۱۰ اندازه گیری و گزارش شده است. شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج طیف سنجی پاشندگی انرژی (EDX) نمونه رسی مورد مطالعه را نشان می دهد. بر اساس تصویر میکروسکوپ الکترونی، نمونه رسی از پراکندگی قابل توجهی برخوردار است. نتایج اخذ شده از آزمایش EDX نیز حاکی از غلظت قابل توجه یون سدیم در این نمونه دارد.

مشخصات فیزیکی شامل چگالی، دانه بندی، حدود اتربرگ، درصد مواد آلی، درصد رطوبت و آزمایش pH بر اساس استاندارد ASTM اندازه گیری شده است [11]. همه آزمایش های رفتاری روی بخشی از خاک که از الک نمبر ۲۰۰ عبور داده شده، انجام شده است. آزمایش های رفتاری بر اساس دستورالعمل انجام آزمایش های ژئوتکنیک زیست محیطی دانشگاه مک گیل کانادا صورت گرفته است (جدول ۲).

جدول (۲). برخی از مشخصات ژئوتکنیک زیست محیطی رس طبیعی.

Properties	Quantity measured
XRD Analysis	Illite, Kaolinite, Calcite, Montmorillonite, Quartz
CEC (cmol/Kg-Soil)	29.3
SSA (m ² /g)	110.9
Carbonate content (%)	25
Organic content (%)	1.96
pH (1:10, Soil:Water)	9.9

Table 2. Some of the geoenvironmental characteristics of the natural clay.

شکل ۱. تصویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج طیف سنجی پاشندگی انرژی (EDX) از خاک رسی طبیعی.

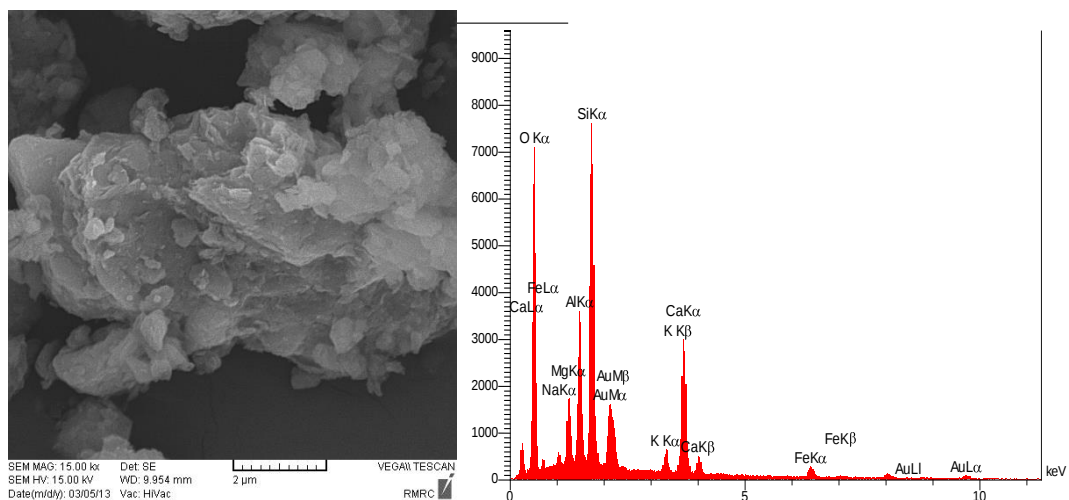


Fig. 1. SEM and EDX of the natural clay sample.

جدول ۳. آزمایش های الکتروسیستیک انجام شده در این پژوهش.

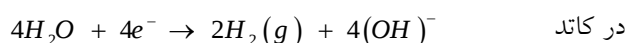
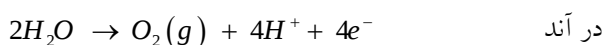
Experiment number	Electrokinetics time (h)	Voltage(v)	Wet density (g/cm ³)	The initial water content (%)	Cathode compartment solution	Anode compartment solution
1	240	15	1.7	20	Distilled water	Distilled water
2	240	15	1.7	20	Distilled water	0.2 M CaCl ₂
3	240	15	1.7	20	Distilled water	0.5 M CaCl ₂

Table 3. The electrokinetics experiments of this research.

نمونه‌ها به مدت یک دوره ۲۴۰ ساعته تحت آزمایش الکتروسیستیک با ولتاژ ثابت ۱۵ ولت قرار گرفتند. برای شدت بخشی فرایند الکتروسیستیک در مخزن آند به جای آب مقطر، از محلول کلسیم کلرید با غلظت‌های ۰/۲ و ۰/۵ مولار استفاده شد. الگوی کلی آزمایش‌های الکتروسیستیک صورت گرفته در این پژوهش در جدول (۳) بیان شده است. برای هر یک از آزمایش‌های الکتروسیستیک، مقادیر دبی الکترواسمزی و شدت جریان در فواصل زمانی مختلف اندازه‌گیری و گزارش شده است. همچنین پس از اتمام فرایند هر آزمایش الکتروسیستیک، نمونه خاک از سلول خارج و به ۵ مقطع عرضی تقسیم شد و درصد رطوبت و درصد کربنات هر یک از نمونه‌ها اندازه‌گیری و گزارش شده است. سپس نمونه‌ها پودر شده و از هر مقطع عرضی با نسبت ۱:۱۰ (خاک به آب مقطر) سوسپانسیون تهیه شد. سوسپانسیون حاصل به مدت ۳ تا ۴ روز، روزانه حداقل ۲ ساعت به وسیله لرزاننده الکتریکی هم زده شد. بعد از این مرحله، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت تا تعادل کامل و همگن شدن سیستم نگهداری شدند. در انتها مقادیر pH با دستگاه pH متر اندازه‌گیری و گزارش شد.

۳. بحث و بررسی

در روند آزمایش‌های الکتروسیستیک با برقراری جریان الکتریکی، الکترولیز آب در سلول‌های آند و کاتد آغاز می‌شود که منجر به واکنش‌های اکسیداسیون و احیا به صورت ذیل می‌شود [1]:



در روش الکتروسیستیک با تولید جبهه اسیدی و بازی به ترتیب در آند و کاتد و امکان حرکت آن‌ها در طول نمونه خاک، pH خاک دچار تغییر می‌شود. آزمایش‌های الکتروسیستیک در شرایط شدت بخشی نشده و شدت بخشی شده با محلول‌های ۰/۲ و ۰/۵ مولار کلسیم کلرید ($CaCl_2$) تحت اثر ولتاژ ثابت ۱۵ ولت و طبق الگوی جدول (۳) انجام گرفت. برای ارزیابی تأثیر شدت بخشی با کلرید کلسیم بر رفتار خاک، پس از اتمام آزمایش‌های الکتروسیستیک نمونه‌ها با چکش تراکم از سلول خارج و مقادیر درصد کربنات و pH در

شکل شماره (۲) دیاگرام شماتیک دستگاه آزمایش الکتروسیستیک استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. سلول اصلی دستگاه از جنس پلاستیک شفاف فشرده به شکل استوانه به قطر داخلی ۷۲ میلی‌متر و به طول ۱۴۵ میلی‌متر بوده است. این سلول در دو انتها به مخازن آند و کاتد متصل شده است. الکترودهایی سوراخ‌دار و از جنس گرافیت به دو انتهای سلول متصل و برای جلوگیری از خروج خاک از سلول، با کاغذ صافی مناسب پوشانده شده است. منبع تغذیه DC که تأمین‌کننده برق مستقیم دستگاه است دارای بیشینه ظرفیت ۱۰ آمپر و ۲۴۰ ولت بوده است. در این پژوهش با انتخاب یک اختلاف پتانسیل ۱۵ ولت در نمونه‌های آزمایشگاهی، جریان در نمونه ثبت شده و شرایط کلیه آزمایش‌ها یکسان انتخاب شد.

در آزمون‌های الکتروسیستیک نمونه خاک طبیعی از الک نمره ۱۰ عبور داده شده و در هوا خشک شد. سپس مقدار ۲۰ درصد وزنی خاک، آب مقطر به عنوان رطوبت اولیه به نمونه خاک طبیعی خشک شده اضافه شد. پس از ورز دادن و یکنواخت کردن نمونه، خمیر مورد نظر درون یک پلاستیک سربسته به مدت ۲۴ ساعت برای حصول تعادل، نگهداری شد. پس از این مرحله برای به دست آوردن نمونه همگن، خمیر فوق از الک نمره ۱۰ با ورز دادن عبور داده شد و سپس در ۵ لایه یکسان با دانسیته ثابت $1/7 \text{ g/cm}^3$ با چکش طراحی شده به ابعاد قطر داخلی سلول، در سلول جای داده شد. مقداری از خاک برای تعیین درصد رطوبت، pH و درصد کربنات کلسیم جداگانه تحت آزمایش قرار گرفت.

شکل ۲. تصویر شماتیک دستگاه آزمایشگاهی الکتروسیستیک [10]

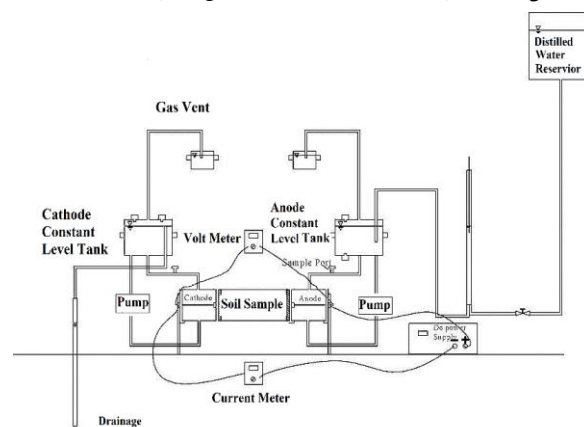


Fig. 2. The schematic picture of electrokinetics apparatus [10].

با توجه به زیاد بودن کربنات طبیعی خاک (۲۵٪) و تأثیر آن بر pH خاک، تغییرات درصد کربنات در انتهای آزمایش‌ها اندازه‌گیری و در شکل (۴) ارائه شده است. در آزمایش بدون شدت بخشی و در فاصله ۰/۱ نرمال شده از آند، کربنات خاک نسبت به خاک طبیعی ۲۰ درصد کاهش یافته است. در نمونه‌های شدت بخشی شده با محلول‌های ۰/۲ مولار و ۰/۵ مولار، در همین فاصله مقدار کاهش به ترتیب برابر با ۱۶ و ۱۲ درصد بوده است. احتمالاً علت این کاهش، انحلال کربنات در جبهه اسیدی بوده است؛ اما به تدریج با حرکت به سمت کاتد میزان کربنات نسبت به درصد کربنات خاک طبیعی افزایش داشته است. این میزان افزایش در نمونه با ۰/۵ مولار کلسیم کلرید در مخزن آند، حدود ۱۴ درصد در فاصله ۰/۹ نرمال شده از آند است. اما در نمونه بدون شدت بخشی میزان کربنات در همان نقطه حدود ۴ درصد افزایش دارد. با توجه به بیشتر بودن pH محلول کلسیم کلرید (حدود ۸) نسبت به آب مقطر (حدود ۶/۷) و در نتیجه کاهش قدرت جبهه اسیدی، میزان انحلال کربنات متوقف شده است. به نظر می‌رسد افزایش میزان کربنات در نزدیکی کاتد ناشی از تشکیل دوباره کربنات به صورت هیدروکسیدی در شرایط قلیایی و انتقال کربنات‌های حل شده در محدوده آند در طول نمونه و رسوب آن در pH های بازی بوده است [16]. بر اساس نتایج شکل (۴)، حداقل کربنات در هیچ یک از نمونه‌ها کمتر از ۲۰ درصد نبوده است که میزان افزایش pH (شکل ۳) و عدم پیشروندگی جبهه اسیدی را توجیه می‌کند.

از سوی دیگر به منظور بررسی تأثیر محلول کلسیم کلرید بر دبی جریان الکترواسمزی، میزان دبی خروجی از مخزن کاتد در طول مدت انجام آزمایش به وسیله استوانه مدرجی که مطابق شکل (۱) در زیر مخزن کاتد قرار گرفته، جمع‌آوری و اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (۵) آورده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل (۵)، شدت بخشی نمونه با محلول ۰/۲ نرمال و ۰/۵ نرمال کلسیم کلرید به ترتیب سبب افزایش قابل توجهی در دبی الکترواسمزی شده است. همچنین نمودارهای ارائه شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که میزان دبی در زمان‌های اولیه از شروع فرآیند الکترواسمزی

قطعات مختلف نمونه‌ها تعیین شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های (۳ و ۴) ارائه شده است.

شکل (۳) تغییرات pH در طول نمونه‌های خاک پس از انجام آزمایش الکترواسمزی را نشان می‌دهد. مقادیر pH خاک در نمونه بدون شدت بخشی از حدود ۷ در مجاورت آند تا حدود ۱۰ در مجاورت کاتد تغییر داشته است. این تغییرات برای آزمایش شدت بخشی شده با ۰/۲ مولار محلول کلسیم کلرید از حدود ۷/۵ تا ۱۰/۴ و برای آزمایش شدت بخشی شده با ۰/۵ مولار محلول کلسیم کلرید از ۸ تا ۱۱ بوده است. بر اساس نتایج آزمایش شدت بخشی نشده؛ اگر چه pH تا فاصله ۰/۷ نرمال شده از آند، نسبت به خاک طبیعی (قبل از آزمایش الکترواسمزی) کاهش داشته است (۹/۹ = pH خاکی طبیعی)؛ اما pH در محدوده قلیایی بوده است. در واقع حضور کربنات کلسیم در خاک سبب افزایش ظرفیت بافرینگ خاک و ممانعت از گسترش جبهه اسیدی شده است. با توجه به شکل (۳) بعد از اضافه کردن محلول کلسیم کلرید (CaCl_2) در مخزن آند و افزایش غلظت آن، مقادیر pH خاک افزایش بیشتری داشته است. علت این امر را می‌توان به کاهش واکنش‌های هیدرولیز و ضعیف بودن جبهه اسیدی به ویژه در نمونه‌های شدت بخشی شده با مقادیر زیاد کلسیم کلرید نسبت داد [15]. همچنین این موضوع حاکی از یک رابطه مستقیم میان افزایش غلظت محلول شدت بخشی کلسیم کلرید و میزان pH خاک است.

شکل ۳. تغییرات pH خاک در طول نمونه‌ها در انتهای آزمایش‌های الکترواسمزی.

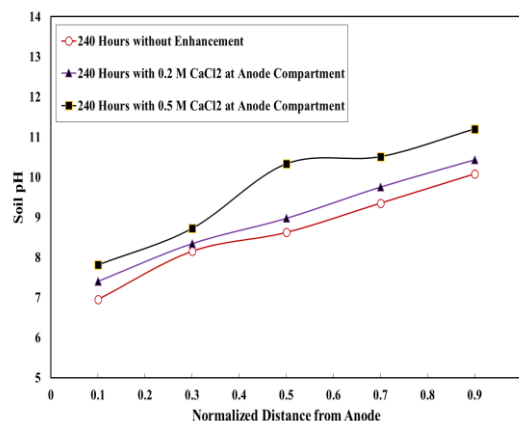


Fig. 3. pH variations of soil sample along the cell at the end of electrokinetics experiments.

آند به سمت کاتد شده است. همچنین با وجود مهاجرت الکترونی، در نمونه های شدت بخشی شده با کلسیم کلرید که منجر به حرکت یون کلسیم از سمت آند به سمت کاتد می-شوند، جابه جایی آب حفره ای از سمت آند به سمت کاتد و به دنبال آن خروج آب از مخزن کاتد به استوانه مدرجی که در زیر مخازن تراز ثابت قرار گرفته اند، اتفاق افتاده است. این الگوی انتقال، با الگوی درصد رطوبت آزمایش های الکتروسیستیک کاساگراند هماهنگی دارد [3]. فرایند فوق از منظر ژئوتکنیک زیست محیطی سبب امکان انتقال سیال حفره ای حاوی آلاینده به سمت مخزن کاتد می شود. از منظر ژئوتکنیکی نیز این فرایند منجر به افزایش تنش موثر در سمت کاتد شده (البته این افزایش در نمونه های شدت بخشی شده بیشتر است) که آن نیز به نوبه خود منجر به افزایش دانسیته (تحکیم) می-شود. علت این موضوع را می توان به خروج دبی الکترواسمزی از کاتد و متعاقب آن افزایش تنش موثر و نیز به تمرکز کاتیون های منتقل شده در نمونه و جمع شده در محدوده کاتد که سبب تحکیم اسمزی می شود، نسبت داد.

شکل ۵. تغییرات دبی الکترواسمزی در آزمایش های الکتروسیستیک.

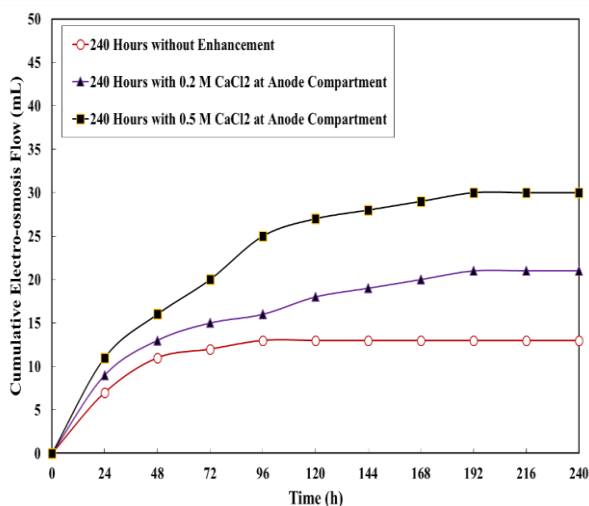


Fig. 5. Electro-osmosis discharge variations in electrokinetics experiments.

همچنین به منظور مطالعه تأثیر غلظت های مختلف محلول کلسیم کلرید بر تغییرات مقاومت الکتریکی خاک، شدت جریان الکتریکی نمونه ها در طول آزمایش الکتروسیستیک با مولتی متر اندازه گیری شد (شکل ۶). با افزایش مدت آزمایش، شدت جریان در ابتدا به صورت تابع هموگرافیک روند

تقریباً برای همه نمونه ها تا زمانی در حدود ۴۸ ساعت با شیب نسبتاً زیادی افزایش داشته است؛ به طوری که در نمونه های شدت بخشی شده با ۰/۲ و ۰/۵ مولار کلسیم کلرید به ترتیب حدود ۶۲ و ۵۴ درصد از کل دبی الکترواسمزی در ۴۸ ساعت اولیه شروع فرایند از نمونه خارج شده اما در نمونه بدون شدت بخشی این میزان ۸۴ درصد بوده است. شیب این تغییرات تا زمان ۱۹۲ ساعت ملایم شده و میزان دبی به مقدار ثابتی رسیده است. بر اساس نتایج پژوهش های قبلی [3] خروج بیشتر سیال حفره ای سبب افزایش تنش موثر و وقوع تحکیم اسمزی می-شود. نتایج ارائه شده در شکل (۵) نیز نشان می دهد که نمونه های با شدت بخشی با محلول ۰/۵ نرمال کلسیم کلرید، دبی الکترواسمزی بیشتری داشته اند. مشاهده نمونه های خارج شده از سلول های آزمایش الکتروسیستیک نیز حاکی از آن بود که نمونه های خارج شده از سلول های تحت شدت بخشی، به ویژه در ناحیه مجاورت کاتد، از دانسیته بیشتری برخوردار بوده اند.

شکل ۴. تغییرات درصد کربنات در طول نمونه ها در انتهای آزمایش های الکتروسیستیک.

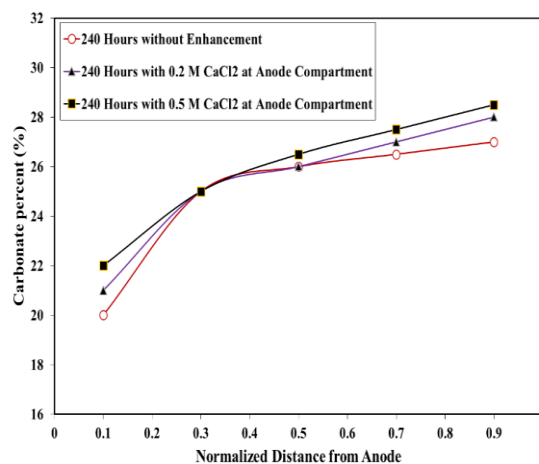


Fig. 4. Carbonate percentage variations of soil samples along the cell at the end of electrokinetics experiments.

با توجه به اینکه pH اولیه نمونه خاک طبیعی حاوی ۲۵ درصد کلسیم کربنات برابر ۹/۹ است و از pH مانند نقطه بار صفر (ZPC) که تقریباً برابر ۱/۸ اندازه گیری شد، بسیار بزرگتر است در نتیجه جریان الکترواسمزی مستقیم در نمونه حکم فرما است. این جریان الکترواسمزی سبب حرکت آب از

به صورت کربنات کلسیم، شدت جریان کاهش یافته و شیب کاهشی شدت جریان تا کاهش میزان یون‌های موجود در خاک ادامه داشته و سپس تقریباً به ثبات رسیده است. با توجه به شکل (۵) این ثبات در میزان جریان الکتریکی برای نمونه بدون شدت بخشی در مدتی نزدیک به ۱۴۴ ساعت پس از شروع آزمایش، برای نمونه با ۰/۵ مولار و در نمونه ۰/۲ مولار در ۱۹۲ ساعت پس از شروع آزمایش صورت گرفته و تقریباً در همه نمونه‌ها یکسان و به حدود ۱۰ میلی‌آمپر رسیده است. تغییر رفتار در ویژگی‌های ریزساختاری خاک اصولاً بر تغییر ویژگی‌های در مقیاس درشت ساختاری خاک اثر مستقیم می‌گذارد [20-21].

شکل ۶. تغییرات شدت جریان الکتریکی در آزمایش‌های الکتروسینتیک

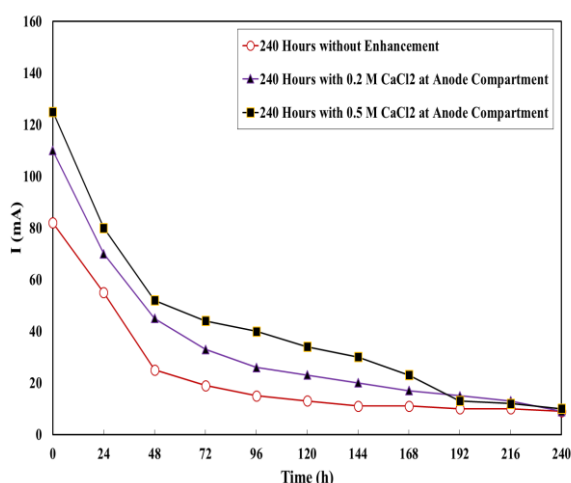


Fig. 6. Variations of electrical current intensity in electrokinetics experiments.

۴. نتیجه‌گیری

- در خاک رسی طبیعی پرکربنات، به علت وجود مقادیر زیاد کربنات کلسیم که به عنوان عامل موثری در تغییرات pH خاک در طول فرایند الکتروسینتیک محسوب می‌شود، در آزمایش بدون شدت بخشی عدم پیشروندگی جبهه اسیدی مشاهده می‌شود. همین موضوع سبب شده است که در نمونه بدون شدت بخشی، فرایند الکتروسینتیک عملکرد مناسبی نداشته است.

نزولی بسیار قابل توجهی داشته است. لیکن با افزایش زمان، نرخ تغییرات آن کاهش یافته است. از عوامل مؤثر بر کاهش شدت جریان الکتریکی در طول آزمایش، تولید یون هیدروکسیل (OH^-) در کاتد است [17]. از دیگر دلایل افت شدت جریان الکتریکی می‌توان به ختشی نشدن دو جبهه اسیدی و بازی تولید شده در حین فرایند الکتروسینتیک، پوشیده شدن سطح الکترودها به وسیله حباب‌های هوا در اثر واکنش‌های الکترولیز و ناخالصی‌ها و نمک‌های غیر قابل حلی که مانند عایقی سطح کاتد را پوشانده و سبب کاهش جریان الکتریکی می‌شوند، اشاره کرد [18]. به دلیل زیاد بودن درصد کربنات، جبهه بازی در طول زمان می‌تواند جبهه اسیدی را ختشی کند و میزان شدت جریان به عدد تقریباً ثابتی می‌رسد. همان‌گونه که مشهود است، در آزمایش بدون شدت بخشی (وجود آب مقطر در آند) بیشینه شدت جریان الکتریکی حدود ۸۲ میلی‌آمپر است که این میزان در آزمایش با محلول ۰/۵ مولار کلسیم کلرید در مخزن آند حدود ۱۳۵ میلی‌آمپر بوده که حدود ۶۵ درصد افزایش داشته است. به طور کلی محلول استفاده شده در آزمایش تحت جریان الکتریسیته، الکترولیز شده و سبب شده تا غلظت مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها در خاک افزایش یابد. این افزایش یون‌ها باعث بیشتر شدن عبور جریان تحت اثر ولتاژ ثابت و در نتیجه بهبود این فرایند شده است.

به نظر می‌رسد استفاده از محلول کلسیم کلرید به جای آب مقطر در مخزن آند و همچنین محلول با غلظت بیشتر باعث افزایش مقدار این یون‌ها و در نتیجه افزایش شدت جریان شده که مؤید این نکته است. در واقع محلول کلسیم کلرید میزان مقاومت الکتریکی نمونه را کاهش داده است. این موضوع سبب افزایش دبی الکترواسمزی به علت افزایش انتقال یونی در نمونه‌های شدت بخشی شده با کلسیم کلرید شده است. افزایش دبی الکترواسمزی در خاک‌های آلوده سبب انتقال آلاینده محلول به سمت کاتد و از منظر ژئوتکنیکی می‌تواند سبب افزایش تحکیم اسمزی در مجاورت کاتد شود [19]. ضمن آنکه به نظر می‌رسد با جذب کاتیون‌های کلسیم توسط کانی‌های رسی و نیز رسوب بخشی از یون‌های کلسیم

2. Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R.E., Puppala, S., Bricka, M. and Parker, R., (1995), "Electrokinetic remediation: basics and technology status," *Journal of Hazardous Materials*, **40** (2), pp. 117-137.
3. Casagrande, I.L., (1949), "Electro-osmosis in soils," *Geotechnique*, **1** (3), pp. 159-177.
4. Lima, A.T., A. Hofmann, D. Reynolds, C.J. Ptacek, P. Van Cappellen, L.M. Ottosen, and S. Pamukcu, (2017), "Environmental Electrokinetics for a Sustainable Subsurface," *Chemosphere*, **181**, pp. 122-133.
5. Bjerrum, L., Moun, J. and Eide, O., (1967), "Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay," *Geotechnique*, **17** (3), pp. 214-235.
6. Ouhadi, V.R., Amiri, M., A.R. Goodarzi, (2012), "The Special Potential of Nano-Clays for Heavy Metal Contaminant Retention in Geo-Environmental Projects," *Journal of Civil and Surveying Engineering*, **45**, Issue: 6, pp. 631-642.
7. Zhou, D.M., Deng, C.F. and Cang, L., (2004), "Electrokinetic remediation of a Cu contaminated red soil by conditioning catholyte pH with different enhancing chemical reagents," *Chemosphere*, **56** (3), pp. 265-273.
8. O'Bannon, C.E., Morris, G.R. and Mancini, F.P., (1976), "Electrochemical hardening of expansive clays," *Transportation Research Record*, (593).
9. Alshawabkeh, A.N., Sheahan, T.C. and Wu, X., (2004), "Coupling of electrochemical and mechanical processes in soils under DC fields," *Mechanics of Materials*, **36** (5-6), pp. 453-465.
10. Ouhadi, V.R., Bahadori Nezhad, O.R., Amiri, M., (2014), "Lead Retention of Carbonated Kaolinite in the Adsorption and Electrokinetics Processes," *Modares Civil Engineering Journal*, Issue 14, No. 3, pp. 3-17.
11. American Society for Testing and Materials, ASTM, (2002), "Annual book of ASTM standard", Philadelphia, New York, **4**, 08.
12. Hendershot, W.H. and Duquette, M., (1986), "A Simple Barium Chloride Method for Determining Cation Exchange Capacity and Exchangeable Cations," *Soil Science Society of America Journal*, **50** (3), pp. 605-608.
13. Eltantawy, I.M. and Arnold, P.W., (1973), "Reappraisal of Ethylene Glycol Mono-Ethyl Ether (EGME) Method for Surface Area Estimations of Clays," *European Journal of Soil Science*, **24** (2), pp. 232-238.
14. Ouhadi, V.R., Yong, R.N., Rafiee, F., and Goodarzi, A.R., "Impact of carbonate and heavy metals on micro-structural variations of clayey soils", *Applied Clay Science*, **52**, pp. 228-234, (2011).
15. Rosestolato, D., Bagatin, R. and Ferro, S., (2015), "Electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals (mercury in particular)," *Chemical Engineering Journal*, **264**, pp. 16-23.
16. Annamalai, S., Santhanam, M., Sundaram, M. and Curras, M.P., (2014), "Electrokinetic remediation of

• استفاده از محلول شدت بخشی کلسیم کلرید منجر به افزایش شدت جریان الکتریکی در زمان‌های اولیه آزمایش شده است. دلیل این امر الکترولیز محلول موجود در مخازن آند تحت جریان الکتریسیته است که باعث افزایش غلظت مجموع کاتیون‌ها و آنیون‌ها در فاز محلول خاک نسبت به نمونه بدون شدت بخشی می‌شود. این افزایش یون‌ها با تقویت سازوکار الکترونی و الکترواسمزی باعث عبور جریان الکتریکی بیشتری تحت اثر ولتاژ ثابت شده و در نتیجه کارایی این فرایند افزایش یافته است.

• تغییرات دبی الکترواسمزی در آزمون‌های شدت بخشی نشده و شدت بخشی شده نشان می‌دهد که وجود کرنات کلسیم مانع از سازوکار الکترواسمزی نشده است. لیکن شدت بخشی با کلسیم کلرید، سازوکار الکترواسمزی را به میزان بسیار مطلوبی بهبود داده است به گونه‌ای که شدت بخشی با محلول ۰/۲ نرمال و ۰/۵ نرمال کلسیم کلرید به ترتیب سبب افزایش قابل توجهی در دبی الکترواسمزی شده است. این بهبود عملکرد در حضور کلسیم کلرید را می‌توان به انتقال کاتیونی ناشی از حضور یون کلسیم نسبت داد. این فرایند می‌تواند سبب افزایش تحکیم اسمزی در مجاورت کاتد شود.

• به نظر می‌رسد در نمونه‌های شدت بخشی شده با کلسیم کلرید، به دلیل انتقال یون کلسیم در نمونه و تبادل کاتیونی آن با کاتیون‌های یک ظرفیتی لایه دوگانه، و متعاقب آن با کاهش ضخامت لایه دوگانه رسی، در افزایش دبی الکترواسمزی تسهیل شده است.

۵. سپاسگزاری و مشارکت نویسندگان

مؤلفین از حوزه پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا برای تأمین هزینه این پژوهش تشکر می‌کنند. در انجام این پژوهش همکاری نفر سوم، آقای مهندس امیدرضا بهادری‌نژاد، محدود به کمک در راه‌اندازی دستگاه الکترواسمزی بوده است.

References

۶. مراجع

1. Acar, Y.B. and Alshawabkeh, A.N., (1993), "Principles of electrokinetic remediation," *Environmental Science & Technology*, **27** (13), pp. 2638-2647.

- Paterson, AB Fourie & D Reid (eds), *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 259-274.
20. Ouhadi V.R., Goodarzi A.R., (2003), Pore fluid characteristics effect on the dispersivity behaviour of soils from macro and micro structure aspects, *Proc. of the 2nd International Symposium on Contaminated Sediments*, pp. 200-206.
21. Ouhadi V.R., Amiri M., (2014), Interaction of nano-clays and Cu contaminant in geo-environmental projects, *Journal of Environmental Science and Technology*, **16**, pp. 75-87.
- inorganic and organic pollutants in textile effluent contaminated agricultural soil," *Chemosphere*, **117**, pp. 673-678.
17. Lee, H.H. and Yang, J.W., (2000), "A new method to control electrolytes pH by circulation system in electrokinetic soil remediation," *Journal of Hazardous Materials*, **77** (1-3), pp. 227-240.
18. Sah, J.G. and Chen, J.Y., (1998), "Study of the electrokinetic process on Cd and Pb spiked soils," *Journal of Hazardous Materials*, **58** (1-3), pp. 301-315.
19. Kalumba, D. & Mudenge, S.T. (2019), "Review of the potential role of electrokinetics technology in tailings dewatering and minerals recovery, in AJC

Impact of Enhancement with Calcium Chloride Solution on the Electrolysis and Electro-Osmosis Mechanisms of Clayey Solis in Electrokinetics Process

Vahid Reza Ouhadi ^{1*}, Arman Mohamadi², Omid Reza Bahadorinezhad²

1* Faculty of Civil Eng., Bu-Ali Sina University, Iran; Adjunct Prof., University of Tehran, School of Civil Eng.

2 Master Students, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Iran.

*vahidouhadi@yahoo.ca

Abstracts

Electrokinetics is known as a common method for improvement of soil engineering properties and contaminant removal from soils. In carbonated soils due to the soil buffering capacity, the acid front does not form through the soil sample. Therefore, the soil remediation or improvement usually caused by hydrogen ion effect will not occur. Consequently, a reduction in electrokinetics efficiency happens. One of the methods to overcome this problem is the application of enhancement methods. The main objective of this paper is to increase the electro-osmosis flow of a carbonated clayey soil in electrokinetics by application of calcium chloride solution as an enhancement material. For this purpose, an un-enhancement and enhanced electrokinetics process with 0.2, and 0.5 molar concentrations of calcium chloride has been applied on carbonated natural clay samples. The calcium chloride solutions were added to anode reservoir. The achieved results of this paper indicate that due to the noticeable percentages of carbonate calcium in soil sample, not only the pH of soil in electrokinetics process has not decrease, but also because of alkaline condition of soil sample due to the presence of calcium carbonate and calcium chloride solution, the pH of soil has increased. Furthermore, in enhancement electrokinetics with calcium chloride, the presence of calcium ions and an increase in electro migration process have caused an increase in efficiency of electro osmosis. For this reason, the volumetric flow rate of enhanced electrokinetics experiments with 0.5 molar calcium chloride has noticeably increased in comparison with that of for un-enhanced experiments.

Keywords: Electro osmosis, Electrolysis, Electrokinetics, Enhancement, Carbonated Clay.