

# بهبودی خاکهای ریزدانه با استفاده از تزریق الکتروکینتیک

امین فلامکی<sup>۱\*</sup>؛ نادر شریعتمداری<sup>۲</sup>؛ علی نورزاد<sup>۳</sup>

## چکیده

در این تحقیق غلظت محلول سیلیکات سدیم در بهسازی سیلت غیر خمیری با روش تزریق الکتروکینتیک بررسی شده است. محلولهای سیلیکات از طریق یک مخزن در کنار الکترود آند به درون خاک تزریق شده اند. تزریق سیلیکات سدیم مقاومت خاک را بسته به غلظت محلول، در مجاورت الکترود آند بین ۵ تا ۸ برابر افزایش داده است. تزریق ۵ و ۱۰ درصد از این محلول مقاومت خاک را در کل طول نمونه به مقدار قابل توجه افزایش می دهد. اگرچه محلول ۲۰ درصد سیلیکات سدیم، مقاومت خاک را در مجاورت آند به شدت افزایش می دهد، اما تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت در سایر بخشهای نمونه دیده نمی شود. بیشترین افزایش مقاومت در طول نمونه (طول نفوذ دوغاب) به تزریق محلول ۵ درصد سیلیکات سدیم در آند و محلول ۱۰ درصد اسید فسفریک در کاتد اختصاص دارد بطوری که مقاومت ۳/۳ تا ۴/۰ برابر شده است. کمترین عمق نفوذ دوغاب به تزریق محلول ۲۰ درصد سیلیکات سدیم در آند اختصاص دارد. در این پژوهش نشان داده می شود که می توان با این روش برای شکل گیری یک شمع و یا بهسازی لرزه ای در زیر پی های موجود اقدام نمود.

## کلمات کلیدی

الکتروکینتیک، تزریق، سیلیکات سدیم، بهسازی

## *Soil Improvement by Electrokinetic Injection*

N. Shariatmadari; A. Falamaki; A. Noorzad

### ABSTRACT

In this study, a non-plastic silt is grouted by sodium silicate in an electrokinetic cell. The silicate solutions are injected through the reservoir next to the anode electrode. The injection of Na-silicate solution increases the strength adjacent to the anode electrode between 5 to 8 times compared with the base soil. Increasing silicate concentration generates lower increase in strength across the specimen. This means that decreasing the silicate concentration increases the penetration length of the grout. Neglecting the results for anode side of the specimens, the maximum increase in strength has been observed for injection of 5% silicate solution through the anode with acid in the cathode chamber. The obtained strength is 3.3 to 4.0 times greater than the strength of the base soil with the highest penetration length. The application of this technology for increasing the strength of the soil underneath an existing foundation or generation of pile through the soil is proven.

### KEYWORDS

Electrokinetics, Soil improvement, Sodium silicate, Injection

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۶/۶/۱۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۸/۳

\* نویسنده مسئول و استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، شیراز، شهرک گلستان، Email: afalamaki@iust.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، Email: shariatmadari@iust.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران، Email: noorzad@pwut.ac.ir

می‌باشد. در مرجع [۱۱] بیان شده است که کاربرد تزریق الکتروکینتیک با روش تحکیم الکتروکینتیک که هدف آن افزایش مقاومت رسها از طریق تحکیم و کاهش رطوبت است متفاوت می‌باشد. در تزریق الکتروکینتیک می‌توان چسبندگی خاک را بطور مصنوعی افزایش داد بدون آن که رطوبت آن زیاد تغییر نماید. هدف از انجام این تحقیق بررسی تزریق الکتروکینتیک سیلیکات سدیم و تاثیر آن بر مقاومت خاک سیلت می‌باشد. دو پرسش اصلی که در این تحقیق جواب داده می‌شوند عبارتند از: ۱- تاثیر غلظت محلول سیلیکات سدیم در بهسازی سیلت با روش تزریق الکتروکینتیک چیست؟ ۲- تاثیر شرایط کاتولیت (سیال سمت کاتد یا شرایط مرزی) در بازدهی روش چه می‌باشد؟ برای رسیدن به اهداف یاد شده آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش غلظت سیلیکات سدیم، عمق نفوذ دوغاب افزایش یافته و استفاده از اسید در کاتد موجب رسوب بیشتر سیلیکات سدیم و افزایش مقاومت در تمام توده خاک سیلت غیر خمیری می‌شود.

### ۱-۱- تئوری الکتروکینتیک

اعمال جریان مستقیم الکتریکی بوسیله الکترودهای زیرآب، موجب اکسیداسیون در آند و تشکیل یک جبهه اسیدی می‌شود. در حالی که در کاتد جبهه بازی ایجاد می‌شود:

$$2\text{H}_2\text{O} - 4e^- \rightarrow \text{O}_2\uparrow + 4\text{H}^+ \quad (\text{در آند})$$

$$4\text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightarrow 2\text{H}_2\uparrow + 4(\text{OH})^- \quad (\text{در کاتد})$$

سرعت انتقال ذره در حالت یک بعدی برابر است با [۱۴]:

$$v_i = (u^* + k_e) \frac{\Delta E}{\Delta L} \quad (۱)$$

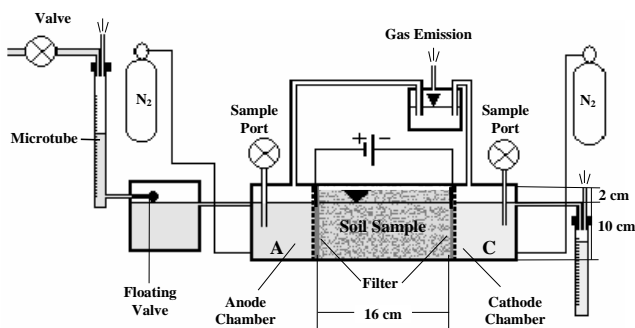
که در آن  $v_i$  (m/s) سرعت ذره،  $u^*$  (m<sup>2</sup>/V-s) تحرک پذیری یونی موثر،  $k_e$  (m<sup>2</sup>/V-s) ضریب نفوذپذیری الکترواسمز و  $\Delta E/\Delta L$  (V/m) گرادیان الکتریکی (پتانسیل الکتریکی در واحد طول) می‌باشد. با توجه به معادله هلم هولتز- اسمولوچوفسکی [۱۴] دبی جریان الکترواسمز،  $Q$  برابر است:

$$Q = \frac{\xi n}{\eta} \frac{\Delta E}{\Delta L} A = k_e i_e A = vA \quad (۲)$$

که در آن  $\xi$  (F/m) ضریب گذردهی سیال حفره ای،  $\eta$  (N-s/m<sup>2</sup>) پتانسیل زتا،  $i_e$  (V/m) گرادیان الکتریکی و  $n$  تخلخل محیط است. بنابراین  $k_e$  برابر با  $(\xi n / \eta)$  می‌باشد. در بیشتر موارد مهاجرت یونی مؤثرتر از الکترواسمز می‌باشد [۱۵]. بنابراین لزجت مواد تزریق باید نزدیک به لزجت آب باشد. سیلیکات سدیم از مهمترین دوغابهای شیمیایی غیر خطرناک است که در

فن آوری تزریق نفوذی به روش سنتی که در آن حفره‌های خاک توسط یک ماده تزریق پر می‌گردد، در خاکهای دارای ریزدانه قابلیت استفاده کمتری دارد. تزریق در خاکهای حاوی بیش از ۲۰٪ سیلت و سیلت متراکم غیرممکن است و رس‌های سیلت‌دار نیز تزریق ناپذیرند [۱] [۲]. یکی از روشهای جدید، تزریق الکتروکینتیک است. در این روش دو الکترود آند و کاتد در زمین نصب شده و یک میدان الکتریکی بوجود می‌آورند. در اثر اعمال میدان الکتریکی بارهای مثبت (کاتیونهای موجود در خاک) به سمت قطب منفی (کاتد) و بارهای منفی به سمت قطب مثبت (آند) جذب می‌شوند. تعدادی بار مثبت اضافی بر روی سطح باردار خاک وجود دارند. همینکه این بارهای اضافی به سمت قطب منفی حرکت کردند آب نیز در اثر نیروی کشش با این ذرات به سمت قطب منفی حرکت می‌کند. این جریان را جریان الکترواسمز می‌نامند. بنابراین اگر مواد تزریق در سمت آند اضافه شود با سرعت بیشتری توسط فرایندهای الکترواسمز و مهاجرت یونی به درون خاک ریزدانه نفوذ می‌نماید. از برتریهای این روش آنست که می‌توان بدون دستخوردگی خاک را بهسازی نمود به طوری که در حین عملیات تغییر حجم خاک تا اندازه ای کم باشد. پژوهشگران آزمایشگاهی برای تزریق الکتروکینتیک در پنجاه سال اخیر انجام داده‌اند تا خواص خاک را بهبود دهند. تأثیر محلولهای شیمیایی بر روی خواص مکانیکی خاکها با استفاده از الکتروکینتیک [۳]، بهبود الکتروشیمی مونت موریلونیت با تزریق منیزیم و رسوب بروسیت [۴]، تزریق سوسپانسیون بنتونیت با سرعت بیشتر به درون خاکهای ریزدانه با استفاده از جریان الکترواسمز [۵]، تزریق آلومینیوم با گرادیان الکتروشیمی و افزایش مقاومت خاکهای رسی [۶]، تزریق پتاسیم در خاک متورم شونده زیر یک بزرگراه [۷]، تزریق الکتروکینتیک یونهای مس و آلومینیوم و تأثیر بر مقاومت برشی [۸]، تزریق یون فسفات و آلومینیوم در خاک کائولینیت [۹]، افزایش چسبندگی خاکهای کربناتی با دو محلول تثبیت کننده کلرید کلسیم و سولفات آلومینیم [۱۰] [۱۱] و تثبیت خاکهای نرم با تزریق اسید فسفریک از کاتد [۱۲] نمونه‌هایی از این تحقیقات می‌باشند. در آزمایشهای گزارش شده در مرجع شماره [۱۳]، N-Silicate برای تزریق در خاک ۵۰ درصد ماسه و ۵۰ درصد سیلت استفاده شده است. اگرچه مقاومت خاک افزایش یافته اما نتایج چندان آشکار نیست و نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. دیده می‌شود که بیشتر این تحقیقات بر روی خاکهای رسی متمرکز

بخشهای مشبک با مخزن اصلی در ارتباط هستند. از نیتروژن برای چرخش سیال استفاده شده تا محلول ها هموژن باقی بمانند. به وسیله یک لوله، جعبه دیگری به مخزن آند وصل گردید. یک لوله باریک با قطر داخلی ۱۶ mm به این جعبه توسط شیر شناور متصل می‌باشد. به محض پایین آمدن آب در مخزن آند از جعبه مجاور، آب به درون آن سرازیر می‌گردد. با توجه به پائین آمدن تراز آب، شیر شناور باز شده و از لوله باریک کاهش آب جبران می‌شود. با اندازه گیری افت آب در لوله باریک حجم آب ورودی از طریق آند قابل تعیین است. با یک لوله باریک متصل به مخزن کاتد نیز می‌توان حجم آب خروجی از نمونه را در زمانهای مختلف اندازه گیری کرد. از یک منبع تغذیه پتانسیل ثابت با ظرفیت نهایی ۳ آمپر و ۶۰ ولت برای اعمال پتانسیل ثابت استفاده گردیده است.



شکل (۱): سلول الکتروشیمی

خاک سیلت قهوه ای و به شکل پودر خشک از معدن شن و ماسه فیروز کوه تهیه شد. آزمایشهای خواص فیزیکی و شیمیایی نشان می‌دهد که این خاک سیلت غیر خمیری (ML) بوده که ماکزیم زره آن ۰/۰۲۶mm و درصد رطوبت بهینه آن ۱۴/۳ درطی می‌باشد. کانی های اصلی این خاک بر اساس آزمایش x-ray کوارتز و فلدسپار می‌باشند.

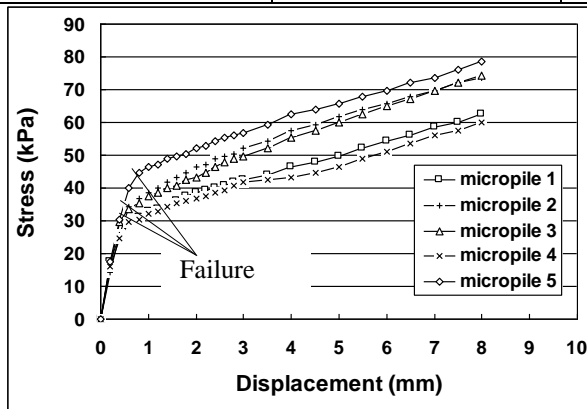
جدول (۱): خلاصه آزمایشها

نوبت آزمایش		۱		۲		۳		۴	
بدون فرایند		۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
محلول آند	-	آب	سیلیکات سدیم ۵ درصد	سیلیکات سدیم ۵ درصد	سیلیکات سدیم ۱۰ درصد	سیلیکات سدیم ۱۰ درصد	سیلیکات سدیم ۲۰ درصد	سیلیکات سدیم ۲۰ درصد	سیلیکات سدیم ۲۰ درصد
محلول کاتد	-	آب	آب	اسید ۱۰ درصد	آب	اسید ۱۰ درصد	آب	اسید ۱۰ درصد	آب
انرژی مصرفی (W-H)	-	۲۸.۹۹	۴۵.۱۲	۲۶.۲۱	۷۳.۲۲	۳۹.۱۰	۵۶.۷۶	۵۰.۹۶	۵۰.۹۶
وزن مخصوص خشک (kN/m <sup>3</sup> )	۱۶.۴۹	۱۶.۵۱	۱۶.۸۸	۱۶.۶۳	۱۶.۷۹	۱۶.۵۹	۱۶.۹۵	۱۶.۸۲	۱۶.۸۲
نسبت تخلخل	۰.۵۸	۰.۵۷	۰.۵۴	۰.۵۶	۰.۵۵	۰.۵۷	۰.۵۳	۰.۵۴	۰.۵۴

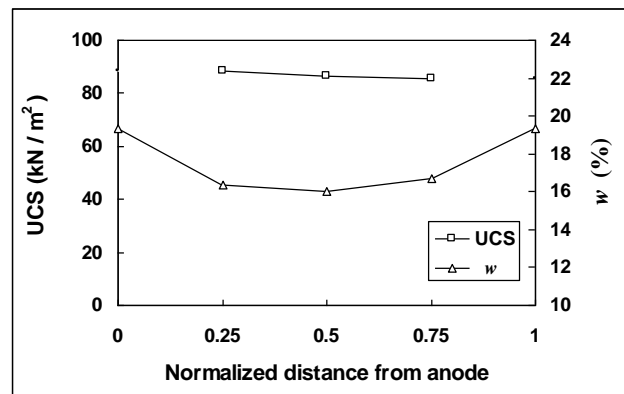
تزریق کاربرد زیادی دارد. محلول های سیلیکات سدیم با اسید حاصل از یک کاتالیست به ژل تبدیل می‌شوند. پس اگر محلول سیلیکات سدیم از طریق آند به خاک تزریق شود اسید تولید شده می‌تواند موجب رسوب آن و افزایش مقاومت خاک شود. این مقاله بر روی درک بهتر از کاربرد بهسازی خاک ریزدانه با روش تزریق الکتروکینتیک (با هدف تغییرات ناچیز درصد رطوبت) متمرکز است و علاوه بر افزایش مقاومت خاک سیلت، نشان داده می‌شود که می‌توان برای شکل گیری یک شمع و یا بهسازی لرزه ای در زیر پی های موجود اقدام نمود.

## ۲- برنامه آزمایشها

به منظور دستیابی به اهداف، آزمایشهایی مطابق جدول ۱ صورت گرفته است. با استفاده از یک سلول الکتروکینتیک، سیلیکات سدیم به درون یک سیلت غیر خمیری تزریق گردیده است. محلولهای سیلیکات با غلظتهای متفاوت از طریق یک مخزن در کنار الکتروکاتد به درون خاک تزریق شده است. نشان داده شده که استفاده از اسید در کاتد بر روی جریان الکترواسمز تأثیر می‌گذارد [۱۲]. اسید نیتریک جریان الکترواسمز را معکوس می‌کند اما اسید فسفریک جریان معکوسی ایجاد نکرده و جریان از سمت آند به کاتد باقی می‌ماند. یونهای فسفات بر خلاف نیترات در خاک رسوب کرده و می‌توانند مقاومت خاک را افزایش دهند. بنابراین در این تحقیق از اسید فسفریک در مخزن مجاور کاتد استفاده است. چهار نوبت آزمایش انجام شده که ویژگی آنها در جدول ۱ دیده می‌شود. در همه آزمایشها گرادیان الکتریکی ۱V/cm در طول نمونه به مدت یک هفته اعمال گردیده است. شکل ۱ سلولی که برای این تحقیق طراحی شده را نشان می‌دهد. دستگاه شامل یک جعبه با سه بخش از جنس پلکسی گلاس می‌باشد. نمونه خاک در مخزن وسط با ابعاد ۱۲۰×۹۰×۱۶۰ میلیمتر قرار می‌گیرد. از ورقه‌های استیل مشبک به عنوان الکتروکاتد استفاده می‌شود. مخازن کناری یعنی مخازن کاتد و آند از طریق



شکل (۴): منحنی تنش جداره- تغییر مکان ریزشمعها در آزمایش کنترل- خاک پایه (بهبود نیافته)



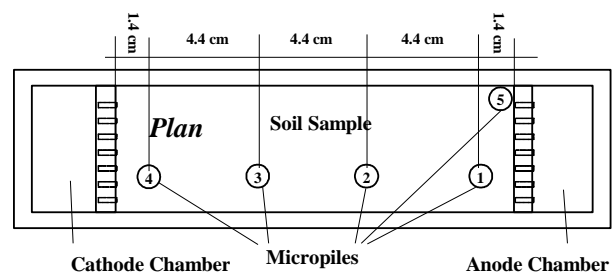
شکل (۲): تغییرات مقاومت تک محوری و درصد رطوبت در طول نمونه قبل از اعمال میدان الکتریکی

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- جریان الکترواسمز و پروفیل درصد رطوبت

شکل ۵ حجم جریان ورودی و خروجی از نمونه خاک را از سمت آند و کاتد نشان می‌دهد. در یک نتیجه گیری کلی می‌توان گفت که در آزمایشهای ۲ تا ۷ (که سیلیکات سدیم از آند به درون خاک تزریق شده) جریان الکترواسمز چند ساعت بعد از شروع آزمایش قطع شده است. بیشترین حجم جریان در آزمایش ۱ (۳۰۳ و ۳۵۶ سی سی از طریق آند و کاتد) که هیچ ماده افزودنی به خاک تزریق نشده دیده می‌شود. کمترین حجم جریان در آزمایشات ۲ و ۳ با کمتر از ۲۰ سی سی دیده می‌شود. در این آزمایش‌ها ۵ درصد سیلیکات سدیم از آند به خاک تزریق شده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که افزایش غلظت سیلیکات سدیم موجب افزایش حجم جریان الکترواسمز می‌شود. شاید بتوان علت افزایش جریان را ناشی از این دانست که در غلظتهای بیشتر سیلیکات سدیم نیاز به تولید اسید بیشتر برای رسوب سیلیکات است و در نتیجه با افزایش غلظت سیلیکات سدیم رسوب دیرتر ایجاد شده و جریان زمان بیشتری تداوم می‌یابد. بیشترین اختلاف در جریان ورودی و خروجی در آزمایش ۱ است. در شکل ۶ پروفیل درصد رطوبت در طول نمونه در پایان آزمایش ترسیم شده است. همه نمونه‌ها با درصد رطوبت اولیه ۱۵ درصد تهیه شده‌اند. اما درصد رطوبت بعد از اشباع نمونه افزایش یافته است. پس از اعمال میدان الکتریکی به مدت یک هفته به نمونه‌های مختلف، کمترین پروفیل درصد رطوبت به آزمایش ۱ (بدون تزریق مواد شیمیایی) اختصاص دارد. با توجه به نتایج شکل ۶ می‌توان استدلال نمود که تزریق سیلیکات سدیم به روش الکتروکینتیک کمترین دست خوردگی را ایجاد کرده و افزایش مقاومت ناشی

شکل ۴ تنش برشی سطح جداره ریزشمع‌ها را نسبت به جابجایی نشان می‌دهد (از مقاومت نوک چشم پوشی شده است). در مرجع شماره [۱۱] از این روش برای ارزیابی چسبندگی خاک در مجاورت آند استفاده شده است. طبق تعریف بار گسیختگی، محل تقاطع منحنی تنش- کرنش و نیمساز زاویه مماس‌های دو بخش خطی می‌باشد [۱۶].

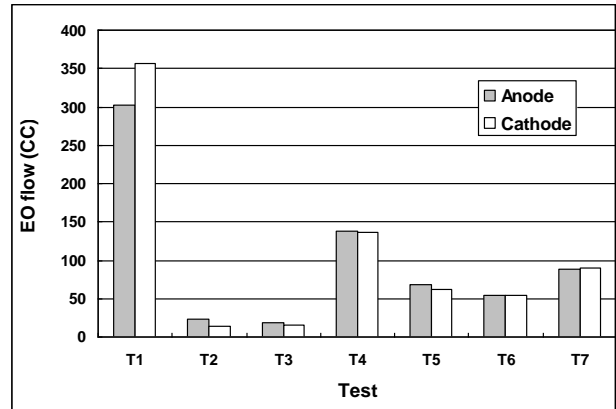


شکل (۳): محل نصب میکروشمعها در سلول

تفاوت مقاومت ریزشمع ۲ و ۳ نسبت به ۱ و ۴ به دلیل بیشتر بودن درصد رطوبت در بخشهای نزدیک به مخازن است. از ریزشمع ۵ به دلیل تأثیر سختی سلول استفاده نشده است.

نتایج شکل ۲ و ۴ نشان می‌دهد نمونه‌های ساخته شده در راستای طول، همگن و یکنواخت می‌باشد. در آزمایشات تزریق با روش الکتروکینتیک انجام شده، پس از اشباع نمونه‌ها با آب، همه مخازن با محلولهای مورد نیاز پر شده و گرادیان  $17 / \text{cm}$  به مدت یک هفته اعمال گردید.

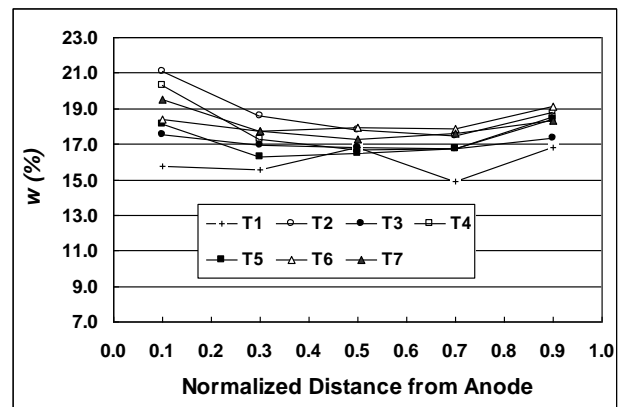
از کاهش درصد رطوبت نمی‌باشد.



شکل (۵): حجم کل جریان الکترواسمز در طی یک هفته

### ۲-۳-۲- پروفیل pH

رسوب سیلیکات در خاک نیازمند وجود اسید می‌باشد. pH محلولهای سیلیکات سدیم مورد استفاده بین ۱۰/۸ تا ۱۱/۰ می‌باشد. اسید تولید شده در مجاورت آند محیط مناسب برای رسوب سیلیکات تزریق شده به درون خاک را فراهم می‌کند. در شکل ۷- الف و ۷- ب تغییرات pH در آزمایشهای ۱ تا ۷ در طول نمونه خاک در پایان آزمایش دیده می‌شود. pH خاک قبل از اعمال فرایند الکتروکینتیک نزدیک به ۸/۱ بوده است. با اعمال میدان الکتریکی در آزمایش ۱، pH در مجاورت آند به کمتر از ۶/۲ و در مجاورت کاتد به بیش از ۱۰/۵ افزایش می‌یابد.



شکل ۶- پروفیل درصد رطوبت در طول نمونه در انتهای فرایند

نزدیک به ۶۰ درصد طول نمونه pH بیش از ۸/۱ است در آزمایشات ۲، ۴ و ۶ که سیلیکات سدیم در آند و آب در کاتد تزریق شده، pH خاک در بیش از ۷۰ تا ۸۰ درصد طول نمونه افزایش یافته است (شکل ۷- الف). با افزایش غلظت سیلیکات سدیم نیز طول نمونه خاک که pH آن بیش از ۸/۱ می‌گردد افزایش می‌یابد. کمترین پروفیل pH در شکل ۷- الف به آزمایش ۲ تعلق دارد که در آن از ۵ درصد سیلیکات سدیم استفاده شده است در هر سه آزمایش شکل ۷- الف، pH در مجاورت آند

کاهش یافته اگرچه سدیم سیلیکات با pH بالا به خاک تزریق شده است. این نتایج بیانگر رسوب سیلیکات در مجاورت الکتروآند و بسته شدن حفره‌های خاک و قطع جریان الکترواسمز می‌باشد. شکل ۷- ب پروفیل pH آزمایشات ۳، ۵ و ۷ را با ۱ مقایسه کرده است. در این آزمایشات از محلول اسید فسفریک در کاتد استفاده شده است. برخلاف شکل ۷- الف، پروفیل pH آزمایشات ۳ و ۵ در زیر خط pH خاک (۸/۱) می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که انتظار می‌رود سیلیکات بیشتری در این آزمایشات در طول نمونه خاک رسوب کرده باشد اما آزمایشهایی برای اندازه‌گیری رسوب و اثبات آن لازم است.

### ۳-۳-۳- پروفیل مقاومت

همانگونه که در قبل شرح داده شد از روش ریزشمع‌ها برای تعیین افزایش مقاومت و عمق نفوذ دوغاب استفاده گردید. ریزشمع‌ها یک هفته پس از اعمال میدان الکتریکی تحت بار قائم قرار گرفته‌اند.

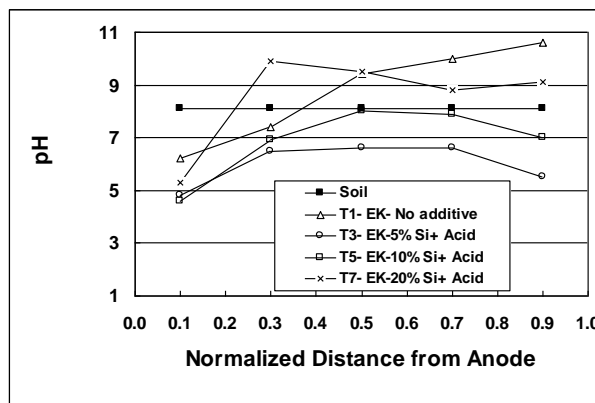
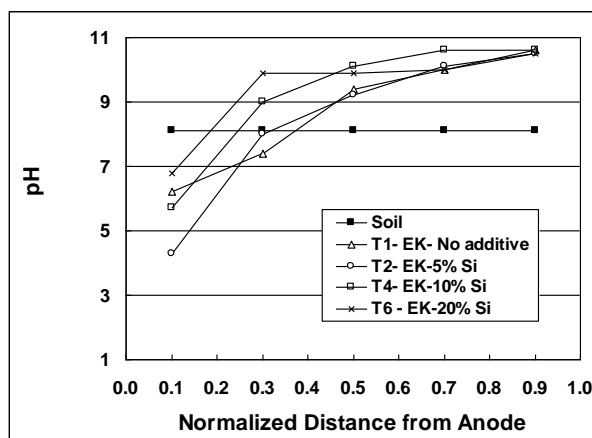
منحنی تنش برشی جداره نسبت به جابجایی ریزشمع ۱ در همه آزمایشات در شکل ۸ به عنوان نمونه ترسیم شده است. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که فرایند الکتروکینتیک بدون مواد افزودنی (آزمایش ۱) در مقاومت خاک تغییری ایجاد نمی‌کند و منحنی تنش - تغییر مکان ریزشمع در این آزمایش و نمونه خاک بدون فرایند الکتروکینتیک برهم منطبق است. اما تزریق سیلیکات سدیم مقاومت ریزشمع ۱ را در آزمایشات ۲ تا ۷ به شدت افزایش داده است.

به منظور اینکه نتایج گرفته شده از منحنی تنش برشی جداره - تغییر مکان برای کلیه ریزشمع‌ها در همه آزمایشات قابل تفسیر باشد شکلهای ۹- الف تا ج ترسیم شده‌اند که در آنها به تنش گسیختگی ریزشمع‌ها توجه شده است. فرایند الکتروکینتیک بدون مواد افزودنی (آزمایش ۱)، مقاومت خاک را بجز در مجاورت آند افزایش می‌دهد. بخشهای نزدیک به کاتد (ریزشمع ۴) بیشترین مقاومت را در این آزمایش (۱) نشان می‌دهد. اگر چه فرایند الکتروکینتیک پیچیده می‌باشد اما افزایش مقاومت می‌تواند ناشی از عواملی مثل کاهش درصد رطوبت نمونه، اکسیداسیون آهن خورده شده از آند [۱۷] و رسوب کاتیونهای حفره ای در محیط با pH بالا در مجاورت کاتد باشد.

نتایج پروفیل درصد رطوبت نشان داد که کمترین پروفیل درصد رطوبت به آزمایش ۱ تعلق دارد که به معنی آبیگری بیشتر این نمونه توسط فرایند الکتروکینتیک می‌باشد. از طرفی دیده شد که در بیش از ۶۰ درصد طول نمونه در سمت کاتد pH

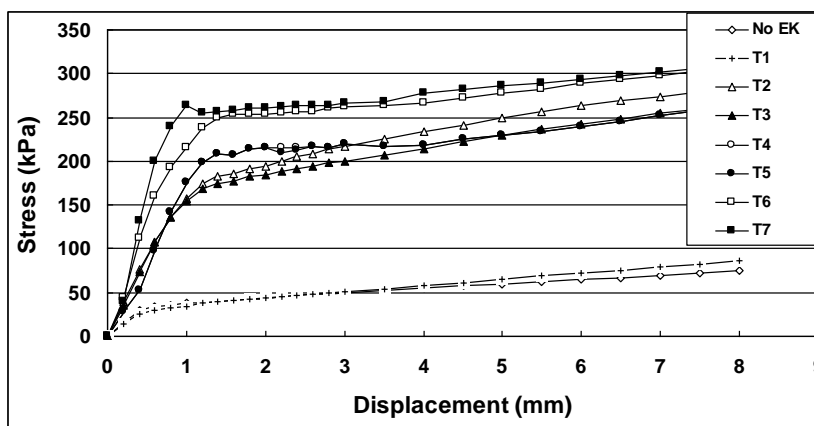
تزیق ۵ و ۱۰ درصد از این محلول مقاومت خاک را افزایش می‌دهد. استفاده از اسید در مخزن کاتد موجب افزایش بیشتر مقاومت در تمام طول می‌شود. بیشتر نشان داده شد که پروفیل pH آزمایشات ۳ و ۵ در زیر خط pH طبیعی خاک بوده و کمترین پروفیل pH به این دو آزمایش وابسته است این نتایج بدان معنی است که رسوب سیلیکات بیشتری در نمونه خاک این دو آزمایش صورت گرفته و مقاومت نمونه‌ها در مقایسه با سایر آزمایشات بیشتر افزایش یافته است. در شکل ۹-ج دیده می‌شود اگرچه محلول ۲۰ درصد سدیم سیلیکات (آزمایشات ۶ و ۷) مقاومت خاک را در مجاورت آند به شدت افزایش داده است اما تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت در سایر بخشهای نمونه دیده نمی‌شود. در این شکلها دیده می‌شود که با افزایش غلظت سیلیکات همیشه (در اینجا) عمق نفوذ دوغاب زیاد نمی‌گردد. نکته قابل توجه در باره شکل ۹ این است که کمترین جریان الکترواسمز در آزمایشات ۲ و ۳ (تزیق ۵ درصد سیلیکات سدیم) دیده شد اما این دو آزمایش بیشترین افزایش مقاومت را در طول نمونه از خود نشان داده اند. علاوه بر این، درصد رطوبت در طول هر دو نمونه بیش از نمونه آزمایش ۱ می‌باشد که بیانگر افزایش مقاومت بدون تحکیم یا آب‌گیری است. زیرا نمونه‌های ۲ و ۳ از ۱ مرطوب تر هستند و تفاوت جریان الکترواسمز ورودی و خروجی از خاک در این دو نمونه مطابق شکل ۵ ناچیز است. اگر چه الکترواسمز سیال حفره‌ای و در نتیجه دوغاب را به طرف کاتد می‌برد اما مهاجرت یونی انتقال بارهای منفی به طرف آند و یونهای مثبت به طرف کاتد می‌تواند موثرتر باشد در حالی که جریان سیالی در خاک وجود نداشته باشد [۱۸]. پس مهاجرت یونی عامل حاکم در انتقال سیلیکات به جلو و افزایش مقاومت می‌باشد.

بیش از مقدار طبیعی خاک (۸/۱) می‌باشد. در آزمایش ۱ نیز در بیش از ۷۰ درصد طول نمونه در سمت کاتد مقاومت بین ۶۰ تا ۱۶۰ درصد افزایش داشته است.



شکل (۷): پروفیل pH در طول نمونه (الف) با کاتولیت آب (ب) با کاتولیت محلول اسید فسفریک

شکل ۹ پروفیل مقاومت را برای تزیق محلول سیلیکات سدیم در حالت استفاده نکردن و استفاده از اسید فسفریک در کاتد مقایسه می‌کند. شکل ۹-الف و ۹-ب نشان می‌دهد که



شکل (۸): تنش برشی جداره میکرو شمع ۱ نسبت به تغییر مکان

در همه آزمایشها سیلیکات سدیم مقاومت خاک را در مجاورت آند بین ۴۰ تا ۷۰ درصد افزایش می‌دهد. افزایش

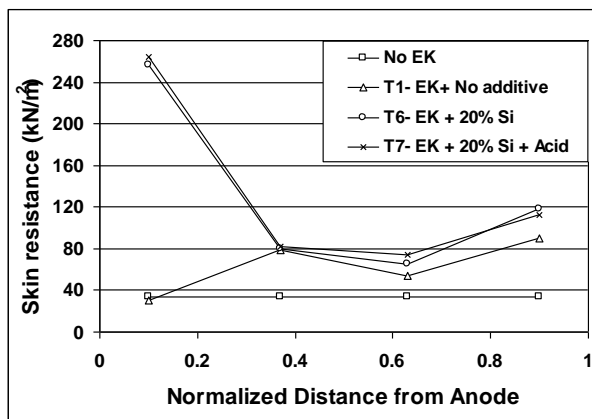
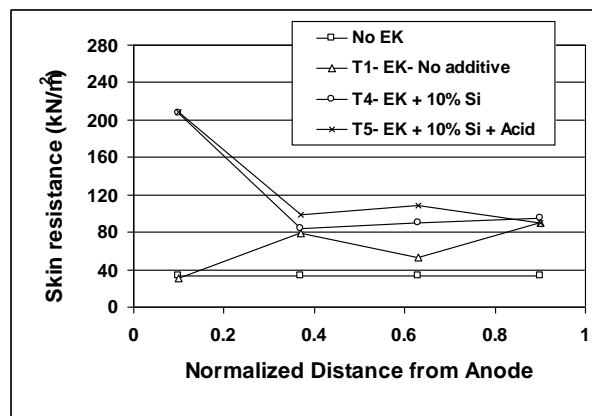
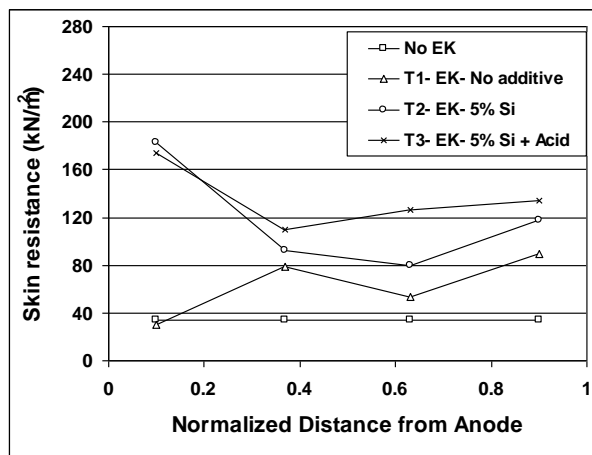
در طول نمونه اختصاص دارد یعنی مقاومت خاک در طول نمونه حداقل ۳ برابر شده است. کمترین عمق نفوذ دوغاب به آزمایش ۶ و ۷ یعنی استفاده از محلول ۲۰ درصد سیلیکات سدیم در آند اختصاص دارد. انرژی مصرفی یک پارامتر مهم در ارزیابی بازدهی است. کل انرژی مصرفی اعمال شده در هر آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است. کمترین انرژی مصرفی در آزمایش ۱ و معادل ۲۸/۹۹ وات ساعت می‌باشد. به نظر می‌رسد با بکار بردن مواد تزریق مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. شاید بتوان گفت دلیل آن قطع زودتر جریان الکترواسمز در آزمایشات با مواد تزریق و کاهش انتقال یونها می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

نتایج نشان می‌دهد در آزمایشهایی که سیلیکات سدیم از آند به درون خاک تزریق شده، جریان الکترواسمز چند ساعت بعد از شروع آزمایش قطع شده است و اختلاف جریان ورودی و خروجی نیز کاهش می‌یابد. پس ایده بهسازی مقاومت خاک بدون تغییر حجم و دست خوردگی قابل توجه با روش تزریق الکتروکینتیک سیلیکات سدیم عملی به نظر می‌رسد.

تزریق ۵ و ۱۰ درصد محلول سیلیکات سدیم مقاومت خاک را در کل طول نمونه افزایش می‌دهد. استفاده از اسید در مخزن کاتد موجب افزایش بیشتر مقاومت در تمام طول می‌شود. اگرچه محلول ۲۰ درصد سیلیکات سدیم مقاومت خاک را در مجاورت آند به شدت افزایش داده است اما تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت در سایر بخشهای نمونه دیده نمی‌شود. کاهش غلظت سیلیکات عمق نفوذ دوغاب را افزایش می‌دهد. بیشترین افزایش مقاومت در طول نمونه (طول نفوذ دوغاب) به تزریق محلول ۵ درصد سیلیکات سدیم در آند و محلول ۱۰ درصد اسید فسفریک درکاتد اختصاص دارد بطوری که مقاومت ۳/۳ تا ۴/۰ برابر شده است. کمترین عمق نفوذ دوغاب به تزریق محلول ۲۰ درصد سیلیکات سدیم در آند اختصاص دارد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که می‌توان با این روش چسبندگی بین ذرات خاک ریزدانه و عناصر سازه ای مثل شمعهای قدیمی را افزایش داد. همچنین کاربرد روش برای شکل گیری یک شمع سیلیکاتی سدیم به منظور تقویت یا بهسازی لرزه ای در زیر پی های موجود اثبات می‌گردد. از غلظتهای بیشتر می‌توان برای ایجاد چسبندگی المانهای سازه ای و خاک استفاده و از غلظتهای کمتر می‌توان برای تزریق دوغاب به فواصل بیشتر استفاده نمود.

مقاومت در مجاورت آند با غلظت محلول سیلیکات سدیم نسبت مستقیم دارد. اما افزایش غلظت محلول تضمین کننده افزایش مقاومت بقیه طول نمونه نیست. مطابق شکل ۹ افزایش غلظت موجب ازدیاد کمتر در مقاومت در بقیه طول نمونه می‌گردد. پس کاهش غلظت سیلیکات عمق نفوذ دوغاب را افزایش می‌دهد.



شکل (۹): مقایسه پروفیل مقاومت بعد از تزریق سیلیکات سدیم (الف) محلول ۵ درصد (ب) محلول ۱۰ درصد (ج) محلول ۲۰ درصد

در صورتی که از نتایج ریزشمع ۱ در همه آزمایشها چشم پوشی شود بیشترین افزایش مقاومت به آزمایش ۲ یعنی استفاده از محلول ۵ درصد سیلیکات سدیم در آند و محلول ۱۰ درصد اسید فسفریک درکاتد و با بیشترین عمق نفوذ دوغاب

## ۵- تقدیر و تشکر

با شماره قرارداد ۶۱۶۴۴/۱۵۲ مورخ ۱۳۸۴/۱۲/۱۵ انجام رسیده است و که نویسندگان مقاله قدردانی خود را از این حمایت اعلام می‌دارند.

این طرح با حمایت مالی معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران (دفتر امور پژوهشی و پشتیبانی علمی)

## ۶- مراجع

- [۱] Shang, J.Q., E. Mohamedelhassan, and M. Ismail, "Electrochemical cementation of offshore calcareous soil". *Can. Geotech. J.* 41: 877-893, 2004.
- [۲] Alshawabkeh, A. N. and Sheahan, T., "Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields", *Ground Improvement*, Pub: Thomas Telford, Vol 7, Issue: 4, pp 177-185. 2004.
- [۳] Thevanayagam, S. and Jia, W., "Electro-Osmotic Grouting for Liquefaction Mitigation in Silty Soils", *ASCE Special Technical Publication*., Grouting, Louisiana, Feb. 2003.
- [۴] Alshawabkeh, A. N., Yeung, A. and Bricka, R. M., "Practical aspects of in situ electrokinetic remediation," *ASCE Journal of Environmental Engineering*, accepted, in press. 1999.
- [۵] Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N. "Principles of Electrokinetic Remediation," *Environmental Science and Technology*, 27(13): 2638-2647, 1993.
- [۶] Tani, K., and Craig, W.H., "Bearing capacity of circular foundations on soft clay of strength increasing with depth". *Soils and Foundations*, 35(4): 21-35, 1995.
- [۷] Segall, B. A., O'Bannon, C. E., Matthias, J. A., "Electro-Osmosis Chemistry and Water Quality," *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 106, No. GT10, pp. 1148-1152, 1980.
- [۸] Alshawabkeh, A.N., Sheahan, T., "Stabilizing fine-grained soils by phosphate electro-grouting", *Journal of the Transportation Research Board* (1787), 53-60, 2002.
- [۹] Karol, R. H.; *Chemical Grouting*, 2<sup>nd</sup> ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY, 1990.
- [۱۰] Mitchell, J. K.: "Soil Improvement- State- of- the- Art," *Proc. 10th ICSFME*, Stockholm, Vol. 4, 509-565, 1981,
- [۱۱] Tolstopjatow, K; "woprou ob elektrochimitscheskom ukreplenii gruntow", *Potschwowedenie* 8. Tondorf, S., *Grundlagen der Elektrosanierung*, TerraTech 4, 66-69, 1940.
- [۱۲] Youell, R. F., "An Electrolytic Method for Producing Chlorite-Like Substances from Montmorillonite", *Clay Miner. Bull.* 9, 191-195, 1959.
- [۱۳] Holmes, W. J., "Electroosmosis and civil engineer. *Civ. Eng.*" *Public Works Rev.*, 58(682): 624-626, 1963.
- [۱۴] Gray, D. H., "Electrochemical Hardening of Clay Soils", *Geotechnique*, Vol. 20, No.1, pp. 81-93, 1970.
- [۱۵] O'Bannon, D. E.r, Morris, G. R., and Mancini, F. P., "Electrochemical hardening of expansive clays." *Transp. Res. Rec.* 593, *Transportation Research Board*, Washington, D.C., 46-50, 1976.
- [۱۶] Feldkamp, J R. and Belhomme, G. M., "Large-strain electrokinetic consolidation: theory and experiment in one dimension", *Geotechnique* 40, No. 4, 557-568, 1990.
- [۱۷] Ozkan, S., Gale, R.J., and Seals, R.K., "Electrokinetic Stabilization of Kaolinite by Injection of Al and PO43- Ions", *Ground Improvement*, 3(4): 135-144, 1999.
- [۱۸] Mohamedelhassan, E., and Shang, J.Q., "Electrokinetics-Generated Pore Fluid And Ionic Transport In An Offshore Calcareous Soil", *Can. J. Geotech. /Rev. Can. Geotech.* 40(6): 1185-1199, 2003.