

استفاده از روش الکترواسمزی به منظور تسریع خروج آب در خاک‌های ریزدانه

محمد ناصح^۱، علی رئیسی استبرق^۲، مهرداد مقدس^{۳*}

۱. کارشناس ارشد گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی گروه آبیاری و آبادانی دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۹/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۶/۳۰)

چکیده

امروزه استفاده از فرایند الکترواسمزی در به‌حرکت‌درآوردن آب از محیط خاک یکی از روش‌های بسیار کارآمد به‌سازی خاک ریزدانه به‌شمار می‌رود. ایجاد میدان الکتریکی در محیط خاک به وسیله الکترودها موجب حرکت مولکول‌های آب و خروج آن‌ها از محیط متخلخل می‌شود. در این پژوهش، از سیستم جدید الکترواسمزی با نام زهکش‌های الکتریکی عمودی به منظور به‌سازی یک خاک ریزدانه در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های خاک رسی در حالت اشباع تهیه و با قرارگیری در مدل فیزیکی طراحی‌شده آزمایش شد. نتایج نشان داد، در صورت استفاده از روش الکترواسمزی، خروج آب از خاک بیشتر و با سرعت بالاتر انجام می‌شود. همچنین، میزان خروج آب با افزایش اختلاف ولتاژ بین قطب‌های کاتد و آند در خاک افزایش می‌یابد. اندازه‌گیری هدایت الکتریکی و pH در طول نمونه خاک نیز نشان داد در حین فرایند الکترواسمزی مقدار pH در قطب کاتد افزایش و در قطب آند کاهش می‌یابد و مقدار EC در هر دو قطب افزایش می‌یابد. همچنین ولتاژ اعمال‌شده در طول نمونه خاک از قطب آند به سمت قطب کاتد کاهش می‌یابد. بنابراین روش الکترواسمزی می‌تواند جایگزین خوبی برای نشست خاک به جای استفاده از سربار روی خاک باشد.

کلیدواژه‌گان: به‌سازی خاک، تحکیم سریع، زهکش الکتریکی عمودی

مقدمه

به‌سازی خاک به معنای افزایش مقاومت، کاهش نفوذپذیری، و بهبود خصوصیات مقاومتی خاک از دیدگاه مهندسی است. رسیدن به این هدف معمولاً با استفاده از روش‌هایی نظیر زهکشی خاک، تراکم خاک، و پیش‌بارگذاری انجام می‌شود. در خاک‌های درشت‌دانه عملیات زهکشی با حفر چاهک‌های ماسه‌ای به‌سرعت انجام می‌شود. ولی در خاک‌های ریزدانه این عملیات بسیار زمان‌بر است و زهکشی کامل و تحکیم این خاک‌ها قبل از اجرای پروژه ممکن است سال‌ها به طول بینجامد. یکی از روش‌های مفید و زودبازده برای خروج آب از این خاک‌ها استفاده از روش الکترواسمزی است. این پدیده ناشی از طبیعت قابل جابه‌جایی کاتیون‌های جذب‌شده به وسیله خاک و همچنین قطبی بودن مولکول‌های آب است. به‌سازی خاک با این روش با اعمال ولتاژ مستقیم به خاک از طریق الکترودهای جاسازی‌شده در خاک انجام می‌شود.

یکی از نخستین تئوری‌های پرکاربرد موجود در زمینه الکترواسمزی و خروج آب از خاک رسی تحت میدان الکتریکی

بر اساس نظریه هلمهلتز در سال ۱۹۸۷ پایه‌گذاری شد و سپس در سال ۱۹۱۴ اسمولوچوفسکی آن را اصلاح کرد (Sahang, 1997; Mitchell and Soga, 2005). بر اساس این تئوری، لوله‌های موئین موجود در خاک‌های رسی، که اشباع از آب‌اند، همانند یک خازن الکتریکی عمل می‌کنند؛ طوری که بارهای یکسان در نزدیکی سطح دیواره‌ها و بارهای مخالف به صورت محلول در آب موجود در لوله‌ها و در فاصله بسیار کمی از دیواره‌ها وجود دارند. همچنین، در این تئوری فرض بر آن است که اگر خاک اشباع موجود تحت یک میدان الکتریکی قرار گیرد، توده بارهای موجود در لایه میانی، که همگی دارای بار مثبت‌اند (شکل ۱)، لایه آب موجود در لوله‌های موئین را در راستای جریان به حرکت درمی‌آورند. توزیع سرعت جریان در داخل لوله موئین در شکل ۱ می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت در نزدیکی دیواره‌ها به دلیل وجود بارهای منفی کم است و با حرکت به سمت مرکز لوله افزایش می‌یابد.

در این روش، که نخستین بار Casagrande در سال ۱۹۴۹ آن را پیشنهاد کرد، پس از اعمال ولتاژ، آب حفره‌ای از قطب مثبت (آند) به سمت قطب منفی (کاتد) حرکت می‌کند و در قطب منفی تخلیه می‌شود که این عمل خاک را محکم

* نویسنده مسئول: m.moghadas@ut.ac.ir

al (2009) با به کارگیری این روش نتیجه گرفتند که مقاومت برشی زهکشی نشده خاک را می توان افزایش داد.

در زمینه اثر پدیده الکترواسمز بر سرعت بخشیدن به تحکیم خاک های ریزدانه مطالعات بسیار کمی انجام شده است. Burnotte et al (2004) با اعمال اختلاف پتانسیل در دو طرف خاک در مقیاس آزمایشگاهی و مزرعه به این نتیجه رسیدند که می توان این روش را برای افزایش تحکیم خاک، تا ۱۲ درصد، به کار برد.

پژوهش های انجام شده در زمینه اثر الکترواسمز بر خصوصیات خاک فاقد اندازه گیری های شیمیایی است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی خصوصیات تحکیمی خاک، تغییرات pH و EC (هدایت الکتریکی) خاک در طول مدت آزمایش ها بررسی شد.

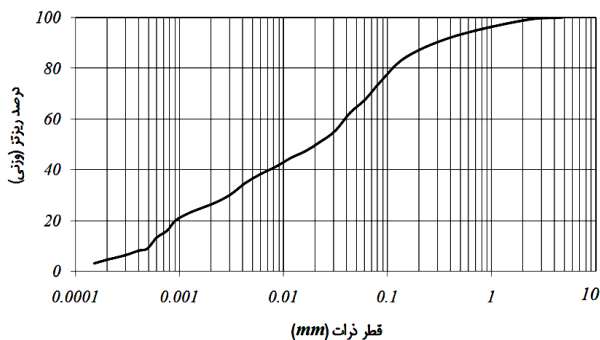
مواد و روش ها

خاک استفاده شده

خاک آزمایش شده از نواحی اطراف دشت تاکستان قزوین تهیه و آزمایش های حدود اتربرگ، دانه بندی، و تراکم استاندارد مطابق استانداردهای ASTM روی آن انجام شد که نتایج آن در جدول ۱ می آید. خاک استفاده شده مطابق سامانه طبقه بندی متحد رس با خواص خمیری پایین (CL) است. منحنی دانه بندی خاک استفاده شده در شکل ۲ می آید.

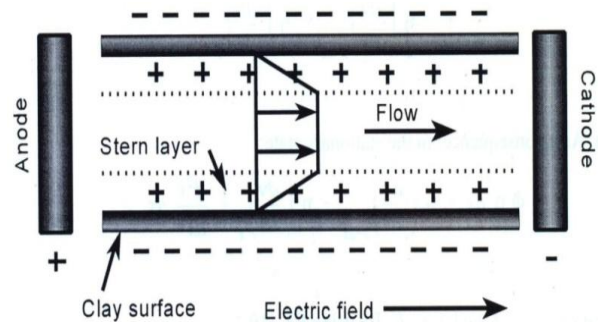
جدول ۱. خواص فیزیکی خاک استفاده شده

۴۹٫۵	حد روانی (%)
۲۴٫۶	حد خمیری (%)
۲۴٫۹	شاخص خمیری (%)
۱۶٫۸	حد انقباض (%)
۲٫۶۹	وزن مخصوص دانه های جامد (G _s)
۰٫۷۴	فعالیت (A)
۱۷	رطوبت بهینه (%)
۱۷٫۲	γ _{dmax} (N/m ³)



شکل ۲. منحنی دانه بندی خاک استفاده شده

می کند (Casagrande, 1949; Esrig, 1968; Wan and Mitchell, 1976; Rittirong et al, 2008).



شکل ۱. جریان الکترواسمزی در یک لوله مویینه بر اساس تئوری H-S (Mohammed and Antia, 1998)

معادله انتقال آب در شرایط الکترواسمزی را می توان به صورت رابطه ۱ و ۲ نشان داد:

$$q_{total} = q_h + q_e \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$q_{total} = -\frac{k_h}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - k_e \cdot \frac{\partial V}{\partial x} \quad (\text{رابطه ۲})$$

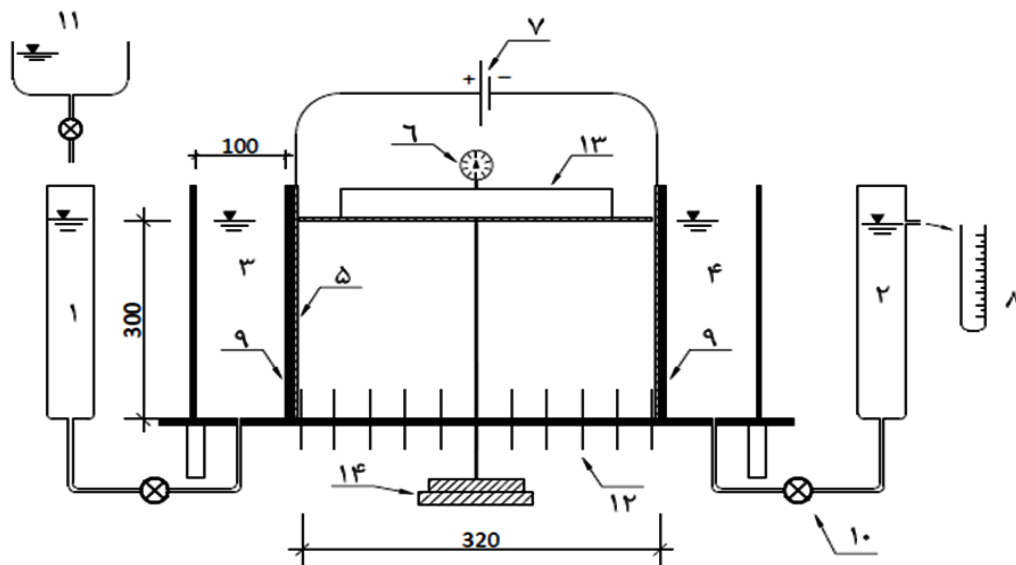
q_{total} کل جریان ترکیبی خارج شده از خاک در واحد سطح مقطع (m³/s)، q_h جریان خارج شده به واسطه قانون دارسی (m³/s)، q_e جریان الکترواسمزی خارج شده از محیط (m³/s)، k_e ضریب هدایت الکترواسمزی (m²/s.v)، و k_h ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s) است.

Casagrande (1949) با استفاده از این فرایند روشی را برای بهبود پارامترهای مکانیکی خاک ها و به منظور به سازی آنها ابداع کرد. از آن پس پژوهشگران مختلف از روش خروج آب از خاک برای اهدافی مانند پایداری شیب ها، کنترل نشست از زیر خاک ریزها (Casagrande, 1983)، افزایش مقاومت رس های حساس (Bjerrum et al, 1967; Lo et al, 1991)، افزایش ظرفیت باربری شمع ها (Soderman and Milligan, 1961)، و ترمیم و به سازی پی های تغییر شکل یافته (Fetzer, 1967) استفاده کردند. همچنین Lo et al (2000) این روش را برای احیای اراضی به کار گرفتند. Chew et al (2004) با استفاده از روش الکترواسمز تحت ولتاژهای مختلف به این نتیجه رسیدند که مقاومت برشی خاک در اثر استفاده از این روش افزایش می یابد. Rittrong et al (2008) الکترودهای قائم را برای به سازی دو نوع خاک رسی به کار بردند و تأثیر ولتاژها را بر پارامترهای مکانیکی خاک در آزمایشگاه و همچنین در صحرا بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که روش الکترواسمزی سبب بهبود خصوصیات مقاومتی خاک می شود. همچنین Ou et

که دو طرف آن دو منبع آب به ابعاد 10×10 سانتی‌متر مربع و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر تعبیه شد. شکل ۳ تصویر شماتیک اجزای مختلف این دستگاه را نشان می‌دهد. جنس دیواره‌های دستگاه از نوع پلکسی‌گلس و ضخامت آن، با توجه به نیروهای وارد شده بر هر بخش، متفاوت بود.

ابزار به کار رفته دستگاه آزمایش

در این پژوهش، برای بررسی تحکیم و نشست خاک و همچنین اندازه‌گیری میزان جریان آب خروجی از خاک، یک مدل فیزیکی ساخته شد. این دستگاه شامل یک محفظه برای قرارگیری نمونه خاک به ابعاد $30 \times 32 \times 10$ سانتی‌متر مکعب در قسمت میانی بود



- | | | |
|-----------------|----------------------------|-------------------------------|
| ۱- مخزن تخلیه | ۶- عقربه تغییر شکل سنج | ۱۱- مخزن آب |
| ۲- مخزن تخلیه | ۷- منبع تغذیه جریان مستقیم | ۱۲- پروبهای اندازه‌گیری ولتاژ |
| ۳- مخزن آند | ۸- استوانه مدرج | ۱۳- صفحه بارگذاری |
| ۴- مخزن کاتد | ۹- صفحه متخلخل | ۱۴- سربار |
| ۵- الکتروود EVD | ۱۰- شیر قطع و وصل جریان | |

شکل ۳. تصویر شماتیک مدل فیزیکی سلول الکترواسمزی (ابعاد بر حسب میلی‌متر است).

باعث عدم رسانایی و همچنین عدم خوردگی آن در برابر عبور جریان برق می‌شود. همچنین، صفحه بارگذاری نیز شامل صفحه‌ای مستطیل‌شکل با ابعاد $30/8 \times 9/8$ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر است. دلیل استفاده از این روش برای بارگذاری سهولت در تغییر سربار و یکنواختی توزیع بار روی نمونه خاک طی آزمایش‌های به‌سازی است. برای اندازه‌گیری میزان نشست نمونه تحت فرایند الکترواسمز و بارگذاری محدود از عقربه تغییر شکل سنج، که روی صفحه بارگذاری تعبیه شده، استفاده شد.

منبع تغذیه و تخلیه جریان آب

در دو سمت مخازن آند و کاتد دو استوانه پلاستیکی مدرج برای تنظیم بار آبی مجموعه کار گذاشته شده که منابع تغذیه و

مخازن آب

همان‌طور که اشاره شد، در دو سمت خاک دو ستون آب، که با نام‌های مخازن کاتد و آند در شکل ۳ نشان داده شده، در نظر گرفته شد. هدف از این کار اشباع نگه‌داشتن خاک و اندازه‌گیری میزان آب خارج شده از خاک است. حد فاصل این مخازن و نمونه خاک صفحه‌ای متخلخل قرار گرفت تا خاک همواره در شرایط اشباع نگه داشته شود.

سیستم بارگذاری و اندازه‌گیری نشست

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد، بارگذاری از قسمت پایین دستگاه انجام می‌شود؛ طوری که بار وارده از طریق میله نگه‌دارنده و صفحه بارگذاری به نمونه اعمال می‌شود. این میله از جنس آلومینیوم است و با پوشش پلاستیکی پوشانده شده که

تهیه نمونه‌ها

در این پژوهش، خاک آزمایش شده بدون ایجاد تراکم و با رساندن رطوبت آن به حد روانی تهیه شد. برای همه آزمایش‌ها همین شیوه به کار رفت. برای تهیه این نمونه‌ها از آب شرب عاری از عناصر خاص و مضر استفاده شد. برای به‌اشباع رساندن خاک ابتدا مقدار آب مورد نیاز برای رساندن خاک به رطوبت مورد نظر با توجه به رطوبت اولیه محاسبه و به تدریج به خاک اضافه شد. نمونه تهیه شده به مدت ۲۰ تا ۳۰ روز در محیطی که تبادل رطوبتی آن با محیط بیرون ناچیز است قرار داده شد. در این مدت همواره مخلوط تهیه شده با هم‌زن دستی به هم خورد تا مخلوط نهایی یکنواخت و دارای درجه اشباع مورد نظر باشد؛ طوری که در همه آزمایش‌ها پس از گذشت زمان مورد نظر از نقاط مختلف نمونه تهیه شده برای تعیین درصد رطوبت نمونه برداری شد و مشاهده شد توزیع رطوبت در نقاط مختلف یکسان و یکنواخت و برابر حد روانی خاک است. سپس نمونه تهیه شده در محفظه میانی دستگاه قرار گرفت.

نحوه آزمایش

برای انجام دادن آزمایش ابتدا الکترودها (EVD) در دو سمت محفظه اصلی به طور قائم جاگذاری شد. سپس مخلوط خاک آماده شده برای آزمایش داخل محفظه اصلی دستگاه ریخته شد و مدتی به همان حالت ماند تا مخلوط آماده شود و به فرم قالب آزمایش درآید و درون آن تثبیت شود. سپس، صفحه بارگذاری در محفظه اصلی بر نمونه خاک و عقربه تغییر شکل سنج روی صفحه بارگذاری قرار گرفت. هم‌زمان الکترودها به وسیله سیم‌های رابط به منبع تغذیه جریان مستقیم وصل شدند. نحوه اتصال الکترودها به منبع تغذیه به گونه‌ای بود که همواره الکترودها سمت چپ به قطب مثبت (آند) و الکترودها سمت راست به قطب منفی (کاتد) وصل شود. سپس، شیر تخلیه سمت مخزن آند بسته شد و با بارگذاری برابر ۱ کیلوپاسکال روی میله نگهدارنده صفحه بارگذاری (قسمت شماره ۱۴ در شکل ۳) و برقراری جریان مستقیم برق مرحله اصلی آزمایش شروع شد. آزمایش‌ها یک بار در حالت بدون استفاده از اختلاف پتانسیل و پنج بار با اختلاف پتانسیل‌های مختلف تکرار شدند.

با توجه به رطوبت موجود در خاک، بار وارده به نمونه خاک باعث تغییرات ناچیزی در ارتفاع نمونه خاک می‌شود. این موضوع در آزمایش‌های شاهد مطالعه شده است. بنابراین می‌توان همه حجم آب خروجی را مربوط به اعمال اختلاف پتانسیل به خاک و ناشی از جریان الکترواسمزی دانست. میزان

تخلیه جریان نامیده می‌شود. این استوانه‌ها از طریق لوله‌های پلاستیکی به مخازن آند و کاتد متصل شده که برای کنترل جریان آب از آن‌ها روی لوله‌های پلاستیکی شیرهای قطع و وصل جریان تعبیه شد. همچنین، روی منبع تخلیه جریان (قسمت شماره ۲ در شکل ۳) روزه‌ای تعبیه شده که در ترازوی مساوی با تراز خاک و آب در مخازن دیگر قرار دارد و محل تخلیه جریان الکترواسمزی و اندازه‌گیری آن است.

سیستم تأمین ولتاژ

در این پژوهش برای تأمین ولتاژ مستقیم از منابع تأمین‌کننده جریان برق مستقیم، که هر یک توانایی تأمین ولتاژ حداکثر ۴۰ ولت را دارند، استفاده شد. این منابع قابلیت تنظیم‌کنندگی جریان خروجی از خود را دارند که با اتصال سری آن‌ها به یکدیگر می‌توان جریان برق را با اختلاف پتانسیلی بالاتر از کل مجموعه دریافت کرد.

حسگرهای اندازه‌گیری جریان

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

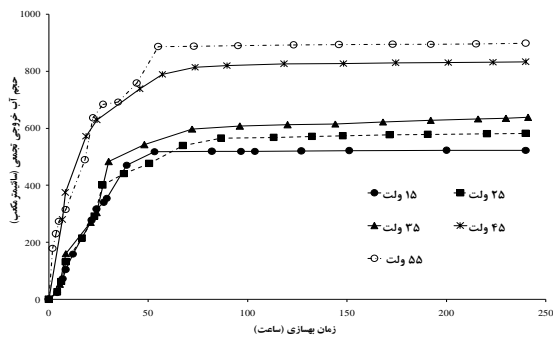
الکترودها

در به‌سازی خاک به روش الکترواسمزی، الکترودها نقش انتقال جریان الکتریسیته را به محیط متخلخل ایفا می‌کنند. الکترودها استفاده شده در این پژوهش مشابه الکترودهای بود که *Rittrong et al* (2008) استفاده کردند. این الکترودها از یک هسته مسی تشکیل شده که داخل یک پوشش پلیمری رساناست. روی سطح بیرونی پوشش پلیمری شیارهای کوچکی وجود دارد که نقش لوله‌های موئین را ایفا می‌کنند. در این حالت، ورقه مسی وظیفه انتقال جریان به محیط متخلخل را به عهده دارد و پوشش پلیمری نقش محافظ در برابر خوردگی ورقه مسی و همچنین کاهنده مسیر زهکشی را دارد. مجموعه این اجزا با یک پوشش ژئوسنتتیک به مثابه فیلتر محافظت می‌شوند. عرض این الکترودها ۹۵ میلی‌متر و ضخامت آن‌ها ۶ میلی‌متر است. این محصول با نام زهکش الکتریکی قائم (EVD^۲) شناخته می‌شود.

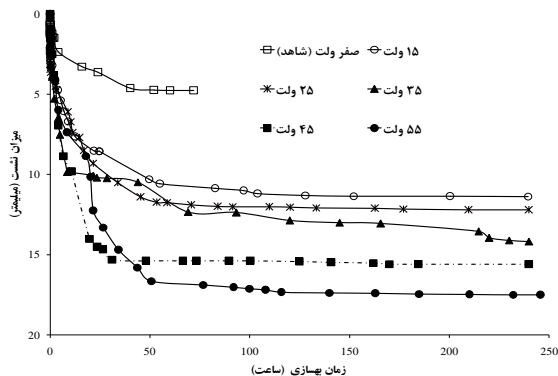
1. Probe
2. Electrical Vertical Drain

خروجی از نمونه بیشتر می‌شود؛ طوری که در زمان تعادل حجم آب خروجی در حالت استفاده از اختلاف ولتاژ ۵۵ ولت دو برابر حالتی است که از اختلاف ولتاژ ۱۵ ولت استفاده می‌شود. این نتیجه با نتایج پژوهش‌های محققانی مانند *Burnotte et al* (2004) همخوانی دارد.

شکل ۵ میزان نشست خاک را در ۶ آزمایش انجام‌شده و در طول زمان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که از اختلاف ولتاژ به نمونه خاک و در نتیجه از اعمال نیروی الکترواسمزی استفاده نشده است نشست خاک و زمان تعادل برای نشست نهایی خاک به ترتیب ۴ میلی‌متر و ۴۰ ساعت است. در حالی که با اعمال اختلاف ولتاژ در قطب‌های کاتد و آند میزان نشست افزایش و زمان تعادل کاهش یافت؛ طوری که در حالت استفاده از اختلاف ولتاژ ۵۵ ولت میزان نشست خاک حدود ۱۷ میلی‌متر و چهار برابر حالت عادی و زمان تعادل آن حدود ۵ ساعت و یک‌هشتم حالت عادی بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت استفاده از نیروی الکترواسمزی باعث افزایش نشست خاک و کاهش زمان لازم برای این کار می‌شود.



شکل ۴. تغییرات حجم آب خروجی از کاتد در ولتاژهای مختلف



شکل ۵. میزان نشست الکترواسمزی (در ولتاژهای مختلف)

با اعمال ولتاژ مستقیم به محیط الکترولیت، واکنش‌های الکتروشیمیایی در محیط توسعه پیدا می‌کنند که مهم‌ترین

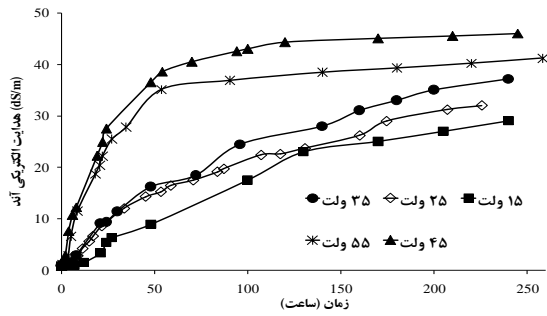
بار ۱ کیلوپاسکال نیز، با توجه به وزن صفحه بارگذاری در دستگاه ادئومتر (دستگاه استاندارد آزمایش تحکیم در آزمایشگاه) و فشاری که آن صفحه به تنهایی به سطح مقطع قالب تحکیم وارد می‌کند، در نظر گرفته شد.

پس از شروع هم‌زمان بارگذاری و اعمال ولتاژ مستقیم، اقدام به ثبت داده‌های مورد نظر در آزمایش در فواصل زمانی مشخص شد. میزان نشست نمونه به وسیله عقربه تغییر شکل‌سنج نصب‌شده بر صفحه بارگذاری انجام می‌شود. از آنجا که میزان تغییرات عقربه در آغاز زیاد است، فاصله قرائت‌ها در آغاز آزمایش کم بود و به تدریج افزایش یافت. میزان حجم جمع‌شده آب خروجی از سمت قطب کاتد به وسیله استوانه مدرجی که کنار روزنه نصب‌شده کنار مخزن تخلیه قرار دارد نیز توزین استوانه مدرج اندازه گرفته می‌شود. این پارامتر در طول هر آزمایش و به فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری شد. برای مشاهده و اندازه‌گیری میزان افت ولتاژ در طول نمونه خاک ولتاژ هر پروب به وسیله دستگاه مولتی‌متر دیجیتالی و در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری شد. برای بررسی تغییرات شیمیایی حادث‌شده بر اثر واکنش‌های الکتروشیمیایی رخ داده در مجموعه و همچنین حرکت یون‌ها، میزان پارامتر pH و هدایت الکتریکی آب در مخازن آند و کاتد در فواصل زمانی مشخص و در طول آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد.

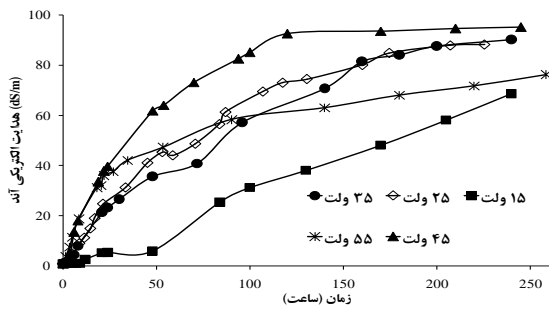
هر آزمایش تا زمانی ادامه یافت که میزان حجم آب خارج‌شده از قطب کاتد تقریباً برابر ۰ شد و در این زمان میزان نشست مجموعه نیز تقریباً ثابت شد. این زمان با توجه به شدت میدان الکتریکی مختلف متفاوت و به طور تقریبی برابر ۱۰ تا ۱۱ روز بود. در این پژوهش، به منظور بررسی اثر ولتاژ اعمال‌شده بر پدیده به‌سازی الکترواسمزی، آزمایش‌ها در ۶ گروه و با ولتاژهای ۰ (آزمایش شاهد)، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵ و ۵۵ ولت انجام گرفت.

یافته‌ها و بحث

آزمایش‌ها در ۶ مرحله انجام شد که یکی از آن‌ها در حالت عدم اعمال ولتاژ و بدون فرایند الکترواسمزی و پنج آزمایش دیگر با اعمال پنج اختلاف ولتاژ در قطب‌های کاتد و آند بود. شکل ۴ تغییرات حجم آب خروجی از کاتد را نسبت به زمان به‌ازای آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد. حجم آب خروجی از قطب کاتد در حالتی که از نیروی الکترواسمزی استفاده نشد بسیار ناچیز بود و در این نمودار نشان داده نشد. شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش اختلاف ولتاژ قطب‌های کاتد و آند میزان حجم آب

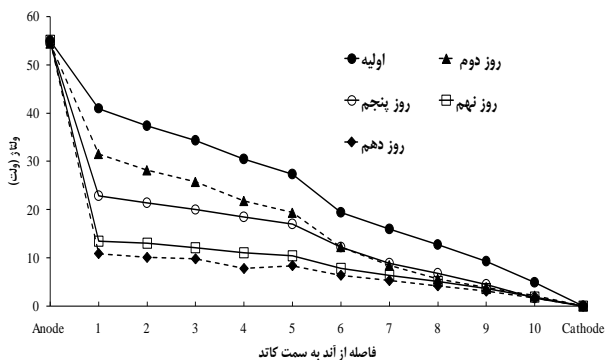


شکل ۷. تغییرات زمانی هدایت الکتریکی برای قطب مثبت (آند)



شکل ۸. تغییرات زمانی هدایت الکتریکی برای قطب منفی (کاتد)

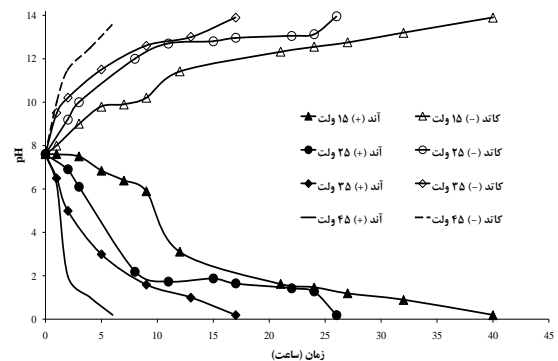
همان‌طور که اشاره شد، در طول هر آزمایش و در فواصل زمانی مشخص مقادیر ولتاژ در طول نمونه به وسیله دستگاه مولتی‌متر اندازه‌گیری شد. شکل ۹ نمونه‌ای از تغییرات ولتاژ را به‌ازای اختلاف پتانسیل ۵۵ ولت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ولتاژ اعمال شده در قطب آند به تدریج در طول خاک مستهلک می‌شود و در قطب آند به ۰ می‌رسد. البته شیب تغییرات ولتاژ خطی نیست و با فاصله گرفتن از قطب آند شیب تغییرات ولتاژ کمتر می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد به‌سازی خاک در نزدیک قطب آند بهتر از قطب کاتد صورت گیرد و آب تخلیه شده از نزدیک قطب آند در خاک بیشتر از آب پژوهش شده از نزدیک قطب کاتد باشد. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش با نتایج پژوهش‌های قبلی همخوانی دارد؛ لیکن در آن پژوهش‌ها به تغییرات هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک نپرداخته‌اند.



شکل ۹. تغییرات ولتاژ در طول نمونه برای آزمایش ۵۵ ولت

آن‌ها تغییرات pH و تولید گاز و گرما در محیط آزمایش است. به همین منظور، برای بررسی واکنش‌های رخ داده در محیط، میزان pH آب مخازن آند و کاتد اندازه‌گیری شد. شکل ۶ تغییرات pH را در این مخازن نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نزدیکی قطب مثبت گاز اکسیژن تولید شده و غلظت یون هیدروژن افزایش یافته است. همچنین با افزایش میزان ولتاژ در آزمایش‌ها زمان رسیدن به pH حداکثر و حداقل کاهش می‌یابد؛ طوری که در آزمایش پتانسیل ۱۵ ولت میزان این پارامتر در قطب آند پس از ۴۰ ساعت به میزان ۰٫۲ می‌رسد. ولی در آزمایش ۴۵ ولت فقط پس از ۶ ساعت از شروع آزمایش مقدار آن به ۰٫۲ می‌رسد. علت این موضوع آن است که افزایش ولتاژ در حقیقت عاملی برای افزایش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی است (Mohamedelhassan and Shang, 2001; Rittirong and Shang, 2005).

شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد تغییرات EC در مقابل زمان برای هر آزمایش با ولتاژ مشخص است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر سری از آزمایش‌ها با برقراری اختلاف پتانسیل در محیط خاک مقدار EC در هر دو مخزن آند و کاتد افزایش می‌یابد. برحسب نتایج به‌دست آمده، این افزایش رابطه نسبتاً مستقیمی با مقدار ولتاژ اعمالی دارد؛ طوری که در ولتاژ ۱۵ ولت در مخزن کاتد، پس از ۱۰ روز از شروع آزمایش، میزان این پارامتر از ۰٫۸۳ به ۶۸ دسی‌زیمنس بر متر رسید. ولی در آزمایش‌های ۲۵ و ۴۵ ولت مقدار این پارامتر بعد از ۱۰ روز به ترتیب به میزان ۸۷ و ۹۵ دسی‌زیمنس بر متر رسید. دلیل این موضوع آن است که هر چه مقدار ولتاژ اعمالی به کل محیط بیشتر باشد نیروی جاذبه دو قطب افزایش می‌یابد و یون‌های بیشتری را به سمت خود جذب می‌کند که باعث افزایش بیشتر مقدار هدایت الکتریکی در اطراف الکترودها می‌شود.



شکل ۶. مقایسه تغییرات پارامتر pH در ولتاژهای مختلف

معرفی نمادها

q_{total} کل جریان ترکیبی خارج شده از خاک در واحد سطح مقطع (m^3/s)
 q_h جریان خارج شده به واسطه قانون دارسی (m^3/s)
 q_e جریان الکترواسمزی خارج شده از محیط (m^3/s)
 k_e ضریب هدایت الکترواسمزی ($m^2/s.v$)
 k_h ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s)
 γ_w وزن واحد حجم آب (g/cm^3)
 γ_{dmax} وزن واحد حجم خشک بیشینه خاک (g/cm^3)
 ω درصد رطوبت بهینه خاک
 EC هدایت الکتریکی آب
 pH اسیدیته آب
 EVD زهکش الکتریکی عمودی

نتیجه گیری

با اعمال فرایند الکترواسمزی میزان نشست نسبت به حالت عادی افزایش و مقدار آن با افزایش اختلاف ولتاژ بین دو قطب آند و کاتد افزایش می یابد. همچنین، فرایند الکترواسمزی سبب تسریع خروج آب و کاهش زمان مورد نیاز برای نشست خاک می شود که با افزایش ولتاژ این زمان بیشتر کاهش می یابد. اسیدیته و هدایت الکتریکی اندازه گیری شده در خاک بیانگر افزایش pH در قطب کاتد و کاهش آن در قطب آند و افزایش EC در هر دو قطب کاتد و آند است. تغییرات ولتاژ در طول نمونه خاک نشان دهنده کاهش اختلاف ولتاژ از قطب آند به سمت قطب کاتد است؛ طوری که میزان کاهش ولتاژ در نزدیکی قطب آند بیشتر است.

سپاس گذاری

بدین وسیله از معاونت علمی و پژوهشی دانشگاه تهران که در تأمین مالی این تحقیق به شماره ۷۱۰۲۰۰۹/۱۰۱ مساعدت کردند تشکر و قدردانی می شود.

REFERENCES

- Bjerrum, L., Moum, J., and Eide, O. (1967). Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian Quick Clay. *Journal of Geotechnique*, 17(3), 214–235.
- Burnotte, F., Lefebvre, G., and Grondin, G. (2004). A case record of electroosmotic consolidation of clay with improved soil-electrode contact. *Canadian Geotechnical Journal*, 41: 1038-1053.
- Casagrande, L. (1949). Electro-osmosis in soils. *Journal of Geotechnique*, 1(3), 159–177.
- Casagrande, L. (1983). Stabilization of soils by means of electro-osmosis: state-of-the-art. *Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, ASCE*, 69(2), 255–302.
- Chew, S. H., Karunaratne, G. P., Kuma, V. M., Lim, L. H., Toh, M. L., and Hee, A. M. (2004). A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains. *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, 22(1), 17–35.
- Esrig, M. I. (1968). Pore pressures, consolidation, and electrokinetics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 94(4), 899–921.
- Fetzer, C. A. (1967). Electro-osmotic stabilization of West Branch Dam. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 93(4), 122–131.
- Lo, K. Y., Ho, K. S., and Incullet I. I. (1991). Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 28(1), 74–83.
- Lo, K. Y., Micic, S., Shang, J. Q., Lee, Y. N., and Lee, S. W. (2000). Electrokinetic strengthening of a soft marine sediment. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 10 (2), 133–144.
- Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005) Fundamentals of Soil Behavior. Wiley, New York, 3rd edn.
- Mohammed, A. M. O. and Antia, H. E. (1998). *Geoenvironmental Engineering*. Elsevier, Amsterdam.
- Mohamedelhasan, E. and Shang, J. Q. (2001). Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis. *Ground Improvement*, 5(1), 3–11.
- Ou, C. Y., Chien, S. C., and Chang, H. H. (2009). Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: field tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 46: 727- 733.
- Rittirong, A. and Shang, J. Q. (2005). Electro-Osmotic stabilization. Elsevier geo-engineering book series.
- Rittirong, A., Douglas, R. S., Shang, J. Q., and Lee, E. C. (2008). Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains. *Geosynthetics International journal*, 15(5), 369–381.
- Shang, J. Q. (1997). Zeta potential and electro-osmotic permeability of clay soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 627-631.
- Soderman, L. G. and Milligan, L. (1961). Capacity of friction piles in varved clay increased by electroosmosis. In: *Proceeding of the 5th International Conference on Soil and Foundation Engineering*, Paris, 2, 143-147.
- Wan, T. and Mitchell, J. K. (1976). Electro-osmotic consolidation of soils. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 102(5), 473–491.

