



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۷، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۷ تا ۴۴

Vol. 47, No. 3, Winter 2015, pp. 37-44



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

AmirKabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## بهبود خواص هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانورس

زینب فخری<sup>۱</sup>، رضا پورحسینی اردکانی<sup>۲\*</sup>، تقی عبادی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۳)

### چکیده

خاکهای رسی به علت ویژگی‌های خاصشان در اجرای پژوهش‌های ژئوتکنیکی و زیست محیطی مانند پرده‌های آب‌بند با نشت بسیار کم به طور وسیعی استفاده می‌شوند. با پیشرفت فن‌آوری نانو، شاهد استفاده از نانو مواد به منظور بهبود ویژگی‌های مواد در بسیاری از شاخه‌های مهندسی از جمله مهندسی ژئوتکنیک هستیم. در مقاله حاضر، به بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رس کائولینیت با افزودن نانورس پرداخته شد. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، شامل حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، تحکیم یک بعدی و ظرفیت تبادل کاتیونی بر روی خاک رس کائولینیت معدن زنوز و مخلوط آن با درصدهای مختلف نانورس، انجام شد. بر پایه نتایج آزمایشگاهی با افزودن ۸٪ نانورس به خاک رس کائولینیت دامنه خمیری و ضریب نفوذپذیری آن در مقایسه با خاک رس کائولینیت بترتیب ۱۸۴٪ افزایش و ۳۰۰ برابر کاهش یافت. همچنین نتایج آزمایش ظرفیت تبادل کاتیونی، افزایش این ظرفیت از ۱۲ به ۲۱ meq/100gr با افزودن ۸٪ نانورس را نشان داد. این افزایش به علت افزایش قابل توجه در مقدار یون سدیم موجود در نمونه است.

### کلمات کلیدی:

نانورس، هدایت هیدرولیکی، خاک رس کائولینیت، آزمایش تحکیم یک بعدی

## ۱- مقدمه

نانورس که از خانواده مونت‌موریلونیت می‌باشد، استفاده شده و با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، تأثیر درصد‌های مختلف آن بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رس کائولینیت بررسی شده است.

۲- مصالح مصرفی  
۱-۱- خاک رس

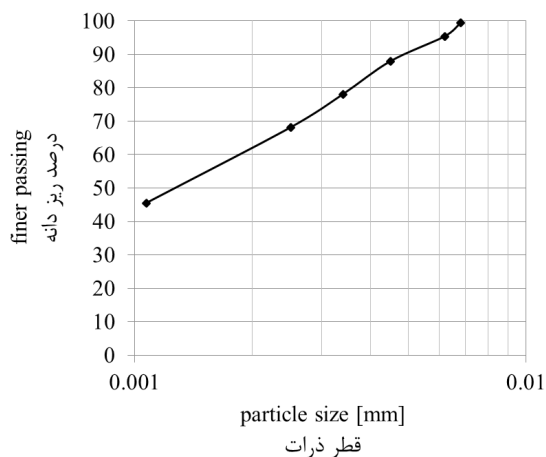
خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها، خاک رس کائولینیت می‌باشد که از معدن زنوز در استان آذربایجان شرقی استخراج شده است. طبق سیستم طبقه‌بندی متحد، رس مصرفی از نوع CL بوده و ۱۰۰٪ وزنی آن از الک نمره ۲۰۰ عبور کرده است. نتایج مربوط به تجزیه شیمیایی خاک رس مصرفی حاصل از آزمایش XRF و ترکیب کانی‌های تشکیل‌دهنده آن بترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و آزمایش هیدرومتری [۹] در شکل ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مواد تشکیل‌دهنده رس کائولینیت مصرفی بدست آمده از آزمایش XRF

ماده تشکیل‌دهنده	درصد وزنی	ماده تشکیل‌دهنده	درصد وزنی
SiO <sub>2</sub>	۶۳/۵	CaO	۱/۴
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۴	MgO	۰/۵
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۶۵	Na <sub>2</sub> O	۰/۳
TiO <sub>2</sub>	۰/۰۴	K <sub>2</sub> O	۰/۲

جدول ۲: ترکیب کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک رس مصرفی

نوع کانی	در صد وزنی
کائولینیت	۶۴
کوارتز	۲۷
کلسیت	۳
سایر	۶



شکل ۱: نمودار دانه بندی خاک کائولینیت مصرفی به روش هیدرومتری

خاک رس به خاکی اطلاق می‌شود که علاوه بر داشتن ذرات ریز، دارای کانی‌های رسی نیز باشد. بسته به کانی‌های موجود در خاک‌های رسی رفتار آنها نیز متفاوت خواهد بود. پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر کانی‌های موجود در خاک‌های رسی بر ویژگی‌های مختلف آنها انجام شده است [۱،۲].

برحسب کانی‌های رسی موجود در خاک، مقادیر کاتیون‌های تبادلپذیر می‌کنند. هر چقدر کاتیون‌های تبادلپذیر<sup>۱</sup> تک ظرفیتی در خاک‌های رسی بیشتر باشند، میزان پراکندگی کریستال‌ها افزایش یافته، در نتیجه ذرات ریزتر شده و سطح ویژه آنها بالا می‌رود [۳]. افزایش در سطح ویژه خاک موجب تغییر ویژگی‌های آن می‌شود که از آن جمله می‌توان به خواص خمیری، ضریب نفوذپذیری و ضخامت آب لایه دوگانه اطراف ذره رس اشاره نمود [۴].

نفوذپذیری خاک‌ها، یکی از ویژگی‌های مهم آن‌هاست که نقش اساسی در مسائل مرتبط با جریان آب داخل خاک و انتقال آلودگی‌ها ایفا می‌کند. تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی دقیق مصالح کم تراوا و ناتراوا اشباع مثل خاک رس اهمیت دارد؛ چون این نوع خاک، نقش مهمی در جلوگیری از نشت در سازه‌های هیدرولیکی و همچنین برای حفاظت محیط زیست در برابر انتقال و گسترش آلودگی‌ها بویژه آلودگی‌های خطرناک دارد [۵].

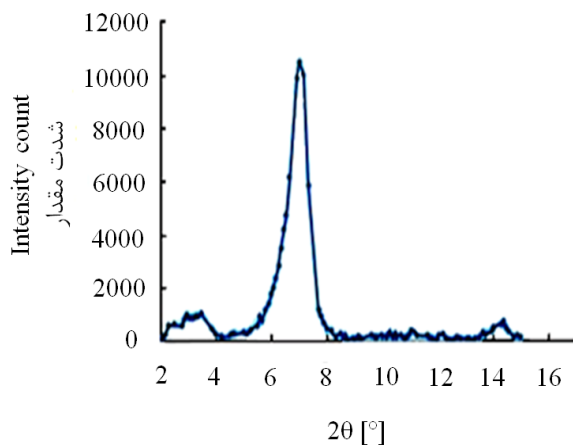
در پژوهش‌های مهندسی ژئوتکنیک که مرتبط با جلوگیری از انتقال آب و یا سیالات دیگر است، از پوشش‌های جدار آب‌بند<sup>۲</sup> بطور گسترده‌ای استفاده می‌شود [۶]. مصالح بکار رفته در این پوشش‌ها باید دارای نفوذپذیری خیلی کم، ظرفیت بالا جذب آلاینده‌ها، انعطاف‌پذیری مناسب در اثر تغییر رطوبت و نشست‌پذیری محدود و استحکام کافی در برابر بار باشند؛ بهمین منظور اغلب از خاک رس استفاده می‌شود. در مواردی که خاک رس محل بعنوان مصالح مورد استفاده در این نوع پوشش‌ها کیفیت لازم را نداشته و هزینه حمل حجم زیاد خاک رس مناسب برای اجرا بالا باشد، اصلاح خاک با اضافه کردن مواد افزودنی ممکن است مقرون به صرفه باشد. افزودنی‌های متداول مثل سیمان، آهک، بنتونیت [۷] و دوده سیلیس [۶] در مطالعات پژوهشگران نشان دهنده نقش مؤثر این افزودنی‌ها در کاهش ضریب نفوذپذیری خاک رس است.

در این تحقیق اثر ماده افزودنی نانورس بر ضریب نفوذپذیری و دیگر خواص فیزیکی-شیمی خاک رس کائولینیت بررسی شد. تحقیقات نشان می‌دهند که در میان خاک‌های رسی با یک رطوبت اولیه یکسان، کانی رس کائولینیت بیشترین ضریب نفوذپذیری را دارد [۴] بدین منظور از میان خاک‌های رسی، این نوع رس انتخاب شد.

مونت‌موریلونیت یکی از کانی‌های رسی است که به علت ویژگی‌های خاصش نسبت به دو کانی معمول رسی دیگر، کاربرد وسیعی در پژوهش‌های ژئوتکنیک زیست‌محیطی دارد [۸]. در تحقیق حاضر از

<sup>1</sup> Exchangeable Cations

<sup>2</sup> Barrier



شکل ۲: نتیجه آزمایش XRD نانوسر مصرفی

به مشخصات مایع نفوذی، ضخامت لایه‌دوگانه ایجاد شده اطراف ذرات باردار خاک دچار تغییراتی می‌شود که در نهایت موجب تغییر در ضریب نفوذپذیری خاک می‌گردد [۱۲].

در پروژه‌های عمرانی، آب متداول‌ترین مایع مورد استفاده در بررسی‌های آزمایشگاهی است؛ چون در این تحقیق، هدف تنها بررسی تأثیر ماده افزودنی نانوسر بر ضریب نفوذپذیری خاک رس کائولینیت و ایجاد نمونه خاکی با نفوذپذیری خیلی کم است، آب بعنوان مایع نفوذی انتخاب شد. خصوصیات آب مصرفی در مطالعات آزمایشگاهی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات شیمیایی آب مصرفی

مقادیر	مشخصات
۷/۸	PH
۱۳۲	TH [mg/L]
۲۶۴	TDS [mg/L]
۱	Na <sup>+</sup> [mg/L]
۰/۴	Mg <sup>2+</sup> [mg/L]
۲/۳	Ca <sup>2+</sup> [mg/L]
۱/۳	Cl <sup>-</sup> [mg/L]
۴۱۳	هدایت الکتریکی µsiemens/cm

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

بررسی‌های آزمایشگاهی با سه هدف زیر انجام شد:

- ۱- بررسی تأثیر افزودنی نانوسر بر ویژگی‌های فیزیکی خاک رس مصرفی؛ که این ویژگی‌ها عبارتند از: حدود آتربرگ، شاخص خمیری، درصد رطوبت بهینه تراکم و حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه. ۲-
- بررسی تأثیر افزودنی نانوسر بر ضریب نفوذپذیری خاک رس مصرفی

مشخصات فیزیکی خاک رس مصرفی طبق روش‌های موجود در استاندارد ASTM 2001 [۹] اندازه‌گیری و در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مشخصات فیزیکی خاک رس مصرفی

۴۱	حد روانی % (LL)
۲۵	حد خمیری % (PL)
۱۶	نشانه خمیری % (I <sub>p</sub> )
۲/۷	چگالی ذرات جامد خاک (G <sub>s</sub> )
≥۰/۰۰۷	اندازه دانه‌ها (mm)
۶۲	مقدار رس %
۰/۲۶	عدد فعالیت (A)

با توجه به مقدار بدست آمده برای عدد فعالیت (جدول ۳) و بر اساس نتایج تحقیقات [۱۰]، خاک رس مورد استفاده، غیرفعال تلقی می‌گردد.

### ۲-۲- نانوسر

نانوسر<sup>۳</sup>ها، نانو ذرات معدنی سیلیکاتی هستند که به شکل لایه‌ای (صفحه‌ای) بوده و حداقل یکی از ابعاد آنها در حدود ۱ تا ۱۰۰ nm است. با روش‌های مختلف فاصله صفحات رس از یکدیگر افزایش یافته و نانوسر بوجود می‌آید که دارای سطح ویژه بسیار بزرگی، بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ m<sup>2</sup>/g است. این سطح بزرگ باعث می‌شود، همواره اندرکنش شدیدی بین نانوسر و محیط اطرافش وجود داشته باشد [۳]. در تحقیق حاضر از نانوسر که ماده‌ای آبدوست<sup>۴</sup> و پودری شکل است، به عنوان ماده افزودنی استفاده شد. نانوسر مصرفی، رس مونت‌موریلونیت اصلاح شده با Na<sup>+</sup> بوده و مشخصات ارائه شده آن توسط شرکت تولیدکننده در جدول ۴ قابل مشاهده است؛ همچنین نتیجه آزمایش XRD نمونه نانوسر نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. با استفاده از قانون براگ [۱۱] و نتیجه آزمایش XRD، فاصله بین لایه‌های نانوسر ۱/۲ nm تعیین شد.

جدول ۴: مشخصات نانو رس مصرفی

مونت‌موریلونیت	پایه
سفید	رنگ
۱/۲	فاصله بین لایه‌ها (nm)
۴-۹	رطوبت %
۲/۸۶	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )

### ۲-۳- مایع نفوذی

آنچه باید در هنگام نفوذ سیال به داخل خاک مورد توجه قرار گیرد، جنس و مشخصات آن است. توجه به این نکته بدلیل تأثیر لزجت و چگالی سیال نفوذی بر ضریب نفوذپذیری خاک است؛ بعلاوه عکس‌العمل خاک در برابر مایع نفوذی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است؛ چون بسته

<sup>۳</sup> Nanoclay

<sup>۴</sup> Hydrophilic

[۱۵]. پدیده تورم به علت افزایش در ضخامت آب لایه دوگانه اطراف دانه رسی ایجاد می‌شود.

برای تعیین حدود روانی، خمیری و شاخص خمیری نمونه‌های خاک رس کائولینیت و درصد‌های مختلف نانورس، آزمایش حدود آتربرگ طبق ASTM D-4318 انجام شد.

### ۳-۲- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم استاندارد مطابق با استاندارد ASTM D-698 بر روی نمونه‌ها انجام شد. هدف از این آزمایش بررسی اثر نانورس بر حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه خاک رس مصرفی است.

### ۳-۳- آزمایش تحکیم

برای تعیین هدایت هیدرولیکی خاک‌های رسی که دارای نفوذپذیری پایین هستند از روش‌های متعددی بصورت مستقیم و یا غیرمستقیم استفاده می‌شود. از روش‌های مستقیم می‌توان به آزمایش‌های بار آبی افتان، بار آبی ثابت و افتان با استفاده از روش گریز از مرکز<sup>۶</sup> [۱۶] و غیره اشاره کرد. برخی روش‌های غیرمستقیم عبارتند از: آزمایش‌های تحکیم یک بعدی (ادئومتر)، تحکیم هیدرولیکی و حدود آتربرگ [۱۷]. در پژوهش‌های انجام شده مرتبط با این موضوع، بطور گسترده‌ای از آزمایش تحکیم یک بعدی استفاده شده است [۱۷]. در این تحقیق نیز برای رسیدن به ضریب نفوذپذیری نمونه‌های رسی از این آزمایش استفاده شد. آزمایش‌ها روی نمونه با قطر ۷۵ mm و ضخامت حدوداً ۲۰ mm با استفاده از دستگاه تحکیم یک بعدی (ادئومتر) طبق استاندارد ASTM D-2435 انجام شد. برای انجام آزمایش تحکیم به مخلوط خاک رس مصرفی و درصد‌های مختلف نانورس، آب در حدود ۲-۱/۵ برابر حد روانی اضافه شد [۱۷]، برای نمونه های حاوی ۴٪ و ۸٪ نانورس مقدار رطوبت ۱/۲ برابر حد روانی انتخاب شد.

برای اشباع کردن نمونه‌ها، طبق دستورالعمل استاندارد ASTM، نمونه‌ها باید داخل محفظه تحکیم به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار سربار ۵ kPa قرار داده شوند [۹]، منظور از اشباع کامل نمونه، درجه اشباع در حدود ۹۷٪ یا بیش از آن است [۱۸].

پس از این مرحله بارگذاری بر روی نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM اعمال شد. فشار سربار اعمالی روی نمونه بترتیب ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ kPa در هر شبانه‌روز بود. در نهایت ضریب تحکیم هر کدام از نمونه‌ها با استفاده از روش لگاریتم زمان [۱۹] محاسبه شد تا بتوان از طریق رابطه  $k=c_v m_v \gamma_w$  ضریب نفوذپذیری را بدست آورد.

### ۳-۴- آزمایش ظرفیت تبادل کاتیونی

آزمایش ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) بر روی نمونه‌ها بر اساس روش Bower et al, 1952 برای یافتن عدد CEC و مقادیر کاتیون‌های تبدیلی انجام شد [۲۰].

تحت نفوذ آب. ۳- تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی. برای دستیابی به اهداف ذکر شده، چهار نوع آزمایش انجام می‌شود که عبارتند از: حدود آتربرگ، تراکم استاندارد، تحکیم یک بعدی و ظرفیت تبادل کاتیونی<sup>۵</sup>. آزمایش‌های ذکر شده برای هر نمونه که شامل خاک رس کائولینیت و درصد‌های مختلف نانورس است حداقل دو بار تکرار شد تا نتایج بدست آمده قابل قبول باشند؛ همچنین نتایج مربوط به هر آزمایش نسبت به نمونه مبنا که نمونه‌ای حاوی خاک رس کائولینیت بدون هیچ مقداری از نانورس است؛ بیان خواهد شد.

### نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی مخلوط خاک رس و نانورس برای انجام آزمایش‌ها درصد‌های مورد نیاز نانورس برای افزودن به خاک رس کائولینیت به میزان ۱٪، ۲٪، ۴٪ و ۸٪ وزنی خشک خاک انتخاب شد. این درصد‌ها بر اساس تحقیق انجام شده روی تأثیر افزودنی بنتونیت بر کاهش ضریب نفوذپذیری خاک رس کائولینیت تعیین گردید [۷]، علت این انتخاب وجود کانی یکسان در هر دو ماده افزودنی می‌باشد.

نحوه انجام و زمان اختلاط دارای اهمیت است، با این وجود شیوه انتخاب شده برای اختلاط مصالح مصرفی در آزمایشگاه متناسب با شرایط اجرا کارهای عمرانی می‌باشد. با مشخص شدن میزان نانورس در هر یک از نمونه‌ها، خاک رس با درصد‌های مختلف نانورس و آب مخلوط شد؛ اختلاط تا زمان رسیدن به نمونه‌ای همگن باید ادامه یابد و این مستلزم صرف زمانی در حدود ۴۵ دقیقه است. برای این کار از همزن برقی با سرعت پایین به طوری که سبب جداسازی افزودنی نگردد و یا همزن دستی استفاده شد [۱۳]. پس از اختلاط کامل آب با مخلوط خاک و نانورس، نمونه‌ها در ظرف دربسته به مدت ۱۶ ساعت نگهداری شدند. علت این عمل آن است که جذب رطوبت ذرات رسی، فرآیندی زمان‌بر است [۹].

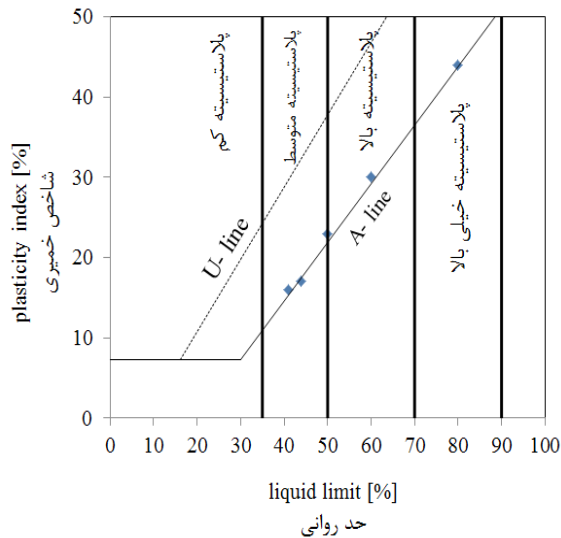
### ۳-۱- آزمایش حدود آتربرگ

خاک رس کائولینیت مصرفی دارای پلاستیسیته (خاصیت خمیری) متوسط است با وجود این در بسیاری از پروژه‌های ژئوتکنیکی مانند پوشش‌های جدار آب‌بند، دامنه خمیری بالا نیاز می‌باشد چون خاک‌ها با پلاستیسیته بالا، قابلیت تحمل تغییر شکل‌های زیاد بدون ایجاد ترک خوردگی در اثر تغییر رطوبت را دارند [۱۴]. بعلاوه ترک خوردگی موجب تغییر هدایت هیدرولیکی خاک می‌شود که این موضوع با هدف اصلی تحقیق مرتبط است؛ پس نیاز به بررسی میزان پلاستیسیته نمونه حاوی درصد‌های مختلف نانورس می‌باشد تا اثر این ماده افزودنی بر حدود آتربرگ و خاصیت خمیری خاک رس مصرفی مشخص گردد.

تغییر در خاصیت خمیری خاک بر پتانسیل تورم نیز اثرگذار است. با افزایش پتانسیل تورم خاک، ضریب نفوذپذیری آن کاهش می‌یابد

<sup>6</sup> Centrifugal Technique

<sup>5</sup> Cation Exchange Capacity



شکل ۴: نمودار تغییرات حدود آتربرگ و دامنه خمیری خاک رس کائولینیت با در صد های مختلف نانورس

#### ۴-۲- آزمایش تراکم

آزمایش تراکم (پروکتور استاندارد) روی نمونه‌ها برای بررسی اثر نانورس روی خصوصیات تراکمی خاک انجام شد. نتایج در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

همان گونه که مشاهده می‌شود با تغییر در صد های مختلف نانورس موجود در نمونه‌های آزمایشی، حداکثر وزن مخصوص خشک و درصد رطوبت بهینه تراکم بصورت خطی بترتیب کاهش و افزایش یافتند؛ بطوری که با افزودن ۸٪ نانورس به خاک رس کائولینیت، حداکثر وزن مخصوص آن ۲٪ کاهش و رطوبت بهینه تراکم ۷٪ افزایش نشان داد. وجود نانورس در نمونه خاک، موجب افزایش سطح ویژه آن شده و مقدار رطوبت بهینه نمونه خاک رس را بیشتر می‌کند. بعلاوه هر چه میزان رطوبت بهینه تراکم خاک افزایش یابد، میزان ذرات موجود در واحد حجم کمتر شده و در نتیجه وزن مخصوص کاهش می‌یابد [۱۴].

#### ۴-۳- آزمایش تحکیم

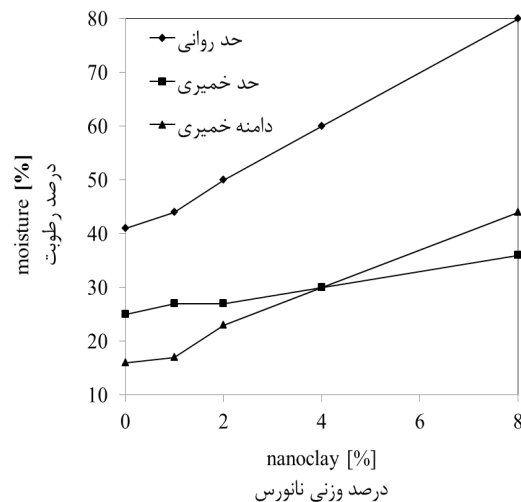
شکل ۷ رابطه بین نسبت تخلخل و ضریب نفوذپذیری نمونه‌های آزمایشی را نشان می‌دهد. در نمودارهای ارائه شده هر خط نشان‌دهنده تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رس کائولینیت و درصد مشخصی از نانورس است.

همان گونه که مشاهده می‌شود با کم شدن میزان تخلخل موجود در یک نمونه، ضریب نفوذپذیری به صورت خطی کاهش یافت. مسدود شدن مسیر عبور آب در اثر کاهش تخلخل، می‌تواند علت این تغییر باشد. شکل ۸ نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری خاک رس مصرفی با در صد های مختلف نانورس در برابر فشار تحکیم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۸، افزایش فشار تحکیم برای یک نمونه خاک، ضریب نفوذپذیری آن را کاهش می‌دهد بعلاوه در یک فشار تحکیمی

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

##### ۴-۱- آزمایش حدود آتربرگ

تأثیر در صد های مختلف نانورس بر حدود آتربرگ و دامنه خمیری خاک رس کائولینیت در شکل ۳ ارائه شده است.

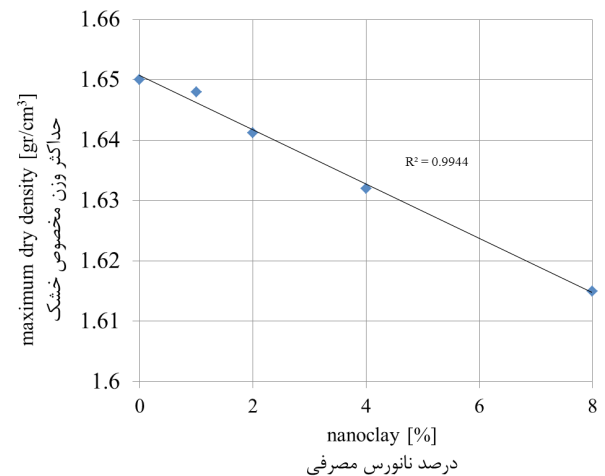
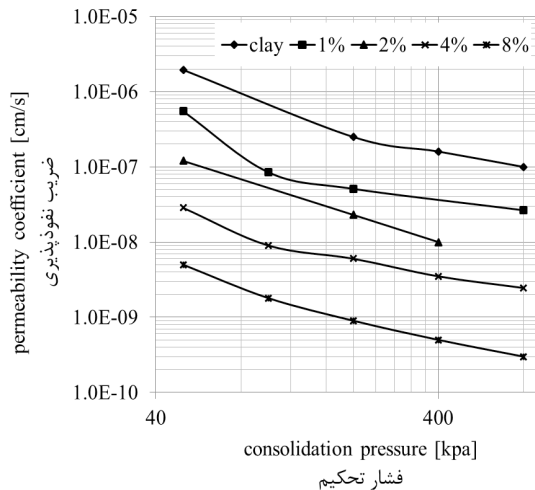


شکل ۳: نمودار تغییرات حدود آتربرگ و دامنه خمیری خاک رس کائولینیت با در صد های مختلف نانورس

همان طور که مشاهده می‌شود حد روانی پس از اضافه کردن نانورس افزایش قابل توجهی داشته ولی تغییر چندانی در مقدار حد خمیری ایجاد نشد؛ بنابراین افزودن نانورس موجب افزایش دامنه خمیری (پلاستیسیته) خاک شد. وجود ۸٪ نانورس در خاک رس مصرفی، موجب افزایش ۱۸۴٪ دامنه خمیری شده که تغییری عمده محسوب می‌گردد. این رخداد می‌تواند بدلیل افزایش سطح ویژه نمونه‌ها بدلیل وجود نانورس و به تبع آن ازدیاد بار الکتریکی شده که باعث می‌شوند آب بیشتری جذب نمونه گردد [۳،۴].

با افزایش پلاستیسیته خاک، تحمل آن در برابر تغییر شکل‌های بزرگ بدلیل تغییر رطوبت (انعطاف پذیری) ازدیاد یافته و در نتیجه خطر ترک خوردگی کاهش می‌یابد و ضریب نفوذپذیری کم، حفظ می‌گردد. شکل ۴ نشان‌دهنده محدوده رفتار خمیری خاک رس مصرفی با در صد های مختلف نانورس است. هر یک از نقاط نشان داده شده در شکل، نماینده یک نمونه خاک رس مصرفی و درصد مشخصی از نانورس است.

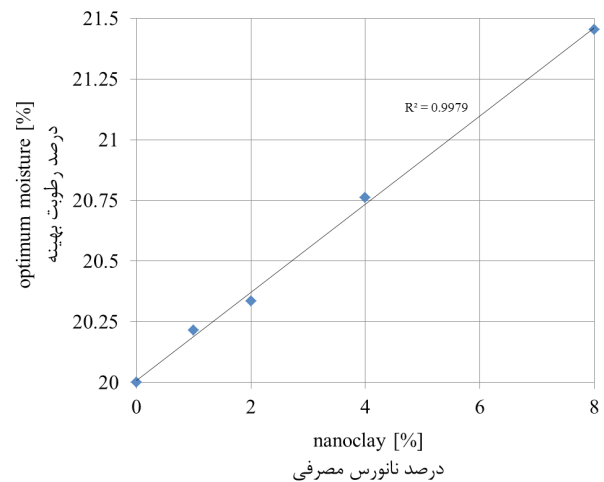
همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزودن نانورس به خاک رس کائولینیت مقادیر حد روانی و دامنه خمیری افزایش یافت و رفتار خمیری خاک تغییر کرد؛ بطوری که از نمونه خاک با پلاستیسیته متوسط به نمونه خاک با پلاستیسیته خیلی زیاد تبدیل شد. بعلاوه با افزایش پلاستیسیته نمونه، فعالیت آن از ۰/۲۶ به ۰/۷۵ برای نمونه خاک با ۸٪ نانورس افزایش یافت که از این نظر خاکی طبیعی به حساب می‌آید [۱۰]. با افزایش فعالیت، میزان تورم نمونه نیز ازدیاد می‌یابد. تورم در خاک با افزایش در ضخامت آب لایه دوگانه اطراف دانه رسی همراه بوده و منجر به کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود.



شکل ۸: نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری - فشار تحکیم خاک رس کائولینیت با درصدهای مختلف نانورس

شکل ۵: نمودار تغییرات حداکثر وزن مخصوص خشک نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانورس

ثابت هر اندازه میزان نانورس موجود در نمونه بیشتر باشد، ضریب نفوذپذیری آن کمتر است. این رخداد بعلت وجود کانی مونت‌موریلونیت فعال در نمونه‌ها است و هر چه میزان نانورس موجود در آن‌ها بیشتر باشد، بر اساس نتایج آزمایش ظرفیت تبادل کاتیونی و مقادیر کاتیون‌های تبدالی (مراجعه به جدول ۷)، میزان کاتیون‌های تک‌ظرفیتی ازدیاد یافته که موجب افزایش در سطح ویژه نمونه و ضخامت آب لایه دوگانه و در نتیجه کاهش ضریب نفوذپذیری شد.

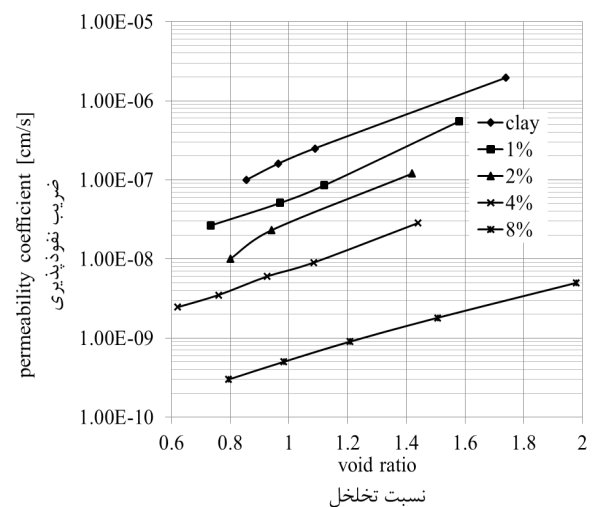


جدول ۶ ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها در تخلخل متناظر با ۹۰٪ تراکم استاندارد را نشان می‌دهد. با افزودن ۸٪ نانورس به خاک رس کائولینیت در تخلخل متناظر ۹۰٪ تراکم استاندارد نمونه (منظور از تخلخل ۹۰٪ تراکم استاندارد، تخلخل متناظر با درصد رطوبتی است که وزن مخصوص خشک نمونه برابر با ۹۰٪ حداکثر وزن مخصوص خشک آن باشد)، ضریب نفوذپذیری آن در حدود  $10^{-10}$  cm/s بدست آمد و ۳۰۰ برابر کاهش یافت که بیانگر تأثیر چشمگیر این ماده افزودنی بر کاهش ضریب نفوذپذیری خاک رس کائولینیت است. با افزایش درصد نانورس موجود در نمونه هم‌چنان ضریب نفوذپذیری در حال کاهش است اما مقادیرش چندان قابل توجه نیست.

شکل ۶: نمودار تغییرات میزان رطوبت بهینه نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانورس

جدول ۶: ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها

ضریب نفوذپذیری (cm/s)	در تخلخل متناظر با ۹۰٪ تراکم استاندارد
$10^{-7}$	۰
$2/65 \times 10^{-8}$	۱
$10^{-8}$	۲
$2/45 \times 10^{-9}$	۴
$3 \times 10^{-10}$	۸



شکل ۷: نمودار تغییرات ضریب نفوذپذیری - نسبت تخلخل خاک رس کائولینیت با درصدهای مختلف نانورس

نمونه‌های آزمایشی در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزودن نانورس به خاک رس کاتولینیت مقدار کاتیون‌های تک‌ظرفیتی افزایش و به تبع آن نسبت

جدول ۷: ظرفیت تبادل کاتیونی و کاتیون‌های تبادلی نمونه‌های آزمایشی

CEC meq/100g	کاتیون‌ها meq/100g				نمونه
	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
۱۲	۲/۴	۸/۲	۰/۸	۰/۶	کاتولینیت
۱۸/۴	۲/۵	۱۰/۴	۰/۹	۴/۶	کاتولینیت + ۴% نانورس
۲۱	۲/۳	۹/۵	۱	۸/۲	کاتولینیت + ۸% نانورس

مجموع کاتیون‌های تک‌ظرفیتی به کاتیون‌های دوظرفیتی نیز افزایش یافت. هر چقدر کاتیون‌های تک‌ظرفیتی نمونه خاک بیشتر باشد، ضخامت آب لایه دوگانه اطراف دانه رسی بیشتر شده بعلاوه میزان پراکندگی کریستال‌ها را افزایش داده و در نتیجه ذرات ریزتر شده و سطح ویژه آنها بالا می‌رود که منجر به بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رس کاتولینیت شد [۳،۴].

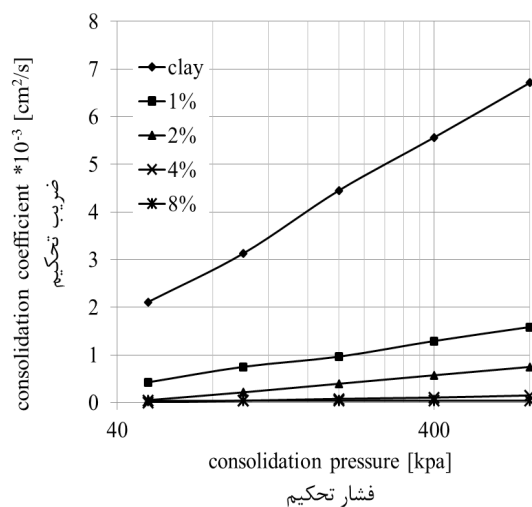
#### ۵- نتیجه‌گیری

با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی تأثیر نانورس بر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی و ضریب نفوذپذیری خاک رس کاتولینیت بررسی شد و نتایج نشان‌دهنده نقش چشمگیر این ماده افزودنی در بهبود ویژگی‌های هیدرولیکی خاک رس کاتولینیت است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و داده‌های بدست آمده از آنها نتایج زیر حاصل شد:

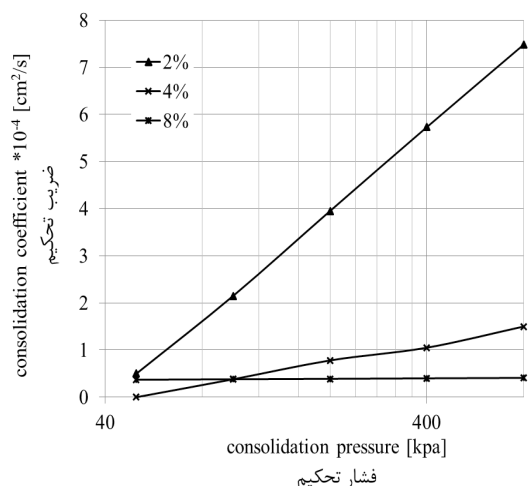
۱- وجود درصدهای مختلف نانورس در خاک رس کاتولینیت، حد روانی خاک را بمقدار زیادی افزایش می‌دهد ولی تغییر چندانی در حد خمیری بوجود نمی‌آورد. براینده تغییر در حدود آتربرگ در اثر افزودن نانورس به خاک رس کاتولینیت، افزایش در دامنه خمیری آن است بطوری که این افزایش برای نمونه حاوی ۸% نانورس در حدود ۱۸۴% بود، در نتیجه افزودن نانورس به خاک رس کاتولینیت رفتار خمیری آن را تغییر داد بعلاوه موجب افزایش میزان رطوبت بهینه خاک و کاهش حداکثر وزن مخصوص خاک گردید.

۲- وجود درصدهای مختلف نانورس در خاک رس کاتولینیت، موجب کاهش در ضریب نفوذپذیری آن شد؛ بطوریکه هر چقدر میزان نانورس موجود در نمونه بیشتر باشد، این کاهش در ضریب نفوذپذیری بیشتر است. با افزودن ۸% نانورس به خاک رس کاتولینیت، ضریب نفوذپذیری

تأثیر نانورس بر ضریب تحکیم قائم خاک رس مصرفی در شکل های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۹: نمودار تغییرات ضریب تحکیم- فشار تحکیم خاک رس کاتولینیت با درصدهای مختلف نانورس



شکل ۱۰: بزرگنمایی نمودار تغییرات ضریب تحکیم- فشار تحکیم خاک رس کاتولینیت با درصدهای مختلف نانورس

بر اساس تحقیقات انجام شده، کانی‌های تشکیل‌دهنده موجود در نمونه‌های رسی بر ضریب تحکیم و نفوذپذیری خاک تأثیرگذار است [۲] و همان‌گونه که در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود با افزودن نانورس به خاک رس کاتولینیت ضرایب تحکیم قائم و نفوذپذیری کاهش می‌یابد. با توجه به این که شدت کم شدن ضریب نفوذپذیری خیلی بیشتر از کاهش ضریب تحکیم است می‌توان نتیجه گرفت که ضریب فشردگی حجمی  $m_v$  نیز با افزودن نانورس کم شده و در نتیجه نشست تحکیمی کاهش یافت.

#### ۴-۴- ظرفیت تبادل کاتیونی

نتایج آزمایش ظرفیت تبادل کاتیونی و کاتیون‌های تبادلی برای

- with landfill leachate”, Applied Clay Science, Elsevier, pp187-193, 2010.
- [9] ASTM, “Annual book of ASTM standards”, ASTM, 2001.
- [10] Head, K. H, “Soil classification and compacting test, Manual of Soil Laboratory Testing”, Vol. 1, Pentech Press, London, 1992.
- [11] Callister, W, “Materials science and engineering”, John Wiley & Sons, 2006.
- [12] Kaya, A. and Fang, H. Y, “The effects of organic fluids on physicochemical parameters of fine-grained soils”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, pp 943-950.
- [13] Bazyar, M. H., Ghazi, H. and Mirkazemi, S. M, “Effect of nanoclay on engineering properties of soil”, Forth International Congeress of Geotechnical Engineering and Soil Mechanic, Iran, 2010.
- [14] Das, B. M, “Advanced soil mechanics”, Taylor & Francis, New York, NY 10016, USA, 2008.
- [15] Kananzadeh, N., Ebadi, T., Khoshniat, S. A. and Mousavirizi, S. E, “The positive effects of Nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate”. Clean-Soil, Air, Water, Vol. 7, Wiley, 2011.
- [16] Nimmo, J. and Mello, K, “Centrifugal techniques for measuring saturated hydraulic conductivity”, Water Resources Research, Vol. 27, No. 6, pp 1263-1269, 1991.
- [17] Sobolewski, M, “Various methods of the measurement of the permeability coefficient in soils- possibilities and application”, Electronic journal of polish agricultural universities, Vol. 8, 2005.
- [18] Fredlund, D. G, “The emergence of unsaturated soil mechanics”, Forth Spencer J. Buchanan lecture, Texas university, 1996.
- [19] Alshenawy, A. O, “Determination of the coefficient of the consolidation using different methods and study the effect of applied pressure for different types of soils”, M.Sc. Thesis, King Saud university, 2007.
- [20] Rhoades, J. D, “Methods of soil analysis”, Part 2, Second Edition, American Society of agronomy, Inc. Soil Science society of American, Inc, 1986.
- آن در حدود ۳۰۰ برابر کاهش یافت؛ همچنین ضرایب تحکیم و فشردگی حجمی نیز کم شدند.
- ظرفیت تبادل کاتیونی و مقادیر کاتیون‌های تبدالی با افزودن نانورس به خاک رس کائولینیت تغییر کرد. با افزایش میزان نانورس موجود در نمونه، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت کاتیون‌های تک ظرفیتی به دو ظرفیتی آن افزایش یافت. افزایش در ظرفیت تبادل کاتیونی بدلیل افزایش مقدار  $Na^+$  است. با افزایش کاتیون‌های تک ظرفیتی میزان پراکندگی کریستال‌ها افزایش یافته در نتیجه ذرات ریزتر شده و سطح ویژه آنها زیاد می‌شود. افزایش در سطح ویژه منجر به افزایش ضخامت آب لایه دوگانه و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک رس کائولینیت شد.

### ۶- مراجع

- [1] Grabowska-Olszewska, B, “Modelling Physical properties of mixture of clays: example of a two-component mixture of Kaolinite and Montmorillonite”, Applied Clay Science, Elsevier, pp 251-259, 2003.
- [2] Retnamony, G. R. and Mehter, M. A, “Effect of clay mineralogy on coefficient of consolidation”, Clays and Clay Minerals, Vol. 46, No. 5, pp 596-600, 1998.
- [3] Lan, T. and Kaviratna, P. D, “Mechanism of clay tactoid exfoliation in epoxy-clay nanocomposites”, Chem Master, pp 2144-2150, 1995.
- [4] Mitchel, J. K. and Soga, K, “Fundamentals of soil behavior”, John Wiley & Sons, Third edition, 2005.
- [5] Zhang, M., Takahashi, M., Morin, H. R., Endo, H. and Esaki, T, “Determining the hydraulic properties of saturated, low-permeability geological materials in the laboratory: Advanced in theory and practice”, Evaluation and remediation of low permeability, ASTM, 2002.
- [6] Kalkan, E. and Akbulut, S. “The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners”, Engineering Geology, Vol. 73, Elsevier, 2004.
- [7] Ohtsubo, M., Anil, K. M., Li, L. and Higashi, T, “Effect of salt solution on the permeability of the mixtures of soil and bentonite”, 5th ICEG Environmental Geotechnics, pp 601-607, 2006.
- [8] Francisca, F. M. and Glatstein, D. A, “Long term hydraulic conductivity of compacted soils permeated