

اصلاح خاک‌های متورم‌شونده به روش الکترواسمزی

سید محمدعلی زمردیان^{۱*}، خلیل خرد^۲

۱. دانشیار بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

۲. کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۲/۴/۱۹)

چکیده

یکی از مشکلات اجرایی بسیار مهم در ساخت کانال‌های آبیاری وجود انواع خاک‌های مسئله‌دار در ساختگاه کانال‌هاست. اگر مطالعات لازم ژئوتکنیکی بر خاک بستر کانال انجام نپذیرد، خرابی‌های گسترده‌ای پدید خواهد آمد. از انواع خاک‌های مسئله‌دار متداول خاک‌های متورم‌شونده است. یکی از روش‌های نوین تقویت و اصلاح خاک‌های محل بهسازی الکترواسمزی است. در این تحقیق نمونه خاک با پتانسیل تورم‌پذیری بالا تهیه و در دستگاه نیمه‌صحرایی متراکم گردید و تأثیر فرایند الکترواسمزی در زمان‌های اصلاحی ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه با ولتاژ مستقیم (DC) تحت اختلاف پتانسیل‌های ۱۲ و ۲۴ و ۴۸ ولت بررسی شد. نتایج مطالعات نشان داد استفاده از روش الکترواسمزی برای اصلاح خاک سبب کاهش پتانسیل تورم‌پذیری خاک در اطراف قطب مثبت (آند) بین ۵۱ تا ۸۵ درصد می‌شود. نتایج آزمایش‌های شیمیایی از کاهش ۲۷ تا ۴۶ درصدی PH در حوالی آند حکایت دارد. بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک، نظیر افزایش مقاومت فشاری تقریباً تا ۸ برابر بیشتر از مقاومت فشاری نمونه اولیه، از دیگر نتایج این تحقیق بود که باعث افزایش مقاومت فشاری خاک بستر کانال‌های آبیاری بهسازی‌شده با الکترواسمزی می‌شود و این امر می‌تواند به ایمنی و پایداری بیشتر کانال‌ها کمک کند.

کلیدواژگان: الکترواسمزی، بهسازی، پتانسیل تورم، خاک‌های متورم‌شونده، مقاومت فشاری.

مقدمه

در اکثر پروژه‌های عمرانی، مانند راه‌سازی و سدسازی و کانال‌های آبرسانی و شالوده‌های ساختمان‌ها و شیروانی‌ها، با انواع خاک‌ها با مشخصات فنی متفاوت مواجهیم. بسیاری از این خاک‌ها برای احداث سازه مناسب نیستند. از این خاک‌ها می‌توان خاک‌های متورم‌شونده را نام برد. خاک‌های متورم‌شونده خاک‌هایی هستند که در اثر افزایش رطوبت حجم آن‌ها به‌صورت شایان توجه افزایش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت خاک‌های متورم‌شونده کاملاً مخالف عمل تحکیم عمل می‌کنند؛ یعنی این خاک‌ها، به جای ازدست‌دادن آب و کاهش حجم، آب را جذب می‌کنند و حجم آن‌ها افزایش پیدا می‌کند. در حالت عمومی خاک‌های مستعد تورم به‌ترتیب دارای حد مایع و حد خمیری بزرگ‌تر از حدود ۴۰ و ۱۵ است (Das, 1984). سختی این خاک‌ها در حالت خشک بسیار زیاد است. معمولاً این خاک‌ها PH بالایی دارند. خاک‌های اسیدی عمدتاً پتانسیل تورم ناچیزی دارند (Askari and Fakher, 1994). مجموعه عواملی که بر پتانسیل تورم خاک تأثیر می‌گذارند عبارت‌اند از ۱. ترکیب

خاک؛ ۲. ترکیب سیال؛ ۳. شرایط تراکم خاک؛ ۴. شرایط آزمایش؛ ۵. تأثیر دست‌خوردگی نمونه.

پیوند میان گرادیان‌های هیدرولیکی- شیمیایی- الکتریکی باعث به‌وجود آمدن انواع مختلف پدیده‌های الکتروسینتیک در خاک می‌شود (Acar, 1992). یکی از روش‌های اصلاح خاک زهکشی الکتروسینتیک است. در توصیف جنبه‌های گوناگون پدیده الکتروسینتیک بر اساس نوع ذره‌ای که در میدان الکتریکی حاصل از جریان حرکت می‌کند می‌توان به مفاهیم الکتروفورزیسی و انتقال الکترونی و الکترواسمزی، که از الکتروسینتیک مشتق می‌شود، اشاره کرد (Mitchell, 2005). به حرکت سیال نسبت به یک ذره ساکن تحت اثر پتانسیل الکتریکی الکترواسمزی گفته می‌شود. در پنجاه سال اخیر الکترواسمزی به‌منزله یک تکنیک عملی تثبیت برای بهبود مقاومت و تغییر شکل‌ها در خاک‌های ریزدانه و سست به‌کار رفته است. Cassagrande (1947) نخستین کسی بود که از این روش برای افزایش مقاومت باربری خاک در کشور آلمان استفاده کرد.

Bjerram *et al.* (1967) در نوژ از الکترواسمزی برای

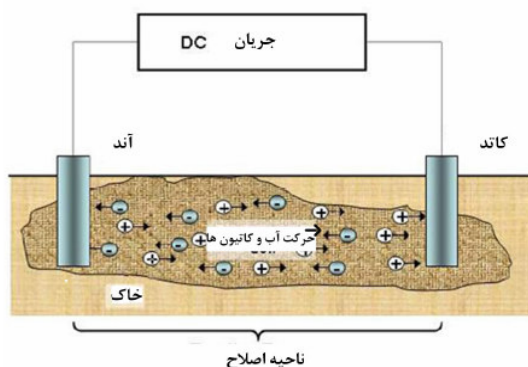
تحکیم رس حساس استفاده کردند. هانسبو در سال ۱۹۷۰ از این روش برای تثبیت خاک استفاده کرد. Morris *et al.* (1985)

* نویسنده مسئول: mzmorod@shirazu.ac.ir

بهبود مشخصات تحکیم و افزایش فشار پیش‌تحکیمی، و بهبود مشخصات حدود آتربرگ، CBR و کاهش افت پتانسیل در آند، بحث شده است. به‌رغم سابقه نسبتاً طولانی کاربرد الکترواسمزی در اصلاح رفتار فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها، کاربرد این پدیده در اصلاح خاک‌های متورم‌شونده سابقه ندارد. در این مقاله به کاربرد فرایند الکترواسمزی در تثبیت خاک‌های رسی متورم‌شونده توجه شد. بنابراین، پتانسیل تورم‌پذیری خاک با در نظر گرفتن متغیرهای ولتاژ و زمان اصلاح کنترل گردید. پتانسیل تورم خاک تحت ولتاژهای ۱۲ و ۲۴ و ۴۸ در زمان‌های ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه بررسی شد.

اصول روش الکترواسمزی در خاک‌های ریزدانه

ضریب نفوذپذیری و همچنین تراوش در خاک‌های رسی و ریزدانه در مقایسه با خاک‌های دانه‌ای خیلی کمتر است. اما زهکشی و نفوذپذیری را می‌توان به کمک جریان برق مستقیم افزایش داد. این پدیده نتیجه جذب کاتیون‌های تشکیل‌دهنده ساختمان رس‌ها به وسیله مولکول‌های دوقطبی آب است. اصل این پدیده در شکل ۱ می‌آید.



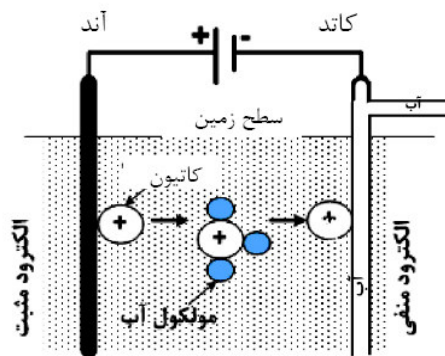
شکل ۱. اصول الکترواسمزی

خاک محکم می‌شود. اگر کاتد هم از جنس ناتراوا باشد، جریان آب از آند به کاتد فشار منفذی منفی در خاک ایجاد می‌کند. این فشار منفذی منفی با گذشت زمان افزایش می‌یابد و به سبب ثابت بودن مجموع تنش در خاک تنش مؤثر افزایش می‌یابد. بنابراین با افزایش تنش مؤثر خاک محکم و فشرده می‌شود.

روش اندازه‌گیری پتانسیل تورم و فشار تورم خاک

در این تحقیق آزمایش پتانسیل تورم مطابق استاندارد ASTM D-4546 انجام گرفت. طبق این استاندارد تورم عبارت است از نسبت بالآمدگی (افزایش ارتفاع) ستونی از خاک پس از جذب آب در مقایسه با ارتفاع اولیه. در روش‌های ارزیابی مستقیم تورم برای اندازه‌گیری فشار تورم غالباً از دستگاه ادنومتر (تحکیم)

برای پایدارساختن یک سد روی خاک رسی- سیلنتی نرم و حساس تحقیقاتی در زمینه الکترواسمزی انجام دادند. در سال ۱۹۹۵ Milligan از این روش برای تقویت ظرفیت اصطکاکی شمع‌ها استفاده کرد. همچنین *Burnotte et al.* (2004) تقویت محل تماس الکتروود با خاک و کنترل تلفات انرژی در محل تماس الکتروودها با خاک و اثر دما را در آزمایش‌های صحرائی ارزیابی کردند. *Cundy et al.* (2005) با نصب یک جفت الکتروود در خاک و برقراری شدت میدان الکتریکی در آن و ایجاد دیواره‌ای غنی‌شده از آهن بین الکتروودها توانستند آلودگی‌ها را خارج و تثبیت و پایداری خاک را فراهم کنند. *Ou et al.* (2009) در تایوان تست الکترواسمزی شیمیایی را در محل با تزریق محلول کلرید کلسیم و پس از آن محلول سیلیکات سدیم انجام دادند که باعث تقویت خاک رسی سیلنتی نرم و کاهش افت پتانسیل شد و با تغییر قطبیت نرمال و معکوس میزان نشست زمین و ولتاژ و جریان خاک حجم آب خارج‌شده از کاتد را بررسی کردند. اغلب مطالعات یادشده بر مشخصات مکانیکی خاک تکیه دارد و در آن‌ها از بهبود مقاومت برشی زهکشی‌نشده،



وقتی در خاک جریان الکتریسیته برقرار می‌شود کاتیون‌ها به طرف کاتد (لوله فلزی مشبک) حرکت می‌کنند. مولکول‌های آب به سبب خاصیت دوقطبی بودن به کاتیون‌ها جذب و همراه آن‌ها به طرف کاتد کشیده می‌شوند. وقتی کاتیون‌ها به کاتد می‌رسند آب آزاد می‌شود و فشار ناشی از انباشتگی آب در کاتد سبب زهکشی آب به بیرون می‌گردد. این عمل الکترواسمزی نامیده می‌شود. هنگامی که پتانسیل DC برای خاک ریزدانه به کار می‌رود جریانی در جهت گرادیان ولتاژ به وجود می‌آید. بهبود خاک به روش الکترواسمزی معمولاً با استفاده از یک آند ناتراوا صورت می‌گیرد؛ بدین معنی که آب موجود در خاک وارد آند نمی‌شود. آب موجود در خاک به‌طور تئوری در قسمت کاتد از بین می‌رود و با برطرف شدن آب موجود در خاک تا اندازه‌ای

جدول ۱. تفسیر کیفی پتانسیل تورم بر اساس شاخص تورم کمیته خاک و

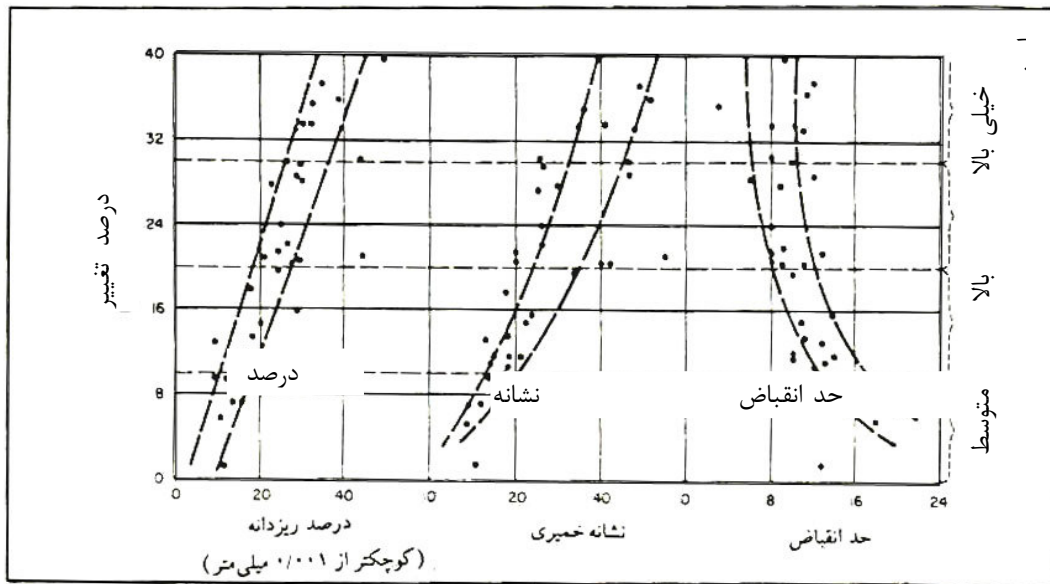
سنگ ASTM (Chen, 1975)

شاخص تورم (EI)	پتانسیل تورم
۰ تا ۲۰	بسیار کم
۲۱ تا ۵۰	کم
۵۱ تا ۹۰	متوسط
۹۱ تا ۱۲۰	زیاد
بیشتر از ۱۳۰	بسیار زیاد

در طبقه‌بندی USBR، که هولتز و گیبس ارائه کردند، اثر عوامل متعدد به‌طور هم‌زمان در نظر گرفته شد. این طبقه‌بندی در جدول ۲ و منحنی‌های شکل ۲ می‌آید.

جدول ۲. طبقه‌بندی کیفی خاک‌های متورم‌شونده سیستم USBR (Chen, 1975)

درجه تورم	پتانسیل تورم محتمل	حد انقباض	شاخص خمیری	درصد محتویات کلونیدی (کوچک‌تر از میکرون)
بسیار زیاد	بیشتر از ۳۰	کمتر از ۱۱	بیشتر از ۳۵	بیشتر از ۲۸
زیاد	۲۰ تا ۳۰	۷ تا ۱۲	۲۵ تا ۴۱	۱۳ تا ۲۰
متوسط	۱۰ تا ۳۰	۱۰ تا ۱۶	۱۵ تا ۲۸	۱۳ تا ۲۳
کم	کمتر از ۱۰	بیشتر از ۱۵	کمتر از ۱۸	کمتر از ۱۵



شکل ۲. طبقه‌بندی تورم خاک بر اساس پیشنهاد هولتز و گیبس (Chen, 1975)

اصفهان، که پتانسیل تورم بالایی دارد، تهیه شد. به‌منظور طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه آزمایش‌های دانه‌بندی و تراکم و حدود آتبرگ بر اساس استاندارد ASTM D422، ASTM D698، ASTM D4318 انجام شد که نتایج آن در جدول ۳ می‌آید.

منطبق بر استاندارد ASTM D-4546 به روش C و برای اندازه‌گیری پتانسیل تورم (تورم آزاد) از دستگاه تحکیم همراه سرباری معادل وزن سرپوش و سنگ متخلخل (۱ کیلو پاسکال) بر اساس استاندارد ASTM D-4546 به روش A استفاده و درصد تورم آزاد با توجه به رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه ۱) } (EI) \text{ درصد تورم} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100$$

طول اولیه نمونه = h_1 و طول ثانویه نمونه = h_2 و بر اساس استاندارد ASTM پس از تعیین پتانسیل تورم با توجه به جدول ۱ رده‌بندی شاخص تورم انجام می‌گیرد و درجه پتانسیل تورم نمونه‌ها تعیین می‌شود.

مواد و روش‌ها

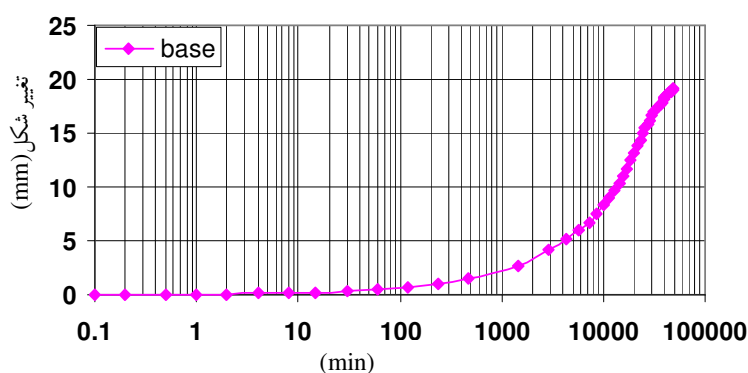
ویژگی‌های خاک بررسی‌شده

خاک رس متورم‌شونده استفاده‌شده در این تحقیق رس بنتونیت به رنگ سفید مایل به سبز بود. این خاک از قرصه‌های وسیع و گسترده خاک‌های متورم‌شونده معدن مهرجان، واقع در استان

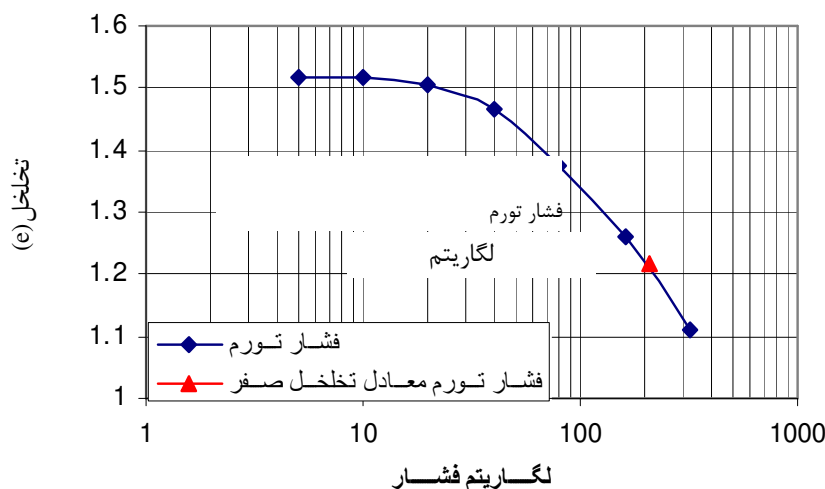
جدول ۳. نتایج طبقه‌بندی و شاخص خمیری و رطوبت بهینه خاک متورم‌شونده مطالعه‌شده

نوع خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص خمیری	طبقه‌بندی خاک	رطوبت بهینه ماکزیمم خشک	وزن مخصوص
رس بنتونیتی	۲۱۱	۴۱	۱۷۰	CH	۲۵٪	۱٫۲۵ g/cm ³

برای تعیین پتانسیل تورم و مشخصات فیزیکی خاک مطالعه‌شده آزمایش‌های اولیه با دستگاه ادنومتر انجام شد. شکل ۳ منحنی آزمایش تعیین پتانسیل تورم خاک مینا را در مدت زمان ۳۱ روز (۴۴۶۴۰ min) و شکل ۴ منحنی فشار تورمی خاک اولیه را با تخلخل اولیه ۱٫۲۱۹ نشان می‌دهد. پتانسیل تورم، فشار تورم، و درصد تورم نمونه خاک استفاده‌شده که از نمودارهای بالا به‌دست آمده است در جدول ۴ می‌آید.



شکل ۳. منحنی پتانسیل تورم خاک اولیه مطالعه‌شده



شکل ۴. منحنی فشار تورم خاک مینا قبل از اصلاح الکترواسمزی

جدول ۴. مشخصات پتانسیل تورم، فشار تورم، و درصد تورم خاک مورد نظر قبل از بهسازی

درصد تورم (EI) (%)	فشار تورم (kPa)	پتانسیل تورم (mm)	ارتفاع اولیه نمونه (mm)
۹۱٫۳۳	۲۲۰	۱۸٫۲۶۷	۲۰

همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک اولیه مطالعه‌شده بر اساس طبقه‌بندی ASTM (جدول ۱) در طبقه خاک‌های با پتانسیل تورم‌پذیری بالا و بر اساس طبقه‌بندی (Chen, USBR 1975) و با توجه به جدول ۲ و ۳ و ۴ و شکل ۲ در طبقه خاک‌های با درجه تورم بسیار زیاد قرار می‌گیرد.

استعداد متورم شدن خاک در اجتماع کاتیون‌ها با ظرفیت کمتر بیشتر است. مطابق تست‌های فیزیکی مشخص گردید خاک درجه تورم بالایی دارد. تست‌های شیمیایی نشان می‌دهد علت تورم بالا وجود مقدار زیاد سدیم در خاک است.

دستگاه استفاده شده در تحقیق

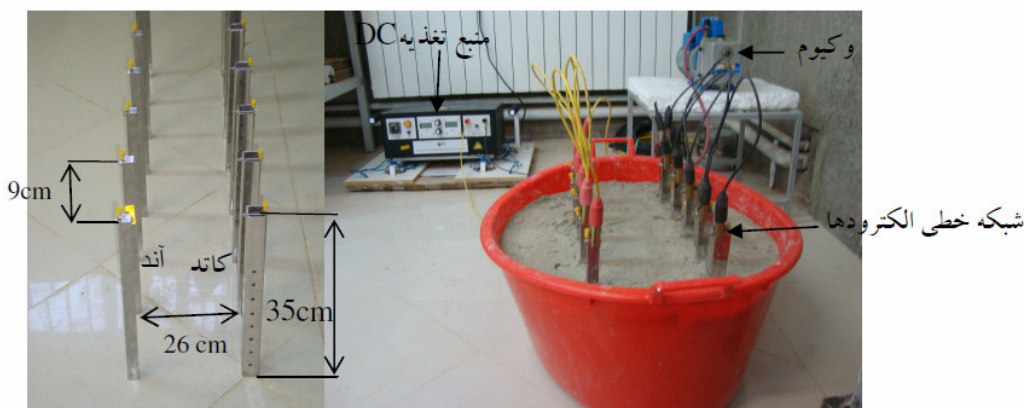
در شکل‌های ۵ و ۶ نمایی از دستگاه الکترواسمزی نیمه‌صحرایی طراحی شده برای این تحقیق دیده می‌شود. ابعاد سلول cm ۳۰×۴۰×۹۰ است. جنس الکترودهای مصرفی جهت کاتد و آند از فولاد زنگ‌نزن است. الکترودهای مصرفی جهت سطح مقطع مربعی به ابعاد ۲ cm² و الکترودهای مصرفی جهت کاتد سطح مقطع مربعی و مشبک به ابعاد ۳ cm² دارند. منبع تغذیه DC استفاده شده دارای ولتاژ خروجی ۰-۶۰ ولت و جریان ۱۰ آمپر با مزیت ثابت ماندن ولتاژ در زمان بهسازی طولانی است. در این تحقیق از شبکه خطی با تعداد ۵ جفت الکترودها با ۹ سانتی‌متر فاصله بین قطب‌های هم‌نام و ۲۶ سانتی‌متر فاصله بین قطب‌های غیر هم‌نام استفاده گردید تا امکان ایجاد یکنواختی بین خطوط شبکه‌های خطی میدان الکتریکی به وجود آید. همچنین برای تخلیه آب زهکش شده در کاتد (قطب منفی) از وکیوم استفاده شد.

جهت بررسی اثر جداگانه و هم‌زمان الکترواسمزی بر تورم خاک و تجزیه و تحلیل فرایندهای شیمیایی اتفاق افتاده، لازم بود آزمایش‌هایی بر عصاره اشباع خاک‌های تهیه شده و آب منفذی موجود در خاک انجام شود. در این آزمایش‌ها مهم‌ترین کاتیون‌های موجود در خاک، شامل Na⁺ و K⁺ و Ca²⁺ و Mg²⁺ تعیین شدند. در آزمایش‌های شیمیایی به مدت زمان الکترواسمزی با ولتاژهای متفاوت نیز توجه شد. جدول ۵ مشخصات شیمیایی خاک را قبل از بهسازی الکترواسمزی نشان می‌دهد.

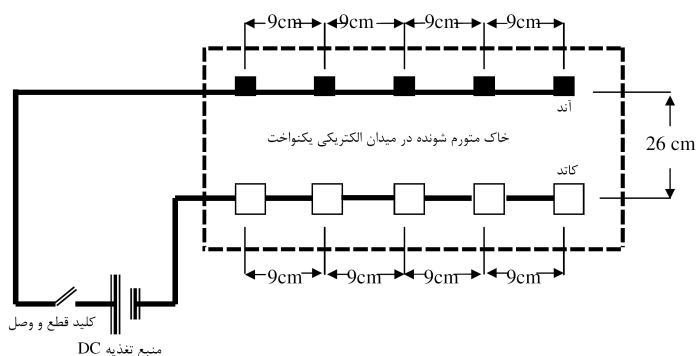
جدول ۵. مشخصات شیمیایی خاک مینا

pH	Na ⁺ (meg/lit)	K ⁺ (meg/lit)	Ca ²⁺ (meg/lit)	Mg ²⁺ (meg/lit)
۹٫۲۲	۲۱٫۷	۸٫۷۲	۰٫۱	۱٫۴۴

پتانسیل تورم خاک‌ها به شدت تحت تأثیر ترکیبات شیمیایی خاک‌هاست. هر چه میزان سدیم در خاک بیشتر باشد پتانسیل تورم خاک نیز بالاتر است. از طرفی وجود کلسیم باعث می‌شود خاک پتانسیل تورم پایین‌تری از خود نشان دهد. علت محاسبه مقدار کاتیون‌های Na⁺ و K⁺ و Ca²⁺ و Mg²⁺ این است که در حین فرایند بهسازی از میزان کاتیون‌های تک‌ظرفیتی کاسته و بر میزان کاتیون‌های چندظرفیتی افزوده می‌شود. این نکته مؤید تغییرات پتانسیل تورم خاک است. زیرا



شکل ۵. نمایی از دستگاه الکترواسمزی نیمه‌صحرایی و چینش الکترودها



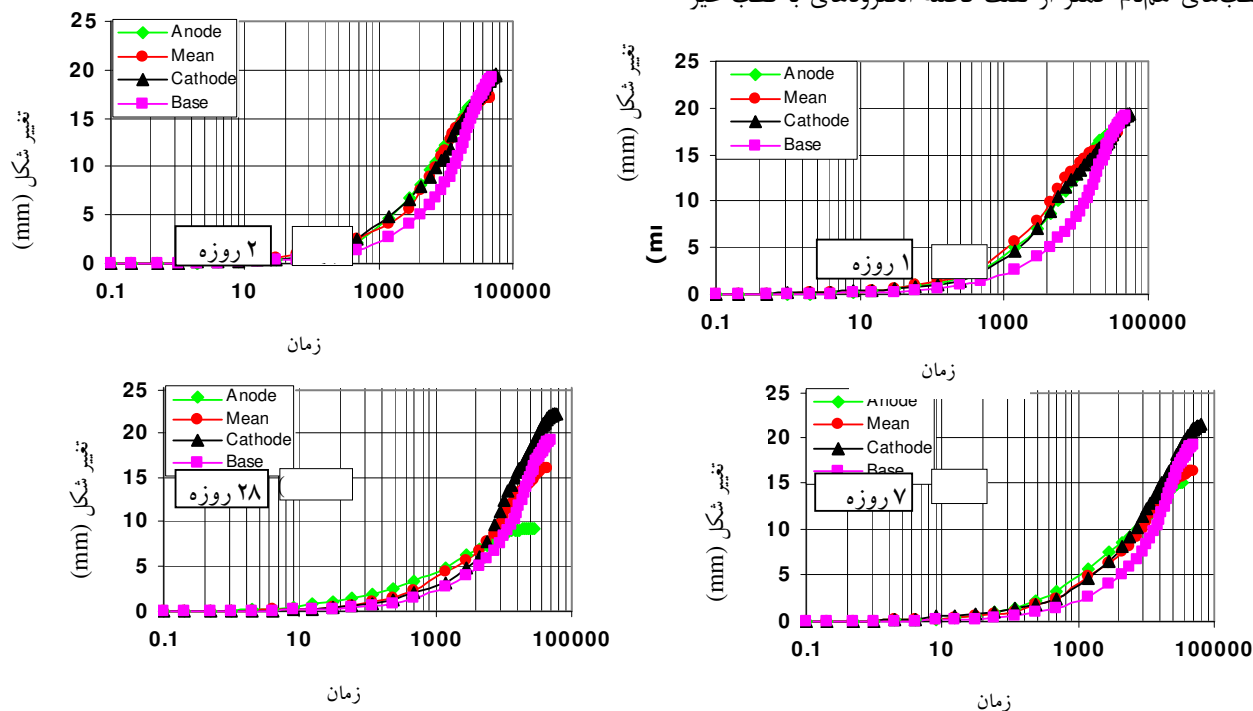
شکل ۶. نمای شماتیک شبکه خطی الکترودها در دستگاه الکترواسمزی

هم‌نام باشد. همچنین الکترودها باید کاملاً با خاک در تماس باشند (شکل‌های ۵ و ۶).

یافته‌ها و بحث

برای بررسی تأثیر بهسازی الکترواسمزی، نمونه‌هایی دست‌نخورده جهت آزمایش‌های پتانسیل تورم و تک‌محوری، به‌کمک نمونه‌گیر^۱ از سه ناحیه آند و کاتد و بین آند و کاتد نمونه‌برداری شد و آزمایش‌های مستقلى، از جمله تورم آزاد و مقاومت فشاری محصورنشده و شیمیایی، روی هر یک از نمونه‌ها انجام گرفت.

شکل ۷ نتایج تأثیر فرایند الکترواسمزی بر پتانسیل تورم خاک مورد مطالعه تحت ولتاژ ۱۲ ولت و زمان‌های اصلاحی ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه را نشان می‌دهد.



شکل ۷. نتایج تأثیر الکترواسمزی تحت ولتاژ ۱۲V و زمان‌های a-۱ روزه، b-۲ روزه، c-۷ روزه و d-۲۸ روزه بر پتانسیل تورم

پتانسیل تورم این نمونه در آند نسبت به نمونه خاک طبیعی در پایان روز بیست‌وهشتم بهسازی به میزان ۹,۲۳۳ کاهش نشان می‌دهد. بدین معنا که تحت ولتاژ ۱۲ ولت و پس از ۲۸ روز بهسازی تقریباً ۵۰/۵۴ درصد پتانسیل تورم در آند کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده همین مقدار اصلاح در آند است. به‌طور کلی می‌توان درصد کاهش پتانسیل تورم را برای هر یک از نمونه‌های بهسازی‌شده محاسبه کرد و آن را مانند آنچه از جدول ۷ می‌آید نشان داد.

نمونه‌های استفاده‌شده در تست‌ها بر اساس وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبتی معادل ۵ درصد بالاتر از رطوبت بهینه آماده گردید. بدین منظور در هر مرحله ۱۲۱,۰۴۲ کیلوگرم خاک بنتونیت با رطوبت ۳۰ درصد کاملاً همگن گشت و برای عمل‌آوری به مدت ۲۴ ساعت درون محفظه‌های در بسته نگهداری شد. سپس نمونه خاک عمل‌آوری‌شده با استفاده از چکش آزمایش تراکم استاندارد طی سه لایه درون قالب مخصوص آزمایش الکترواسمزی کوبیده شد. پس از آن، با تخلیه خاک محل الکترودها، الکترودها با فاصله‌هایی که بتوان بین آن‌ها میدان الکتریکی یکنواخت ایجاد کرد داخل خاک قرار داده شد. آن‌گاه، با اتصال شبکه الکترودها به منبع تغذیه DC، خاک تحت یک میدان الکتریکی یکنواخت قرار گرفت. برای ایجاد میدان الکتریکی یکنواخت حتماً باید فاصله الکترودها با قطب‌های هم‌نام کمتر از نصف فاصله الکترودهای با قطب غیر

جدول ۶ نتایج پتانسیل تورم بر پایه تورم آزاد را برای نمونه‌های بهسازی‌شده تحت ولتاژ ۱۲ و در زمان‌های ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. با افزایش زمان بهسازی مقدار پتانسیل تورم در آند و بینابین آند و کاتد کاهش می‌یابد. ولی در کاتد نتیجه‌ای معکوس دارد. بنابراین کمترین پتانسیل تورم در حوالی آند و پس از ۲۸ روز بهسازی اتفاق می‌افتد. چون مقدار پتانسیل تورم در نمونه قبل از بهسازی به ۱۸,۲۶۷ و بعد از ۲۸ روز بهسازی در آند به ۹,۰۳۴ می‌رسد،

¹ core catcher

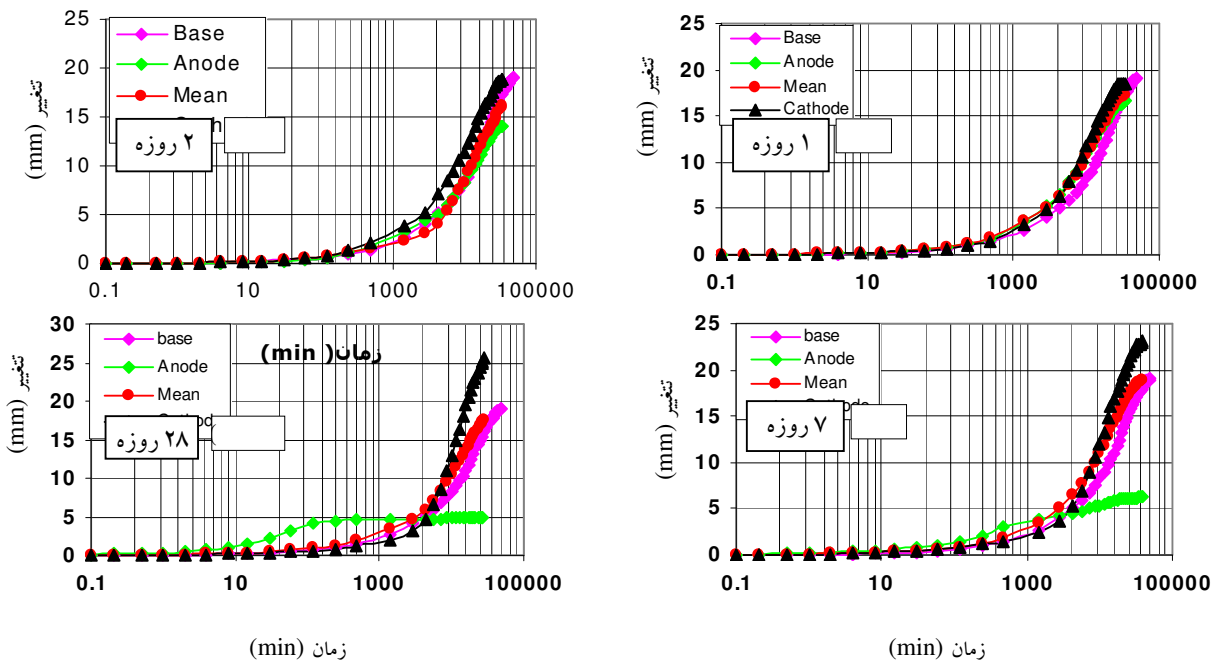
جدول ۶. پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۰.۲، ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۱۲ ولت در آند و کاتد و بین آند و کاتد

زمان بهسازی	آند	بین آند و کاتد	کاتد	قبل از بهسازی
۱ روزه	۱۵٫۸۲	۱۷٫۳	۱۷٫۹	
۲ روزه	۱۵٫۳	۱۷٫۰۹	۱۹٫۱۲	
۷ روزه	۱۴٫۷۶	۱۵٫۶۲	۲۰٫۴۲	
۲۸ روزه	۹٫۰۳۴	۱۵٫۰۹	۲۱٫۷۲	
				۱۸٫۲۶۷

پتانسیل تورم

جدول ۷. درصد کاهش پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۰.۲، ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۱۲ ولت در آند نسبت به نمونه قبل از بهسازی

زمان بهسازی	۱ روزه	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	قبل از بهسازی
درصد کاهش پتانسیل تورم در آند	۱۳٫۳۹	۱۶٫۲۴	۱۹٫۱۹	۵۰٫۵۴	۰



شکل ۸. نتایج تأثیر الکترواسمزی تحت ولتاژ ۲۴۷ و زمان‌های a- ۱ روزه، b- ۲ روزه، c- ۷ روزه و d- ۲۸ روزه بر پتانسیل تورم

چون مقدار پتانسیل تورم نمونه قبل از بهسازی به ۱۸٫۲۶۷ و بعد از ۷ و ۲۸ روز بهسازی در آند به ترتیب به ۹٫۰۳۴ و ۴٫۵۱ رسیده‌اند پتانسیل تورم این نمونه‌ها در آند نسبت به نمونه خاک طبیعی در پایان روز هفتم بهسازی در حدود ۱۲٫۲۴۹ و در پایان روز بیست‌وهشتم بهسازی در حدود ۱۳٫۷۵۷ کاهش نشان می‌دهد. بدین معنا که تحت ولتاژ ۲۴ ولت پس از ۷ روز بهسازی تقریباً ۶۷ درصد و پس از ۲۸ روز بهسازی تقریباً ۷۵ درصد پتانسیل تورم در حوالی آند کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان درصد کاهش پتانسیل تورم را برای

شکل ۸ نتایج تأثیر فرایند الکترواسمزی بر پتانسیل تورم خاک مطالعه‌شده تحت ولتاژ ۲۴ ولت و زمان‌های اصلاحی ۱، ۲، ۷ و ۲۸ روزه با نمونه‌های گرفته‌شده از مجاورت آند و کاتد و بین آند و کاتد را نشان می‌دهد. نتایج پتانسیل تورم بر پایه تورم آزاد برای نمونه‌های بهسازی‌شده تحت ولتاژ ۲۴ و در زمان‌های ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که با افزایش زمان بهسازی مقدار پتانسیل تورم در آند و بین‌آند و کاتد کاهش می‌یابد (جدول ۸). پس کمترین پتانسیل تورم در حوالی آند و بعد از ۷ و ۲۸ روز بهسازی اتفاق می‌افتد.

هر یک از نمونه‌های بهسازی شده به صورت آنچه در جدول ۹ می‌آید محاسبه کرد و نشان داد. نتایج پتانسیل تورم بر پایه تورم آزاد برای نمونه‌های بهسازی شده تحت ولتاژ ۴۸ و در زمان‌های ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روز پتانسیل تورم در حوالی آند و بعد از ۲، ۷ و ۲۸ روز بهسازی اتقاق می‌افتد.

جدول ۸. پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۱، ۲، ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۲۴ ولت در آند و کاتد و بین آند و کاتد

زمان بهسازی	آند	بین آند و کاتد	کاتد	قبل از بهسازی
۱ روزه	۱۵٫۸	۱۷٫۰۲	۱۸٫۰۲۵	
۲ روزه	۱۴٫۰۱۶	۱۶٫۱۷۶	۱۸٫۸۴	
۷ روزه	۶٫۰۱۸	۱۴٫۳۴۶	۲۲٫۱۹	
۲۸ روزه	۴٫۵۱	۱۳٫۹۴۶	۲۴٫۲۸	
				۱۸٫۲۶۷

جدول ۹. درصد کاهش پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۲۴ ولت در آند نسبت به نمونه قبل از بهسازی

زمان بهسازی	۱ روزه	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	قبل از بهسازی
درصد کاهش پتانسیل تورم در آند	۱۳٫۵	۲۳٫۲۷	۶۷٫۰۵	۷۵٫۳۱	۰

جدول ۱۰. پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۱، ۲، ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۱۲ ولت در آند و کاتد و بین آند و کاتد

زمان بهسازی	آند	بین آند و کاتد	کاتد	قبل از بهسازی
۱ روزه	۱۳٫۱۵۷	۱۶٫۵۸	۱۸٫۱۵	
۲ روزه	۱۰٫۱۶۸	۱۳٫۹۹۳	۲۱٫۶۰۶	
۷ روزه	۵٫۴۱۲	۱۳٫۲۹۹	۲۷٫۷۴	
۲۸ روزه	۳٫۰۴۲	۱۲٫۷۸۶	۲۹٫۸۷۶	
				۱۸٫۲۶۷

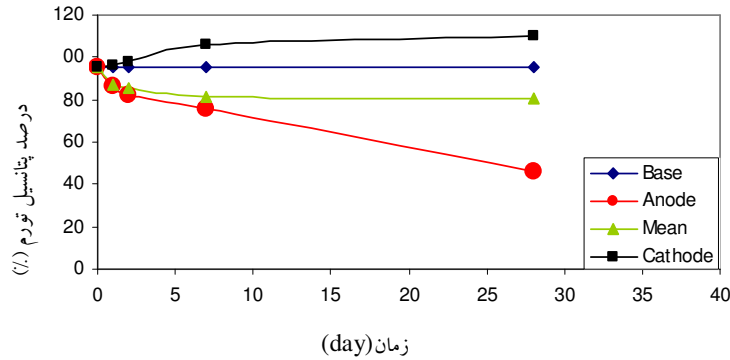
پتانسیل تورم در قطب کاتد (منفی) می‌شود. شکل‌های ۹ تا ۱۱ تأثیر زمان را در اصلاح خاک‌های متورم‌شونده به وسیله الکترواسمزی نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان اصلاح میزان پتانسیل تورم در آند و در بینابین نمونه به‌طور محسوسی کاهش و به موازات آن در قطب کاتد پتانسیل تورم افزایش می‌یابد. بدین معنا که فرایند الکترواسمزی قادر است نمونه‌های با پتانسیل تورم بالا را فقط در قطب آند و بین آند و کاتد اصلاح کند.

مقدار درصد کاهش پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از بهسازی تحت ولتاژ ۴۸ ولت در جدول ۱۱ می‌آید. پس بهترین نمونه بهسازی شده تحت ولتاژ ۴۸ ولت پس از ۲۸ روز بهسازی در حوالی آند وجود خواهد داشت و در این نمونه تقریباً ۸۳٫۳ درصد پتانسیل تورم کاهش می‌یابد.

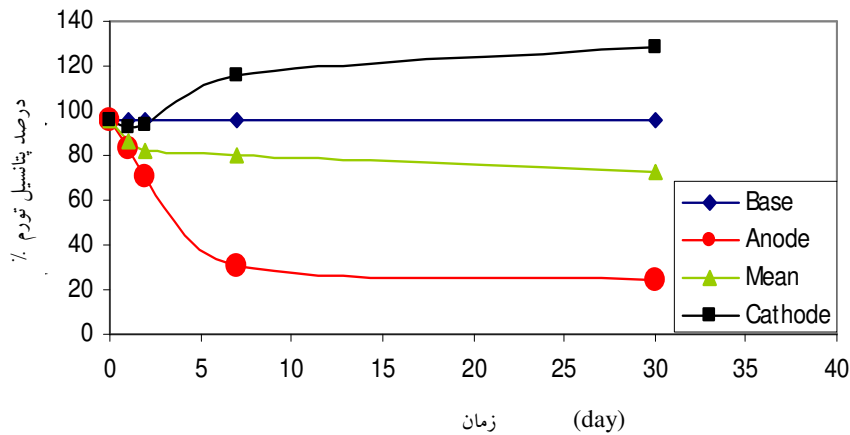
نتایج نشان می‌دهد اصولاً فرایند الکترواسمزی همراه کاهش پتانسیل تورم در قطب آند و تبدیل نمونه‌ای با پتانسیل تورم‌پذیری بالا به نمونه‌ای با پتانسیل تورم‌پذیری کم در قطب مثبت و بینابین سبب تغییرات کم و حتی در مواردی افزایش

جدول ۱۱. درصد کاهش پتانسیل تورم نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی در زمان‌های ۱، ۲، ۷ و ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۴۸ ولت در آند نسبت به نمونه قبل از بهسازی

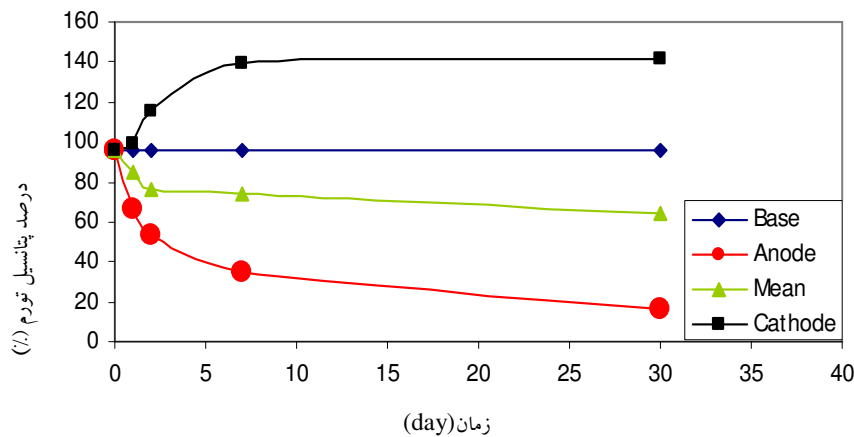
زمان بهسازی	۱ روزه	۲ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	قبل از بهسازی
درصد کاهش پتانسیل تورم در آند	۲۷٫۹۷	۴۴٫۳۳	۷۰٫۳۷	۸۳٫۳۴	۰



شکل ۹. درصد پتانسیل تورم پس از اصلاح الکترواسمزی در زمان‌های ۱ تا ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۱۲



شکل ۱۰. درصد پتانسیل تورم پس از اصلاح الکترواسمزی در زمان‌های ۱ تا ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۲۴



شکل ۱۱. درصد پتانسیل تورم پس از اصلاح الکترواسمزی در زمان‌های ۱ تا ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۴۸

۲۴ ولت دارد.

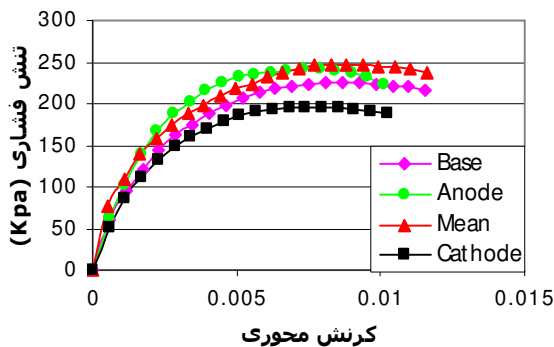
شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان می‌دهند با افزایش ولتاژ و افزایش زمان اصلاح از میزان پتانسیل تورم خاک کاسته می‌شود. با توجه به پیشنهاد USBR، مبنی بر اینکه اگر پتانسیل تورم خاک کمتر از ۱۰ باشد آن خاک در دسته خاک‌های با تورم بسیار پایین قرار می‌گیرد، می‌توان اظهار کرد ۵ نمونه این

شیب منحنی تغییرات زمان در مقابل درصد پتانسیل تورم روند پرشتاب تغییرات طی هفت روز اول اصلاح را نشان می‌دهد؛ به نحوی که مقادیر پتانسیل تورم برای زمان‌های ۷ و ۲۸ روزه در قطب آند بسیار به هم نزدیک است. نتیجه مهم چنین واقعیتی حکایت از کفایت زمان اصلاح ۷ روزه برای خاک‌های با پتانسیل تورم بالا در حوالی آند و تحت تأثیر ولتاژ

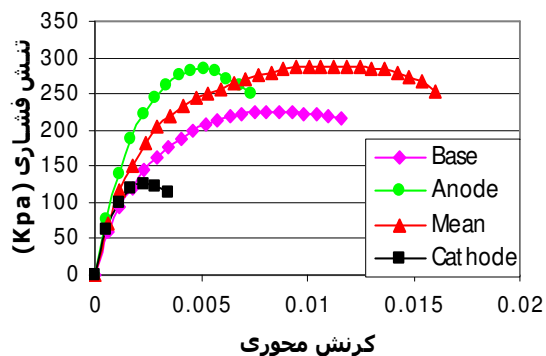
در پی این اتفاق، مهم‌ترین کاتیون‌های موجود در خاک نظیر Na^+ از قطب مثبت به سمت قطب منفی حرکت می‌کند. این امر سبب کاهش پتانسیل تورمی خاک در حوالی آند و افزایش آن در حوالی کاتد می‌شود.

شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ تغییرات مقاومت فشاری محصورنشده خاک را در اثر اعمال فرایند الکترواسمزی در زمان‌های اصلاحی مختلف نشان می‌دهند. ضمناً به علت بهینه‌بودن ولتاژ ۲۴ ولت از نمودارهای به‌دست‌آمده تحت ولتاژهای ۱۲ و ۲۴ ولت صرف‌نظر شده است.

گراف‌ها نشان می‌دهند تغییرات مقاومت تک‌محوری با زمان برقراری جریان الکترواسمزی وابستگی زیادی دارند؛ به نحوی که روند تغییرات مقاومت تک‌محوری با زمان الکترواسمزی ۷ تا ۲۸ روزه در آند از سطح بالایی برخوردار است و عمده تغییرات در مقاومت تک‌محوری نیز در همین بازه زمانی به‌وجود می‌آید و این مسئله می‌تواند مثالی از یک واکنش پوزولانی باشد که تأثیر آن در درازمدت مشاهده می‌شود. ولی عمده تغییرات مقاومت تک‌محوری بین آند و کاتد ۷ روز اولیه پس از برقراری جریان الکتریکی است. این واقعیت را می‌توان به گرمای هیدراسیون بیشتر تولیدشده در روزهای اولیه برای نمونه‌های بهسازی‌شده ارتباط داد؛ به‌طوری‌که بعضاً دمای خاک در حین انجام گرفتن آزمایش به ۵۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسید.



(a)



(b)

شکل ۱۳. نتایج تأثیر الکترواسمزی تحت ولتاژ ۲۴ و زمان‌های a - (روزه و - ۲۸ روزه بر مقاومت فشاری محصورنشده

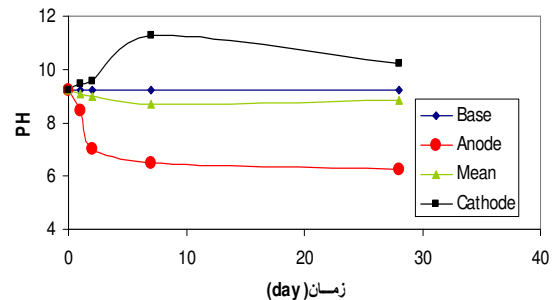
تحقیق به نحو مناسبی اصلاح و بهسازی شده‌اند که عبارت‌اند از:

۱. نمونه اصلاح‌شده با ولتاژ ۱۲ ولت و زمان اصلاح ۲۸ روزه؛
۲. نمونه اصلاح‌شده با ولتاژ ۲۴ ولت و زمان اصلاح ۷ روزه؛
۳. نمونه اصلاح‌شده با ولتاژ ۲۴ ولت و زمان اصلاح ۲۸ روزه؛
۴. نمونه اصلاح‌شده با ولتاژ ۴۸ ولت و زمان اصلاح ۷ روزه؛
۵. نمونه اصلاح‌شده با ولتاژ ۴۸ ولت و زمان اصلاح ۲۸ روزه.

همان‌طور که مشاهده می‌شود برای ولتاژهای ۲۴ ولت و ۴۸ ولت زمان اصلاح ۷ روزه بهینه است؛ درحالی‌که برای ولتاژ ۱۲ روزه تغییرات تا زمان ۲۸ روزه با شیب یکنواخت نیز ادامه پیدا می‌کند و در این ولتاژ یگانه نمونه‌ای که در طبقه خاک‌های با درصد تورم پایین قرار می‌گیرد نمونه‌ای است که در مدت زمان ۲۸ روز تحت ولتاژ الکترواسمزی قرار گرفته است. گفتنی است با توجه به پتانسیل تورم ثبت‌شده پتانسیل تورم همه نمونه‌ها نسبت به پتانسیل تورم نمونه طبیعی کمتر است.

نتایج نشان می‌دهد اقتصادی‌ترین نتیجه ۷ روز بهسازی تحت ولتاژ ۲۴ ولت کاملاً بهینه است؛ به نحوی که تغییرات کمی در پتانسیل تورم برای نمونه ۷ و ۲۸ روزه ثبت شده است.

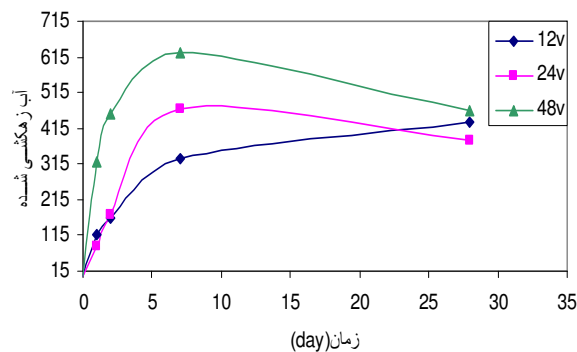
برای آگاهی از نوع برهمکنش خاک در اثر اعمال ولتاژ مستقیم بر آن آزمایش شیمیایی تعیین PH در زمان‌های مختلف اصلاح و در حوالی کاتد و آند و بینابین نمونه‌ها انجام شد. شکل ۱۲ تغییرات PH نمونه‌های تحت ولتاژ ۲۴ ولت را بررسی می‌کند.



شکل ۱۲. نتایج PH خاک آزمایش‌شده پس از اصلاح الکترواسمزی تحت ولتاژ ۲۴ ولت در زمان‌های ۱ تا ۲۸ روزه در آند و کاتد و بین آند و کاتد

به موازات تغییرات پتانسیل تورم، PH نمونه نیز تغییر می‌کند. بر اساس شکل ۱۲ در حوالی آند (قطب مثبت) با گذشت زمان PH نمونه‌ها کاهش می‌یابد، ضمن آنکه روند تغییرات پارامتر مذکور تا زمان اصلاح ۷ روزه محسوس‌تر است؛ درحالی‌که در حوالی کاتد PH نمونه‌ها با گذشت زمان اصلاح افزایش می‌یابد. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت، با کاهش پتانسیل تورم‌پذیری، PH خاک نیز کاهش پیدا می‌کند. مهم‌ترین دلیل این واقعیت حرکت آب منفذی از قطب آند به سمت قطب کاتد در اثر ایجاد میدان الکتریکی اعمال شده است.

با بررسی منحنی‌های مقاومت فشاری محصورنشده چنین استنباط می‌شود که بهسازی الکترواسمزی با گذشت زمان اصلاح سبب افزایش قابل ملاحظه مقاومت تک‌محوری خاک مورد مطالعه در حوالی آند می‌گردد؛ به نحوی که پس از ۷ روز مقاومت خاک نسبت به نمونه اولیه ۲,۳۹ برابر و پس از ۲۸ روز ۵,۸۷ برابر افزایش نشان می‌دهد. این موضوع مناسب بودن مقدار ولتاژ ۲۴ ولت را بر نمونه مطالعه شده نشان می‌دهد. زیرا تحقیقات پیشین نشان می‌دهد در صورتی که ولتاژ اعمالی بر نمونه خاک بیشتر از حد بهینه باشد سبب ترک‌خوردگی خاک می‌شود.



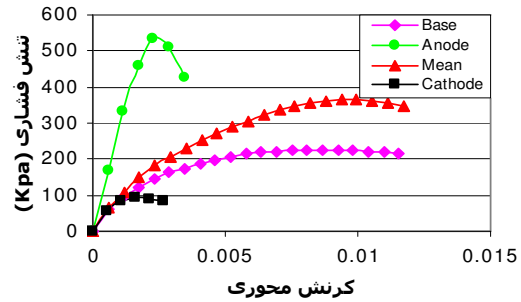
شکل ۱۴. نمودار تغییرات آب حفره‌ای خروجی، زمان پس از ۱ و ۲ و ۷ و ۲۸ روز بهسازی الکترواسمزی تحت ولتاژ ۱۲ و ۲۴ و ۴۸ ولت

شکل ۱۶ نتایج مقدار آب زهکش شده را حین فرایند بهسازی تحت ولتاژها و زمان‌های اصلاحی متفاوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش ولتاژ و افزایش زمان اصلاحی تا ۷ روز مقدار آب منفذی زهکش شده افزایش می‌یابد؛ ضمن آنکه برای زمان اصلاح بیش از ۷ روز از میزان آب زهکش شده مقداری کم می‌شود. علت این موضوع را می‌توان به پدیده‌هایی نظیر تبخیر سطحی، ایجاد ترک‌خوردگی، یونیزه شدن الکترودهای آند، و به‌طور کلی کاهش دانسیته جریان نسبت داد.

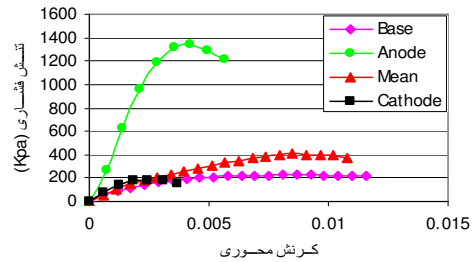
جدول ۱۲. مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌ها بعد از جریان الکترواسمزی تحت ولتاژ ۲۴ ولت در حوالی آند و کاتد و بین آند و کاتد

نمونه	نمونه ۱ روزه	نمونه ۲ روزه	نمونه ۷ روزه	نمونه ۲۸ روزه
اصلاح نشده	آند	بین آند و کاتد	کاتد آند و کاتد	کاتد آند و کاتد
مقاومت (kPa)	۲۴۱	۲۴۵	۲۸۳ ۱۹۵	۲۸۸
			۵۳۶ ۱۲۶	۳۶۶
			۱۳۴۱ ۹۴	۴۰۲
			۱۷۸	

پروژه‌هایی نظیر کانال‌های آبیاری و سدهای خاکی و پی‌سازه‌ها، می‌توان بر ضرورت اصلاح این‌گونه خاک‌ها تأکید کرد. بهسازی الکترواسمزی روشی مدرن جهت اصلاح خاک‌های متورم‌شونده است. با مطالعه نتایج این تحقیق می‌توان گفت:

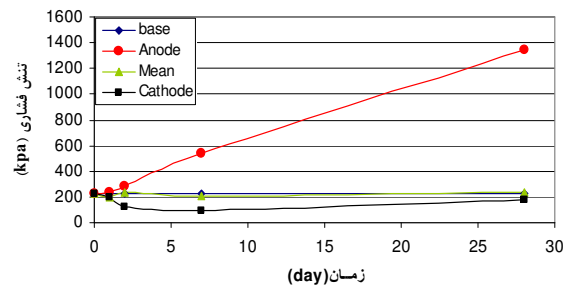


(a)



(b)

شکل ۱۴. نتایج تأثیر الکترواسمزی تحت ولتاژ ۲۴ و زمان‌های a - ۷ روزه و - ۲۸ روزه بر مقاومت فشاری محصورنشده



شکل ۱۵. مقاومت فشاری محصورنشده پس از اصلاح الکترواسمزی در زمان‌های ۱ تا ۲۸ روزه تحت ولتاژ ۲۴

جدول ۱۲ نتایج طبقه‌بندی از لحاظ مقاومتی بر مبنای نتایج آزمایش تک‌محوری در زمان‌های متفاوت تحت اختلاف پتانسیل ۲۴ ولت، پس از جریان الکترواسمزی برای نمونه‌های برداشته شده از نواحی آند و کاتد و بین آند و کاتد را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در یک جمع‌بندی کلی، ضمن اشاره به اهمیت شناخت خاک‌های متورم‌شونده، به دلیل گستره وسیع آن‌ها و از حیث مشکلات ژئوتکنیکی به‌وجودآورده برای ابنیه‌ها و خاکریزها، در

۴. زمان بهینه در اصلاح خاک متورم‌شونده با روش الکترواسمزی ۷ روز است؛

۵. به‌طور کلی بین نمونه‌های بهسازی‌شده با ولتاژهای ۱۲۷ و ۲۴۷ و ۴۸۷ نمونه اصلاح‌شده پس از ۲۸ روز در آند و بین آند و کاتد و همچنین در کاتد بعد از ۱۰ روز بهسازی دارای کمترین پتانسیل تورم‌اند؛

۶. به دلیل آنکه نرخ کاهش پتانسیل تورم نمونه بهسازی‌شده در ولتاژهای ۲۴۷ و ۴۸۷ پس از ۷ روز بهسازی کند می‌شود، بهترین نتیجه در زمان ۷ روز و با ولتاژ ۲۴ ولت است.

REFERENCES

- Acar, Y. B. (1992). "Electro Kinetic Soil Processing", ASCE Geotechnical Publication: No. 30, 1420-1432.
- Askari, F, and Fakher, A, (1994). "Swelling and dispresivity of from geotechnical engineering view", Jahad Daneshgahi, Tehran Publication, (in Farsi).
- Bjerram, L., Moum, J., and Eide, O. (1967). "Application of Electro-osmosis to a Foundation Problem in a Norwegian Quick Clay", *Geotechnique*, 17 (3), 214-235.
- Burnotte, F., Lefebvre, G., and Grondin, G. (2004). "A Case Record of electroosmotic consolidation of clay with improved soil-electrde contact" *Can, Geotech. J.* 41: 1038-1053.
- Cassagrande, L. (1947). "The Application of Electro-Osmosis to Practical Problem in Foundations an Earth Work", Department of Scientific and Industrial Research, Building Research, London, England, Technical Paper, No.30, 22 p.
- Chen, F. H. (1975). "Foundation on expansive soil", scientific publishing company.
- Cundy, A., Hopkinson, L., and Faulkner, D. (2005). "Ferric Iron Re-remediation and Stabilisation", *Environmental Chemistry Group Bulletin*.
- Das, B. M. (1984). "Prineipales of foundation Engineering", PWS-Kem Publishing Company, Boston, USA.
- Mitchell, J. K. (2005). "Fundamentals of soil behavior", 3rd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Morris, D. V., Hillis, S. F., and Caldwell, J. A. (1985). "Improvement of Sensitive Silty clay Electroosmosis", *Canadian Geotechnical Journal*, 22 (1), 17-24.
- Ou, C-Y., Chien, S-C., and Chang, H-H. (2009). "Soil impr-ovement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: field tests ", *Can. Geotech. J.* 46: 727-733.

۱. با اعمال جریان الکتریکی مستقیم (DC) و برقراری میدان الکتریکی یکنواخت بر مقطع نیمه‌صحرایی تشریح‌شده با گذشت زمان از پتانسیل تورمی خاک در حوالی آند به‌شدت کاسته می‌گردد. این به معنای اصلاح کامل مقطعی ۱۰ سانتی‌متری در عمق کامل دستگاه مورد نظر است؛

۲. به موازات تغییر در میزان پتانسیل تورمی خاک، مقدار PH نمونه‌ها نیز تغییر می‌کند؛ به‌نحوی که در حوالی آند از میزان PH نمونه‌ها کاسته می‌شود؛

۳. در اثر اعمال فرایند الکترواسمزی در حوالی آند بر مقدار مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها افزوده می‌شود؛