

# ارزیابی تأثیر بهسازی به روش الکترواسمزی بر خصوصیات مکانیکی خاک رس نرم

حدیث بی باک<sup>۱</sup>، نوید گنجیان<sup>۱\*</sup>، جهانگیر خزایی<sup>۲</sup>، امین بهمن پورا<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران، معماری و هنر، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

\* n.ganjian@srbiau.ac.ir

## چکیده

یکی از انواع روش‌های بهسازی خاک، روش الکتریکی است. در این روش تثبیت خاک‌های ریزدانه، به‌ویژه خاک‌های رسی اشباع، با کاهش ضخامت لایه آب دوگانه از طریق برقراری جریان الکتریکی انجام می‌شود. خاک رس نرم از جمله خاک‌های مسئله‌دار است، این خاک تحت تأثیر شرایط آب و هوایی قرار دارد و احداث سازه بر روی آن‌ها همواره با خطر مواجه است. در این مطالعه به‌منظور بهسازی و تثبیت خاک‌های رسی نرم از روش تزریق الکتروکینتیکی، که یکی از روش‌های تثبیت در حالت برجا بوده و از لحاظ زمان و هزینه بسیار به‌صرفه است استفاده شده است. به این منظور، در شرایط آزمایشگاهی لایه‌ای از خاک با درصد رطوبت و وزن مخصوص در محل در محفظه‌ای به ابعاد  $50 \times 30 \times 20$  cm<sup>3</sup> در پنج لایه متراکم شده و جریان مستقیم (DC) با ولتاژهای 1 و 1/5 به مدت 48 ساعت اعمال گردیده است. الکترودهای مورد استفاده از جنس آلومینیوم و گرافیت و در دو حالت میله‌ای و صفحه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج شاخص مطالعات نشان داد که استفاده از این روش سبب افزایش مقاومت فشاری محدود نشده از 98 kpa به 223 kpa به میزان 128٪، کاهش درصد رطوبت از 24 به 15/2 به میزان 37٪، کاهش شاخص خمیری از 24 به 10 به میزان 58٪ و کاهش تخلخل خاک از 0/675 به 0/443 نسبت به نمونه خاک بهسازی نشده می‌شود. نتایج تحلیل شیمیایی در بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی صحت نتایج فیزیکی را تایید می‌نماید. با توجه به آزمایش‌های درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و تحکیم مشخص گردید بهترین عملکرد مربوط به استفاده از الکترودهای آلومینیوم صفحه‌ای با ولتاژ 1/5 v/cm می‌باشد.

## کلمات کلیدی

خاک رس نرم، بهسازی الکترواسمزی، جنس الکتروده، شکل الکتروده.

یکی از روش‌های بهبود خاک‌های ریزدانه ناپایدار و نرم روش الکترواسمز است. الکترواسمزی اولین بار توسط رئوس در سال ۱۸۰۷ کشف شد. رئوس با اعمال یک جریان مستقیم به مخلوط رس و آب مشاهده نمود که آب در لوله‌های موئین تحت اثر میدان الکتریکی به سمت قطب منفی (کاتد) حرکت می‌کند. در حالی که مفهوم بهسازی خاک با استفاده از روش الکترواسمزی به کاساگراند نسبت داده شده است [۱].

تثبیت الکتروکینتیکی شامل الکترواسموز، الکترولیز، الکتروفورز و مهاجرت الکترونی است که مسئول تغییرات درون خاک هستند. جریان الکترواسمزی در خاک‌های رسی در کنار سایر عوامل، عمدتاً<sup>۱</sup> به دلیل وجود لایه آب دوگانه (DDL) در اطراف ذرات خاک رس رخ می‌دهد. لایه آب دوگانه شامل یک لایه خارجی نسبتاً متحرک و یک لایه ثابت (لایه داخلی DDL) است. تحت یک گرادیان الکتریکی ایجاد شده در خاک، بخشی از لایه آب دوگانه که قابلیت حرکت دارد (لایه خارجی) به سمت الکتروود با بار منفی حرکت می‌کند. حرکت بخش خارجی لایه آب دوگانه در درون محیط متخلخل یک کشش ویسکوز بر آب حفره‌ای وارد می‌کند و در نتیجه موجب حرکت آب در درون خاک می‌شود. الکترواسمز با خارج کردن آب حفرات و ایجاد فشار منفی باعث بهبود ویژگی‌های خاک می‌شود [۲، ۳]. روش تزریق الکتروکینتیکی، از جمله محدود روش‌های تثبیت در حالت برجا است که از لحاظ زمان و هزینه بسیار به صرفه است [۴]. اثرات ترکیبی در تثبیت الکتروکینتیکی باعث تغییر در خواص فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود [۵، ۶]. این روش کاربرد زیادی در مهندسی ژئوتکنیک و ژئوتکنیک زیست محیطی مانند تثبیت خاک، بهبود مقاومت، زهکشی خاک، اصلاح خاک، حذف یون‌های موجود در خاک، ظرفیت باربری دارد و محققین زیادی بر روی این موارد مطالعاتی انجام داده‌اند [۷-۱۲].

تحقیقات زیادی در این روش در زمینه بهبود مقاومت خاک رس انجام شده است. شانگ و همکاران<sup>۱</sup> به مقایسه تاثیر استفاده از جریان الکتریکی مستقیم (DC) و جریان الکتریکی غیر مستقیم (AC) پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در هر دو حالت، مقاومت برشی افزایش می‌یابد اما تاثیر استفاده از جریان الکتریکی مستقیم بیشتر است [۱۳]. او و همکاران<sup>۲</sup> به بررسی اثر تزریق محلول‌های نمکی بر روش الکترواسمزی پرداختند و مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک را با استفاده از آزمایش برش پره بدست آوردند. در این تحقیق مقاومت برشی زهکشی‌نشده خاک در مقایسه با مقاومت اولیه حدود ۴۰٪ افزایش یافت [۱۴]. ذرات رس دارای بار منفی هستند و عبور جریان باعث حرکت کاتیون‌ها در خاک شده و مواد را در سطح خاک جذب می‌کند و این امر باعث ایجاد سمنتاسیون، یکپارچگی و تراکم بیشتر خاک شده و نشست خاک را کاهش می‌دهد [۱۵-۱۸].

جنس الکتروود نقش عمده‌ای در کارایی روش تثبیت الکتروکینتیکی ایفا می‌کند. الکتروود مورد استفاده باید ارزان، قابل دسترس، مقاوم در برابر حرارت تولید شده حین جریان الکتریکی و مقاوم در برابر خوردگی باشد [۱۹]. الکتروودهای مختلفی از جمله مس، آهن، فولاد، آلومینیوم در تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰]. وقتی الکتروود فلزی استفاده می‌شود توان تولیدی و سرعت جریان الکتریکی نسبت به نافلز مثل گرافیت بیشتر می‌شود. با این حال رسوب اکسیدهای فلزی مثل آهن و آلومینیوم باعث افت توان در الکتروودها و خوردگی الکترودهایی مثل فولاد باعث کاهش کارایی این روش می‌شود. عزیزی و همکاران<sup>۳</sup> از الکتروود فولاد ضد زنگ و گرافیت برای بهسازی الکتریکی استفاده کردند که تاثیر فولاد بر افزایش مقاومت نسبت به گرافیت بیشتر بوده است [۱۹]. لیو و همکاران<sup>۴</sup> از الکتروودهای آلومینیوم و مس برای بهبود مقاومت خاک استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که آلومینیوم نسبت به مس زهکشی بیشتر و مصرف انرژی کمتری دارد [۲۱]. جریان الکتریکی عامل دیگری در بررسی تاثیر بهسازی الکتریکی است. افزایش جریان الکتریکی باعث افزایش جریان الکترواسمزی و در نتیجه بهبود مقاومت خاک می‌شود [۲۲]. علی باروتی تبار و همکاران<sup>۵</sup> به بررسی تغییر ولتاژ بر نرخ آبیگری الکترواسمزی خاک لای همراه با زهکش عمودی پیش‌ساخته پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش ولتاژ موجب کاهش درصد رطوبت در نمونه خاک می‌گردد و حجم آب خروجی را افزایش می‌دهد و در نتیجه باعث بهبود

<sup>۱</sup> Shang et al

<sup>۲</sup> Ou et al

<sup>۳</sup> Azizi mir mahalleh et al

<sup>۴</sup> Liu and Xu

<sup>۵</sup> Alibarootitabar et al

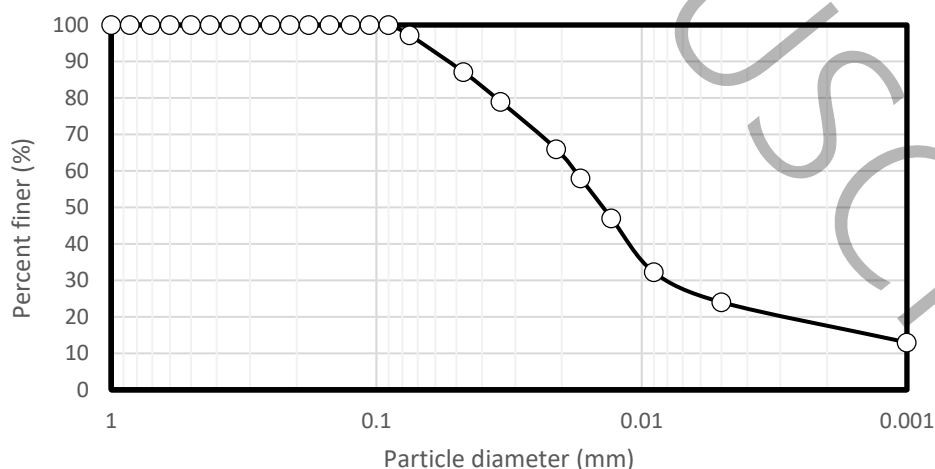
مقاومت نمونه خاک می‌شود [۲۳]. استفاده از الکتروود صفحه‌ای به جای الکتروود میله‌ای با توجه به تاثیر آن بر روی کل مجموعه خاک نتایج بهتری را بدست خواهد آورد. حین استفاده از الکتروود صفحه‌ای از طرفی جریان الکتروواسمزی در کل خاک جریان پیدا کرده، زهکشی آب به سمت الکتروود کاتد بیشتر شده و از طرف دیگر گرمای زیادی تولید شده و در نتیجه کاهش درصد رطوبت بیشتری به همراه دارد [۲۰، ۲۴].

روش الکتروواسمزی به دلیل عدم نیاز به تعویض خاک و همچنین خشک کردن، تخریب، مخلوط کردن خاک و ملاحظات زیست محیطی نسبت به سایر روش‌های بهسازی خاک در راه‌ها می‌تواند به منظور تثبیت خاک‌های رسی مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. با توجه به مطالعات انجام گرفته در گذشته متغیرهای زیادی در فرآیند الکتروواسمزی از جمله شکل الکتروودهای مصرفی، نوع الکتروودها، تغییر ولتاژ و .. تاثیرگذار هستند که هر کدام از این متغیرها باعث تغییر در پارامترهای مقاومتی خاک می‌شوند [۱۰، ۱۱، ۱۹، ۲۲]. اما در این مطالعات اثر این متغیرها به صورت موردی و پراکنده بررسی شده‌اند، در حالی که بررسی و مقایسه اثرات ترکیبی آن‌ها هنوز به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. اگر متغیرهای اصلی از جمله شکل الکتروودهای مصرفی، نوع الکتروودها و همچنین تغییر ولتاژ به طور همزمان در موقعیت‌های مختلف الکتروود در بهسازی الکتروکینتیک به‌ویژه در خاک‌های اشباع که در آن‌ها اثر بهسازی الکتروکینتیک بیشتر است، با هم مقایسه و میزان تاثیر هر کدام از آن‌ها مشخص باشد می‌تواند باعث انتخاب الکتروود مناسب و ولتاژ بهینه و همچنین صرفه‌جویی در هزینه و زمان در این روش شود و زمانی که خاک با مقاومت بیشتری مورد نیاز باشد می‌توان با توجه به نیاز، شکل، نوع الکتروود و ولتاژ اعمالی را تغییر داد. تحقیق حاضر به تأثیر روش الکتروواسمزی به عنوان یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک بر پارامترهای مقاومتی خاک رس نرم با در نظر گرفتن متغیرهای تأثیرگذار و مقایسه آن‌ها با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی می‌پردازد.

## ۲- الگوسازی تجربی

### ۲-۱- خاک مینا

خاک مورد استفاده در این تحقیق خاک رس نرم است که با توجه به آزمایش تورم، دارای قابلیت تورم کم بوده و از عمق یک متری سطح زمین محل دانشکده کشاورزی دانشگاه رازی واقع در شهر کرمانشاه تهیه شده است. نتایج حاصل از آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری برای طبقه‌بندی خاک مورد نظر در شکل ۱ در قالب نمودار دانه‌بندی نشان داده شده است. این خاک در سیستم رده‌بندی متحد در گروه خاک‌های رسی با خمیری (پلاستیسیته) پایین (CL) قرار می‌گیرد. آزمایش‌های مقدماتی مطابق استانداردهای ASTM از قبیل آزمایش دانه‌بندی، هیدرومتری، تعیین حدود اتربرگ، درصد رطوبت، آزمایش تراکم، آزمایش تک‌محوری، تحکیم به‌منظور شناسایی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک صورت پذیرفت که نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.



جدول ۱: مشخصات ژئوتکنیکی خاک مورد استفاده  
 Table 1. Geotechnical properties of the used soil

پارامتر	مقدار
طبقه‌بندی خاک	CL
عمق (m)	۱
درصد رطوبت طبیعی (%)	۲۴
حد روانی (%)	۴۶
حد خمیری (%)	۲۲
حد انقباض (%)	۱۲
شاخص خمیری (%)	۲۴
رطوبت بهینه (%)	۲۱/۰۱
حداکثر وزن مخصوص خشک ( $\text{gr/cm}^3$ )	۱/۵۲
چگالی ویژه (Gs)	۲/۵۶
PH	۷/۶۷
چسبندگی در شرایط طبیعی (Kpa)	۱۱
زاویه اصطکاک در شرایط طبیعی (°)	۲۷
مقاومت فشاری محصور نشده (Kpa)	۹۸

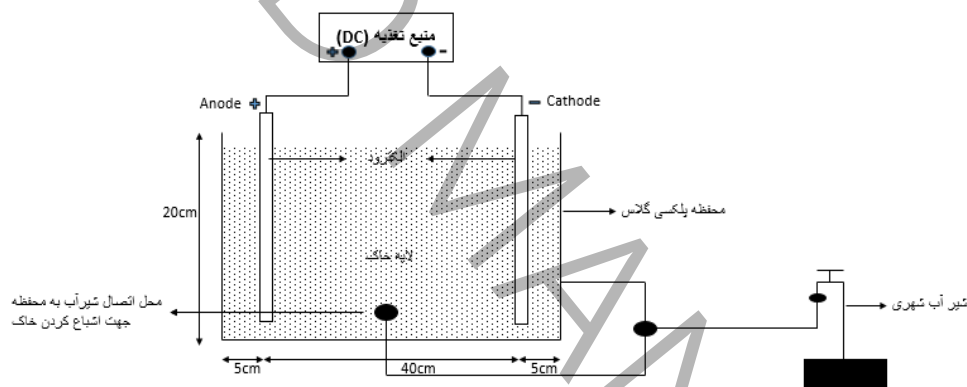
## ۲-۲- روش آماده‌سازی نمونه‌ها و طرح شماتیک تجهیزات ساخته شده

به منظور شبیه‌سازی آزمایش در آزمایشگاه، خاک رس مورد استفاده در محل در بسته‌های ۵۰ کیلوپی ذخیره و پس از خشک کردن در اون، از الک شماره ۴ عبور داده شد. با توجه به مشخص بودن حجم محفظه و با در نظر گرفتن وزن مخصوص مشخص خاک در محل وزن بدست آمده در ۵ لایه به ارتفاع موردنظر با استفاده از چکش آزمایش تراکم استاندارد کوبیده شد. با توجه به اینکه این روش برای خاک‌های با درجه اشباع بالاتر نتایج بهتری را نشان می‌دهد جهت بدست آمدن درجه اشباع ۹۰ درصد با استفاده از شیرهایی که از کنار به محفظه وصل شده‌اند آب تصفیه شده به داخل محفظه و از سمت پایین به بالای مدل با توجه به پدیده موئینگی [۲۶] و جهت حرکت آب در منافذ خاک با سرعت کم در فاصله زمانی ۲۴ ساعت اعمال شد تا هوا از منافذ خارج شده و آب جای آن را بگیرد، در این بازه زمانی آب به بالای سطح نمونه رسید، سطح خاک براق می‌شد و پس از ایجاد شیار با میله، با ضربه زدن به محفظه، شیار شروع به بسته شدن می‌کرد. سپس برای جلوگیری از بخار شدن آب درب محفظه بسته شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شد. با اندازه گیری درصد رطوبت قبل از شروع بهسازی درجه اشباع خاک به ۹۰ درصد رسید. در این مرحله نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده، تحکیم و SEM بر روی خاک بهسازی نشده، گرفته شد. سپس برای انجام عملیات بهسازی الکتریکی، خاک مطابق مراحل قبلی آماده شد و پس از آن با تخلیه خاک محل الکترودها، الکترودها به صورت صفحه‌ای و میله‌ای [۱۷، ۲۳] داخل خاک قرار داده شد بعد از آماده کردن مدل، قرارگیری

الکترودها در داخل خاک و اشباع شدن نمونه، الکترودها به منبع تغذیه جریان برق مستقیم (DC) متصل شده و خروج آب از سوراخی که در کف محفظه تعبیه شده انجام شد و خاک مورد آزمایش به طور مداوم در معرض جریان برق مستقیم قرار گرفته است. تمامی آزمایشها در دمای طبیعی اتاق انجام شده و سطح خاک نیز در معرض هوای آزاد قرار داشته است.

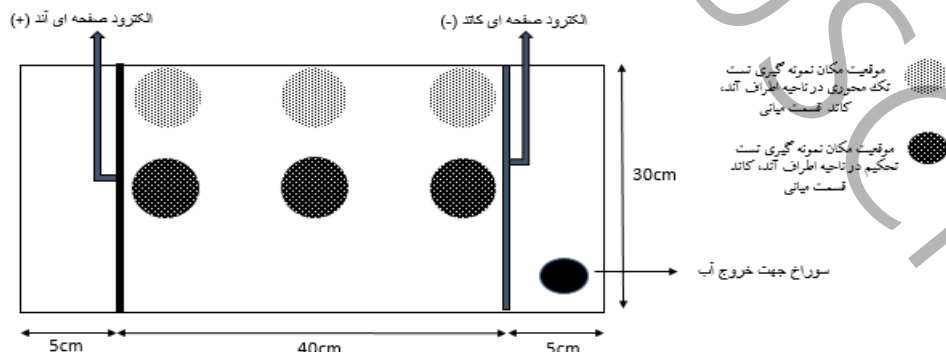
مدل مورد استفاده در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. آزمایش در یک محفظه از جنس پلکسی گلاس به ابعاد  $cm^3$   $50 * 30 * 20$  انجام گرفت. الکترودها در دو حالت میله‌ای به ابعاد  $cm^2$   $5 * 15$  و یا صفحه‌ای به ابعاد  $cm^2$   $30 * 15$  استفاده شده‌اند و برای ایجاد شرایط حرکت آزادانه آب در دیواره الکترودها سوراخ ایجاد شده است. ارتفاع الکترودها به گونه‌ای انتخاب شده است که نمونه‌گیری برای انجام آزمایش مقاومت فشاری به سهولت انجام شود.

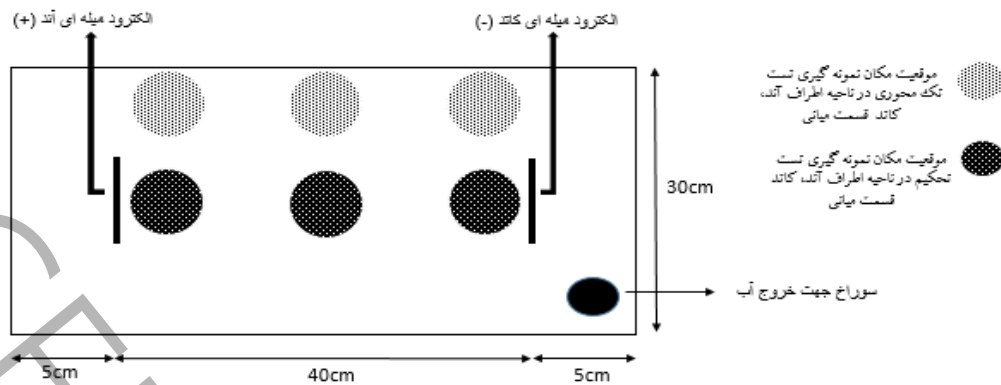
در این آزمایش گرادیان ولتاژ  $v/cm$  ۱ و  $1/5$  توده خاک با استفاده از دو نوع الکتروود آلومینیوم (با علامت اختصاری AI) و گرافیت (با علامت اختصاری G) و اشکال میله‌ای (با علامت اختصاری R) و صفحه‌ای (با علامت اختصاری P) در دوره زمانی ۴۸ ساعت با اتصال الکترودها به منبع تغذیه به نمونه خاک اعمال شده است. برای اعمال گرادیان ولتاژ انتخابی با توجه به حداکثر جریان تولیدی ایجاد شده توسط منبع تغذیه DC مورد استفاده ( $60V$ ) فاصله الکترودها از هم  $40cm$  انتخاب شده است. جدول ۲ مشخصات آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده انجام شده روی خاک رس مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. شکل ۴ تصاویری از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش را نشان می‌دهد. پس از اتمام دوره زمانی ۴۸ ساعت، جریان برق قطع شده و مدل برای نمونه‌گیری جهت آزمون‌های موردنظر آماده شد.



شکل ۲: نمایی از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش

Figure 2. Schematic configuration of electro-osmotic apparatus used in the experiment





شکل ۳: نمای بالای سیستم الکترواسمزی و محل نمونه برداری اطراف آند، کاتد و قسمت میانی [۱۹] در دو حالت استفاده از الکتروود صفحه‌ای و میله‌ای

Figure 3. Plan view of the electro-osmotic apparatus and the sampling location around the anode, cathode and the middle zone [19] in two state of using plate and rod electrodes

جدول ۲: مشخصات آزمایش‌های مقاومت فشاری محدود نشده

Table 2. Characteristics of unconfined compressive strength tests

نمونه‌ها	جنس الکتروود	شکل الکتروود	محل نمونه گیری	آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در ولتاژ اعمالی 1v/cm	آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در ولتاژ اعمالی 1/5v/cm
۱	Al	صفحه ای	نزدیکی آند	*	*
۲			قسمت میانی	*	*
۳			نزدیکی کاتد	*	*
۴		میله ای	نزدیکی آند	*	*
۵			قسمت میانی	*	*
۶			نزدیکی کاتد	*	*
۷	G	صفحه ای	نزدیکی آند	*	*
۸			قسمت میانی	*	*
۹			نزدیکی کاتد	*	*
۱۰		میله ای	نزدیکی آند	*	*
۱۱			قسمت میانی	*	*
۱۲			نزدیکی کاتد	*	*

\*\* آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده برای خاک طبیعی در قسمت میانی انجام گرفت.



شکل ۴: تصاویری از سیستم الکترواسمزی مورد استفاده در آزمایش در دو حالت استفاده از الکترود میله‌ای و صفحه‌ای

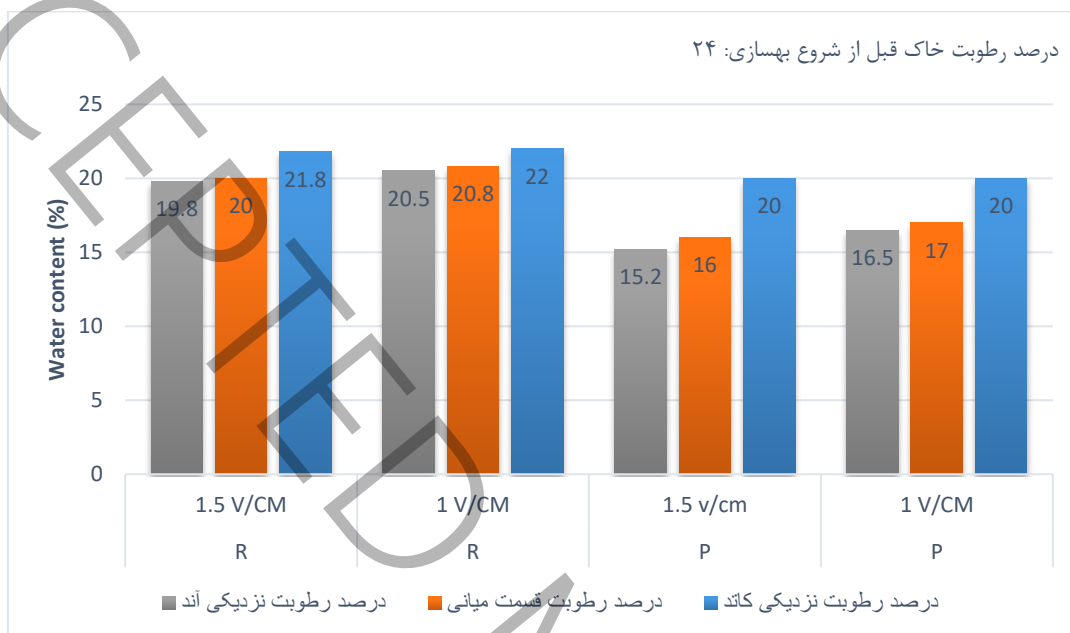
Figure 4. Electroosmosis system used in the experiment in two states of using rod and plate electrodes

به منظور مطالعه اثرات جریان الکترواسمزی در خاک و بررسی رفتار تنش - کرنش خاک، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک محوری) بر روی نمونه خاک (ناحیه اطراف کاتد، آند و قسمت میانی) براساس استاندارد ASTM - D2166 انجام شده است. جهت انجام آزمون مقاومت فشاری، ۲ cm از سطح خاک برداشته شد و قالب تک محوری را برای نمونه‌گیری در قسمت مورد نظر فشار داده و با استفاده از دستگاه بیرون آورنده نمونه، نمونه به آرامی خارج شده و جهت تست در دستگاه تک محوری قرار داده شد. در مجموع ۲۵ آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (۱ نمونه خاک بهسازی نشده، ۲۴ نمونه با سه متغیر و در نزدیک آند، کاتد و قسمت میانی) انجام شد. همچنین تغییرات درصد رطوبت و حدود اتربرگ به عنوان مهمترین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه خاک رس بر روی نمونه‌های بدست آمده از اطراف کاتد، آند و قسمت میانی خاک به ترتیب براساس استاندارد (ASTM - D2216) و (ASTM - D4318) انجام و برای بررسی میزان تحکیم‌پذیری خاک رس از ۴ نمونه (۱ نمونه خاک بهسازی نشده، ۳ نمونه بهینه) آزمایش تحکیم براساس استاندارد (ASTM - D2435) صورت گرفت. پس از برداشتن ۲ cm از سطح خاک، حلقه‌های مربوط به آزمون تحکیم برای نمونه‌گیری در مدل قرار داده شد و جهت آزمایش در دستگاه تحکیم قرار گرفت.

### ۳- نتایج و بحث

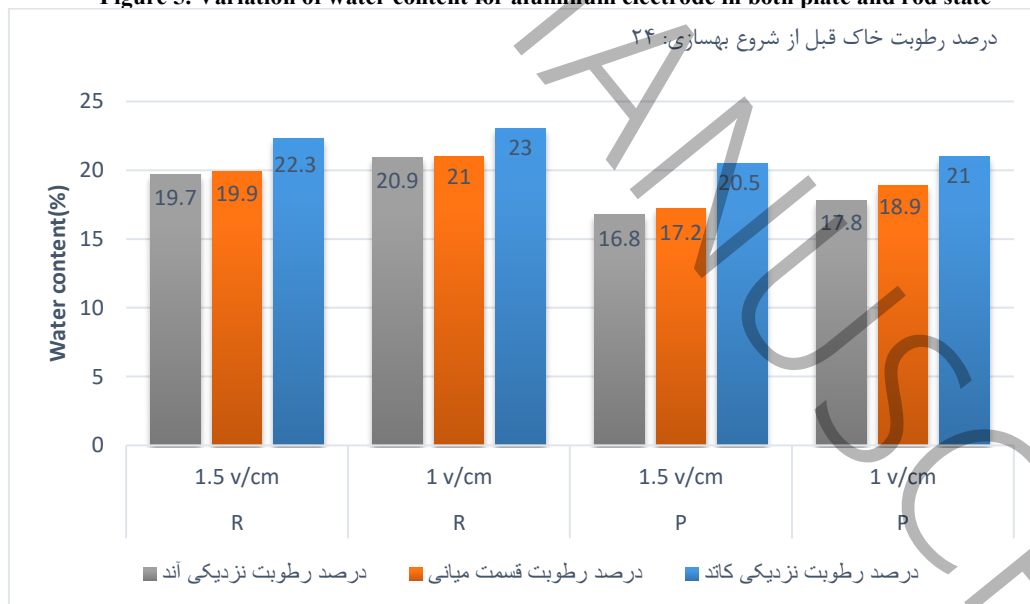
نمودار شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب میزان تغییر درصد رطوبت خاک در حالت استفاده از الکترودهای آلومینیوم و گرافیت در دو نوع میله‌ای و صفحه‌ای در جریان‌های ۱ و ۱/۵ بعد از گذشت ۴۸ ساعت در نزدیکی آند، کاتد و قسمت میانی را نشان می‌دهند.

با اعمال یک اختلاف پتانسیل الکتریکی با جریان مستقیم بر خاک، ذرات معلق باردار، یون‌ها و آب منفذی هر یک در مسیرهای خاص خود به حرکت درمی‌آیند. جریان الکترواسمزی از سمت آند به سمت کاتد است بنابراین مقدار کاهش درصد رطوبت از آند به سمت کاتد کاهش می‌یابد. خشک شدن در اثر گرمای ایجاد شده حین القای جریان الکتریکی و تبخیر طبیعی آب نیز از عوامل موثر دیگر در کاهش درصد رطوبت خاک است [۲۷].



شکل ۵: تغییرات درصد رطوبت در حالت استفاده از الکتروود آلومینیومی در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای

Figure 5. Variation of water content for aluminum electrode in both plate and rod state



شکل ۶: تغییرات درصد رطوبت در حالت استفاده از الکتروود گرافیتی در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای

Figure 6. Variation of water content for r graphite electrode in both plate and rod state

تغییر در میزان درصد رطوبت یک فرآیند غالب حین اعمال جریان برق در خاک می‌باشد. پدیده الکترواسمزی با تغییر در مقدار و حجم آب زهکشی‌شده میزان درصد رطوبت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. البته دو عامل خشک شدن و تبخیر طبیعی با توجه به شرایط محیطی مانند رطوبت و دمای محیط نیز عوامل تاثیرگذار بر درصد رطوبت خاک می‌باشند. افزایش جریان اعمالی با توجه به تولید

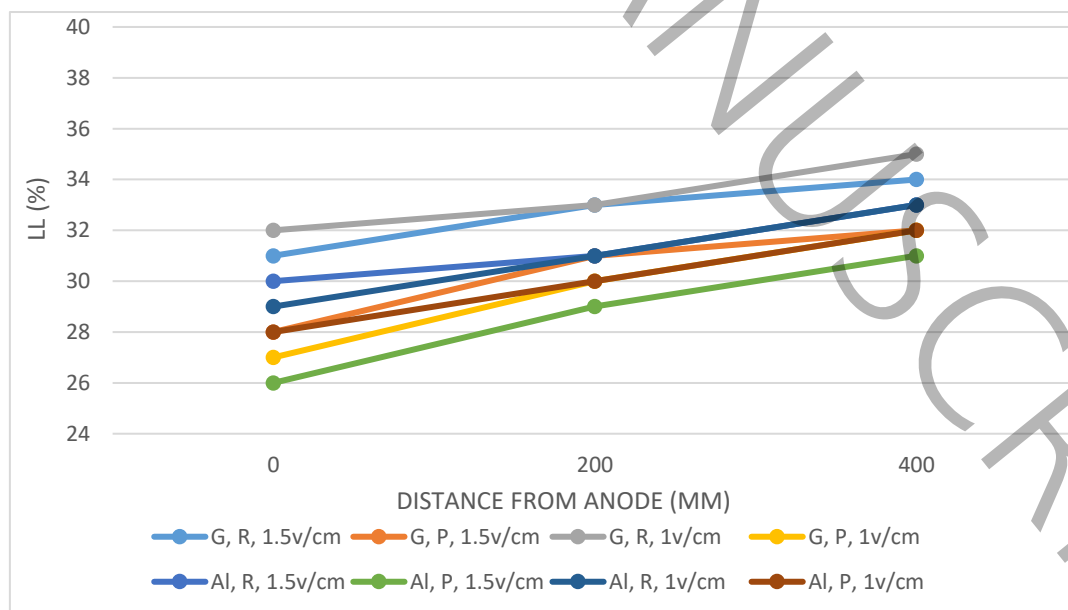


انرژی الکتریکی بیشتر و گرما در خاک تحت درمان، تغییر در نوع و شکل الکترودها با توجه به تفاوت در رسانایی الکترودها می‌تواند بر درصد رطوبت تاثیر بگذارد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است کاهش درصد رطوبت در الکترودها آلومینیومی نسبت به الکترودها گرافیتی بیشتر بوده و این مسئله ممکن است به دلیل رسانایی بیشتر آلومینیوم نسبت به گرافیت، در نتیجه توان تولیدی و سرعت جریان الکتریکی بیشتر باشد و در نتیجه میزان خروج آب از خاک افزایش می‌یابد. عامل مهمتری که در تغییر نتایج مشخص است، استفاده از الکترودهای صفحه‌ای نسبت به الکترودهای میله‌ای می‌باشد. با توجه به اینکه در یک خاک که تحت بهسازی الکترواسمزی قرار گرفته است حین استفاده از الکترودهای صفحه‌ای سطح بیشتری از خاک تحت تاثیر جریان الکتریکی قرار می‌گیرد، انرژی الکتریکی بیشتری از خاک جریان پیدا می‌کند و در نتیجه گرمای بیشتری تولید می‌شود، نسبت به الکترودهای میله‌ای که تنها یک مسیر خطی را مورد تاثیر قرار می‌دهد اثر بیشتری در کاهش درصد رطوبت کل مجموعه خاک دارد. با توجه به محل نمونه‌گیری خاک جهت آزمایش درصد رطوبت خاک در نزدیکی آند، کاتد و قسمت میانی خاک تاثیر شکل الکترودها کاملاً مشخص می‌شود. همچنین هنگام استفاده از الکترودها آلومینیومی با اکسید این فلز، یون آلومینیوم با یون‌های لایه دوگانه جایگزین شده و یون‌های آزاد شده با شرکت در فرآیند الکترواسمزی باعث خروج آب بیشتر و کاهش درصد رطوبت در خاک می‌شود. به عنوان نمونه درصد رطوبت برای نمونه‌هایی که از آلومینیوم صفحه‌ای به عنوان الکترودها استفاده شده است (با ولتاژ اعمالی برابر  $1\text{ V/cm}$ ) در نزدیکی آند  $1/1$  و در حالت استفاده از گرافیت صفحه‌ای  $20$  می‌باشد که در مقایسه با خاک بهسازی نشده به ترتیب به میزان  $25\%$  و  $17\%$  بوده است.

بیشترین میزان کاهش درصد رطوبت مربوط به حالت استفاده از الکترودها آلومینیومی صفحه‌ای با جریان اعمالی  $1/5\text{ V/cm}$  به مقدار  $58\%$  در نزدیکی آند و کمترین میزان کاهش مربوط به حالت استفاده از الکترودها گرافیتی میله‌ای به مقدار  $13\%$  در نزدیکی کاتد است. کاهش درصد رطوبت در بهسازی الکترواسمزی توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است [۲۸-۳۳].

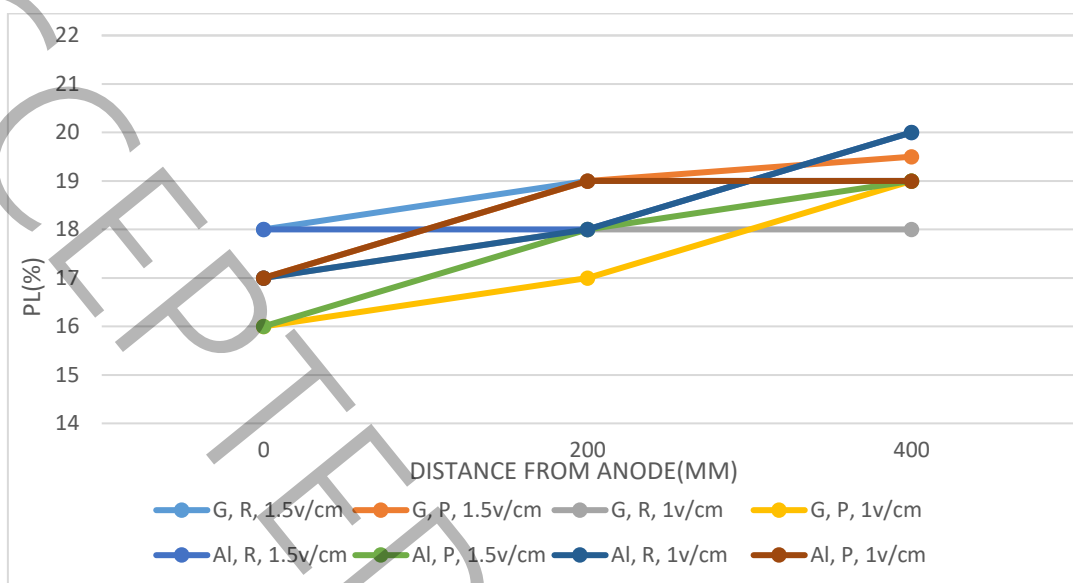
با آگیری تحت جریان برق، فشار آب حفره‌ای منفی شده و مکش در تراوش آب در ساختار خاک ریزدانه توسعه می‌یابد. می‌توان گفت که تغییرات درصد رطوبت خاک‌های مورد آزمایش ناشی از ترکیب فرآیند آگیری بر اثر جریان برق در خاک، تبخیر طبیعی و فرآیند خشک شدن ناشی از گرمای ایجاد شده توسط اعمال جریان به خاک می‌باشد.

نمودار شکل‌های ۷-۹ تغییرات حدود اثر برگ نمونه‌های خاک را تحت ولتاژهای  $1\text{ V/cm}$  و  $1/5$  در حالت استفاده از الکترودهای آلومینیومی و گرافیتی در دو حالت میله‌ای و صفحه‌ای نشان می‌دهند.



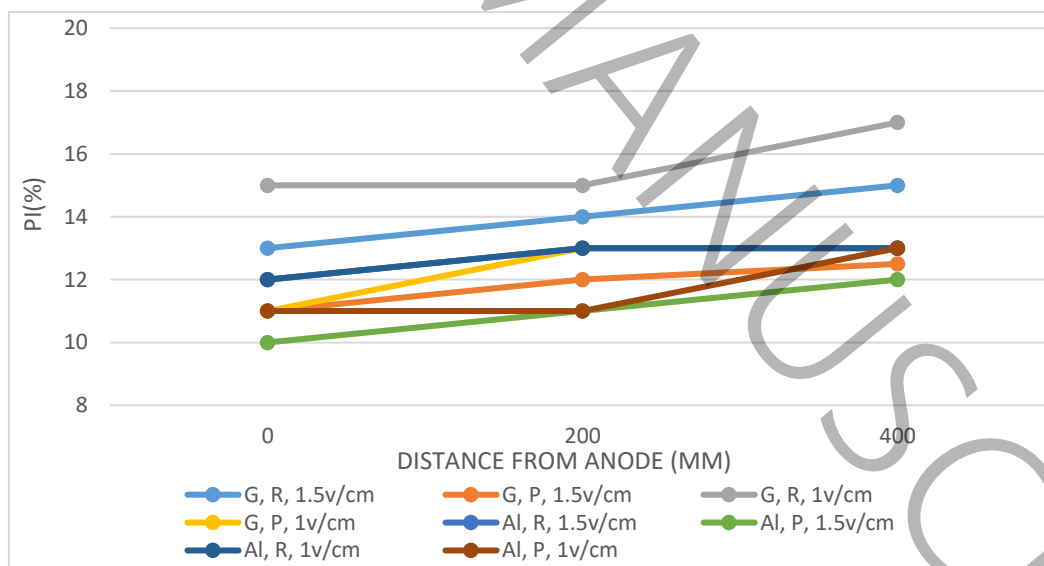
شکل ۷: تغییرات حد روانی با فاصله از آند مربوط به الکترودها آلومینیومی و گرافیتی

Figure 7. Variation of Liquid Limit (LL) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



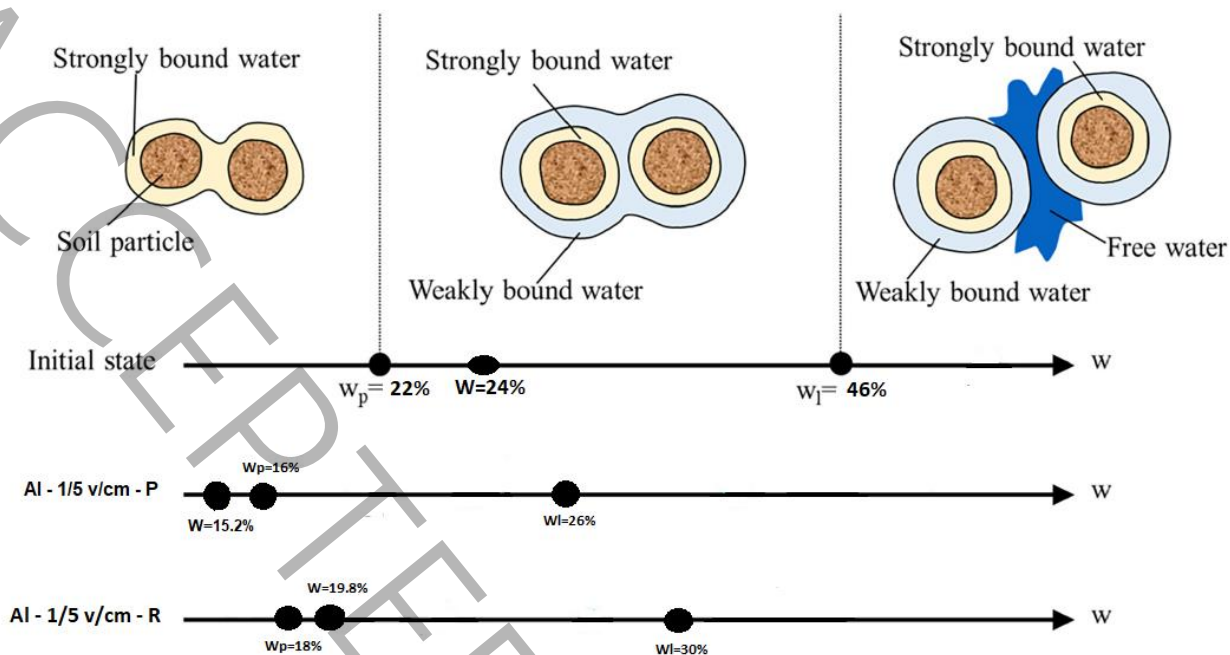
شکل ۸: تغییرات حد خمیری با فاصله از آند مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت

Figure 8. Variation of Plastic Limit(PL) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



شکل ۹: تغییرات شاخص خمیری با فاصله از آند مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت

Figure 9. Variation of Plasticity Index(PI) with the distance from the anode for aluminum and graphite electrodes



شکل ۱۰: حدود اتربرگ و درصد رطوبت برای نمونه های با الکتروود آلومینیومی در نزدیکی آند در دو حالت الکتروود صفحه ای و میله ای (ولتاژ ۱/۵ v/cm)

Figure 10. Atterberg limits and water content for aluminum electrode near the anode in both plate and rod electrode states (voltage 1/5 v/cm)

آب موجود در خاک بر حدود اتربرگ تاثیر می گذارد. اگر درصد رطوبت خاک از حد پلاستیک کمتر باشد آب پیوندی محکم اطراف ذرات خاک رس را در حالت جامد و نیمه جامد را احاطه می کند. اگر درصد رطوبت بین حد پلاستیک و حد روانی باشد آب پیوندی ضعیف تشکیل می شود و اگر درصد رطوبت بیشتر از حد روانی باشد آب آزاد در خاک ظاهر شده و خاک به حالت روانی در می آید. پس از بهسازی الکترواسمزی حدود اتربرگ خاک برای نمونه خاک بهسازی نشده و خاک بهسازی شده به روش لکترواسمزی مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد برای تمامی نمونه ها درصد رطوبت بین حد خمیری و حد روانی می باشد و فقط در سه نمونه بهسازی شده با الکتروود آلومینیوم صفحه ای با ولتاژهای ۱ v/cm و ۱/۵ v/cm با الکتروود گرافیت صفحه ای با ولتاژ ۱/۵ v/cm در نزدیکی آند درصد رطوبت کمتر از حد خمیری می باشد. با بررسی این نتایج مشاهده می شود که در حالت استفاده از الکتروود صفحه ای در ولتاژ بالاتر به دلیل تاثیر مناسب این الکتروود بر نمونه ی خاک آب پیوندی ضعیف نیز در خاک تشکیل نشده است. به طور کلی پس از اعمال جریان الکترواسمزی در هیچ کدام از نمونه ها آب آزاد وجود ندارد، سان و همکارانش نیز در مطالعه خود که اثر اعمال جریان مستقیم بر نمونه خاک رس نرم را مورد بررسی قرار دادند به این نتیجه رسیدند که پس از اعمال جریان الکتریکی در خاک رس نرم آب آزاد وجود ندارد [۳۴].

یکی از پدیده هایی که در روش الکتروکینتیک مشاهده می شود فرآیند الکترواسمزی است که به دلیل اعمال جریان در خاک آب موجود در حفرات حرکت می کند. مقدار و محتوای آب درون خاک عمدتاً به دلیل پدیده فرارفت الکترواسمزی تغییر خواهد کرد. این امر مهم ترین عامل تاثیرگذار در حدود اتربرگ می باشد. پدیده تاثیرگذار دیگر در این فرآیند انتقال الکتریکی است که موجب حرکت ذرات باردار در حفرات در اثر اعمال جریان الکتریکی می باشد. انتقال الکتریکی یون ها و اثرات متقابل آن ها با مواد معدنی موجود در خاک رس به دلیل ایجاد تغییرات در مقادیر غلظت یونی (لایه آب دوگانه) و به وجود آمدن تغییرات دیگر در ساختار خاک رس به واسطه انتقال یون ها شاخص خمیری را تغییر می دهد. نتایج نشان داد با انجام بهسازی الکتریکی مقدار شاخص خمیری در سه قسمت مورد آزمایش نزدیکی آند، کاتد، قسمت میانی کاهش می یابد. کاهش در مقدار شاخص خمیری در تحقیقات قبلی نیز گزارش

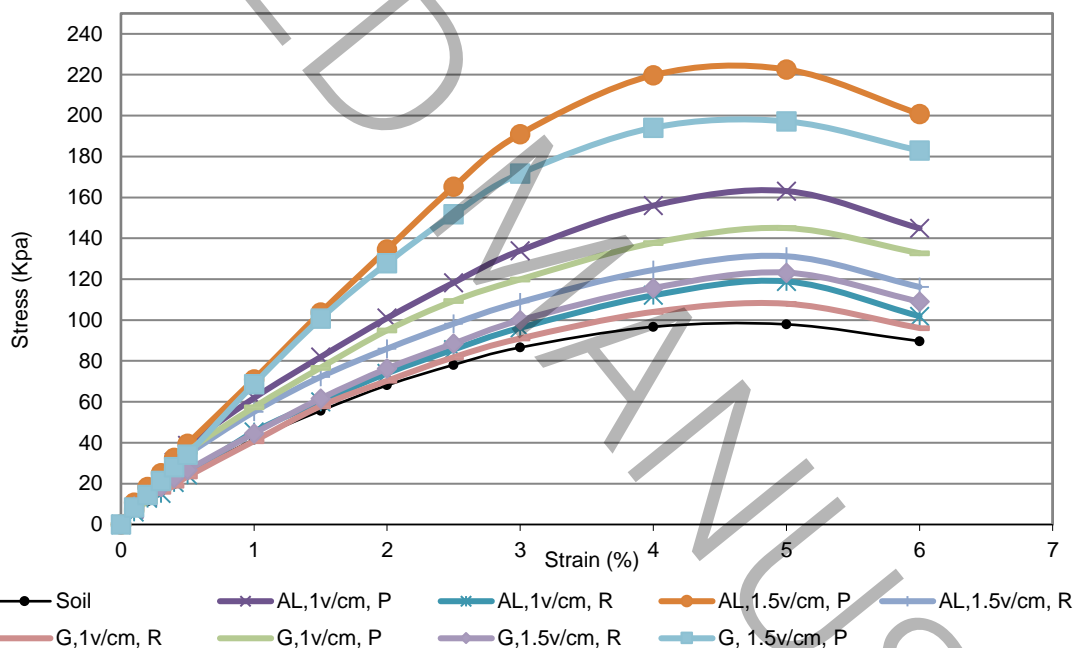
شده است [۳۵]. محققان دلیل این تغییر را به حضور یون‌های سدیم در خاک‌های با ساختار پراکنده و اثرات آن بر لایه آب دوگانه و فرآیندهای الکترواسمزی ارتباط داده‌اند [۱۹].

تولید  $H^+$  در آند و  $OH^-$  در کاتد منجر به افزایش PH از آند به سمت کاتد می‌شود، بار منفی ذرات خاک افزایش یافته و همانطور که از شکل ۸ مشخص است، باعث افزایش PL خاک می‌شود.

تبادل یونی در طول الکترواسمز باعث جایگزینی یون‌های ظرفیت بالا مانند  $Al^{3+}$  و  $Fe^{3+}$  در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و جاذبه بین ذرات نیز باعث کاهش مقدار PI می‌شود. محققان زیادی کاهش شاخص خمیری را هنگام استفاده از بهسازی الکترواسمزی گزارش داده‌اند [۳۶، ۳۷].

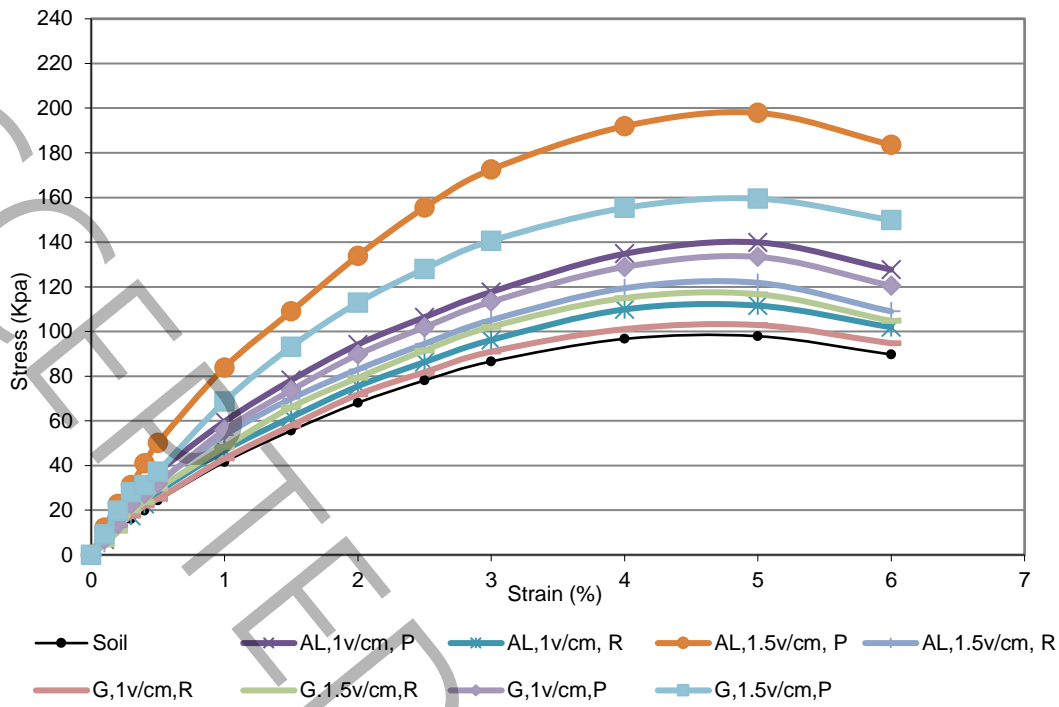
در تمامی حالات مقدار شاخص خمیری کاهش پیدا کرده و بیشترین مقدار کاهش شاخص خمیری مربوط به حالت استفاده از الکتروآلومینیوم صفحه‌ای با اعمال جریان  $1/5 \text{ v/cm}$  در نزدیکی الکتروآند می‌باشد. این نتایج در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است [۳۸]. بهسازی الکترواسمزی با تاثیر بر میزان آب موجود در خاک و همچنین تغییر در ساختار شیمیایی خاک از طریق انتقال یون‌ها موجب تغییر در میزان شاخص خمیری خاک می‌شود.

نمودارهای ۱۱-۱۳ نتایج مقاومت فشاری برای نمونه‌های خاک بهسازی نشده و خاک تحت ولتاژهای  $1 \text{ v/cm}$  و  $1/5$  با الکترودهای آلومینیوم و گرافیت در دو حالت صفحه‌ای و میله‌ای در نواحی اطراف آند، کاتد و ناحیه میانی را نشان می‌دهند.



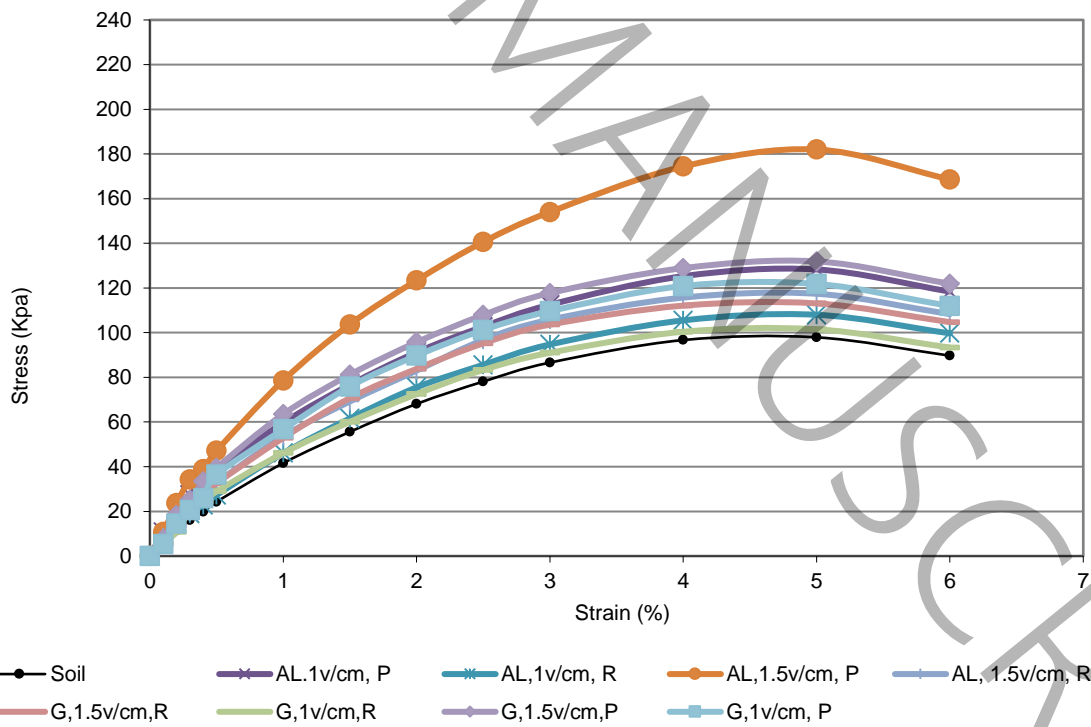
شکل ۱۱: نتایج مقاومت تک‌محوری مربوط به الکتروآلومینیوم و گرافیت نزدیک آند

Figure 11. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode near the anode



شکل ۱۲: نتایج مقاومت تک محوری مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت قسمت میانی

Figure 12. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode in middle zone



شکل ۱۳: نتایج مقاومت تک محوری مربوط به الکترود آلومینیوم و گرافیت نزدیک کاتد

Figure 13. Results of unconfined compressive strength test for aluminum and graphite electrode near the cathode

تاثیر اعمال جریان الكتریکی در طول ۴۸ ساعت بر افزایش مقاومت تک محوری نمونه بهسازی شده به ویژه در ناحیه آند مشهود است. همانطور که از نمودارها مشخص است. میزان مقاومت خاک بهسازی نشده از بقیه نمونه‌ها کمتر است چرا که با اعمال ولتاژ و حرکت آب در خاک و زهکشی آن، همچنین تولید گرما در خاک به علت جریان الكتریکی درصد رطوبت کاهش یافته و همین امر یکی از عوامل افزایش مقاومت خاک می باشد. همچنین با توجه به جهت حرکت آب در خاک با اعمال جریان الكتریکی میزان مقاومت در نزدیکی آند از کاتد بیشتر است. به عنوان مثال، تحت گرادیان  $1 \text{ v/cm}$  با الكترود گرافیت میله‌ای، نزدیک آند مقاومت از  $98 \text{ kpa}$  به  $119 \text{ kpa}$  و با گرادیان  $1/5 \text{ v/cm}$  به  $131 \text{ kpa}$  می‌رسد این بررسی نشان می‌دهد میزان مقاومت در این نمونه با ولتاژ اعمالی  $1 \text{ v/cm}$  نسبت به نمونه خاک طبیعی  $21\%$  و با ولتاژ اعمالی  $1/5 \text{ v/cm}$  به میزان  $34\%$  افزایش داشته است.

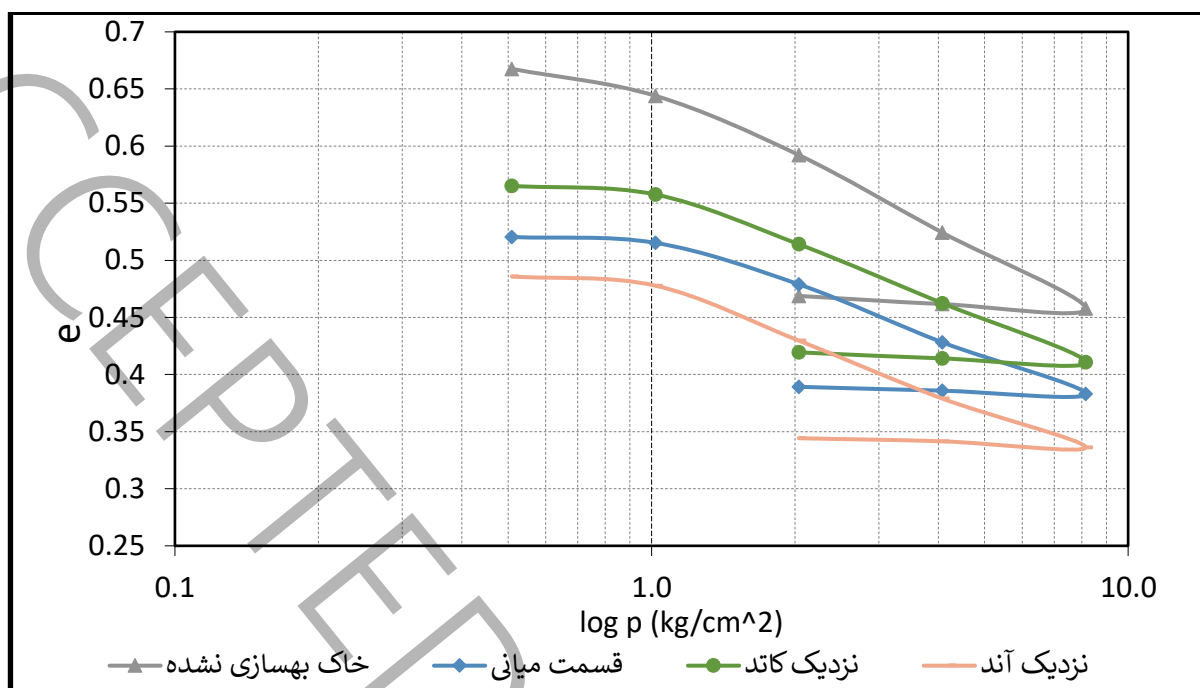
شکل الكترود عامل دیگر در تغییر مقاومت فشاری بوده به این دلیل که در حالت استفاده از الكترود صفحه‌ای تمام نمونه خاک تحت تاثیر جریان قرار گرفته، زهکشی آب بیشتر شده و درصد رطوبت بیشتری کاهش می‌یابد بنابراین مقاومت فشاری افزایش بیشتری پیدا می‌کند. رابطه مستقیم بین کاهش درصد رطوبت با افزایش مقاومت خاک توسط محققان گزارش شده است [۲]. به عنوان مثال خاک حین استفاده از الكترود گرافیت میله‌ای با جریان  $1/5 \text{ v/cm}$  در قسمت میانی مقاومت فشاری از  $98 \text{ kpa}$  به  $122 \text{ kpa}$  به میزان  $25\%$  و در حالت استفاده از الكترود صفحه‌ای مقاومت فشاری به  $198 \text{ kpa}$  رسیده است که به میزان  $102\%$  افزایش پیدا کرده است.

عامل مهم دیگر در این مطالعه که مورد بررسی قرار گرفته است، نوع الكترود مصرفی می باشد. مطالعات محققان نشان می‌دهد که با توجه به رسانایی بیشتر آلومینیوم نسبت به گرافیت این الكترود می تواند نتایج بهتری در بهسازی الكترواسمزی نشان دهد. همانگونه که از نمودارها مشخص است مقاومت خاک مورد بررسی حین استفاده از الكترود میله‌ای با ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$  در نزدیکی آند  $34\%$  و هنگامی که از الكترود صفحه‌ای استفاده می شود  $128\%$  افزایش یافته است. بهترین نمونه برای افزایش مقاومت فشاری مربوط به نمونه خاک حین استفاده از الكترود آلومینیوم صفحه‌ای با ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$  به مقدار  $223 \text{ kpa}$  می‌باشد. در سه قسمت نمونه‌گیری شده مقاومت فشاری افزایش می‌یابد اما افزایش بیشتر مربوط به محدوده آند است. این افزایش مقاومت با توجه به جهت جریان الكترواسمزی مورد انتظار بود. این نتایج در تطابق با نتایج اعلامی توسط دیگر محققان است [۳۹].

انتقال کاتیون‌ها یکی از عوامل تغییر محتوای شیمیایی خاک است. سمنتاسیون یکی از واکنش‌هایست که باعث بهبود مقاومت خاک می‌شود. یون‌های کلسیم خاک و یون‌های آلومینیوم آزاد شده از الكترود در فرایند سمنتاسیون شرکت کرده و باعث بهبود استحکام خاک می‌شود این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت خاک حین استفاده از الكترود آلومینیومی نسبت به گرافیت باشد. پس از اعمال جریان الكتریکی در خاک با ایجاد ساختار جمعی و لخته شده، نفوذپذیری خاک نیز افزایش پیدا می‌کند که این عامل تاثیر بسزایی در افزایش دفع آب از خاک بهسازی شده با استفاده از روش الكتروکینتیک دارد. مسیرهای موجود برای حرکت سیال و پتانسیل ایجاد میدان الكتریکی (رسانایی الكترواسمزی) با نزدیک تر شدن ذرات به یکدیگر و تشکیل ساختار لخته شده افزایش یافته و میزان خروج آب از نمونه بیشتر می‌شود. بنابراین فرآیند الكترواسمزی خروج آب را از خاک تسریع بخشیده و زمان لازم برای تشکیل ساختار یکپارچه در خاک را کاهش می‌دهد که با افزایش ولتاژ اعمالی این میزان کاهش، افزایش می‌یابد ایجاد ساختار جمعی و لخته شده پس از اعمال جریان الكتریکی در تطابق با نتایج و کیلی و همکاران می باشد [۴۰].

آبگیری، مکش ایجاد شده در خاک، تحکیم خاک، انتقال الكتریکی یون‌ها به دلیل ایجاد تغییر در غلظت یونی، تغییر ضخامت لایه آب دوگانه، واکنش‌های سیمانی، خشک شدن طبیعی خاک و گرمای ایجاد شده حین جریان الكتریکی که باعث ایجاد واکنش‌های گرمازا شده و در نتیجه تغییر در ساختار خاک از دیگر عوامل افزایش مقاومت خاک می‌باشد [۱۶].

به‌منظور بررسی بیشتر اثر بهسازی الكترواسمزی بر رفتار خاک آزمایش تحکیم بر روی حالت‌های بهینه (نزدیکی کاتد، نزدیکی آند و قسمت میانی در حالت استفاده از الكترود آلومینیومی صفحه‌ای با جریان ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$ ) انجام شد. محل انتخاب نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۱۴ نتایج آزمون تحکیم و در جدول ۳ مقادیر شاخص تراکم (Cc) و شاخص تورم (Cs) برای نمونه‌ی مورد بررسی آورده شده است.



شکل ۱۴: نتایج آزمون تحکیم در شرایط استفاده از الکترود آلومینیومی صفحه‌ای با جریان ولتاژ ۱/۵ v/cm

Figure 14. Results of consolidation test for plate aluminum electrode with voltage 1/5 v/cm

جدول ۳: مقادیر شاخص تراکم و تورم حاصل از آزمایش تحکیم

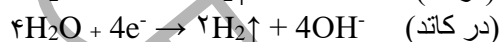
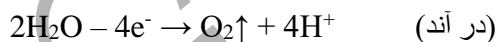
Table 3. Compaction Index and swelling Index from Consolidation Test

نمونه	e(0)	شاخص تراکم (Cc)	شاخص تورم (Cs)
خاک بهسازی نشده	۰/۶۷۵	۰/۲۱	۰/۰۲۴
نزدیکی کاتد	۰/۵۹۲	۰/۱۷	۰/۰۱۸
قسمت میانی	۰/۵۲۴	۰/۱۵	۰/۰۱۱
نزدیکی آند	۰/۴۴۳	۰/۱۴	۰/۰۰۹

با توجه به نتایج، مقادیر نشست برای نمونه خاک بهسازی شده در نزدیکی آند بهتر بوده است. کاتیون‌هایی که وارد آب بین حفره‌ای شده و به سمت کاتد حرکت می‌کند با جابجایی آب اطراف خود باعث خروج بیشتر آب و افزایش استحکام می‌شوند. با خروج آب توسط این کاتیون‌ها یک فشار مکشی منفی به حفره‌های بین خاک وارد شده و منجر به از بین رفتن یا کوچکتر شدن حفره‌ها می‌شود این مسئله باعث کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش استحکام خاک شده و از طرفی جریان آب لایه دوگانه تحت میدان الکتریکی از آند به سمت کاتد بوده این عامل باعث افزایش شدت جریان به سمت کاتد و در نتیجه افزایش تراکم و مقاومت خاک می‌شود. علاوه بر این، اکسیداسیون الکترود آلومینیوم باعث قرار گرفتن یون‌های آلومینیوم در لایه دوگانه شده و یون‌های متحرک و کوچکتر را از لایه دوگانه خارج می‌کنند. یون‌های آزاد شده در فرآیند الکترواسمز شرکت کرده و مقدار آب بیشتری را از خاک خارج می‌کنند. همانطور که از نمودار مشخص است بهسازی الکتریکی باعث کاهش نسبت تخلخل و در نتیجه کاهش نشست خاک می‌شود و با توجه به جهت حرکت جریان الکترواسمزی بهبود خاک در نزدیکی آند بیشتر است.

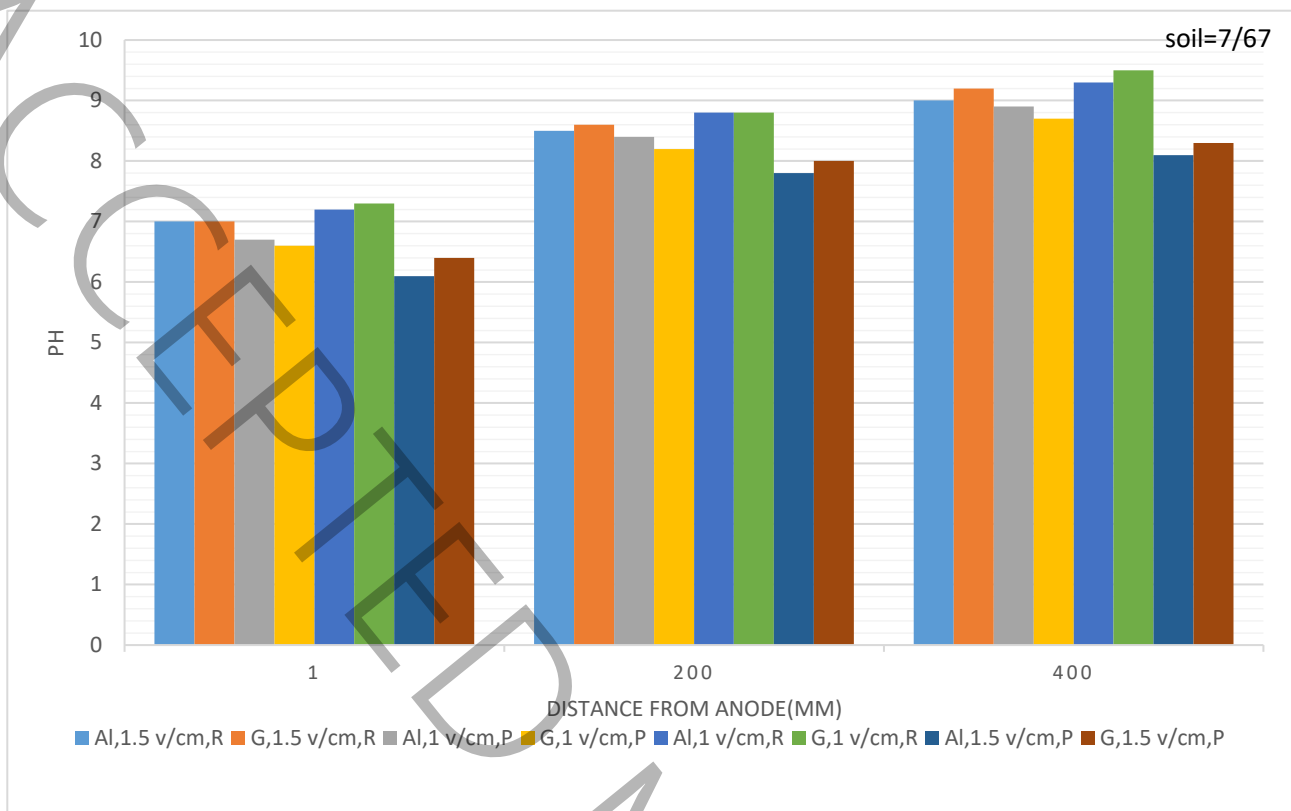
با توجه به نتایج بدست آمده برای شاخص تراکم و همچنین شاخص تورم با اعمال جریان الکترواسمزی و در نتیجه کاهش مقدار نشست شاخص تراکم و شاخص تورم‌زایی کاهش پیدا کرده است [۴۱-۴۴]. همانطور که از جدول ۳ مشخص است میزان شاخص تورم و نسبت تخلخل در نزدیکی آند نسبت به نمونه خاک بهسازی نشده به ترتیب به میزان ۶۲٪ و ۳۵٪ کاهش یافته است.

در طول بهسازی الکتریکی، یون‌های هیدروژن و اکسیژن در اطراف آند و یون‌های هیدروکسیل در اطراف کاتد در نتیجه فرآیند الکترولیز صورت می‌گیرد. واکنش‌های شیمیایی که در آند و کاتد رخ می‌دهد به صورت زیر است (۲):



با تولید  $\text{H}^+$  در آند و با توجه به تحرک  $1/8$  برابری بیشتر از  $\text{OH}^-$  و همچنین جهت حرکت جریان الکترواسمزی به سمت کاتد مقادیر PH پایین در بخش زیادی از نمونه خاک به ویژه در مجاورت آند رخ می‌دهد. پارامتر PH بیشترین اثرگذاری بر پتانسیل زتا دارد. در محیط‌های قلیایی تر با PH بالا، ذره میل کمتری به هم انباشتگی خواهد داشت و در نتیجه پتانسیل زتا کاهش می‌یابد (بیشتر منفی می‌گردد)، همچنین افزایش خاصیت اسیدی باعث می‌شود تا پتانسیل زتا افزایش یابد (عدد منفی کوچکتر) و در PH های بسیار پایین پتانسیل زتا به سمت مقداری مثبت حرکت کند که باعث کاهش و حتی توقف جریان الکترواسمزی به سمت کاتد می‌گردد. هرچه پتانسیل زتا منفی تر باشد نفوذپذیری خاک بیشتر می‌شود، اثر PH بر پتانسیل زتا در مطالعه ساجی یاما و همکاران نیز مورد بررسی قرار گرفته است همچنین کاهش PH در آند در تطابق با نتایج سان و همکارانش می‌باشد [۴۵، ۴۶]. وجود رسوبات سبز و قرمز رنگ در اطراف آند به علت رخ دادن اکسیداسیون در اطراف آند می‌باشد. با توجه به نمودار شکل ۱۵، PH اولیه خاک بهسازی نشده  $7/67$  بوده است که کمترین آن مربوط به نمونه الکترودهی صفحه‌ای آلومینیومی با ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$  در اطراف آند با مقدار  $6/1$  و با توجه به انتقال بیشتر  $\text{H}^+$  در آند به دلیل صفحه‌ای بودن الکترودهی و جنس آلومینیوم آن و ولتاژ بیشتر و بیشترین آن مربوط به نمونه الکترودهی میله‌ای گرافیتی با ولتاژ  $1 \text{ v/cm}$  در اطراف کاتد با مقدار  $9/5$  می‌باشد. این نتایج در تطابق با محققان دیگر است [۴۷، ۱۸]. در این نمودار روند کاهش PH از کاتد به سمت آند را نشان می‌دهد. همانگونه که از نمودارها نیز مشخص است تغییرات PH نسبت به خاک اولیه به ویژه در نزدیکی آند و در بخش‌هایی از قسمت میانی چشمگیر نمی‌باشد که احتمالاً به دلیل کم بودن جریان الکتریکی، واکنش‌های الکترولیز با شدت زیاد صورت نگرفته و مهاجرت یونی خیلی سریع انجام نشده است بنابراین مقادیر PH تغییر آنچنانی نداشته است.

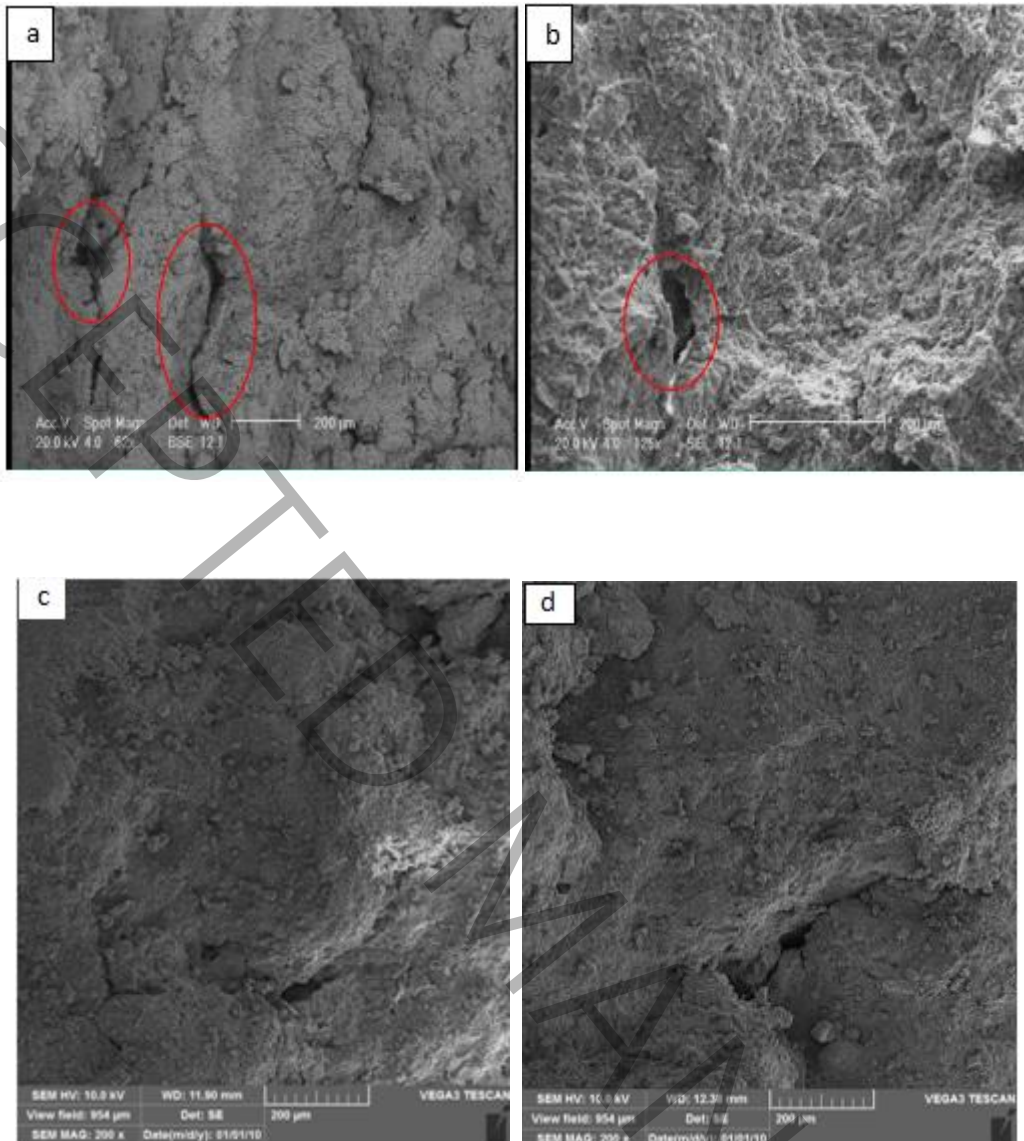




شکل ۱۵: تغییرات pH خاک با فاصله از آند

Figure 15. Variation of ph with distance from the anode

در شکل ۱۶ دو نمونه (یک نمونه خاک بهسازی نشده، یک نمونه خاک بهسازی شده با الکتروود صفحه ای آلومینیومی با ولتاژ اعمالی ۱/۵ v/cm پس از اتمام دوره زمانی ۴۸ ساعت، و قطع جریان برق از اطراف الکتروود آند) تحت آزمایش SEM قرار گرفتند. مطالعه ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی برای تایید نتایج آزمایش انجام می‌گردد. این آزمایش جهت مقایسه نمونه خاک بهسازی نشده و نمونه با حالت بهینه (الکتروود صفحه ای آلومینیوم با ولتاژ اعمالی ۱/۵ v/cm) انجام گرفته است. تغییرات میکروساختار به دو سازکار اصلی مرتبط است. اول تعویض یونی که باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و در نتیجه فشردن صفحات سیلیکاتی می‌شود و دوم خروج آب از حفرات. که این دو پدیده از سمت آند به کاتد کمتر اتفاق می‌افتد. مویبندی، فشار منفی در حفرات ایجاد کرده و باعث از بین رفتن و یا کاهش حجم حفرات می‌شود [۴۸]. تخلخل‌های موجود در خاک از جمله پارامترهای بسیار تعیین کننده و تاثیرگذار بر استحکام آن می باشد. همانگونه که در تصاویر a و b مشاهده می شود (مناطق مشخص شده) اندازه تخلخل‌ها در نمونه خاک تثبیت نشده بسیار بزرگ است و وجود تخلخل‌هایی با این ابعاد به شدت مقاومت خاک را کاهش می دهد. با مقایسه تصاویر a و b با تصاویر c و d به خوبی می توان تفاوت و تغییر در ابعاد تخلخل‌ها را بعد از تثبیت خاک مشاهده کرد. تغییراتی که لخته شدن و آگلومراسیون در آن‌ها به وضوح مشخص است این فرآیندها در تصاویر بعد از بهسازی کاملا نمایان است. نتایج نشان داده است که نمونه خاک طبیعی از توده‌های خاک جدا از هم تشکیل شده‌اند. این ممکن است به دلیل جذب آب توسط ذرات رس باشد، این ذرات با جذب آب به توده‌های بزرگتری تبدیل می‌شوند. از سوی دیگر تبادل یونی در طول الکترواسمز باعث جایگزینی یون‌های ظرفیت بالا مانند  $Al^{3+}$  و  $Fe^{3+}$  در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و همچنین جاذبه بین ذرات باعث کاهش تخلخل خاک شده و بنابراین نمونه خاک بهسازی شده دارای ترکیب متراکم می‌باشد.



شکل ۱۶: تصاویر میکروسکوپ الکترونی قبل (a و b) و بعد از بهسازی الکتروکینتیکی (c و d)

Figure 16. SEM image before (a and b) and after after electrokinetic stabilization (c and d)

با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های صورت گرفته در این تحقیق و مقایسه آن با مطالعات پیشین ارائه شده در مقدمه نتایج نشان‌دهنده بهبود شرایط مقاومتی خاک است همچنین نتایج SEM نشان دهنده کاهش حفرات موجود در خاک بعد از بهسازی الکتروکینتیکی می‌باشد که این امر می‌تواند صحت نتایج فیزیکی را تایید کند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر عوامل مختلف مرتبط با شرایط بهسازی الکترواسمزی بر پارامترهای مقاومتی خاک پرداخته شده است. به این منظور، از الکترودهای با جنس گرافیت و آلومینیوم به دو صورت صفحه‌ای و میله‌ای در گرادیان ولتاژهای  $1 \text{ v/cm}$  و  $1/5$  سانتی‌متر برای بهسازی خاک رس اشباع استفاده شد. با توجه به جهت جریان الکترواسمزی از آند به کاتد و تخلیه آب درصد رطوبت کاهش پیدا کرد و با حرکت آب و تغییر در ساختار شیمیایی به واسطه انتقال یون‌ها شاخص خمیری خاک تغییر کرد. تبادل یونی در طول الکترواسمزی باعث جایگزینی یون‌های با ظرفیت بالا در لایه هیدراته ثابت اطراف ذرات خاک می‌شود. این عامل باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه شده و جاذبه بین ذرات نیز باعث کاهش مقدار PI شد. کاهش درصد رطوبت خاک با افزایش مقاومت رابطه مستقیمی دارد با توجه به جهت جریان مقاومت از کاتد به آند افزایش پیدا کرد. انتقال کاتیون‌ها باعث تغییر در محتوای شیمیایی

خاک می‌شود. یون‌های کلسیم خاک و یون‌های آلومینیوم آزاد شده از الکتروود در فرایند سمنتاسیون شرکت کرده و باعث بهبود استحکام خاک می‌شود این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت خاک حین استفاده از الکتروود آلومینیومی نسبت به گرافیت باشد. جریان الکترواسمزی منجر به فشار منفذی منفی شده و منافذ را از بین برده و باعث یکپارچگی خاک می‌شود این مسئله باعث کاهش تخلخل و در نتیجه افزایش استحکام خاک می‌شود. تغییر ساختار و بافت نمونه های خاک رس بهسازی شده با الکتروود صفحه ای آلومینیومی با گرادیان ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$  در مقایسه با خاک شاهد مطابق تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که با توجه به حرکت کاتیونی که باعث حرکت آب هیدراته اطراف کاتیون ها شده همچنین تبادل یونی که باعث جایگزینی یون های با ظرفیت بالا می‌شود ضخامت لایه دوگانه کاهش یافته و با افزایش جاذبه بین ذرات تخلخل کاهش می‌یابد بنابراین نمونه خاک تثبیت شده به روش الکتروکینتیک دارای ترکیب متراکم‌تری می‌باشد. درصد رطوبت، حدود اتربرگ، مقاومت خاک و نشست تمامی نمونه‌ها در این تحقیق بهبود یافته‌اند اما در حالت استفاده از الکتروود صفحه‌ای بهترین نتایج بدست آمده‌اند که این به دلیل تاثیر جریان بر کل نمونه خاک و افزایش تولید گرما جهت تبخیر آب در مقابل الکتروود میله‌ای است. بهترین نتیجه برای نمونه خاک بهسازی شده با الکتروود صفحه‌ای آلومینیومی با گرادیان ولتاژ  $1/5 \text{ v/cm}$  است که در مقایسه با خاک بهسازی نشده مقادیر شاخص خمیری و نسبت تخلخل آن به ترتیب ۵۸٪ و ۳۵٪ کاهش و مقاومت فشاری محدود نشده ۱۲۸٪ افزایش یافته است.

- [١] I.L. Casagrande, Electro-osmosis in soils, *Geotechnique*, ١(٣) (١٩٤٩) .١٧٧-١٥٩
- [٢] S. Jayasekera, Electrokinetics to modify strength characteristics of soft clayey soils: a laboratory based investigation, *Electrochimica Acta*, ١٨١(٢٠١٥) ٤٧-٣٩.
- [٣] A. Estabragh, M. Naseh, A. Javadi, Improvement of clay soil by electro-osmosis technique, *Applied Clay Science*, ٩٥(٢٠١٤) ٣٤-٣٢.
- [٤] M. Malekzadeh, J. Lovisa, N. Sivakugan, An overview of electrokinetic consolidation of soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, ٣٤(٢٠١٦) ٧٧٦-٧٥٩.
- [٥] P. Asavadorndeja, U. Glawe, Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method, *Bulletin of engineering geology and the environment*, ٦٤(٢٠٠٥) ٢٤٥-٢٣٧.
- [٦] J.G. Loch, A.T. Lima, P.J. Kleingeld, Geochemical effects of electro-osmosis in clays, *Journal of applied Electrochemistry*, ٤٠(٢٠١٠) ١٢٥٤-١٢٤٩.
- [٧] S.R. Kaniraj, J. Yee, Electro-osmotic consolidation experiments on an organic soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, ٢٩(٤) (٢٠١١) ٥١٨-٥٠٥.
- [٨] S. Jayasekera, S. Hall, Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments, *Geotechnical and Geological Engineering*, ٢٥(٢٠٠٧) ١٠-١.
- [٩] D. Tjandra, P.S. Wulandari, Improving marine clays with electrokinetics method, *Civil Engineering Dimension*, ٩(٢) (٢٠٠٧) ١٠٢-٩٨.
- [١٠] H. Shoghi, M. Ghazavi, N. Ganjian, Pilot-scale electrokinetic treatment of dispersive soil and feasibility study of sodium ion transport across the soil by electric field relocation, *Arabian Journal of Geosciences*, ١٢(٢٠١٩) ٧-١.
- [١١] F. Cheng, S. Guo, H. Zeng, B. Wu, Effect of electrokinetic process on in situ stabilization and detoxification of arsenic-contaminated soil with high content of calcium, *Environmental Research*, ٢٤١(٢٠٢٤) ١١٧٥٠٤.
- [١٢] S. Ge, J. Zang, Y. Wang, L. Zheng, X. Xie, Combined stabilization/solidification and electroosmosis treatments for dredged marine silt, *Marine Georesources & Geotechnology*, ٣٩(١٠) (٢٠٢١) ١١٦٦-١١٥٧.
- [١٣] J.Q. Shang, W.A. Dunlap, Improvement of soft clays by high-voltage electrokinetics, *Journal of geotechnical engineering*, ١٢٢(٤) (١٩٩٦) ٢٨٠-٢٧٤.
- [١٤] C.-Y. Ou, S.-C. Chien, Y.-G. Wang, On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions, *Applied Clay Science*, ١٣٦-١٣٠ (٢٠٠٩) (٢-١)٤٤.
- [١٥] H. Wu, L. Hu, Microfabric change of electro-osmotic stabilized bentonite, *Applied Clay Science*, ١٠١(٢٠١٤) ٥٠٩-٥٠٣.
- [١٦] V. Jeyakanthan, C. Gnanendran, S.-C. Lo, Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay, *Canadian Geotechnical Journal*, ٤٨(١٢) (٢٠١١) ١٨٠٢-١٧٨٨.
- [١٧] M. Malekzadeh, N. Sivakugan, One-dimensional electrokinetic stabilization of dredged mud, *Marine Georesources & Geotechnology*, ٣٥(٥) (٢٠١٧) ٤٠٩-٤٠٣.
- [١٨] T. Askin, D. Turer, Effect of electrode configuration on electrokinetic stabilization of soft clays, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, ٤٩(٤) (٢٠١٦) ٣٢٦-٣٢٢.
- [١٩] H.A.M. Mahalleh, M. Siavoshnia, M. Yazdi, Effects of electro-osmosis on the properties of high plasticity clay soil: chemical and geotechnical investigations, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, ٨٨٠(٢٠٢١) ١١٤٨٩٠.
- [٢٠] J. Zhou, Y.L. Tao, C.J. Xu, X.N. Gong, P.C. Hu, Electro-osmotic strengthening of silts based on selected electrode materials, *Soils and Foundations*, ٥٥(٥) (٢٠١٥) ١١٨٠-١١٧١.
- [٢١] Y.-m. Liu, H.-f. Xu, Experimental study of the electrode material for electro-osmosis in mudflat sludge, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, ٢٠١٧, pp. ٠١٢٠٩٣.
- [٢٢] C. Yuan, C.-h. Weng, Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient, *Advances in Environmental research*, ٧(٣) (٢٠٠٣) ٧٣٢-٧٢٧.

- [23] A. Alibarootitabar, A. Ardakani, M. Mahmoudipour, Evaluation of the effect of voltage variation on the electro-osmosis dewatering of a silty soil using prefabricated vertical drains, *International Journal of Geotechnical Engineering*, 15(4)(2021) 511-512.
- [24] Z. Xue, X. Tang, Q. Yang, Influence of voltage and temperature on electro-osmosis experiments applied on marine clay, *Applied Clay Science*, 141(2017) 22-33.
- [25] J. Akansha, S. Thakur, M.S. Chaithanya, B.S. Gupta, S. Das, B. Das, N. Rajasekar, K. Priya, Technological and economic analysis of electrokinetic remediation of contaminated soil: A global perspective and its application in Indian scenario, *Heliyon*(2024) .
- [26] M.Y. Fattah, Q.G. Majeed, H.H. Joni, Comparison between methods of soil saturation on determination of the soil water characteristic curve of cohesive soils, *Arabian Journal of Geosciences*, 14(2)(2021) 101.
- [27] L. Zhang, L.-p. Jing, N.-w. Wang, C. Fang, Y.-q. Li, Z.-d. Shan, Electro-Osmosis Chemical Treatment of High-Salinity Soft Marine Soils: Laboratory Tests, *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1)(2017) .
- [28] J. Wang, H. Fu, F. Liu, Y. Cai, J. Zhou, Influence of electro-osmosis activation time on vacuum electro-osmosis consolidation of a dredged slurry, *Canadian Geotechnical Journal*, 55(1)(2018) 153-157.
- [29] Z. Sun, W. Tan, J. Gong, G. Wei, Electrokinetic Remediation of Zn-Polluted Soft Clay Using a Novel Electrolyte Chamber Configuration, *Toxics*, 11(3)(2023) 263.
- [30] S.R. Kaniraj, H. Huong, J. Yee, Electro-osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain, *Geotechnical and Geological Engineering*, 29(3)(2011) 295-297.
- [31] Z. Sun, J. Geng, C. Zhang, Q. Du, Electrokinetic Remediation of Cu-and Zn-Contaminated Soft Clay with Electrolytes Situated above Soil Surfaces, *Toxics*, 12(8)(2024) 563.
- [32] Z. Sun, S. Xu, C. Zhang, J. Geng, Y. Gu, Electroosmotic strengthening of soft clay under different electrification modes, *Energy Science & Engineering*.(2024) .
- [33] H. Jin, L. Zhang, B. Wang, C. Fang, L. Wang, Effects of electrode materials and potential gradient on electro-osmotic consolidation for marine clayey soils, *Frontiers in Earth Science*, 12(2024) 1260045.
- [34] Z. Sun, C. Zhang, B. Demarscho Eugene, X. He, Electroosmotic flow in soft clay and measures to promote movement under direct current electric field, *Plos one*, 19(2024) (4).0302150.
- [35] W. Abdullah, A. Al-Abadi, Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil, *Applied Clay Science*, 47(4-3)(2010) 350-353.
- [36] V. Kumar, The effect of electrokinetic stabilization (EKS) on peat soil properties at Parit Botak area, Batu Pahat, Johor, Malaysia, *Indian Journal of Science and Technology*, 11(2018) 44.
- [37] C. Liaki, C. Rogers, D. Boardman, Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes, *Journal of applied electrochemistry*, 40(2010) 1237-1225.
- [38] A. Wahab, Z. Embong, S.A.A. Tajudin, Q.U. Zaman, H. Ullah, The electrokinetic stabilization (EKS) impact on soft soil (peat) stability towards its physical, mechanical and dynamic properties at Johor state, Peninsular Malaysia, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts a/b/c*, 123(2021) 103028.
- [39] D. Bergado, A. Balasubramaniam, M. Patawaran, W. Kwunpreuk, Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 4(4)(2000) 163-153.
- [40] A.H. Vakili, R. Narimousa, M. Salimi, M.S. Farhadi, M. Dezh, Effect of freeze-thaw cycles on characteristics of marl soils treated by electroosmosis application, *Cold Regions Science and Technology*, 167(2019) 102861.
- [41] A. Flora, S. Gargano, S. Lirer, L. Mele, Effect of electro-kinetic consolidation on fine grained dredged sediments, *Procedia Engineering*, 158(2016) 8-3.
- [42] G. Lefebvre, F. Burnotte, Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes, *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2)(2002) 408-299.
- [43] Y. Shen, W. Shi, S. Li, L. Yang, J. Feng, M. Gao, Study on the Electro-Osmosis Characteristics of Soft Clay from Taizhou with Various Saline Solutions, *Advances in Civil Engineering*, 2020(1)(2020) 6752565.
- [44] A. Hosseini, S.M. Haeri, S. Mahvelati, A. Fathi, Feasibility of using electrokinetics and nanomaterials to stabilize and improve collapsible soils, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(5)(2019) 1065-1055.
- [45] Z. Sun, Y. Qing, C. Zhang, B.D. Eugene, Electroosmosis and electrophoresis in soft clay under direct current electric field, *Heliyon*, 10(7)(2024) .

[٤٤]Y. Sugiyama, N. Hashimoto, C. Couture, D. Takano, Electrochemical perspective on the applicability of electroosmosis for clay consolidation, *Journal of Applied Electrochemistry*, ٥٤(٥) (٢٠٢٤) ١٠٧٣-١٠٥٧.

[٤٧]W. Wen, L. Jia, W. Zhao, H. Feng, D. Cao, J. Xie, T. Xu, M. Cui, W. Zhou, Q. Mei, Study on the effect of electrokinetic methods combined with and solidification/stabilization technique for remediation of Cu<sup>٢+</sup>-contaminated soil under different voltage gradients, *International Journal of Electrochemical Science*, ١٧(١٠) (٢٠٢٢) ٢٢١٠٢١.

[٤٨]H. Bibak ,J. Khazaei, H. Moayedi, Investigating the effect of a new industrial waste on strengthening the soft clayey soil, *Geotechnical and Geological Engineering*, ٣٨(٢٠٢٠) ١١٨٣-١١٩٥.

# Evaluating effect of electro – osmotic on mechanical properties of soft clay

Hadis Bibak<sup>a</sup>, Navid Ganjian<sup>a\*</sup>, Jahangir Khazaei<sup>b</sup>, Amin bahmanpour<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Civil Engineering Department, Science and Reseach Branch, Islame azad University, Tehran, Iran

<sup>b</sup> Civil Engineering Department, Razi University, Kermanshah, Iran

## ABSTRACT

One of the techniques of stabilization soil is the electrical method. In this method, stabilization of fine-grained soils, especially saturated clay soils, is done by reducing the thickness of the double water layer by establishing an electric current. Soft clay is one of the problematic soils, because it is affected by weather conditions, and as a result, building structures on them is always at risk. In this study, to improve and stabilize soft clay soils, the electrokinetic injection method, which is one of the limited stabilization methods in situ and is very economical in terms of time and cost, was used. For this purpose, a layer of soil with water content and specific gravity in situ is compacted in five layers in a chamber with dimensions of 50\*30\*20 cm<sup>3</sup> and direct current (DC) with voltages of 1/5 and 1 v/cm of soil mass has been applied for 48 hours. The used electrodes were made of two types of aluminum and graphite and were used in two shapes, rod and plate. The index results of the studies showed that the use of this method increases the unconfined compressive strength from 98 kPa to 223 kPa, decreases the water content from 24 to 15/2 and the plasticity index from 24 to 10 and Soil porosity decreases from 0/675 to 0/443 . The results of chemical analysis confirm the correctness of the physical results in the scanning electron microscope images. According to the water content, Etterberg limits, unconfined compressive strength and consolidation tests, it was determined that the best performance is related to the use of plate aluminum electrode with a voltage of 1/5.

## KEYWORDS

Soft clay soil, electro - osmosis, electro d material, electrode shape

---

\* Corresponding Author: Email: n.ganjian@srbia.ac.ir