Archive of SID

بررسی تأثیر نانورس بر خصوصیات مهندسی هسته سدهای خاکی

صادق قوامی جمال[۱]، علی مهدی فرانی[۲]، محمد حسین مبینی[۳]، مهرداد رجبی حران[۴]، علیرضا فرخی[۵]

۱- استاد مدعو دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی گرمسار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش آب و سازه‌های هیدرولیکی، مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی گرمسار

۳- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

۴- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۵- عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی علاءالدوله سمنانی گرمسار

چکیده

سدهای خاکی به عنوان یکی از سازه‌های خاکی معمولاً شامل هسته‌ای در میان سطح مقطع آن است که نقش مهمی در کاهش میزان نشت از طریق بدنه سد دارد. به‌دلیل برخی مشکلات فنی و اجرایی، در هسته سدهای خاکی از خاک رسی مخلوط به‌جای خاک رسی خالص استفاده می‌شود. ممکن است در برخی موارد نیاز به بهبود خصوصیات مکانیکی و مهندسی این خاک‌ها در رابطه با عملکرد مورد نیاز هسته سد خاکی باشد. یکی از روش‌های نوین بهسازی خاک‌ها استفاده از نانوذرات به عنوان افزودنی است. نانورس به دلیل سطح ویژه بالا و خصوصیات فیزیکی، پتانسیل بالایی در بهبود پارامترهای مهندسی خاک دارد. به علاوه از نظر اقتصادی، نانورس به عنوان یکی از مواد کم هزینه در بین تمام نانومواد قابل استفاده در صنعت ساخت محسوب می‌شود. در این تحقیق، اثر نانورس بر خصوصیات مهندسی خاک رس مخلوط مورد استفاده در هسته سدهای خاکی مورد مطالعه قرار گرفته است. درصدهای مختلفی از نانورس شامل ۱، ۲ و ۴ درصد نسبت به وزن خشک خاک به نمونه‌ها افزوده و آزمایش‌های تراکم، مقاومت فشاری محصور نشده و نفوذپذیری انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن نانورس به خاک مخلوط موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک می‌شود. نانورس علاوه بر پر کردن فضای خالی بین ذرات و کاهش نفوذپذیری، موجب می‌شود که ذرات نانو در کنار آب، یک ژل ویسکوز تولید کنند که باعث اتصال بین ذرات خاک و ایجاد ساختار متراکم‌تر می‌گردد که منجر به افزایش مقاومت خاک می‌شود.

کلمات کلیدی: نانورس، هسته سدهای خاکی، خصوصیات مهندسی، هدایت هیدرولیکی، مقاومت

۱- مقدمه

با توجه به اینکه در هسته سدهای خاکی، فشار آب حفره‌ای از عوامل ناپایداری و آسیب در این سدها می‌باشد، انتخاب مصالح مناسب برای هسته اهمیت زیادی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که مشکلات فنی و اجرایی نظیر زمان زیاد اجرا، حجم زیاد مصالح رسی، حساسیت بالای مصالح رسی به شرایط آب و هوایی موجب شده است که در هسته سدهای خاکی از خاک رسی مخلوط به جای خاک رس خالص استفاده شود. اکثر سدهای خاکی ساخته شده در گذشته به دلیل نفوذپذیری کم خاک رس دارای هسته رسی بودند. اما محدودیت منابع قرضه خاک رس، موجب شد مهندسین ژئوتکنیک به فکر جایگزین کردن این مصالح با مصالحی با مقاومت بالا و نفوذپذیری نسبتاً پایین باشند. از این رو از خاک‌های مخلوط که ترکیبی از مصالح دانه‌ای مانند ماسه و مصالح چسبنده مانند رس هستند، استفاده می‌شود. از آنجا که رفتار مکانیکی این خاک‌های مخلوط، حد میانی

www.SID.ir

Archive of SID

خاک‌های رسی و دانه‌ای است ممکن است در برخی موارد نیاز به بهبود خصوصیات مکانیکی و مهندسی این خاک‌ها در رابطه با عملکرد مورد نیاز هسته سد خاکی باشد.

به منظور بهبود خصوصیات خاک‌ها، روش‌های بسیاری وجود دارد که به عنوان روش‌های بهسازی و تثبیت خاک‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. تمام روش‌های بهسازی زمین منطبق با هدف پروژه و شرایط ساختگاه، سعی در بهبود پارامترهای ژئوتکنیکی خاک دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به افزایش مقاومت برشی به منظور تأمین پایداری، کاهش تراکم‌پذیری خاک جهت کاهش نشست و یا کاهش نفوذپذیری به منظور کنترل جریان آب زیرزمینی اشاره کرد. (Moseley and Kirsch, 2004). یکی از روش‌های بهسازی و بهبود مشخصات فنی خاک، تثبیت خاک با استفاده از مواد افزودنی است. با پیشرفت علوم نانو و فرآوری محصولات متنوع در مقیاس نانومتر، امکان استفاده از این محصولات در پروژه‌های مهندسی عمران نیز فراهم آمده است. برای اولین بار ایده فناوری نانو توسط Feynman (1960) مطرح شد. در حال حاضر انواع مختلفی از نانوذرات از جمله نانوکربن، نانولوله‌های کربن، نانورس‌ها و اکسیدهای فلزی برای بهبود عملکرد خاک استفاده می‌شود (Ben-Moshe et al., 2013; Correia et al., 2015; Khalid et al., 2015; Alsharef et al., 2016). یکی از ویژگی‌های مهم کانی‌های رسی، مانند مونت موریلونیت، ساختار ورقه‌ای آن‌ها می‌باشد که منجر به اصلاح خصوصیات رس می‌شود. به طور کلی، مواد معدنی رس ممکن است در حضور آب به دلیل خاصیت تیکسوتروپیک، تشکیل ژل دهند و جذب آب زیاد و ظرفیت بالای تبادل کاتیون داشته باشند (Uddin, 2008). از نظر اقتصادی، نانورس به عنوان یکی از مواد کم هزینه در بین تمام نانومواد قابل استفاده در صنعت ساخت محسوب می‌شود. به علاوه، هزینه‌های تولید نانومواد با گذشت زمان به میزان قابل توجهی کاهش یافته زیرا تکنولوژی‌های مدرن، بازده تولید این مواد را ارتقاء داده است و به خصوص هنگامی که مقدار زیادی از نانومواد مورد نیاز است هزینه‌ها کمتر خواهد بود (Low et al., 2017).

در این تحقیق تأثیر افزودن نانورس بر خصوصیات مهندسی خاک رس مخلوط (رس و ماسه)، جهت ساخت هسته‌ی رسی سدهای خاکی، مانند پارامترهای تراکمی و مقاومتی و نفوذپذیری بررسی می گردد. بدین منظور پس از شناسایی مشخصات پایه‌ی خاک مورد مطالعه، آزمایش‌های تراکم استاندارد، نفوذپذیری و مقاومت فشاری محصور نشده بر نمونه‌های خاک حاوی ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس (نسبت به وزن خشک خاک) انجام می‌شود.

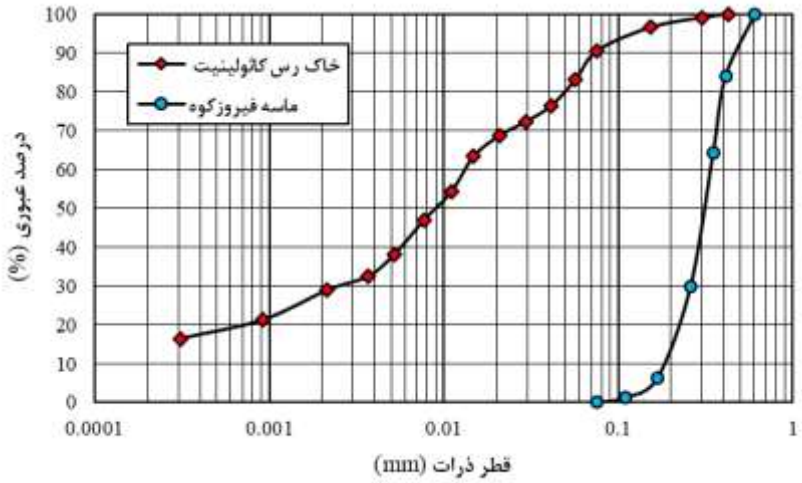
۲- مصالح

در این تحقیق، از خاک رس کائولینیت و ماسه ۱۶۱ فیروزکوه برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. خاک رس کائولینیت از شرکت صنایع خاک چینی ایران با نام تجاری ZMK1 تهیه گردید که تصویر آن در شکل ۱ نشان داده شده است. منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت در شکل ۲ و مشخصات مهندسی آن در جدول ۱ ارائه شده است. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی خاک رس کائولینیت که از آنالیز XRF به دست آمده را نشان می‌دهد. به منظور شناسایی کانی‌های تشکیل‌دهنده این خاک آنالیز XRD انجام شد که براساس نتایج آن، عمده کانی‌های تشکیل دهنده خاک رس، کائولینیت، کوارتز و کلسیت تعیین گردید. ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانه‌بندی یکنواخت (SP) است که منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است. چگالی دانه‌های ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ۲/۶۵۸ به دست آمد. جدول ۲ ترکیبات شیمیایی موجود در این ماسه را نشان می‌دهد. از نانورس مونت موریلونیت به عنوان افزودنی در خاک استفاده شد که محصول شرکت سیگما آلدریچ است و از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه گردید. خصوصیات فیزیکی آن در جدول ۳ و ترکیبات شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۱): خاک رس کائولینیت تهیه شده از شرکت صنایع خاک چینی ایران.



شکل (۲): منحنی دانه‌بندی خاک رس کائولینیت و ماسه ۱۶۱ فیروزکوه.

جدول (۱): مشخصات خاک رس کائولینیت مصرفی.

پارامتر	مقدار
وزن مخصوص	۲/۶۵
حد روانی (٪)	۲۹/۵
حد خمیری (٪)	۲۱/۵
شاخص پلاستیسیته (٪)	۸
دانسیته خشک حداکثر (kN/m^3)	۱۷
رطوبت بهینه (٪)	۱۶/۲
نام خاک براساس طبقه‌بندی متحد	CL

جدول (۲): ترکیبات شیمیایی موجود در خاک رس کائولینیت، ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و نانورس.

www.SID.ir

Archive of SID

ترکیب	رس کائولینیت	ماسه فیروزکوه	نانورس
SiO_2	72.5	92.5	55.83
Al_2O_3	18.07	0.92	19.5
MgO	0.61	0.26	3.48
Na_2O	0.25	-	1.05
K_2O	0.39	0.15	0.79
Cl	0.44	-	-
SO_3	0.06	-	-
P_2O_5	0.04	-	-
SrO	0.11	-	-
Fe_2O_3	0.36	0.88	6.57
TiO_2	0.02	-	0.65
CaO	1.15	0.25	2.04
LOI	6.0	5.04	10.09

جدول (۳): خصوصیات فیزیکی نانورس.

پارامتر	مقدار
چگالی (g/cm^3)	۰/۳۵
سطح مخصوص (m^2/g)	۷۵۰
اندازه ذرات (nm)	۲۰-۱
رنگ	کرم متمایل به زرد

همان‌طور که در بخش مقدمه گفته شد، به دلیل برخی مشکلات فنی و اجرایی، امروزه در هسته سدهای خاکی از خاک رسی مخلوط به جای خاک رس خالص استفاده می‌شود. به عنوان مثال در سد کرخه که بزرگترین سد مخزنی ایران با ارتفاع ۱۲۷ متر است، از هسته رسی مخلوط (متشکل از ۶۰ درصد رس و ۴۰ درصد مصالح دانه‌ای) استفاده شده است. از این رو در این تحقیق، خاک رس مخلوط متشکل از ۶۰ درصد رس کائولینیت و ۴۰ درصد ماسه فیروزکوه انتخاب شد و از این پس با عنوان "خاک" در نظر گرفته می‌شود. به منظور بررسی تأثیر نانورس بر خصوصیات مهندسی خاک، ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس (نسبت به وزن خشک خاک) به آن افزوده شد. ابتدا نانورس با مقدار آبی که برای تراکم خاک در نظر گرفته شده است به مدت ۲۰ دقیقه در دستگاه همزن مخلوط می‌شود و سوسپانسیون تهیه شده به تدریج به خاک اضافه می‌گردد.

۳- آزمایش‌ها

در رطوبت‌های کم، وقتی آب به خاک اضافه می‌شود، ذرات خاک، آب اضافه شده را به صورت لایه‌ای اطراف خود جذب می‌کند و این لایه نقش روغن‌کاری و نرم کردن محیط را ایفا می‌کند. اما در رطوبت‌های زیاد، آب فضای خالی بین دانه‌ها را پر می‌کند و مانع نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌شوند. به تعبیری دیگر وجود بیش از حد آب باعث می‌گردد انرژی اعمالی به توده، توسط ذرات آب جذب شده و به دانه‌های خاک منتقل نشود. رطوبت خاک جهت تراکم باید نه کم و نه زیاد باشد، بلکه باید در مقدار بهینه‌ای قرار داشته باشد که به آن «رطوبت بهینه w_{opt}» گفته می‌شود. رطوبت بهینه، باعث بیشترین تراکم خاک و دستیابی به «وزن مخصوص خشک حداکثر γ_{max}» می‌شود. هدف آزمایش تراکم به دست آوردن w_{opt} و γ_{max} است. این مشخصه‌های تراکمی اثر مهمی بر خصوصیات مهندسی خاک مانند مقاومت، تراکم‌پذیری و نفوذپذیری دارد. به همین دلیل آزمایش تراکم استاندارد برای هر مخلوط با درصدهای متفاوت نانورس انجام شد. پس از اضافه کردن نانورس به نمونه‌ها، آن‌ها را به مدت ۲۴ ساعت داخل محفظه پلاستیکی نگه داشته و سپس آزمایش تراکم بر مخلوط انجام شد. در آزمایش تراکم استاندارد طبق ASTM D 698، نمونه خاک مورد نظر در ۳ لایه و ۲۵ ضربه با انرژی ۶۰۰ کیلو نیوتن‌متر بر مترمکعب در قالبی به قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر و با چکشی به وزن ۲۴/۴ نیوتن که از ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر رها می‌شود متراکم می‌گردد.

www.SID.ir

Archive of SID

آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده (تک‌محوری) یک روش سریع برای تعیین مقاومت تقریبی خاک‌های چسبنده است. به منظور انجام آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده طبق استاندارد ASTM D 2166، با توجه به ابعاد قالب نمونه تک محوری (قطر ۳۸ میلی‌متر و ارتفاع ۷۶ میلی‌متر) مقدار مشخصی خاک خشک با درصدهای مختلف نانورس (همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد) به طور همگن مخلوط شد. پس از اختلاط، نمونه‌ها در رطوبت بهینه، با تراکم ۱۰۰ درصد دانسیته خشک حداکثر در قالب متراکم شدند. پس از خارج کردن نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل از قالب، یک لایه سلفون به دور آنها پیچیده شد و در داخل کیسه پلاستیکی در دمای ۱/۷± ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا مدت عمل‌آوری ۷ روزه طی شود. پس از عمل‌آوری، نمونه‌ها در دستگاه آزمایش تک محوری تحت بارگذاری با نرخ کرنش ۱٪ بر دقیقه قرار گرفتند.

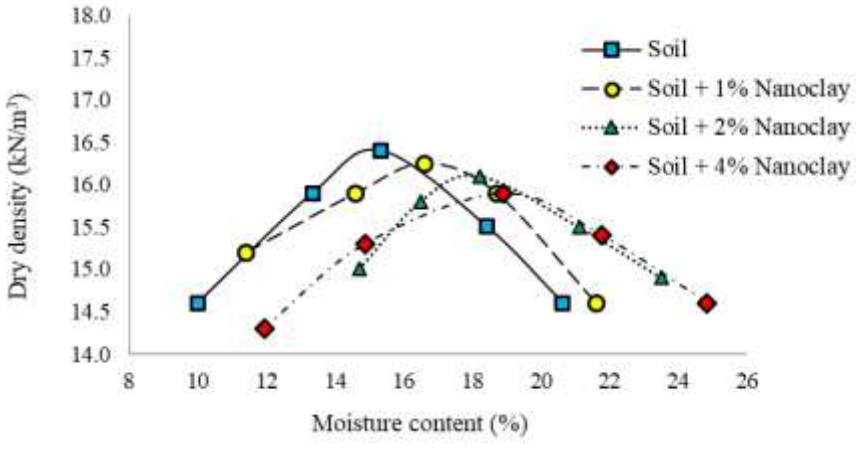
نفوذپذیری، امکان جریان آب در خاک اشباع است که در خاک‌های ریزدانه با انجام آزمایش هد افتان اندازه‌گیری می‌شود. در این آزمایش نمونه خاک در یک لوله قرار داده شده و اجازه داده می شود که آب در آن جریان پیدا کند. اختلاف هد اولیه در زمان t=0، مقدار h_1 ثبت می شود و با جریان آب در میان خاک، مقدار اختلاف هد در زمان t=t، h_2 ثبت می‌گردد. ضریب نفوذ پذیری K به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K = 2.303 \frac{al}{At} \log \frac{h_1}{h_2}$$

که در آن h اختلاف هد بر حسب سانتی‌متر در زمان t، A سطح مقطع نمونه خاک برحسب سانتی‌متر مربع، a سطح مقطع لوله قائم برحسب سانتی‌متر مربع و L طول نمونه خاک برحسب سانتی‌متر است. نفوذپذیری نمونه های حاوی نانورس با استفاده از آزمایش هد افتان براساس استاندارد ASTM D 5084 انجام شد.

۴- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

منحنی تراکم برای خاک و نمونه‌های حاوی نانورس در شکل ۳ نشان داده شده است. برای هر مخلوط ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و منحنی تراکم (وزن مخصوص خشک - درصد رطوبت) به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش مقدار نانورس در خاک موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک شده است. این نتایج منطبق بر نتایج تحقیقات Fakhri et al. (2016) و Tabarsa (2017) می‌باشد. با افزودن ۴ درصد نانورس به خاک، درصد رطوبت بهینه از ۱۵/۳ به ۱۸/۹ درصد رسیده است. مخلوط کردن خاک با نانورس که حاوی کانی‌های مونت موریلونیت است، با توجه به سطح ویژه بالای ذرات آن باعث جذب بیشتر آب (رطوبت) در خاک شده و در نتیجه درصد رطوبت بهینه نمونه را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر به دلیل سبک بودن ذرات نانورس، افزودن ۴ درصد نانورس به خاک موجب کاهش ۳ درصدی دانسیته خشک حداکثر نمونه شده است و دانسیته خشک حداکثر از ۱۶/۴ به ۱۵/۹ کیلونیوتن بر مترمکعب رسیده است. به علاوه هرچه مقدار درصد رطوبت بهینه تراکم خاک بیشتر شود، مقدار ذرات موجود در واحد حجم خاک کمتر شده و کاهش دانسیته خاک را به دنبال دارد (Ghavami et al. 2020).

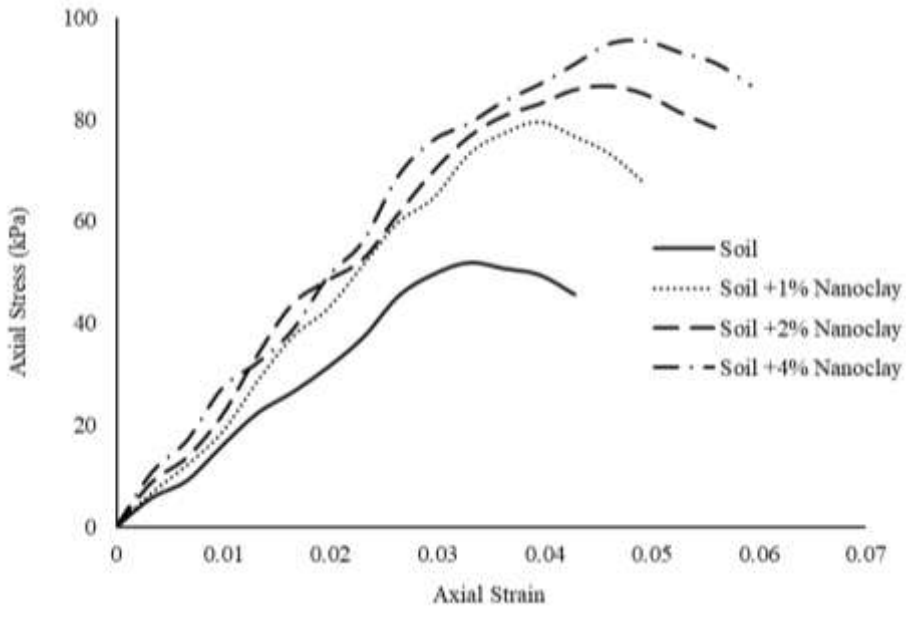


www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۳): منحنی تراکم نمونه‌ها.

نمونه‌های حاوی نانورس پس از ۷ روز عمل‌آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده قرار گرفتند. شکل ۴ منحنی تنش-کرنش به دست آمده را برای خاک خالص و نمونه‌های حاوی نانورس نشان می‌دهد. افزایش درصد نانورس به افزایش نقاط برخورد ذرات خاک یعنی عامل چسبندگی و اصطکاک بین ذرات و قفل و بست آن‌ها می‌گردد و فضای خالی بین ذرات را پر می‌کند که این عوامل منجر به ایجاد ساختار متراکم‌تر و افزایش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. این روند افزایش مقاومت با استفاده از نانوذرات در تحقیقات Mohammadzadeh Sani et al. (2010) و Ghavami et al. (2018) نیز گزارش شده است. از طرفی با افزودن آب، ذرات نانو یک ژل ویسکوز تولید می‌کند که ذرات خاک را به هم متصل می کند. این چسبندگی بین ذرات به دلیل ژل ویسکوز احتمالاً از آب جذبی بین ذرات است. این ژل ویسکوز اصطکاک بین ذرات را افزایش داده و سبب افزایش مقاومت می‌گردد. مقاومت نمونه‌ها با ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس به ترتیب حدود ۵۳، ۶۷ و ۸۴ درصد افزایش پیدا کرده و به ۷۹/۵، ۸۶/۵ و ۹۵/۵ کیلوپاسکال رسیده است. میزان افزایش مقاومت با بیشتر شدن مقدار نانورس کمتر می‌شود. این امر را می‌توان ناشی از این دانست که با افزایش درصد نانورس، ممکن است این ذرات به صورت یکنواخت در خاک پراکنده نشود و این ذرات به هم بچسبند و دیگر عملکرد نانو نداشته باشند. همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است افزایش مقدار نانورس موجب می‌شود که تنش حداکثر در کرنش بیشتری اتفاق بیفتد. علت این امر را می‌توان ناشی از این دانست که به دلیل سطح ویژه بالای ذرات نانورس، آب بیشتری جذب می شود و موجب می شود که ذرات خاک راحت تر روی یکدیگر بلغزند. در نتیجه کرنش گسیختگی افزایش می‌یابد. به طوری که کرنش متناظر با تنش بیشینه با افزودن ۴ درصد نانورس از ۳ درصد به ۵ درصد می‌رسد.

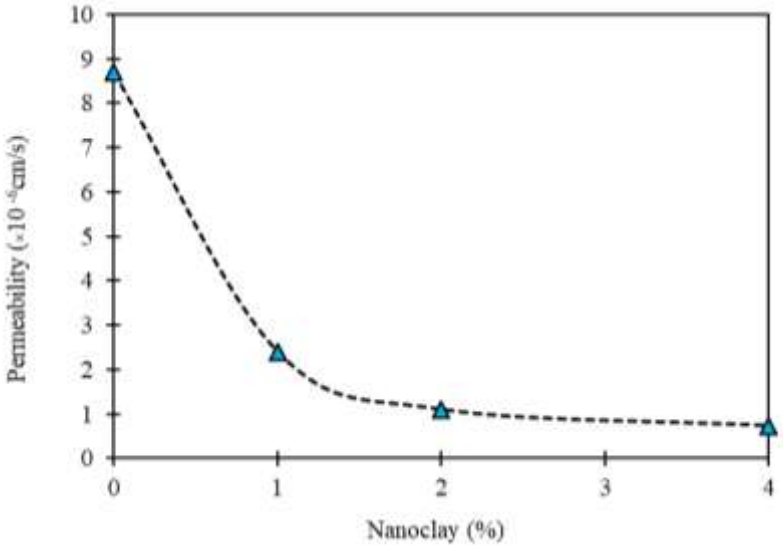


www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۴): منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها در آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده پس از ۷ روز عمل‌آوری.

مقادیر نفوذپذیری نمونه‌ها با درصدهای مختلف نانورس براساس آزمون هد افتان در شکل ۵ آمده است. با افزایش مقدار نانورس، نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که ۴ درصد نانورس موجب کاهش ۱۲ برابری نفوذپذیری خاک شده و نفوذپذیری نمونه خاک خالص از $۸/۷ \times ۱۰^{-۶}$ به $۰/۷۳ \times ۱۰^{-۶}$ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد. علت کاهش نفوذپذیری نمونه‌ها را می‌توان به خاصیت پرکنندگی ذرات نانورس بین ذرات خاک نسبت داد. از طرفی ظرفیت تبادل کاتیونی و مقادیر کاتیون‌های تبادلی با افزودن نانورس به خاک تغییر می‌کند. با افزایش میزان نانورس موجود در نمونه، ظرفیت تبادل کاتیونی و نسبت کاتیون‌های تک ظرفیتی به دو ظرفیتی آن افزایش می‌یابد. افزایش در ظرفیت تبادل کاتیونی به دلیل افزایش مقدار Na^+ است. با افزایش کاتیون‌های تک ظرفیتی میزان پراکندگی کریستال‌ها بیشتر شده در نتیجه ذرات ریزتر شده و سطح ویژه آن‌ها افزایش می‌یابد. افزایش در سطح ویژه منجر به افزایش ضخامت آب لایه دوگانه و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌گردد.



www.SID.ir

Archive of SID

شکل (۵): تغییرات نفوذپذیری نمونه‌ها با افزودن نانورس.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، خاک رس مخلوط متشکل از ۶۰ درصد رس کائولینیت و ۴۰ درصد ماسه فیروزکوه به عنوان مصالح هسته سد خاکی انتخاب شد. به منظور بررسی تأثیر نانورس بر خصوصیات مهندسی خاک، ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس (نسبت به وزن خشک خاک) به آن افزوده شد و آزمون‌های تراکم استاندارد، مقاومت فشاری محصور نشده و نفوذپذیری بر نمونه‌ها انجام شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد:

- افزودن نانورس به خاک مخلوط موجب افزایش رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک می شود. با افزودن ۴ درصد نانورس به خاک، درصد رطوبت بهینه از ۱۵/۳ به ۱۸/۹ درصد می رسد. از طرف دیگر ۴ درصد نانورس موجب کاهش ۳ درصدی دانسیته خشک حداکثر نمونه شده است و دانسیته خشک حداکثر را از ۱۶/۴ به ۱۵/۹ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌رساند.
- استفاده از نانورس در خاک مخلوط موجب افزایش مقاومت فشاری محصور شده نمونه‌ها می‌شود. مقاومت نمونه‌ها با ۱، ۲ و ۴ درصد نانورس به ترتیب حدود ۵۳، ۶۷ و ۸۴ درصد افزایش پیدا کرده و به ۷۹/۵، ۸۶/۵ و ۹۵/۵ کیلوپاسکال می‌رسد. افزایش مقدار نانورس موجب می‌شود که تنش حداکثر در کرنش بیشتری اتفاق بیفتد و خاک رفتار نرم‌تری از خود نشان دهد. افزودن نانورس علاوه بر پر کردن فضای خالی بین ذرات، موجب می‌شود که ذرات نانو در کنار آب، یک ژل ویسکوز تولید کنندکه باعث اتصال بین ذرات خاک و ایجاد ساختار متراکم‌تر می‌گردد و نقاط برخورد ذرات خاک یعنی عامل چسبندگی و اصطکاک و به دنبال آن مقاومت نمونه‌ها افزایش می‌یابد.
- با افزایش مقدار نانورس، نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که ۴ درصد نانورس موجب کاهش ۱۲ برابری نفوذپذیری خاک شده و نفوذپذیری نمونه از $۸/۷ \times ۱۰^{-۶}$ به $۰/۷۳ \times ۱۰^{-۶}$ سانتی‌متر بر ثانیه می‌رسد.

مراجع

Alsharef, J. M. A., Taha, M. R., Firoozi, A. A., and Govindasamy, P. (2016). *Potential of Using Nanocarbons to Stabilize Weak Soils*. Applied and Environmental Soil Science, 2016: 1–9.

Ben-Moshe, T., Frenk, S., Dror, I., Minz, D., and Berkowitz, B. (2013). *Effects of metal oxide nanoparticles on soil properties.* Chemosphere, 90 (2): 640–646.

Correia, A. A. S., Casaleiro, P. D. F., and Rasteiro, M. G. B. V. (2015). *Applying Multiwall Carbon Nanotubes for Soil Stabilization.* Procedia Engineering, 102: 1766–1775.

Fakhri, Z., Pourhosseini Ardekani, R., and Ebadi, T. (2016). *Improvement in the Hydraulic Properties of Kaolinite with Adding Nanoclay*. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 47 (3): 39-46.

Feynman, R. P. (1960). *There's plenty of room at the bottom*. Engineering and Science, 23(5): 22–36.

www.SID.ir

Archive of SID

Ghavami, S., Farahani, B., Jahanbakhsh, H., Moghadas Nejad, F. (2018). *Effects of Silica Fume and Nano-silica on the Engineering Properties of Kaolinite Clay*. AUT Journal of Civil Engineering, 2 (2): 135-142.

Ghavami, S., Jahanbakhsh, H., Saeedi Azizkandi, A., and Moghaddas Nejad, F. (2020). *Influence of sodium chloride on cement kiln dust-treated clayey soil: strength properties, cost analysis, and environmental impact*. Environment, Development and Sustainability.

Khalid, N., Mukri, M., Kamarudin, F., Abdul Ghani, A. H., Arshad, M. F., Sidek, N., Ahmad Jalani, A. Z. and Bilong, B. (2015). *Effect of Nanoclay in Soft Soil Stabilization*. InCIEC 2014, 905–914.

Low, I. M., Hakamy, A., & Shaikh, F. (2017). *High Performance Natural Fiber-Nanoclay Reinforced Cement Nanocomposites*. SpringerBriefs in Molecular Science.

Mohammadzadeh Sani, A., Arabani, M., Khodaparast, A. Jamshidi Chenari, R. (2010). *The effect of nanoclay on the geotechnical properties of clay sands*. 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran, Iran.

Moseley, M. P., Kirsch, K. 2004. *Ground improvement*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Tabarsa, A. (2017). *Effect of Adding Nanoclay on the Geotechnical Behavior of Fine-grained Soft Soils*. Journal of Engineering Geology, 11 (2): 225-246.

Uddin, F. (2008). *Clays, Nanoclays, and Montmorillonite Minerals*. Metallurgical and Materials Transactions A, 39(12): 2804–2814.

www.SID.ir