



امکان سنجی تزریق هم‌زمان هیدرولیکی و الکتروفوریتیک سیلیس کلئیدی در ماسه

محمد امین نوذری^۱ رضا ضیایی موبد^۲

^۱ دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (عج)، قزوین، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (عج)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ شهریورماه ۱۳۹۶
بازنگری: ۱۲ آذرماه ۱۳۹۶
پذیرش: ۲۱ دی ماه ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۵ دی ماه ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

سیلیس کلئیدی
تزریق الکتروکینتیک
تثبیت غیر محرک
به سازی خاک
ماسه

چکیده: یکی از متداول‌ترین روش‌های به‌سازی خاک‌های اشباع به کارگیری پدیده الکتروکینتیک است. آبکشی خاک‌های ریزدانه رسی، رفع آلودگی فلزات سنگین از خاک و هم‌چنین تزریق الکتروکینتیک تثبیت‌کننده‌های مختلف از جمله سیلیکات سدیم، سیلیس کلئیدی و محلول‌های یونی به ویژه در خاک‌های ریزدانه که تزریق هیدرولیکی با فشار در آن‌ها به بافت خاک صدمه می‌زند به عنوان روش تثبیتی غیرمحرک؛ نمونه‌هایی از کاربرد این روش است. سیلیس کلئیدی تثبیت‌کننده‌ای است که از پراکنده شدن ذرات باردار در محیط‌های متفاوت مانند آب به دست می‌آید. بررسی کمی میزان تزریق پذیری سیلیس کلئیدی و تأثیر این ماده و پدیده الکتروکینتیک بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و مایع منفذی و تأثیر هم‌زمان آن با تزریق هیدرولیکی، نیازمند ساخت دستگاهی است تا کنترل پارامترهای متفاوت را امکان‌پذیر کند. به همین منظور، کارحاضر به شیوه ساخت دستگاه و سازو کاری که بتوان توسط آن پدیده الکتروکینتیک در به‌سازی خاک به ویژه تزریق سیلیس کلئیدی را تحت شرایط متفاوت هیدرولیکی بررسی نمود، پرداخته است. دستگاه ساخته شده و عملکرد آن با انجام آزمایش بر روی نمونه ماسه مورد بررسی قرار گرفت. با انجام آزمایش‌های تک‌محوری و هم‌چنین اندازه‌گیری سرعت موج برشی نمونه‌های تزریق شده، قابلیت دستگاه مورد نظر جهت اعمال، بررسی و کنترل پارامترهای لازم در تحقیقات مربوطه تأیید شد.

۱- مقدمه

الکتروکینتیک^۱ یک واژه عمومی فیزیکی است که به حرکت ذرات تحت اثر میدان الکتریکی دلالت می‌کند. در مهندسی ژئوتکنیک این واژه به مفهوم اعمال یک جریان الکتریکی مستقیم با شدت جریان کم، یا یک اختلاف پتانسیل با شدت جریان کم به یک جفت الکتروود مثبت و منفی قرار گرفته در خاک اطلاق می‌شود [۱]. در مهندسی ژئوتکنیک از پدیده الکتروکینتیک استفاده‌های فراوانی طی سال‌های متمادی صورت گرفته است. در دهه ۳۰ میلادی کاساگرانده برای تثبیت خاک‌ها از این روش استفاده کرد. بعد از آن محققین دیگری از این روش در علم ژئوتکنیک استفاده کردند که از آن جمله می‌توان به تزریق مواد شیمیایی به صورت دوغاب [۲]، پایین آوردن سطح آب‌های زیرزمینی [۳]، افزایش پایداری دیواره حفاری‌ها [۴]، تثبیت خاک‌های ریزدانه [۵] و مقاوم‌سازی الکتروشیمیایی خاک‌های دریایی نرم [۶] اشاره کرد. در دو دهه گذشته از این روش به عنوان یک روش کارآمد در رفع آلودگی خاک‌ها در مسائل زیست‌محیطی استفاده‌های فراوانی

شده است. پیوند میان گرادیان‌های هیدرولیکی- شیمیایی- الکتریکی باعث به وجود آمدن انواع مختلف پدیده‌های الکتروکینتیک در خاک می‌شود. به دلیل ماهیت پدیده‌های مختلف الکتروکینتیک (الکترواسمزی^۲، انتقال الکترویونی^۳ و الکتروفورز^۴)، بازده مناسب این روش در رفع آلودگی فلزات سنگین از خاک‌ها ثابت شده است؛ هر چند که در رفع آلودگی‌های آلی و بعضاً رادیو اکتیو نیز از این روش با موفقیت استفاده شده است [۸-۱۲].

تزریق الکتروکینتیک با استفاده از انتقال الکترواسموزی و انتقال الکترویونی به منظور به‌سازی خاک‌های رسی به طور گسترده‌ای مورد تحقیق قرار گرفته است. بهبود الکتروشیمی مونت موریلونیت با تزریق منیزیم و رسوب بروسیت [۱۳]، تزریق الکتروکینتیک یون‌های مس و آلومینیوم و تأثیر بر مقاومت برشی [۱۴]، تزریق یون فسفات و آلومینیوم در خاک کائولینیت [۱۵] و افزایش چسبندگی خاک‌های کربناتی با دو محلول تثبیت‌کننده کلرید کلسیم و سولفات آلومینیوم [۱۶] نمونه‌هایی از این تحقیق‌ها هستند. هم‌چنین استفاده از پدیده الکتروکینتیک در

2 Electro-Osmosis

3 Electro Ion Migration

4 Electrophoresis

1 Electrokinetic

نویسنده عهده‌دار مکاتبات : ziaie@eng.ikiu.ac.ir

ذاتاً^۳ و حرکت پذیری الکتروفوریتیک ذرات باردار به طور عمده‌ای بر میزان تزریق و به‌سازی تأثیرگذار است. رأفت‌نیا و همکاران در سال ۲۰۱۵ و سمونوف و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۲۴ و ۲۵] به وابستگی مقادیر pH و قدرت یونی و ظرفیت آن‌ها با شاخص‌های الکتروفورز اشاره کردند و نشان دادند که خصوصیات محلول کلئیدی در فرآیند الکتروکینتیک وابسته به این کمیت‌ها است.

افزایش مقاومت خاک‌های تثبیت شده با سیلیس کلئیدی در ادبیات فنی به طور عمده‌ای موجود است. افزایش مقاومت خاک‌های ماسه‌ای در برابر بارهای لرزه‌ای، افزایش چسبندگی و میزان نفوذپذیری با توجه به تغییرات گرانی و هم‌چنین افزایش مقاومت روانگرایی توسط محققین بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است [۳۱-۲۶]. سیلیس کلئیدی تعلیقی^۴ کلئیدی است که فاز پیوسته‌ی آن آب و ذرات پراکنده آن نانو ذرات سیلیس است که با تغییر pH و قدرت یونی به صورت ژل در می‌آید. تغییرات pH و قدرت یونی و هم‌چنین غلظت ذرات نانوسیلیس در مقدار پتانسیل ذاتا، حرکت‌پذیری الکتروفوریتیک، گرانی و مدول ژل‌شدگی تأثیرگذار است [۳۳-۳۱]. جیا و تواناگایام در سال ۲۰۰۳ به بررسی تزریق الکتروکینتیک سیلیس کلئیدی در خاک ماسه لای دار در یک مطالعه موردی پرداختند. در تحقیق مذکور علی‌رغم تلاش صورت گرفته به علت در نظر گرفتن جریان الکترواسموزی و پیش فرض حرکت ذرات سیلیس کلئیدی از آند به کاتد، تزریق به علت کاهش pH در آند دچار ژل‌شدگی شد. با توجه به بار خالص منفی ذرات نانوسیلیس در pH های بالاتر از ۷، حرکت الکتروفوریتیک ذرات نانوسیلیس از کاتد به سوی آند خواهد بود. هم‌چنین به علت بار خالص خنثی در ذرات ماسه و لای جریان فاز مایع به وجود نخواهد آمد [۳۲ و ۳۳].

باتوجه به میزان نفوذپذیری پایین خاک به همراه ریزدانه‌های غیرخمیری و هم‌چنین مشکلاتی چون گرفتگی منافذ بر اثر تزریق هیدرولیکی حتی به روش غیرمحرک^۵ [۳۱]؛ میزان تزریق‌پذیری الکتروفوریتیک ذرات سیلیس کلئیدی در ماسه اشباع و تأثیر آن بر خصوصیات مقاومتی خاک مبهم است. در تحقیق حاضر، تزریق الکتروفوریتیک سیلیس کلئیدی در خاک ماسه اشباع و تأثیر آن به همراه تزریق هیدرولیکی با حفظ شرایط غیرمحرک پرداخته شده است. از نظر اجرایی برای بهبود تثبیت غیرمحرک لایه‌های ماسه با اندازه دانه‌های کوچک که تزریق هیدرولیکی در آن با چالش رو به رو است؛ می‌توان روش تزریق الکتروفوریتیک را جایگزین کرد. چالش پیش‌رو امکان‌سنجی تزریق سیلیس کلئیدی به روش الکتروفوریتیک در خاک ماسه است که تاکنون

خاک‌های ریزدانه غیرخمیری نیز به‌کار رفته است. از آن جمله می‌توان به افزایش مقاومت لای‌های تثبیت شده با سیلیکات سدیم با استفاده از جبهه اسیدی آند [۱۷] و امکان‌سنجی تزریق سیلیکات سدیم و سیلیس کلئیدی اشاره کرد [۱۸].

واژه الکتروکینتیک به مجموعه‌ای از پدیده‌ها که در اثر وجود جریان الکتریکی ایجاد می‌شوند، اطلاق می‌گردد این پدیده‌ها عبارت‌اند از [۱۹-۲۱]:

- انتقال الکترویونی که به انتقال یون‌های منفرد به کاتد یا آند در اثر جریان الکتریکی مستقیم اطلاق می‌گردد. جهت انتقال الکتریکی یون‌ها (انتقال الکترویونی) بسته به کاتیون یا آنیون بودن یون، به سمت کاتد یا آند خواهد بود.
- الکترواسمزی که در اثر پدیده‌های انتقال الکترویونی و الکتروفورز و در حضور جریان الکتریکی مستقیم جریان فاز مایع خاک ایجاد می‌گردد. هم‌چنین این پدیده نتیجه اندرکنش‌های متفاوت بین سطوح باردار ذرات فاز جامد خاک و ترکیبات یونی محلول است.
- جریان الکتروفوریتیک^۱ که عبارت است از انتقال ذرات متحرک فاز جامد خاک و یا ذرات باردار موجود در کلئیدها در حضور جریان الکتریکی مستقیم که به دلیل بار سطحی خالص آن‌ها ایجاد می‌گردد.
- الکترولیز که به تجزیه آب در مجاورت الکترودها و به تبع آن افزایش غلظت یون H⁺ در مجاورت آند (ایجاد جبهه اسیدی) و افزایش غلظت یون OH⁻ در مجاورت کاتد (ایجاد جبهه بازی) گفته می‌شود. تجزیه آب به دلیل واکنش‌های اکسایش و احیاء انجام می‌پذیرد.

انتقال الکتروفوریتیک وابسته به عوامل متعددی نظیر حرکت‌پذیری^۲، مقدار بار و جهت قرارگیری ذرات باردار و یون‌های موجود در آب زیرزمینی و یا فاز محلول و هم‌چنین غلظت یون، ثابت دی الکتریک، گرانی و محلول و نیز درصد مواد آلی و غیر آلی موجود در محیط است [۲۲]. علاوه بر عوامل یاد شده، جنس الکترودها و زمان اعمال گرادیان جریان الکتریکی نیز بر درجه به‌سازی خاک موثر است [۲۳].

به‌رغم تحقیقات گسترده پیرامون به‌سازی به روش الکتروکینتیک؛ مساوات و همکاران در سال ۲۰۱۰ به محدودیت‌های موجود و زمینه‌های تحقیقاتی پیش‌رو از جمله بهینه‌سازی شدت جریان اعمالی و زمان اعمال آن، تشخیص اهمیت نسبی پدیده‌های انتقال الکتروکینتیک نسبت به یکدیگر و هم‌چنین تأثیر جریان الکتروکینتیک بدون عوامل تثبیت‌کننده بر روی خاک اشاره کرده است [۲۳].

یکی از مسایل تأثیرگذار در میزان به‌سازی به روش الکتروکینتیک تغییرات محیط در اثر این پدیده و تأثیر آن بر خصوصیات الکتروشیمیایی محیط و محلول است. تغییرات pH در اثر الکترولیز و تغییرات پتانسیل

3 Zeta Potential
4 Suspension
5 Passive Injection

1 Electrophoretic
2 Mobility

۲-۲- محفظه‌های تزریق، آند و کاتد

محفظه‌های تزریق از جنس پلی‌آمید به‌گونه‌ای تراشیده شد که درون آن دو عدد حلقه لاستیکی یکی برای آب‌بندی بیرون دیواره سلول و دیگری برای آب‌بندی اتصال سطح مقطع انتهایی سلول با محفظه قرار گیرد. محل اتصال به شکل پله بوده و وسط آن به عمق ۲ سانتی‌متر تراش داده شد. آند و کاتد از جنس گرافیت در انتهای محفظه به ضخامت ۱ سانتی‌متر قرار گرفت و به وسیله دو پیچ به بدنه محفظه متصل شد. محل عبور پیچ‌های فلزی به وسیله چسب آکوارיום آب‌بندی شد. هم‌چنین سه مجرای عبور سیال در فضای باقی‌مانده با زاویه ۹۰ درجه ایجاد شد که از بیرون به وسیله شیرهای ورودی و اتصالات قابلیت اتصال به مخازن ذخیره آب یا سیال تزریقی فراهم کرد. شکل ۲ نحوه قرارگیری گرافیت در انتهای محفظه و منافذ و شکل ۳ مجموعه سلول تزریق را نشان داده‌اند.



شکل ۲. محفظه تزریق، قرارگیری قطب‌های گرافیتی و حلقه‌های لاستیکی

Injection compartment, graphite pole and plastic ring



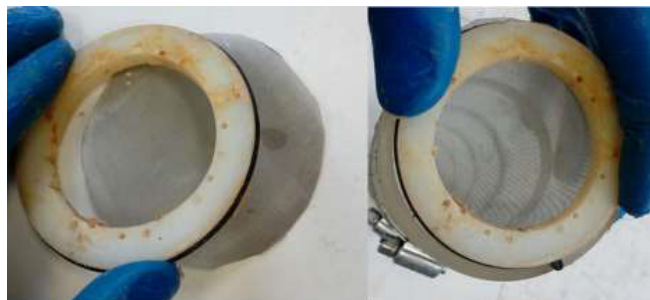
شکل ۳. مجموعه نهایی سلول پس از اتصال اجزاء
Injection cell after assemblage of all parts

بررسی نشده‌است. از این رو ابتدا به ساخت دستگاهی با قابلیت تزریق کنترل شده به هر دو روش پرداخته شد. برای این منظور دستگاه تزریق با تغییر و مدل‌سازی دستگاه‌های پیشنهاد شده توسط مراجع [۱۸ و ۳۴] ساخته شد و پس از تزریق با دستگاه مذکور، تأثیر تزریق سیلیس کلوئیدی به روش الکتروفوریتیک و هیدرولیکی هم‌زمان بر مقاومت ماسه با انجام آزمایش مقاومت محصورنشده بررسی شد. هم‌چنین گیرش نمونه، اتصالات بین دانه‌ها در سه روش هیدرولیکی، الکتروفوریتیک و تزریق هم‌زمان مورد تحقیق قرار گرفت.

۲- ساخت دستگاه

۲-۱- سلول خاک

سلول تزریق خاک به شکل استوانه از جنس پلکسی و به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر و قطر داخلی ۷ سانتی‌متر ساخته شد. جهت جداسازی نمونه خاک پس از تثبیت سلول تزریق به دو قسمت در راستای ارتفاع بریده شد. به منظور آب‌بندی سلول و جلوگیری از نشت مایع منفذی به هنگام آزمایش در یکی از نیم‌استوانه‌ها در سطح بریده شده شیار نیم‌دایره به قطر ۳ میلی‌متر در هر دو سوی نیم‌دایره ایجاد شد. با قراردادن رینگ لاستیکی انعطاف‌پذیر به قطر ۳/۵ میلی‌متر در شیار و به وسیله بست‌های فلزی دو قسمت به هم متصل و آب‌بند شد. هر دو انتهای سلول از وجه داخلی به اندازه ۰/۵ سانتی‌متر در جهت ارتفاع به مقدار ۱ میلی‌متر تراش داده شد تا توری متخلخل جهت یکنواخت‌سازی تزریق به صورت آب‌بند درون آن قرار بگیرد. توری فلزی از جنس فولاد ضد زنگ^۱ با قطر چشمه‌های ۲۵۰ میکرون به یک حلقه پلاستیکی چسبانده شد. در شکل ۱ نحوه آب‌بند شدن و قرارگیری حلقه‌های پلاستیکی نشان داده شده‌است. نکته مهم استفاده از توری فلزی به جای سنگ متخلخل است چرا که رسانایی ناچیز سنگ متخلخل دارای تأثیر منفی بر شکل‌گیری انتقال الکتروکینتیک است.



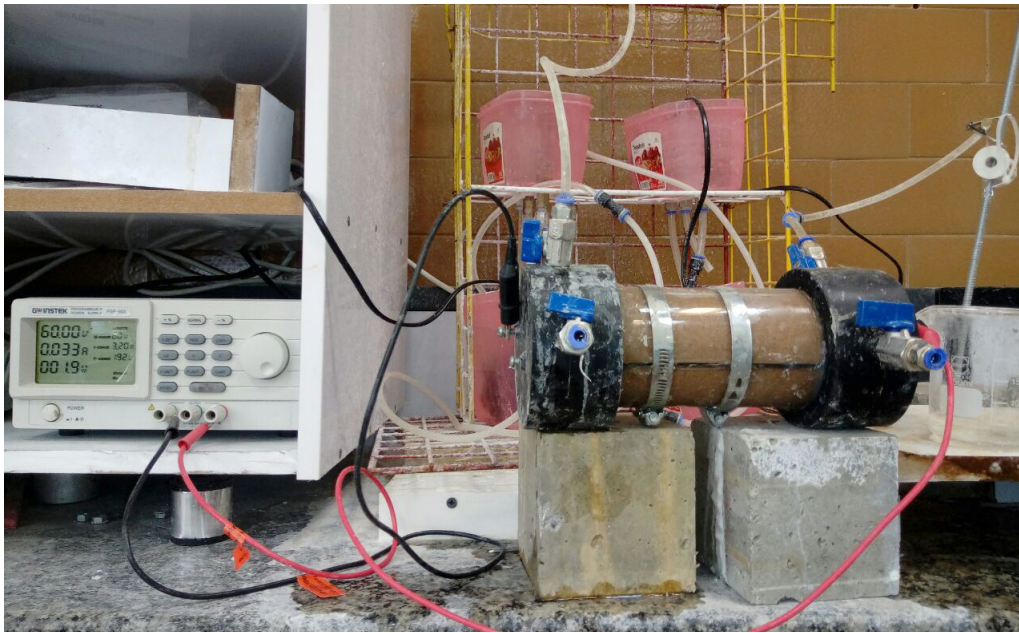
شکل ۱. نحوه آب‌بند شدن و قرارگیری حلقه‌های پلاستیکی در دو انتهای سلول

Sealing process and installation of plastic rings on the end parts of the cell

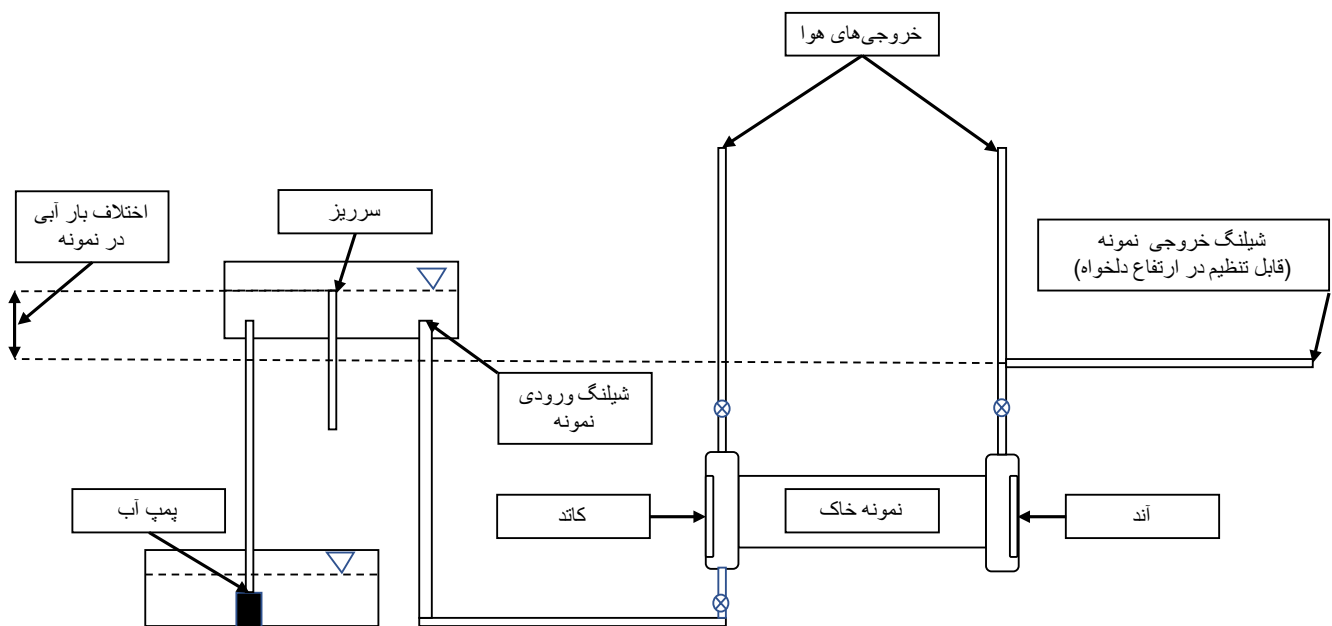
1 Stainless Steel

به سمت نمونه است. برای اعمال اختلاف بار آبی ورود و خروج، شیلنگ خروج از انتهای نمونه را می‌توان در ارتفاع دلخواه قرار داد. این در حالی است که بار آبی ورودی به علت وجود سرریز در ظرف بالایی ثابت است. شکل ۴ و ۵ نحوه قرارگیری مجموعه مخزن، سرریز و تزریق الکتروکینتیک را در حالت واقعی و شماتیک نشان می‌دهد.

۳-۲- مخزن سیال و سرریز برای اعمال هد هیدرولیکی
 اعمال بار آبی ثابت و کنترل شده در حین تزریق با استفاده از دو ظرف که با اختلاف ارتفاع نسبت به هم قرار داشتند و هم‌چنین یک پمپ آکواریوم که سیال را از ظرف پایین به طرف بالا انتقال می‌دهد؛ میسر شد. ظرف بالا دارای یک خروجی برای سلول یک ورودی از ظرف پایین و یک خروجی به ظرف پایین در ارتفاعی بالاتر نسبت به خروجی



شکل ۴. نمای کلی از مخازن، سرریز و منبع تغذیه جهت انجام شیوه‌های گوناگون تزریق سیلیس کلوئیدی
 Overview of reservoirs, spillway and Power supply for various methods of injecting Colloidal silica



شکل ۵. تصویر شماتیک از مخازن، سرریز و نمونه جهت انجام شیوه‌های گوناگون تزریق سیلیس کلوئیدی
 Schematic design and assembly of apparatus elements

۳- مصالح مورد استفاده و روش آزمایش ۳-۱- مصالح

خاک مورد استفاده در آزمایش ماسه ۱۶۱ فیروزکوه است که منحنی دانه بندی آن در شکل ۶ آمده است. ضریب یکنواختی و ضریب انحناء برای ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به ترتیب برابر با ۱/۶۱ و ۰/۷۹ است و در طبقه خاک های بد دانه بندی شده قرار می گیرد. سیلیس کلوئیدی استفاده شده در این تحقیق از شرکت متالورژی آسان تک سرام خریداری شد که دارای ۳۰ درصد وزنی اولیه ذرات نانو سیلیس بود. خصوصیات کلی سیلیس کلوئیدی در جدول ۲ خلاصه شده است. برای انتخاب سیال تزریق که بیشترین حرکت پذیری الکتروفوریتیک را داشته باشد؛ ابتدا دو نمونه سیال با درصدهای وزنی ۳۰ و ۵ و مقدار

pH برابر با ۹، تحت آزمایش پتانسیل زتا قرار گرفت. نمونه ۵ درصد وزنی با رقیق نمودن محلول ۳۰ درصد وزنی بر اثر افزایش آب مقطر تهیه شد. همان گونه که انتظار می رفت نمونه با درصد وزنی بیشتر نانو سیلیس دارای حرکت پذیری الکتروفوریتیک بزرگتری بود. مطابق نتایج آزمایش پتانسیل زتا که در جدول ۱ آمده است؛ حرکت پذیری الکتروفوریتیک نمونه با ۳۰ درصد وزنی (۰/۷۹ cm²/(V.s) -۳) به دست آمد که ۴/۸۱ برابر نمونه با ۵ درصد وزنی است. علامت منفی نشان دهنده بار منفی ذرات نانو سیلیس در pH مورد نظر است. بنابراین برای حرکت ذرات تحت میدان الکتریکی باید قطب الکتریکی محفظه ورودی کاتد باشد تا جریان هیدرولیکی و جریان الکتروفوریتیک هم راستا بوده و اثر یکدیگر را خنثی نکنند.

جدول ۱. حرکت پذیری الکتروفوریتیک سیلیس کلوئیدی

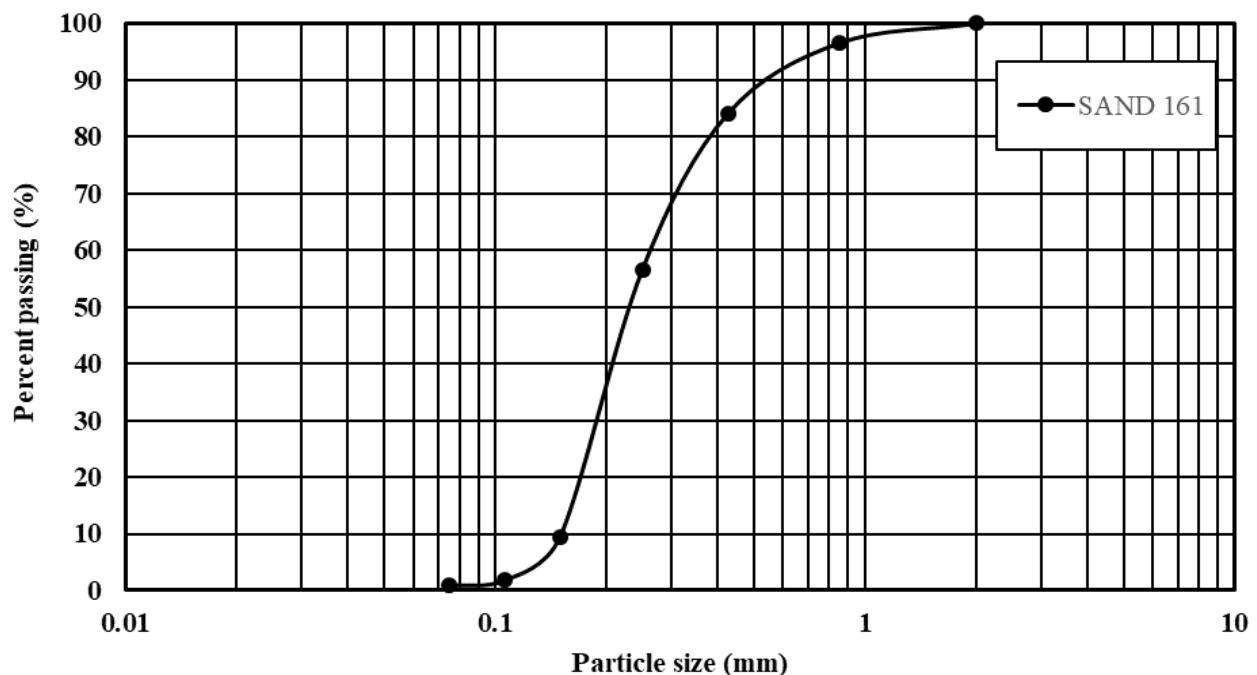
Electrophoretic mobility of colloidal silica

pH	درصد وزنی ذرات نانو سیلیس	حرکت پذیری الکتروفوریتیک (cm ² /(V.s))
۹	۳۰	-۳/۲۹۳
۹	۵	-۰/۶۸۴

جدول ۲. مشخصات محلول سیلیس کلوئیدی مورد استفاده در این تحقیق

Colloidal silica properties used in current study

مقادیر	کمیت
۳۰	درصد وزنی نانو سیلیس
۹	pH
۹/۳-۱۰/۱	متوسط قطر ذرات (نانومتر)
۱/۲	دانسیته نسبی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد



شکل ۶. منحنی دانه بندی ماسه ۱۶۱

Particle size distribution of Firoozkoo sand Number 161

۲-۳- روش آزمایش

برای دستیابی به نمونه‌ای یکنواخت از روش تراکم کاهش یافته برای ساخت نمونه استفاده شد [۳۵]. در این روش نمونه ۱۵ سانتی‌متری با درصد رطوبت ۶ درصد، و فرض تعداد شش لایه و کاهش تراکم یافته ۶ درصد و صفر درصد برای لایه‌های اول و آخر؛ نسبت تخلخل یکنواخت ۰/۷۵ را حاصل کرد که معادل با دانسیته نسبی ۳۰٪ بود. پس از ساخت نمونه به روش تراکم کاهش یافته و آماده‌سازی سلول مطابق شکل ۴، آب شهری از مخزن وارد نمونه شد تا زمانی که دبی خروجی ثابت شود. مرحله اشباع‌سازی با بارآبی هیدرولیکی پایین به گونه‌ای صورت گرفت تا نمونه دچار شستگی نشود. پس از اشباع شدن نمونه، مخزن‌های ورودی سیال به جای آب با سیلیس کلئیدی پر شدند. چهار نوع تزریق متفاوت برای مقایسه انجام شد. برای تزریق هم‌زمان هیدرولیکی و الکتروفوریتیک (EP-H)، ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل که معادل گرادیان الکتریکی ۴ V/cm است به نمونه اعمال شد و هم‌زمان با آن شیر خروجی باز شد تا جریان اندک هیدرولیکی به وجود بیاید. نکته قابل توجه آن است که دبی موجود صرفاً به دلیل هد هیدرولیکی است اما حرکت ذرات نانو سیلیس مربوط به هر دو جریان است. پس از ۴ ساعت که حجم خروجی حدوداً نیمی از فضای حفرات بود هر دو جریان توسط آزمایشگر قطع شد. دلیل این امر تشخیص چگونگی کسب مقاومت در طول نمونه بود که با توجه به عدم جایگزینی کامل آب حفره‌ای با سیلیس کلئیدی؛ روند گسیختگی در آزمایش مقاومت محصور شده و هم‌چنین گیرش نمونه پس از مدت معلوم می‌تواند آن را نشان بدهد. در این آزمایش از خروج گازهای تولید شده بر اثر الکترولیز آب جلوگیری شد. نمونه پس از تزریق به مدت ۲۸ روز برای حفظ رطوبت درون پلاستیک در بسته نگهداری شد و مقاومت محصور نشده آن مورد آزمایش قرار گرفت.

به منظور مقایسه، یک نمونه خاک ماسه تحت تزریق هیدرولیکی بدون اعمال جریان الکتروفوریتیک (H) قرار گرفت به گونه‌ای که سیلیس کلئیدی تزریق شده در خاک بر اثر جریان هیدرولیکی با نمونه‌ای که تزریق هم‌زمان دارد (EP-H)، برابر باشد. هم‌چنین یک نمونه تزریق الکتروفوریتیک بدون اعمال جریان هیدرولیکی (EP) به مدت ۲۴ ساعت و با گرادیان الکتریکی ۴ V/cm و گرادیان هیدرولیکی ۰/۰۶۷ انجام شد. در آزمایش (EP) نیز نمونه بعد از اشباع شدن ۶۰ ولت اختلاف پتانسیل بر نمونه اعمال شد و اجازه خروج گاز تولید شده بر اثر الکترولیز به نمونه داده نشد. هم‌چنین یک آزمایش با استفاده از جریان الکتروفوریتیک به شرح زیر انجام شد. هر دو مخزن از سیلیس کلئیدی پر شد. در این روش ابتدا ۱۲ ساعت تزریق الکتروفوریتیک انجام شد که کاتد باعث حرکت ذرات سیلیس کلئیدی به سمت مرکز نمونه

شد؛ سپس مخزن ورودی و جهت جریان الکتروفوریتیک عوض شد و ۱۲ ساعت دیگر تزریق الکتروفوریتیک از سوی دیگر انجام شد. سپس در دو مخزن فرآیند الکترولیز به مدت ۴۸ ساعت انجام شد که ۲۴ ساعت اول یکی از محفظه‌ها دارای سیم با جریان مثبت بود و سیم دیگر با جریان منفی بود. در ۲۴ ساعت دوم جای این دو جریان عوض شد. در آزمایش آخر (EP-EL) در ۴۸ ساعتی که الکترولیز انجام می‌شود به دلیل اینکه قطب‌ها در الکترولیز شرکت نمی‌کند و تنها سیم‌های بدون روکش در محفظه وجود دارد؛ جریان الکتریکی بسیار ناچیز که توسط دستگاه خوانده نمی‌شود به وجود می‌آید. در حین آزمایش‌ها دبی خروجی برای آزمایش H و EP-H و شدت جریانی که در طی آزمایش در نمونه به وجود می‌آید برای EP و EP-H ثبت شد. نمونه‌هایی که گیرش مطلوب داشتند، پس از ۲۸ روز تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار داده شدند. هم‌چنین با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی، نحوه تشکیل پیوندها مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و پیش از آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده، سرعت موج برشی توسط دستگاه بندر المنت اندازه‌گیری شد.

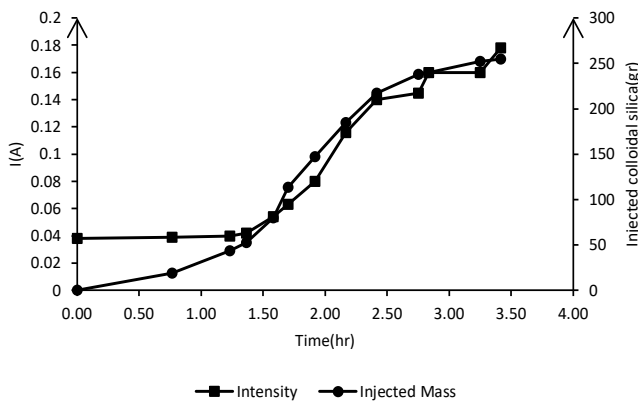
جهت انجام آزمایش بندر المنت از دو پیوزالکتریک از جنس نیکل استفاده شد. پیوزالکتریک‌ها دارای ابعاد $21\text{mm} \times 8\text{mm}$ و ضخامت $0/6$ بودند. نمونه‌ها پیش از آزمایش بندر المنت جهت قرارگیری کامل پیوزالکتریک‌ها خراش داده شدند. سپس برای آزمایش تک‌محوری دو سطح انتهایی نمونه تسطیح شدند تا بارگذاری به صورت محوری و در راستای طولی وارد شود.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تزریق نمونه‌های ماسه

در مدت زمان تزریق، جریان الکتریکی عبوری از نمونه و توان مصرفی در کل سیستم که شامل خاک، آب و سیال بود؛ ثبت شد. شکل ۷ روند تغییرات شدت جریان عبوری را در تزریق الکتروفوریتیک خالص (EP) نشان می‌دهد. شدت جریان عبوری از سیستم دارای روند نزولی است. کاهش شدت جریان با گذشت زمان با روند گزارش شده در مرجع [۳۴] مطابق است. روند نزولی را از یک سو می‌توان به کاهش غلظت ذرات در کل محیط در اثر حرکت ذرات نانوسیلیس به درون خاک بر اثر جریان الکتروفوریتیک مرتبط دانست. از سوی دیگر با کاهش غلظت، حرکت‌پذیری کاهش یافته و در نتیجه شدت جریان نیز کاهش خواهد یافت. کاهش مقدار حرکت‌پذیری الکتروفوریتیک بر اثر کاهش غلظت طبق جدول ۱ قابل استناد است. شکل ۸ تغییرات

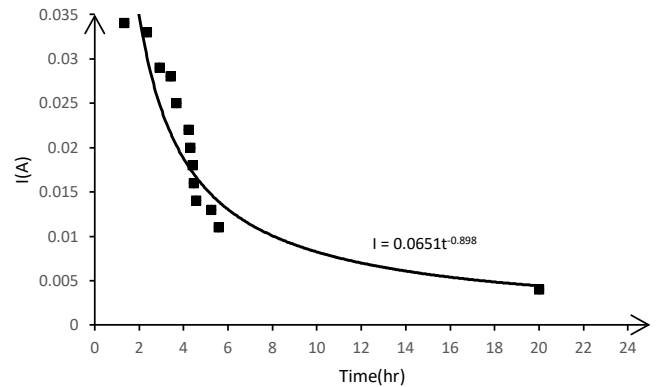
تواناگیام^۱ [۲۲] در سال ۲۰۰۳ از جریان اندک هیدرولیکی در ماسه لای دار استفاده و محلول در مجاورت آند قرار داده شده است و اثر آن اندک فرض شده است، اما روند صعودی نمودار در کار ایشان نشان دهنده تأثیر مشخص تزریق هیدرولیکی در نمونه است. روند تغییرات شدت جریان و محلول تزریق شده بر اثر جریان هیدرولیکی و تطابق نسبی آن‌ها به خوبی نشان می‌دهد که ورود سیال باعث افزایش شدت جریان و در نتیجه توان مصرفی در نمونه خاک خواهد شد. به بیان دیگر در خاک ماسه‌ای به علت نفوذ پذیری بالا، جریان هیدرولیکی بسیار پایین نیز باعث افزایش انرژی مصرفی خواهد شد. در انتهای تزریق، pH محلول در محفظه خروجی در روش EP-H و روش H اندازه‌گیری شد. مقدار pH برای هر دو مورد برابر با ۸/۵ بود. برابر بودن مقدار pH در هر دو روش EP-H و روش H نشان می‌دهد که جریان هیدرولیکی بر شرایط الکتروشیمیایی در دو محفظه تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد.



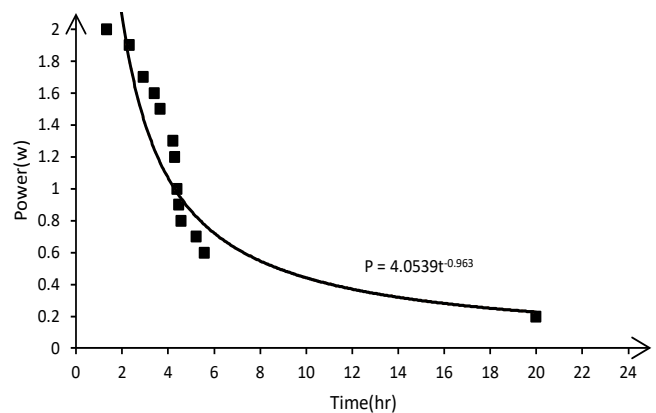
شکل ۹. شدت جریان عبوری بر اثر گرادیان الکتریکی 4 V/cm و مقدار سیلیس تزریق شده در نمونه در تزریق هم‌زمان الکتروفوریتیک و هیدرولیکی سیلیس کلوئیدی در خاک ماسه (EP-H)
Variation of the current intensity under 4 V/cm electric field in electrophoretic injection coupled by hydraulic introducing of colloidal silica to Firoozkooch sand Number 161 (EP-H)

در نمونه ماسه‌ای که به روش EP تزریق شده بود، پس از اتمام تزریق دچار گیرش شد و در نزدیکی آند دارای ظاهری صیقلی و مستحکم بود. دلیل این امر آزاد شدن یون H^+ در نزدیکی آند به علت پدیده الکترولیز است. فرآیند پلیمری شدن سیلیس کلوئیدی در مجاورت آند با ورود ذرات نانوسیلیس در اثر جریان الکتروفوریتیک که از سمت کاتد به سوی آند است آغاز شده و به سمت کاتد ادامه می‌یابد. لذا در نواحی نزدیک به کاتد نیز گیرش رخ داد که به علت pH بالاتر نسبت به مجاورت آند کندتر و دارای استحکام کمتری بود. هرچند که غلظت سیلیس کلوئیدی در

توان مصرفی را نشان می‌دهد که در حین اعمال میدان الکتریکی توسط دستگاه اعمال گرادیان الکتریکی ثبت شده است. همان‌طور که از شکل ۸ مشخص است، روند تغییرات توان مصرفی مانند شدت جریانی الکتریکی در نمونه خاک است. علت این امر ثابت بودن اختلاف پتانسیل در حین اعمال جریان الکتریکی است. مساحت زیر نمودار در شکل ۸ میزان انرژی الکتریکی مصرف شده را نشان می‌دهد.

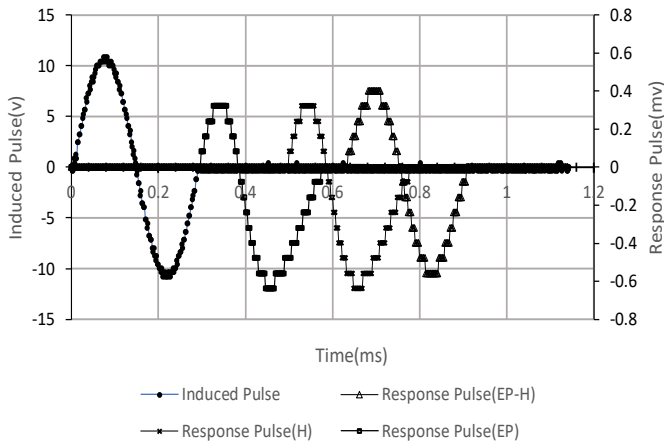


شکل ۷. شدت جریان عبوری بر اثر گرادیان الکتریکی 4 V/cm در خاک ماسه در تزریق الکتروفوریتیک سیلیس کلوئیدی
Variation of the current intensity under 4 V/cm electric field in electrophoretic introducing of colloidal silica to Firoozkooch sand Number 161



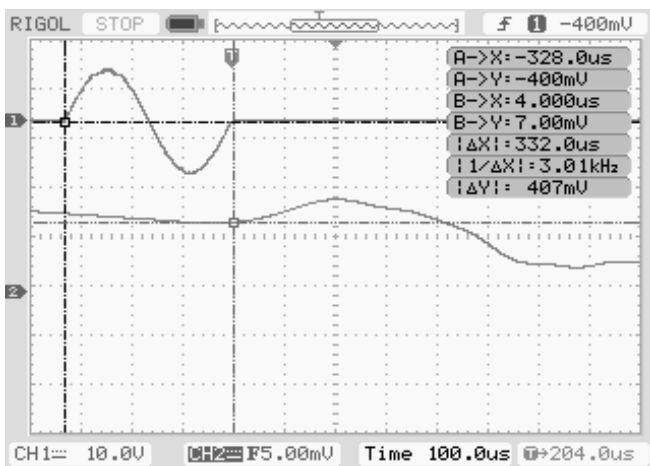
شکل ۸. توان مصرفی بر اثر گرادیان الکتریکی 4 V/cm در خاک ماسه در تزریق الکتروفوریتیک سیلیس کلوئیدی (EP)
Variation of power consumption under 4 V/cm electric field in electrophoretic introducing of colloidal silica to Firoozkooch sand Number 161

در شکل ۹ تغییرات شدت جریان و میزان سیلیس کلوئیدی ورودی به نمونه EP-H نشان داده شده است. ورود مداوم سیال بر اثر جریان هیدرولیکی به افزایش غلظت ذرات نانو سیلیس منجر شده است. از این رو شدت جریان عبوری از نمونه روندی صعودی دارد. این روند با آنچه توسط [۱۸] گزارش شده است، مشابه است. هرچند که در کار جیا و



شکل ۱۰. موج ورودی و پاسخ در نمونه‌های تزریق شده به روش EP و EP-H و H

Input and response pulses in specimens grout-ed under EP, EP-H and H condition



شکل ۱۱. نمونه پاسخ برای آزمایش EP-EL به طول ۱۳/۲ cm
Typical Response of bender element test for Ep-El specimen with 13.2 cm long

در جدول ۳ سرعت موج برشی در هر ۵ نمونه خلاصه شده است. همانطور که مشخص است سرعت موج برشی در نمونه‌های تزریق شده در نمونه به روش EP-EL بزرگتر از بقیه نمونه‌ها و برابر با ۳۹۶ m/s است. پس از آن نمونه EP با سرعت موج برشی ۳۱۲ m/s و در ادامه به ترتیب برای نمونه H و نمونه EP-H برابر با ۲۸۷ m/s و ۲۰۴ m/s است. نمونه تزریق نشده دارای سرعت موج برشی برابر با ۴۷ m/s بود. نتایج نشان دهنده افزایش موج برشی در همه موارد است. نکته قابل توجه افزایش سریع‌تر مدول برشی در نمونه EP و EP-EL است. هم‌چنین نمونه‌ای که به روش EP-H تزریق شده است افزایش سختی کمتری نشان داده است که با تفسیر ارائه شده بر اساس تغییرات pH در کاتد منطبق است. در نمونه EP-H به دلیل افزایش pH در نزدیکی کاتد گیرش دیرتر رخ داده است و افزایش مدول سختی و موج برشی در کل نمونه نیز کندتر خواهد بود.

نزدیکی کاتد به علت نزدیکی به محفظه‌ی ورودی قطعا بیشتر بوده و به افزایش مقاومت کمک کرده است.

در نمونه‌ی ماسه که به روش EP-H تزریق شد گیرش بعد از یک هفته نیز رخ نداده و در این نمونه که جریان هیدرولیکی بسیار کند بود و عمل تزریق به مدت ۴ ساعت انجام شد، فرآیند پلیمری شدن مشابه با آنچه در روش EP مشاهده شد؛ آغاز نشده بود. این امر می‌تواند به دو دلیل زیر رخ دهد:

۱- زمان تزریق نسبت به نمونه EP که ۲۴ ساعت بوده است کمتر و در نتیجه تولید H+ قطعاً به میزان کمتری است. در نتیجه کاهش pH کمتری رخ داده و گیرش به تأخیر می‌افتد.

۲- مقدار قابل توجهی از H+ تولید شده با خروج آب از سمت آند خارج شده و نمی‌تواند فرآیند پلیمری شدن را تسریع کند. به بیان دیگر pH در محفظه‌ی آند و در کل خاک با pH محلول ورودی کنترل می‌شود به گونه‌ای که اثر پدیده الکترولیز در محفظه‌های کاتد و آند به شدت کاهش می‌یابد.

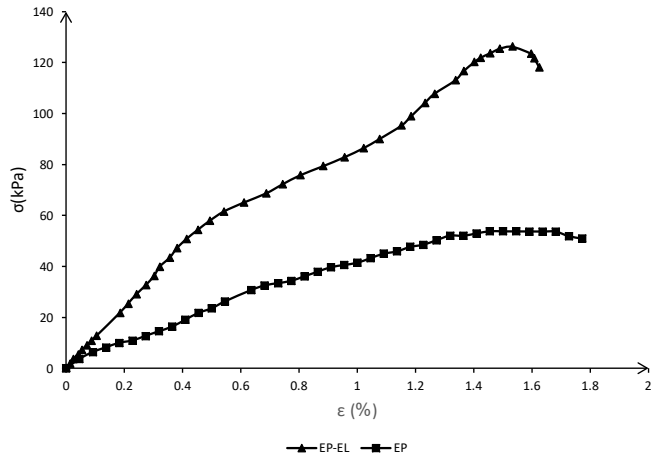
در پاسخ به این پرسش که آیا باید برای مقایسه با نمونه EP باید تزریق EP-H نیز ۲۴ ساعت باشد یا خیر؛ لازم به یادآوری است که در صورت تزریق ۲۴ ساعته EP-H و یا H (که شرایط برابر با هم مقایسه دارند)، نمونه بدون نیاز به پدیده الکتروکینتیک به به طور کامل تزریق خواهد شد و می‌توان با محلولی رقیق‌تر و افزایش قدرت یونی و کاهش pH محلول ورودی به گیرش و مقاومت مطلوب رسید. از لحاظ فنی ادامه تزریق نه تنها غیر اقتصادی است بلکه به گیرش نیز از طریق کاهش pH کمک نخواهد کرد.

لذا برای مشخص شدن این اثر در کسب مقاومت از آزمایش EP-EL استفاده شد. که هر دو سمت نمونه در زمانی برابر در معرض H+ قرار گیرند. در این آزمایش علاوه بر مورد ذکر شده، طول نمونه برای تزریق به دلیل اینکه هر دو قطب کاتد است؛ نصف مقدار معادل در نمونه EP و EP-H است. بدین معنی که مدت زمانی که از هر طرف ذرات تحت جریان الکتروفوریتیک حرکت کردند؛ نیمی از زمان آزمایش‌های EP و EP-H بود.

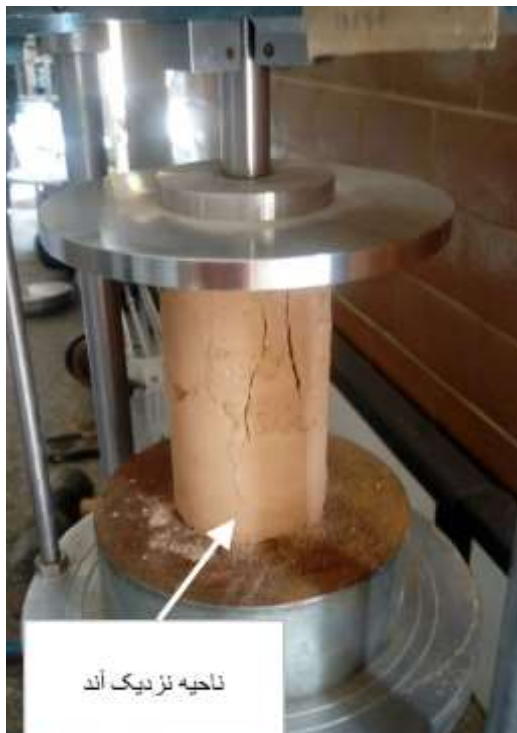
۲-۴- آزمایش سرعت موج برشی و تک محوری

جهت مقایسه میزان افزایش سختی در نمونه‌ها نسبت به نمونه تزریق نشده از آزمایش موج برشی توسط دستگاه بندر المنت استفاده شد. تک موج سینوسی به نمونه وارد شده و با استفاده از زمان پاسخ و طول نمونه، سرعت موج برشی برای هر سه نمونه تزریق شده و نمونه ماسه ای تزریق نشده محاسبه شد. با تقسیم طول نمونه بر اختلاف زمان رسیدن ابتدای موج سینوسی پاسخ با ابتدای موج سینوسی وارد شده، سرعت موج برشی به دست آمد. شکل ۱۰ نمونه امواج ورودی

است. نمونه EP-EL با توجه به فرآیند الکترولیز در هر دو طرف به مدت ۲۴ ساعت در هر دو طرف با تسریع گیرش و کسب مقاومت بیشتری همراه بوده است. افزایش سرعت موج برشی و شیب ابتدای نمودارهای تنش-کرنش در شکل ۱۲ نیز در دو نمونه با هم منطبق است. رفتار هر دو نمونه ترد و دارای شکل پذیری اندک است.



شکل ۱۲. منحنی تنش-کرنش آزمایش مقاومت محصور نشده نمونه‌های EP و EP-EL پس از ۲۸ روز
Unconfined compression tests of EP and EP-EL samples after 28 days curing day



شکل ۱۳. نمونه تزریق شده در آزمایش فشاری محصور نشده
An image of injected sample under unconfined compression test

جدول ۳. سرعت موج برشی در نمونه‌های ماسه قبل و پس از تزریق Shear wave velocity of grouted and clean sand

نمونه	سرعت موج برشی (m/s)
ماسه تزریق نشده	۴۸
تزریق EP-EL	۳۹۶
تزریق EP	۳۱۲
تزریق EP-H	۲۰۴
تزریق H	۲۸۷

نکته دیگر این است که به جز نمونه‌های EP و EP-EL دو نمونه دیگر گرچه قابلیت خودایستایی داشتند اما قابلیت بارگذاری نداشتند. لذا به محض بارگذاری دچار ریزش شدند. گرچه نمونه H سرعت موج برشی بزرگتر و تقریباً نزدیک به نمونه EP داشت اما به دلیل عدم گیرش در نواحی میانی نمونه و عدم یکنواختی در کل نمونه به سرعت از وسط دچار شکست شد. افزایش سرعت موج برشی در این نمونه به علت گیرش قابل توجه در دو انتهای نمونه بوده است که در نمونه EP-H تنها یک طرف نمونه این خصوصیت را دارد. لذا می‌توان آمادگی نمونه تزریق شده به روش‌های فوق را جهت انجام آزمایش تک‌محوری، سرعت موج برشی در حدود ۳۰۰ متر بر ثانیه دانست.

شکل ۱۲ منحنی تنش-کرنش به دست آمده از آزمایش مقاومت محصور نشده را بر روی نمونه‌های EP و EP-EL را نشان می‌دهد. مقدار مقاومت کسب شده در اثر تزریق سیلیس کلئیدی در نمونه EP برابر با ۳۸ kPa بود. این مقدار برای نمونه EP-EL برابر با ۱۲۶ kPa به دست آمد. کرنش معادل گسیختگی برای نمونه EP و EP-EL به ترتیب برابر با ۱/۴۵ و ۱/۵۳ درصد به دست آمد. مقاومت کسب شده در نمونه EP از مقدار مشابه در خاک‌های ماسه‌ای تزریق شده با محلول ۵ درصد نانوسیلیس که در محدوده ۳۰ kPa تا ۶۰ kPa در مرجع [۳۱] گزارش شده است؛ نزدیک است. شرایط اولیه محلول در روش EP که دارای ۳۰ درصد وزنی ذرات نانوسیلیس است با انتقال الکتروکینتیک درون محیط خاک باعث افزایش غلظت ذرات بر اثر تزریق در نواحی دور از کاند شده است؛ این افزایش به اندازه‌ای بوده است که بر اثر گیرش در نزدیکی آند، در نهایت نمونه مقاومت تک‌محوری در محدوده گزارش شده توسط مرجع [۳۱] را نتیجه داده است. همان گونه که از شکل شماره ۱۳ مشخص است؛ نمونه دارای گسیختگی در نواحی نزدیک به آند نیست که علت آن عدم یکنواختی نمونه به علت شرایط الکتروشیمیایی متفاوت نمونه پس از تزریق است. هم‌چنین در شکل ۱۳ ترک قائم در نمونه خاک نیز که در شکل ۱۳ قابل مشاهده است؛ به همین علت

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نیاز به بررسی تأثیر هم‌زمان تزریق الکتروکینتیک و هیدرولیکی جهت حفظ غیرمحرک بودن فرآیند به‌سازی خاک ماسه لای‌دار، دستگاه متناسب برای مطالعه آزمایشگاهی ساخته شد. در مقاله حاضر به چگونگی ساخت سلول و آب‌بندی نمونه اشباع و هم‌چنین نحوه قرارگیری الکتروده‌های گرافیتی در انتهای محفظه‌های تزریق و توری فلزی در انتهای سلول به وضوح پرداخته شد. هم‌چنین چگونگی ارتباط مخازن و تهیه آن به صورت ساده و قابل ساخت برای خواننده ارائه شد. آزمایش امکان‌سنجی دستگاه با تزریق سیلیس کلئیدی به طور هم‌زمان با تزریق هیدرولیکی غیرمحرک موفقیت‌آمیز بود و نمودارهای به‌دست آمده دارای تطابق رفتاری با مراجع گذشته بود. نمونه تزریق شده دارای مقاومت قابل ملاحظه بوده و شکل گسیختگی نشان‌دهنده کسب مقاومت در کل نمونه است. در نتیجه دستگاه مورد نظر برای آزمایش‌های مورد نظر محققین مفید و قابل استفاده خواهد بود. از آزمایش‌های تزریق به روش‌های گوناگون بر خاک ماسه ای، نتایج زیر قابل استنتاج است:

در خاک ماسه‌ای ۱۶۱ فیروزکوه، تزریق سیلیس کلئیدی به روش الکتروفوریتیک امکان‌پذیر است. لذا در شرایطی که امکان تزریق هیدرولیکی به دلایل محدودیت فضای اجرایی وجود ندارد، می‌توان از تزریق الکتروفوریتیک استفاده کرد.

کاهش pH در مجاورت آند در روش EP به گیرش سریع تر و افزایش مقاومت در ۲۸ روز پس از تزریق کمک می‌کند. اما در تزریق هم‌زمان هیدرولیکی و الکتروفوریتیک شرایط الکتروشیمیایی محیط را محلول اولیه تعیین می‌کند. در نمونه EP-EL که در هر دو طرف کاهش pH رخ داده است؛ افزایش چشمگیر مقاومت نسبت به نمونه‌های دیگر رخ داده است.

در خاک ماسه‌ای ۱۶۱ فیروزکوه که دارای نفوذپذیری قابل توجه است، پدیده هم‌زمان الکتروفوریتیک و هیدرولیکی نه تنها به تسریع گیرش منجر نمی‌شود بلکه به علت افزایش انرژی الکتریکی مصرفی مقرون به صرفه نیست. لذا هرچه گرادیان هیدرولیکی کوچکتر باشد مصرف انرژی کمتر و شرایط الکتروشیمیایی نزدیک به آند برای تسریع گیرش مناسب‌تر است.

افزایش سرعت موج برشی پس از ۲۸ روز در نمونه‌های EP و EP-EL بیشتر از EP-H بود که نشان‌دهنده افزایش سختی و گیرش سریع‌تر در این دو روش است. در هر دو روش، سرعت موج برشی خاک ماسه‌ای ۱۶۱ پس از تزریق به طور قابل توجهی افزایش یافت که در نمونه EP-EL و EP به ترتیب حدود ۸ و ۶ برابر و در نمونه EP-H حدود ۴ برابر بود.

به طور خلاصه می‌توان نتیجه گرفت که تزریق الکتروفوریتیک

این بدان معنی است که گرچه تزریق هیدرولیکی صورت نگرفته است اما ذرات سیلیس کلئیدی به انتهای نمونه نیز رسیده‌اند و پدیده الکتروفوریتیک به نفوذ ذرات در محیط کمک کرده است. هم‌چنین تأثیر کاهش pH در نزدیکی آند را بر گیرش نشان می‌دهد. بنابراین عملکرد دستگاه تزریق و ابعاد انتخاب شده نظیر اندازه و جنس گرافیت، گرادیان ولتاژ اعمالی و محلول انتخاب شده قابل تأیید جهت به‌سازی غیرمحرک خاک ریزدانه غیرچسبنده است. همان‌طور که گفته شد نمونه‌های تزریق شده به روش EP-H و EP-H تنها بعد از ۲۸ روز در برخی نواحی دچار گیرش نبوده و قابل بارگذاری نبودند.

شکل ۱۲ به طور واضح تصویر خاک در دو حالت تثبیت شده و تثبیت نشده در میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در حالت تثبیت نشده دانه‌های خاک به طور واضح و جدا از هم دیده می‌شوند. اما در حالت تثبیت شده دانه‌های خاک بر اثر ژل شدن سیلیس کلئیدی به مجموعه‌ای درشت‌تر تبدیل شده‌اند. هم‌چنین در شکل اتصالات بین دانه‌های دیده می‌شود. علاوه بر این می‌توان به بزرگ شدن فضاهای خالی اشاره کرد. باید خاطر نشان کرد که این به معنای افزایش نفوذپذیری نیست چرا که ممکن است این فضاهای خالی محبوس باشند و این ادعا باید به صورت جداگانه مورد تحقیق قرار گیرد. عدم وضوح تصاویر در کناره به دلیل صیقلی نبودن سطح خاک است. کوچک‌ترین تفاوت باعث می‌شود که تصویر دارای وضوح نباشد چرا که در فاصله کانونی مناسب نیست. به هر روی شکل ۱۲ نشان‌دهنده اتصالات بین دانه‌ها و هم‌چنین تشکیل مجموعه‌های به هم متصل است.



شکل ۱۴. خاک ماسه فیروزکوه ۱۶۱ قبل و بعد از تثبیت با سیلیس کلئیدی (نمونه EP-EL)
An image of Firoozkooch sand Number 161 before and after the injection (EP-EL)

from saturated clay by electroosmosis, *Environmental Science & Technology*, 27(2) (1993) 283-291.

[11] A. Ugaz, S. Puppala, R. Gale, Y. Acar, ELECTROKINETIC SOIL PROCESSING COMPLICATING FEATURES OF ELECTROKINETIC REMEDIATION OF SOILS AND SLURRIES: SATURATION EFFECTS AND THE ROLE OF THE CATHODE ELECTROLYSIS, *Chemical engineering communications*, 129(1) (1994) 183-200.

[12] A.T. Yeung, C.-n. Hsu, R.M. Menon, EDTA-enhanced electrokinetic extraction of lead, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8) (1996) 666-673.

[13] R. Youell, An electrolytic method for producing chlorite-like substances from montmorillonite, *Clay Min. Bull.*, 4 (1960) 191-195.

[14] J. Feldkamp, G. Belhomme, Large-strain electrokinetic consolidation: theory and experiment in one dimension, *Geotechnique*, 40(4) (1990) 557-568.

[15] S. Ozkan, R. Gale, R. Seals, Electrokinetic stabilization of kaolinite by injection of Al and PO₄³⁻ ions, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 3(4) (1999) 135-144.

[16] E. Mohamedelhassan, J. Shang, Electrokinetics-generated pore fluid and ionic transport in an offshore calcareous soil, *Canadian Geotechnical Journal*, 40(6) (2003) 1185-1199.

[17] N. Shariatmadari, A. Falamaki, A. Noorzad, Soil Improvement by Electrokinetic Injection, (2010).

[18] S. Thevanayagam, W. Jia, Electro-osmotic grouting for liquefaction mitigation in silty soils, in: *Grouting and Ground Treatment*, 2003, pp. 1507-1517.

[19] Y.B. Acar, A.N. Alshawabkeh, Principles of electrokinetic remediation, *Environmental science & technology*, 27(13) (1993) 2638-2647.

[20] Y.B. Acar, R.J. Gale, A.N. Alshawabkeh, R.E. Marks, S. Puppala, M. Bricka, R. Parker, Electrokinetic remediation: basics and technology status, *Journal of hazardous materials*, 40(2) (1995) 117-137.

[21] A.N. Alshawabkeh, R.M. Bricka, Heavy metals extraction by electric fields, in: *Environmental restoration of metals-contaminated soils*, CRC press LLC, 2001, pp. 167-186.

[22] S. Thevanayagam, W. Jia, Electro-osmotic grouting for liquefaction mitigation in silty soils, *Geotechnical Special Publication*, 2 (2003) 1507-1517.

[23] N. Mosavat, E. Oh, G. Chai, A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils, *International journal of GEOMATE*, 2(2) (2012) 266-272.

محلول بهینه‌ای با حرکت‌پذیری بالا، قابل توجه است. هم‌چنین کاهش pH به طور قابل ملاحظه‌ای به آغاز و تسریع کسب مقاومت و گیرش کمک می‌کند.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

تنش، kPa	σ
اختلاف پتانسیل، v	V
شدت جریان، A	I
علائم یونانی	
کرنش	ϵ
زیرنویس	
محوری	a

مراجع

- [1] R. Lageman, Electroreclamation. Applications in the netherlands, *Environmental science & technology*, 27(13) (1993) 2648-2650.
- [2] M.I. Esrig, Applications of electrokinetics in grouting, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 92(SM5, Proc Paper 490) (1900).
- [3] D.H. Gray, J.K. Mitchell, Fundamental aspects of electroosmosis in soils, *Journal of the Soil Mechanics and foundations Division*, 93(6) (1967) 209-236.
- [4] B.A. Chappell, P.L. Burton, Electro-osmosis applied to unstable embankment, *Journal of the geotechnical engineering division*, 101(8) (1975) 733-740.
- [5] J. Mitchell, T. Wan, Electro-osmotic consolidation-its effects on soft soils, in: *Proc., 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1977, pp. 219-224.
- [6] D.G. Buckland, J. Shang, E. Mohamedelhassan, Electrokinetic sedimentation of contaminated Welland River sediment, *Canadian geotechnical journal*, 37(4) (2000) 735-747.
- [7] Y.B. Acar, Electrokinetic soil processing (a review of the state of the art), in: *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics*, ASCE, 1992, pp. 1420-1432.
- [8] C.J. Bruell, B.A. Segall, M.T. Walsh, Electroosmotic removal of gasoline hydrocarbons and TCE from clay, *Journal of Environmental Engineering*, 118(1) (1992) 68-83.
- [9] G.R. Eykholt, D.E. Daniel, Impact of system chemistry on electroosmosis in contaminated soil, *Journal of geotechnical engineering*, 120(5) (1994) 797-815.
- [10] A.P. Shapiro, R.F. Probstein, Removal of contaminants

- [29] P.M. Gallagher, C.T. Conlee, K.M. Rollins, Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2) (2007) 186-196.
- [30] P.M. Gallagher, S. Finsterle, Physical and numerical model of colloidal silica injection for passive site stabilization, *Vadose Zone Journal*, 3(3) (2004) 917-925.
- [31] P.M. Gallagher, Y. Lin, Colloidal silica transport through liquefiable porous media, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(11) (2009) 1702-1712.
- [32] H.E. Bergna, W.O. Roberts, *Colloidal silica: fundamentals and applications*, CRC Press, 2005.
- [33] J.H. Masliyah, S. Bhattacharjee, *Electrokinetic and colloid transport phenomena*, John Wiley & Sons, 2006.
- [34] A.T. Yeung, T.B. Scott, S. Gopinath, R.M. Menon, C.-n. Hsu, *Design, fabrication, and assembly of an apparatus for electrokinetic remediation studies*, (1997).
- [35] R. Ladd, *Preparing test specimens using undercompaction*, (1978).
- [24] S. Raafatnia, O.A. Hickey, C. Holm, Electrophoresis of a spherical polyelectrolyte-grafted colloid in monovalent salt solutions: comparison of molecular dynamics simulations with theory and numerical calculations, *Macromolecules*, 48(3) (2015) 775-787.
- [25] I. Semenov, P. Papadopoulos, G. Stober, F. Kremer, Ionic concentration-and pH-dependent electrophoretic mobility as studied by single colloid electrophoresis, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 22(49) (2010) 494109.
- [26] T. Bolisetti, *Experimental and numerical investigations of chemical grouting in heterogeneous porous media*, (2005).
- [27] T. Bolisetti, S. Reitsma, R. Balachandar, *Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media*, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 135(5) (2009) 697-700.
- [28] C.T. Conlee, P.M. Gallagher, R.W. Boulanger, R. Kamai, *Centrifuge modeling for liquefaction mitigation using colloidal silica stabilizer*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(11) (2012) 1334-1345.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. A. Nozari , R. Ziaie Moayed , Feasibility Study of Coupled Hydraulic and Electrophoretic Injecting colloidal silica in sand , *Amirkabir J. Civil Eng.*, 51(2)(2019)285-296.

DOI: 10.22060/ceej.2018.13408.5403

