

بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانورس مونت موریلونیت در خواص خمیری و مقاومتی ماسه‌ی رس‌دار

میرعباد حسینی (کارشناس ارشد)

محمد علیایی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

هیثم حیدرزاده (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۴۰۰)
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۲/۲، ص. ۱۳-۲۳، (پژوهشی)

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور بررسی تغییرات به وجود آمده در حدود اتربرگ و تنش برشی خاک‌های ماسه‌ی رس‌دار از آزمایش‌های حدود اتربرگ و برش مستقیم در درصد‌های مختلف نانورس بر روی ماسه‌های رس‌دار با ترکیب گوناگون درصد‌های ماسه و رس انجام شده است. همچنین، جهت بررسی میکروسکوپی بافت نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پیمایش سطح نمونه‌ها استفاده شده است. بررسی تصاویر نشان می‌دهد ذرات نانورس در صورت نبود رس در نمونه‌ی خاک (یعنی خاک ماسه‌ی خالص) یا عدم پراکندگی یکنواخت، اثر معکوس در رفتار خاک خواهند داشت. در صورت وجود رس در خاک ماسه‌ی و همچنین پراکنده شدن یکنواخت نانورس در خاک، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بهبود می‌یابند. برای خاک مورد مطالعه در پژوهش حاضر، بهترین ترکیب از نظر مقاومت برشی، مربوط به خاکی است که از ترکیب ۸۰٪ ماسه و ۲۰٪ تشکیل شده و با افزودن ۴٪ نانورس به آن، بهترین نتیجه از نظر مقاومت برشی به دست آمده است.

واژگان کلیدی: بهسازی خاک، نانورس، حدود اتربرگ، مقاومت برشی، برش مستقیم.

me.hosseini@modares.ac.ir
m.olaei@modares.ac.ir
heidarzadeh@sku.ac.ir

۱. مقدمه

نانوذرات خاک با اندازه‌ی بسیار ریز تا 10^0 نانومتر، کوچک‌ترین ذرات در محیط‌های خاکی هستند. مواد در محدوده‌ی نانو اغلب رفتار فیزیکی بسیار متفاوتی با اتم‌ها و مواد توده‌ی از خود نشان می‌دهند. خصوصیات مواد نانومقیاس را نمی‌توان ضرورتاً با توجه به ویژگی‌های مواد درمقیاس‌های بزرگ‌تر پیش‌بینی کرد. تغییرات مهم در رفتار مواد نه فقط با تغییرات مداوم رفتاری مواد در اندازه‌های کوچک، بلکه در اثر ظهور پدیده‌های جدیدی نظیر محدودیت اندازه‌ی کوانتومی، ترابری شبه موجی و غلبه‌ی پدیده‌های سطحی صورت می‌گیرد.^[۱،۲] مواد نانومقیاس به دلیل اندازه‌ی بسیار کوچک‌شان، مساحت سطح ویژه‌ی بسیار بالایی دارند. از این رو به طور بسیار فعالی با دیگر ذرات خاک واکنش می‌دهند و حل می‌شوند. به دلیل داشتن همین مساحت سطح ویژه‌ی بسیار بالا و بارهای سطحی، حتی در صورت استفاده‌ی بسیار کم از این ذرات در محیط خاک، رفتار فیزیکی - شیمیایی و خصوصیات مهندسی خاک را به طور بسیار ویژه و قابل توجه تحت تأثیر قرار می‌دهند.^[۳] تأثیر اندازه‌ی ذرات نانوسیلیس در مقایسه با میکروسیلیس در پایداری رس با توجه به آزمایش‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده است.^[۴] عمده‌ی کار انجام شده در نوشتار احمدی و شفیع (۲۰۱۹)،^[۵] بر پایه‌ی نتایج به دست آمده از آزمایش تک‌محوری است.

اولین کاربرد نانوتکنولوژی در مصالح ساخت و ساز به اواسط دهه‌ی ۹۰ میلادی بر می‌گردد. از آن زمان تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه‌ی استفاده از نانوذرات یا

استفاده از خاک که همواره ارزان‌ترین مصالح ساختمانی بوده است، از مراحل اولیه‌ی صنعت ساختمان به آن توجه شده و تا امروز در ساخت سازه‌های مهمی، نظیر سدهای بزرگ خاکی متداول بوده است. در تاریخچه‌ی فناوری مصالح ساختمانی، خاک‌ها همواره به عنوان توده‌هایی با مقاومت فشاری خوب، که در کشش و برش تاب چندانی ندارند، شناخته شده‌اند. امروزه اصلاح رفتار خاک به کمک افزودنی‌ها به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود بسیاری از پارامترهای رفتاری خاک همواره مد نظر پژوهشگران در مهندسی ژئوتکنیک بوده است.^[۱،۲] افزودنی‌های متداول همچون سیمان، آهک، کلسیم کلرید، خاکستر بادی، قیر و... در گذشته بررسی شده‌اند. یکی از مشکلات استفاده از افزودنی‌های معمول، آلودگی زیست‌محیطی است، ولی استفاده از نانوذرات، سبب کاهش زیست تخریب‌پذیری خواهد شد، چرا که منشأ نانوذرات در اصل یک خاک طبیعی است. همچنین استفاده از آن در بهسازی خاک، کنترل خواص مقاومتی و کم کردن سیمان مصرفی و متعاقباً صرفه‌ی اقتصادی را نتیجه خواهد داد.^[۳]

امروزه از نانوتکنولوژی در شاخه‌های مختلف علوم به دفعات استفاده می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۱۲/۱۳۹۸، اصلاحیه ۱۴/۴/۱۳۹۹، پذیرش ۱۴/۱۰/۱۳۹۹.

DOI:10.24200/J30.2021.55263.2719

نانوتکنولوژی در بسیاری از شاخه‌های ساخت و ساز (از جمله تکنولوژی بتن) انجام شده است. همچنین از نانوکامپوزیت در اصلاح خصوصیات مصالح مختلف مانند آسفالت نیز استفاده شده است.^[۷] قانون و همکاران (۲۰۲۰)،^[۸] نشان دادند که نانورس می‌تواند حساسیت تنش آسفالت را ناشی از نوسان‌های دمایی کاهش دهد. استفاده از فتاوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک می‌تواند در دو رویکرد مطرح شود: (۱) مطالعه‌ی ساختار خاک در مقیاس نانومتر و در نتیجه دریافت درک بهتری از طبیعت خاک به همراه مطالعه‌ی عملکرد خاک‌ها با نانوساختارهای متفاوت (۲) به کار بردن خاک در مقیاس اتمی و مولکولی از طریق افزودن نانوذرات به عنوان یک عامل خارجی.^[۹] پژوهش حاضر جزء دسته‌ی دوم طبقه‌بندی می‌شود.

یونگورا و میوا (۱۹۹۲)،^[۱۰] نانوذرات سیلیس را برای افزایش مقاومت فشاری ماسه به کار بردند. آنها با ۳۲ درصد وزنی نانوسیلیس بعد از ۱۰۰۰ روز، مقاومت خاک را ۳/۵ برابر کردند. پرسوف و همکارانش (۱۹۹۷)،^[۱۱] دریافتند که در خاک‌های ماسه‌یی با افزایش درصد نانوسیلیس، مقاومت فشاری خاک بالا می‌رود، که بیشینه‌ی افزایش، ۴۰۰ کیلوپاسکال است. همچنین اعلام کردند که با افزودن نانوذرات سیلیس ضریب تراوایی کاهش خواهد یافت. در مطالعه‌ی در سال ۲۰۰۵،^[۱۲] نیز نانوذرات سیلیس برای افزایش اتصال و چسبندگی بین ذرات خاک و کاهش گرانروی آن به کار رفته و رفتار ماسه به وسیله‌ی نانومواد در بررسی آزمایشگاهی و در شرایط بارگذاری سیکیلی بهبود یافته است. نتایج پژوهش اخیر نشان داد که اتصال و چسبندگی ذرات خاک به افزایش درصد نانوذرات وابسته است. همچنین، گالاگر و همکارانش (۲۰۰۷)،^[۱۳] در ایالات متحده، نانومواد را مخصوصاً در جایی به کار بردند که خاک آن از نوع ماسه همراه با گرانروی بالا بود و بهبود ۴۰ درصدی نشست را پس از اجرا کردن زلزله‌ی مصنوعی و ارزیابی نشست ارائه شده گزارش کردند. ژانگ (۲۰۰۴)،^[۱۴] نشان داد که وجود نانوساختار در خاک باعث افزایش حدود اتربرگ می‌شود و نانوذرات، خواص ویژه‌ی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند. طاهها (۲۰۰۹)،^[۱۵] در مطالعه‌ی خود به این نتیجه رسیده است که افزودن نانوخاک به دست آمده از فرایند آسیاب گلوله‌یی به انواعی از خاک‌های ریزدانه سبب افزایش حدود خمیری و روانی، ولی کاهش دامنه‌ی خمیری می‌شود. همچنین افزودن نانوخاک به نمونه‌های تثبیت شده با سیمان، مقاومت فشاری آنها را افزایش داده است.^[۱۵] طاهها و یانگ (۲۰۱۰)،^[۱۶] اثر نانولوله‌های کربنی در خاک‌ها را در مطالعه‌ی در مالزی و بر روی خاک کائولینیت بررسی کردند و آزمایش حدود اتربرگ بر روی آن انجام دادند و شاخص خمیری خاک مقدار کمی افزایش یافت. در پژوهش مذکور، اثر نانوذرات در نسبت تخلخل و حفره‌های موجود خاک، در آزمایش تحکیم بررسی شد و نتایج حاصل از آزمایش تحکیم نشان داد که افزایش نانولوله‌های کربنی تا ۵/۰٪ افزایش قابلیت فشرددگی خاک را نشان می‌دهد، ولی وجود ۱٪ از این ماده در خاک نسبت تخلخل را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد.^[۱۶] بر اساس مطالعات انجام شده در ادبیات فنی،^[۱۷] نشان داده شده است که افزودن نانوذرات به ماسه‌ی رس دار و ماسه‌ی تثبیت شده با سیمان سبب افزایش حد روانی و حد خمیری و کاهش نشانه‌ی خمیری می‌شود. این ذرات در مقاومت برشی ماسه‌ی تثبیت شده با سیمان اثر مثبت دارند. هوآنگ و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۸] تأثیر نانوذرات را در پتانسیل روانگرایی خاک ارزیابی و ملاحظه کردند که روش استفاده از نانوذرات در بهبود خاک، می‌تواند به مقدار قابل ملاحظه‌یی در عملکرد روانگرایی خاک تأثیرگذار باشد. از طرف دیگر، مروری بر عملکرد تعدادی از نانوذرات در پایداری خاک‌ها انجام شده است.^[۱۹]

خصوصیات خاک پایدار شده با نانوکربنات کلسیم و الیاف از بین رفته‌ی فرش‌ها توسط چوباستی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۲۰] انجام و منتشر شده است. آزمایش‌های مذکور بر پایه‌ی آزمون‌های آزمایش تک‌محوری بوده است. همچنین در مطالعه‌ی

دیگری، از آزمایش تک‌محوری برای ارزیابی بهبود خاک ماسه‌یی بهبود یافته به کمک نانورس و نانوسیلیکات استفاده شده است.^[۲۱]

مطالعات آزمایشگاهی روی پایداری سازی خاک‌ها با استفاده از نانوذرات به عنوان یک بحث روز مطرح است.^[۲۲]

طبرسا و همکاران (۲۰۱۸)،^[۲۳] تأثیر مقدار نانورس را در پایداری یک نوع خاک بادرقتی ارزیابی کردند. بادرقت‌های مورد نظر در واقع نوعی خاک‌های رسوبی با دانه‌هایی به اندازه‌ی سیلت هستند، که اغلب اندکی سیمانته نیز هستند. ظهیره و همکاران (۲۰۲۰)،^[۲۴] اثر نانورس در ساختار خاک رس را مطالعه کردند و نشان دادند که نانورس‌ها با پرکردن فضای خالی بین ذرات، خلل و فرج خاک را کاهش می‌دهند و با قفل و بست بین ذرات، باعث کاهش رطوبت بهینه‌ی خاک می‌شوند.^[۲۴] قصاب‌کلایی و همکاران (۲۰۱۶)،^[۲۵] تأثیر استفاده از نانوذرات سیلیکاتی (نانوسیلیکا) را در خصوصیات ژئوتکنیکی و فیزیکی یک خاک رسی سیمانته ارزیابی کردند. با مروری بر تاریخچه‌ی نانوتکنولوژی، به نوبه بودن در رشته‌ی ژئوتکنیک و البته سرعت بسیار زیاد پیشرفت و توسعه‌ی آن طی سال‌های اخیر پی برده می‌شود. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی اندک در زمینه‌ی اصلاح خاک به کمک نانوافزودنی‌ها، در پژوهش حاضر سعی بر این است تا با نگاه دقیق‌تری به مسئله‌ی مذکور پرداخته و ابعاد مختلف آن روشن شود. تصور این‌که با یافتن نانوذراتی خاص و افزودن مقادیری از آن به خاک، خصوصیات آن مانند: مقاومت، حدود اتربرگ، نفوذپذیری و شکل‌پذیری خاک به مقدار قابل توجهی بهبود یابد، لزوم انجام پژوهش‌ها و مطالعات در این زمینه را بیشتر می‌کند.

در پژوهش حاضر، نمونه‌هایی کنترل شده از خاک ماسه‌یی رس دار تهیه شده است. مشخصات و ویژگی‌های هر کدام از خاک‌های ماسه‌یی و رسی به دقت شناسایی شد. برای این منظور آنالیز شیمیایی، کانی‌شناسی و توزیع دانه‌بندی روی خاک رسی انجام پذیرفت. از طرف دیگر، نانورس مونت‌موریلونیت با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مشخص که در ادامه ارائه شده است، تهیه و درصدهای مشخصی از آن با خاک ماسه‌یی ترکیب شده است. به این ترتیب، خاک‌های ماسه‌یی رس دار با نسبت‌های مختلف تهیه شدند. سپس، به خاک‌های مذکور، مقادیر کنترل شده‌ی نانورس افزوده شد. سپس آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی روی آنها انجام شد و ارزیابی صورت گرفت. همچنین، به منظور مشاهده‌ی تغییرات صورت گرفته در بافت و ساختار خاک به لحاظ فیزیکی و شیمیایی قبل و بعد از اضافه کردن درصدهای مختلف نانورس از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پیمایش سطح نمونه‌ها استفاده شد. در یک جمع‌بندی کلی با بررسی تصاویر مختلف میکروسکوپی ملاحظه شده است در صورت وجود رس در خاک ماسه‌یی (در خاک ماسه‌یی رس دار) و همچنین پراکنده شدن یکنواخت نانورس در خاک، پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بهبود می‌یابند. به عبارت دیگر، ذرات نانورس در صورت عدم وجود رس در نمونه‌ی خاک (یعنی در حالتی که خاک ماسه‌یی خالص است) یا عدم پراکنندگی یکنواخت، اثر معکوس در رفتار خاک خواهند داشت.

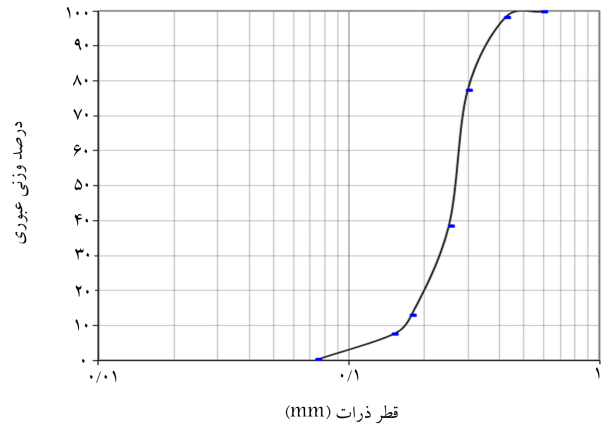
۲. مشخصات مصالح

۲.۱. ماسه

برای مصالح ماسه‌یی مورد نیاز در پژوهش حاضر از نوعی ماسه‌ی استاندارد به نام ماسه‌ی سیلیسی شکسته‌ی فیروزکوه استفاده شده است، که به اختصار ماسه‌ی ۱۶۱ نامیده می‌شود. ماسه‌ی ۱۶۱، زرد رنگ متمایل به طلایی بوده و برخی مشخصات

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه.

نوع ماسه	۱۶۱	D_{50} (mm)	۰/۲۶
چگالی ویژه	۲/۶۶	ضریب یکنواختی	۱/۸
نسبت تخلخل بیشینه	۰/۹۲۸	ضریب خمیدگی	۱/۱۹
نسبت تخلخل کمینه	۰/۵۸۳	نفوذپذیری (cm/s)	۱/۰۱۲۵



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استاندارد ۱۶۱ فیروزکوه.

آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین شکل ۱، نشان‌دهنده‌ی منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در آزمایش‌هاست.

۲.۲. رس

رس استفاده شده در پژوهش حاضر، که برای تهیه‌ی ماسه‌ی رس‌دار به کار رفته است، نوعی رس مصنوعی از نوع گائولن با نام تجاری ZWNK1-T است، که از شرکت صنایع خاک و چینی ایران خریداری شده است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی، آنالیز کانی‌شناسی و توزیع دانه‌بندی محصول مذکور به ترتیب در جدول‌های ۲ الی ۴ ارائه شده است.

در همه‌ی آزمایش‌ها به دلیل لزوم تناسب قطر بزرگ‌ترین دانه با ابعاد قالب و نیز هم‌خوانی نسبی ماده‌ی افزودنی و مصالح پایه، خاک رس از الک شماره‌ی ۴۰ عبور داده شد و حدود اتربرگ آن در جدول ۵ ارائه شده است.

۳.۲. نانورس مونت‌موریلونیت

نانورس استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، از نوع مونت‌موریلونیت اصلاح شده است، که با نام تجاری کلوزیت B ۳۰ خریداری شده و محصول شرکت SOUTHERN CLAY ایالات متحده بوده است، که سایر مشخصات آن در جدول ۶ ارائه شده است. اندازه‌ی ذرات نانورس به گونه‌ی است که ۹۰٪ آن کوچک‌تر از $1.3 \mu m$ ، ۵۰٪ کوچک‌تر از $1.3 \mu m$ و ۱۰٪ آن از $1.3 \mu m$ کوچک‌تر است.

۳. روش آماده‌سازی نمونه‌های خاک برای آزمایش‌ها

مسئله‌ی بسیار مهم در زمینه‌ی استفاده از نانوذرات در توده‌ی خاک، پراکندگی مناسب نانوذرات است. زمانی نانوذرات، خصوصیات عالی و بالقوه‌ی خود را در معرض نمایش می‌گذارند، که توده‌های متراکم شده‌ی آنها به واحدهای مجزا و منفرد شکسته شوند و ذرات نانو، جدا از هم در بین ذرات خاک قرار گیرند. هنگامی

جدول ۲. آنالیز شیمیایی خاک رس ZWNK1-T.

ترکیب شیمیایی	درصد	ترکیب شیمیایی	درصد
L.O.I	$8/5 \pm 1$	CaO	$1/4 \pm 0/2$
SiO ₂	65 ± 1	MgO	$0/35 \pm 0/05$
Al ₂ O ₃	22 ± 1	Na ₂ O	$0/35 \pm 0/05$
Fe ₂ O ₃	$0/55 \pm 0/1$	K ₂ O	$0/35 \pm 0/05$
TiO ₂	$0/04 \pm 0/01$	SO ₃	-

جدول ۳. آنالیز کانی‌شناسی خاک رس ZWNK1-T.

کائولینیت	کوارتز	کلسیت	سایر
60 ± 2	31 ± 2	$2/5 \pm 0/5$	6 ± 1

جدول ۴. توزیع دانه‌بندی خاک رس ZWNK1-T.

$< 150 \mu m$	$< 40 \mu m$	$< 20 \mu m$	$< 2 \mu m$
۱۰۰٪	۹۸٪	39 ± 3 ٪	۰-۵٪

جدول ۵. حدود اتربرگ خاک رس ZWNK1-T.

نام رس	PI(%)	PL(%)	LL(%)
ZWNK1-T	۱۴	۳۱	۴۵

که نیروی جاذبه‌ی بین ذرات بیش از نیروی دفعه‌ی بین آنها باشد، ذرات به هم می‌چسبند و سبب انباشتگی می‌شوند. برای جلوگیری از انباشتگی نانوذرات در توده‌ی خاک، استفاده از روش‌های مکانیکی و روش‌های شیمیایی مناسب ضروری است.^[۲۶] به منظور جلوگیری از دخالت عوامل شیمیایی برای پراکندن نانوذرات، در پژوهش حاضر، از یکی از روش‌های مکانیکی برای پراکندن نانوذرات در خاک استفاده شده است. بدین ترتیب که برای تهیه‌ی ماسه‌ی رس‌دار، ابتدا ماسه و رس با درصد مشخص تهیه شد. سپس به منظور پراکندن همگن نانوذرات در توده‌ی خاک به کمک آسیاب گلوله‌یی، ابتدا رس موجود در خاک ماسه‌ی رس‌دار با درصد مشخص نانورس به صورت خشک داخل محفظه‌ی دستگاه آسیاب گلوله‌یی قرار گرفت و به مدت ۳/۵ ساعت آسیاب شد. سپس خاک ماسه‌یی به مخلوط داخل محفظه اضافه و گلوله‌های داخل آن خارج شد. سپس اجازه داده شد که مخلوط موجود در محفظه به مدت ۱/۵ ساعت دیگر با یکدیگر مخلوط شوند، تا نهایتاً یک مخلوط همگن و یکنواخت به دست آید. دلیل استخراج گلوله‌ها به هنگام اضافه کردن خاک ماسه‌یی، به هم زدن دانه‌بندی خاک مورد آزمایش است. زیرا وجود گلوله‌های مذکور در خاک ماسه‌یی باعث شکسته شدن دانه‌های ماسه می‌شود و دانه‌بندی آن را تغییر می‌دهد، که این امر در نتایج آزمایش‌ها تأثیرگذار خواهد بود.

۴. برنامه‌ی آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر، با اضافه کردن درصد‌های مختلف نانورس به ۵ نوع مصالح، شامل: یک نوع خاک ماسه‌یی خالص و ۴ نوع ماسه‌ی رس‌دار، میزان تأثیر نانورس در مصالح مذکور در آزمایش‌هایی که در ادامه شرح داده شده است، بررسی شده است. درصد‌های ماسه و رس برای ۴ نوع ماسه‌ی رس‌دار، شامل: ۱۰٪ رس +

جدول ۶. مشخصات نانورس مونت موریلونیت اصلاح شده کلوزیت B^{۳۰}.

فاصله‌ی صفحات	ضخامت صفحات	چگالی	رنگ
۱/۸۵mm	۱mm	۱/۹۸kg/cm ^۳	سفید متمایل به شیری

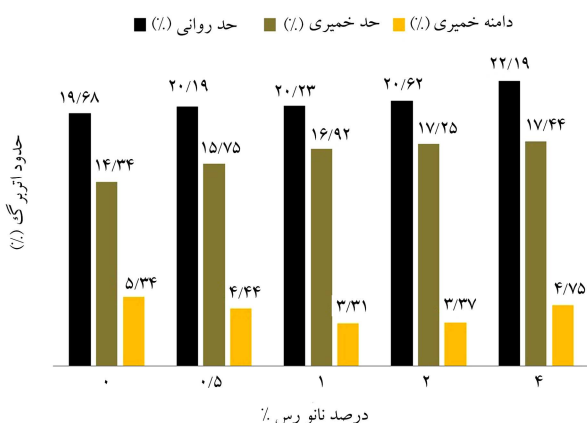
۵. ارائه نتایج آزمایش‌ها

۱.۵. حدود اتربرگ

در ادامه، نتایج حاصل از آزمایش‌های حدود اتربرگ در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که مطابق آن نتایج نشان می‌دهند که نانورس استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر باعث افزایش حد روانی و حد خمیری خاک شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش نانورس تا ۱٪ وزنی سبب کاهش دامنه‌ی خمیری شده است. این مسئله می‌تواند در مهندسی ژئوتکنیک حائز اهمیت باشد، زیرا خاک‌هایی که حالت خمیری بالایی دارند، پس از خشک شدن دچار انقباض زیادی می‌شوند و در نتیجه خاک، هدایت هیدرولیکی بالایی خواهد داشت، که می‌تواند برای سازه‌هایی مانند محل دفن زباله مضر باشد.^[۱۵، ۵] در حالی که در درصد‌های بالاتر از ۱٪، افزایش حد روانی و حد خمیری به گونه‌ی بی‌پایه بوده است که باعث افزایش دامنه‌ی خمیری شده است. این موضوع نیز می‌تواند برای اصلاح خاک‌هایی که در آنها خاصیت خمیری بالاتری جهت تغییر شکل‌پذیری بیشتر به خصوص در مجاورت آب مورد نیاز است، اهمیت داشته باشد. در نتیجه، با توجه به کاربرد مورد نظر می‌توان با استفاده از درصد‌های مختلف نانوافزودنی مذکور، دامنه‌ی خمیری خاک را افزایش یا کاهش داد. البته با توجه به جدید بودن افزودنی‌های ذکر شده و محدودیت‌هایی نظیر قیمت بالا و مشکلات اختلاط در حجم بالا، استفاده‌ی گسترده از نانورس به منظور افزایش یا کاهش حدود خمیری، نیازمند انجام پژوهش‌های بیشتری در این زمینه است. تأییدگذاری نانوذرات در مشخصات خمیری خاک را می‌توان ناشی از سه دلیل اصلی دانست: (۱) سطح ویژه‌ی بسیار بزرگ و بارهای سطحی؛ (۲) نانوتخلخل درون‌ذره‌ی (۳) میکروساختار توده‌ی.

۲.۵. آزمایش برش مستقیم

در بخش حاضر، بررسی رفتار مکانیکی خاک‌های مطالعه شده و مخلوط آنها با درصد‌های مختلف نانورس بر پایه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های برش مستقیم



شکل ۲. تغییرات حدود اتربرگ برای مصالح ۰/۴C + ۰/۶S در درصد‌های مختلف نانورس.

۰/۹۰ ماسه، ۰/۲۰ رس + ۰/۸۰ ماسه، ۰/۳۰ رس + ۰/۷۰ ماسه و ۰/۴۰ رس + ۰/۶۰ ماسه بوده است. درصد‌های اضافه شده‌ی نانورس به خاک: ۰/۵، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ درصد وزن خشک خاک بوده است. برای تمامی آزمایش‌ها، مخلوط کردن نانورس و خاک با استفاده از آسیاب گلوله‌ی صورت گرفته و آزمایش‌ها در رطوبت بهینه انجام شده است.

برای ساخت نمونه، ابتدا خاک و نانورس، به صورتی که بیان شد، مخلوط شدند و سپس مقدار آب لازم برای رسیدن به درصد رطوبت بهینه به مخلوط اضافه شد. بر روی نمونه‌های ماسه‌ی رس‌دار بدون افزودن نانورس آزمایش تراکم استاندارد^[۲۷] مطابق استاندارد ASTM-D۶۹۸،^[۲۷] انجام شد.

همچنین به منظور بررسی آثار افزودنی مذکور در خواص خمیری ماسه‌ی رس‌دار، آزمایش تعیین حدود اتربرگ^[۲۷] مطابق با استاندارد ASTM D۴۳۱۸،^[۲۷] انجام شد. البته فقط در ماسه‌ی رس‌دار همراه با ۰/۴۰ رس، آزمایش مذکور امکان‌پذیر بود و در سایر ترکیب درصد‌ها، امکان محاسبه‌ی حد روانی^[۲] و حد خمیری^[۴] مصالح فراهم نشد.

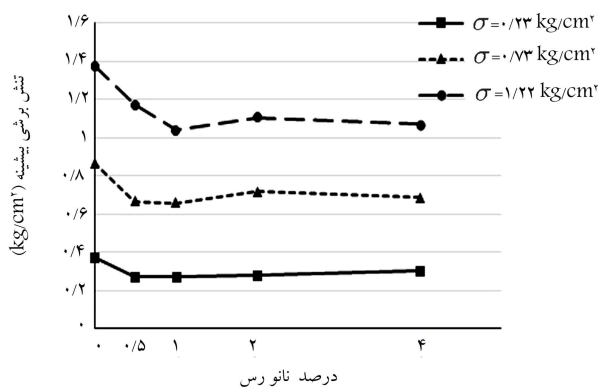
آزمایش برش مستقیم^[۵] مطابق استاندارد ASTM-D۳۰۸۰ بر روی نمونه‌های ماسه‌ی خالص، ۰/۲۰ رس + ۰/۸۰ ماسه و ۰/۴۰ رس + ۰/۶۰ ماسه با کنترل کرنش و در تمامی درصد‌های نانورس انجام شد. هدف از انجام آزمایش اخیر، بررسی تأثیر نانورس در پارامترهای مقاومت برشی مصالح مذکور است. به منظور بررسی اثر درصد‌های مختلف رس در تأثیرگذاری نانورس در چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک روی تمامی ترکیب‌های با درصد‌های ماسه‌ی رس‌دار در ۰/۱ نانورس، آزمایش برش مستقیم زهکشی شده انجام شد. آزمایش‌های اخیر در سه تنش قائم ۰/۲۳، ۰/۷۳ و ۱/۲۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع انجام شدند، که تنش‌های مذکور به ترتیب برای مدل کردن شرایط تنش در عمق‌های حدودی ۱/۲، ۳/۸، ۶/۴ متر انتخاب و به نمونه اعمال شده‌اند. دلیل انتخاب عمق‌های اشاره شده برای اعمال به نمونه این است که بهسازی خاک معمولاً برای خاک‌های سطحی انجام می‌شود. از آنجایی که نوشتار حاضر در حقیقت به دنبال بررسی نانورس به عنوان یکی از افزودنی‌های نوین در جهت بهسازی خاک است و چون بهسازی معمولاً در خاک‌های سطحی انجام می‌شود، انتخاب اعماق مذکور و در نتیجه تنش‌های ذکر شده، می‌تواند منطقی باشد.

در یک جمع‌بندی کلی، برنامه‌ی آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

به منظور مشاهده‌ی تغییرات صورت گرفته در بافت و ساختار خاک به لحاظ فیزیکی و شیمیایی قبل و بعد از اضافه کردن درصد‌های مختلف نانورس در ماسه‌ی خالص و ماسه‌ی رس‌دار از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای پیمایش سطح نمونه‌ها استفاده شده است. در ادامه، جهت سهولت در بیان و ارائه‌ی نتایج از علائم اختصاری جهت ذکر نام مصالح استفاده شده است. در این راستا، از حروف لاتین S، C و N به ترتیب برای ماسه، رس و نانورس استفاده شده است. به عنوان مثال، عبارت ۲N + ۰/۴C + ۰/۶S نشان‌دهنده‌ی ماسه‌ی رس‌دار با ترکیب ۰/۶۰ ماسه و ۰/۴۰ رس به همراه ۰/۲ ماده‌ی افزودنی نانورس است.

جدول ۷. برنامه آزمایش‌ها انجام شده در این تحقیق.

نام آزمایش	درصد ترکیب مصالح	درصد نانورس	تعداد آزمایش	توضیحات
تراکم استاندارد	۹۰٪ ماسه + ۱۰٪ رس	-	۸	-
	۸۰٪ ماسه + ۲۰٪ رس	-	۹	-
	۷۰٪ ماسه + ۳۰٪ رس	-	۷	-
	۶۰٪ ماسه + ۴۰٪ رس	-	۹	-
		۰		
حدود اتزبرگ	۶۰٪ ماسه + ۴۰٪ رس	۰/۵		برای هر کدام از موارد:
		۱	۱۰	حد روانی
		۲	۳	حد خمیری
		۴		
		۰	۳	
		۰/۵	۳	
		۱	۳	در هر یک از موارد، تنش‌های قائم اعمال شده بر نمونه‌ها
		۲	۳	۰٫۲۳، ۰٫۲۳ و ۰٫۲۲
		۴	۳	کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است.
		۰	۳	
		۰/۵	۳	
		۱	۳	
		۲	۳	
		۴	۳	



شکل ۳. مقایسه‌ی تنش برشی پیشینه‌ی مصالح S (ماسه) در درصدهای مختلف N (نانورس).

همان‌طور که در نمودارهای اخیر مشاهده می‌شود، در اغلب موارد، ماسه‌ی خالص، مقاومت برشی پیشینه و نهایی بیشتری نسبت به مخلوط آن با نانورس دارد. این موضوع را می‌توان ناشی از عدم وجود رس در ماسه‌ی خالص دانست، که در نتیجه‌ی آن با افزوده شدن نانورس، پیوند قوی بین ذرات نانورس و خاک ایجاد نشده

جدول ۸. نتایج آزمایش تراکم استاندارد.

نسبت ترکیب مصالح	وزن مخصوص خشک پیشینه (g/cm ³)	رطوبت بهینه (%)
۰/۹S + ۰/۱C	۱/۷۹	۹/۶۸
۰/۸S + ۰/۲C	۱/۹۸	۸/۷۵
۰/۷S + ۰/۳C	۱/۹۷	۹/۴۴
۰/۶S + ۰/۴C	۱/۹۳	۹/۸۵

صورت گرفته و پارامترهای مختلف مقاومت برشی خاک، مانند: چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مقاومت برشی مطالعه شده‌اند.

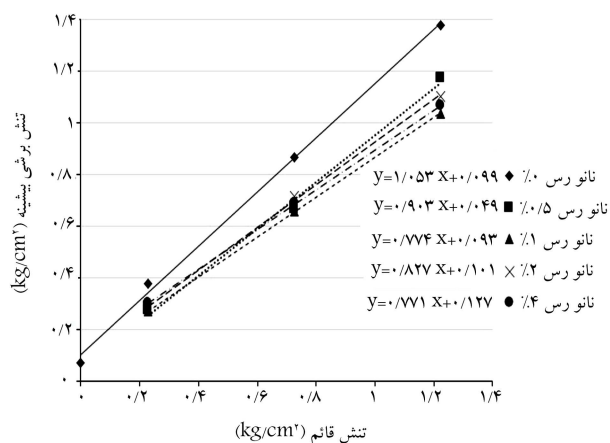
نتایج آزمایش تراکم استاندارد بر روی ماسه‌های رس‌دار با درصدهای متفاوت ماسه و رس در جدول ۸ ارائه شده است. مقدار تراکم لازم در نمونه‌های آزمایش‌های برش مستقیم با استفاده از مقادیر مذکور ساخته شده‌اند.

۱.۲.۵. ماسه‌ی خالص

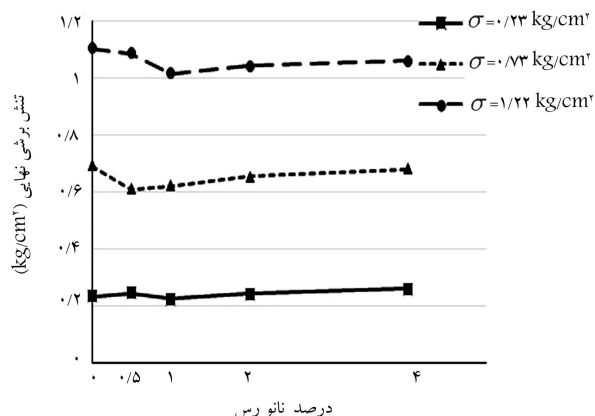
در ادامه و در شکل‌های ۳ و ۴، مقاومت نقطه‌ی اوج و نهایی حاصل از نمودارهای تغییرات تنش برشی در مقابل تغییرمکان افقی برای ماسه‌ی خالص با درصدهای مختلف نانورس رسم شده‌اند.

جدول ۹. پارامترهای مقاومت برشی برای مصالح S با درصد‌های مختلف N.

نسبت ترکیب مصالح		چسبندگی (kg/m^2)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
C_{ult}	C_{max}	C_{ult}	C_{max}	
۴۱/۲	۴۶/۴	۰/۰۴۵	۱/۰۹۹	S
۴۰/۲	۴۲/۱	۰/۰۳۵	۰/۰۴۹	S+۰/۵N
۳۸/۶	۳۷/۷	۰/۰۴۴	۰/۰۹۳	S+۱N
۳۷/۴	۳۹/۶	۰/۰۷۸	۰/۱۰۱	S+۲N
۳۸/۸	۳۷/۶	۰/۰۸۵	۰/۱۲۷	S+۴N



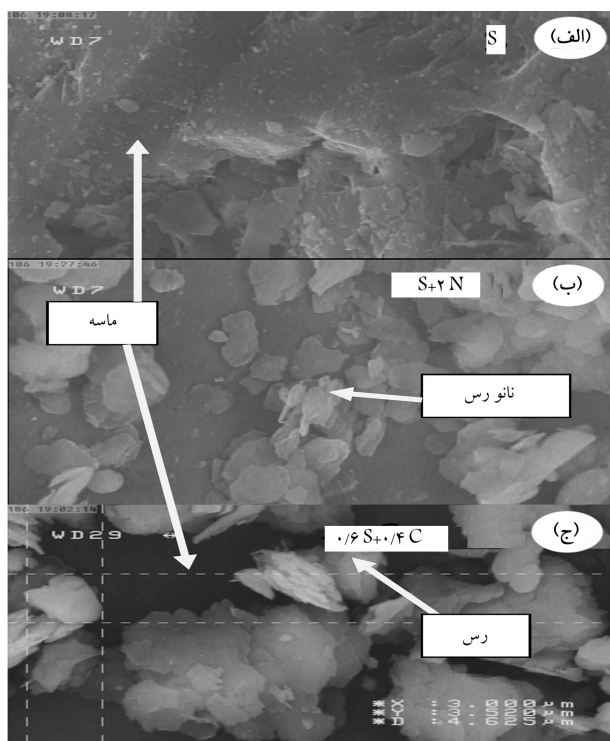
شکل ۵. پوش گسیختگی مصالح S (ماسه) با درصد‌های مختلف N (نانورس) برای تنش برشی بیشینه.



شکل ۴. مقایسه‌ی تنش برشی نهایی مصالح S (ماسه) در درصد‌های مختلف N (نانورس).

و باعث کاهش مقاومت برشی شده است. لذا در بخش‌های بعدی، این موضوع با افزودن رس به مخلوط صحت‌سنجی شده است. با توجه به نمودارهای مذکور تأثیر منفی وجود نانورس در تنش قائم کمتر، که نماینده‌ی عمق‌های سطحی است، کمتر است. همچنین با افزودن درصد نانورس بیشتر از ۱٪، به تدریج افت مقاومت، چیران و بر مقاومت افزوده شده است؛ که این مسئله را می‌توان ناشی از افزایش چسبندگی دانست. سپس چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح ذکر شده با استفاده از پوش گسیختگی موهر-کولمب بررسی شده است، که در شکل ۵ مشاهده می‌شود و مطابق آن و معادله‌ی خط‌های مربوط به پوش گسیختگی مصالح مختلف، که در شکل اخیر وجود دارد، مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در دو حالت تنش برشی بیشینه و نهایی مطابق جدول ۹ به دست آمده است. برای پارامترهای به دست آمده از تنش برشی بیشینه از اندیس max و برای پارامترهای به دست آمده از تنش برشی نهایی از اندیس ult استفاده شده است.

شایان ذکر است که چسبندگی‌های به دست آمده برای ماسه‌ی خالص، مقادیر واقعی چسبندگی نیستند و نوعی چسبندگی ظاهری هستند، که ناشی از مدل خطی ساده‌ی موهر-کولمب است. همان‌گونه که مشاهده شد، نانورس در ماسه‌ی خالص، اثر منفی در مقاومت برشی خاک دارد و نمونه‌های بدون نانورس، تنش برشی بیشتری را نسبت به نمونه‌های حاوی نانورس تحمل می‌کنند. علت این موضوع را می‌توان در زیاد بودن فضای بین دانه‌ها در خاک ماسه‌یی خالص دانست. در واقع همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، به دلیل فضای زیاد بین دانه‌ها، نانوذرات در حفره‌های مذکور قرار می‌گیرند و تأثیر زیادی در متراکم کردن ساختار خاک ندارند و در نتیجه



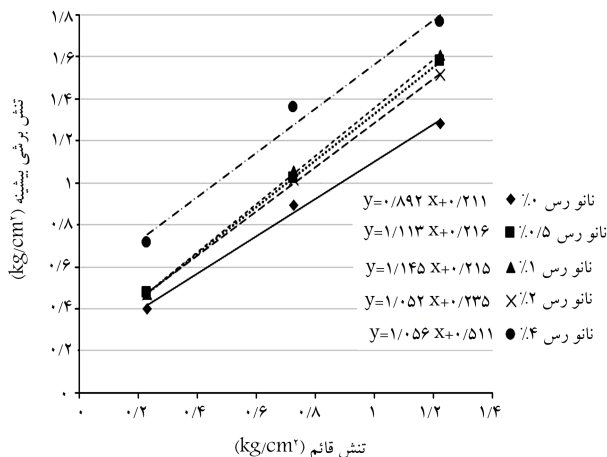
شکل ۶. عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر.

می‌توان ناشی از افزایش چسبندگی حاصل از افزودن نانورس دانست. زیرا به دلیل واکنش‌پذیری بسیار فعال نانوذرات با دیگر ذرات خاک، چسبندگی و اتصال بین ذرات افزایش می‌یابد. پوش گسیختگی موهر - کولمب مصالح مذکور نیز در حالت تنش برشی بیشینه در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ۹ و معادله‌ی خط‌هایی که در آن مشاهده می‌شود، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح مورد نظر به دست آمده است، که در جدول ۱۰ ارائه شده‌اند.

با توجه به نتایج ذکر شده مشاهده می‌شود که در هر دو حالت تنش برشی نهایی و بیشینه، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک با افزودن نانورس نسبت به مصالح بدون نانوافزودنی افزایش یافته و بیشترین زاویه‌ی اصطکاک مربوط به $AS+0/2C+1N$ بوده است. در درصد‌های بیشتر از ۱٪، زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش یافته است. افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک ناشی از افزایش نانورس را می‌توان به سیمانتاسیون به وجود آمده در بین ذرات و همچنین پُرشدگی فضای خاکی بین دانه‌ها نسبت داد. از یک طرف، افزایش نانورس‌ها به دلیل تمایل زیاد به چسبندگی با دیگر دانه‌های خاک می‌توانند تا حدودی باعث سیمانته شدن خاک شوند و از طرف دیگر، با پُر کردن فضای خالی بین ذرات می‌توانند باعث انسجام و تراکم بیشتر توده‌ی خاک شوند. همچنین به دلیل واکنش‌پذیری بسیار فعال نانوذرات با دیگر ذرات خاک، چسبندگی و اتصال بین ذرات افزایش یافته است. با افزایش بیشتر نانورس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی با کاهش رو به رو شده است، که ناشی از عدم پراکندگی مناسب نانورس در خاک برای درصد‌های بالای نانورس است، که سبب می‌شود توده‌هایی از نانوذرات در خاک ایجاد شوند که باعث کاهش زاویه‌ی اصطکاک و افزایش چسبندگی می‌شوند (شکل ۱۳ - ج). در هر دو حالت تنش برشی بیشینه و نهایی، بیشینه‌ی چسبندگی مربوط به مصالح با ترکیب درصد $AS+0/2C+4N$ است. یکی از دلایل افزایش چسبندگی، ماهیت نانورس است. نانورس با جذب آب بیشتر در رطوبت بهینه برای نمونه‌های تثبیت شده، حالتی چسب مانند پیدا می‌کند و ذرات خاک را به هم می‌چسباند، که این عاملی برای افزایش چسبندگی در نمونه‌های شامل نانورس می‌شود.

زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک در درصد بهینه‌ی نانورس با افزایش ۱۷ درصدی برای حالت تنش برشی بیشینه و افزایش ۱۳ درصدی برای حالت تنش

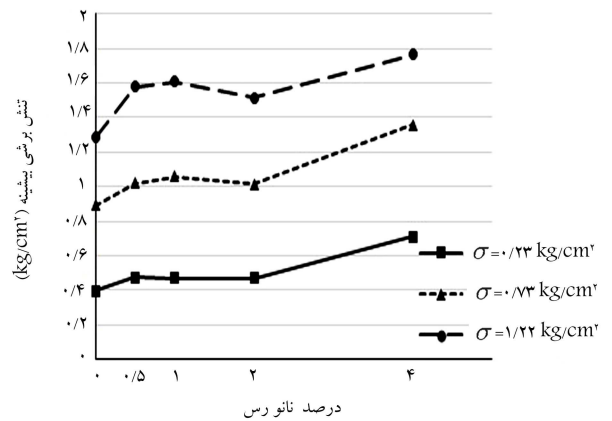


شکل ۹. پوش گسیختگی مصالح $AS+0/2C$ با درصد‌های مختلف N برای تنش برشی بیشینه.

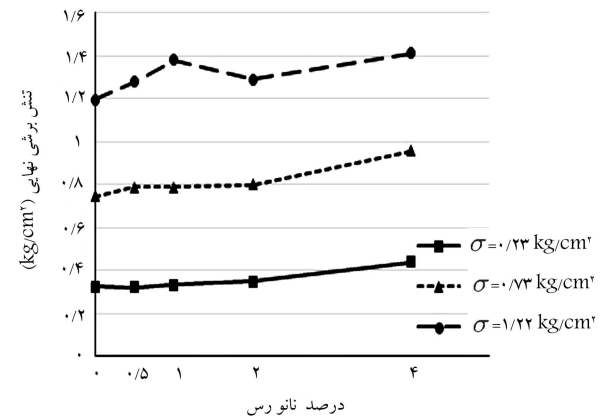
نمی‌تواند تأثیر مثبتی در مقاومت برشی ماسه داشته باشند. همچنین در این نوع مصالح به دلیل عدم وجود رس، نانوذرات نمی‌توانند در واکنش‌های شیمیایی لازم برای اثرگذاری در مقاومت خاک شرکت کنند. با توجه به مطالب ذکر شده نمی‌توان نانورس را به عنوان یک افزودنی در جهت اصلاح خصوصیات خاک‌های ماسه‌یی خالص به کار برد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمونه‌های حاوی نانورس، ذراتی از افزودنی نانورس به سطح دانه‌های ماسه چسبیده و باعث شده‌اند که دانه‌ها راحت‌تر روی هم بلغزند، در حالی که در نمونه‌ی بدون افزودنی چنین ذراتی در مجاورت دانه‌های ماسه مشاهده نمی‌شود. در نتیجه با توجه به تصاویر اشاره شده و نتایج آزمایش‌های برش مستقیم بر روی ماسه‌ی خالص می‌توان نتیجه گرفت که افزایش بیش از حد نانورس موجب کاهش زاویه‌ی اصطکاک خاک شده است.

۲.۲.۵. ماسه‌ی رس‌دار با ترکیب ۸۰٪ ماسه + ۲۰٪ رس
 برای بررسی اثر نانورس در مقاومت برشی ماسه‌ی رس‌دار، آزمایش برش مستقیم بر روی درصد‌های مختلف ماسه و رس صورت گرفت. در ادامه، مقاومت نقطه‌ی اوج و نهایی حاصل از نمودارهای تنش - تغییرمکان مصالح $AS+0/2C$ در درصد‌های مختلف نانورس در شکل‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌شود، که مطابق آنها، در بیشتر نمودارها، افزودن نانورس تا درصد‌های ۵٪ و ۱٪ سبب افزایش مقاومت برشی بیشینه و نهایی مصالح مذکور شده است. این افزایش در مقاومت برشی را



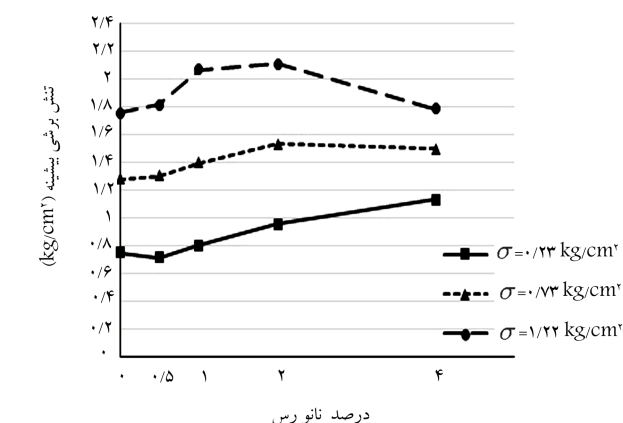
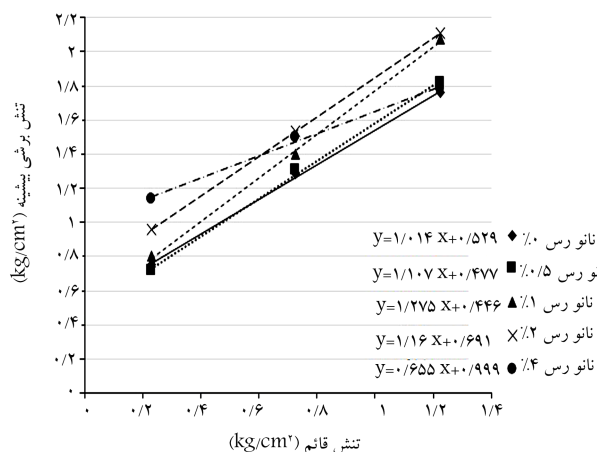
شکل ۷. مقایسه‌ی تنش برشی بیشینه مصالح $AS+0/2C$ در درصد‌های مختلف N.



شکل ۸. مقایسه‌ی تنش برشی نهایی مصالح $AS+0/2C$ در درصد‌های مختلف N.

جدول ۱۰. پارامترهای مقاومت برشی برای مصالح $0/2C+0/8S$ با درصد‌های مختلف N.

نسبت ترکیب مصالح		چسبندگی (kg/m^2)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	
Cult	Cmax	Cult	Cmax	Cult	Cmax
$0/2C$	$0/8S$	$0/211$	$0/121$	$41/2$	$41/7$
$0/2C+0/5CN$	$0/8S$	$0/226$	$0/096$	$43/9$	$48/1$
$0/2C+1CN$	$0/8S$	$0/215$	$0/071$	$46/4$	$48/9$
$0/2C+2CN$	$0/8S$	$0/235$	$0/123$	$43/5$	$46/5$
$0/2C+4CN$	$0/8S$	$0/511$	$0/225$	$44/4$	$46/6$



شکل ۱۰. مقایسه‌ی تنش برشی بیشینه‌ی مصالح $0/4C+0/6S$ در درصد‌های مختلف N.

شکل ۱۲. پوش گسیختگی مصالح $0/4C+0/6S$ با درصد‌های مختلف N برای تنش برشی بیشینه.

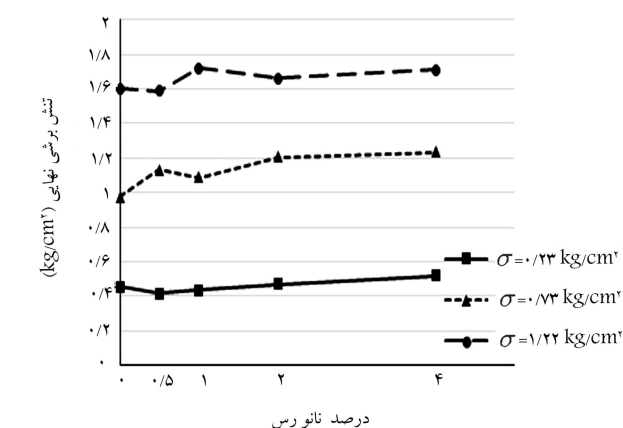
مقاومت برشی می‌تواند با افزایش بیش از حد درصد نانورس، تأثیر منفی به خود بگیرد و روند کاهشی را تجربه کند.

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، این افزایش مقاومت کلی به دلیل افزایش چسبندگی و اتصال بین نانوذرات و سایر ذرات خاک است. در واقع، ذرات نانورس بین ذرات بزرگ تر خاک قرار گرفته و حفره‌ها بین آنها را پر کرده و ساختار متراکم‌تری ایجاد کرده‌اند، که سبب افزایش مقاومت خاک شده است.

در ادامه، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح $0/4C+0/6S$ در درصد‌های مختلف نانورس، با استفاده از پوش گسیختگی موهر - کلمب بررسی شده است. پوش گسیختگی مصالح $0/4C+0/6S$ در حالت تنش برشی بیشینه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

با توجه به شکل ارائه شده و معادله‌ی خط‌های مربوط به پوش گسیختگی مصالح مختلف، که در شکل‌ها وجود دارد، مقادیر چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی در دو حالت تنش برشی بیشینه و نهایی در جدول ۱۱ ارائه شده است، که با مطالعه‌ی نتایج موجود در آن مشاهده می‌شود که در هر دو حالت تنش برشی نهایی و بیشینه، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک با افزودن نانورس نسبت به مصالح بدون نانوفزودنی افزایش یافته و بیشترین زاویه‌ی اصطکاک مربوط به مصالح $0/4C+1N$ و $0/4C+0/6S$ بوده و در درصد‌های بیشتر از ۱٪، زاویه‌ی اصطکاک داخلی کاهش یافته است.

همان‌طور که در بخش مربوط به مصالح $0/2C+0/8S$ بیان شد، افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی ناشی از افزایش نانورس را می‌توان به سیمانتاسیون به وجود آمده در بین ذرات و همچنین پُزدگی فضای خاکی بین دانه‌ها نسبت



شکل ۱۱. مقایسه‌ی تنش برشی نهایی مصالح $0/4C+0/6S$ در درصد‌های مختلف N.

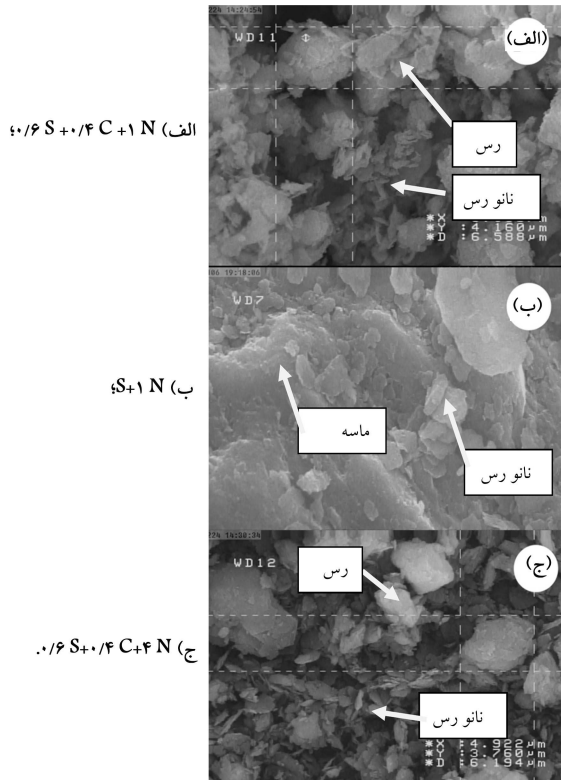
برشی نهایی همراه بوده و نیز چسبندگی در بهترین حالت، افزایش ۱۴۲ و ۸۶ درصدی به ترتیب برای حالت‌های بیشینه و نهایی داشته است.

۳.۲.۵. ماسه‌ی رس‌دار با ترکیب ۶۰٪ ماسه + ۴۰٪ رس

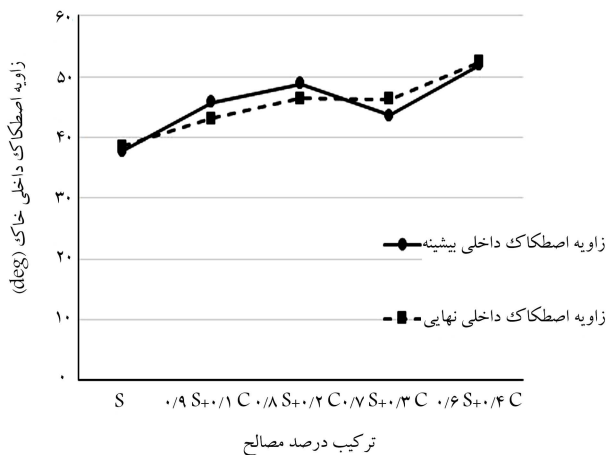
مقاومت نقطه‌ی اوج و نهایی حاصل از نمودارهای تنش - تغییرمکان مصالح $0/4C+0/6S$ در درصد‌های مختلف نانورس در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ با هم مقایسه شده‌اند، که مطابق آنها تنش برشی بیشینه و نهایی مخلوط ماسه‌ی رس‌دار با افزایش درصد نانورس غالباً افزایش یافته‌اند. در واقع، در مصالح اخیر، نانورس سبب افزایش مقاومت برشی شده است. البته افزایش درصد نانورس روی افزایش

جدول ۱۱. پارامترهای مقاومت برشی برای مصالح $0/4C + 0/6S$ با درصد‌های مختلف N.

نسبت ترکیب مصالح	چسبندگی (kg/m^2)		زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	
	C_{ult}	C_{max}	C_{ult}	C_{max}
$0/4C + 0/6S$	۵۲۹/۰	۱۷۴/۰	۴۹/۱	۴۵/۴
$0/4C + 0/5CN + 0/6S$	۴۷۷/۰	۱۸۹/۰	۴۹/۷	۴۷/۹
$0/1CN + 0/6S$	۴۴۶/۰	۱۴۱/۰	۵۲/۳	۵۱/۹
$0/2CN + 0/6S$	۶۹۱/۰	۲۳۹/۰	۵۰/۳	۴۹/۲
$0/4CN + 0/6S$	۹۹۹/۰	۲۸۵/۰	۵۰/۲	۳۳/۲



شکل ۱۳. عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر.



شکل ۱۴. مقایسه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح مختلف در ۱٪ نانورس.

داد. با افزایش بیشتر نانورس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی با کاهش رو به رو می‌شود، که این را می‌توان ناشی از عدم پراکندگی مناسب نانورس در خاک برای درصد‌های بالای نانورس دانست. همان‌طور که در شکل ۱۳ و با مقایسه قسمت‌های الف و ج مشاهده می‌شود، با افزایش درصد نانورس، پراکندن یکنواخت آن در توده‌ی خاک مشکل می‌شود و این ذرات به هم می‌چسبند و دیگر عملکرد نانو ندارند. در نتیجه، چسبندگی خاک افزایش و زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن کاهش یافته است؛ زیرا توده‌های نانورس مانع از اصطکاک دانه‌های ماسه می‌شوند. در هر دو حالت، بیشینه‌ی چسبندگی مربوط به مصالح با ترکیب درصد $0/4C + 0/6S$ است. این افزایش، به دلیل جذب آب توسط نانورس و ایجاد حالتی مشابه چسب توسط نانورس است.

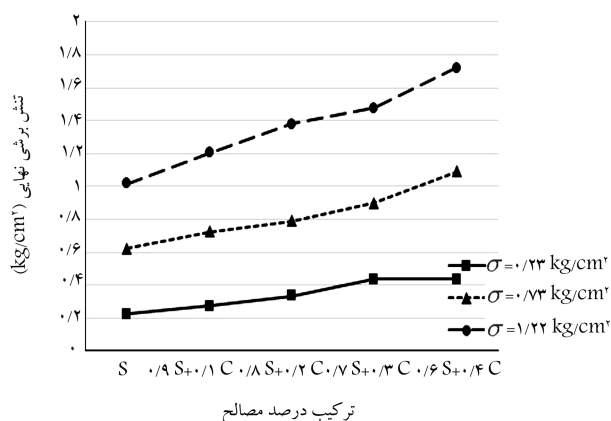
در درصد بهینه‌ی نانورس، زاویه‌ی اصطکاک داخلی نسبت به حالت بدون نانورس، ۱۴٪ برای حالت تنش برشی بیشینه و ۷٪ برای حالت تنش برشی نهایی افزایش یافته است. همچنین چسبندگی در بهترین حالت با افزایش ۸۹ و ۶۴ درصدی به ترتیب برای حالت‌های بیشینه و نهایی همراه بوده است.

در نتیجه، عموماً خاک‌های غنی شده با نانوذرات، زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی بزرگ‌تری دارند. این موضوع می‌تواند به دلیل پُر شدن فضای خالی بین ذرات نانورس، میل به چسبندگی نانورس‌ها به سایر اجزاء، و سیما تاسیون ناشی از ذرات نانورس باشد، که در نهایت باعث ایجاد توده‌های متراکم نسبتاً قوی‌تر با مقاومت برشی بزرگ‌تر در توده‌ی خاک می‌شود.

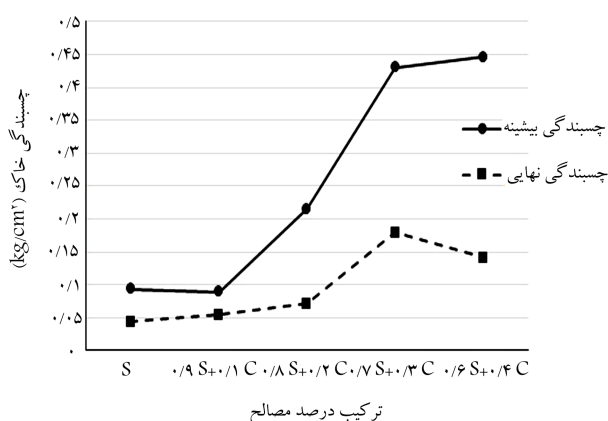
در مجموع، بررسی تصاویر FESEM نشان می‌دهد تا هنگامی که ذرات نانورس، در صورت وجود رس در ماسه، به‌طور یکنواخت در خاک پراکنده شوند، سبب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطبق بر آزمایش‌های مقاومتی انجام شده می‌شوند. اما در صورت عدم وجود رس یا عدم پراکندگی یکنواخت، اثر معکوس در رفتار خاک خواهند داشت.

۴.۲.۵. بررسی اثر رس در چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی ماسه‌ی رس‌دار در درصد ثابت نانورس

برای مطالعه‌ی اثر رس در پارامترهای مقاومت برشی ماسه‌ی رس‌دار در درصد ثابت نانورس، با توجه به نتایج بخش‌های قبل، از مقدار نانورس به اندازه‌ی ۱٪ وزنی استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی دقیق اثر رس علاوه بر آزمایش‌های انجام شده‌ی قبلی از ماسه‌های رس‌دار با ترکیب درصد‌های $0/1C + 0/9S$ و $0/3C + 0/7S$ به همراه ۱٪ وزنی نانورس استفاده شده و مصالح مذکور نیز تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفتند. در ادامه و در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، به بررسی اثر رس در زاویه‌ی اصطکاک داخلی و چسبندگی ماسه‌ی رس‌دار



شکل ۱۷. مقایسه‌ی تنش برشی نهایی مصالح مختلف در ۱٪ نانورس.



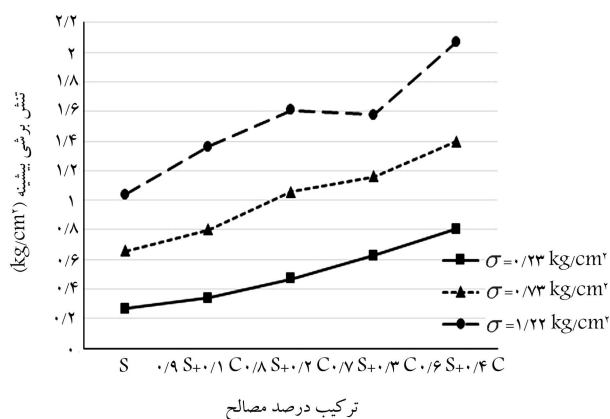
شکل ۱۵. مقایسه‌ی چسبندگی مصالح مختلف در ۱٪ نانورس.

۶. نتیجه‌گیری

نانوذرات رس به عنوان مصالحی برای اصلاح خاک می‌توانند استفاده شوند. در پژوهش حاضر، در ابتدا یک ماسه‌ی خالص تهیه و پس از دانه‌بندی و شناسایی اولیه، مقاومت برشی و پارامترهای مقاومت برشی آن به کمک آزمایش برش مستقیم اندازه‌گیری شدند. سپس، با افزودن درصد‌های مختلف رس نیز پارامترهای اخیر سنجش شدند. از آنجایی که هدف پژوهش حاضر، ارزیابی تأثیر نانورس در عملکرد خاک است، درصد‌های مختلفی از نانورس به خاک‌های مذکور (ماسه‌ی خالص و ماسه‌ی رس‌دار متشکل از درصد‌های مختلف رس) افزوده شد و اثر افزودن نانورس در خاک‌های اشاره شده ارزیابی شد. بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر، شاخصه‌های حدود اتربرگ و مقاومت برشی مخلوط خاک مورد مطالعه با نانوذرات رس در مقایسه با خاک بدون نانورس بهبود یافته است. این مسئله در بهسازی خاک‌های سطحی، که برای انجام پروژه‌های مختلف عمرانی در خاک‌های ضعیف لازم است، می‌تواند مفید باشد.

با توجه به نتایج آزمایشگاهی ملاحظه شده است که ذرات نانورس با دانه‌های ماسه‌ی خالص، پیوند قوی ایجاد نکرده و در نتیجه‌ی افزایش ذرات نانورس به ماسه‌ی خالص، حتی کاهش مقاومت برشی خاک نیز محتمل است. اما افزایش درصد اندکی از ذرات نانورس (در حدود ۱٪) به ماسه‌ی رسی می‌تواند باعث افزایش نسبی در مقاومت برشی خاک و پارامترهای مقاومت برشی خاک شود. برای خاک مورد مطالعه در پژوهش حاضر، بهترین ترکیب از این لحاظ مربوط به مصالح با ترکیب درصد $AS+0.2C+4N$ بوده است. اما اگر افزایش ذرات نانورس از یک حد فراتر رود، می‌تواند تأثیر منفی در مقاومت برشی خاک و پارامترهای مقاومت برشی بگذارد.

با توجه به اطلاعات به دست آمده از مطالعه‌ی حاضر روشن می‌شود که نانوذرات، گزینه بسیار خوبی برای بهبود خصوصیات خاک هستند. ولی استفاده‌ی گسترده از نانوذرات در عمل و به طور گسترده نیاز به پژوهش‌های گسترده‌تری در این زمینه دارد. همچنین این نتیجه حاصل شده است که مسائل اقتصادی، که با توجه به قیمت بالای نانوذرات ایجاد شده است، قابل حل است؛ زیرا درصد‌های کمی از نانورس می‌تواند باعث افزایش ظرفیت باربری و بهبود خواص خمیری خاک شوند. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان دریافت که رس در ابعاد نانو به علت داشتن سطح ویژه بالا، تأثیر عمده‌ی در خواص مهندسی خاک می‌گذارد و لذا با درصد‌های کمی از نانورس می‌توان به نتایج بهتری دست یافت.



شکل ۱۶. مقایسه‌ی تنگش برشی بیشینه‌ی مصالح مختلف در ۱٪ نانورس.

با ۱٪ وزنی نانورس در دو حالت تنش برشی بیشینه و نهایی پرداخته شده است.

با توجه به نمودارهای اخیر، تأثیر درصد رس و ماسه در زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی ماسه‌ی رس‌دار با ۱٪ نانورس سبب شده است که با افزایش میزان رس، پارامترهای مقاومتی، روند کلی افزایشی (با اغماض از برخی موارد خاص) پیدا کنند. دلیل این موضوع را می‌توان در قرار گرفتن دانه‌های ریز رس در فضای بین دانه‌های درشت‌تر ماسه و همچنین تمایل به ایجاد چسبندگی بیشتر در ترکیب با ذرات نانو دانست. این موضوع باعث ایجاد توده‌ی متراکم‌تر خاک با پارامترهای مقاومتی بیشتر می‌شود. همچنین، از آنجا که دانه‌بندی رس بین ماسه و نانورس است، امکان ایجاد پیوندهای قوی بین ذرات امکان‌پذیر وجود دارد (مقایسه‌ی قسمت‌های الف و ج در شکل ۶ و قسمت‌های الف و ب در شکل ۱۲). از طرف دیگر، به دلیل طبیعت چسبنده‌ی رس، افزایش قابل ملاحظه‌ی چسبندگی ماسه‌ی رس‌دار با افزایش درصد رس به وقوع می‌پیوندد. در ادامه و در شکل‌های ۱۶ و ۱۷، مقاومت نقطه‌ی اوج و نهایی حاصل از نمودارهای تنش - تغییرمکان، در ماسه‌های رس‌دار با ۱٪ نانورس بررسی شده است.

با توجه به تغییرات چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی، همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزایش نسبت رس به ماسه باعث افزایش مقاومت برشی بیشینه و نهایی ماسه‌های رس‌دار در درصد ثابت نانورس شده است، که به دلیل ایجاد توده‌های متراکم‌تر و پیوندهای قوی‌تر در خاک است، که در اثر فرو رفتن ذرات رس در فضای بین دانه‌های ماسه ایجاد شده است.

تقدیر و تشکر

نویسندگان نوشتار حاضر بر خود لازم می‌دانند از ستاد ویژه توسعه فناوری نانو بابت حمایت‌های مالی انجام شده از پژوهش حاضر (با شماره پرونده ۵۶۱۲۴) تشکر کنند.

از طرف دیگر، با بررسی تصاویر FESEM ملاحظه شد که در صورت وجود رس در ماسه (ماسه‌ی رس‌دار) تا زمانی که ذرات نانورس به طور یکنواخت در خاک پراکنده شوند، سبب بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک منطبق بر آزمایش‌های مقاومتی انجام شده می‌شوند. اما در صورت عدم وجود رس یا عدم پراکنده‌ی یکنواخت، اثر معکوس در رفتار خاک خواهند داشت.

پانوشته‌ها

1. standard compaction test
2. Atterberg limits Test
3. liquid limit
4. plastic limit
5. direct shear test

منابع (References)

1. Maity, J., Chattopadhyay, B.C. and Mukherjee, S.P. "Improvement of characteristics of clayey soil mixed with randomly distributed natural fibers", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, **99**(1), pp. 55-65 (2018).
2. Khazaei, J. and Moayedi, H. "Soft expansive soil improvement by eco-Friendly waste and quick lime", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **44**(10), pp. 8337-8346 (2019).
3. Janalizadeh, A., Jahanshahi, M., Roshan, N. and et al. "Evaluation of the nano silica effect on improvement of the clay soils strength behavior", *Proc. of the 7th National Congress of Civil Engineering, Zahedan* (2013).
4. Gutierrez, M.S. "Potential applications of nanomechanics in geotechnical engineering", *Proc. of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, UK*, pp. 29-30 (2005).
5. Sani, M.A., Arabani, M., Haghi, K.A. and et al. "Nanoclay influence on geotechnical properties of clayey sands", *Proc. of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Tehran, Iran* (2010).
6. Ahmadi, H. and Shafiee, O. "Experimental comparative study on the performance of nano-SiO₂ and microsilica in stabilization of clay", *The European Physical Journal Plus*, **134**(9), p. 459 (2019).
7. Bala, N., Kamaruddin, I., Napiah, M. and et al. "Polymer nanocomposite-modified asphalt: characterisation and optimisation using response surface methodology", *Arabian Journal for Science and Engineering*, **44**(5), pp. 4233-4243 (2019).
8. Ghanoun, S.A., Tanzadeh, J. and Mirsepahi, M. "Laboratory evaluation of the composition of nano-clay, nano-lime and SBS modifiers on rutting resistance of asphalt binder", *Construction and Building Materials*, **238**, pp. 117592 (2020).
9. Majeed, Z.H. and Taha, M.R. "A review of stabilization of soils by using nanomaterials", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **7**(2), pp. 576-581 (2013).
10. Yonekura, R. and Miwa, M. "Fundamental properties of sodium silicate based grout", *Proc. Of the 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, Singapore*, pp. 439-444 (1993).
11. Persoff, P., Apps, J.A., Moridis, G.J. and et al. "Effect of dilution and contaminants on strength and hydraulic conductivity of sand grouted with colloidal silica gel", *Proc. of International Containment Technology Conference and Exhibition, St. Petersburg, FL* (1997).
12. Gallagher, P.M. and Lin, Y. "Column testing to determine colloid silica transport mechanisms", *Sessions of the Geo-Frontiers Congress* (2005).
13. Gallagher, P.M., Conlee, C.T. and Rollins, K.M. "Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **133**(2), pp. 186-196 (2007).
14. Zhang, G., Germaine, J.T., Whittle, A.J. and et al. "Index properties of a highly weathered old alluvium", *Geotechnique*, **54**(7), pp. 441-451 (2004).
15. Taha, M.R. "Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures", *Proc. of the 3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Prague, Czech Republic*, pp. 377-382 (2009).
16. Taha, M.R. and Ying, T. "Effects of carbon nanotube on kaolinite: basic geotechnical behavior", *ICCE-18, Anchorage, Alaska, USA* (2010).
17. Sani, M.A. "Laboratory investigation of the nanoparticles effect on the engineering properties of the sandy soils", *Master of science thesis, University of Guilan, Rasht, Iran* (2011).
18. Huang, Y., Wen, Z., Wang, L. and et al. "Centrifuge testing of liquefaction mitigation effectiveness on sand foundations treated with nanoparticles", *Engineering Geology*, **249**, pp. 249-256 (2019).
19. Arora, A., Singh, B. and Kaur, P. "Performance of nanoparticles in stabilization of soil: a comprehensive review", *Materials Today: Proceedings*, **17**, pp. 124-130 (2019).
20. Choobasti, A.J., Samakoosh, M.A. and Kutanaei, S.S. "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium

- carbonate and reinforced with carpet waste fibers”, *Construction and Building Materials*, **211**, pp. 1094-1104 (2019).
21. Ali Zomorodian, S.M., Shabnam, M., Armina, S. and et al. “Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives”, *Applied Clay Science*, **140**, pp. 140-147 (2017).
 22. Kulanthaivel, P., Soundara, B., Velmurugan, S. and et al. “Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement”, *Materials Today: Proceedings* (2020).
 23. Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C.L. and et al. “Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay – A sustainable material for construction”, *Construction and Building Materials*, **158**, pp. 454-463 (2018).
 24. Zoriyeh, H., Erdem, S., Gürbüz, E. and et al. “Nanoclay modified high plasticity soil as a building material: micro-structure linked engineering properties and 3D digital crack analysis”, *Journal of Building Engineering*, **27**, pp. 1-13 (2020).
 25. Ghasabkolaei, N., Janalizadeh, A., Jahanshahi, M. and et al. “Physical and geotechnical properties of cement-treated clayey soil using silica nanoparticles: An experimental study”, *The European Physical Journal Plus*, **131**(5), pp. 134 (2016).
 26. Bahari, M. “Laboratory investigation of silts geotechnical properties improvement using nanoclay”, *Master of science thesis, University of Guilan, Rasht, Iran* (2013).
 27. ASTM, “Annual book of ASTM standards”, *American Society for Testing and Materials* (2006).