



کاربرد مواد نانو در بهبود ظرفیت باربری خاکها

علی کاکاوند، گروه مهندسی عمران-ژئوتکنیک، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران
روزبه دبیری (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران،
rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

چکیده

روش غیر محرک روشی نو در تثبیت خاک‌های ضعیف و ماسه‌های سست است. این روش نوعی قفل و بست کردن بافت خاک می‌باشد. برای بهسازی موفق به این روش، رسیدن به طول نفوذ مناسب و همچنین بالا رفتن پارامترهای مقاومت برشی ضروری است. تحقیقات گذشته افزایش مقاومت در مقابل روانگرایی و کاهش نفوذپذیری بر اثر تزریق نانو سیلیکا کلونیدی را نشان داده است. در این تحقیق، خاک ماسه‌ای در دو حالت خشک و اشباع با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی سیلت تحت نفوذ نانو سیلیکا کلونیدی قرار گرفت و سپس با انجام آزمایش برش مستقیم پارامترهای مقاومت برشی (زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی) تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که با تنظیم قدرت یونی و خصوصیات رئومترهای همچون ویسکوزیته و مدول ژل شدگی، رسیدن به طول نفوذ مناسب و کسب مقاومت لازم جهت انجام تزریق غیر محرک در خاک‌های با درصد سیلت بالا امکان پذیر است. همچنین پارامترهای مقاومت برشی افزایش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: نانو سیلیکا کلونیدی، مقاومت برشی، ماسه، لای، ویسکوزیته، تزریق.



Applying Nano Material in Improving Bearing Capacity of Soils

Ali Kakavand, Department of Geotechnical Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

Rouzbeh Dabiri (Corresponding author), Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

Abstract

Passive method is a new way in stabilizing loose soils. This method is as a type of interlocking of soil structure. In order to successfully improve in this method, it is necessary to achieve proper penetration length and increase the shear strength of parameters. Previous studies have shown an increased resistance to liquefaction and decreased permeability due to colloidal Nano silica injection. In this research, sandy soil was mixed with silt in 5, 10 and 15 percent. Then, specimens in dry and saturated conditions were placed under the influence of Nano silica colloid. For determining geotechnical properties of improved specimens direct shear test was performed in three situation (dry, saturated, and grouted). Also, for studying drainage condition after improving constant head permeability test was carried out. The results showed that by adjusting ionic strength and rheometry properties such as viscosity and gel modulus, it is possible to achieve proper penetration length and obtain the required strength for injection in silty sand with a high non plastic fines content. Besides, with the injection of Nano silica colloid, the amount of vertical settlement in the samples decreased significantly. Also, the amount of permeability of the stabilized materials showed a decreasing trend.

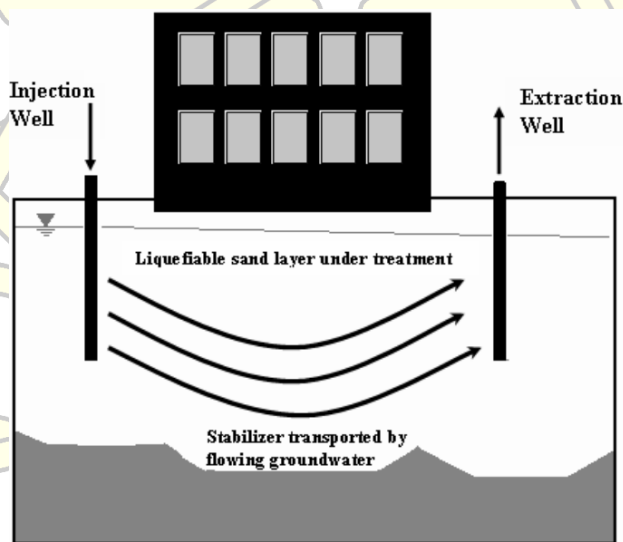
Keywords: *Colloidal Nano Silica, Shear Strength, Sand, Silt, Viscosity, Injection.*



۱- مقدمه

به آرامی در خاک‌های مستعد روانگرایی تزریق می‌شود. تحقیقات گذشته بر پایه امکان‌سنجی تثبیت غیر محرک و با محور شناسایی ماده‌ی تثبیت‌کننده‌ی مناسب، مطالعه‌ی چگونگی رساندن تثبیت‌کننده به موقعیت صحیح در زمان موردنظر و نیز ارزیابی زمان و هزینه‌ی این فرآیند استوار بوده است [۱ و ۲]. با استفاده از روش‌ها و دوغاب‌های متفاوت می‌توان خاک ماسه لای دار را از لحاظ مقاومت و نفوذپذیری بهبود بخشید (جدول ۱).

تثبیت غیر محرک روشی نو برای بهسازی مناطق توسعه‌یافته که دارای فضای کم می‌باشند است. این فرآیند از طریق چاه‌های ورودی در بالادست ناحیه‌ی موردنظر آغاز می‌شود و به چاه‌های خروجی در پایین‌دست جریان آب زیرزمینی منتهی می‌شود. شکل (۱) نمونه‌ای از این روش را نشان می‌دهد که در آن ماده‌ای با ویسکوزیته‌ی کم



شکل (۱): مفهوم تثبیت غیر محرک [۲]

جدول ۱: روش‌های مقابله با روانگرایی در خاک [۳]

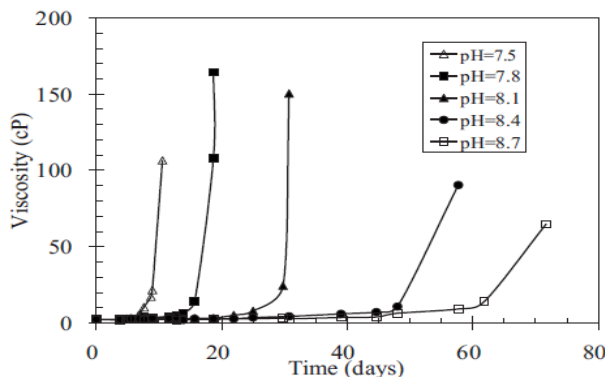
| نوع روش | | ماسه | ماسه سیلت | سیلت | کاربرد در مناطق توسعه‌یافته | |
|-------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----|
| تراکم | تراکم دینامیکی | بله | امکان پذیر | امکان پذیر | خیر | |
| | تراکم ارتعاشی | بله | امکان پذیر | امکان پذیر | خیر | |
| تراکم/زهکشی/تسلیح | | ستون ماسه‌ای با ارتعاش | بله | امکان پذیر | امکان پذیر | خیر |
| سفت‌سازی | تزریق نفوذی | بله | نامعلوم | خیر | بله | |
| | تزریق تراکمی | بله | | تا حدودی | بله | |
| | اختلاط خاک | بله | بله | بله | خیر | |
| | تزریق جت | نامعلوم | بله | بله | بله | |
| | تزریق الکتروکینتیک | بله | بله | بله | بله | |
| | روش غیر محرک | بله | وابسته به هدایت هیدرولیکی | وابسته به هدایت هیدرولیکی | بله | |



۲- معرفی نانو سیلیکا کلونیدی

شکل از جامدی باحالت ژل درمی آید و سپس شبکه‌ای سه‌بعدی و یکنواخت تشکیل می‌دهد و این روند ادامه می‌یابد تا فرایند کامل شود. زمان ژل شدگی نانو سیلیکا به نرخ برهم‌کنش ذره به ذره آن مربوط است که به عوامل مختلفی از قبیل درصد سیلیکا در محلول، اندازه ذرات نانو سیلیکا، مقاومت یونی، PH و درجه حرارت محلول بستگی دارد. زمان ژل شدگی با افزایش وزن سیلیس و قدرت یونی و حرارت و کاهش اندازه ذرات کاهش می‌یابد. افزایش قدرت یونی باعث شکستن لایه دوگانه پیرامون ذرات می‌شود و احتمال برخورد ذرات را باهم افزایش می‌دهد. وجود کاتیون‌های موجود در آب زیرزمینی و کاتیون‌های قابل‌تبادل در خاک می‌تواند بر زمان ژل شدگی تأثیر بگذارد. کوتاه‌ترین زمان ژل شدگی در محدوده $5 < PH < 7$ رخ می‌دهد و خارج از این محدوده این زمان می‌تواند به‌شدت افزایش یابد [۱ و ۱۴]. پس از رقیق‌سازی و پیش از ژل شدگی محدوده زمانی اولیه‌ای موجود است که ویسکوزی‌تر کوچک می‌ماند و سپس با افزایش ناگهانی ویسکوزی‌تر و متعاقب آن ژل شدگی همراه می‌شود. شکل این منحنی در حالت کلی و البته بازمان ژل شدگی متفاوت ثابت است [۵]. تغییرات مدول ژل شدگی را برای محلول رقیق شده با ۵ درصد وزنی و قدرت یونی ۰/۱ برای مقادیر متفاوت PH نشان می‌دهد. مدت‌زمانی که ویسکوزی‌تر پایین می‌ماند متغیر است ولی شکل کلی از روندی مشابه هم پیروی می‌کند.

نانوتکنولوژی در مهندسی ژئوتکنیک تحت دو عنوان می‌تواند موردبررسی قرار گیرد: مطالعه ساختار خاک در مقیاس نانومتریک و پس‌ازاین شناخت بهتری از ماهیت خاک، با شناخت کار آیی با نانو ساختارهای متفاوت نائل می‌شود؛ دست‌کاری خاک در مقیاس اتمی یا مولکولی، معمولاً به‌واسطه افزودن نانو مواد به‌عنوان یک فاکتور خارجی کمک می‌نماید [۴]. سیلیکای کلونیدی رقیق تثبیت‌کننده‌ای مناسب برای تثبیت خاک‌های ماسه سست است [۱ و ۲]. این ماده تعلیقی کلونیدی است که فاز پیوسته‌ی آن آب و ذرات پراکنده آن نانو ذرات سیلیس است و می‌تواند با تنظیم PH و قدرت یونی به‌صورت ژل دربیاید. یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در تزریق هیدرولیکی یا الکتروسینتیک، ویسکوزی‌تر دوغاب است [۵]. به هنگام تولید نانو سیلیکا، محلول کلونیدی نانو سیلیس با اضافه کردن محلولی آکالین مانند هیدروکسید سدیم در برابر ژل شدگی مقاوم می‌شوند. این عمل باعث می‌شود که ذرات سیلیس یونیزه شده و همدیگر را دفع کنند. ژل شدگی می‌تواند با کاهش این نیروی دافعه القا و کنترل شود. نانو سیلیکا کلونیدی به‌عنوان ماده‌ای بی‌ضرر برای محیط‌زیست، استفاده‌های متفاوتی در پروژه‌های تحقیقاتی و مهندسی دارد. ژل شدگی فرآیندی است که طی آن محلول سیلیکا کلونیدی به ساختاری زنجیره‌ای



شکل (۲): تغییرات ویسکوزی‌تر در مقادیر مختلف PH برای محلول نانو سیلیس با ۵ درصد وزنی [۵]



۳- مرور مطالعات گذشته

یونکرا و میوا برای افزایش مقاومت فشاری ماسه از نانو ذرات سیلیس استفاده کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با افزودن ۳۰ درصد وزنی نانو سیلیس بعد از ۱۰۰۰ روز مقاومت خاک ۳/۵ برابر شده است [۸]. نول و همکاران، با استفاده از نانو سیلیس در یک پایلوت شامل ماسه سست به کاهش نفوذپذیری و جذب سطحی فلزات از محلول رسیدند [۸]. پرساف و همکاران دریافتند که در خاک‌های ماسه‌ای با افزایش درصد نانو سیلیس مقاومت فشاری خاک بالا می‌رود که حداکثر افزایش ۴۰۰ KPa بوده است. همچنین با افزودن نانو ذرات سیلیس ضریب تراوایی کاهش خواهد یافت [۹]. گالکر و میچل مطالعاتی در زمینه تأثیر دوغاب نانو سیلیس بر پتانسیل روانگرایی و رفتار سیکلیک ماسه سست اشباع انجام داده‌اند. نتایج حاکی از آن بود که نانو سیلیس باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت خاک ماسه‌ای سست در برابر تغییرات بارگذاری سیکلیک شده است [۲]. گالاکر و لین بحث کاهش پتانسیل روانگرایی خاک دانه‌ای را مطرح نمودند. نانو سیلیس سبب افزایش چسبندگی خاک و در نتیجه مقاومت کافی آن در برابر روانگرایی می‌شود. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان داد که نانو سیلیس به میزان ۵ درصد وزنی خاک، برای کاهش خطر روانگرایی مناسب می‌باشد [۷]. گالاکر و همکاران برای کاهش نشست خاک‌های روان گرا، نانو سیلیس را به‌عنوان افزودنی در چاه‌های شامل خاک ماسه‌ای تزریق کردند و به‌وسیله انفجار، روانگرایی را ایجاد نمودند. بعد از انفجار، تقریباً بهبود ۴۰ درصدی میزان نشست در مناطق اصلاح‌شده گزارش شده است [۱۰]. باترون و همکاران آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، سه محوری و تحکیم را بر روی خاک مخلوط شده با نانو سیلیس انجام داده و دریافتند که رفتار این خاک در مراحل اولیه الاستیک و سپس الاستوپلاستیک می‌شود. در طی زمانی که خاک مخلوط شده با نانو سیلیس در معرض ارتعاش ناشی از انفجار قرار دارد، خطر کمتری خواهد داشت [۱۱]. طاها تأثیر نانو خاک حاصل از سنگ

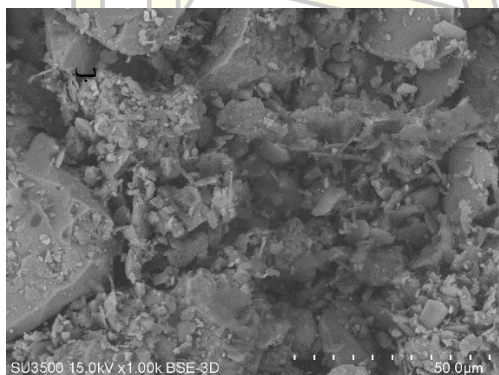
زمان بین مخلوط‌سازی و افزایش سریع ویسکوزی‌تری می‌تواند از چند ثانیه تا چند ماه باشد. در این مدت محلول سیلیکا کلوئیدی به‌صورت سیالی غیر نیوتنی و در حال تکامل عمل می‌کند. زمانی که ویسکوزی‌تری به مقداری بالاتر از ۱۰۰۰ cP (سانتی پواز) می‌رسد رفتار مانند سیالی غیر نیوتنی می‌شود [۶]. پرساف و همکاران جدولی برای تبیین حالات ژل شدگی ارائه داد که حالت ژل شدگی ۱ تا ۱۱ را در بردارد. حالت ۱ زمانی است که در آن ویسکوزی‌تری محلول بدون تغییر می‌ماند. در حالت دوم ویسکوزی‌تری به آرامی افزایش می‌یابد. پس از آن محلول در حالاتی مختلف به افزایش ویسکوزی‌تری ادامه می‌دهد. در حالت ۱۰ ماده به‌صورت صلب درمی‌آید [۷]. برای بررسی طول نفوذ زمان حرکت زمانی تعریف شده است که از آغاز مخلوط شدن تا ورود به حالت ۲ ادامه می‌یابد که در مقدار تقریبی ویسکوزی‌تری ۴ cP رخ می‌دهد و زمان ژل شدگی زمانی است که در آن حالت ۱۰ حاصل می‌شود [۵]. مدلی برای محاسبه ویسکوزی‌تری بر حسب زمان ارائه شده است که در آن ویسکوزی‌تهی سیلیس کلوئیدی که در زمان t به طول l نفوذ کرده است از رابطه‌ی لگاریتمی زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$\mu(l) = \mu(l) = a_1 + a_2 \exp(a_3) \quad (1)$$

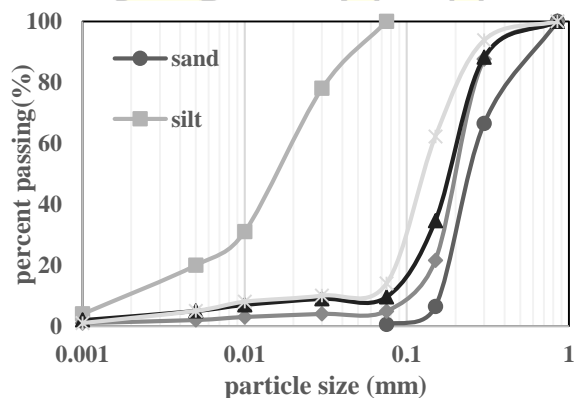
که در رابطه فوق، a_1, a_2, a_3 از برازش داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری ویسکوزی‌تری به‌دست‌آمده است. به‌هنگام فرایند ژل شدگی دونیرو با اثر متضاد وجود دارد. نیروی جاذبه بین ذرات که باعث شکل‌گیری ژل می‌شود و دیگری نیروهای برشی که باعث شکستن ساختار در حال شکل‌گیری می‌شود. بنابراین در دوغاب‌های در حال حرکت برش باعث شکستن شبکه‌ی مولکولی می‌شود؛ در نتیجه در این حالت ویسکوزی‌تری کمتر از مقداری است که محلول کلوئیدی در حالت ساکن در همان زمان طی شده از مخلوط‌سازی دارد.



شبه تیز گوشه می‌باشند. خاک لای دار با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد با ماسه‌ای مخلوط شده است که منحنی دانه‌بندی مصالح مخلوط طبق استاندارد ASTM D421 [۱۶] و ASTM D422 [۱۷] برآورد گردیده و مطابق شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل (۳): عکس میکروسکوپ الکترونیکی مصالح مورد مطالعه در تحقیق حاضر: الف- ماسه- ب- لای



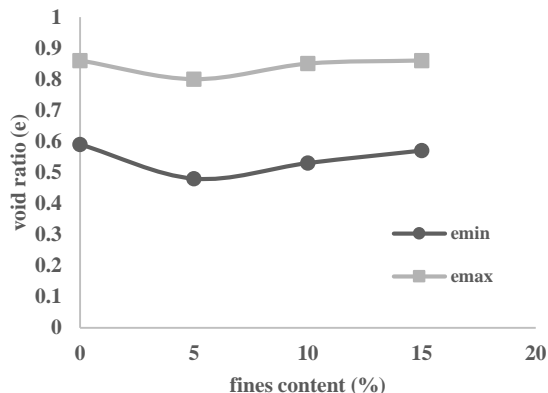
شکل (۴): منحنی دانه‌بندی مصالح مخلوط مورد مطالعه در تحقیق حاضر

شکن گلوله‌ای را روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بررسی کرد. آزمایش‌های حدود ات‌برگ و مقاومت فشاری تک‌محوری روی خاک کائولینیت پس از افزودن نانو خاک انجام شد. حدود خمیری و روانی مخلوط خاک شامل نانو خاک، نسبت به خاک بدون نانو افزایش می‌یابد. از آنجائی که افزایش در حد روانی کمتر از حد خمیری است، نشانه خمیری کاهش می‌یابد [۱۲]. محمد بوالحسنی در سال ۱۳۹۰، بررسی ویژگی‌های مکانیکی بنتونیت تثبیت شده با نانو سیلیس و سیمان را مطالعه نمود. نتایج حاکی از آن است که نانو سیلیس به تنهایی در مدت زمان کوتاه روی مقاومت تأثیر ندارد، اما با بکار بردن سیمان و نانو سیلیس رشد مقاومت چشمگیر خواهد شد [۱۳]. سیدی و همکاران در سال ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ تأثیر نانو کلئید سیلیکا را در بهسازی خاک‌های ماسه‌ای سیلتی تحت بارگذاری دینامیکی مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان مشاهده نمودند که از نانو کلئید سیلیکا برای افزایش مقاومت در برابر روانگرایی ماسه‌های لای دار تا میزان ۳۰ درصد می‌توان استفاده نمود [۱۴ و ۱۵]. هدف اصلی در تحقیق حاضر بررسی تأثیر کاربرد نانو سیلیکا کلئیدی در بهسازی توانایی باربری خاک‌های ماسه‌ای لای دار می‌باشد. در این تحقیق درصد ریزدانه برابر ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لای در نظر گرفته شده است. همچنین در مطالعه حاضر طول نفوذ نانو سیلیکا در خاک ماسه سیلت به روش غیر محرک، تعیین مدول ژل شدگی مناسب برای تزریق و تعیین خصوصیات رئومترى محلول نانو سیلیکا مورد ارزیابی قرار گرفته است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۴- مواد و روش‌ها

۴-۱- مواد

در تحقیق حاضر، از ماسه و لای ۱۶۱ فیروزکوه جهت مطالعه استفاده شده است که عکس میکروسکوپ الکترونیکی مصالح مطابق شکل ۳ قابل مشاهده می‌باشد. براین اساس مس توان دریافت که ذرات ماسه‌ای به صورت



شکل (۶): تغییرات نسبت تخلخل حداقل و حداکثر در نمونه‌های مورد مطالعه

چگالی ویژه مخلوط‌های خاکی مورد مطالعه بر اساس استاندارد ASTM D854 [۱۸] اندازه‌گیری شده و مطابق جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. همچنین مقادیر نسبت‌های تخلخل حداقل بر اساس آزمایش میز ارتعاشی مطابق استاندارد ASTM D4253 [۱۹] تعیین گردیده است (شکل ۵). مقدار نسبت تخلخل حداکثر مصالح طبق استاندارد ASTM D4254 [۲۰] ارزیابی شده است. نتایج مطابق شکل ۶ ارائه شده است. نمونه‌های خاکی مورد مطالعه با تراکم نسبی ۴۰ درصد آماده شدند تا شرایط سست بودن و در نتیجه تزریق پذیر بودن آماده باشد.

جدول ۲: تغییرات چگالی (GS) ویژه نمونه‌های مورد مطالعه

| ماسه با ۵ درصد لای | ماسه با ۱۰ درصد لای | ماسه با ۱۵ درصد لای | ماسه |
|--------------------|---------------------|---------------------|------|
| ۲/۶۱ | ۲/۶۴ | ۲/۵۹ | ۲/۶۲ |

۴-۲- نانو سیلیکا کلئیدی و نمونه‌سازی

نانو سیلیکا کلئیدی استفاده شده محصول شرکت MSA [۲۱] می‌باشد. اندازه متوسط ذرات سیلیس کلئیدی ۱۰ نانومتر است و با PH بزرگتر از ۷ می‌باشد. برای آماده‌سازی محلول نانو سیلیکا کلئیدی ۵ درصد وزنی و PH و نیز قدرت یونی به ترتیب از آب مقطر و اسید کلریدریک غلیظ و نمک کلرید سدیم استفاده گردید. برای تزریق، محلولی با ۵ درصد وزنی و قدرت یونی ۰/۲ و با PH برابر ۶/۱ انتخاب گردید. از این رو ابتدا آب به محلول به میزان سی درصد وزنی اضافه شد. سپس با اسید کلریدریک میزان اسیدیته آن افزایش یافت. در انتها با افزودن نمک کلرید سدیم قدرت یونی از طریق میزان یون کلر موجود در محلول ارزیابی گردید.



شکل (۵): دستگاه آزمایش میز ارتعاشی در تحقیق حاضر

۴-۳- تزریق سیلیس کلئیدی

با توجه به درصد تراکم نسبی در نظر گرفته شده و حجم لوله تزریق و چگالی ویژه به دست آمده برای دانه‌بندی‌های متفاوت وزن خشک لازم برای هر ۱۰ سانتی‌متر از طول لوله به دست آمد. سپس در لوله پلاکسی گلاس (Plexiglas) که دارای ۱ متر طول و قطر ۴ سانتی‌متر بود، در هر ۱۰ سانتی‌متر طول مصالح ریخته شده تا نمونه‌ای



موردنظر آن و تهیه نمونه خاک متناظر با آن صورت گرفت که میانگین نتایج دبی، طول نفوذ ویسکوزیتر با سرعت‌های ۳۰ و ۶۰ دور بر دقیقه مطابق شکل ۸ و ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که تراکم نسبی نمونه‌های مورد مطالعه برابر ۴۰ درصد بوده و مقادیر اندازه‌گیری شده برای طول یک متر نفوذ محلول در نمونه می‌باشد. بر اساس شکل ۶ می‌توان دریافت که در با افزایش میزان درصد ریزدانه در خاک ماسه‌ای مدت‌زمان موردنیاز جهت حرکت و نفوذ محلول نیز افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش میزان درصد ریزدانه دبی خروجی محلول از نمونه‌ها به‌صورت آهسته صورت می‌گیرد که علت آن گرفتگی منافذ توسط ذرات ریزدانه می‌باشد. در تأیید نتایج به‌دست‌آمده می‌توان مقادیر ویسکوزیتر محلول در نمونه‌های مورد مطالعه را در شکل ۷ مشاهده نمود. هرچه میزان درصد ریزدانه کمتر باشد با ویسکوزیتر بالاگیرش سریع‌تر اتفاق می‌افتد. بالعکس هنگامی که میزان ریزدانه به ۱۵ درصد می‌رسد مدت‌زمان گیرش به علت بالا رفتن ویسکوزیتر محلول و پایین آمده هدایت هیدرولیکی در نمونه افزایش می‌یابد. در حالتیکه در نمونه ماسه‌ای حاوی ۱۰ درصد لای رفتار مناسب مشاهده می‌گردد و تغییرات دبی بسیار محسوس نمی‌باشد. در انتها می‌توان بیان کرد که در ویسکوزیتر پایین و درصد تراکم ۴۰ درصد تا زمانی که مقدار ویسکوزیتر کمتر از ۲ سانتی پواز است تزریق پذیری در درصد سیلت ۱۵ درصد نیز امکان‌پذیر است و طول نفوذ ۱ متر را پاسخ می‌دهد اما به محض بالا رفتن ویسکوزیتر ضمن پایین آمدن هدایت هیدرولیکی، و در نتیجه دبی حالت غیر محرک از بین رفته و خاک دارای گرفتگی شده و متراکم می‌شود. و در نتیجه نفوذ نیز متوقف می‌شود.

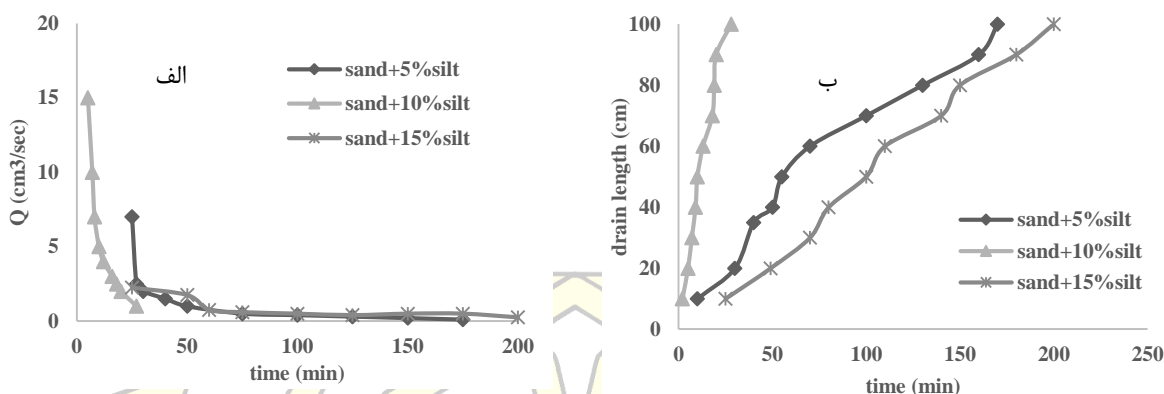
یکنواخت از نظر ساختار به وجود آید. سپس مجراهای های ورود و خروج آب و محلول را که دارای فیتینگ های پنوماتیکی است در دو انتهای لوله بسته‌شده و با شلنگ‌های مربوطه به مخزنی که در ارتفاع دو متری قرار دارد وصل گردید. محلول آماده‌شده در ستون خاک موجود در قالب با ویژگی‌های مشخص شده از ارتفاع ۲ متر تزریق شد. بررسی شرایط تزریق در مصالح مخلوط ماسه و لای با درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در دو حالت انجام گرفت. در حالت اشباع، ابتدا آب به نمونه خاک تزریق شد و پس از یکنواخت شدن جریان آب ورودی و خروجی مخزن نانو سیلیکا کلئید جایگزین مخزن آب گردید. در حالت خشک از ابتدا مخزن از محلول کلئیدی پر شده و سپس تزریق انجام گرفت. در حالت اشباع از میزان آب خروجی می‌توان میزان حجم تزریق‌شده و همچنین دبی در زمان تزریق را به دست آورد. اما در حالت خشک این امکان وجود ندارد. در هر دو حالت با افزودن ماده رنگی به محلول اولیه می‌توان میزان طول نفوذ را اندازه‌گیری نمود. نمایی از دستگاه تزریق به‌طور کامل در شکل ۷ نشان داده شده است.



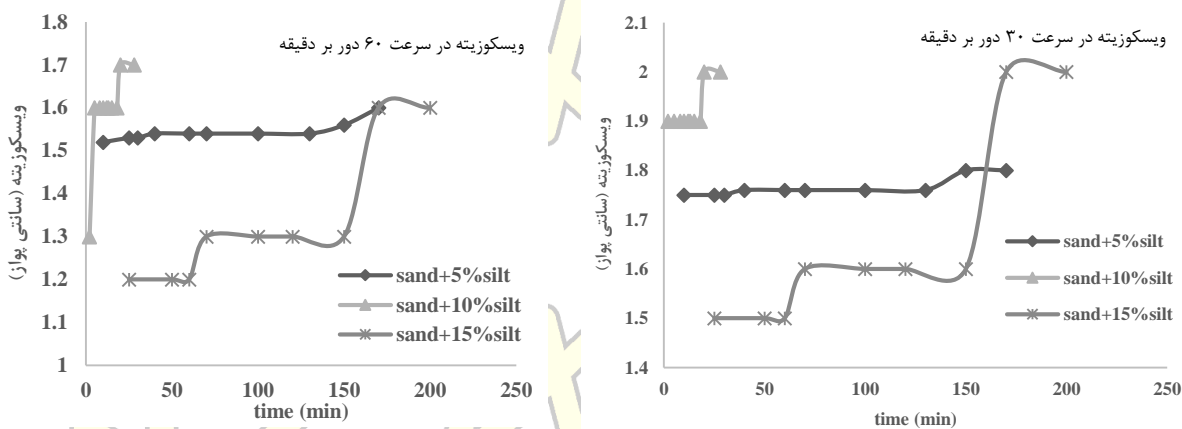
شکل (۷): لوله تزریق به طول ۱ متر و قطر ۴ سانتیمتر

۴-۳-۱- نتایج تزریق در حالت اشباع

در این مرحله، سه تزریق در مصالح مورد مطالعه انجام گرفته است که در مجموع ۹ آزمایش تزریق پس از ساخت محلول



شکل (۸): نتایج تزریق در حالت اشباع الف- تأثیر ذرات ریزدانه بر تغییرات دبی خروجی محلول در مقابل زمان در نمونه‌های مورد مطالعه ب- تأثیر درصد ریزدانه بر تغییرات زمان نفوذ محلول در نمونه‌های مورد مطالعه



شکل (۹): تأثیر درصد ریزدانه بر تغییرات ویسکوزیته محلول در مقابل زمان در نمونه‌های مورد مطالعه، الف- با سرعت ۳۰ دور در دقیقه ب- با سرعت ۶۰ دور در دقیقه

قابل مشاهده می‌باشد. در تمامی تزریق‌های انجام گرفته در حالت خشک به دلیل انتخاب ویسکوزیته مناسب تزریق به‌طور کامل انجام شده است. در خاک ماسه‌ای با ۵ و ۱۰ درصد لای می‌توان دریافت که روند نفوذ به‌مانند حالات قبل با کاهش سرعت نفوذ همراه است. این پدیده را می‌توان از کاهش شیب طول نفوذ برحسب زمان دریافت. نسبتاً می‌توان زمان تزریق کامل را با آنچه در حالت اشباع به

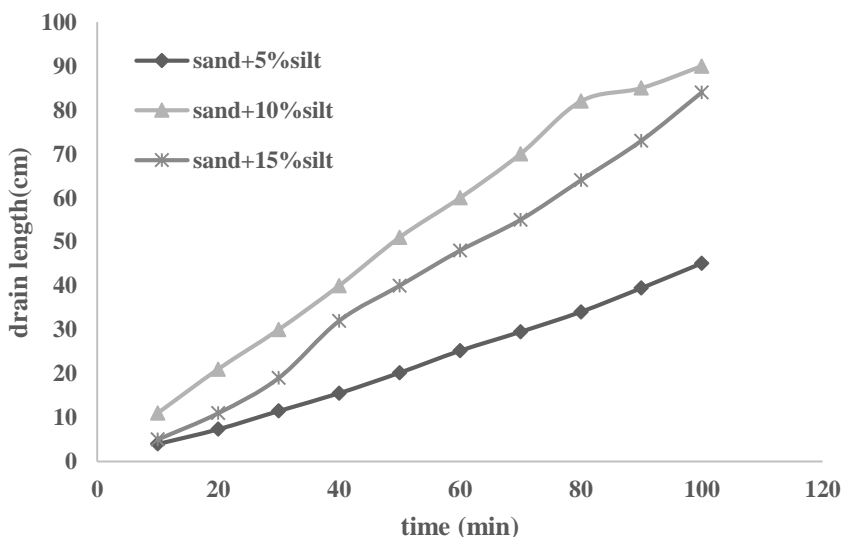
۴-۳-۲- نتایج تزریق در حالت خشک

در نمونه‌های خشک که قبل از تزریق آب وارد محیط متخلخل خاک نشده است، امکان بررسی دبی وجود ندارد. تنها می‌توان با ارزیابی طول نفوذ نحوه تزریق و رفتار آن را مشاهده نمود. تغییرات طول نفوذ باگذشت زمان ویسکوزیته متناظر با آن در دو سرعت متفاوت برای نمونه‌های مورد مطالعه مطابق شکل‌های ۱۰ و ۱۱

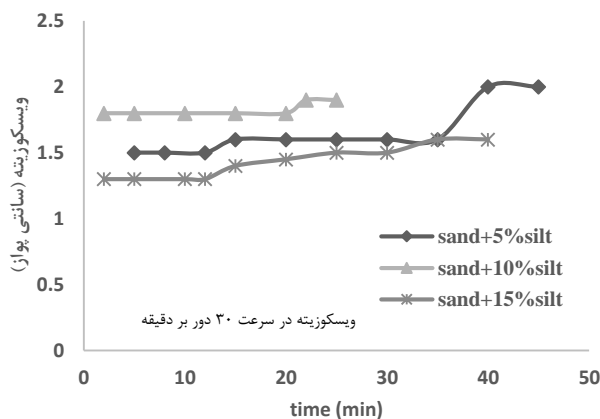
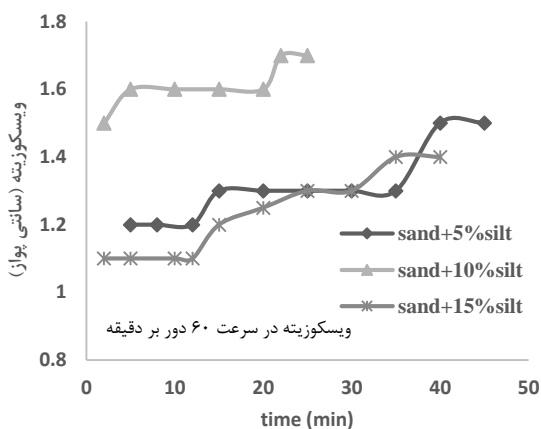


تزریق خواهد شد. به همین دلیل، انتخاب محلول با ویژگی- های مناسب حتی در خاک‌های با درصد ریزدانه ۱۵ درصد به تثبیت موفق خاک‌های سست کمک می کند.

دست می‌آید نزدیک دانست. در ماسه با ۱۵ درصد لای نیز ویسکوزی‌تر مناسب به تزریق موفق منجر شده است. رفتار مشابه در تزریق‌های گفته‌شده ناشی از این واقعیت است که افزایش ویسکوزی‌تر باعث کاهش سرعت نفوذ در حین



شکل (۱۰): تغییرات طول نفوذ در مقابل زمان در نمونه‌های مورد مطالعه



شکل (۱۱): تغییرات ویسکوزی‌تر محلول در مقابل زمان در نمونه‌های مورد مطالعه، الف- با سرعت ۳۰ دور در دقیقه-ب- با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه



۴-۴- روش

ابعاد نمونه مربعی به ضلع ۶ سانتی‌متر بود. سرعت نرخ کرنش برابر ۰/۳ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید. به منظور آنکه بتوان شرایط تزریق را در مصالح مورد مطالعه را در آزمون برش مستقیم آماده نمود، همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد قالب‌های نمونه‌سازی جدیدی ساخته شد که از مواد پلیمری و چوب بوده که دارای ورودی و خروجی پنوماتیکی می‌باشند. لازم به ذکر است که مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌های تزریق‌شده برابر ۱ ماه می‌باشد (شکل ۱۲). در شکل ۱۳ نحوه انجام آزمون برش مستقیم در حالت اشباع و بدون تزریق مشاهده می‌گردد.

با توجه به این‌که هدف از تزریق نانو سیلیکا کلونیدی در خاک بهسازی و افزایش توانایی باربری آن بوده است، لذا بررسی افزایش مقاومت در اثر تزریق بخشی مهم از تحقیق است. بنابراین جهت ارزیابی مشخصات ژئوتکنیکی مصالح تثبیت‌شده از آزمون برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D3080-98 [۲۲] انجام گردیده است. این آزمایش در سه تنش قائم ۴۰، ۸۰ و ۱۲۰ کیلوپاسکال در سه حالت خشک بدون تزریق، اشباع بدون تزریق و حالت تزریق‌شده نانو سیلیکا کلونیدی انجام‌شده است. همچنین



شکل (۱۲): تصویر نمونه‌سازی تزریق نانو سیلیکای کلونیدی برای آزمایش برش مستقیم

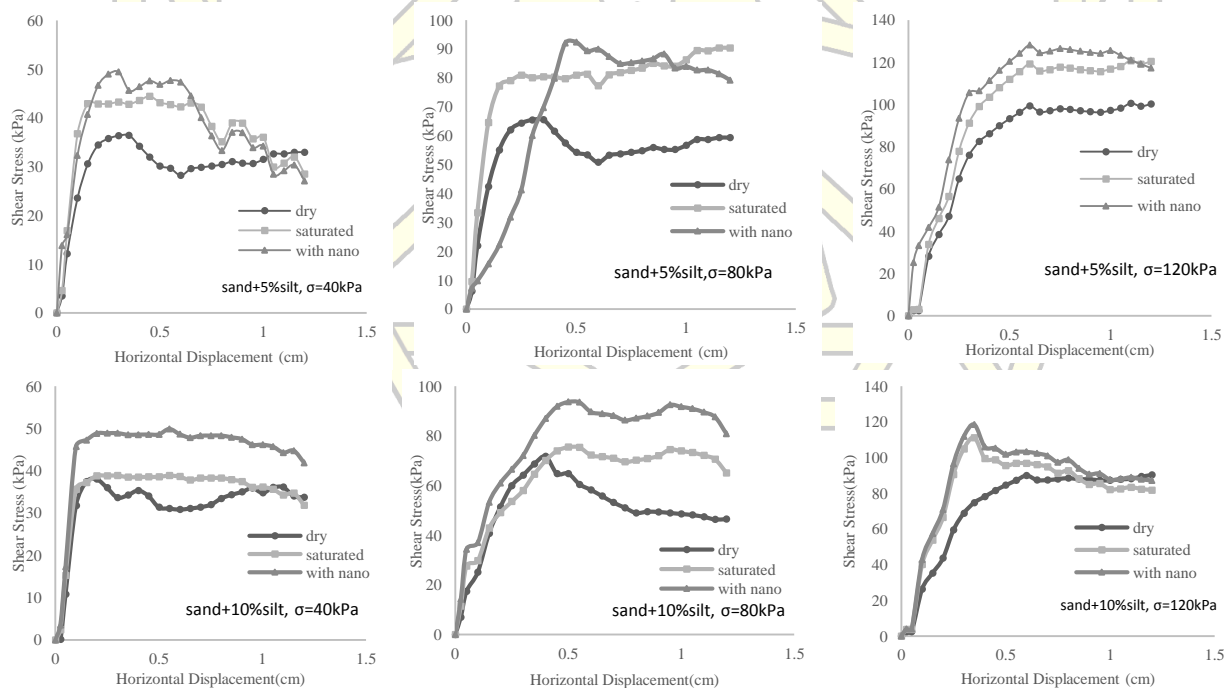


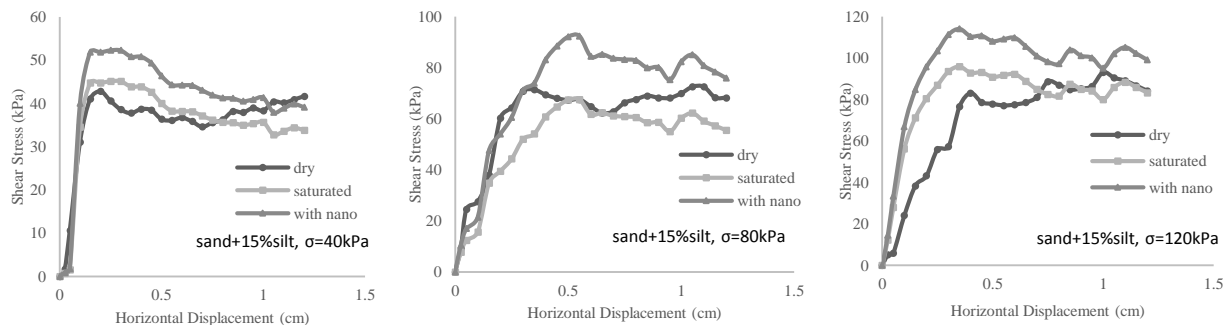
شکل (۱۳): انجام آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در حالت اشباع

۵- نتایج حاصل از آزمایشات

بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان مشاهده نمود که در تمامی حالت‌ها در مقایسه با نمونه‌های خشک، نمونه‌های اشباع شده با تزریق نانو سیلیکا کلونیدی دارای بیشترین مقاومت برشی بوده و سپس نمونه‌های اشباع دارای بیشترین توانای باربری می‌باشند.

نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم بر روی نمونه‌های مورد مطالعه به شرح ذیل قابل بیان می‌باشند:
الف- تغییرات تنش برشی در مقابل جابجایی افقی بر روی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق شکل ۱۴ قابل مشاهده می‌باشد.

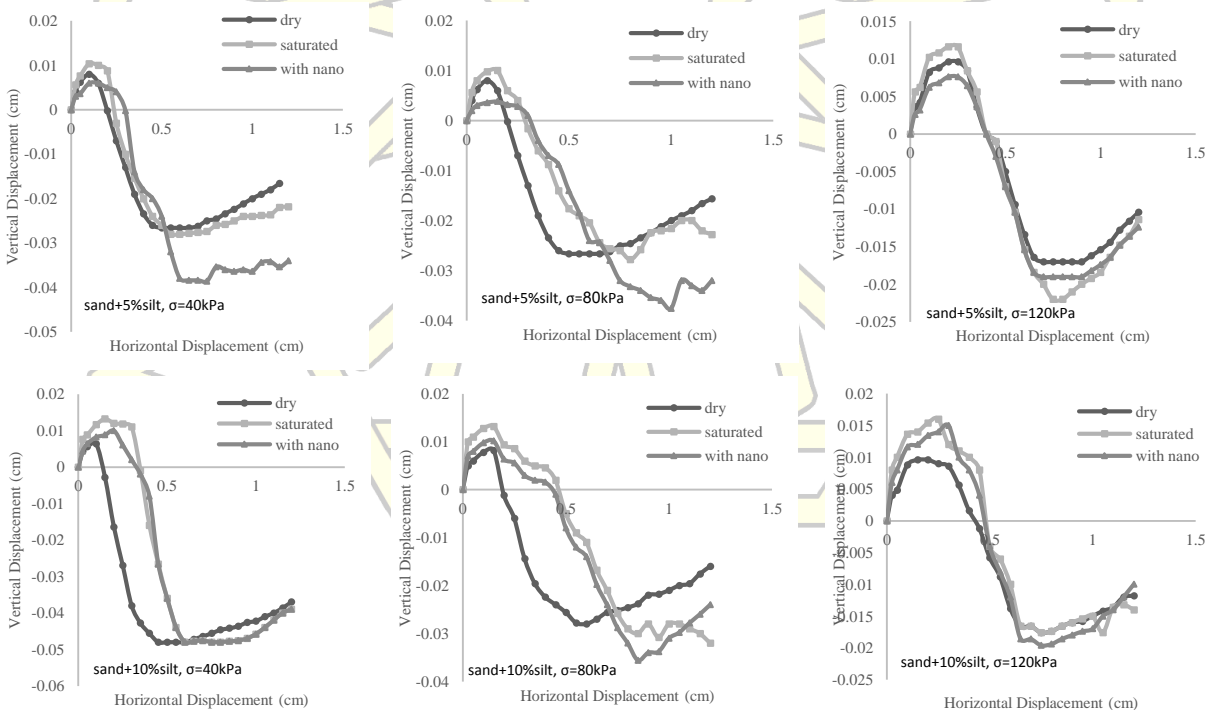


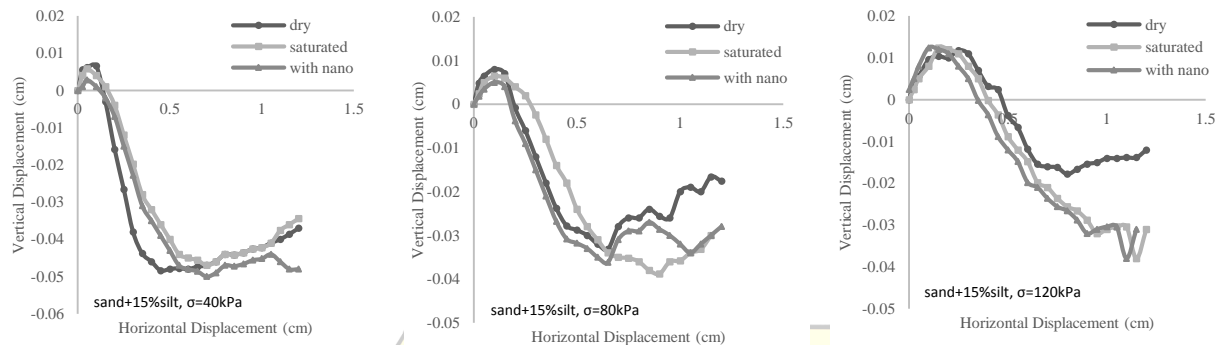


شکل (۱۴): تغییرات تنش برشی در مقابل جابجایی افقی در نمونه‌های مورد مطالعه

می‌باشند. هنگامی که به نمونه‌های مورد مطالعه نانو سیلیکا کلونیدی تثبیت می‌شوند مشاهده می‌گردد که در تنش‌های قائم کم و متوسط نشست قائم بینابین ارائه می‌کند. در حالی که در تنش‌های قائم بالا میزان نشست قائم حداقل در آن‌ها به وقوع می‌پیوندد.

ب- در هنگام بارگذاری برش مستقیم نمونه‌های مورد مطالعه، میزان تغییرات نشست قائم ارزیابی گردیده است که در مقابل جابجایی‌های افقی مطابق شکل ۱۵ رسم ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌گردد که نمونه‌ها در حالت خشک عموماً دارای کمترین میزان نشست قائم می‌باشند. و بالعکس نمونه‌های اشباع دارای بیشترین مقدار نشست قائم

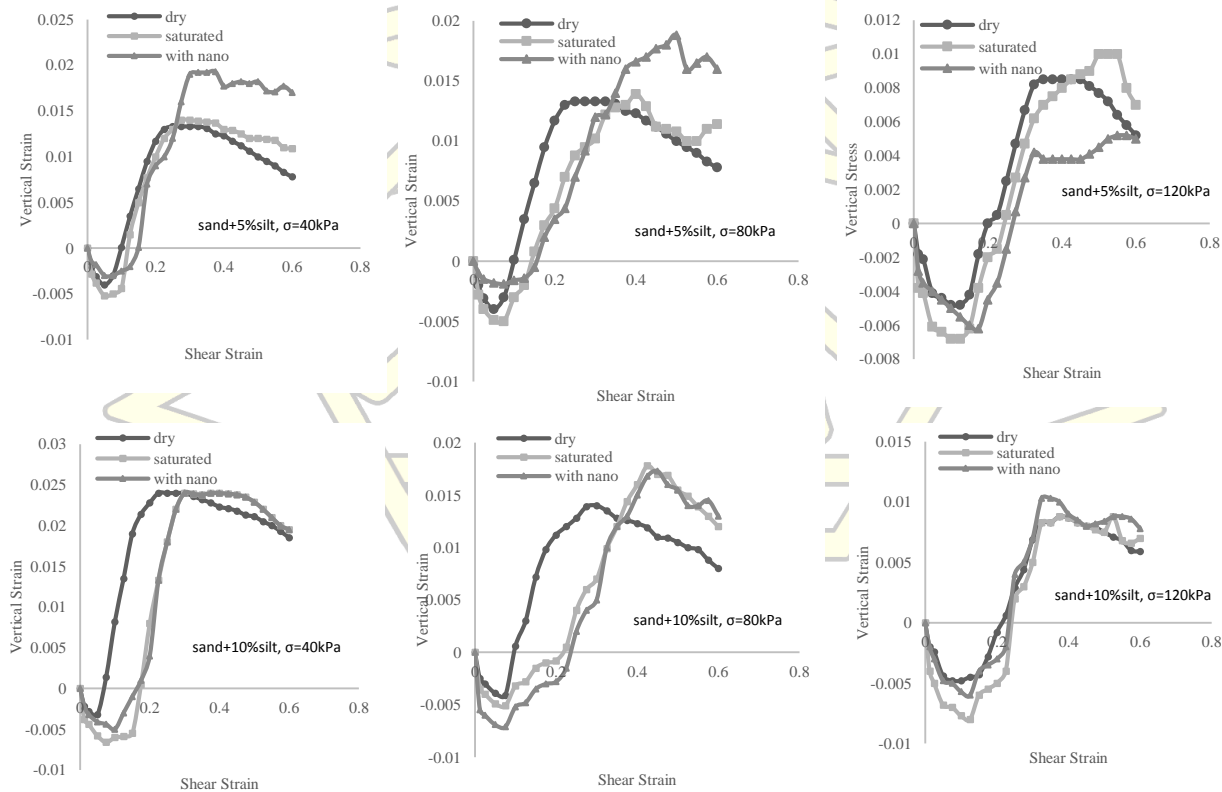


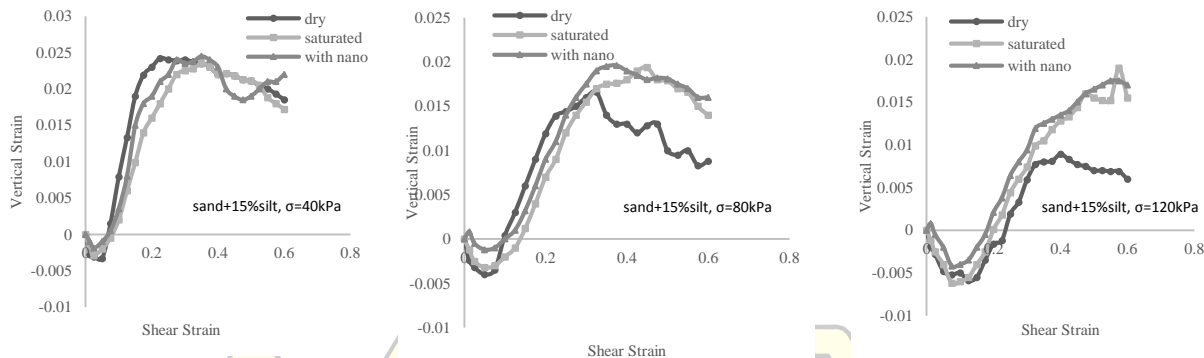


شکل (۱۵): تغییرات جابجایی قائم در مقابل جابجایی افقی در نمونه‌های مورد مطالعه

دارای حداقل میزان از نظر کرنش قائم می‌باشند. هنگامی که به نمونه‌ها نانو سیلیکا کلئیدی تزریق شده است مشاهده می‌گردد که میزان کرنش قائم را در مقایسه با حالت اشباع کنترل نموده است ولی بهینه نمی‌باشد.

ج- از نتایج مهم حاصل از آزمایش برش مستقیم، ارزیابی میزان کرنش قائم ناشی از بارگذاری در تقابل کرنش برشی می‌باشد که مطابق شکل ۱۶ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که به‌طور عمومی نمونه‌های اشباع دارای بیشترین کرنش قائم بوده و نمونه‌های خشک

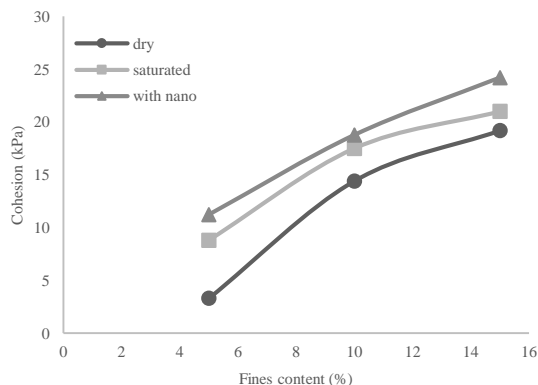
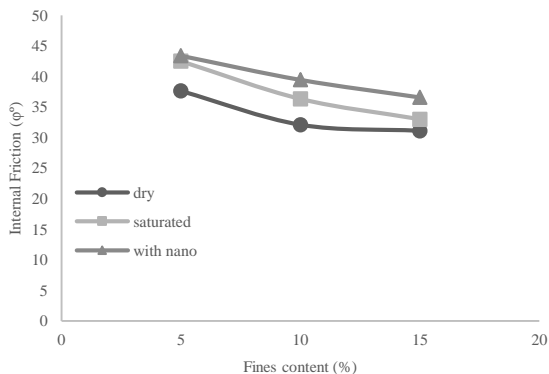




شکل (۱۶): تغییرات کرنش قائم در مقابل کرنش افقی در نمونه‌های مورد مطالعه

افزایش درصد ریزدانه در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه میزان زاویه اصطکاک داخلی کاهش و چسبندگی افزایش یافته است. در انتها، با تزریق نانو سیلیکا کلئیدی به نمونه‌ها می‌توان دریافت که بالاترین مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه باحالت‌های گذشته در آن‌ها ایجاد گردیده است. ولی مشابه باحالت‌های قبلی با افزایش میزان درصد ریزدانه میزان چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد.

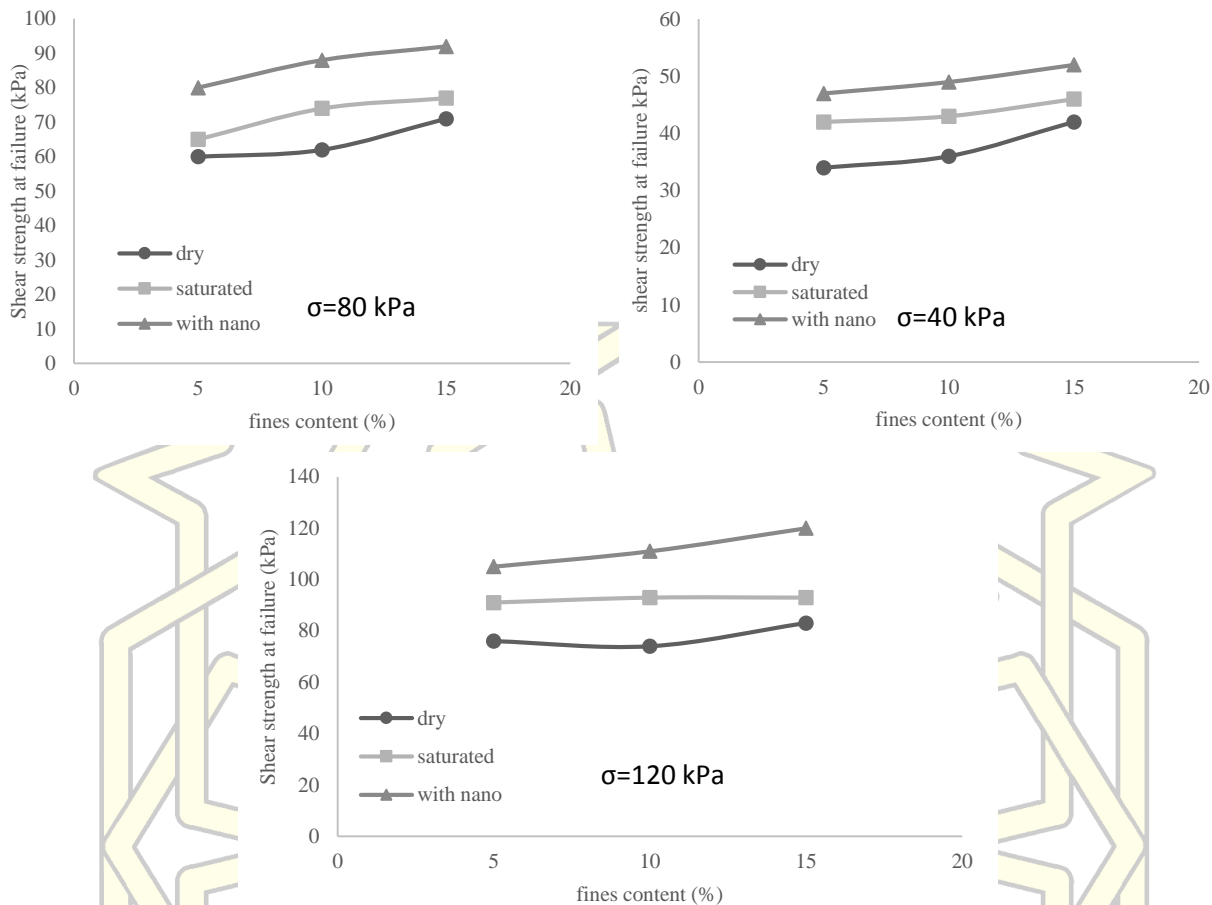
د- تأثیر نانو سیلیکا کلئیدی بر روی پارامترهای مقاومتی نمونه‌های مورد مطالعه انجام گرفته است که نتایج آن مطابق شکل ۱۷ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که در حالتی که نمونه‌های خاک به صورت خشک مورد آزمایش قرار گرفته‌اند با افزایش درصد ریزدانه در ماسه میزان چسبندگی افزایش و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. همچنین در حالت اشباع مشاهده می‌گردد که در نمونه‌ها میزان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه باحالت خشک به طور کلی افزایش یافته‌اند ولی با



شکل (۱۷): تأثیر نانو سیلیس کلئیدی بر پارامترهای مقاومتی نمونه‌های خاکی مورد مطالعه

افزایش یافته است. همچنین هنگامی که به نمونه‌های مورد مطالعه نانو سیلیکا کلئیدی تزریق شده است می‌توان دریافت که در تمامی درصد‌های ریزدانه میزان مقاومت برشی در لحظه گسیختگی بالاترین میزان رو نسبت به حالت دیگر دارا می‌باشد.

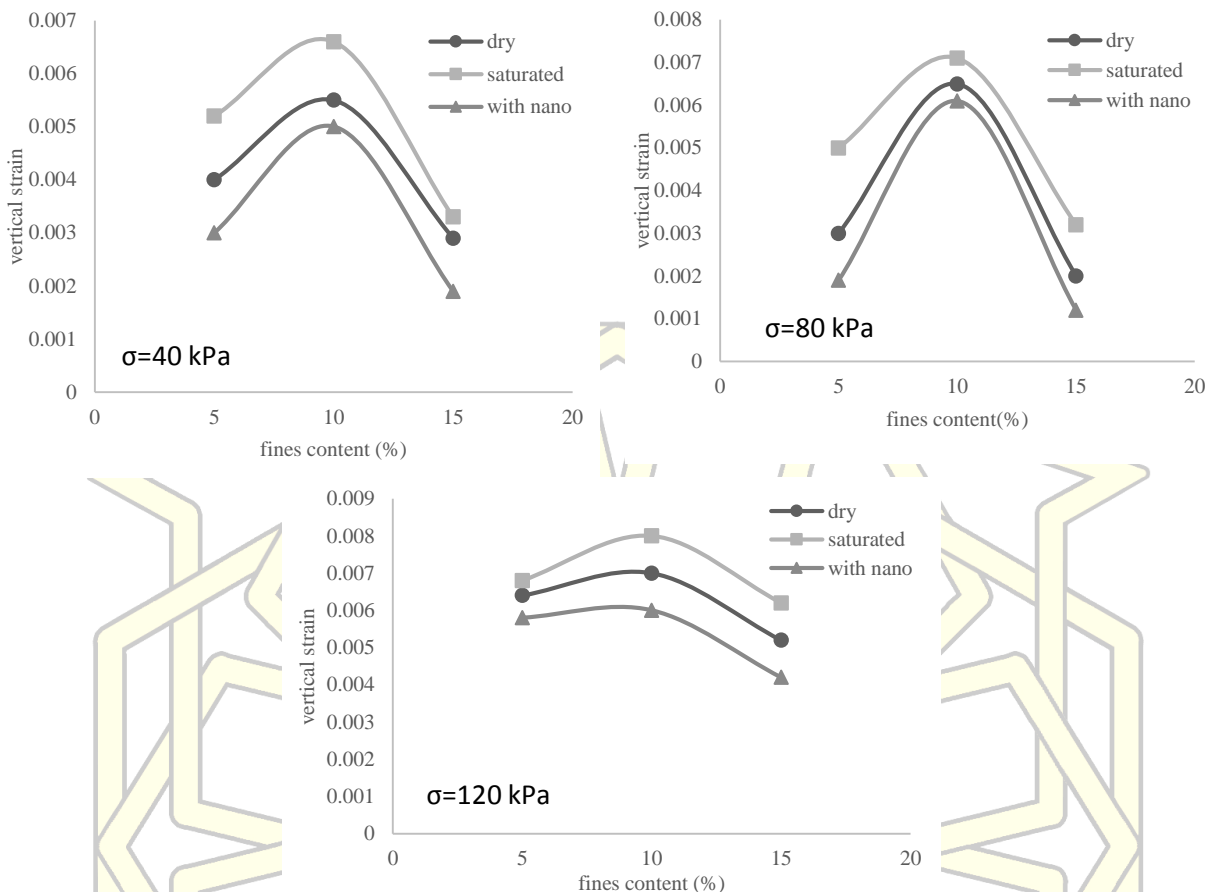
و- تأثیر نانو سیلیکا کلئیدی بر روی مقاومت برشی در لحظه گسیختگی نمونه‌های مورد مطالعه انجام گرفته است که نتایج آن مطابق شکل ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت در حالت کلی با افزایش میزان درصد ریزدانه مقاومت برشی در لحظه گسیختگی



شکل (۱۱): تأثیر نانو سیلیس کلونیدی بر مقاوم برشی خاک در لحظه گسیختگی در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه

۱۵ درصد می‌رسد مشاهده می‌گردد که کمترین میزان نشست قائم در نمونه‌ها ایجاد می‌شود. همچنین با مقایسه نمودارها می‌توان مشاهده نمود که میزان کرنش قائم در تمام نمونه‌ها در حالت اشباع دارای بیشترین میزان بوده و هنگامی که به نمونه‌های خاکی مورد مطالعه نانو سیلیس کلونیدی تزریق می‌شود حداقل‌ترین میزان وقوع نشست و کرنش قائم اتفاق می‌افتد.

ی- تأثیر نانو سیلیس کلونیدی بر روی میزان کرنش‌های قائم نمونه‌های مورد مطالعه مقایسه گردیده است که نتایج آن مطابق شکل ۱۹ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان دریافت با افزایش میزان تنش‌های قائم نرخ کرنش قائم افزایش می‌یابد. در حالت کلی هنگامی که ۱۰ درصد لای به ماسه افزوده شده است بالاترین نرخ کرنش قائم به وقوع پیوسته است. همچنین زمانی که درصد ریزدانه به



شکل (۱۹): تأثیر نانو سیلیس کلئیدی بر کرنش قائم در نمونه‌های خاکی مورد مطالعه

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

۱- بر اساس نتایج تزریق در مصالح مخلوط اشباع، کاهش دبی با افزایش زمان و افزایش متناظر ویسکوزیته با آن به‌طور واضح مشاهده می‌گردد. ویسکوزیته در محلول در دو سرعت متفاوت و دو نرخ کرنش برشی اندازه‌گیری شده است. سرعت نفوذ با افزایش زمان تزریق کاهش می‌یابد که با کاهش دبی نیز متناسب است. مجموعه تزریق‌ها در خاک اشباع نشان می‌دهد که در ویسکوزیته پایین و درصد تراکم ۴۰ درصد تا زمانی که مقدار ویسکوزیته کمتر از ۲ سانتی پواز است تزریق پذیری در درصد سیلت ۱۵ درصد نیز امکان‌پذیر است و طول نفوذ ۱ متر را پاسخ می‌دهد. اما به‌محض بالا رفتن ویسکوزیته در ضمن پایین آمدن هدایت هیدرولیکی و در نتیجه دبی حالت غیر محرک از بین رفته و خاک دارای گرفتگی شده و متراکم می‌شود و در نتیجه نفوذ نیز متوقف شده است.

در تحقیق حاضر، خاک ماسه‌ای فیروزکوه با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی لای مخلوط گردیده و تحت نفوذ نانو سیلیکا کلئیدی قرار گرفت است. در ادامه، پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مخلوط تثبیت‌شده بر اساس آزمایش برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-98 بررسی شده است. همچنین میزان طول نفوذ در ماسه لای دار به هنگام تزریق نانو سیلیکا کلئیدی بررسی شده است. خصوصیات محلول شامل درصد وزنی، PH و مقاومت یونی ویسکوزیته می‌باشد که مورد ارزیابی و اندازه‌گیری شده است. نتایج نهایی به‌دست‌آمده از تحقیق حاضر را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:



بنابراین با توجه به موارد فوق می‌توان ذکر کرد که باگذشت زمان میزان دبی تزریقی در هر دو حالت خشک و اشباع کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که هم‌گرادین هیدرولیکی با افزایش طول نفوذ کاهش می‌یابد و هم‌این‌که افزایش ویسکوزیته باعث کاهش هدایت هیدرولیکی و کند شدن حرکت در خاک می‌شود. همچنین، در مقادیر بالای ویسکوزیته تزریق در بار ارتفاع مورد استفاده در آزمایش‌ها باعث فشرده شدن نمونه سست می‌شود و یا اینکه در صورت تزریق حالت غیر محرک از بین می‌رود و حالت تراکمی پیدا می‌کند. این امر گاهی به خرابی نحوه قرارگیری ذرات خاک منجر می‌شود و گاهی با بسته شدن منافذ توسط ریزدانه‌ها باعث قطع و عدم ادامه یافتن تزریق می‌شود. اگرچه با افزایش درصد لای مقدار چسبندگی مجازی نشان داده شده در آزمایش برش مستقیم بزرگ‌تر است. این روند افزایش چسبندگی در هر سه حالت آزمایش که خشک، اشباع و تزریق شده است دیده می‌شود. همچنین افزایش لای باعث کاهش زاویه اصطکاک داخلی شده است. این رفتار نیز در هر سه حالت خشک، اشباع و تزریق شده دیده می‌شود. در حالت‌های تزریق شده افزایش درصد ریزدانه همان رفتاری را نشان می‌دهد که در حالات قبل دیده شده است. ولیکن با تزریق نانو سیلیکا کلئیدی در خاک ماسه‌ای با درصد‌های لای‌های ۵ تا ۱۵ درصد که محدوده مورد نظر این تحقیق بوده است باعث تثبیت خاک شده است؛ به‌طور کلی پارامترهای مقاومت برشی افزایش یافته است.

۲- در نمونه‌های مصالح مخلوط خشک که پیش از تزریق آب وارد محیط متخلخل خاک نشده است، امکان بررسی دبی وجود نداشته و تنها با اندازه‌گیری طول نفوذ به نحوه تزریق و رفتار تزریق پی برد. در تمامی تزریق‌های انجام‌گرفته مشاهده می‌گردد که با افزایش ویسکوزیته سرعت نفوذ در حین تزریق کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که انتخاب محلول با ویژگی‌های مناسب حتی در خاک‌های ماسه‌ای با ۱۵ درصد لای به تثبیت موفق خاک‌های سست کمک می‌کند.

۳- از نظر پارامترهای ژئوتکنیکی مشاهده می‌گردد که مقادیر چسبندگی در حالت تزریق شده نسبت به حالت تزریق نشده افزایش داشته است. این افزایش نسبت به حالت خشک در درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ سیلت به ترتیب برابر $3/4$ ، $1/26$ و $1/26$ است. این افزایش نسبت به حالت اشباع به ترتیب برابر با $1/28$ ، $1/07$ و $1/28$ است. همچنین افزایش زاویه اصطکاک داخلی در حالت تزریق شده نسبت به حالت خشک برای درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب برابر با $1/15$ ، $1/23$ و $1/17$ است. زاویه اصطکاک داخلی در حالت تزریق شده نسبت به حالت اشباع برای درصد‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب برابر با $1/02$ ، $1/07$ و $1/29$ است. به‌طور کلی می‌توان دریافت که افزایش پارامترهای مبین مقاومت برشی به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت برش مستقیم در حالت تزریق شده نسبت به حالت خشک بیشتر است تا نسبت افزایش به حالت اشباع که در آن امکان روانگرایی وجود دارد.

۷- مراجع

- [1] Gallagher, P. M., (2000), Passive site remediation for mitigation of liquefaction risk. *Ph.D. Dissertation, Virginia Polytech. Inst. and State Uni.*, Blacksburg.
- [2] Gallagher, P. M., Mitchell, J. K., (2002), *Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. Soil Dyn. and Earth. Eng.*, 22: 1017-1026.
- [3] Thevanayagam, S., JIA, W., (2003), Electro-osmotic grouting for liquefaction mitigation in silty soils.



Geotech. Spec. Pub., 2: 1507-1517.

[4] Gallagher, P. M., Lin, Y., (2009), Colloidal silica transport through liquefiable porous media. *J. of geotech. and geoenvironmen. eng.*, 135: 1702-1712.

[5] Yonekura, R. Miwa, M., (1993), Fundamental properties of sodium silicate based grout. *Proc. 11th Southeast Asia, Geotech. Conf.*, Singapore, 439-444.

[6] Gallagher, P. M. Koch, A. J., (2003), Model testing of passive site stabilization: A new technique. *Proc. 3th Int. Conf. on Grouting and Ground Treatment, New Orleans*, 2: 1478-1490.

[7] Gallagher, P. M., Conlee, C. T., Rollins K. M., (2007), Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. *J. of Geotech. and Geoenvironm. Eng.*, 133: 186-196.

[8] Noll, M. R., Bartlett, C., Dochat, T. M., (2007), In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica. *Proc. 6th National outdoor action conference on aquifer restoration*, (443-57), Las Vegas, NV.

[9] Persoff, P., Apps, J., Moridis, G. and Whang, J. M., (1999), Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica. *J. of Geotech. and Geoenvironmen. Eng.*, 125: 461-469.

[10] Hamderi M., Gallagher P. M., (2013), An optimization study on the delivery distance of colloidal silica. *Scientif. Res. Essays*. 8: 1314-1323.

[11] Butron, C., Axelsson, M., Gustafson, G., (2009), Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. *Tunnel. and under. space techn.*, 24: 603-607.

[12] Taha, M., (2009), Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures. *Nanotechnology in Construction* 3, 377-382.

[13] Abolhassani, M., (2011), Study of mechanical properties of bentonite stabilized with Nano silica and Cement, *Ms.c. Thesis*, KNT University, Tehran, Iran.

[14] Moradi, Gh., Seyedi, Sh., (2014), Evaluation of uniform delivery of colloidal Nano silica stablizer to liquefiable sily sand. *Int. J. Nano Dimens.*, 6: 501-508.

[15] Moradi, Gh., Seyedi, Sh., (2017), Evaluation of effective strength parameters and mirco structural variations of silty sands stabilized with Nano colloidal silica. *J. of Civil eng. and environ.*, 46: 78-90.

[16] ASTM D421-85, (1985), Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants, *Annual book of ASTM standards*, (reapproved 1998).

[17] ASTM D422-63, (1963), Standard Test Method for article-Size Analysis of Soils, *Annual book of ASTM standards* (reapproved 1998).

[18] ASTM-D 854-02, (2002), Standard test method for specific gravity of soil solids by water pycnometer, *Annual book of ASTM standards*.

[19] ASTM D4253-16, (2006), Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table, *Annual book of ASTM standards*.

[20] ASTM D4254-16, (2006), Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density, *Annual book of ASTM standards*.

[21] MSA Company, <http://msatechnology.com>.

[22] ASTM D 3080-98, (1998), Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained condition, *Annual book of ASTM standards*.