

تأثیر افزودنی نانو رس مونت موریلونیت Na^+ بر پارامترهای مکانیکی خاکهای رسی

حمیدرضا خسروانی مقدم^۱، محمدرضا آصف^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی

۲. استادیار زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی

asef@khu.ac.ir

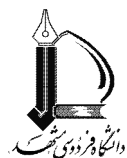
چکیده

امروزه استفاده از فناوری نانو موجب پیشرفتهای چشمگیر در علوم مختلف شده است. در همین راستا تحقیقاتی در زمینه کاربرد این فناوری در ژئوتکنیک انجام شده که نتایج موفقیت آمیز آن جامعه مهندسی را به مطالعه بیشتر در این حوزه سوق داده است. در این پژوهش اثر نانو رس مونت موریلونیت Na^+ بر بهبود خواص مکانیکی خاکهای چسبنده با انجام چند آزمایش مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور آزمایش های حدود آتربرگ، مقاومت فشاری محدود نشده و برش مستقیم به روش پروکتور استاندارد بر روی خاک های نمونه رسی که ساختاری چسبنده دارند انجام شد. برای مطالعه از دو نوع خاک رسی تجاری و رس لای دار شهر قم استفاده شده است. نتایج نشان دهنده آنست که با افزایش درصد نانو رس مونت موریلونیت Na^+ در این خاک ها، حد خمیری و روانی و همچنین مقاومت تک محوری به میزان قابل توجهی افزایش می یابد.

کلمات کلیدی: نانو رس، خاک رسی، حدود آتربرگ، آزمایش برش مستقیم، مقاومت فشاری محدود نشده

۱. مقدمه

همزمان با توسعه فناوری نانو در جهان، اصلاح پارامترهای رفتاری خاکهای مختلف به یکی از مسائل مهم پیش روی پژوهشگران در حوزه ژئوتکنیک تبدیل شده است (سیدی گلسفیدی ع، ۱۳۹۰). اضافه نمودن پاره ای از افزودنیها به خاک، به عنوان یکی از روشهای مؤثر در بهبود برخی از مشخصه های رفتاری خاک مانند رابطه ی تنش- کرنش-مقاومت، نفوذپذیری و خودترمیمی، به ویژه در بعضی از سازه های ژئوتکنیکی نظیر خاکریزهای جاده ها، شیروانی های مصنوعی، مدفن های زباله های شهری و سدهای خاکی، همواره مد نظر بوده است (میخائیل و هوکلا، ۲۰۰۲). در سالهای اخیر برای اصلاح پارامترهای مهندسی خاک افزودنی های متداول (غیر نانو) همچون آهک، کلسیم کلرید، خاکستر بادی، قیر، کامپوزیت های نو ترکیب، پلیمرهای سبک و سنگین و غیره در مطالعات سایر پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است (درماتاس و منگ، ۲۰۰۳؛ گوتیرز، ۲۰۰۵؛ نادری نیا و نایینی، ۲۰۰۹). در کنار آن، نانومواد که حائز ویژگی های منحصر به فردی هستند و استفاده از آنها در دیگر شاخه های علوم مهندسی منجر به تحولاتی بنیادی شده است، در مهندسی ژئوتکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته اند (سیدی گلسفیدی ع، ۱۳۹۰).



مطالعات مهندسی مواد نشان می دهد که مواد در محدوده ی نانو اغلب رفتار فیزیکی بسیار متفاوتی با مواد توده ای از خود نشان می دهند. خصوصیات مواد نانو مقیاس را نمی توان ضرورتاً با توجه به ویژگیهای مواد در مقیاسهای بزرگتر پیش بینی کرد. تغییرات مهم در رفتار مواد نه تنها با تغییرات مداوم رفتاری مواد در اندازه های کوچک، بلکه در اثر ظهور پدیده های جدیدی نظیر محدودیت اندازه ی کوانتومی، ترابری شبه موجی و غلبه ی پدیده های سطحی صورت می گیرد (گوتیرز، ۲۰۰۵). تاها (۲۰۰۹) نشان داد افزودن نانو خاک به دست آمده از فرآیند آسیاب گلوله ای برای انواعی از خاکهای ریزدانه و انجام آزمایشهای حدود اتربرگ بر روی آنها، منجر به افزایش حدود خمیری و روانی، ولی کاهش دامنه ی خمیری شده است. همچنین افزودن نانو خاک به نمونه های تثبیت شده با سیمان مقاومت فشاری آنها را افزایش داده است. بر حسب داده های آزمایش تراکم بر روی خاکستر بادی، دانبل و همکاران (۲۰۰۹) نشان دادند افزایش در مقدار ارگانوسیلان* در ابعاد نانو، منجر به کاهش مقدار رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک بیشینه شده است و مطالعات میدانی نشان داد که اصلاح خاک با ارگانوسیلان، افزایش مقاومت، کاهش پتانسیل تورم و کاهش چشمگیر رسانایی هیدرولیکی را به همراه دارد.

در این پژوهش اثر افزودن نانو رس بر رفتار خمیری و مقاومت فشاری تک محوری خاکهای ریزدانه مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به اینکه در زمینه استفاده از نانو مواد و تاثیر آن بر خواص مهندسی خاک مطالعه جامعی صورت نگرفته است لذا نتایج این پژوهش می تواند درک بهتری از رفتار نانو رس در خاک به ما ارائه دهد و بدین طریق، گامی موثر در استفاده از نانو فناوری در مهندسی ژئوتکنیک برداشته شود.

۲. مواد مصرفی

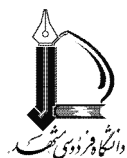
نانو رس مونت موریلونیت استفاده شده در این تحقیق، دارای یون Na^+ در ساختار خود می باشد. متوسط ضخامت هریک از لایه های آن کمتر از ۲۰ نانومتر بوده و دارای بیش از ۹۸ درصد کانی مونت موریلونیت است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول شماره ۱ بیان شده است. درصد حضور نانو رس در نمونه های رسی بمنظور انجام آزمایش های حد روانی و حد خمیری به میزان ۱، ۲ و ۵ درصد حجم کل نمونه آزمایش و برای آزمایش های برش مستقیم و مقاومت فشاری فشاری تک، ۰/۵ و ۱ درصد انتخاب شده است.

جدول شماره ۱- مشخصات نانو رس مورد استفاده

ابعاد لایه ها	ضخامت فیلم کربستالی	فاصله صفحات	درصد مونت موریلونیت	چگالی ظاهری	میزان رطوبت موجود
$1 \times 20 \times 1000 \text{ nm}$	20 nm	1.1-3.2 nm	98%	0.5 gr/cm^3	3%

به منظور مطالعه جامع اثر نانو رس بر خواص مکانیکی خاکهای رسی چسبنده، از دو نوع خاک استفاده شده است. خاک نوع اول کائولینیت تجاری و خاک نوع دوم خاک رس لای دار شهر قم می باشد که با حفر گمانه دستی از عمق ۳ متری رسوبات رسی واقع در شمال غرب این شهر استحصال گردیده است. خاکهای مورد استفاده از الک نمره ۲۰۰ عبور داده شده اند.

* ارگانوسیلان، پلیمری شیمیایی است که با استفاده از تقویت پیوندهای عناصر سیلیسیم و کربن در آزمایشگاه بدست آمده است و چه در مقیاس نانو و چه در مقیاس های بزرگتر استفاده های بسیاری برای بهسازی و کاهش نفوذپذیری در مواد مختلف را سبب می شود.



۳. شیوه انجام آزمایش

در این تحقیق در مرحله اول آزمایشات حدود آتربرگ (حد روانی و حد خمیری) مطابق استاندارد ASTM-D-4318-98 برای هر دو نمونه خاک مورد آزمایش یعنی رس لای دار شهر قم و کائولینیت تجاری انجام شد. برای هر نوع خاک چهار نمونه با افزودن درصد های متفاوت از نانو رس (۰٪، ۱٪، ۲٪، ۵٪) تهیه شد و آزمایشهای حدود آتربرگ روی آنها انجام شد. هدف از انجام این آزمایشات بررسی تاثیر مواد نانویی بر خصوصیات پلاستیسیته و درصد جذب آب بود.

در مرحله بعد آزمایش برش مستقیم مطابق با استاندارد ASTM-D-3080 با هدف بررسی تاثیر نانو رس مونت موریلونیت بر روی تعیین مقاومت برشی خاک و پارامترهای مقاومتی خاک از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی انجام شد. برای هر یک دو نوع خاک سه نمونه با افزودن درصد های متفاوت از نانو رس (۰٪، ۵٪، ۱٪) تهیه شد.

در مرحله بعدی مطابق استاندارد ASTM-D-2166 جهت انجام آزمایش تک محوری، ابتدا بر روی خاک های مورد مطالعه آزمایش پروکتور استاندارد صورت پذیرفت و رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک حداکثری برای هر دو نوع خاک رسی چسبنده تعیین گردید. نمونه ها در تراکم ثابت که از آزمایش پروکتور استاندارد بدست آمده بود، با ۰٫۵ و ۱ درصد نانو رس تهیه شدند و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند.

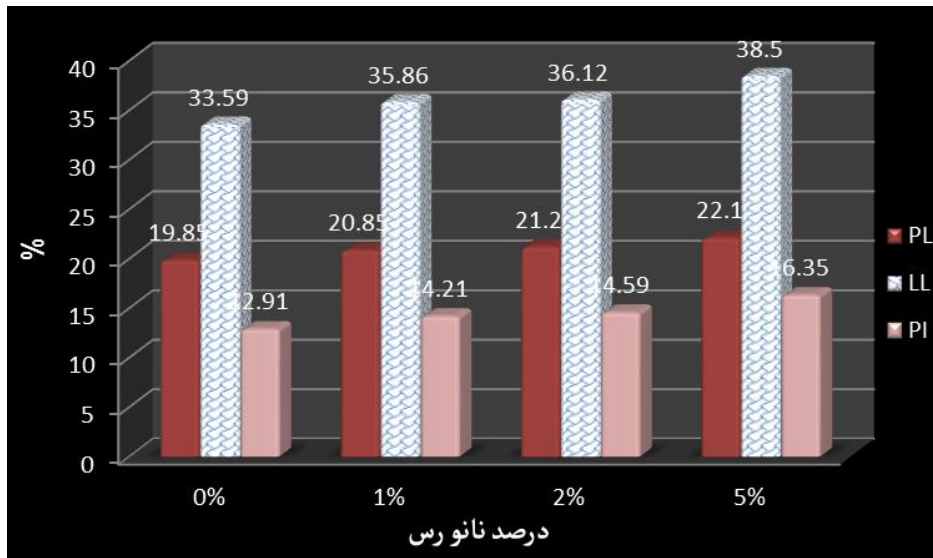
۴. نتایج

یکی از عوامل مهم در رفتار خاکهای رسی سطح مخصوص کانیهای رسی می باشد و هر چه کانی مربوطه دارای سطح بزرگتر و جرم کمتری باشد، سطح مخصوص بزرگتری داشته و ظرفیت تبادل یونی آن افزایش می یابد. ابعاد لایه های کانی کائولینیت در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ و ضخامت آن در حدود ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر می باشد. در صورتیکه ابعاد لایه نانو رس مصرف شده ۱۰۰۰ و ضخامت لایه های آن ۲۰ نانومتر است. یعنی سطح مخصوص نانو رس مورد استفاده در حدود ۲۰ برابر کانی کائولینیت می باشد. همچنین ابعاد بسیار کوچک نانو رس باعث می شود که فاصله بین صفحات کانیهای رسی پر شده و میزان تبادل یونی افزایش چشمگیری پیدا کند. از آنجا که افزودن درصد های کمی از نانو رس باعث تغییرات مثبت در حدود آتربرگ خاکهای چسبنده می شود، موضوع فوق می تواند در بسیاری از پروژه های ژئوتکنیکی از جمله هسته رسی سدهای خاکی موثر واقع شود؛ زیرا دامنه خمیری بالا منجر به کاهش قابلیت ایجاد ترک، افزایش مقاومت در برابر رگاب و در نهایت افزایش پایداری سد گردد. همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، افزایش در مقاومت و مدول تغییر شکل را نشان می دهد که این می تواند در پروژه های راهسازی و پی سازی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا درصد های کمی از نانو رس، می تواند باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش عمده در نشست شالوده ها گردد.

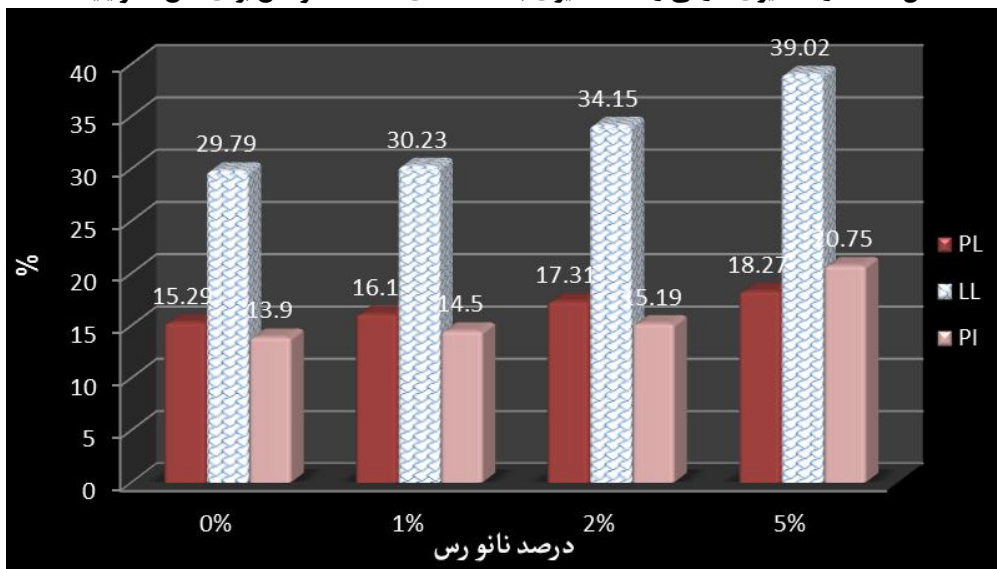
۴.۱. حدود آتربرگ

نانو رس مونت موریلونیت Na^+ به علت ابعاد بسیار کوچک خود دارای سطح ویژه بسیار بالایی است، لذا مقدار آبی که این ذرات را احاطه می کند، افزایش می یابد که این امر به نوبه خود باعث افزایش حدود آتربرگ خاک رس مخلوط با نانو رس می شود [۵]. نتایج بدست آمده برای آزمایش حد روانی و حد خمیری نشان می دهد که با افزایش درصد نانو رس در خاک، حد خمیری (PL) افزایش کمی نشان می دهد، اما حد روانی (LL) افزایش قابل توجهی را نشان می دهد (شکل ۱ و ۲). همچنین با افزایش نانو رس

مونت موریلونیت Na^+ در خاک دامنه یا نشانه خمیری (PI) افزایش می یابد به طوریکه به ترتیب با افزودن ۵٪ نانو رس نشانه خمیری برای خاک رس کائولینیت تجاری ۲۶ درصد و برای رس لای دار شهر قم نیز ۴۹ درصد افزایش یافت.



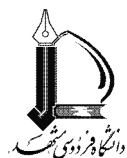
شکل ۱- حدود خمیری، روانی و نشانه خمیری با درصد های مختلف نانو رس برای رس کائولینیت



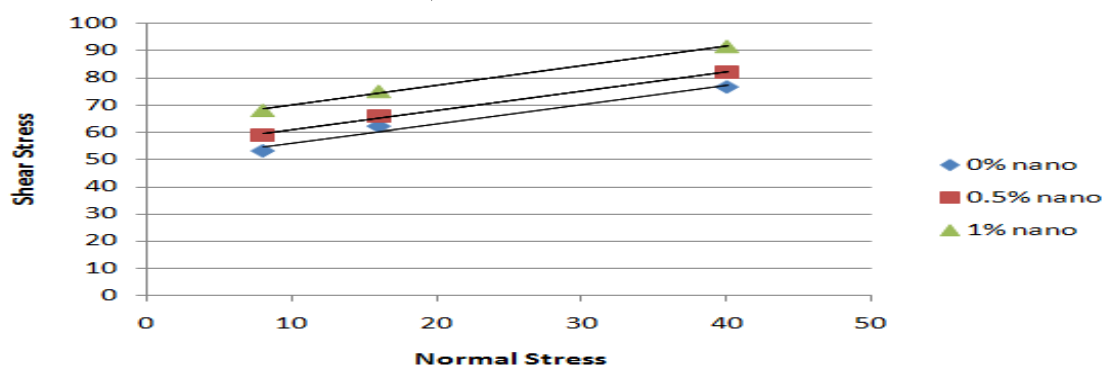
شکل ۲- حدود خمیری، روانی و نشانه خمیری با درصد های مختلف نانو رس برای رس لای دار قم

۴,۲ آزمایش برش مستقیم

نتایج آزمایش برش مستقیم بر روی رس کائولینیت و رس لای دار قم به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ نشان داده شده است. محور افقی نمایانگر مقدار تنش نرمال و محور قائم نشان دهنده تنش برشی است که طی آزمایش به نمونه اعمال شده تا آن را به گسیختگی برساند. خطی که این سه نقطه را به هم وصل می کند در اصطلاح پوش گسیختگی نامیده می شود. شیب این خط نشان دهنده اصطکاک بین

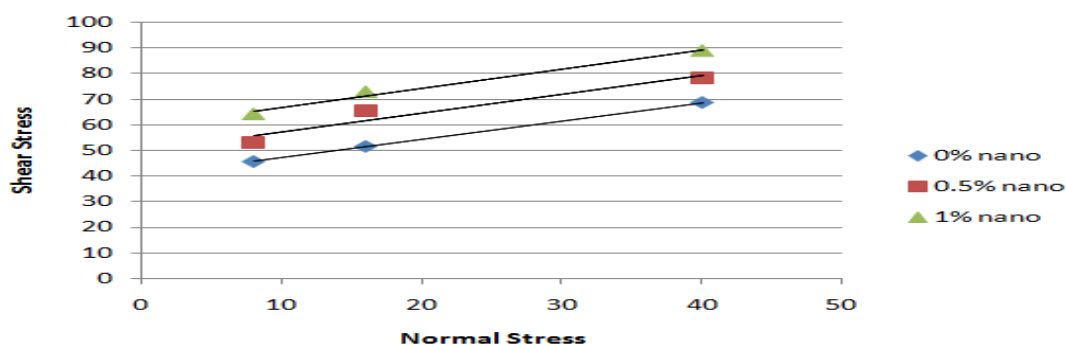


ذرات و عرض از مبدا آن نشان دهنده چسبندگی خاک است. نتایج بدست آمده از آزمایش برش مستقیم نشان می دهد که با افزایش نانو رس، مقاومت برشی هر دو نوع خاک مورد آزمایش افزایش می یابد که این افزایش با توجه به مقدار نانو رس مصرف شده بسیار چشمگیری می باشد به طوری که با افزودن ۱٪ نانو رس به خاک رس لای دار قم، چسبندگی نزدیک به ۵۰٪ افزایش نشان می دهد.



شکل ۳- نتایج آزمایش برش مستقیم با درصد های مختلف نانو رس برای رس کائولینیت

همانطوری که در شکل های ۳ و ۴ دیده می شود، با افزایش مقدار نانو رس شیب نمودار تغییر چندانی نمی کند که این امر نشان دهنده این امر است که با افزایش درصد نانو در این خاکها، زاویه اصطکاک داخلی دستخوش تغییرات محسوس نمی شود. پس عامل افزایش مقدار مقاومت برشی، افزایش در زاویه اصطکاک خاک نیست. پس تنها عامل باقیمانده، افزایش میزان چسبندگی در این خاکها می باشد. با افزایش درصد نانو در این خاکها، عرض از مبدا نمودار افزایش می یابد که این مبین افزایش چسبندگی می باشد. در جدول شماره ۲ مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای خاکهای مورد آزمایش با درصد های مختلف نانو رس مشاهده می شود که موید افزایش ناچیز زاویه اصطکاک داخلی و افزایش محسوس چسبندگی می باشد. با توجه به سطح ویژه بسیار بالای نانو رس، افزایش در چسبندگی این خاکها انتظار می رفت.



شکل ۴- نتایج آزمایش برش مستقیم با درصد های مختلف نانو رس برای رس لای دار قم

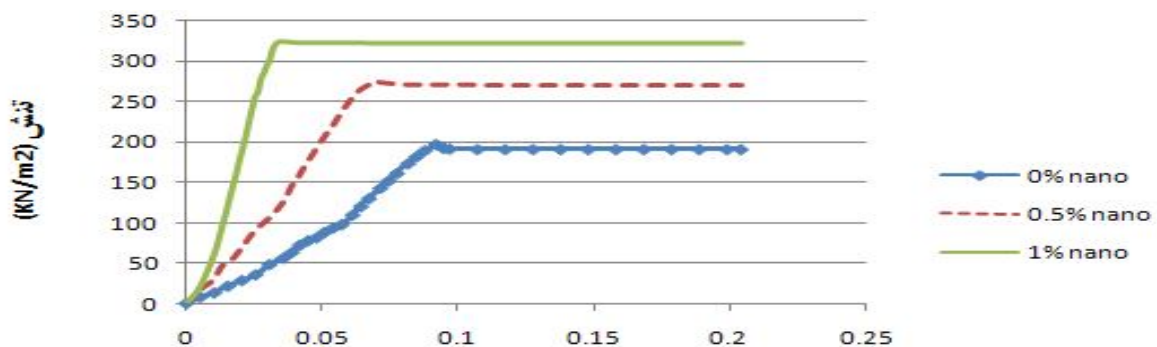
۳،۴. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک موری بر روی رس کائولینیت و رس لای دار شهر قم به ترتیب در اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با افزایش نانو رس مونت موریلونیت Na^+ ، مقاومت فشاری برای هر دو نوع خاک افزایش می یابد که روند این افزایش با توجه به مقدار کم نانو رس مصرف شده بسیار چشمگیر است، به طوری که با افزودن ۱٪ نانو رس

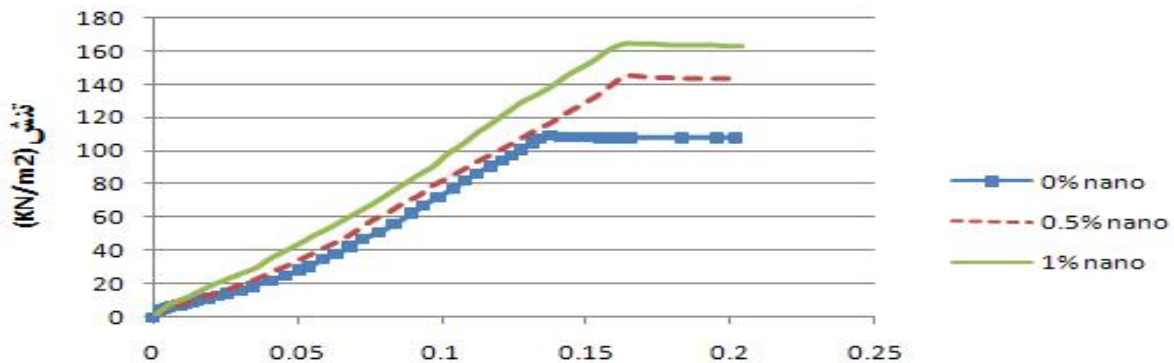
به خاک رس کائولینیت، مقاومت فشاری ۶۹٪ و برای خاک رس لای دار قم ۵۱٪ افزایش را نشان می دهد. همچنین با توجه به شکل ۵ و ۶، افزودن نانو رس باعث افزایش مقاومت خاک در برابر تغییر شکل نیز می شود. به طوریکه مدول سکانت (E₅₀) بدست آمده از این آزمایشات نشان می دهد که با افزودن ۱٪ نانو رس به رس کائولینیت و رس لای دار شهر قم، مدول سکانت به ترتیب ۴۱۰ و ۱۲۰ درصد افزایش می یابد. مدول سکانت میزان سختی (نسبت تنش به کرنش) در هنگامی است که مقدار تنش خاک مورد آزمایش به ۵۰ درصد تنش در لحظه گسیختگی برسد.

جدول ۲- مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای خاکهای مورد آزمایش با درصدهای مختلف نانو رس

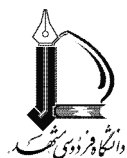
نوع خاک	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (KN/m ²)
رس کائولینیت + ۰٪ نانو رس	۳۵٫۲۶	۴۸٫۹
رس کائولینیت + ۰٫۵٪ نانو رس	۳۵٫۳۴	۵۳٫۸۹
رس کائولینیت + ۱٪ نانو رس	۳۶٫۰۲	۶۲٫۸
رس لای دار قم + ۰٪ نانو رس	۳۵٫۷۱	۳۹٫۹
رس لای دار قم + ۰٫۵٪ نانو رس	۳۶٫۱۳	۵۰٫۰۵
رس لای دار قم + ۱٪ نانو رس	۳۶٫۷۲	۵۹٫۵۳



شکل ۵- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده با درصدهای مختلف نانو رس برای رس کائولینیت



شکل ۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده با درصدهای مختلف نانو رس برای رس لای دار شهر قم



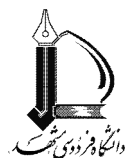
انجام آزمایشات حدود آتربرگ، برش مستقیم و مقاومت فشاری تک محوری بر روی دو نوع خاک چسبنده رسی (رس کائولینیت تجاری و رس لای دار شهر قم) با درصد های مختلف نانو رس مونت موریلونیت Na^+ به منظور بررسی اثر نانورس بر خواص مکانیکی خاکهای رسی چسبنده صورت انجام شد که نتایج زیر بدست آمد:

۱. با افزایش مقدار نانو رس، حد خمیری افزایش کمی در دو نوع خاک رس آزمایش شده نشان می دهد به طوری که با افزودن ۵٪ نانو رس به کائولینیت و خاک رس لای دار شهر قم، حد خمیری به ترتیب ۱۱ و ۱۹ و حد روانی به ترتیب ۱۵ و ۳۰ درصد افزایش داشته است.
 ۲. با افزایش مقدار نانو رس در خاکهای رسی چسبنده مورد آزمایش، نشانه خمیری افزایش چشمگیری می یابد. به طوری که با افزودن ۵٪ نانو رس به خاک رسی کائولینیت و خاک رس لای دار شهر قم، شاخص خمیری به ترتیب ۲۶ و ۴۹ درصد افزایش می یابد.
 ۳. با افزایش مقدار نانو رس در خاکهای چسبنده مورد آزمایش، مقاومت در برابر تغییر شکل افزایش می یابد که این افزایش مربوط به افزایش در میزان چسبندگی خاک می باشد. به طوری که با افزودن ۱٪ نانو رس به کائولینیت و خاک رس لای دار شهر قم، میزان چسبندگی به ترتیب ۲۸ و ۴۹ درصد افزایش می یابد.
 ۴. با افزایش مقدار نانو رس در خاکهای رسی چسبنده مورد آزمایش، مقاومت تک محوری افزایش قابل ملاحظه ای از خود نشان می دهد. طوری که با افزودن ۱٪ نانو رس به خاک رس کائولینیت، مقاومت فشاری تک محوری ۶۵٪ و برای خاک رس لای دار قم ۵۱٪ افزایش را نشان می دهد.
 ۵. با افزایش مقدار نانو رس در خاکهای چسبنده مورد آزمایش، مقاومت در برابر تغییر شکل افزایش می یابد. به طوری که با افزودن ۱٪ نانو رس به رس کائولینیت و رس لای دار شهر قم، مدول سکانت به ترتیب ۴۱۰ و ۱۲۰ درصد افزایش می یابد.
- از آنجا که افزودن درصد کمی از نانو رس باعث تغییرات قابل توجه در حدود آتربرگ خاکهای چسبنده می شود، این موضوع می تواند در بسیاری از پروژه های ژئوتکنیکی از جمله هسته رسی سدهای خاکی موثر واقع شود؛ زیرا دامنه خمیری بالا می تواند منجر به کاهش قابلیت ایجاد ترک، افزایش مقاومت در برابر رگاب و در نهایت افزایش پایداری سد شود. همچنین نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محوری، افزایش در مقاومت و مدول تغییر شکل را نشان می دهد که این می تواند در پروژه های راهسازی و پی سازی مورد استفاده قرار گیرد. زیرا درصد های کمی از نانو رس، می تواند باعث افزایش ظرفیت باربری و کاهش عمده در نشست شالوده ها گردد

منابع

سیدی گلسفیدی، ع. بازاریار، م.ح. میر کاظمی، م. قاضی، ح. "کاربردهای فناوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک". اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه. زیباکار. اسفند ۱۳۹۰

- Dermatas, D and Meng, X.G. (2003), "Utilization of fly ash for stabilization /solidification of heavy metal contaminated soils," Engineering Geology 70, 377-394
- Gutierrez, M.S., (2005), "Potential Applications of Nano-mechanics in Geotechnical Engineering," Proc of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, UK, pp. 29,30
- Naderi nia, Naeini, S.A., (2009), "The influence of polymer inclusion and plasticity index on the unconfined compression strength of clays," Proc. of the 2nd International Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia



Taha, M.R., (2009), "Geotechnical Properties of Soil-Ball Milled Soil Mixtures," Proc. of the 3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction, Prague, Czech Republic, pp. 377~382.

Daniels, J.M., Mehta, P., Vaden M., Sweem D., Mason M.D., Zavareh M., and Ogunro V., (2009), "Nano- Scale Organo-Silane Applications in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering," Journal of Terraspace Science and Engineering 1(1): 21-30

F.Michael, Jr.Hochella: Nanoscience and technology:the next revolution in the Earthsciences,Blacksburg,(2002).