



Research Article

Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber and Nano-silica on the Physical and Mechanical Properties of Silty Sand Soil

Mahmoud Malakouti Olounabadi ^{a*}, Khosrow Salehi ^b, Abdol Reza Fazeli ^a,
Babak Golchin ^c, Ramin Meshkabadi ^d

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, I. R. Iran.

^b MSc., Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, I. R. Iran.

^c Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I. R. Iran.

^d Associate Professor, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-11-12

Revised: 2024-11-21

Accepted: 2024-11-26

Keywords:

Silty sand;
Nano-silica;
Polypropylene fibers;
California Bearing Ratio;
Shear strength.

ABSTRACT

This research investigated the effect of using polypropylene fibers and nano-silica on the mechanical properties (such as California Bearing Ratio (CBR) and shear strength) of silty sandy soil. Different laboratory samples were prepared with varying percentages of nano-silica (1%, 2%, and 3%) and polypropylene fibers of different lengths (6 mm and 12 mm). The fibers were mixed with 0.1%, 0.5%, and 1% of soil weight. The microscopic characteristics of soils were examined using SEM. Results showed that addition of polypropylene fibers significantly increased the CBR value, and using 1% of fibers improved the interlocking and bonding of soil particles, creating a more unified soil texture. Increasing the length of polypropylene fibers from 6mm to 12 mm also increased the CBR. Addition of 1%, 2%, and 3% nano-silica increased the CBR value by 2.2, 3.3, and 4.2 times, respectively. The highest load-bearing and shear strength was observed with the use of 1% polypropylene fibers and 3% nano-silica. The shear strength test revealed that polypropylene fibers did not change the soil cohesion, but increased the angle of internal friction, while nano-silica improved the soil cohesion, but did not affect the internal friction angle. The combination of these two materials significantly increased the shear strength of the studied soil.

* Corresponding author.

E-mail address: malakooti@pgu.ac.ir

How to cite this article: Malakouti Oloun Abadi, M. , Salehi, K. , Fazeli, A. , Golchin, B. and Meshkabadi, R. (2024). Experimental Study of the Effect of Polypropylene Fiber and Nano-silica on the Physical and Mechanical Properties of Silty Sand Soil. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 10(3), 67-88.
<https://doi.org/10.22075/jtie.2024.35895.1699>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس بر پارامترهای فیزیکی و مکانیکی خاک ماسه‌ای لای دار

محمود ملکوتی علون آبادی^{۱*}، خسرو صالحی^۲، عبدالرضا فاضلی^۱، بابک گلچین^۲، رامین مشک آبادی^۴

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

^۲ کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

^۳ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۴ دانشیار، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

چکیده

در این تحقیق، اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس بر ویژگی های مکانیکی خاک ماسه ای لای دار، نظیر ضریب باربری کالیفرنیا (CBR) و مقاومت برشی، بررسی شد. بدین منظور، نمونه های مختلف آزمایشگاهی با ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس در حضور الیاف پلی پروپیلن به طول های ۶ و ۱۲ میلی متر تهیه شدند. الیاف با مقادیر وزنی ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد با خاک مخلوط گردیدند. از طرفی، ویژگی های میکروسکوپی خاک با استفاده از SEM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن الیاف پلی پروپیلن موجب افزایش معنادار در مقدار CBR نمونه ها می شود. استفاده از الیاف به مقدار یک درصد، قفل و بست ذرات خاک را در بین الیاف افزایش داده و بافت یکپارچه ای از خاک ایجاد می کند. از طرفی، تغییر طول الیاف پلی پروپیلن از ۶ به ۱۲ میلی متر موجب افزایش مقدار ضریب باربری کالیفرنیا می شود. نانوسیلیس با مقدار ۱، ۲ و ۳ درصد، نسبت باربری کالیفرنیا نمونه ها را به ترتیب ۲/۲، ۳/۳ و ۴/۲ برابر افزایش می دهد. بیشترین نسبت باربری و مقاومت برشی مربوط به استفاده از ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن با ۳ درصد نانوسیلیس است. آزمایش مقاومت برشی نشان داد که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به ازای درصدهای مختلف اختلاط، تغییر می یابند. الیاف پلی پروپیلن، چسبندگی خاک را تغییر ندادند، ولی توانستند زاویه اصطکاک داخلی را افزایش دهند. در نقطه مقابل، نانوسیلیس، چسبندگی خاک را بهبود داد، لیکن نتوانست زاویه اصطکاک داخلی خاک را تغییر دهد. ترکیب این دو ماده، مقاومت برشی خاک مورد مطالعه را به صورت قابل توجهی افزایش داد.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

واژه های کلیدی:

ماسه لای دار؛

نانوسیلیس؛

الیاف پلی پروپیلن؛

نسبت باربری کالیفرنیا؛

مقاومت برشی.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: malakooti@pgu.ac.ir

۱. مقدمه

خاک ماسه‌ای یکی از خاک‌هایی است که به وفور در طبیعت، بخصوص در مناطق ساحلی، یافت می‌شود. عموماً، بستر خاکی در مجاورت محیط‌های آبی مانند سواحل رودخانه‌ها و دریاها به دلیل شرایط رطوبتی از نوع خاک‌های سست و ناپایدار می‌باشد. تثبیت، مسلح کردن و تقویت خاک یک تکنیک مؤثر و قابل اطمینان در مهندسی ژئوتکنیک برای پایداری شیب‌ها و افزایش ظرفیت باربری خاک‌ها است. یکی از این روش‌ها، استفاده از الیاف برای مسلح کردن خاک است. انواع مختلفی از الیاف مصنوعی نظیر الیاف کربن، الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن در دسترس می‌باشند. چنگیزی و حداد (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) اثر الیاف پلی استر بازیافت شده را با درصد‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ بر مقاومت برشی و نسبت باربری کالیفرنای خاک‌های با حد خمیری کم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد وزنی الیاف، مقاومت برشی خاک افزایش پیدا می‌کند. گول و میر (۲۰۲۳) از الیاف شیشه‌ای و پودر کوره سیمان برای تثبیت خاک بستر راه استفاده نمودند. بررسی ایشان نشان داد که استفاده از این ترکیب، ضخامت روسازی راه را ۴۴ درصد کاهش می‌دهد. ال‌مجید و همکاران (۲۰۲۳) از الیاف طبیعی در طول و مقدار مختلف برای کنترل تورم خاک‌های تورم‌پذیر استفاده نمودند. نتایج آزمایشگاهی، اثر مثبت استفاده از این الیاف را نشان داد. فارغیان و همکاران (۲۰۲۳) از الیاف لاستیک بازیافتی برای مسلح کردن خاک استفاده نمودند. نتایج نشان داد که این الیاف، مقاومت برشی و کششی خاک را بهبود می‌دهند.

یکی از روش‌های دیگر در بهبود خصوصیات خاک، استفاده از مواد افزودنی نانو است. پژوهش‌های مختلفی در زمینه استفاده از افزودنی‌های نانو در خاک صورت گرفته است. مجید و طاها (۲۰۱۲) اثر افزودن ۰/۵ تا ۱ درصد از نانواکسید منیزیم، نانومس و نانورس را بر ویژگی‌های تراکمی، مقاومت فشاری و حد روانی

نمونه‌های خاک رس نرم در مالزی بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت فشاری و تراکم خاک با افزایش هر یک از این نانومواد افزایش یافته و شاخص پلاستیکی کاهش می‌یابد. کوی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تثبیت خاک با سیمان و نانوکربنات کلسیم با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و روش‌های XRD و SEM پرداختند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که نانوکربنات کلسیم باعث کاهش سرعت خوردگی و افزایش میزان تراکم می‌شود. کلهر و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثر تثبیت‌کننده نانوپلیمر بر خاک رس دارای ماسه سیلیسی پرداختند. ترکیب یک درصد نانوپلیمر، ۹ درصد ماسه سیلیسی و ۹۰ درصد خاک رس، مقدار CBR را ۶ برابر و مقدار مقاومت برشی خاک را ۸ برابر افزایش داد. طاهرخانی و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی اثر تثبیت‌کننده نانوپلیمری در ساخت لایه‌های روسازی راه در سه خاک مختلف شامل: الف) ۱۰۰ درصد رس، ب) ۸۰ درصد ماسه و ۲۰ درصد رس و ج) ۵۰ درصد شن، ۲۰ درصد ماسه و ۳۰ درصد رس پرداختند. نتایج نشان داد که این افزودنی تأثیر مشخصی بر رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک ندارد، ولی باعث افزایش حد خمیری و کاهش حد روانی و دامنه خمیری می‌شود. هوانگ (۲۰۱۹) اثر ۱۳ درصد سیمان و ۱۵ درصد نانواکسید منیزیم را در خصوص پایداری خاک مورد مطالعه قرار داد. آزمایش SEM نشان داد که نانواکسید منیزیم ریزساختار خاک را بهبود می‌بخشد، ولی استفاده بیش از حد از آن باعث ترک در داخل خاک می‌شود.

گروهی از پژوهشگران، اثر نانوسیلیس را در خاک بررسی نمودند. بهمنی و همکاران (۲۰۱۴) در یک مطالعه تجربی، تأثیر نانو ذرات سیلیس را بر تراکم، هدایت هیدرولیکی و مقاومت فشاری خاک هوازده در حضور سیمان بررسی نمودند. در این تحقیق، اضافه کردن ۴ درصد از این افزودنی به خاک به همراه سیمان، مقاومت

فشاری را تا ۸۰ درصد افزایش داد. نتایج آزمون‌های SEM، FTIR و XRD نشان داد که نانوسیلیس با واکنش پوزولانی تبدیل به ژل سیلیکات کلسیم هیدریت شده و چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد. موسوی و کرم‌وند (۲۰۱۷)، اثر جایگزینی نانوسیلیس را بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های رسی با سیمان مورد مطالعه قرار دادند. با جایگزینی ۱ تا ۲ درصد نانوسیلیس با قطر ۱۵ تا ۸۰ نانومتر، مقاومت خاک پس از ۱۴ روز افزایش یافت. منگ و همکاران (۲۰۱۷) تأثیر خاک ماسه‌ای حاوی ۶ درصد سیمان را با نانوسیلیس با مقادیر صفر، ۴، ۸ و ۱۲ درصد از وزن خاک مورد بررسی قرار دادند. پس از ۹۰ روز از عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمایش‌های SEM و XRD مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوسیلیس، مقاومت برشی خاک ماسه‌ای را بهبود می‌بخشد. چوب‌بستی و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانوسیلیس بر نسبت باربری کالیفرنیای خاک ماسه‌ای رس‌دار پرداختند. در این پژوهش، مقاومت CBR نمونه‌های خاکی تثبیت نشده و تثبیت شده در زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه خاک ماسه‌ای دارای ۳۰ درصد رس، علاوه بر ۴/۵ درصد نانوسیلیس، با ۲/۲۵ درصد نانوسیلیس هم مقدار CBR قابل قبولی دارد. قربانی و همکاران (۲۰۱۹) اثر نانوسیلیس را بر مقاومت مکانیکی و تراکم‌پذیری خاک رس تثبیت شده بررسی نمودند. نتایج نشان داد که نانوسیلیس به طور قابل توجهی مقاومت تراکم‌پذیری را کاهش می‌دهد. همچنین، با افزایش مقدار نانوماده تا ۲ درصد، CBR خاک ۶ درصد افزایش می‌یابد.

ترکیب الیاف با نانومواد یک روش نوین در بهبود رفتار خاک‌ها می‌باشد. چنگیزی و حداد (۲۰۱۵) اثر توأم نانوسیلیس به مقدار ۰/۵، ۰/۷ و یک درصد و الیاف پلی‌استر بازیافت شده با مقادیر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ را بر مقاومت برشی، مقاومت فشاری و حد روانی خاک‌ها

مورد مطالعه قرار دادند. در کار تحقیقی ایشان، افزایش نانوسیلیس تا ۰/۷ درصد موجب افزایش مقاومت خاک شد. از طرفی، افزایش الیاف منجر به افزایش مقاومت گردید. نتایج نشان داد که ترکیب یک درصد نانوسیلیس با ۰/۵ درصد الیاف، بیشترین افزایش مقاومتی را ایجاد می‌نماید. یائو و همکاران (۲۰۱۹) اثر الیاف کربن و افزودنی نانوسیلیس را بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، ریزساختاری (خصوصیات بافت) و مقاومت برشی خاک سیلتی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش آنها نشان داد که مقاومت برشی در مقایسه با نمونه‌های بدون الیاف و نانوسیلیس بهبود یافته است. ترکیب ۲ درصد الیاف کربن با ۳ درصد نانوسیلیس، مقاومت برشی خاک را ۱۲۸ درصد افزایش داد. محسنی و همکاران (۲۰۱۹) از ترکیب ۰/۴، ۰/۸ و ۰/۲ درصد نانوکربنات کلسیم و ۰/۴ و ۰/۶ درصد از الیاف فرش استفاده کردند. ایشان نشان دادند که ترکیب الیاف و نانوماده رفتار خاک را بهبود می‌دهد. خان (۲۰۱۹) اثر الیاف پروپیلن، نانو آلومینا و خاکستر پوسته برنج را بررسی نمود. وی از هیدروکسید سدیم (SH) و سیلیکات سدیم (SS) با نسبت $SS/SH=2.5$ به عنوان محلول قلیایی در خاک استفاده کرد. نانوالومینا به مقدار ۲۰ درصد از حجم کل به عنوان اتصال‌دهنده استفاده شد. الیاف پروپیلن به مقدار صفر، ۰/۵ و ۱ درصد و خاکستر پوسته برنج با نسبت جایگزینی صفر، ۱۰ و ۲۰ درصد از حجم استفاده شد. با انجام آزمایش‌ها، مقاومت فشاری و تراکم خاک افزایش، ولی نفوذپذیری کاهش یافت.

در تحقیق حاضر، امکان بهبود توأم ضریب اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای لای‌دار با الیاف پلی‌پروپیلن و چسبندگی آن با نانوسیلیس به عنوان یک روش نوآورانه بررسی می‌شود. بدین منظور، مشخصات فیزیکی این نمونه‌ها بررسی می‌شود. آزمایش مقاومت برشی و CBR انجام می‌شود و ویژگی‌های میکروسکوپی این خاک با استفاده از آزمایش FESEM بررسی می‌گردد.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. مشخصات مصالح مصرفی

در این تحقیق، از خاک ماسه‌ای لای دار واقع در پارک علم و فناوری بوشهر استفاده شد. نمونه خاک انتقال یافته به آزمایشگاه تحت آزمایش دانه بندی بر اساس استاندارد ASTM D 422-87 قرار گرفت. برای بررسی بخش ریزدانه خاک، آزمایش هیدرومتری بر اساس استاندارد ASTM D 421-58 انجام گرفت. با توجه به نتایج آزمایش‌ها، منحنی دانه بندی برای نمونه خاک در شکل ۱ نشان داده شده است. از روی مقادیر به دست آمده برای نمونه خاک و بر اساس سیستم طبقه بندی متحد، این خاک در طبقه ماسه لای دار قرار گرفت. در ادامه، آزمایش تعیین رطوبت بهینه بر اساس استاندارد ASTM D 698-78 انجام گرفت. آزمایش تراکم در این پژوهش به روش اصلاح شده و با قالب کوچک انجام شد. همچنین، رطوبت خاک نیز اندازه گیری شد. سپس، رطوبت مجددی به خاک اضافه گردید و آزمایش تکرار شد. مطابق شکل ۲، حداکثر وزن مخصوص برابر ۱/۸ گرم بر سانتی متر مکعب در رطوبت بهینه ۱۱ درصد می باشد.

الیاف مصرفی در این تحقیق از نوع پلی پروپیلن با طول ۶ میلی متر و ۱۲ میلی متر و مقاومت کششی ۴۰۰ مگاپاسکال بوده که از شرکت میسون خریداری شده است (شکل ۳). خواص این ماده شبیه به پلی اتیلن با چگالی زیاد است. صرف نظر از پلاستیک‌های اسفنجی، این پلیمر سبک ترین ترموپلاستیکی است که به صورت تجاری در دسترس است. تلاش شد با دقت در نحوه اختلاط الیاف و خاک از گلوله شدن آن‌ها جلوگیری شود. این امر موجب توزیع یکنواخت الیاف در نمونه‌های آزمایشگاهی شد. مشخصات الیاف در جدول ۱ ذکر شده است. در این تحقیق، از نانوسیلیس به عنوان افزونی استفاده شد. مسئله بسیار مهم در استفاده از نانوذرات در توده خاک، پراکندگی مناسب نانوذرات می باشد.

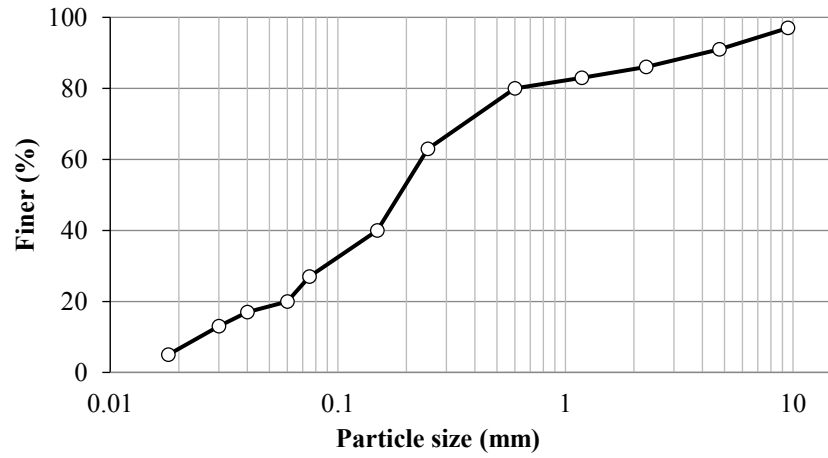
پراکنده شدن درست و یکنواخت نانوذرات در خاک

عاملی است که تمامی نتایج را تحت تأثیر قرار می دهد. به طوری که اگر پراکنده شدن نانوذرات در خاک به درستی انجام نگیرد، علاوه بر آن که تأثیر مثبتی بر خصوصیات خاک ندارد، بلکه باعث تأثیر منفی نیز بر خصوصیات خاک خواهد شد. هنگامی که نیروی جاذبه بین ذرات بیشتر از نیروی دافعه آن‌ها باشد، ذرات به هم چسبیده و سبب انباشتگی می شوند. برای جلوگیری از انباشتگی نانوذرات در توده خاک، استفاده از روش‌های مکانیکی برای پراکندن نانوذرات در خاک استفاده می شود (کدیور و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به بررسی‌های انجام شده و امکانات موجود در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه خلیج فارس، جهت پراکنده کردن نانوسیلیس در خاک، از دستگاه همزن آزمایش هیدرومتری استفاده شد. ابتدا نانوذرات در آب مقطر پراکنده شدند. سپس، نمونه‌های آب مقطر حاوی نانوذرات به مدت ۱۰ دقیقه در زیر دستگاه همزن قرار گرفتند تا اینکه نانوذرات به طور مناسب در آب مقطر پراکنده شوند. نمونه‌ها پس از تهیه، در مدت ۲۴ ساعت مورد آزمایش قرار گرفتند.

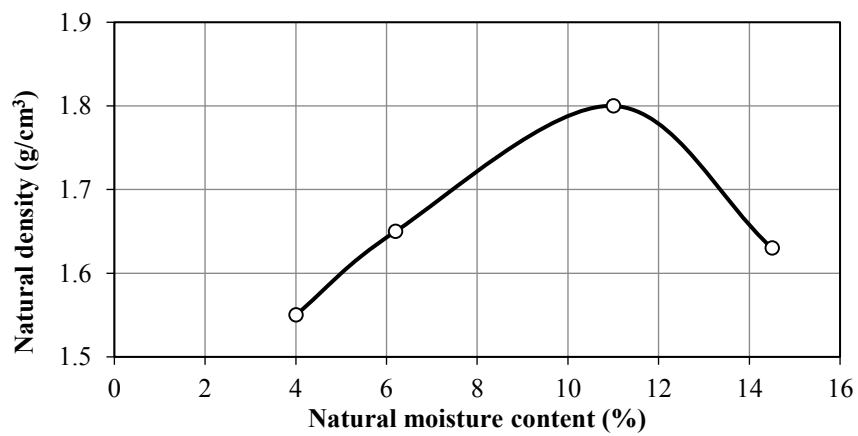
۲-۲. آزمایش‌های انجام شده

۱-۲-۲. آزمایش برش مستقیم و CBR

آزمایش برش مستقیم بر اساس استاندارد ASTM D3080-90 انجام گرفت. آزمایش برش تحت سه سربار ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلو پاسکال انجام شد. قرائت نیرو در هر ۰/۱ میلی متر جابجایی تا ۲ میلی متر جابجایی و از آن پس در هر ۰/۲ میلی متر جابجایی بود. سرعت بارگذاری ۰/۵ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. در نهایت، نمودار تنش کرنش رسم گردید و بر اساس آن چسبندگی (C) و زاویه برش (ϕ) محاسبه گردید. همچنین آزمایش CBR روی نمونه‌ها صورت گرفت.



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک



شکل ۲. نمودار درصد رطوبت بهینه خاک ماسه‌ای لای دار



شکل ۳. الیاف پلی پروپیلن

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

مشخصات ظاهری	توضیحات
رنگ ظاهری	سفید
نوع الیاف	منفرد
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱
طول الیاف (mm)	۶ و ۱۲
قطر (mm)	۲۳
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰
هدایت هیدرولیکی	کم
هدایت حرارتی	کم
مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها	زیاد

۲-۲-۲. آزمایش FESEM

ابتدا شش نمونه خاک که به چهار گروه زیر تقسیم می‌شوند، تهیه گردید:

۱. خاک ماسه‌ای لای‌دار به‌عنوان نمونه شاهد

۲. خاک ماسه‌ای لای‌دار با الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر، با درصدهای وزنی ۰/۵ و ۱

۳. خاک ماسه‌ای لای‌دار با الیاف پلی پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر با درصدهای وزنی ۰/۵ و ۱، بعد از آزمایش برش مستقیم

۴. خاک ماسه‌ای با ۳ درصد وزنی نانوسیلیس بعد از آزمایش برش مستقیم برای تهیه نمونه‌های دارای الیاف و نانوذرات، ابتدا محلول الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس در مقدار معینی آب حل گردید. سپس، نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن به‌طور مستقیم به خاک اضافه شد. سپس، با استفاده از دستگاه همزن برقی، مخلوط مواد به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شد تا یکنواختی و پراکندگی الیاف و نانو در خاک به سطح قابل قبول برسد. سپس، نمونه‌ها در دمای ۱۱۰ درجه در آون به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند تا خشک گردند. با خرد کردن و هم‌زدن نمونه‌های خشک‌شده با استفاده از میله و کاردک، ۱۸ درصد وزنی آب یونیزه شده جهت مخلوط کردن هر یک از نمونه‌ها اضافه شد. سپس، نمونه‌ها در ظرفی به قطر ۶۰ میلی‌متر

و ارتفاع ۲۰ میلی‌متر به‌صورت لایه‌ای متراکم گردیدند و به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. سپس، نمونه‌ها جهت آزمایش بسته‌بندی شدند و به محل آزمایش ارسال شدند (شکل ۴). در جدول ۲، مشخصات نمونه‌ها آورده شده است. جدول ۳، برنامه آزمایش‌های مکانیکی را نشان می‌دهد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. نتایج تحلیل آزمایش FESEM

شکل ۵، تصاویر FESEM مربوط به نمونه‌های خاک با درصدهای مختلف نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۵-الف مشخص است، در خاک بدون نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن، حفراتی مشاهده می‌گردد و ساختار خاک غیرفشرده است. در درصدهای کم الیاف (شکل ۵-ب)، فاصله الیاف از یکدیگر زیاد بوده و توده یکپارچه خاک به وجود نمی‌آید. در حالی که با افزایش درصد وزنی الیاف (شکل ۵-ج)، در اثر اختلاط و اصطکاک ایجاد شده بین ذرات خاک و الیاف، ساختار یکپارچه‌تری بین خاک و الیاف تشکیل می‌شود و با ایجاد قفل و بست دانه‌های خاک در بین الیاف، مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. از سوی

آزمایش می‌توان نمودار تنش برشی برحسب جابجایی و نمودار تنش برشی برحسب تنش قائم را برای انواع مختلف خاک‌ها به دست آورد. در شکل ۶- الف، تغییرات تنش برشی برحسب جابجایی برای خاک اولیه (خاک بدون الیاف و نانوسیلیس) در تنش‌های قائم ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوپاسکال نشان داده شده است. بر اساس این نمودار، تغییرات تنش برشی بین ۲۴ تا ۷۶ کیلوپاسکال در سربارهای مختلف است. در شکل ۶- ب نمودار برازش یافته برای این خاک به منظور تعیین مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمایش داده شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، چسبندگی خاک مورد استفاده، تقریباً صفر $C=0.03\text{kPa}$ و زاویه اصطکاک داخلی $\tan^{-1} 0.52 = 27.4$ می‌باشد.

دیگر، با اضافه کردن نانوسیلیس و الیاف (شکل ۵- د)، یک شبکه به هم پیوسته و یکپارچه‌تری بین ذرات خاک ایجاد می‌شود. بنابراین، می‌توان گفت برای استفاده از پتانسیل کامل نانوسیلیس و الیاف نیاز است که این مواد به‌خوبی در خاک پراکنده گردند. با افزایش الیاف و افزودن نانوسیلیس، سطح ویژه خاک افزایش می‌یابد و منافذ به‌خوبی پر می‌شوند. این امر می‌تواند منجر به چسبندگی بهتر بین ذرات خاک گردد.

پیش‌بینی می‌شود که استفاده از نانوسیلیس بتواند مقاومت برشی خاک را به‌طور مؤثرتری بهبود بخشد.

۲-۳. نتایج آزمایش برش مستقیم

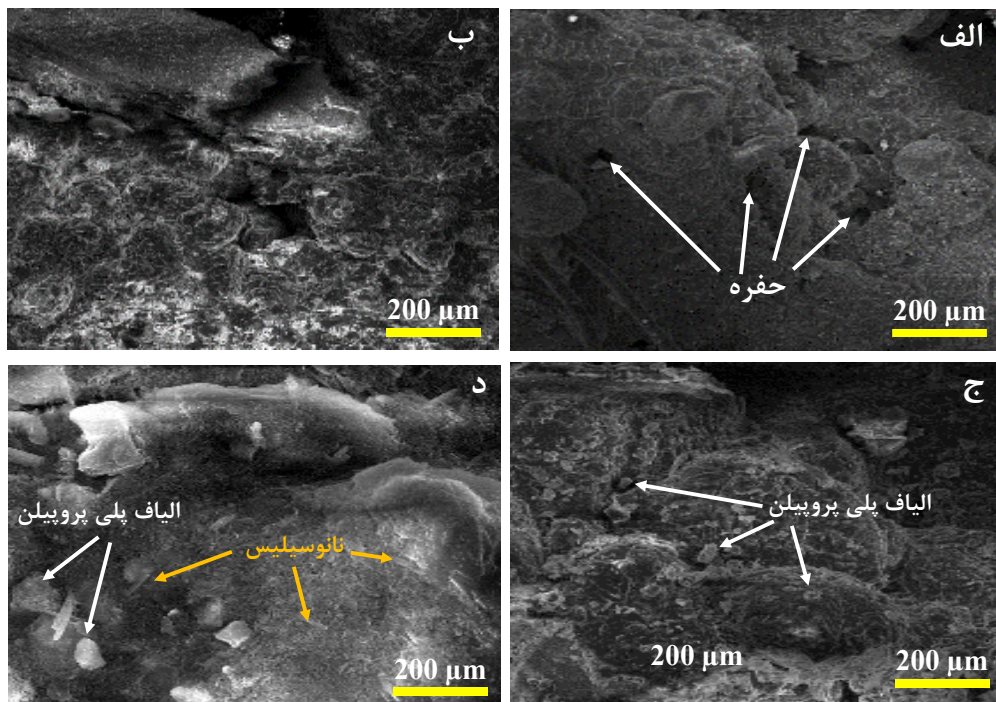
آزمایش برش مستقیم به‌منظور بررسی مقاومت برشی خاک و تعیین پارامترهای مرتبط انجام می‌شود. از این



شکل ۴. تهیه نمونه‌ها جهت عکس‌برداری

جدول ۲. مشخصات نمونه‌ها برای عکس‌برداری

نام نمونه	درصد الیاف	درصد نانوسیلیس
نمونه شاهد	۰	۰
خاک با الیاف ۱۲ mm	۰/۱، ۰/۵ و ۱	۰
خاک با الیاف ۱۲ mm	۰/۵ و ۱ بعد از آزمایش برش مستقیم	۰
خاک با نانوسیلیس	۰	۳ درصد بعد از آزمایش برش مستقیم



شکل ۵. تصاویر FESEM مربوط به افزودن درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس: الف- نمونه شاهد (بدون الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس)، ب- ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، ج- ۱ درصد الیاف پلی پروپیلن و د- ۳ درصد نانوسیلیس

جدول ۳. برنامه آزمایش‌های مکانیکی روی خاک ماسه‌ای لای دار

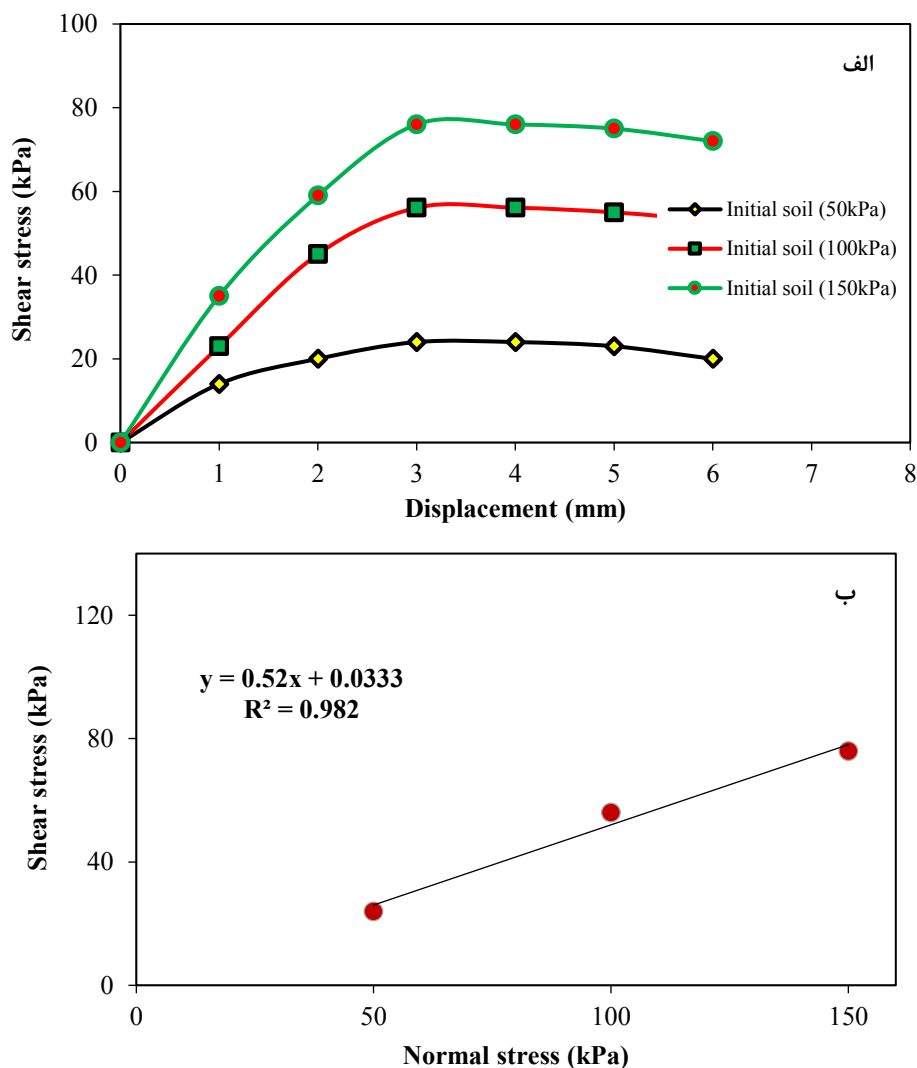
مقدار مواد افزودنی به کار رفته	مواد افزودنی	برنامه آزمایشگاهی
صفر درصد	-	نمونه شاهد
۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف به طول ۶ و ۱۲ میلی متر	فقط الیاف	گروه اول
۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس	فقط نانوسیلیس	گروه دوم
۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس به همراه ۱ درصد الیاف ۱۲ میلی متری	ترکیب الیاف و نانوسیلیس	گروه سوم

در شکل ۷، نمودار تنش برشی برحسب مقدار جابجایی به ازای افزودن ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد از الیاف پلی پروپیلن در طول‌های ۶ و ۱۲ میلی متر نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات این شکل، نمودارهای شکل ۸ برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزودن ۰/۱ درصد الیاف به طول ۶ میلی متر به خاک اولیه، مقدار مقاومت برشی خاک به میزان $\frac{24}{24-32} \times 100 = 43\%$ افزایش پیدا کرده است. با توجه به نمودار برآزش یافته در شکل ۸، زاویه اصطکاک داخلی خاک

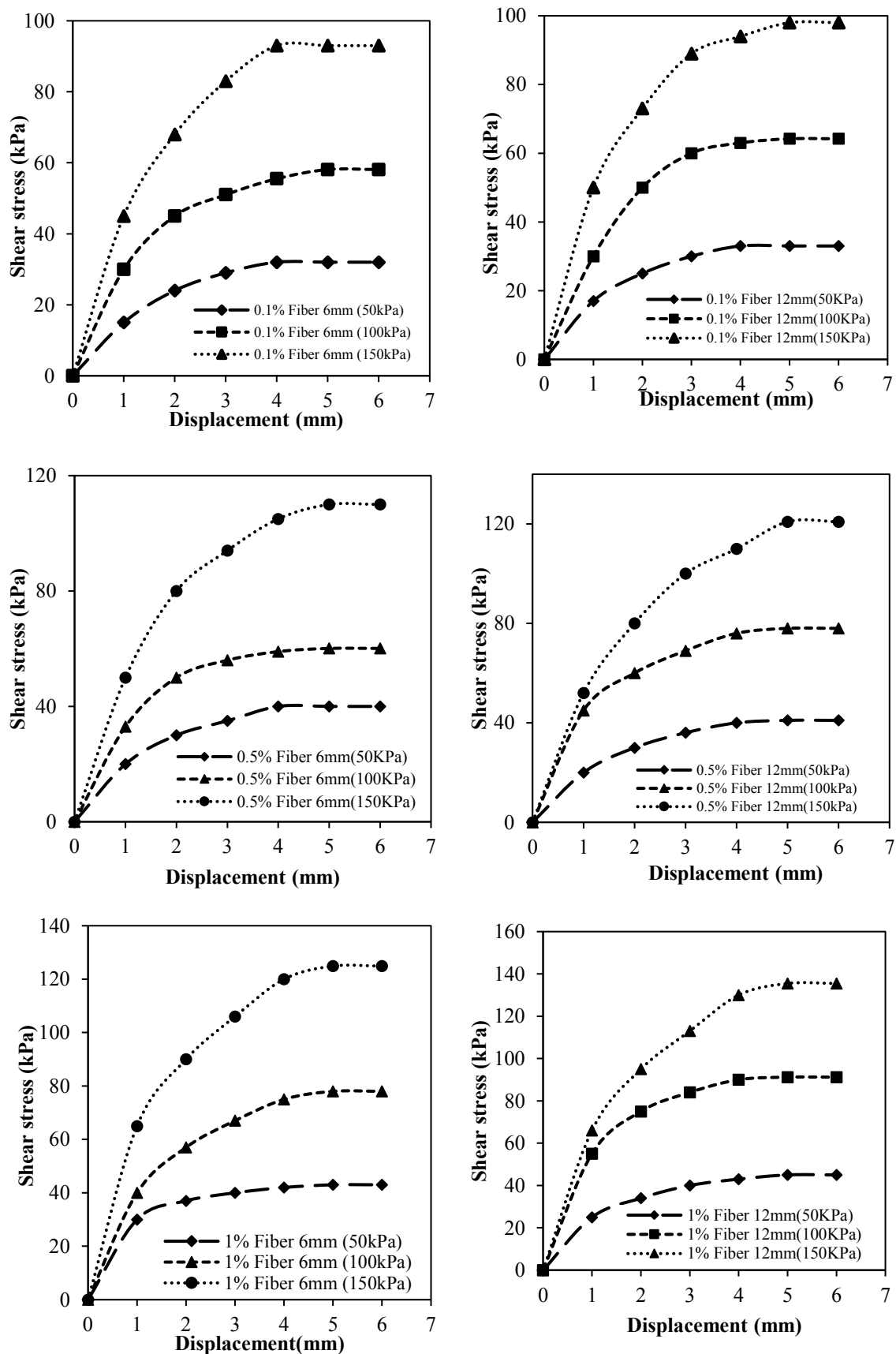
در شکل ۷، نمودار تنش برشی برحسب مقدار جابجایی به ازای افزودن ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد از الیاف پلی پروپیلن در طول‌های ۶ و ۱۲ میلی متر نشان داده شده است. با استفاده از اطلاعات این شکل، نمودارهای شکل ۸ برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزودن ۰/۱ درصد الیاف به طول ۶ میلی متر به خاک اولیه، مقدار مقاومت برشی خاک به میزان $\frac{24}{24-32} \times 100 = 43\%$ افزایش پیدا کرده است. با توجه به نمودار برآزش یافته در شکل ۸، زاویه اصطکاک داخلی خاک

الیاف ۱۲ میلی‌متری، مقاومت برشی خاک مسلح شده ۸۷ درصد افزایش پیدا کرد، زاویه اصطکاک داخلی خاک ۵۳ درصد زیادتر شد، ولی تأثیری بر روند بهبود چسبندگی خاک ماسه‌ای مشاهده نگردید. شکل ۹، خلاصه‌ای از اثر تغییرات مقدار و طول الیاف پلی‌پروپیلن را بر مقدار تغییر زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای لای‌دار نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش درصد وزنی الیاف، زاویه اصطکاک داخلی افزایش پیدا می‌کند (از ۲۷/۵ درجه به ۴۲ درجه افزایش پیدا کرد)، لیکن تغییر طول الیاف، تأثیر بسیار قابل توجهی در مقدار زاویه اصطکاک داخلی ندارد.

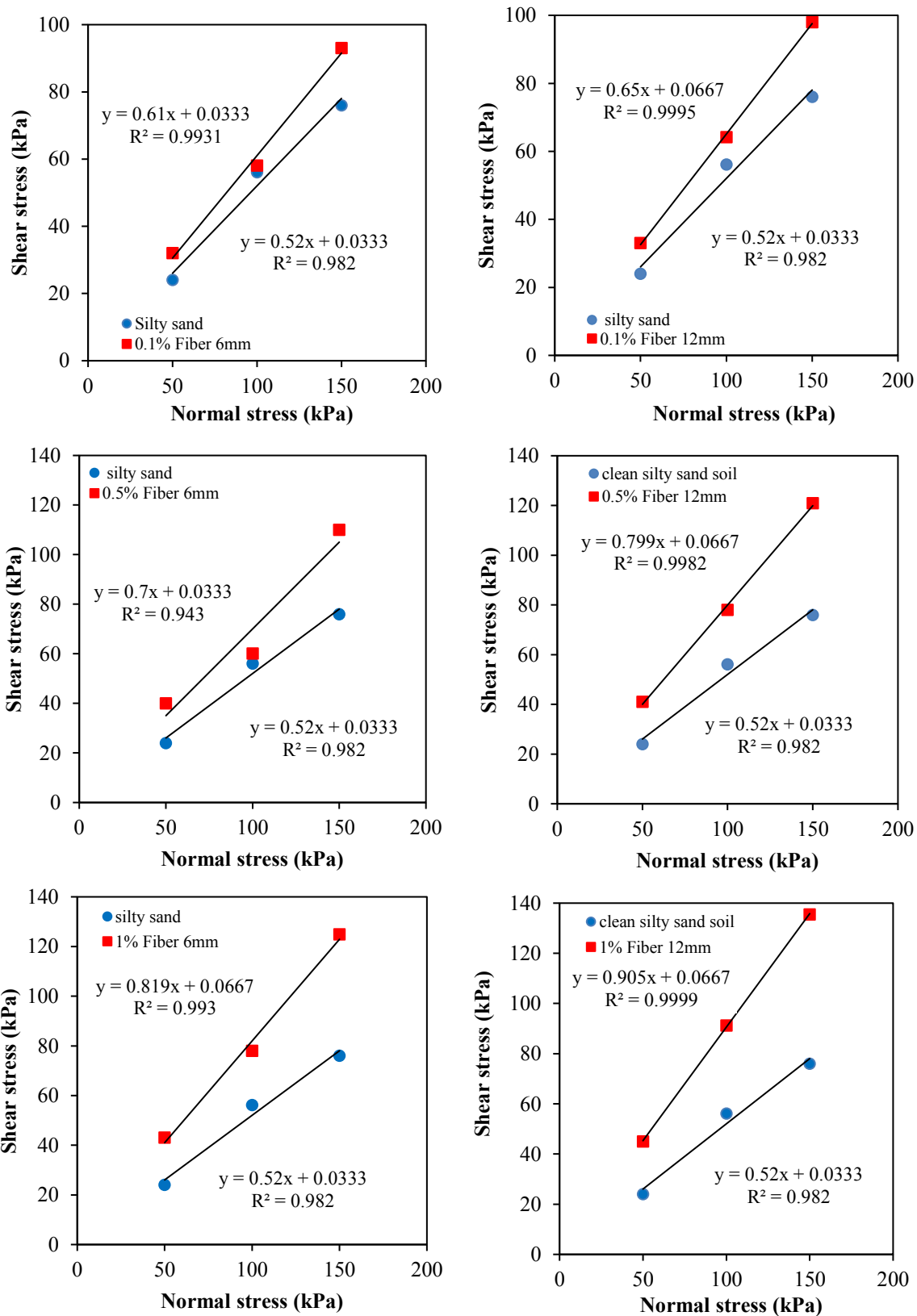
بر روند بهبود چسبندگی خاک ماسه‌ای نداشت. در گام بعدی، طول الیاف به ۱۲ میلی‌متر افزایش داده شد. بررسی شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که با افزودن ۰/۱ درصد وزنی الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر، مقاومت برشی خاک مسلح شده ۳۷ درصد و زاویه اصطکاک داخلی خاک ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌کند؛ ولی تأثیری در روند بهبود چسبندگی خاک ماسه‌ای مشاهده نمی‌شود. با افزودن ۰/۵ درصد الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر، مقاومت برشی خاک مسلح شده ۷۰ درصد و زاویه اصطکاک داخلی خاک ۴۰ درصد افزایش می‌یابد، ولی چسبندگی خاک نزدیک صفر است. مجدداً، با افزودن ۱ درصد وزنی



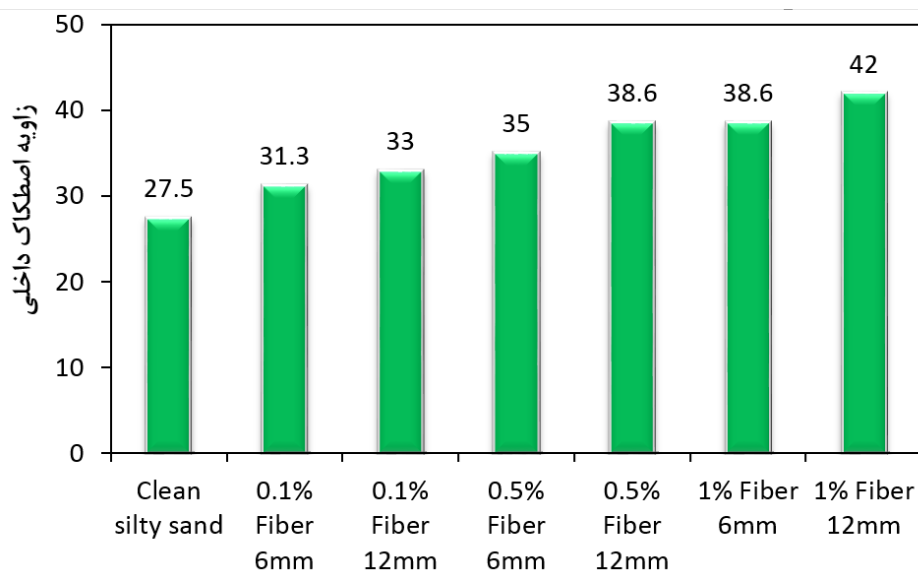
شکل ۶. نمودارهای الف- تنش برشی - جابجایی و ب- برآزش تنش برشی - تنش قائم اولیه خاک



شکل ۷. نمودار تنش برشی بر حسب جابجایی برای مقادیر مختلف وزنی و طولی الیاف پلی پروپیلن



شکل ۸. تنش برشی در مقابل تنش قائم به ازای افزودن مقادیر مختلف وزنی و طولی الیاف پلی پروپیلن



الیاف پلی پروپیلن (درصد)

شکل ۹. مقدار زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای لای دار به ازای تغییر در مقدار و طول الیاف پلی پروپیلن

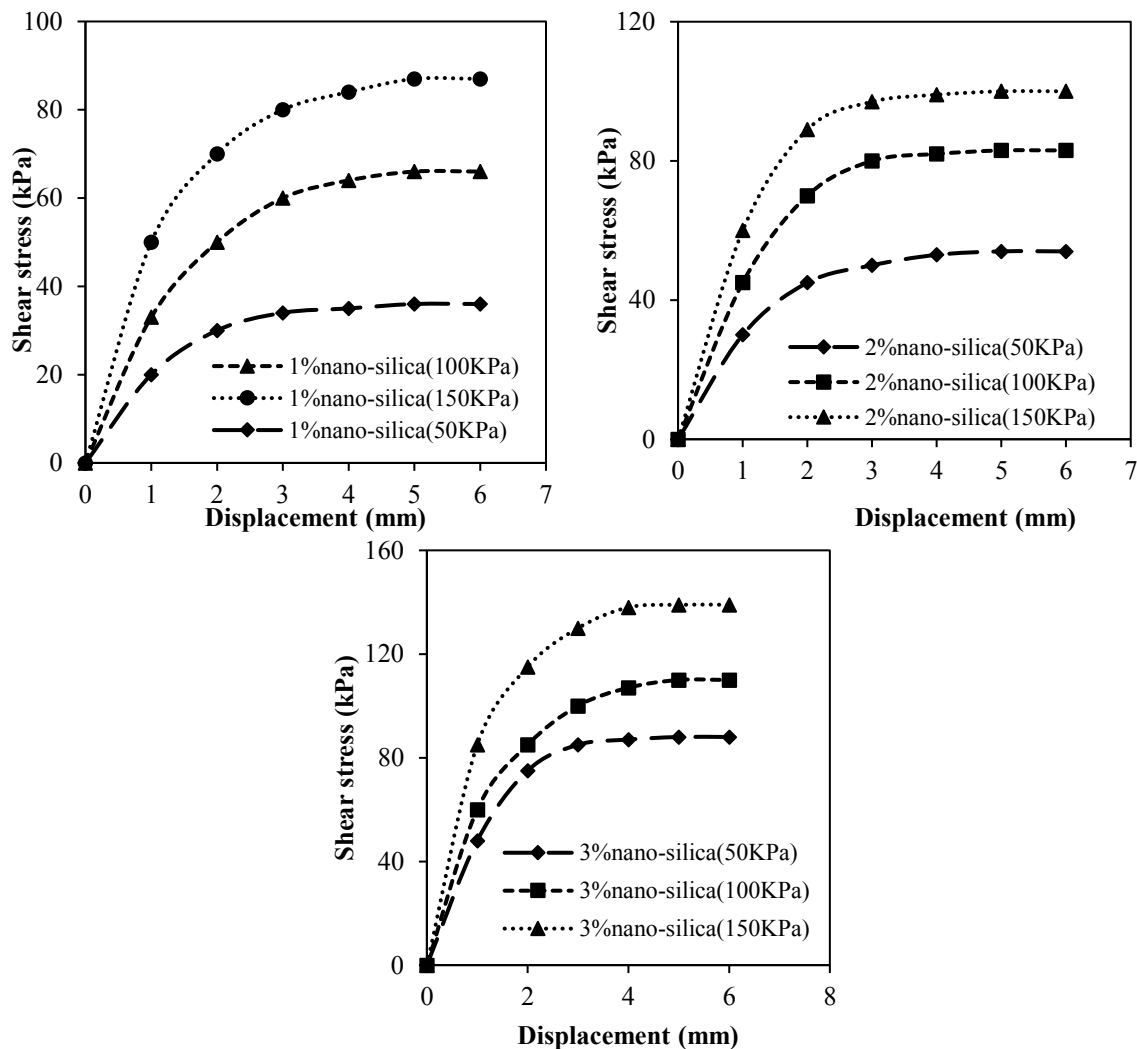
به ۶۱/۳ کیلوپاسکال می‌رسد. شکل ۱۲، اثر تغییرات مقدار نانوسیلیس را بر مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک ماسه‌ای لای دار نشان می‌دهد. مطابق این شکل، زاویه اصطکاک داخلی تغییرات چندانی نداشته، ولی چسبندگی از صفر به ۶۳ کیلوپاسکال افزایش داشته است. این بدان معناست که نانوسیلیس در چسبندگی خاک به طور قابل توجهی مؤثر است.

در گام سوم، تصمیم گرفته شد بهترین ترکیب الیاف، یعنی مقدار ۱ درصد وزنی آن با طول ۱۲ میلی‌متر با مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نانوسیلیس در خاک ترکیب شود تا اثر توأم بهبود زاویه اصطکاک داخلی ناشی از الیاف و بهبود چسبندگی ناشی از نانوسیلیس بررسی گردد. شکل ۱۳، مقدار تغییرات تنش برشی را به ازای تغییر شکل‌های مختلف برای این ترکیب از الیاف و افزودنی نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز نمودار لازم برای سنجش زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی این خاک‌ها را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها، مقدار مقاومت برشی در طرح اختلاط ۳ درصد نانوسیلیس با ۱ درصد الیاف بیشترین درصد افزایش (۳۳۶ درصد) را دارا

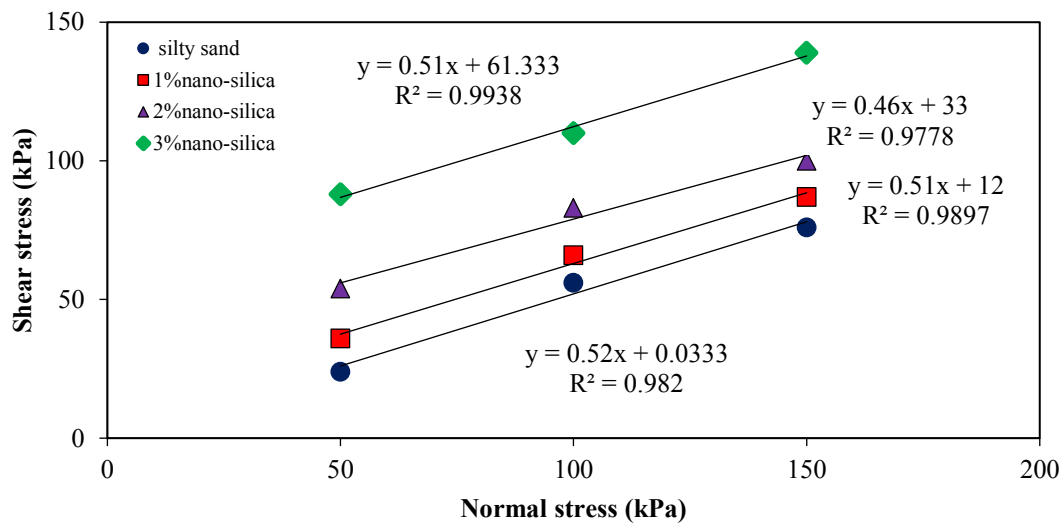
در گام دوم تحقیق، اثر نانوسیلیس بر پارامترهای مقاومتی خاک ماسه‌ای لای دار سنجیده شد. شکل ۱۰، نمودارهای تنش برشی برحسب جابجایی را به ازای درصدهای مختلف نانوسیلیس نشان می‌دهد. شکل ۱۱، نمودار برازش شده به ازای اطلاعات شکل ۱۰ را بر حسب تغییرات تنش برشی در مقابل تنش قائم نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزودن ۱ درصد وزنی نانوسیلیس، مقاومت برشی خاک ۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. موسوی و کرم‌وند (۲۰۱۷) اثر بهبود مقاومت برشی خاک‌ها را در حضور نانوسیلیس مشاهده کردند. با توجه به نمودار برازش شده، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاسته شده، ولی چسبندگی خاک ماسه‌ای به ۱۲ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد. افزودن ۲ درصد نانوسیلیس، مقاومت برشی خاک را ۱۲۵ درصد افزایش می‌دهد، زاویه اصطکاک داخلی خاک را مقداری کم کرده، ولی چسبندگی را به ۳۳ کیلوپاسکال می‌رساند. در نهایت، با افزودن ۳ درصد وزنی نانوسیلیس، مقاومت برشی خاک ۲۲۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. بر اثر این افزایش، زاویه اصطکاک داخلی خاک کاسته شده، ولی چسبندگی خاک

الیاف و نانوسیلیس بر افزایش مقدار مقاومت برشی خاک ماسه‌ای لای‌دار است. در این ترکیب، پارامترهای مقاومتی از جمله چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی دستخوش تغییر می‌شوند. بیشترین تأثیر در ترکیب ۱ درصد از الیاف ۱۲ میلی‌متری و ۳ درصد نانوسیلیس مشاهده می‌گردد.

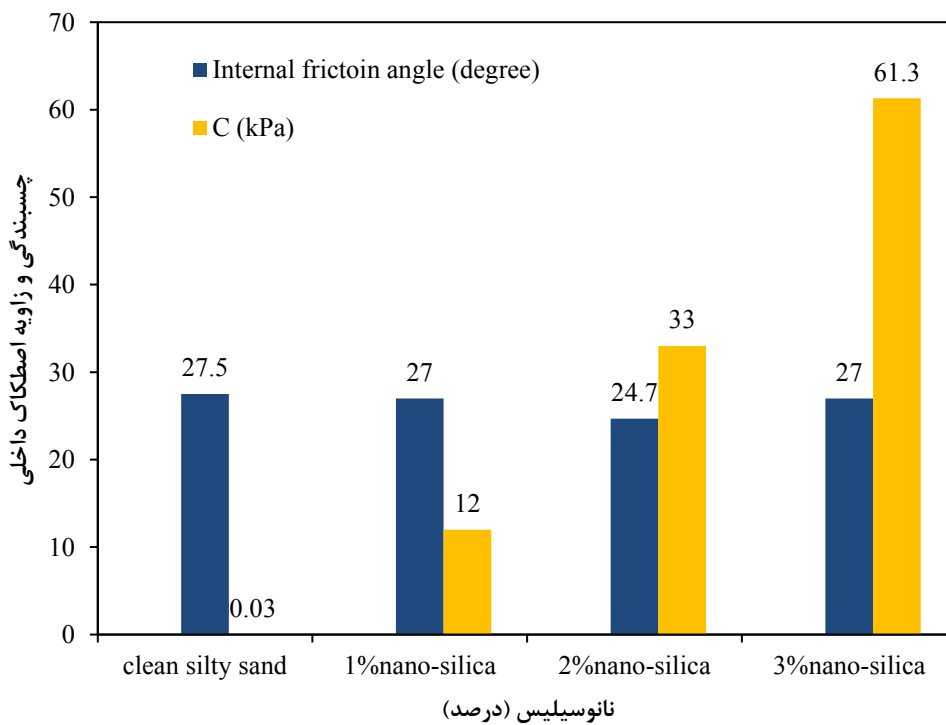
می‌باشد. چنگیزی وحداد (۲۰۱۵) اثر مثبت ترکیب نانوسیلیس با یک الیاف دیگر را گزارش نمودند. جدول ۴، مقادیر درصد تغییر مقاومت برشی را در سه گام فوق‌الذکر برای انواع مختلف ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج آزمایش روی طرح‌های مختلف اختلاط نشان‌دهنده اثر مثبت ترکیب



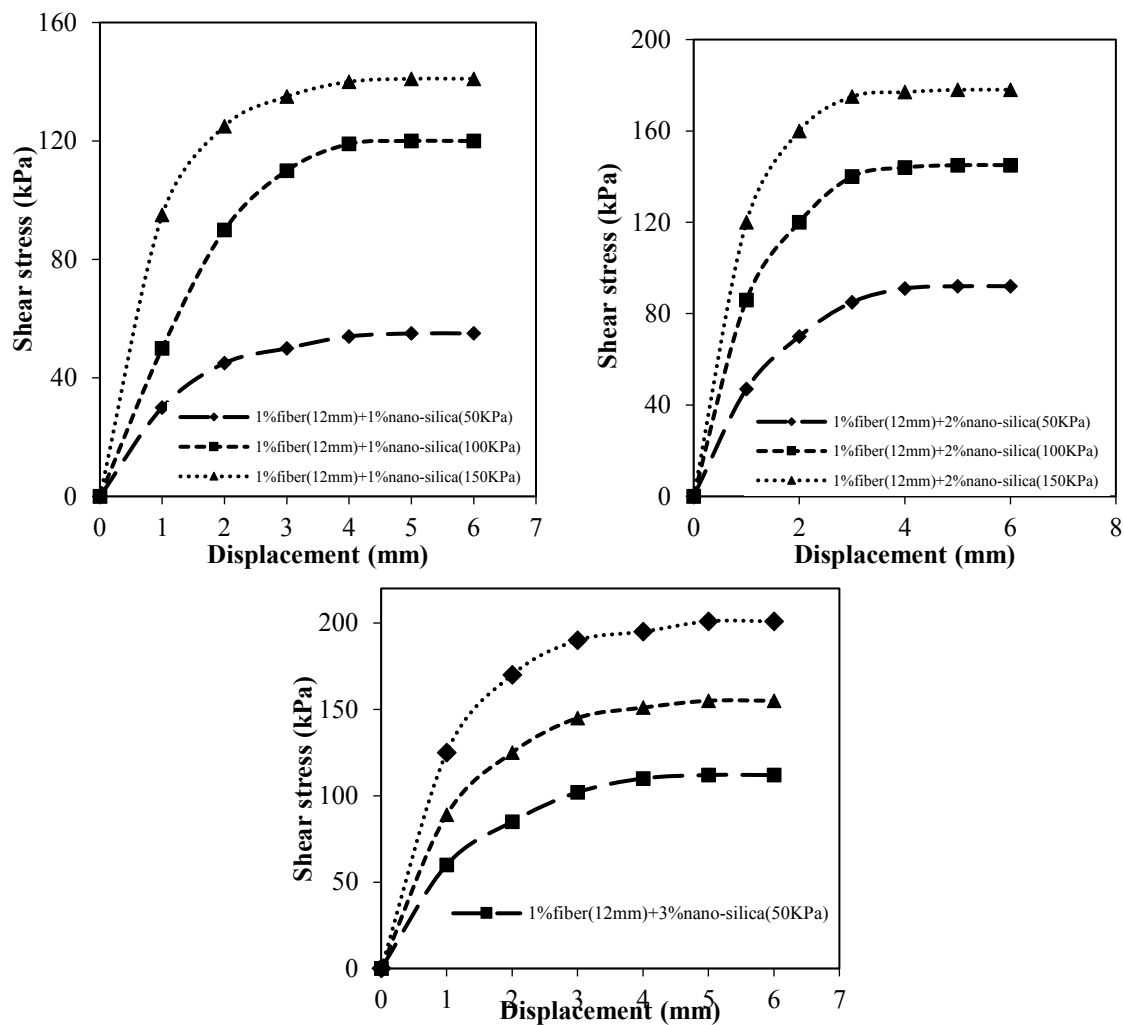
شکل ۱۰. نمودار جابجایی بر حسب تنش برشی با افزودن درصدهای مختلف وزنی نانوسیلیس



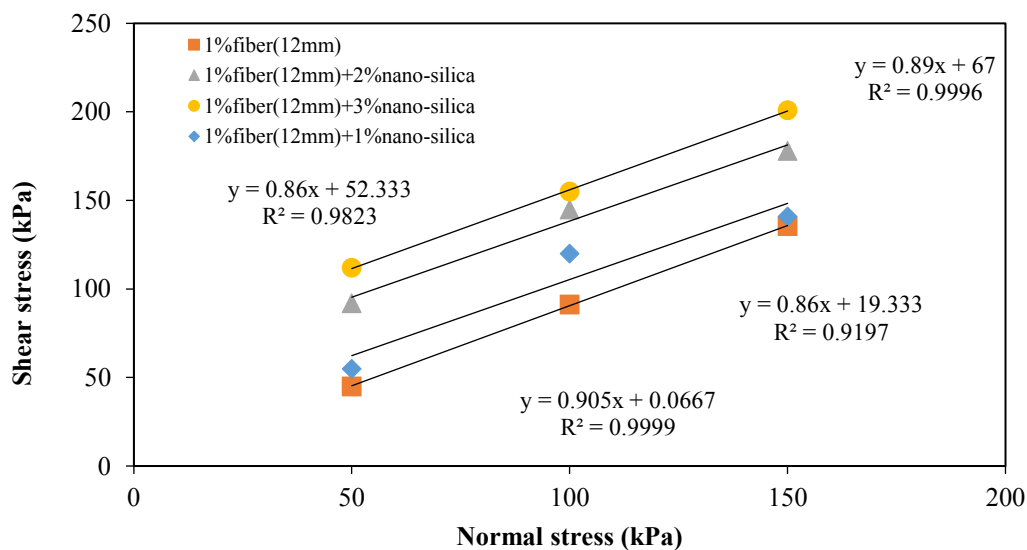
شکل ۱۱. نمودار تنش قائم در مقابل تنش برشی با افزودن درصدهای مختلف وزنی نانوسیلیس



شکل ۱۲. مقدار زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در خاک ماسه‌ای لای‌دار به ازای تغییر مقدار نانوسیلیس



شکل ۱۳. نمودارهای تنش برشی - جابجایی برای الیاف ۱۲ میلی متری به مقدار ۱ درصد با مقادیر مختلف نانوسیلیس



شکل ۱۴. نمودار تنش قائم - تنش برشی برای ۱ درصد الیاف ۱۲ میلی متری با مقادیر مختلف نانوسیلیس

جدول ۴. درصد تغییر مقاومت برشی با توجه به طرح‌های مختلف اختلاط و تنش نرمال

Mix	PF%	تنش نرمال		
		50 kPa	100 kPa	150 kPa
CS	۰	۰	۰	۰
CS+PF(6mm)	۰/۱	۳۳	۳/۵	۲۲
	۰/۵	۶۶	۷	۴۵
	۱	۷۹	۳۹	۶۴
CS+PF(12mm)%	۰/۱	۳۷/۵	۱۴	۲۹
	۰/۵	۷۰	۳۹	۵۸
	۱	۸۷/۵	۶۲/۵	۷۸
CS+NS%	۱	۵۰	۱۷/۵	۱۴
	۲	۱۲۵	۴۸	۳۱/۵
	۳	۲۶۶	۹۶	۸۲
CS+1%PF(12mm)+NS%	۱	۷۹	۱۱۴	۸۵
	۲	۲۸۳	۱۵۸	۱۳۴
	۳	۳۶۶	۱۷۶	۱۶۴

CS: Natural soil; PF: Polypropylene fiber; NS: Nano-SiO₂

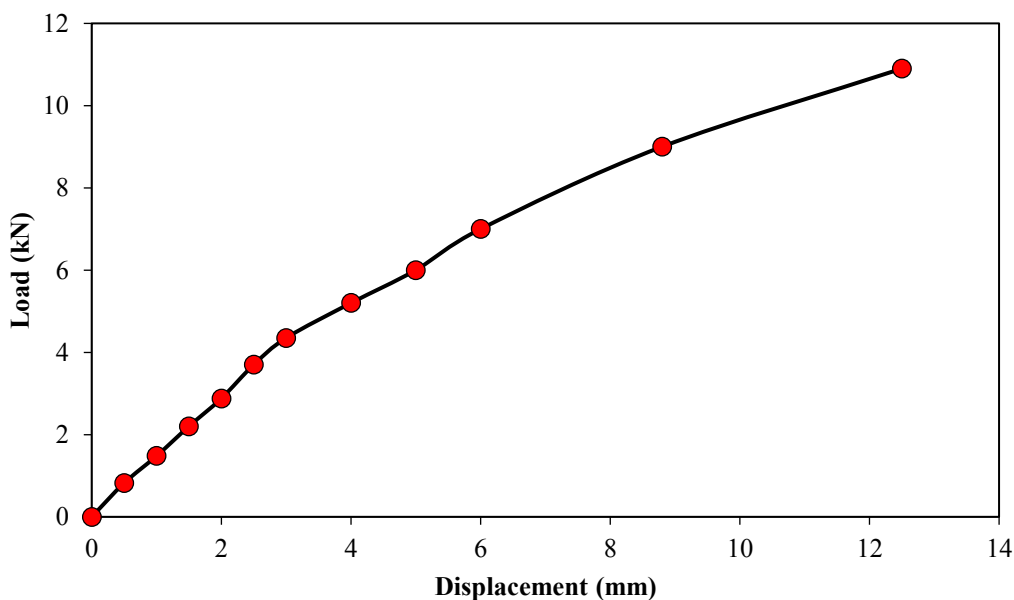
۳-۳. نتایج آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا

آزمایش CBR به منظور تعیین ظرفیت باربری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمایش، نمودار نیروی فشاری بر حسب نفوذ در داخل خاک ترسیم می‌شود. شکل ۱۵ این نمودار را برای خاک ماسه‌ای لای‌دار نشان می‌دهد. در شکل ۱۶ این نمودار را برای ترکیب خاک با مقادیر مختلف و طول الیاف پلی پروپیلن و نیز ترکیب خاک با درصد‌های مختلف نانوسیلیس نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۱۵، ظرفیت باربری این خاک ۱۰/۹ کیلونیوتن است. افزودن ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد الیاف ۶ میلی‌متری، این ظرفیت را به ترتیب به ۱۲/۵، ۱۴/۵ و ۱۸ کیلونیوتن افزایش می‌دهد. این بدان معناست که استفاده از الیاف پلی پروپیلن مقدار ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای لای‌دار را افزایش می‌دهد. علی و همکاران (۲۰۱۹) نیز اثر بهبود دهنده پلی پروپیلن را در مقدار CBR خاک‌های ماسه‌ای لای‌دار مشاهده کردند. مطابق شکل ۱۵، استفاده

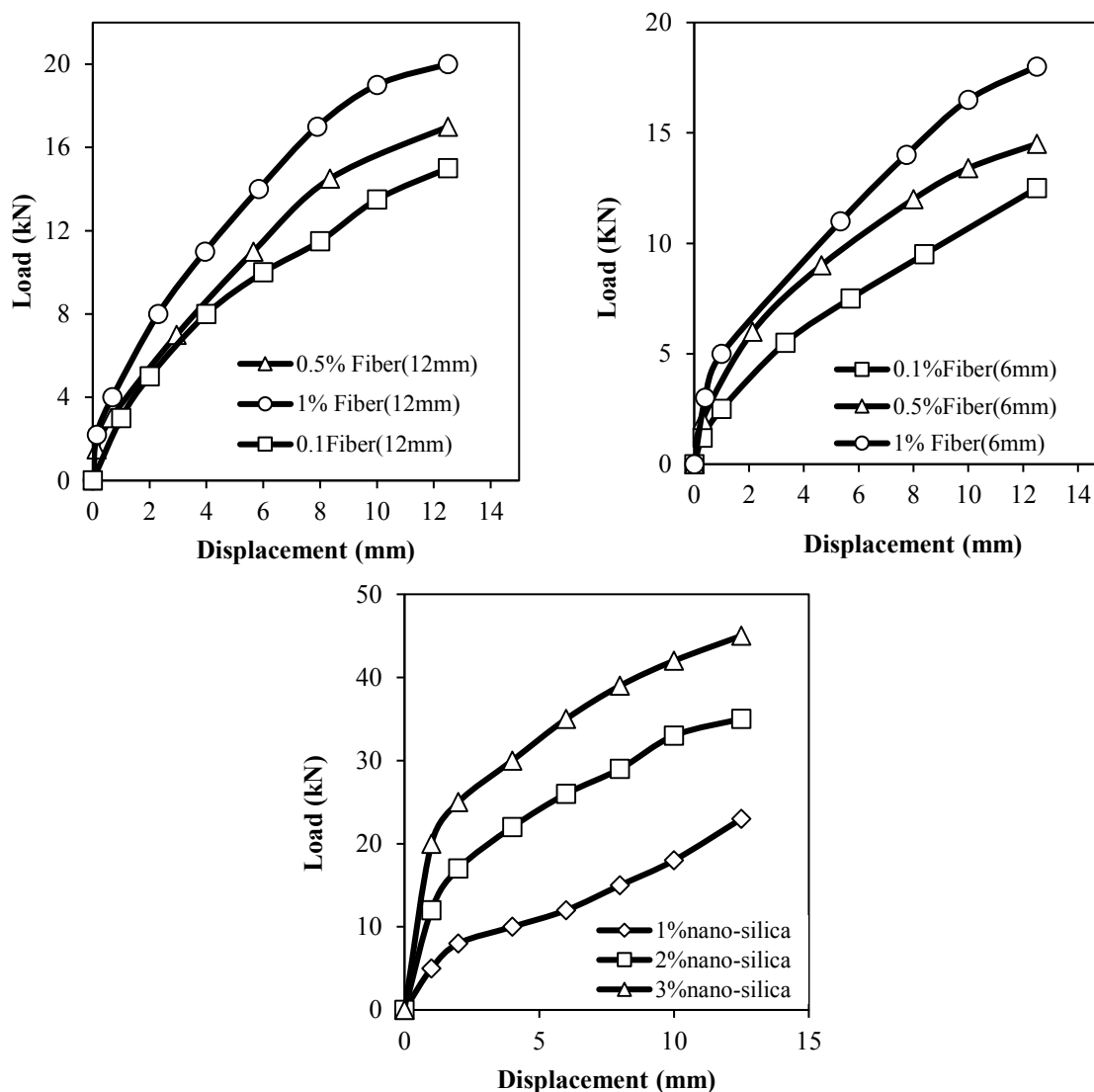
از الیاف ۱۲ میلی‌متری ظرفیت باربری را برای همان درصد‌های الیاف به ترتیب به ۱۵، ۱۷ و ۲۰ کیلونیوتن افزایش می‌دهد. این نشان می‌دهد که افزایش طول الیاف، مقدار ظرفیت باربری را کمی بهبود می‌دهد. اعداد متناظر برای استفاده از ۱ و ۲ و ۳ درصد وزنی نانوسیلیس در این خاک معادل ظرفیت باربری ۲۳، ۳۵ و ۴۵ کیلونیوتن می‌باشد. این اعداد نشان می‌دهند که تأثیر استفاده از نانوسیلیس به صورت محسوسی بیشتر از الیاف پلی پروپیلن بر ظرفیت باربری این خاک است. مقادیر بیشتر نانوسیلیس، ظرفیت باربری بیشتری را تأمین می‌کنند. شکل ۱۷، مقدار CBR را به ازای درصد‌های مختلف الیاف ۶ و ۱۲ میلی‌متری نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که اختلاط الیاف با خاک مورد آزمایش سبب افزایش مقدار CBR خاک می‌گردد. با افزایش درصد وزنی الیاف، مقدار CBR بیشتر افزایش می‌یابد. شکل ۱۸، مقدار CBR را در درصد‌های مختلف نانوسیلیس

می‌توان به پدیده ژل‌شدگی نسبت داد. در مرحله اول، نانوذرات یک کلئید معلق در آب را تشکیل می‌دهند. بعد از آن ژلی از نانوذرات تولید می‌شود که منافذ خاک را پر می‌کند. ژل‌شدگی فرایندی است که در آن مخلوط نانوسیلیس کلئیدی تبدیل به یک ژل جامدگونه می‌شود. این ژل، هنگام اختلاط با خاک به راحتی با خاک مخلوط شده و آن را مستحکم می‌نماید. در این فرآیند، نیروهای دافعه به شیوه کنترل شده کاهش می‌یابند. با افزودن الیاف به خاک، به تدریج توده یکپارچه‌ای از خاک و الیاف ایجاد شده و ظرفیت باربری و مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. در مقادیر وزنی کمتر از ۱٪، فاصله الیاف از یکدیگر زیاد بوده و توده یکپارچه خاک به وجود نمی‌آید. بنابراین، بهترین عملکرد در الیاف ۱۲ میلی‌متر و ۱ درصد وزنی ایجاد می‌شود. علت این افزایش مقاومت، توزیع منظم‌تر رشته‌های الیاف در خاک است. در این حالت، خاک مسلح به صورت یکپارچه عمل کرده و قفل و بست لازم مابین دانه‌های خاک و الیاف ایجاد می‌شود.

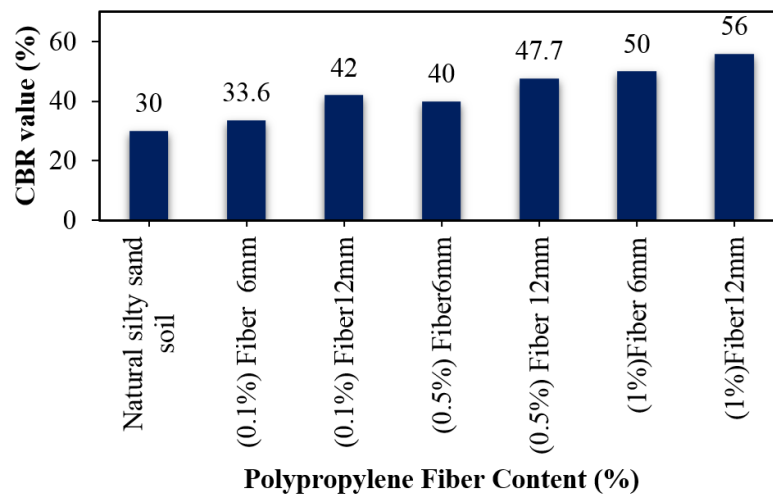
نمایش می‌دهد. با افزایش درصد وزنی نانوسیلیس مقدار CBR افزایش پیدا می‌کند. این بدان معنی است که با افزودن نانوسیلیس با مقدار ۱، ۲ و ۳ درصد به خاک اولیه، افزایش ۲/۲، ۳/۳ و ۴/۲ برابری در مقدار CBR قابل مشاهده است. سه درصد نانوسیلیس توانست CBR خاک مورد آزمایش را بیشتر از خاک استاندارد نماید. در مرحله آخر این پژوهش، مقادیر مختلف نانوسیلیس با بهترین مقدار مقاومتی الیاف در خاک مورد آزمایش، استفاده شد. شکل ۱۹، نسبت افزایش CBR را برای نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی نشان می‌دهد. اختلاط نانوسیلیس با درصدهای متفاوت ۱، ۲ و ۳ درصد با ۱ درصد الیاف ۱۲ میلی‌متری به ترتیب موجب افزایش ۳، ۷/۳ و ۵/۱ برابری CBR خاک اولیه شد. با توجه به این شکل، بیشترین مقاومت برشی مربوط به اختلاط ۳ درصد نانوسیلیس با ۱ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر است. به طور کلی، افزایش مقادیر CBR با نانوسیلیس را



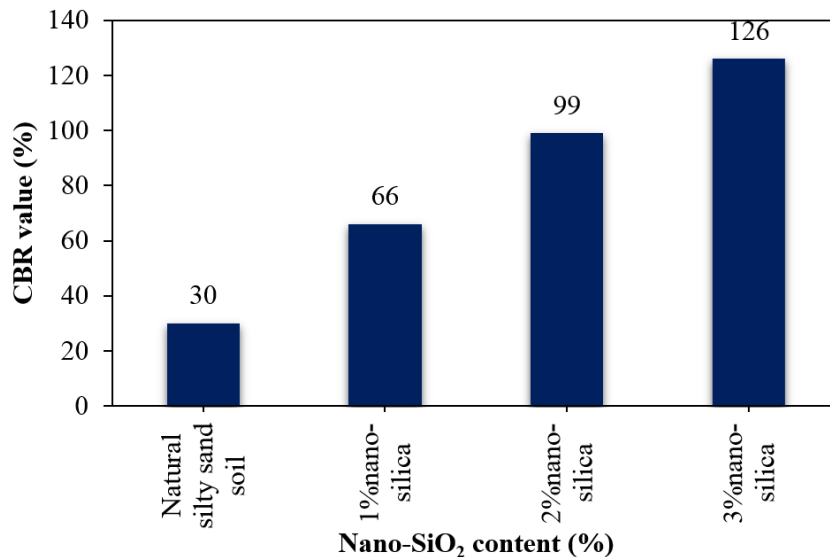
شکل ۱۵. تغییرات نیروی فشاری به نفوذ برای خاک ماسه‌ای لای دار



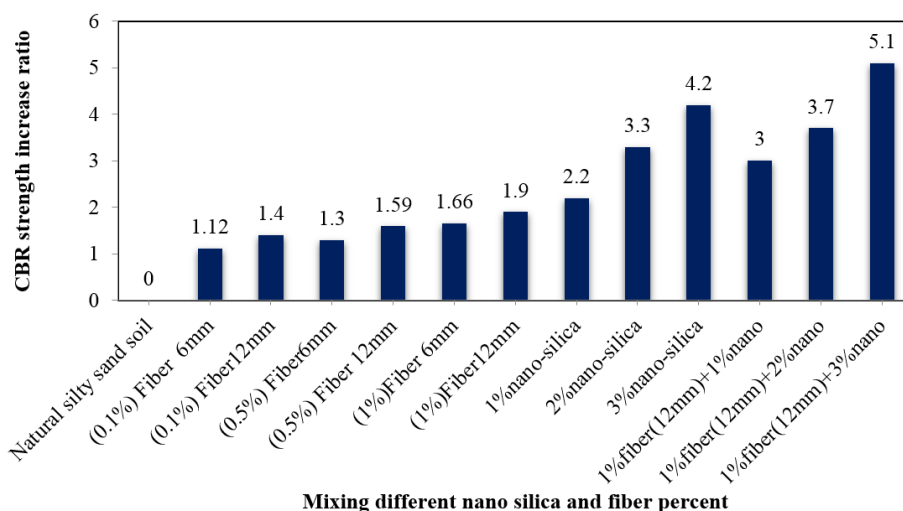
شکل ۱۶. تغییرات نیروی فشاری به نفوذ برای درصدهای مختلف الیاف و نانوسیلیس در خاک ماسه‌ای لای دار



شکل ۱۷. مقدار CBR در طول‌های الیاف ۶ و ۱۲ میلی متری



شکل ۱۸. مقدار CBR در درصدهای مختلف نانوسیلیس



شکل ۱۹. نسبت افزایش CBR خاک‌های اصلاح شده به خاک اولیه در مقادیر مختلف نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن

۴. نتیجه گیری

ماده با هم، مقاومت برشی حداکثر را در مقدار ۳ درصد نانوسیلیس و ۱ درصد الیاف ۱۲ میلی متری نشان می دهد. الیاف پلی پروپیلن، ضریب اصطکاک داخلی خاک ماسه ای لای دار را بهبود می دهد. در حالی که نانوسیلیس مقدار چسبندگی این خاک را ارتقا می دهد. در الیاف ۱۲ میلی متری با مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد در تنش قائم ۱۵۰ کیلو پاسکال، زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب ۲۹، ۵۸ و ۷۸ درصد افزایش می یابد. اختلاط خاک اولیه و نانوسیلیس با مقادیر ۱ و ۲ و ۳ درصد، مقاومت برشی خاک اولیه را برای تنش قائم ۵۰ کیلو پاسکال، ۵۰، ۱۲۵

۱. در آزمایش برش مستقیم، الیاف پلی پروپیلن و نانوسیلیس به صورت جداگانه و هم در ترکیب با هم باعث افزایش مقاومت برشی خاک ماسه ای لای دار می شوند. بیشترین مقاومت از نظر الیاف مربوط به یک درصد الیاف با طول ۱۲ میلی متر و از نظر نانوسیلیس مربوط به ۳ درصد از این ماده است. افزایش درصد الیاف و نانوسیلیس با افزایش مقاومت برشی همراه است. الیاف ۱۲ میلی متری، مقاومت برشی نسبتاً بیشتری نسبت به الیاف ۶ میلی متری از خود نشان می دهند. ترکیب این دو

لیکن باید توجه کرد که استفاده از این روش در مقیاس واقعی می‌تواند با محدودیت‌هایی مواجه باشد. روش‌هایی در مقیاس واقعی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند که از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر باشند، مواد اولیه و ماشین‌آلات مورد نیاز در دسترس باشد، اثرات زیست-محیطی، دوام و ابعاد ایمنی آنها سنجیده شده باشد و مجوز اجرای آنها از دیدگاه مقررات و استانداردهای ملی و منطقه‌ای داده شده باشد. از طرف دیگر، نتایج آزمایشگاهی ممکن است در مقیاس واقعی تکرار نشوند. بنابراین لازم است پروژه‌های پایلوت پیش از پروژه‌های واقعی اجرا شوند تا پارامترهای مغفول شناسایی شوند و عملکرد درازمدت مورد توجه قرار گیرد.

۵. در تحقیقات آزمایشگاهی اخیر (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عامری و همکاران، ۲۰۲۱ با محدودیت‌هایی و عرب‌یارمحمدی و همکاران، ۲۰۲۲) از روش سطح پاسخ در طراحی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود از این روش در مطالعات اثر افزودنی‌های نانو و الیاف بر مقاومت مکانیکی خاک‌ها نیز استفاده شود.

و ۲۶۶ درصد و برای تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال، ۱۷/۵، ۴۸ و ۹۶ درصد و برای تنش قائم ۱۵۰ کیلوپاسکال، ۱۴، ۳۱/۵ و ۸۲ درصد افزایش می‌دهد.

۲. در آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا، ترکیب نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن باعث بهبود ظرفیت باربری کالیفرنیا می‌شوند. بیشترین سهم افزایش مربوط به افزایش ۱ درصد الیاف و ۳ درصد نانوسیلیس است. با افزایش مقدار الیاف و مقدار نانوسیلیس ظرفیت باربری کالیفرنیا افزایش قابل توجهی می‌یابد. الیاف ۱۲ میلی‌متری عملکرد بهتری از الیاف ۶ میلی‌متری دارند. برای طرح اختلاط خاک اولیه با الیاف ۱۲ میلی‌متری با مقادیر ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد به ترتیب CBR خاک اولیه ۱/۲، ۱/۳ و ۱/۶۶ برابر افزایش می‌یابد. این عدد برای طرح اختلاط یک درصد الیاف ۱۲ میلی‌متری با مقادیر ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس به ترتیب ۳/۷، ۵/۱ و ۵/۱ برابر است.

۳. نتایج آزمایش FESEM نشان می‌دهد که با افزایش مقدار نانوسیلیس و الیاف، چسبندگی و قفل و بست بین ذرات خاک بهتر می‌گردد. این امر می‌تواند مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک را افزایش دهد.

۴. در این تحقیق، مقاومت مکانیکی خاک ماسه‌ای لای‌دار در حضور الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس بهبود یافت.

۵. مراجع

- Ali, M., Almani, Z., Hindu, A. K., Memon, U. H. and Memon, N. N. 2019. "Geotechnical properties of silty sand reinforced with polypropylene woven bags". *Int. J. Mod. Res. Eng. Manage.*, 2(12): 1.
- Ameri, M., Mansourian, A., Shaker, H. and Ameri, A. 2021. "Determining the appropriate amount of mixed fine-grained and coarse-grained slag based on the mechanical properties of asphalt mixtures using response surface methodology". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 7(3): 21-36.
- Arabyarmohammadi, H., Sharbatdar, M. K. and Naderpour, H. 2022. "Mechanical properties evaluation of roller compacted concrete pavement using response surface methodology in terms of an experimental program". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 7(4): 75-98.
- Bahmani, S. H., Huat, B. B., Asadi, A. and Farzadnia, N. 2014. "Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement". *Constr. Build. Mater.*, 64: 350-359.
- Changizi, F. and Haddad, A. 2014. "Stabilization of subgrade soil for highway by recycled polyester fiber". *J. Rehabil. Civ. Eng.*, 2(1): 93-105.
- Changizi, F. and Haddad, A. 2015. "Strength properties of soft clay treated with mixture of nano-SiO₂ and recycled polyester fiber". *JRMGE*, 7(4): 367-378.
- Choobasti, A. J., Samakoosh, M. A. and Kutanaei, S. S. 2019. "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers". *Constr. Build. Mater.*, 211: 1094-1104.

- Cui, H., Jin, Z., Bao, X., Tang, W. and Dong, B. 2018. "Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms". *Constr. Build. Mater.*, 189: 286-295.
- El Majid, A., Cherradi, C., Khadija, B. and Razzouk, Y. 2023. "Laboratory investigations on the behavior of CBR in two expanding soils reinforced with plant fibers of varying lengths and content". *Mater. Today: Proc.* <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.395>
- Fareghian, M., Afrazi, M. and Fakhimi, A. 2023. "Soil reinforcement by waste tire textile fibers: small-scale experimental tests". *J. Mater. Civ. Eng.*, 35(2): 04022402.
- Ghorbani, A., Hasanzadehshooili, H., Mohammadi, M., Sianati, F., Salimi, M., Sadowski, L. and Szymanowski, J. 2019. "Effect of selected nanospheres on the mechanical strength of lime-stabilized high-plasticity clay Soils". *Adv. Civ. Eng.*, 2019(1): 4257530.
- Gul, N. and Mir, B. A. 2023. "Performance evaluation of silty soil reinforced with glass fiber and cement kiln dust for subgrade applications". *Constr. Build. Mater.*, 392: 131943.
- Huang, W. C. 2014. "Improvement evaluation of subgrade layer under geogrid-reinforced aggregate layer by finite element method". *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, 12(3): 204-215.
- Kadivar, M., Barkhordari, K. and Kadivar, M. 2011. "Nanotechnology in geotechnical engineering". *Adv. Mater. Res.*, 261: 524-528.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., Roustaei, M. and Mirhosseini, S. 2019. "Influence of nano-SiO₂ on geotechnical properties of fine soils subjected to freeze-thaw cycles". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 161: 129-136.
- Khan, M. A. 2013. "A CBR based study evaluating subgrade strength of flexible pavements having soil flyash interfaces". *Int. J. Civ. Struct. Eng.*, 11(1): 10-18.
- Majeed, Z. H. and Taha, M. R. 2012. "Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil". *J. Asian Sci. Res.*, 2(11): 587.
- Meng, T., Qiang, Y., Hu, A., Xu, C. and Lin, L. 2017. "Effect of compound nano-CaCO₃ addition on strength development and microstructure of cement-stabilized soil in the marine environment". *Constr. Build. Mater.*, 151: 775-781.
- Mohseni, E., Kazemi, M. J., Koushkbaghi, M., Zehtab, B. and Behforouz, B. 2019. "Evaluation of mechanical and durability properties of fiber-reinforced lightweight geopolymers composites based on rice husk ash and nano-alumina". *Constr. Build. Mater.*, 209: 532-540.
- Mousavi, S. E. and Karamvand, A. 2017. "Assessment of strength development in stabilized soil with CBR PLUS and silica sand". *J. Traff. Transport. Eng.*, 4(4): 412-421.
- Noroozi, R., Shafabakhsh, G., Kheyroddin, A. and Mohammadzadeh Moghaddam, A. 2019. "Experimental study and statistical modeling of roller compacted concrete pavement behavior containing waste PET particles, recycled fibers and metakaolin powder". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 5(2): 35-56.
- Soil, A. C. D. O., Rock. Subcommittee D18 03 on Texture, P. and Soils, D. C. O. 2003. "Standard test method for particle-size analysis of soils". ASTM International.
- Taherkhani, H., Hashemi, A. and Sharifi, V. 2012. "Evaluating the use of CBR PLUS for constructing the pavement layers from stabilized soils". *Quart. J. Transport. Eng.*, 3(4): 339-347.
- Yao, K., Wang, W., Li, N., Zhang, C. and Wang, L. 2019. "Investigation on strength and microstructure characteristics of nano-MgO admixed with cemented soft soil". *Constr. Build. Mater.*, 206: 160-168.