

ارزیابی افزایش مقاومت مکانیکی خاک‌های ریزدانه در اثر وارد کردن یون کلسیم با استفاده از روش الکترو سینتیک

محمدهادی داودی^{۱*}، امین کدیور^۲

دریافت مقاله: ۹۰/۹/۲۶ پذیرش مقاله: ۹۰/۱۲/۳

چکیده

بسیاری از خاک‌های ریزدانه در حالت اشباع فاقد ظرفیت باربری و مقاومت مکانیکی لازم هستند و لذا تقویت آنها از طریق مواد افزودنی اجتناب ناپذیر است. این فرآیند چنانچه از طریق وارد کردن یون کلسیم انجام شود به کندی صورت می‌گیرد و لذا تسریع آن حائز اهمیت است. در این مقاله امکان استفاده از روش الکترو سینتیک در وارد کردن یون مقاوم‌ساز کلسیم به خاک ریزدانه به منظور افزایش مقاومت مکانیکی آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌های خاک با شرایط یکسان آماده شده و به مدت زمان مشابه تحت جریان محلول کلرید کلسیم ۰/۶۶ نرمال و جریان برق مستقیم (DC) با ولتاژهای مختلف قرار گرفته‌اند. سپس یک سری آزمایش‌های مکانیکی و شیمیایی روی نمونه‌های خاک و محلول‌های ورودی و خروجی به عمل آمده و در نهایت به کمک آزمایش برش مستقیم پارامترهای مقاومتی خاک قبل و بعد از اصلاح اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده بیانگر تأثیر فوق‌العاده این روش در بالا بردن جذب کلسیم خاک و افزایش مقاومت مکانیکی آن است، به گونه‌ای که با وارد کردن محلول به درون خلل و فرج خاک (V_v)، در مقایسه با نمونه شاهد، پارامتر چسبندگی ۲۲۰٪ و زاویه اصطکاک داخلی ۹۲٪، تحت ولتاژ ۳۰ ولت افزایش یافته است. این افزایش در پارامترهای مقاومتی با عبور دادن محلول به حجمی معادل یک برابر حجم خلل و فرج خاک (V_v) حاصل شده است که طی آن، درصد وزنی کلرید کلسیم اضافه شده نسبت به وزن خاک خشک ۰/۹٪ بوده است.

کلید واژه‌ها: مقاومت مکانیکی، خاک ریزدانه، کلرید کلسیم، الکترو سینتیک، اصلاح خاک

۱- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

۲- کارشناس ارشد خاک و پی

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

کربناتاسیون است. این واکنش زمانی رخ می‌دهد که میزان آهک اضافه شده به خاک زیاد بوده و یا خاک، رس کافی برای در اختیار گذاشتن آهک نداشته باشد. بدین ترتیب آهک اضافی با CO_2 هوا واکنش انجام داده و تشکیل $CaCO_3$ می‌دهد (Canadian Foundation Eng. Manual, 1992). دیگر واکنش مضر آهک تشکیل کانی اترینگات است که سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت خاک می‌شود. این واکنش زمانی رخ می‌دهد که آهک با کانی‌های رسی و سولفات موجود در خاک ترکیب شده و یا خاک، در معرض آب سولفات قرار بگیرد (Sherwood, 1993). از این رو استفاده از کلرید کلسیم می‌تواند به عنوان یک گزینه جدید مورد بررسی قرار گیرد زیرا اولاً حلالیت آن بسیار زیاد است (۷۴ گرم در صد گرم آب)، و ثانیاً برخلاف برخی نمک‌های دیگر کلسیم فاقد اثرات زیان بار زیست محیطی است.

به‌طور کلی و صرف نظر از نحوه تهیه محلول حاوی یون کلسیم، یک فاکتور محدود کننده در استفاده از این تکنیک به منظور تقویت خاک وجود دارد که عبارت از نفوذپذیری بسیار کم خاک‌های ریزدانه است. معمولاً خاک‌های ریزدانه نفوذپذیری کمتر از 10^{-5} سانتی‌متر بر ثانیه دارند و همین امر موجب می‌شود که عبور دادن حجم مورد نیاز محلول اشباع آهک و یا محلول کلرید کلسیم از خاک، مدت بسیار زیادی طول بکشد. به‌طور مثال برای عبور دادن ۱۶۹ CC محلول اشباع آهک از یک نمونه خاک سیلتی به حجم ۱۹۲ CC تحت گرادیان هیدرولیکی واحد، ۲۸ ساعت زمان لازم است (رستمی، ۱۳۸۹). و برای عبور دادن ۲۵۰ هزار مترمکعب محلول اشباع آهک که حاوی ۱۵۳۰ تن آهک است، از یک توده لغزشی به حجم ۲۵۵ هزار مترمکعب تحت گرادیان هیدرولیکی برابر با شیب توده و مساوی ۳۰٪، مدت ۶۰۳ روز نیاز می‌باشد (احدی عالی، ۱۳۸۶). از این رو استفاده از یک تکنیک کمک کننده برای تسریع در عبور دادن محلول حاوی یون کلسیم مورد نیاز ضروری است.

بنابر نتایج (Mitchell (1993 کوپل بین گرادیان‌های الکتریکی، شیمیایی و هیدرولیکی موجب بروز پدیده‌های مختلف

افزایش مقاومت مکانیکی خاک ریزدانه برای نیل به اهداف مختلف طرح‌ها انجام می‌شود. بدین منظور از دیرباز یون کلسیم به‌عنوان یک یون مقاوم‌ساز استفاده می‌شده که منبع تأمین آن عمدتاً آهک بوده و به حالت پودر و یا دوغاب غلیظ آهک به خاک اضافه شده است. روند اصلاح خاک با آهک از طریق واکنش‌های شیمیایی سیمان‌تاسیون و تعویض کاتیونی می‌باشد (Canadian Foundation Eng. Manual, 1992). بر اساس گزارش‌های ارائه شده توسط داودی و همکاران (۱۳۸۷) و احدی عالی (۱۳۸۶) استفاده از محلول اشباع آهک، به علت این‌که یون کلسیم را به‌صورت آزاد در اختیار خاک قرار می‌دهد، به عنوان روش جدیدتر و مؤثرتری شناخته شده است. بر اساس گزارش الوندکوهی (۱۳۸۵) با افزودن ۰/۵٪ آهک به وزن خاک رسی CL، شاخص خمیری آن ۱۴٪ کاهش و چسبندگی آن ۳۰۰٪ و زاویه اصطکاک داخلی آن ۲۲۰٪ افزایش می‌یابد. وی روابط ۱ و ۲ را برای خاک مورد آزمایش ارائه داد:

$$C = 31 + 0.78V_v \quad (1)$$

$$\phi = 5.3 + 0.23V_v \quad (2)$$

رستمی (۱۳۸۹) گزارش داد برای یک خاک سیلتی (ML) با عبور دادن محلول اشباع آهک و به مقدار ۴۳ برابر حجم خلل و فرج (V_v) در یک نمونه ۲۰۰ سانتی‌متر مکعبی خاک، مقاومت فشاری تک محوری آن ۴۳٪ افزایش می‌یابد و دو رابطه زیر به ترتیب برای حجم محلول عبوری کمتر از $20V_v$ و بیشتر از $20V_v$ به شرح زیر ارائه داد که در آنها q_u (مقاومت فشاری تک محوری) بر حسب kPa است:

$$q_u = 41.4 + 0.95V_v \quad (3)$$

$$q_u = -4.2 + 2.98V_v \quad (4)$$

اما استفاده از آهک دو نقص عمده دارد، یکی انحلال‌پذیری بسیار کم آهک و معادل ۰/۱۳۷ گرم در صد گرم آب (شاه‌نظری، ۱۳۷۶) است که سبب می‌شود محلول حاصل غنی از کلسیم نباشد و دیگری واکنش‌های مضر احتمالی که می‌تواند در خاک رخ دهد. مهمترین این واکنش‌ها

نمک‌ها، الکترولیز، هیدرولیز، اکسایش، کاهش، جذب فیزیکی و شیمیایی و ایجاد تغییر در ساختار و بافت خاک. به‌علت این تأثیرات و عکس‌العمل‌های پیچیده ناشی از آن، تغییرات مداومی در ویژگی‌ها و خصوصیات خاک رخ می‌دهد که با تئوری‌های گفته شده در مورد الکترواسمزی قابل توجیه نیستند. برخی از این تغییرات از قبیل سخت شدن الکتروشیمیایی و تغییر در پلاستیسیته، مفید هستند اما بعضی دیگر مثل گرم شدن و یا تولید گاز موجب خراب کردن تأثیر الکترواسمزی می‌شود (Mitchell, 1993). این تأثیرات به آثار الکتروشیمیایی ناشی از الکترواسمزی معروفند.

طبق تحقیقات Yu Ou et al. (2009) مشخص شده است که برای بهبود راندمان الکترواسمزی در تحکیم خاک، تزریق محلول نمک‌هایی با کاتیون چند ظرفیتی مثل کلسیم، بسیار مؤثر است. به عنوان مثال با استفاده از محلول کلرید کلسیم، در حدود ۱۷۲٪ قابلیت تراوایی الکترواسمزی افزایش یافته که این امر موجب افزایش آب زهکشی شده از کاتد و به دنبال آن بالا رفتن مقاومت زهکشی نشده خاک می‌گردد.

در این تحقیق سعی بر آن است که امکان استفاده از تکنیک الکتروسیستیک برای وارد کردن سریع‌تر محلول حاوی یون کلسیم که از انحلال کلرید کلسیم در آب به‌دست آمده، به خاک و اثر آن بر افزایش مقاومت مکانیکی خاک ارزیابی شود.

۲. مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده از نوع لای با پلاستیسیته پایین (ML) با حد روانی ۲۲٪، فاقد حد خمیری، رطوبت بهینه ۱۵/۶٪ و حداکثر وزن مخصوص خشک $16/62 \text{ kN/m}^3$ می‌باشد. خاک مورد مطالعه شامل ۱۴٪ ذرات هم‌اندازه رس، ۷۲٪ لای و ۱۴٪ ماسه است.

کلرید کلسیم استفاده شده به‌صورت دانه‌ای، سفیدرنگ، با ابعاد دانه ۲ الی ۶ میلی‌متر و در بسته‌های ۱ کیلوگرمی است. وزن مخصوص کلرید کلسیم $21/1 \text{ kN/m}^3$ ، جرم مولی آن $110/98 \text{ g/mol}$ و حلالیت آن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد ۷۴۰ گرم در یک لیتر آب می‌باشد.

الکتروسیستیک در خاک می‌گردد. در مهندسی ژئوتکنیک، این واژه به مفهوم اعمال یک جریان الکتریکی مستقیم (DC) با شدت کم به یک جفت الکتروود مثبت و منفی مستقر در خاک است. بر اساس نوع ذره‌ای که در میدان الکتریکی حاصل از این جریان به حرکت در می‌آید، می‌توان انواع مختلف پدیده‌های الکتروسیستیک را از هم تفکیک نمود. یکی از این پدیده‌ها الکترواسمزی است که به حرکت مولکول‌های یک سیال، عمدتاً آب، تحت اثر پتانسیل الکتریکی گفته می‌شود. پدیده دیگر الکتروفورز می‌باشد که به حرکت یونها تحت اثر میدان الکتریکی اطلاق می‌گردد. الکترواسمزی کاربرد زیادی در روش‌های بهسازی خاک داشته، از جمله تصفیه و پاکسازی خاک از فلزات سنگین، تحکیم خاک و خارج سازی آب از خاک‌های لایروبی شده و تزریق دوغاب به خاک‌هایی با نفوذپذیری پایین (Fang, 2004). در یک فرآیند الکترواسمزی، با توجه به وجود آب منفذی و قطبی بودن مولکول‌های آب، کاتیون‌های موجود در آب منفذی خاک، به مولکول‌های آب چسبیده و تحت اثر میدان الکتریکی از قطب مثبت (آند) به قطب منفی (کاتد) کشیده می‌شوند. ضریب نفوذپذیری الکترواسمزی مستقل از اندازه و توزیع خلل و فرج خاک است، لذا در خاک‌های ریزدانه تحت گرادیان‌های برابر، پتانسیل‌های الکتریکی موجب بروز جریان‌های با توان بزرگ‌تری نسبت به پتانسیل‌های هیدرولیکی می‌شود. پس می‌توان جریان ناشی از الکترواسمزی را به عنوان یک مکانیزم مؤثر برای حرکت دادن آب و سیالات در خاک ریزدانه اشباع با ضریب نفوذپذیری اندک در نظر گرفت. از عوامل مؤثر بر جریان الکترواسمزی می‌توان به پتانسیل الکتریکی، هیدراسیون یونها، لزجت و ثابت دی‌الکتریک سیال منفذی، pH سیستم و گرادیان pH، ظرفیت تعویض کاتیون خاک و هدایت الکتریکی سطحی اشاره کرد (Fang, 2004).

هنگامی که یک جریان الکتریکی مستقیم (DC) به خاک مرطوب اعمال می‌شود، ممکن است آثار زیر را به دنبال داشته باشد: پخش یونی، تعویض کاتیون (تبادل کاتیون)، پیدایش گرادیان pH و اسمزی، خشک شدن کامل خاک به‌وسیله گرمای تولید شده در الکتروودها، جداسازی کانی‌ها، ته‌نشینی

برای جلوگیری از پدیده بالازدگی خاک در حین عبور محلول، سرباری معادل ۱ کیلوپاسکال روی سطح نمونه قرار داده شد.

آزمایش با اشباع کردن خاک با محلول تحت گرادیان هیدرولیکی و با شیب ۱۰٪ در طول نمونه‌ها شروع شد. محلول از بالادست وارد خاک شده و به تدریج با گذشت زمان به مخزن خروجی می‌رسید و به‌طور مداوم حجم محلول‌های ورودی و خروجی در زمان‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شد. این مرحله تا زمانی که حجم جریان ورودی و خروجی برابر شود، ادامه یافت. محلول استفاده شده، شامل ۰/۶۶ نرمال کلرید کلسیم است.

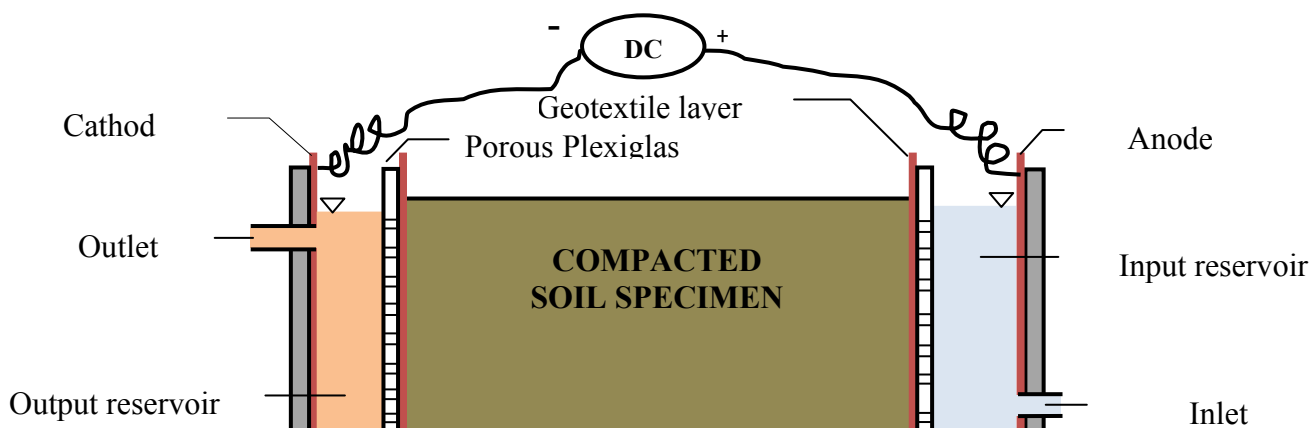
پس از اشباع شدن نمونه‌ها، جریان برق مستقیم (DC) با ۱۲، ۲۴ و ۳۰ ولت اعمال می‌گردید. شکل ۲ نمونه خاک تحت جریان محلول و جریان الکتریسیته را نشان می‌دهد.

بر روی نمونه‌ها دو دسته آزمایش شیمیایی و مکانیکی صورت گرفت. آزمایش‌های شیمیایی شامل تعیین pH و هدایت الکتریکی (EC) محلول‌های ورودی و خروجی نمونه‌ها است که در زمان‌های مختلف و در طول آزمایش انجام می‌شود. همچنین میزان کلسیم موجود در خاک اولیه و خاک اصلاح شده اندازه‌گیری می‌شد. آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمایش برش مستقیم بر نمونه‌های دست نخورده اخذ شده از نمونه خاک و آزمایش نفوذ مخروط سوئدی است.

برای تهیه نمونه خاک، یک قالب مستطیلی با ابعاد مسطحه ۱۰×۳۰ و به ارتفاع ۱۱ سانتی‌متر از جنس پلاستیک شفاف (پلکسی‌گلاس) که در دو طرف آن مخازنی برای محلول ورودی و خروجی در نظر گرفته شده، ساخته شد. سطح محلول در مخزن ورودی به‌وسیله پمپ ماریوت که تغذیه کننده مخزن است همواره در تراز یک سانتی‌متر پایین‌تر از سطح خاک، ثابت نگه داشته شد. این کار به منظور جلوگیری از حرکت محلول از سطح خارجی خاک انجام شده است. در مخزن خروجی هم سطح محلول با نصب یک شیلنگ و ثابت کردن آن در تراز یک سانتی‌متر پایین‌تر از سطح خاک، ثابت نگه داشته شد.

نمونه خاک مورد آزمایش، در دو طرف توسط صفحات مشبک پلکسی‌گلاس و یک لایه ژئوتکستایل با مخزن‌های طرفین ارتباط هیدرولیکی مناسبی برقرار کرد. الکترودهای استفاده شده از جنس استیل بوده و در مخازن محلول‌های ورودی و خروجی قرار می‌گرفت. جریان الکتریسیته مورد نیاز از یک منبع تغذیه جریان برق مستقیم قابل تنظیم با ولتاژ حداکثر ۳۰ ولت تأمین شده و قطب مثبت (آند) در ورودی و قطب منفی (کاتد) در خروجی آن قرار داشت. شکل ۱ شماتیک دستگاه ساخته شده را نشان می‌دهد.

برای ساخت نمونه خاک، خاک با ۱۰٪ رطوبت، در سه لایه و تا رسیدن به تراکم ۹۵٪ در جعبه‌های تهیه شده کوبیده شد.



شکل ۱. شماتیک دستگاه آزمایش

با توجه به ماهیت پدیده الکتروسینتیک که حرکت دادن سریع مولکول‌های آب در محدوده آند تا کاتد است، انتظار بر این است که با اعمال ولتاژ، دبی محلول عبوری افزایش یابد. این امر در نمونه VC-12 مشاهده شده است. اما اندازه‌گیری‌های حجم محلول عبور کرده از خاک، نشان داده که با اعمال ولتاژ الکتریکی در سایر نمونه‌ها حجم محلول عبوری کمتر شده و در حقیقت نفوذپذیری خاک کاهش یافته است. هرچه ولتاژ اعمالی بیشتر شده، میزان کاهش دبی محلول عبوری نیز شدت یافته است. علت کاهش دبی عبوری با اعمال ولتاژ، اکسایش کلر موجود در محلول ورودی در آند و تولید گاز کلر مطابق با رابطه ۵ است.



این گاز همراه با محلول، به خاک وارد شده و به خلل و فرج خاک نفوذ کرده است. پس از مدتی در مدخل ورودی خاک و در یک لایه نازک از آن، غلظت این گاز بالا رفته به نحوی که نفوذپذیری خاک به شدت کاهش می‌یابد. به همین دلیل به

از نتایج فوق برمی‌آید که به کار بردن تکنیک الکتروسینتیک در کنار استفاده از محلول کلریدکلسیم، کمک قابل توجهی به افزایش حجم محلول عبوری و افزایش نفوذپذیری خاک نمی‌کند.

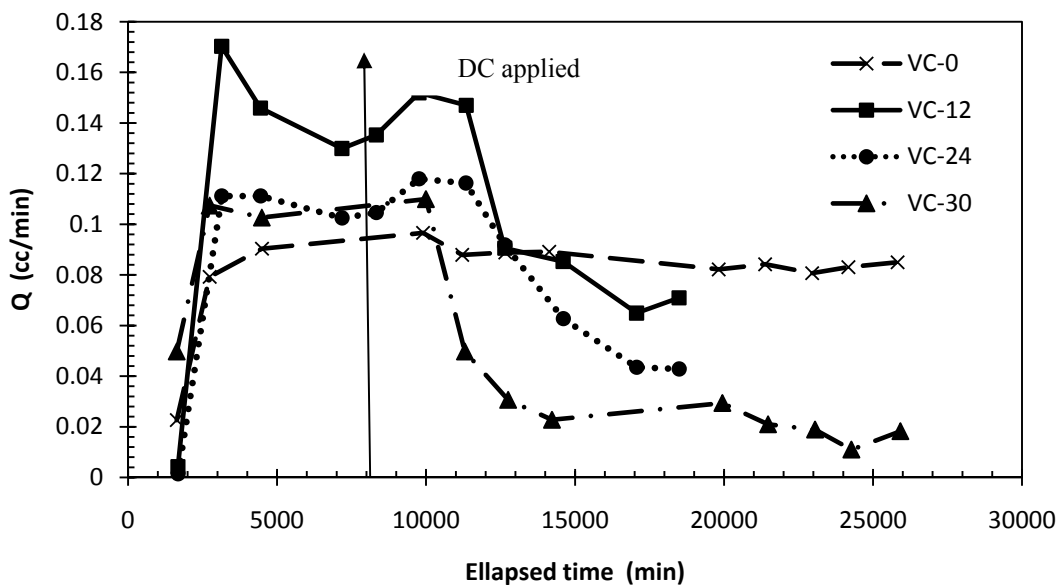
نام‌گذاری نمونه‌ها با توجه به محلول عبور کرده از آن‌ها و ولتاژ اعمال شده به نمونه انجام شد. حرف C نشان دهنده محلول وارد شده به نمونه، حرف V نشانه اعمال ولتاژ الکتریکی و عدد پس از آن بیان‌کننده میزان ولتاژ است. به عنوان مثال نمونه VC-24 نمونه‌ای است که محلول کلریدکلسیم تحت ولتاژ ۲۴ ولت از آن عبور کرده است.



شکل ۲. نمونه خاک تحت جریان محلول و میدان الکتریکی

۳. نتایج و بحث

تدریج دبی ورودی به نمونه خاک کاهش یافته و موجب کند شدن جریان محلول در آن می‌شود. در شکل ۳ تغییرات دبی محلول عبوری از نمونه‌های مختلف با گذشت زمان نمایش داده شده است.

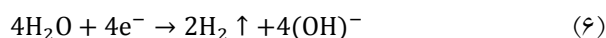


شکل ۳. تغییرات دبی محلول عبوری از نمونه‌ها

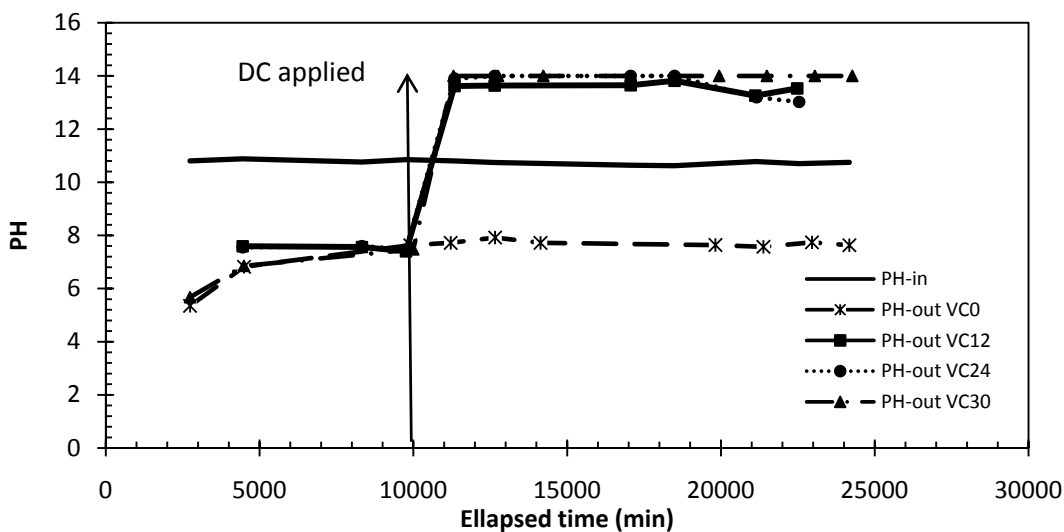
در شکل ۵ نمودارهای تغییرات EC در نمونه‌های مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، EC محلول ورودی ۳۵ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر است ولی EC محلول خروجی نمونه بدون ولتاژ (VC-0)، در ابتدای آزمایش بسیار کمتر از ورودی و حدود ۱۷ میلی‌زیمنس بر سانتی‌متر بوده است. علت این اختلاف آن است که بخشی از یون‌های کلسیم در خاک باقی‌مانده و با آن واکنش پوزولانی انجام داده و یا جذب ذرات رس شده است. این اختلاف به تدریج رو به کاهش می‌گذارد و در انتهای آزمایش، مقدار EC محلول خروجی با ورودی برابر می‌شود.

در شکل ۴ مقادیر pH محلول‌های ورودی و خروجی در طی مدت آزمایش برای چهار نمونه نمایش داده شده است. pH محلول ورودی ۱۱ بوده در حالی که pH محلول‌های خروجی در ابتدای تمامی آزمایش‌ها کمتر و معادل ۸ ثبت شده است. در دقیقه ۱۰۰۰۰ که ولتاژ اعمال شده است، pH افزایش ناگهانی یافته و به ۱۴ رسیده است.

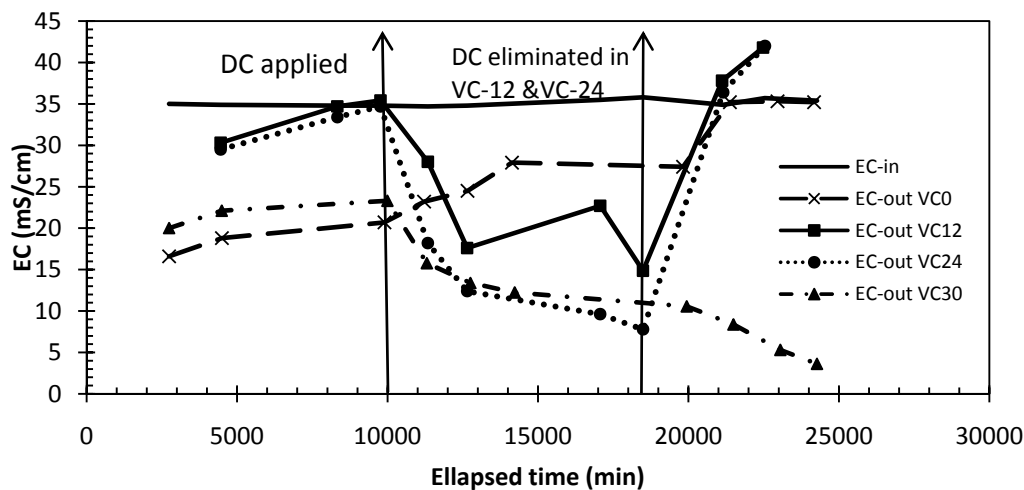
علت این امر هیدرولیز آب محلول خروجی در سمت کاتد می‌باشد که به دنبال آن و مطابق رابطه ۶ گاز هیدروژن و یون OH^- تولید شده و محیط به شدت قلیایی شده است.



EC به معنای هدایت الکتریکی است و می‌توان آن را معیاری از مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌های موجود در محلول دانست.



شکل ۴. تغییرات pH در محلول ورودی و محلول‌های خروجی



شکل ۵. تغییرات EC در محلول ورودی و محلول‌های خروجی

شکل ۶ بخشی از یون‌های کلسیم از حالت محلول خارج شده و بر روی الکتروود کاتد ترسیب شود. به همین دلیل هم مطابق شکل ۵، مقدار EC محلول خروجی که پس از کاتد اخذ شده، کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد.

در جدول ۱ منظور از محلول خروجی، محلولی است که از مخزن خارج شده و در حقیقت بعد از محل کاتد نمونه‌گیری شده است. لذا مقدار کلسیم ترسیب شده در کاتد از تفاضل کلسیم وارد شده به خاک، کلسیم اضافه شده به خاک و کلسیم موجود در محلول خروجی به دست می‌آید. در این جدول برای به دست آوردن درصد وزنی کلسیم اضافه شده به خاک نیز از نسبت مقدار کلسیم اضافه شده در هر نمونه به وزن خاک خشک همان نمونه، استفاده می‌شود.



شکل ۶. ترسیب یون کلسیم در الکتروود منفی (کاتد)

یکسان بودن مقدار EC ورودی و خروجی بدان معناست که دیگر جذب یونی در خاک صورت نمی‌گیرد و یا هر اندازه که یون، جذب خاک می‌شود به همان مقدار هم از یون‌های موجود در خاک، توسط محلول شسته شده و خارج می‌شود. اما در نمونه‌های VC-12، VC-24 و VC-30، با اعمال ولتاژ مقدار EC خروجی به شدت کاهش پیدا کرده و روند کاهشی پیدا می‌کند. بیشترین کاهش در نمونه‌های VC-24 و VC-30 دیده می‌شود.

کاهش EC که نشان دهنده کم شدن یون‌های موجود در محلول است، ممکن است نتیجه چند عامل باشد: اول جذب برخی یون‌ها در خاک، مانند یون کلسیم که این امر مطلوب است و در قسمت آنالیز آنیون-کاتیون محلول‌ها و خاک به آن خواهیم پرداخت، دوم خارج شدن بعضی از یون‌ها مثل یون کلر به صورت گاز از درون محلول در سمت آند. عامل سوم ترسیب کلسیم بر کاتد است. به طوری که مطابق شکل ۶ بخشی از یون‌های کلسیم بر اساس رابطه ۷ ترسیب یافته و روی الکتروود منفی (کاتد) را پوشانده‌اند.



جدول ۱ آنالیز محلول‌های ورودی و خروجی و همچنین عصاره اشباع خاک در قبل و بعد از اصلاح را نمایش می‌دهد. با برقراری جریان الکتریسیته، میزان کلسیم خاک در نمونه‌ها افزایش یافته و بیشترین جذب کلسیم در خاک نمونه VC-30 بوده است. در عین حال همان‌طور که قبلاً گفته شد و مطابق

جدول ۱. آنالیز کلسیم در نمونه‌های مختلف

موضوع	VC-0	VC-12	VC-24	VC-30
کلسیم وارد شده به خاک (g)	۲۴/۶۷۳	۴۴/۸۴	۳۸/۴۴۰۸	۲۰/۴۸۲
کلسیم موجود در خاک اولیه (g)	۱/۱۳۶۶۴	۱/۱۳۶۶۴	۱/۱۳۶۶۴	۱/۱۳۶۶۴
کلسیم موجود در خاک در انتهای آزمایش (g)	۷/۹۶۵۳۶	۹/۳۷۷۲۸	۹/۹۵۸۹۲	۱۵/۱۷۷۶
کلسیم اضافه شده به خاک در اثر آزمایش (g)	۶/۸۲۸۷۲	۸/۲۴۰۶۴	۸/۸۲۲۲۸	۱۴/۵۸۰۹۶
درصد وزنی کلسیم اضافه شده به خاک (%)	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۱۶	۰/۲۷
کلسیم موجود در محلول خروجی پس از کاتد (g)	۱۵/۲۳۲	۱۷/۰۳۱۵۶	۴/۵۳۲۲	۰/۹۲۳۶۲۴
کلسیم ترسیب شده در کاتد (g)	۲/۶۱۲۲۸	۱۹/۵۶۷۸	۲۵/۰۸۶۳۲	۴/۹۷۷۴۱۶
نسبت کلسیم ترسیب شده به کلسیم ورودی	۰/۱۰۶	۰/۴۳۶	۰/۶۵۲	۰/۲۴۲

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ولتاژ، مقدار کلسیم جذب شده در خاک افزایش پیدا کرده و مقدار کلسیم ترسیب شده هم بیشتر می‌شود. اما در نمونه VC-30 علی‌رغم افزایش کلسیم جذب شده، میزان کلسیم ترسیب شده کاهش می‌یابد. لذا می‌توان در این مورد اعمال الکتروسیتیک را مؤثر دانسته و ولتاژ ۳۰ ولت را بهینه دانست. برای افزایش جذب کلسیم با افزایش ولتاژ جریان الکتریکی می‌توان دلایل زیر را برشمرد:

- ۱- آثار الکتروشیمیایی ناشی از الکترواسمزی که در مقدمه به آن‌ها اشاره کردیم، یعنی افزایش تعویض کاتیون، بالا رفتن جذب فیزیکی و شیمیایی در خاک و ایجاد تغییر در ساختار و بافت خاک. پس می‌توان ادعا کرد که با برقراری جریان الکتریسته و با بروز پدیده‌های گفته شده میزان جذب کلسیم افزایش می‌یابد.
- ۲- تسریع در یونیزاسیون محلول کلرید کلسیم و افزایش یون‌های آزاد کلسیم در آن به علت برقراری جریان الکتریسته و الکترولیز شدن محلول.
- ۳- عملکرد خاک به‌عنوان یک پل نمکی و رسیدن محلول به تعادل یونی، بدین ترتیب که در مخزن ورودی با توجه به وجود الکتروود مثبت (آند) و اکسایش کلر طبق رابطه ۵، میزان یون منفی در محلول به شدت کاهش یافته و محلول از حالت تعادل خارج می‌شود. در این لحظه برای این‌که دوباره محلول به تعادل برسد، یون‌های مثبت کلسیم به سرعت به سمت خاک حرکت کرده و خاک به‌عنوان یک پل نمکی عمل می‌کند و کلسیم‌های بیشتری نسبت به حالت بدون برق جذب خاک می‌شود.

مسئله دیگری که در مورد میزان یون کلسیم قابل توجه می‌باشد، تغییرات آن در طول نمونه خاک و در امتداد جریان محلول است. در نمونه‌هایی که جریان برق به آن‌ها اعمال شده، می‌توان گفت که از سمت آند به کاتد افزایش غلظت یون کلسیم مشاهده می‌شود. شکل ۷ این موضوع را بهتر نشان می‌دهد.

در نمونه بدون اعمال برق، غلظت یون کلسیم در عصاره اشباع خاک در حدود 200 mE/lit بوده ولی از ورودی به

سمت خروجی به تدریج و به صورت جزئی کاهش می‌یابد و به 170 mE/lit می‌رسد. علت این امر آن است که غلظت یون کلسیم، در محلول عبوری از خاک به تدریج و از ورودی به سمت خروجی، با جذب یون‌ها توسط خاک، کمتر می‌شود و لذا شانس جذب آن‌ها توسط خاک نیز در همان امتداد کاهش جزئی می‌یابد. برای نمونه‌های تحت ولتاژ ۱۲ و ۲۴ ولت، غلظت کلسیم افزایش یافته و در ورودی به 24 mE/lit می‌رسد. تغییرات آن در امتداد جریان جزئی ولی هم جهت با آن است. به طوری که در خروجی، به ترتیب به 230 و 240 mE/lit افزایش می‌یابد. علت این امر آن است که تحت تأثیر پدیده الکتروسیتیک، یون‌های کلسیم از آند به سمت کاتد در حرکت هستند و لذا فرصت بیشتری برای خاک‌های نزدیک به کاتد به‌منظور جذب کلسیم وجود دارد. این امر برای نمونه تحت ولتاژ ۳۰ ولت شدت می‌گیرد به نحوی که از یک سوم ابتدایی نمونه به بعد، افزایش غلظت کلسیم به‌طور ناگهانی شدت پیدا کرده و سپس تدریجاً به 370 mE/lit می‌رسد. با این وجود، در مقایسه با نمونه بدون ولتاژ، در یک سوم ابتدایی نمونه VC-30 کاهش جدی در غلظت کلسیم مشاهده شده و مقدار آن به حدود mE/lit ۷۰ سقوط کرده است. بنابراین ولتاژ ۳۰ ولت علی‌رغم این که در قسمت اعظم نمونه، تأثیر چشمگیری در افزایش کلسیم خاک دارد، اما در مجاورت آند اثر نامطلوبی به جا می‌گذارد.

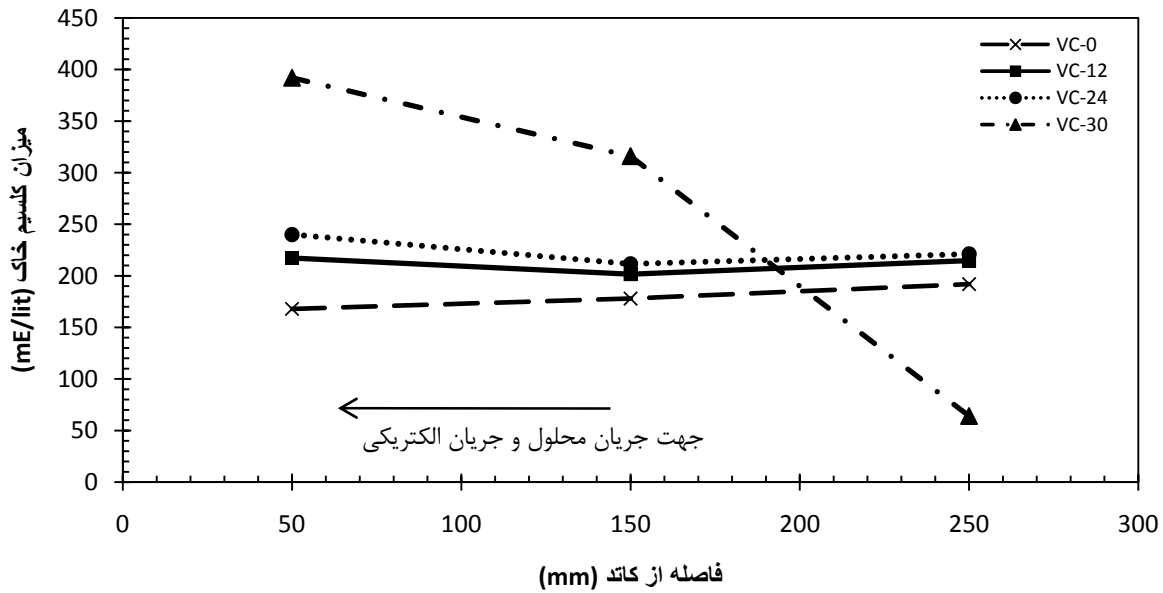
یکی از آزمایش‌های مکانیکی انجام شده در این تحقیق، آزمایش نفوذ مخروط سوئدی یا انگلیسی است. این آزمایش عموماً برای تعیین حد خمیری خاک به کار می‌رود و مطابق استاندارد BS-1377 part:2 انجام می‌شود، اما با استفاده از روابط تجربی موجود می‌توان از آن معیاری برای مقاومت برشی زهکشی نشده خاک به‌دست آورد. در این آزمایش یک مخروط با ابعاد، زاویه رأس و وزن معین از سطح نمونه خاک رها می‌شود و میزان فرورفتگی آن در خاک را اندازه می‌گیرند. مقدار فرو رفتگی با مقاومت خاک و ظرفیت باربری آن رابطه معکوس دارد. در این پژوهش، مخروط فلزی به وزن ۸۰ گرم و با زاویه رأس ۳۰ استفاده شد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش ولتاژ، مقدار کلسیم جذب شده در خاک افزایش پیدا کرده و مقدار کلسیم ترسیب شده هم بیشتر می‌شود. اما در نمونه VC-30 علی‌رغم افزایش کلسیم جذب شده، میزان کلسیم ترسیب شده کاهش می‌یابد. لذا می‌توان در این مورد اعمال الکتروسیتیک را مؤثر دانسته و ولتاژ ۳۰ ولت را بهینه دانست. برای افزایش جذب کلسیم با افزایش ولتاژ جریان الکتریکی می‌توان دلایل زیر را برشمرد:

- ۱- آثار الکتروشیمیایی ناشی از الکترواسمزی که در مقدمه به آن‌ها اشاره کردیم، یعنی افزایش تعویض کاتیون، بالا رفتن جذب فیزیکی و شیمیایی در خاک و ایجاد تغییر در ساختار و بافت خاک. پس می‌توان ادعا کرد که با برقراری جریان الکتریسته و با بروز پدیده‌های گفته شده میزان جذب کلسیم افزایش می‌یابد.
- ۲- تسریع در یونیزاسیون محلول کلرید کلسیم و افزایش یون‌های آزاد کلسیم در آن به علت برقراری جریان الکتریسته و الکترولیز شدن محلول.
- ۳- عملکرد خاک به‌عنوان یک پل نمکی و رسیدن محلول به تعادل یونی، بدین ترتیب که در مخزن ورودی با توجه به وجود الکتروود مثبت (آند) و اکسایش کلر طبق رابطه ۵، میزان یون منفی در محلول به شدت کاهش یافته و محلول از حالت تعادل خارج می‌شود. در این لحظه برای این‌که دوباره محلول به تعادل برسد، یون‌های مثبت کلسیم به سرعت به سمت خاک حرکت کرده و خاک به‌عنوان یک پل نمکی عمل می‌کند و کلسیم‌های بیشتری نسبت به حالت بدون برق جذب خاک می‌شود.

مسئله دیگری که در مورد میزان یون کلسیم قابل توجه می‌باشد، تغییرات آن در طول نمونه خاک و در امتداد جریان محلول است. در نمونه‌هایی که جریان برق به آن‌ها اعمال شده، می‌توان گفت که از سمت آند به کاتد افزایش غلظت یون کلسیم مشاهده می‌شود. شکل ۷ این موضوع را بهتر نشان می‌دهد.

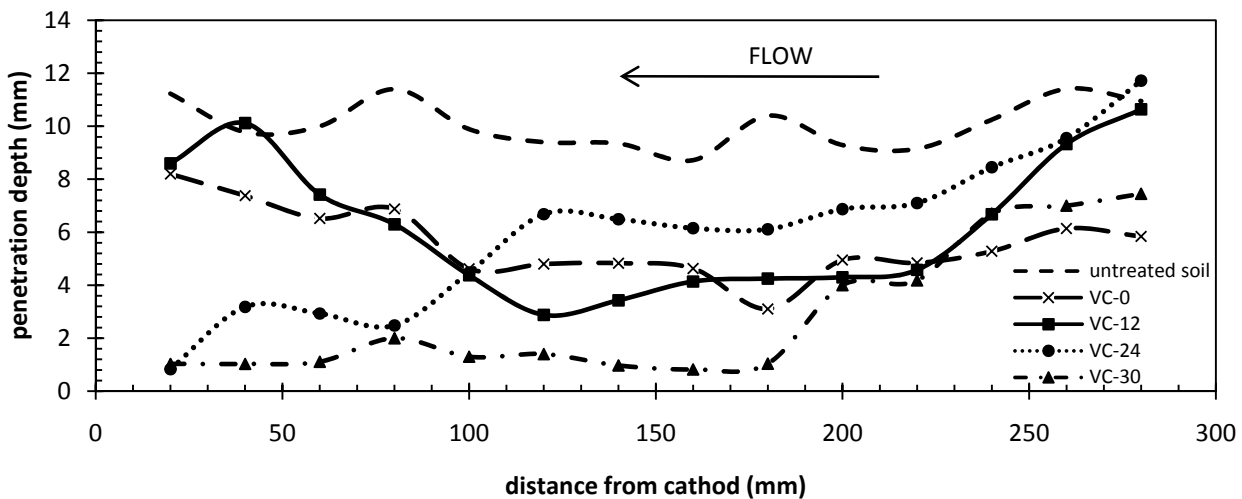
در نمونه بدون اعمال برق، غلظت یون کلسیم در عصاره اشباع خاک در حدود 200 mE/lit بوده ولی از ورودی به



شکل ۷. تغییرات کلسیم خاک در امتداد جریان محلول

برشی زهکشی نشده در ناحیه مزبور است. در بخش آنالیز شیمیایی خاک نیز مشاهده شد که میزان یون کلسیم در سمت کاتد بیشتر است، لذا این دو مسأله مؤید یکدیگر هستند. این تطابق نتایج آزمایش مخروط سوئدی و آنالیز شیمیایی در مورد نمونه VC-0 نیز مشاهده می‌شود. به طوری که به علت جذب کلسیم بیشتر در سمت ورودی، مقاومت برشی در این ناحیه نیز بیشتر بوده و عمق نفوذ مخروط کمتر است.

در این آزمایش بیشتر به جنبه کیفی و مقایسه‌ای آن توجه شده و میزان نفوذ مخروط، با مقدار کلسیم جذب شده در خاک و افزایش مقاومت آن نسبت داده شد. شکل ۸ خلاصه نتایج این آزمایش روی نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار فوق قابل مشاهده است، به طور غالب، برقرار شدن جریان الکتریسیته سبب کاهش عمق نفوذ مخروط در خاک سمت کاتد می‌گردد و این به معنای افزایش مقاومت



شکل ۸. نتایج آزمایش مخروط سوئدی

تنش- کرنش برای تمامی نمونه‌ها، تحت تنش قائم ۷۵ kPa ترسیم شده است.

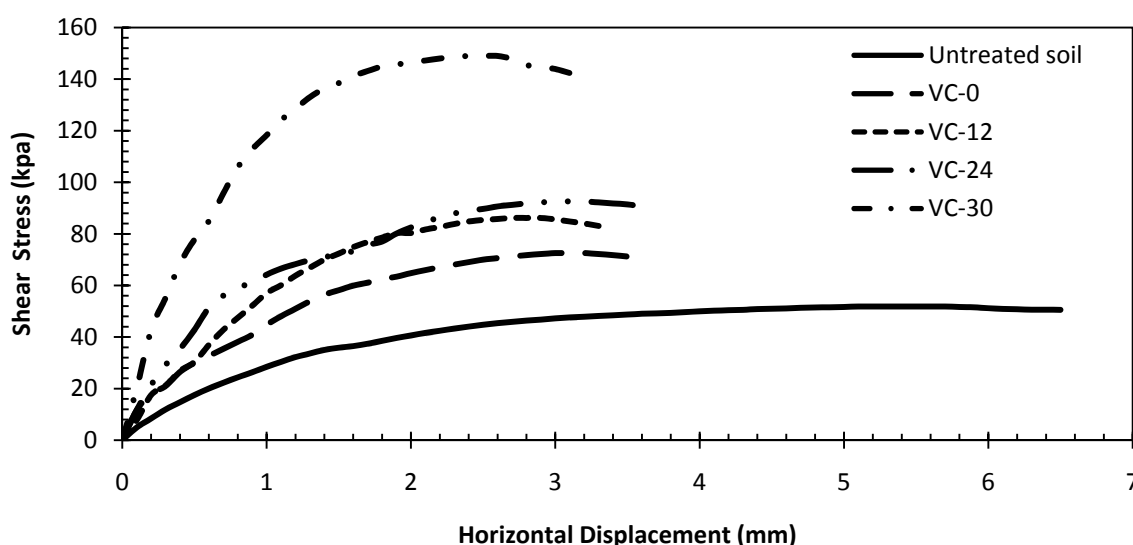
در شکل ۹ مشاهده می‌شود که اولاً با اضافه کردن محلول کلریدکلسیم به خاک، تغییر شکل‌های آن کمتر و رفتار خاک تردتر می‌شود. ثانیاً در مقایسه بین ولتاژهای مختلف اعمال شده، جریان ۳۰ ولتی بیشترین مقاومت برشی را به دست می‌دهد و می‌توان آن را از این نظر ولتاژ مطلوب و مناسب دانست.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد، تحت تنش قائم ۷۵ kPa محلول کلریدکلسیم به تنهایی افزایش ۴۰ درصدی، مقاومت لازم را عبوری در این حالت V_v ۱/۸ و درصد وزنی کلریدکلسیم اضافه شده به خاک ۱/۶٪ است. اگر همراه با آن روش الکترواسمزی با ولتاژهای ۱۲، ۲۴ و ۳۰ ولت اعمال شود، این افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۶۶، ۷۹ و ۱۸۷ درصد است. با افزایش ولتاژ، همان‌طور که قبلاً اشاره شد، به علت کاهش نفوذپذیری خاک، میزان حجم محلول عبوری و به دنبال آن درصد وزنی کلریدکلسیم اضافه شده به خاک کاهش می‌یابد. این در حالی است که کلسیم جذب شده و واکنش داده با خاک، افزایش یافته است.

همان‌طور که در این شکل مشخص است ولتاژ ۳۰ ولت بهترین و بیشترین تأثیر را بر افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده خاک داشته و علاوه بر این که سبب افزایش مقاومت بیشتری در مقایسه با نمونه‌های دیگر شده، محدوده وسیع‌تری از خاک را نیز تحت تأثیر قرار داده است. این مسأله را می‌توان مرتبط به کارآمدتر بودن ولتاژ ۳۰ ولت نسبت به سایر ولتاژهای اعمال شده در بحث جذب کلسیم خاک و کم‌تر بودن کلسیم ترسیم شده در محلول خروجی دانست.

آزمایش مکانیکی بعدی انجام شده، آزمایش برش مستقیم است. به منظور انجام آزمایش برش مستقیم، سه نمونه خاک دست نخورده از قسمت میانی قالب و در سه عمق مختلف گرفته شد. هر نمونه در دستگاه برش مستقیم به مدت یک ساعت تحکیم یافت و سپس به روش کند و اشباع، با سرعت 0.2 (mm/min) و تحت سربارهای قائم ۲۵، ۵۰ و ۷۵ kPa به صورت زهکشی شده و تا رسیدن به تغییر مکان ۱۰٪ یا پیک مقاومت، تحت نیروی برشی گسیخته گردید.

با انجام آزمایش برش مستقیم، پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای خاک اصلاح نشده به ترتیب برابر با $4/3$ و $31/9$ درجه محاسبه شد. در شکل ۹ منحنی‌های



شکل ۹. منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها تحت تنش قائم ۷۵ kPa

$$\Delta C_r = \frac{\text{چسبندگی نمونه خاک شاهد} - \text{چسبندگی نمونه خاک اصلاح شده}}{\text{چسبندگی نمونه خاک شاهد}} \times 100 \quad (۸)$$

(۹)

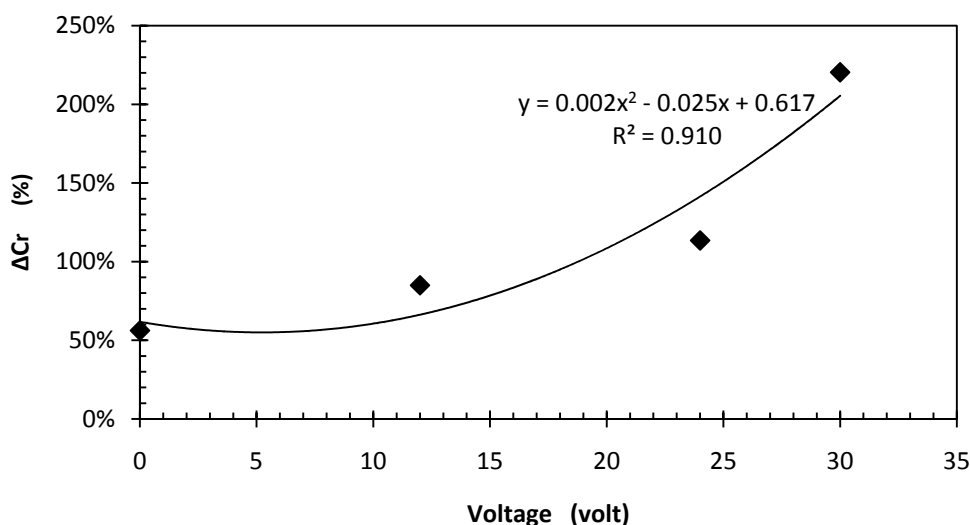
$$\Delta \phi_r = \frac{\text{زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک شاهد} - \text{زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک اصلاح شده}}{\text{زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک شاهد}} \times 100$$

افزایش زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) نمونه‌های خاک در این آزمایش‌ها با نتایج (Abdullah and Al-Abadi (2010) همخوانی دارد. آنها گزارش دادند افزایش یون کلسیم از طریق الکترو سینتیک به یک خاک رسی با پلاستیسیته بالا (CH) موجب افزایش ۲۸/۸ درصدی در مقدار ϕ شده است، اما بر خلاف انتظار و بر خلاف نتایج پژوهش حاضر، مقدار چسبندگی در خاک آنها ۳۰/۵ درصد کاهش یافت. این در حالی است که یون کلسیم علاوه بر تشکیل ژل چسبنده، در صورتی که وارد فعل و انفعالات شیمیایی نشود، به دلیل الکترووالانس بالا موجب کاهش لایه مضاعف شده و لذا منجر به افزایش چسبندگی خاک می‌شود.

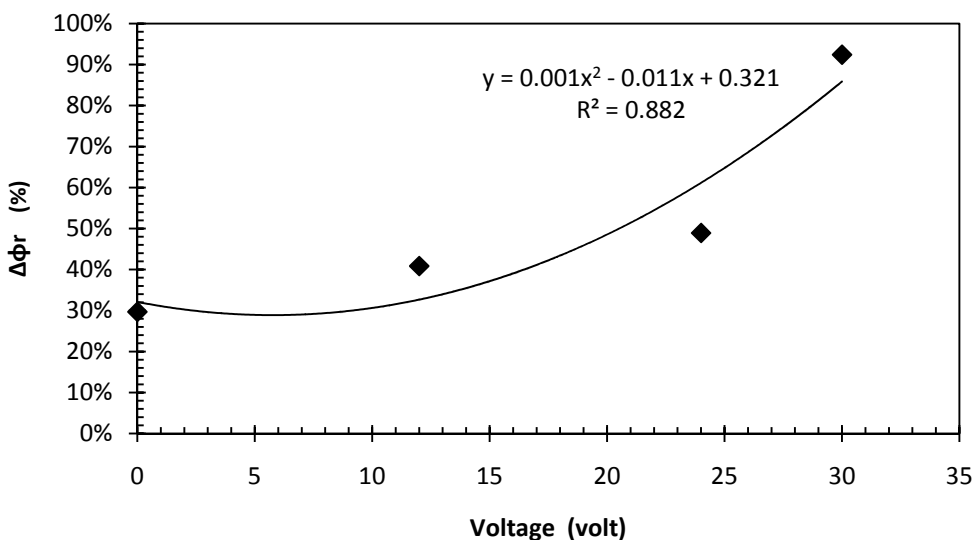
تأثیر این تکنیک بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول حجم‌های محلول عبوری و درصد وزنی کلرید کلسیم اضافه شده به خاک نیز نمایش داده شده است. بیشترین افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مربوط به نمونه VC-30 می‌باشد که با توجه به نتایج آنالیز کلسیم خاک و آزمایش مخروط سوئدی، قابل انتظار بود. درصد افزایش چسبندگی نسبت به نمونه شاهد برای نمونه‌های VC-0، VC-12، VC-24 و VC-30 به ترتیب برابر با ۵۶، ۸۵، ۱۱۳ و ۲۲۰ درصد و افزایش زاویه اصطکاک داخلی نیز به ترتیب برابر با ۳۰، ۴۱، ۴۹ و ۹۲ درصد است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی تحت تأثیر ولتاژهای مختلف، بر حسب درصد افزایش نسبی چسبندگی (ΔC_r) و افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی ($\Delta \phi_r$)، مطابق روابط ۸ و ۹ ترسیم شده است.

جدول ۲. مقادیر C و ϕ برای نمونه‌های مختلف

نام نمونه	حجم محلول عبوری بر حسب V_v	درصد وزنی کلرید کلسیم اضافه شده به خاک خشک	درصد وزنی کلسیم اضافه شده به خاک خشک	چسبندگی (C) kPa	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) درجه
شاهد	-	-	-	۴/۳۱	۳۱/۸۶
VC-0	۱/۸	۱/۶	۰/۱۳	۶/۷۳	۴۱/۳۱
VC-12	۱/۵	۱/۳	۰/۱۵	۷/۹۷	۴۴/۸۷
VC-24	۱/۱	۱	۰/۱۶	۹/۲	۴۷/۴۴
VC-30	۱	۰/۹	۰/۲۷	۱۳/۸۱	۶۱/۳



شکل ۱۰. تغییرات افزایش نسبی چسبندگی تحت تأثیر ولتاژهای مختلف



شکل ۱۱. تغییرات افزایش نسبی زاویه اصطکاک داخلی تحت تأثیر ولتاژهای مختلف

۴. نتیجه گیری

در این مقاله مکان استفاده از کلریدکلسیم به عنوان تأمین کننده یون کلسیم مورد نیاز برای ایجاد واکنش پوزولانی و تقویت خاک ریزدانه به همراه تکنیک الکترواسمزی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

۱- استفاده از محلول کلریدکلسیم برای بالا بردن مقاومت برشی خاک بسیار مؤثر است. این امر با واکنش پوزولانی کلسیم آزاد که به میزان فراوان در اختیار خاک قرار می‌گیرد،

میسر می‌شود. حلالیت بسیار بالای کلریدکلسیم، این امکان را فراهم می‌کند که یون کلسیم آزاد بسیار بیشتری در اختیار خاک قرار بگیرد و سبب افزایش میزان و سرعت اصلاح خاک شود. به طوری که با توجه به نتایج حاصل شده، میزان افزایش یون کلسیم در خاک تحت جریان محلول ۶۶٪، نرمال کلریدکلسیم، ۶۰٪ بوده است.

۲- استفاده از تکنیک الکترواسمزی در کنار مقاوم سازی با محلول کلریدکلسیم سبب افزایش راندمان و تأثیرگذاری آن

۴- تأثیر محلول کلرید کلسیم و همچنین تکنیک الکترواسمزی در ترکیب با آن بر پارامترهای مقاومت برشی خاک بسیار مؤثر است، به طوری که میزان افزایش چسبندگی در نمونه‌های VC-0، VC-12، VC-24 و VC-30 به ترتیب برابر با ۵۶، ۸۵، ۱۱۳ و ۲۲۰ درصد می‌باشد. زاویه اصطکاک داخلی نیز به ترتیب به میزان ۳۰، ۴۱، ۴۹ و ۹۲ درصد زیاد می‌شود. این نتایج نیز بیان کننده تأثیر بیشتر ولتاژ ۳۰ ولت نسبت به سایر ولتاژها است.

۵- با مشاهده نتایج آزمایش مخروط سوئدی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که خاک در جریان ۳۰ ولتی، نسبت به سایر آزمایش‌ها بیشتر تحت تأثیر قرار گرفته و مقاومت آن افزایش یافته است. لذا از این حیث نیز جریان ۳۰ ولت نسبت به سایر ولتاژهای لحاظ شده در این تحقیق مؤثرتر است.

۶- در بحث میزان ترسیب کلسیم ناشی از الکترواسمزی در کاتد و محلول خروجی، نمونه VC-30 کمترین میزان ترسیب را داشته به طوری که نسبت کلسیم ترسیب شده در کاتد به کلسیم وارد شده به نمونه خاک ۰/۲۴ است که این مورد با عنایت به موارد فوق، ۳۰ ولت را در این تحقیق ولتاژ بهینه معرفی می‌کند.

می‌شود. بدین ترتیب که از یک طرف با بالا بردن میزان یونیزاسیون در محلول، یون کلسیم آزاد و فعال که آماده واکنش با خاک است، افزایش می‌یابد و از طرف دیگر با توجه به آثار الکتروشیمیایی روی خاک، به جذب بیشتر کلسیم در خاک کمک کرده و مقاومت نهایی آن را افزایش می‌دهد. این در حالی است که الکترواسمزی همراه با محلول کلرید کلسیم موجب کاهش نفوذپذیری خاک شده و حجم محلول عبوری از خاک کاهش می‌یابد. اما علی‌رغم این کاهش، مقدار کلسیم جذب شده افزایش یافته و روند اصلاح خاک بهبود می‌یابد.

۳- با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان ولتاژ ۳۰ ولت را بهترین ولتاژ به منظور افزایش مقاومت برشی برای خاک مورد استفاده در این تحقیق دانست. این ولتاژ سبب بیشترین افزایش مقاومت به میزان ۱۷۸ درصد تحت تنش قائم ۲۵ kPa، معادل ۲۲۳ درصد تحت تنش قائم ۵۰ kPa و معادل ۱۸۷ درصد تحت تنش قائم ۷۵ kPa می‌شود. افزایش مقاومت مذکور با عبور دادن محلول به حجمی معادل V_v حاصل می‌شود. در این حالت درصد وزنی کلرید کلسیم اضافه شده به خاک ۰/۹٪ است.

منابع

- داودی، م.ه.، سیاوش‌نیا، م.، احدی‌عالی، و.، ۱۳۸۷. اصلاح خاک بسترهای تورم‌زا در شبکه‌های آبیاری و تثبیت بسترهای لغزشی کانال‌های انتقال آب با استفاده از محلول اشباع آهک. اولین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ص. ۲۸۱-۲۸۸.
- احدی‌عالی، و.، ۱۳۸۶. پایدارسازی توده‌های ناپایدار به روش افزودن محلول اشباع آهک (مطالعه موردی توده دنبلید شرقی طالقان). پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.
- رستمی، م.، ۱۳۸۹. بررسی تأثیر محلول اشباع آهک بر افزایش مقاومت فشاری خاک‌های رسی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.
- الوندکوهی، ۱۳۸۵. افزایش مقاومت برشی خاک از یک توده طبیعی لغزشی با استفاده از چاهک‌های حاوی آب و آهک. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران.

Abdullah, W.S., Al-Abadi, A.M., 2010. Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil. *Journal of Applied Clay Science*, 47: 343-350.

Canadian Geotechnical Society, 1987. *Canadian Foundation Engineering Manual*.

Sherwood, P.T., 1993. *Soil Stabilization with Cement and Lime. State of the Art Review*, HMSO, London UK.

-
- Mitchell, J.K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior. John Wiley & Sons, Inc, pp. 229-270
- Fang, H., 2004. Foundation Engineering Handbook. CBS Publisher & Distributors, pp. 350-351.
- Yu Ou, C., Chi Chen, S., Guang Wang, Y., 2009. On the enhancement of electro-osmotic soil improvement by the injection of saline solution. Journal of Applied Clay Science,
- Acar, Y.B., 1992. Electrokinetic Soil Processing. ASCE, Geotechnical Special Publication, 30:1420-1432