بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس

مرضیه بهاری* و علی شاه‌نظری[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۳۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۵)

چکیده

حمل مصالح قرضه برای زیرسازی مناسب کانال‌های انتقال آب به‌منظور تحمل‌پذیری بیشتر بار حاصل از سازه از جمله موارد مهم در طرح‌های عمرانی می‌باشد که مشکلات زیادی از نظر اجرایی به بار می‌آورد. لذا در این تحقیق ماده‌ی نانوکامپوزیت رس با نسبت وزنی یک درصد با خاک منطقه ترکیب گردید. نمونه خاک مورد آزمایش از بستر کانال C_{25} (انشعابی از بند انحرافی گنج افروز در محدوده ی پروژه البرز) در فواصل مختلف و عمق یک متر برداشت شد. با انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم روی خاک ملاحظه شد که با افزودن نانورس به خاک میزان مقاومت برشی، خاصیت چسبندگی و تراکم‌پذیری خاک به‌ترتیب برابر با ۱۴/۱۳، ۱۴/۱۳ و ۸۲/۷۶ درصد افزایش یافته و زاویه شکست و نسبت تخلخل نهایی نیز کاهش یافته است. در نتیجه با ترکیب ماده ی نانورس به خاک پایداری و استحکام خاک بیشتر شده و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و همچنین حمل مصالح قرضه برای زیرسازی کانال وجود نخواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاک، تحکیم، فرسایش، مقاومت فشاری، نانورس

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Mbahari198551@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]

[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]

مقدمه

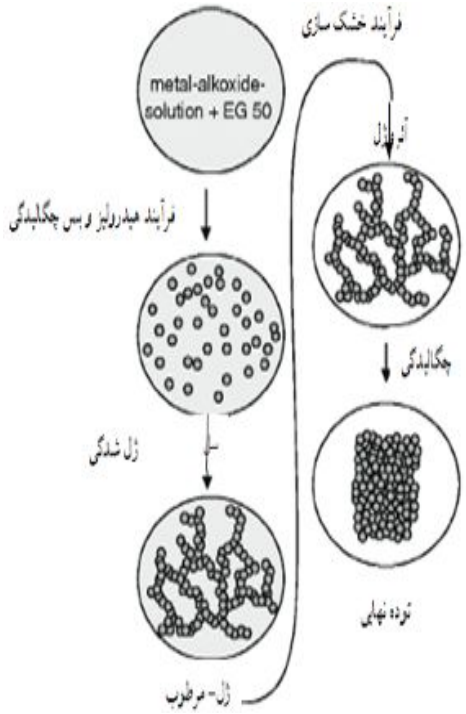
طرح های عمرانی زیادی در سطح کشور در حال اجرا می باشند، این طرح ها به خصوص در بخش آب نیازمند یک زیرسازی مناسب می باشند تا بتوانند بار حاصل از سازه را تحمل نمایند. بدین‌منظور در اکثر طرح‌ها از مصالح قرضه استفاده می‌شود، چون اغلب خاک‌ها توان تحمل سازه را ندارند و پس از مدتی نشست خواهند کرد بدین منظور از مصالح درشت دانه مثل مصالح رودخانه‌ای و کوهی استفاده می شود که عموماً با صرف هزینه زیاد از مناطق دوردست به محل پروژه انتقال می یابند و پس از خاک برداری خاک موجود، با تراکم مناسبی برای زیرسازی کانال‌ها استفاده می‌شوند .در بسیاری از مناطق برداشت بی رویه مصالح مرغوب رودخانه ای باعث ایجاد عوارض ناخوشایندی از نظر ژئومورفولوژیکی مانند به هم خوردن تعادل طبیعی و تغییر مسیر رودخانه شده است همچنین این امر موجب کاهش راندمان برداشت آب از رودخانه، تشدید فرسایش در پایین دست رودخانه، تشدید عوامل رخداد سیلاب و خسارات ناشی از آن و تخریب سازه‌های تقاطعی در رودخانه ها می شود. همچنین پیامدهای زیست محیطی مانند تخریب زمین‌های اطراف، آبزیان و زیستگاه‌های پرندگان و جانوران منطقه را در پی دارد (۴). افزایش وزن مخصوص و تراکم پذیری خاک زیرین باعث بهبود مشخصه های مقاومتی خاک و افزایش ظرفیت باربری پی و کاهش نشست های ناخواسته ی سازه می شود. بنابراین پیدا کردن راهکاری که بتواند باعث افزایش باربری، تراکم پذیری و مقاومت گردد و از طرف دیگر کاهش نشست خاک زیرین کانال های انتقال آب شود، باعث کاهش هزینه طرح ها خواهد شد. بدین منظور در این تحقیق از نانورس ها استفاده شده است. نانورس ها کانی هایی در مقیاس نانومتر هستند که از سطح ویژه ای در حدود ۷۵۰ متر مربع بر گرم برخوردارند این مواد اغلب به‌عنوان پرکننده‌ها در اصلاح خواص پلیمرها به‌کار گرفته شده‌اند (۷ و ۱۴). مزیت هایی از قبیل خالص بودن و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا در این کامپوزیت‌ها باعث شده است تا نانورس‌ها در استحکام پلیمرها نقش زیادی را ایفا کنند (۱۰). مونت موریلونیت تنها رس طبیعی است که استفاده از آن به‌عنوان یک نانو رس مناسب بیشتر مورد توجه است (۶).

در تحقیقی برای بررسی تأثیر نانورس بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار از ۳ درصد مختلف نانورس به میزان ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزن نمونه استفاده گردید که نتایج نشان‌دهنده‌ی بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک بعد از افزایش نانورس به خاک بود (۵). در تحقیقی دیگر با افزودن نانورس به خاک مشاهده گردید که حد روانی و حد خمیری پس از اضافه کردن ماده نانورس افزایش یافته است (۱). همچنین با انجام آزمایش تراکم بر روی خاکستر بادی و با افزایش مقدار ارگانوسیلان در ابعاد نانو نتیجه گرفته شد که مقدار رطوبت بهینه کاهش و وزن مخصوص خشک بیشینه افزایش یافته است و نیز اصلاح خاک با ارگانوسیلان، افزایش مقاومت، کاهش پتانسیل تورم و کاهش چشمگیر رسانایی هیدرولیکی را به همراه داشته است (۸).

هدف از این پژوهش ترکیب ماده ی نانوکامپوزیت رس به خاک بستر کانال انتقال آب $C_{۲۵}$ انشعاب یافته از محل بند انحرافی گنج افروز در محدوده‌ی پروژه البرز می باشد تا بدین طریق خواص ژئوتکنیکی خاک از قبیل مقاومت برشی، چسبندگی، شاخص فشردگی و تراکم‌پذیری خاک بهبود یابد.

مواد و روش‌ها

از آنجایی‌که خاک رس مونت موریلونیت گستردگی قابل توجهی در جهان دارد و نیز به‌دلیل دارا بودن سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، توانایی جذب آب بالایی دارد (۱۲) در این پژوهش از این نوع خاک رس استفاده گردید. همچنین در این تحقیق به‌این دلیل که روش سل- ژل (sol-gel) متداول‌ترین روش تولید نانوذرات در فاز مایع می‌باشد، این روش از میان روش‌های مختلف تولید نانوذرات (چگالش گاز خنثی، سل- ژل و آسیاب مکانیکی) انتخاب گردید (۱۱). در ابتدا با روش سل- ژل، نانوذرات مونت‌موریلونیت تهیه شد. در



شکل ۱. نمایی از سنتز به روش سل- ژل

این روش، محلول همگن آماده شده به سل و سپس به ژل و بعد از آن به نانوذرات تبدیل گردید (شکل ۱). از ۵ گرم ماده‌ی زایکوسیل که برای ضد آب کردن بتن و مصالح ساختمانی و محافظت از آنها در برابر گرما، اشعه فرابنفش و فرسایش به کار می‌رود (۳) برای پر کردن فضای مابین لایه‌های مونت موریلونیت استفاده گردید که این ماده در اثر ایجاد تغییرات شیمیایی در مونت موریلونیت به آن خاصیت آبگریزی داد.

نمونه خاک‌ها از بستر کانال $C_{۲۵}$ از کانال‌های انشعابی بند انحرافی گنج افروز در محدوده‌ی پروژه البرز در منطقه شمال شهرستان قائم شهر واقع در استان مازندران، برداشت گردید. نمونه‌ها از عمق یک متری و به‌ترتیب از فواصل ۰+۰۱۸، ۰+۵۰۰، ۰+۹۰۰، ۲+۲۵۰ و ۴+۴۵۰ در مسیر کانال انتقال آب $C_{۲۵}$ برداشت گردید.

آزمایش دانه بندی و هیدرومتری روی ۳ کیلوگرم از این خاک انجام شد و منحنی دانه بندی خاک رسم گردید. وزن مخصوص ویژه‌ی خاک (G_S) با رابطهٔ زیر محاسبه گردید:

$$G_s = M_\circ / [M_\circ + (M_a - M_b)] \qquad [۱]$$

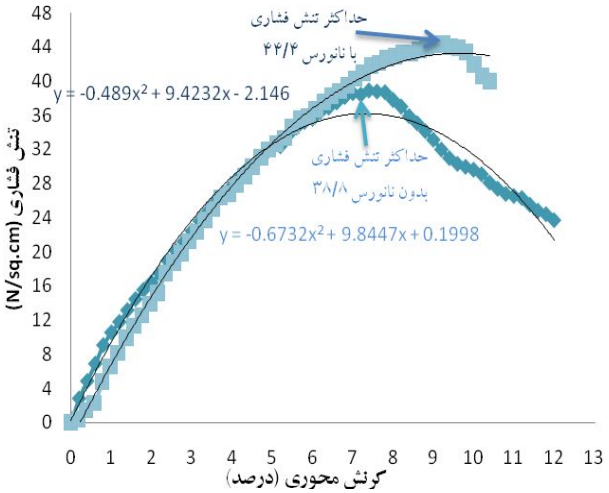
$M_\circ$ وزن نمونه خشک شده در آون، M_a وزن پیکنومتر پر از آب در دمای T_a، M_b وزن پیکنومتر پر از آب و خاک در دمای T_b برحسب گرم می‌باشد.

با مطالعه‌ی تحقیقات انجام شده (۱ و ۵) درصد نانورس مورد آزمایش برای تزریق به خاک بستر کانال معادل یک درصد انتخاب گردید. بعد از ترکیب خاک به نسبت وزنی ۱ درصد با ماده نانوکامپوزیت رس، آزمایشات تراکم، مقاومت فشاری ساده (تک‌محوری، محصور نشده) و تحکیم طبق استاندارد JIS ژاپن روی این خاک انجام گردید. جهت انجام آزمایش تک‌محوری برای اندازه‌گیری تقریبی مقاومت برشی خاک چسبنده، ابتدا بر روی خاک مورد مطالعه آزمایش پروکتور استاندارد انجام گردید و رطوبت و تراکم بهینه خاک تعیین گردید. با رسم منحنی تراکم، $\omega_{\%90}$ (درصد رطوبت متناظر با ۹۰٪ وزن مخصوص خشک ماکزیمم) به دست آمد و مقدار آب لازم برای اشباع کردن نمونه در آزمایش مقاومت فشاری تک محوری از فرمول زیر محاسبه گردید:

$$[۱/(۱+\omega_\circ)] * (\omega_{\%۹۰} - \omega_\circ) * ۱۰۰۰ \qquad [۲]$$

در این فرمول $\omega_\circ$ درصد رطوبت اولیه می باشد. با انجام آزمایش تک محوری، منحنی‌های تنش- کرنش (σ-ε) رسم گردید. حداکثر تنش فشاری قبل از آن‌که کرنش حاصله به بیش از ۱۵ درصد برسد با استفاده از نمودار تنش- کرنش تعیین و به‌عنوان مقاومت فشاری تک محوری (q_u) تعریف شد. میزان چسبندگی (C_u) نیز برابر نصف مقدار مقاومت فشاری تک محوری تعیین گردید. شیب قسمت اول منحنی‌های تنش- کرنش به‌عنوان مدول الاستیسیته اولیه تغییر شکل (E_s) محاسبه گردید. به شرایطی که نمونه نمی‌تواند پس از آن مرحله، فشار بیشتری را تحمل نماید شکست گفته می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، نقطه‌ای که بیشترین مقاومت را در برابر تغییر شکل در اثر فشاری محوری نشان می‌دهد، بیان‌گر لحظه و شرایط شکست می‌باشد. زوایای شکست خاک با افق بلافاصله پس از ایجاد ترک در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس توسط نقاله اندازه‌گیری شد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]



شکل ۲. منحنی‌های σ-ε در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس

پارامترهای حاصل از آزمایش تحکیم نیز از روابط زیر به‌دست آمدند.

$$C_v = ۰/۱۹H' / t_{۵۰} \quad [۳]$$

$$a_v = \Delta e / \Delta p \quad [۴]$$

$$m_v = a_v/(۱+e_۰) \quad [۵]$$

در این روابط، Δe تغییرات نسبت تخلخل، $e_۰$ نسبت تخلخل اولیه نمونه، Δp تغییرات بار (فشار) بر واحد سطح نمونه، $t_{۵۰}$ زمان ۵۰٪ تحکیم، C_V ضریب تحکیم، H میانگین طولانی‌ترین راه زهکشی آب در بارگذاری، a_v ضریب تراکم‌پذیری و m_v ضریب تغییر حجم می‌باشد.

بعد از رسم منحنی e- log p آزمایش تحکیم، شاخص فشردگی (C_c) در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس از رابطه زیر محاسبه شد.

$$C_c = \Delta e / (\log p_۲/p_۱) \quad [۶]$$

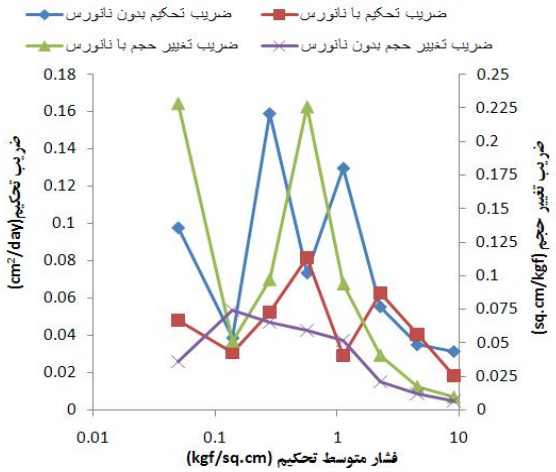
نتایج و بحث

با رسم منحنی دانه بندی مشخص گردید که مقادیر شن، ماسه، سیلت و رس خاک منطقه به ترتیب برابر ۱/۸، ۱۰/۱، ۴۵/۷ و ۴۲/۳ درصد بوده که با توجه به مثلث بافت خاک، نوع خاک منطقه در سیستم طبقه‌بندی USDA از نوع سیلتی رسی بوده است. همچنین با انجام آزمایش تعیین G_S، وزن مخصوص ویژه‌ی خاک برابر ۲/۶۳۴ به‌دست آمد. در شکل ۲ منحنی‌های تنش- کرنش برای تعیین مقاومت فشاری و تعیین مدول الاستیسیته در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس رسم شده است.

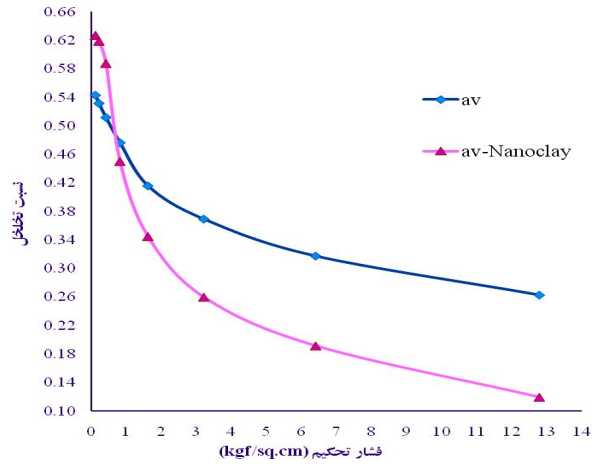
میزان مقاومت فشاری خاک قبل و بعد از افزودن نانورس به‌ترتیب برابر با ۳۸/۸ و ۴۴/۴N/sq.cm، میزان چسبندگی و مقاومت برشی قبل و بعد از تزریق نانورس به ترتیب برابر با ۱۹/۴ و ۲۲/۲ N/sq.cm به‌دست آمد. بنابراین با افزودن ۱ درصد وزنی ماده ی نانورس به خاک، درصد تغییرات مقاومت فشاری و مقاومت برشی حداکثر معادل ۱۴/۱۳ بوده است. همچنین بیان‌گر این مطلب است که با افزودن میزان یک درصد نانورس در خاک استحکام خاک بستر از حالت خیلی سخت به حالت بسیار سخت رسیده است. مقدار مدول الاستیسیته اولیه تغییر شکل در خاک حاوی و فاقد نانورس به ترتیب معادل ۷۰۰ و ۹۸۰ پاسکال بوده که نشان دهندهٔ کاهش ۲۸ درصدی این ضریب در خاک شامل نانورس می‌باشد. کاهش مدول الاستیسیته اولیه تغییر شکل در خاک حاوی نانورس نسبت به خاک فاقد نانورس نشان می‌دهد خاک حاوی نانورس دست خوردگی آن بیشتر از خاک فاقد نانورس بوده است که در پایداری و استحکام خاک تأثیر به سزایی دارد یعنی ترکیب خاک با نانورس به نیروهای داخلی نگهدارندهٔ ذرات کمک می کند که در برابر فشارهای بیشتر، کمتر از خود تغییر شکل نشان دهند، در واقع نیروهای داخلی بین ذرات را افزایش می‌دهد و این امر به ایجاد چسبندگی بیشتر و مقاومت فشاری بیشتر کمک می‌کند.

با مقایسه زوایای شکست در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس مشخص گردید که نوع شکست در نمونه خاک فاقد و حاوی نانورس از نوع شکست ترد است یعنی نمونه در یک یا چند جهت شکسته شده و ترک های ایجاد شده در سطح نمونه ظاهر شده است. زاویه شکست قبل از افزودن نانورس به خاک بستر کانال برابر ۶۵° بود که بعد از تزریق نانورس به آن به ۶۰°

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]



شکل۳. منحنی m_v و c_v آزمایش تحکیم در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس



شکل۴. منحنی a_v آزمایش تحکیم در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس

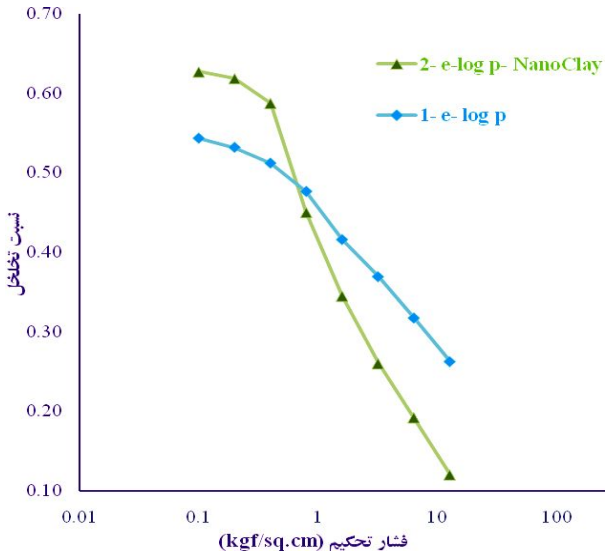
کاهش یافته است به عبارتی زاویه شکست ۵ درجه و یا ۸/۳ درصد کاهش پیدا کرد که این روند در آزمایشات فوق نشان دهنده‌ی این است که با افزودن ۱ درصد وزنی نانورس به خاک مورد آزمایش، تحمل بار وارده توسط نمونه افزایش یافته و زاویه شکست در نتیجه‌ی اتصال محکم‌تر ذرات خاک به یکدیگر کاهش و میزان چسبندگی نمونه افزایش یافته است که با نتایج تحقیقات (۵ و ۸) مطابقت دارد. در مطالعه‌ای برای افزایش مقاومت فشاری ماسه از نانوذرات سیلیکا بهره گرفته شد (۱۳). همچنین برای افزایش چسبندگی و همبستگی بین ذرات خاک و کاهش ویسکوزیته آن نیز از نانوذرات سیلیکا استفاده گردید (۱۰).

در شکل ۳ منحنی C_V و m_v آزمایش تحکیم در نمونه‌های خاک بستر حاوی و فاقد نانورس رسم گردیده است. با توجه به رسم منحنی C_v آزمایش تحکیم در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس مشخص گردید که با افزودن نانورس به نمونه ی خاک بستر تغییراتی در روند ضریب تحکیم ایجاد شد و میانگینC_v نمونه خاک فاقد نانورس معادل ۰/۰۴۷ و در ترکیب با نانوری معادل ۰/۰۳۳ است در نتیجه روند تغییرات در C_v کاهش یافته است. کاهش ضریب تحکیم نشان دهنده‌ی کندتر شدن سرعت وقوع نشست است. با توجه به منحنی m_v مشاهده شد که افزودن نانورس به خاک سبب تغییرات حجمی بیشتر در خاک شده است و به‌عبارتی تغییرات حجمی ارتباط مستقیمی با روند تغییرات ارتفاعی نمونه خاک در قالب نمونه ای تحکیم دارد و میانگین m_v در نمونه ی فاقد نانورس از ۰/۰۹۹ به ۰/۲۸۵ در نمونه‌ی حاوی نانورس تغییر یافت که به منزله افزایش ۲/۸ برابری در نشست تحکیمی است این امر بیان‌گر این مطلب است که تغییرات ارتفاعی در نمونه حاوی نانورس بیشتر، در نتیجه نشست در آن بیشتر شده است. بنابراین افزودن نانو رس باعث افزایش نشست و در ضمن طولانی شدن زمان تحکیم می‌شود.

در شکل ۴ نیز منحنی a_v آزمایش تحکیم در نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس آورده شده است. با انجام عمل تحکیم در دو نمونه خاک حاوی و فاقد نانورس در ضریب تراکم پذیری تغییراتی ایجاد شده است .ضریب تراکم پذیری در نمونه‌ی فاقد نانورس ۰/۰۲۹ و در نمونه‌ی حاوی نانورس ۰/۰۵۳ به‌دست آمده است، به بیان دیگر شیب این تغییرات با افزودن نانورس به خاک بستر ۸۲/۷۶ درصد افزایش یافته، در نتیجه ضریب تراکم‌پذیری بیشتر شده است.

در شکل ۵، منحنی e- log p آزمایش تحکیم در نمونه خاک بستر حاوی و فاقد نانورس رسم گردید. که با توجه به آن و محاسبه شاخص فشردگی از روی شیب این منحنی ها، شاخص فشردگی در نمونه‌ی فاقد نانورس ۰/۱۷۶ و در نمونه‌ی حاوی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]



شکل۵. منحنی e- log p آزمایش تحکیم در نمونه خاک بستر فاقد و حاوی نانورس

نانورس ۰/۲۸۶ به‌دست آمده است، بنابراین شاخص فشردگی در خاک حاوی نانورس بیشتر از خاک فاقد نانورس بوده است و میزان فشار پیش تحکیمی خاک(p_c) نیز از ۱/۲ به ۰/۵۱ رسیده است به عبارتی با افزودن نانورس مقدار آن کمتر شده است و بیان‌گر این مطلب است که تحمل خاک برای فشارهای سرباری که در آینده متحمل خواهد شد، بیشتر خواهد گشت.

با اعمال بارگذاری روی نمونه ها، تغییرات ارتفاعی در نمونه های حاوی نانورس بیشتر بوده است و این تغییرات ارتفاعی حاکی از آن است که وجود نانورس با توجه به ویژگی سطح ویژه ی بالا در خاک، سبب تغییر در ساختار خاک و کاهش نسبت تخلخل نهایی گردیده است. نمونه های متراکم شده حاوی نانورس با بارگذاری بر آن تراکم پذیرتر گشته و این حالت متراکم شدن بیشتر در منحنی a_v که نشان‌دهنده‌ی ضریب تراکم پذیری است، قابل مشاهده است و افزایش شاخص فشردگی نشان‌دهنده‌ی نشست بیشتر در این نوع نمونه‌ها بوده است.

افزودن نانورسی با این خصوصیات شیمیایی در حین بارگذاری مانند احداث سازه در محل که کمترین نشست را در پی داشته باشد، نتیجه‌ی مثبتی نخواهد داشت. اما می‌توان قبل از احداث سازه برای عملیات پیش بارگذاری از این ماده با این ترکیب شیمیایی استفاده نمود به‌عبارت دیگر در محل‌هایی که مدت زمان نشست طولانی و میزان نشست خاک در دراز مدت بسیار است برای کاهش میزان نشست در اثر احداث سازه‌ها می‌توان از این ماده‌ی نانورسی استفاده نمود. در خاک‌های ریزدانه نشست در مدت زمان طولانی اتفاق خواهد افتاد و سازه‌های احداثی بعد از مدتی در اثر نشست تخریب می‌شوند، برای جلوگیری از این حوادث هم، افزودن نانورس به خاک برای تسریع در نشست با عملیات تحکیمی که به آن پیش‌بارگذاری گویند، نتایج مثبتی در دراز مدت به دنبال خواهد داشت. در تحقیقی تأثیر ساختار خاک بر پارامترهای تحکیمی خاک های غنی از نانوذرات بررسی شد (۲). در ایالات متحده با استفاده از نانومواد بهبود ۴۰ درصدی نشست را با اعمال زلزله مصنوعی و ارزیابی نشست اعمال شده در آن گزارش شد (۹).

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این تحقیق می توان گفت که نانورس باعث بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بستر کانال می گردد. با انجام آزمایش تک‌محوری مقاومت فشاری خاک در برابر نیروهای سربار ناشی از بار قائم افزایش یافت که این امر باعث کاهش زاویه شکست، افزایش خاصیت چسبندگی و تغییر شکل‌پذیری کمتر خاک گردید. . نتایج حاصل از آزمایش تحکیم در این تحقیق نشان داد که نمونه های متراکم شده حاوی نانورس با بارگذاری بر روی آن نسبت به نمونه‌های فاقد نانورس و با همان میزان فشار سربار تراکم پذیرتر گشته و تغییرات حجمی آن به دلیل تغییرات ارتفاعی در نمونه افزایش یافته است یعنی وجود این کانی در ساختار و اسکلت خاک تغییراتی ایجاد نموده که سبب کاهش نسبت تخلخل نهایی خاک و افزایش شاخص فشردگی شده است. در نتیجه با تزریق ماده ی نانورس در خاک پایداری و استحکام خاک بیشتر شده و می‌توان از خاک همان منطقه برای ساخت کانال‌ها استفاده نمود

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]

و دیگر نیازی به حمل مصالح قرضه که هم هزینه زیادی داشته و هم اینکه باعث ایجاد عوارض ژئومورفولوژیکی و زیست محیطی زیادی می شود نخواهد بود، که این امر کاهش هزینه طرح‌ها را به دنبال خواهد شد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از اعضای محترم آزمایشگاه مکانیک خاک مرکز تحقیق، توسعه و تکنولوژی هراز به‌دلیل همکاری‌های لازم جهت انجام این پژوهش تقدیر و تشکر می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. سلیمی، ه.، م. کرمی و م. محمدی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی اثر نانو سیلیس بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس رشت. همایش ملی سازه، راه و معماری. دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس. ۳ تا ۴ اسفند ۱۳۹۰.

۲. سیدی گل سفیدی، ع.، م. ح. بازیار، س. م. میرکاظمی و ح. قاضی. ۱۳۹۰. کاربردهای فناوری نانو در مهندسی ژئوتکنیک. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه. دانشگاه آزاد اسلامی لشت نشا- زیباکنار. ۲۷ بهمن ۱۳۹۰.

۳. صادقی نیک، ع.، ع. بهاری و ن. منوچهریان. ۱۳۸۹. بررسی نقش نانو ذرات در استحکام ساختمان‌ها. پروژه پژوهشی باشگاه پژوهشگران جوان. دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار.

۴. نعمتی کوتنایی، م.، ر. فضل اولی و ع. شاه‌نظری. ۱۳۸۸. بررسی اثر برداشت مصالح رودخانه‌ای بر سیستم رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه ماشلک). پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۵. محمدزاده ثانی، ا.، م. عربانی، ا. خداپرست حقی و ر. جمشیدی چناری. ۱۳۸۹. تأثیر نانورس بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی ماسه‌های رس‌دار. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. تهران. ۱۱ تا ۱۲ آبان ۱۳۸۹.

6. Bahari, A., A. Sadeghi nik, M. Roodbari, K. Taghavi and S. E. Mirshafiei. 2012. Synthesis and strength study of cement mortars containing sic nano particles. Digest J. Nanomater. Biostr. 7: 1427-1435

7. Carmen, D. H. 1996. Clay and Clay Minerals. 44: 424-428.

8. Daniels, J. M., P. Mehta, M. Vaden, D. Sweem, M. D. Mason, M. Zavareh and V. Ogunro. 2009. Nano-scale organo-silane applications in geotechnical and geoenvironmental engineering. J. Terraspace Sci. Eng. 1: 21-30.

9. Gallagher, P. M., C. T. Conlee and K. M. Rollins. 2005. Full-scale field testing of colloidal silica grouting for mitigation of liquefaction risk. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133: 186-196.

10. Gallagher, P. M. and Y. Lin. 2005. Column testing to determine colloid silica transport mechanisms. Geo-Frontiers Congress, 24-26 Janury, USA.

11. Ke, Y. C. and P. stroeve. 2005. Polymer–layered silicate and silica nanocomposites. Elsevier science publishers B. V. Amsterdam. The Netherlands.

12. Quang, T., T. Nguyen and D. G. Baird. 2007. An improved technique for exfoliating and dispersing nanoclay particles into polymer matrices using supercritical carbon dioxide. Polymer. 48: 6923- 6933.

13. Yonekura, R. and M. Miwa. 1993. Fundamental properties of sodium silicate based grout. 11th SAG C, 4-8 May, Singapore.

14. Zhongzhong, Q. 2008. Preparation and X characterization of MMT-Sillica nanocomposite: a Sol-gel approach modifying clay surface. Physic. B. 403: 3231-3238.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1394.19.72.10.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10]