

تأثیر ماده افزودنی نانوسیلیس بر فرسایش پذیری خاک

سید محمد علی زمردیان^{۱*} و آرمینا سلیمانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱)

چکیده

پدیده فرسایش یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب سازه‌های آبی است. لذا اصلاح خاک جهت بهبود کیفیت آن و کاهش فرسایش، امری مهم به‌شمار می‌رود. با توجه به اثرهای زیانبار موادی همچون آهک و خاکستر بر محیط زیست و توسعه روز افزون به‌کارگیری فناوری نانو در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی، استفاده از ذرات نانو به‌عنوان مواد افزودنی نوین، روشی کارآمد تلقی می‌شود. در این تحقیق، برای بررسی تأثیر ماده افزودنی نانوسیلیس در کنترل فرسایش ماسه، از دستگاه تابع فرسایش (EFA) استفاده شده است. نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با مقادیر صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۴ درصد وزنی خاک خشک در قالب تراکم استاندارد تراکم گردیده و به‌وسیله یک فلوم بسته تحت دبی‌های متغیر مورد آزمایش فرسایش‌پذیری قرار گرفتند. پارامترهای فرسایش‌پذیری به‌دست آمده نشان داد که با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک خشک، فرسایش‌پذیری نسبت به نمونه شاهد ۹۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که تراکم نمونه‌ها در درصد رطوبت بهینه سبب می‌شود خاک بیشترین مقاومت در برابر فرسایش را از خود نشان دهد. نتایج تصویر میکروسکوپی (SEM) نشان می‌دهد که با افزودن ذرات نانوسیلیس به خاک خشک، ساختار خاک متراکم‌تر می‌شود، که این امر موجب کاهش فرسایش‌پذیری می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: اصلاح خاک، دستگاه تابع فرسایش، ضریب فرسایش‌پذیری، نانوسیلیس

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: mzomorod@shirazu.ac.ir

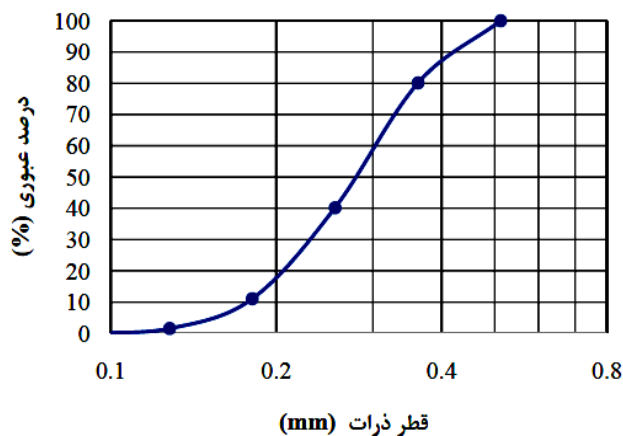
مقدمه

یکی از مهم‌ترین عواملی که سازه‌های آبی را تهدید می‌کند فرسایش آبی است. به طوری که آمار خرابی سدهای خاکی بزرگ تا سال ۱۹۸۶ نشان می‌دهد که لبریزی آب از مخزن سد ۳۴/۲٪ و فرسایش داخل خاکریزها ۳۲/۵٪ از علل خرابی سدهای خاکی را به خود اختصاص می‌دهند (۱۴). اگر خاک چسبندگی کافی را نداشته باشد توسط عوامل طبیعی مانند طوفان‌های شدید، باران‌های سنگین و یا سیل، به شدت فرسایش می‌یابد. خاک طبیعی موجود در محل، همواره به طور کامل برای انجام فعالیت عمرانی و تحمل سازه مورد نظر مناسب نیست. عدم استحکام خاک موجب نشست سازه و ناپایداری آن می‌شود. برای مثال، خاک‌های ماسه‌ای سست اگر تحت بارهای دینامیکی مانند زلزله قرار گیرند، ممکن است موجب ناپایداری کل سازه شوند که نمونه بسیار مهم آن پدیده روانگرایی است. به همین علت باید جهت افزایش پایداری خاک و بهبود کیفیت آن اصلاحاتی صورت گیرد. روش‌های بهسازی و اصلاح خاک عبارتند از: تراکم، مسلح سازی، استفاده از زهکش‌های سنگی، تزریق، تعویض خاک مستعد با خاک مناسب و استفاده از مواد افزودنی. افزودن برخی مواد به خاک، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود برخی از مشخصه‌های رفتاری خاک مانند مقاومت و نفوذپذیری به‌ویژه در بعضی از سازه‌ها نظیر سدهای خاکی، دیوارهای حائل، خاکریز جاده‌ها، شیروانی‌های مصنوعی و اراضی دفن زباله همواره مدنظر بوده است. این روش می‌تواند برای جلوگیری از ریزش خاک، کاهش نشست سازه، افزایش ظرفیت باربری خاک و بهبود مقاومت آن، کاهش پتانسیل تورم خاک‌های رسی و پدیده روانگرایی ماسه مفید واقع شود. به‌طور کلی، هنگامی که یک ماده با درصد وزنی مشخص به خاک افزوده شود که بتواند موجب بهبود خواص خاک مورد نظر شود، فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد. استفاده از مواد افزودنی می‌تواند برای جلوگیری از ریزش خاک، کاهش نشست سازه، افزایش ظرفیت باربری خاک و بهبود مقاومت آن، کاهش

پتانسیل تورم خاک‌های رسی و پدیده روانگرایی ماسه مفید واقع شود. افزودنی‌های متداول همچون سیمان (۶)، آهک (۸)، شیشه خرد شده (۱۶)، خاکستر بادی (۵ و ۹) و مواد پلیمری (۱۰) در مطالعات گذشته مورد بررسی قرار گرفته است.

بر اساس گزارش انجمن ملی آهک اضافه کردن این مواد به خاک ریزدانه باعث بهبود تراکم، کاهش پلاستیسیته، کاهش تورم، بهبود مقاومت و پایداری و در خاک دانه‌ای باعث کاهش نفوذپذیری، کاهش فرسایش و افزایش دوام می‌شود. نکته قابل ذکر این است که اغلب با افزودن درصد کمی از این مواد می‌توان به نتیجه مطلوب رسید (۱۸). با توجه به اینکه اخیراً در زمینه مهندسی ژئوتکنیک و ساخت و ساز به دنبال استفاده از مصالح ارزان‌تر و در دسترس‌تر هستند استفاده از این روش مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (۱۱ و ۱۲). با توجه به اینکه رایج‌ترین مواد افزودنی مانند سیمان، آهک، گچ و خاکستر، احتمال آلودگی زیست محیطی، تغییر pH خاک و آب زیرزمینی، اختلال در عمل زهکشی خاک را به دنبال دارند، یافتن جایگزینی برای آنها ضروری است. از سوی دیگر، با توسعه روز افزون به‌کارگیری فناوری نانو در شاخه‌های مختلف علوم مهندسی، استفاده از ذرات نانو به عنوان مواد افزودنی نوین، روشی کارآمد تلقی می‌گردد. نخستین مطالعات در زمینه کاربرد فناوری نانو در صنعت ساخت و ساز به دهه ۱۹۹۰ میلادی باز می‌گردد. از آن زمان تاکنون مطالعات فراوانی روی فناوری نانو در بسیاری از شاخه‌های ساخت و ساز انجام گرفته است که در این میان سهم مهندسی ژئوتکنیک بسیار اندک بوده است (۱۵). سالانه حدود ۵/۵ میلیارد دلار در سراسر دنیا صرف سرمایه‌گذاری روی تحقیقات در زمینه این فناوری می‌شود که این نشان‌دهنده اهمیت ویژه این فناوری در عصر حاضر است (۷).

آب روشن و زمردیان با بررسی تأثیر میزان رطوبت و درصد تراکم بر فرسایش‌پذیری خاک به کمک دستگاه تابع فرسایش نشان دادند که سرعت فرسایش با تنش برشی اعمال شده رابطه خطی دارد (۲). همچنین، برای رطوبت کم‌تر از بهینه، با افزایش انرژی تراکم، مقاومت در برابر فرسایش نیز افزایش



شکل ۱. منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده

جدول ۱. خصوصیات ماسه مورد استفاده

پارامتر	مقدار
D_{50}	۰/۲۸ mm
G_s	۲/۶۵
C_u	۱/۷
C_c	۰/۹۸
$\rho_{d\max}$	۱۴۹۸ kg/m ^۳
w_{opt}	٪۱۶/۵

تأثیر رطوبت بر فرسایش این خاک در حضور و عدم حضور نانوسیلیس بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده

منحنی دانه بندی خاک مورد استفاده توسط آزمایش دانه بندی طبق استاندارد ASTM D422 انجام و در شکل (۱) آورده شده است. این خاک بر اساس طبقه بندی متحد (Unified Soil Classification System)، ماسه بدانه بندی شده (SP) است. در جدول (۱) نیز مشخصات این خاک از قبیل متوسط قطر اندازه ذرات (D_{50})، چگالی دانه ها (G_s)، ضریب یکنواختی (C_u)، ضریب دانه بندی (C_c)، حداکثر جرم مخصوص خشک ($\rho_{d\max}$) و درصد رطوبت بهینه (w_{opt}) آورده شده است.

می یابد. اما برای رطوبت بیشتر از بهینه، افزایش انرژی تراکم تأثیری بر مقاومت فرسایشی خاک ندارد.

امین فرسایش پذیری خاک با استفاده از تزریق باکتری را توسط دستگاه تابع فرسایش مورد بررسی قرار داد (۳). نتایج نشان داد که در هنگام فرایند تزریق، اعمال هوادهی به همراه شرایط مناسب دما و همچنین وجود مواد مغذی مورد نیاز برای رشد باکتری، تکثیر و توزیع یکنواخت تر باکتری در داخل خاک را به دنبال دارد. در نتیجه، با تشکیل رسوب کربنات کلسیم، مقاومت فرسایشی نمونه با دو بار تزریق باکتری و محلول سفت کننده به فاصله زمانی ۱۲ روز تا ۹۷ درصد کاهش می یابد.

با توجه به اهمیت بررسی فرسایش پذیری خاک، تلاش برای جلوگیری و کاهش مقدار آن امری ضروری می باشد. از سوی دیگر، استفاده از مواد افزودنی نوین، روشی جدید است که نیاز به مطالعه بیشتری دارد. ماده افزودنی نانوسیلیس یک ماده غیرسمی است که از نظر زیست شناختی و شیمیایی بی اثر می باشد (۱۷). همچنین، اکثر مطالعات انجام شده روی تأثیر این ماده در زمینه تکنولوژی بتن بوده و به فرسایش پذیری توجهی نگردیده است. لذا، در پژوهش حاضر برای اولین بار تأثیر نانوسیلیس بر فرسایش پذیری خاک بررسی شده است. بدین منظور مقادیر صفر، ۱، ۱/۵، ۲ و ۴ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک افزوده گردید و آزمایش تابع فرسایش انجام شد. همچنین

جدول ۲. مشخصات فیزیکی نانوسیلیس

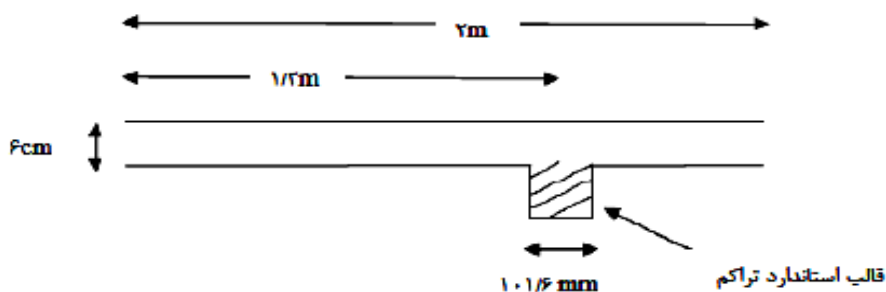
چگالی (gr/cm^3)	اندازه ذرات (nm)	سطح ویژه (m^2/gr)	درجه خلوص (%)	رنگ
۲/۴	۱۲	۲۰۰	+۹۹	سفید

جدول ۳. آنالیز شیمیایی (XRD) نانوسیلیس

فرمول	مقدار (%)
SiO_2	<۹۹
Ca	>۰/۰۰۷
Na	>۰/۰۰۵
Ti	>۰/۰۱۲
Fe	>۰/۰۰۲



شکل ۲. نانوسیلیس مورد استفاده



شکل ۳. طرح شماتیک مجرا (۱)

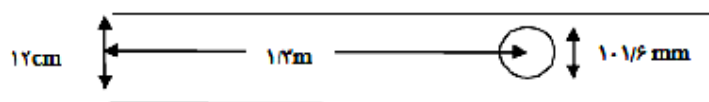
بسته با مقطع عرضی مستطیلی شکل با ابعاد 6×12 سانتی‌متر و طول ۲ متر استفاده شده است. در کف این مجرا حفره‌ای با قطر $101/6$ میلی‌متر و در فاصله $1/3$ متری از محل ورودی جریان تعبیه شده است. طرح شماتیک و پلان دستگاه تابع فرسایش در شکل‌های (۳) و (۴) آورده شده اند. از این طریق نمونه خاک تراکم شده درون قالب استاندارد که با نانوسیلیس مخلوط گردیده، می‌تواند در معرض جریان قرار گیرد و آزمایش فرسایش بر روی نمونه انجام می‌گردد. قسمتی از دیواره این مجرا از شیشه ساخته شده است تا فرایند فرسایش در طول هر

نانوسیلیس مورد استفاده

نانوسیلیس مورد استفاده در این پژوهش پودری شکل است (شکل ۲) و محصول شرکت آلمانی Evonik Industrials است. مشخصات بیشتر این ماده در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده است.

آزمایش تابع فرسایش

آزمایش تابع فرسایش (Erosion function) برای اولین بار توسط بریود و همکاران (۴) ارائه گردید. برای انجام این آزمایش در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشگاه شیراز، از یک مجرای



شکل ۴. پلان مجرا (۱)



شکل ۵. دستگاه تابع فرسایش

میلی متر و وزن ۲/۵ کیلوگرم متراکم می‌گردد. همچنین، برای بررسی تأثیر میزان رطوبت بر فرسایش پذیری، نمونه‌های حاوی درصد بهینه نانوسیلیس با میزان رطوبت ۲ درصد کمتر از میزان رطوبت بهینه و ۲ درصد بیشتر از آن متراکم می‌گردد.

آزمایش قابل مشاهده باشد (شکل ۵). در این دستگاه با عبور دبی مشخص روی نمونه و اندازه‌گیری زمان می‌توان میزان تنش برشی را به دست آورد. در پایان آزمایش نیز میزان فرسایش انجام شده نمونه، اندازه‌گیری می‌شود تا بتوان نمودار تابع فرسایش را برای خاک مورد نظر به دست آورد.

محاسبه سرعت فرسایش و تنش برشی

با برقراری جریان روی نمونه خاک، نمونه تحت فرسایش قرار می‌گیرد. سرعت آبستگگی از رابطه ۱ قابل محاسبه است:

$$E = V_e / (A_s \Delta t) \quad (1)$$

که در آن:

E : سرعت فرسایش (mm/hr)

V_e : حجم آب لازم برای پر نمودن حفره‌ها (mm^۳)

A_s : مساحت سطح نمونه خاک (سطح قالب تراکم) (mm^۲)

Δt : مدت زمان آزمایش (hr)

برای هر سرعت جریان تنش برشی اعمال شده بر سطح نمونه خاک از رابطه ۲ قابل محاسبه است:

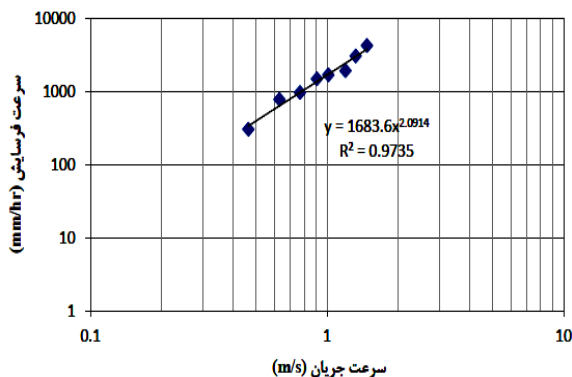
$$\tau = 1 / \rho_w f v^2 \quad (2)$$

که در آن:

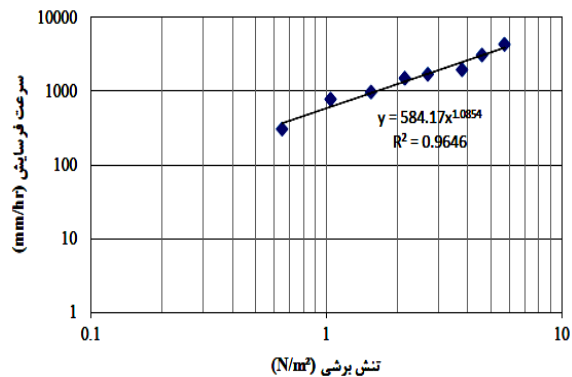
τ : تنش برشی (N/m^۲)

آماده‌سازی نمونه‌ها

با مشخص بودن وزن مخصوص بیشینه خاک مورد نظر و همچنین حجم قالب دستگاه تابع فرسایش (قالب استاندارد تراکم)، وزن خاک لازم تعیین می‌گردد. برای اختلاط بهتر نانوسیلیس با خاک، مقادیر مختلف نانوسیلیس در میزان آب معادل با رطوبت بهینه خاک (حاصل از آزمایش تراکم استاندارد) حل شده، سپس به خاک اضافه می‌گردد و با آن مخلوط می‌شود. به منظور یکنواخت سازی رطوبت و ایجاد پیوند بهتر میان نانوسیلیس و خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه‌های پلاستیکی و عایق (برای حفظ رطوبت نمونه‌ها) نگهداری می‌شوند. پس از گذشت ۲۴ ساعت، هر نمونه مطابق استاندارد ASTM D698 با توجه به ارتفاع قالب مورد نظر در سه لایه در قالب ریخته می‌شود. جهت اعمال انرژی تراکم استاندارد هر لایه با ۲۵ ضربه توسط چکش با قطر ۵۰/۸



شکل ۷. نمودار سرعت فرسایش برحسب سرعت جریان نمونه شاهد



شکل ۶. نمودار تابع فرسایش نمونه شاهد

نمودار سرعت فرسایش برحسب سرعت جریان این نمونه نیز در شکل (۷) آورده شده است.

با توجه به نمودار شیلدز، تنش برشی بحرانی نمونه شاهد در محدوده قابل قبول است (تنش برشی بحرانی نمونه شاهد با متوسط قطر اندازه ذرات، متناظر است) (۱۳). نمودار سرعت فرسایش به سرعت جریان این نمونه نشان می‌دهد که با افزایش دبی جریان، سرعت جریان افزایش می‌یابد و با توجه به رابطه ۱، با افزایش حجم آب لازم برای پر نمودن حفره‌ها، حجم آبستگی و در نتیجه سرعت فرسایش نیز افزایش می‌یابد.

تأثیر نانو سیلیس بر فرسایش پذیری

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت با افزودن درصد‌های مختلف نانو سیلیس تا مقدار ۱/۵ درصد وزنی خاک، به دلیل قابلیت جذب آب سطحی این ذرات، وجود بارهای سطحی زیاد، ایجاد خاصیت سیمانی، سطح ویژه بالا، ایجاد چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر، کاهش فضای خالی خاک و ایجاد ساختار متراکم‌تر فرسایش پذیری کاهش می‌یابد. افزودن مقدار بیشتر از ۱/۵ درصد نانو سیلیس تأثیر منفی بر روی خواص مکانیکی خاک دارد. به طوری که افزایش بیش از حد مقدار ذرات نانو سیلیس موجب انباشتگی و کلوخه‌ای شدن ذرات خاک می‌شود. این امر سبب افزایش تخلخل در خاک می‌شود، در نتیجه آب بیشتری جهت پر شدن این حفره‌های

ρ_w : دانسیته آب در دمای اتاق (1000 kg/m^3)

V: سرعت متوسط جریان (m/s)

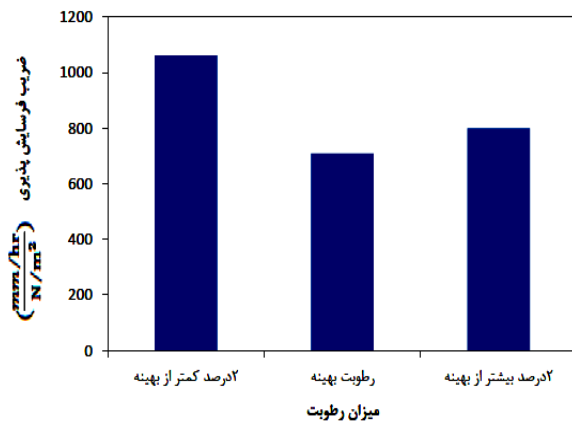
f: ضریب اصطکاک (فلوم)

جهت ارزیابی تأثیر درصد‌های مختلف نانو سیلیس و رطوبت بر ضریب فرسایش پذیری و تنش برشی بحرانی، به نمودار تابع فرسایش که به عنوان ارتباط بین سرعت فرسایش (E) و تنش برشی (T)، تعریف می‌شود، نیاز است. برای هر دبی، میزان سرعت فرسایش و تنش برشی از روابط ذکر شده قابل محاسبه است. در نهایت، نمودار تابع فرسایش رسم می‌گردد. محل تلاقی نمودار سرعت فرسایش - تنش برشی با محور افقی نشان‌دهنده تنش برشی بحرانی می‌باشد و شیب این نمودار به صورت ضریب فرسایش پذیری تعریف می‌شود. افزایش تنش برشی بحرانی یا کاهش ضریب فرسایش پذیری، نشان‌دهنده افزایش مقاومت خاک در برابر فرسایش است.

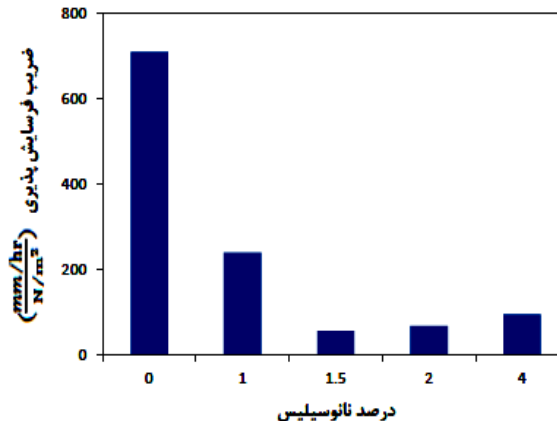
نتایج

فرسایش پذیری خاک شاهد

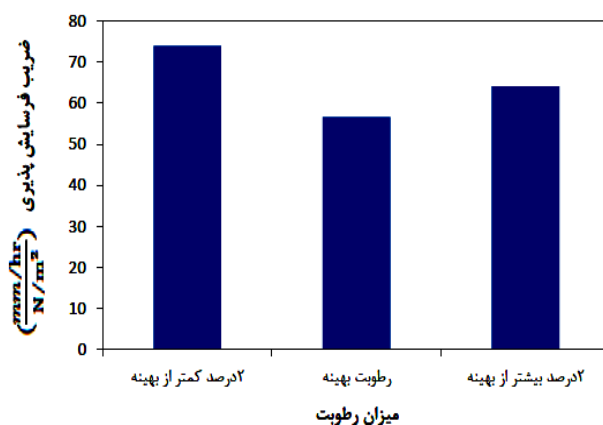
با رسم نمودار تابع فرسایش نمونه شاهد (نمونه بدون ماده افزودنی نانو سیلیس) ضریب فرسایش پذیری و تنش برشی بحرانی برای این نمونه برابر $(\frac{\text{mm/hr}}{\text{N/m}^2})$ و $709/80$ و (N/m^2) و $0/23$ به دست آمد (شکل ۶). برای مقایسه بهتر شرایط جریان،



شکل ۹. تأثیر رطوبت بر ضریب فرسایش پذیری نمونه شاهد



شکل ۸. تأثیر درصد‌های مختلف نانوسیلیس بر ضریب فرسایش پذیری خاک



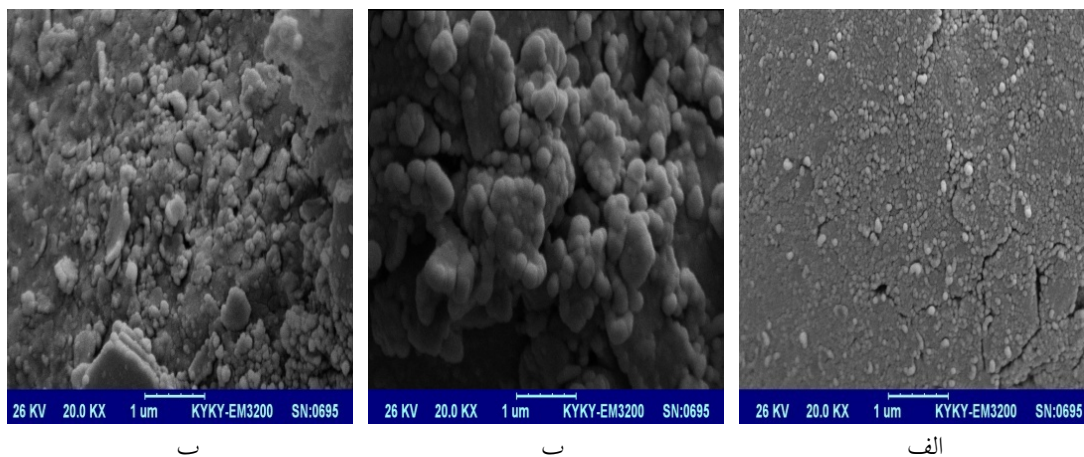
شکل ۱۰. تأثیر رطوبت بر ضریب فرسایش پذیری نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس

خالی نیاز است. از سوی دیگر به علت نرمی زیاد ذرات نانوسیلیس، جذب آب سطحی توسط ذرات نانو افزایش می‌یابد. این دو عامل موجب افزایش درصد رطوبت بهینه خاک می‌گردد. با افزایش رطوبت بهینه، آب کم کم جای ذرات خاک را گرفته و به دلیل وزن حجمی کم تر آب نسبت به خاک، وزن مخصوص خشک خاک کاهش و فرسایش پذیری افزایش می‌یابد (شکل ۸). لذا درصد وزنی بهینه اختلاط نانوسیلیس با خاک برای داشتن بیشترین مقاومت در برابر فرسایش ۱/۵ درصد انتخاب گردید. لازم به ذکر است خاک حاوی نانوسیلیس همواره دارای ضریب فرسایش پذیری کمتری نسبت به خاک خالص می‌باشد. تفاوت ضریب فرسایش پذیری بین نمونه

خاک حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس ناچیز است که با توجه به مقرون به صرفه تر بودن، درصد بهینه نانوسیلیس ۱/۵ انتخاب گردید. با توجه به آنچه گفته شد، افزودن نانوسیلیس به خاک می‌تواند به عنوان یک تثبیت کننده جهت اصلاح خاک و بهبود مشخصات آن در نظر گرفته شود.

تأثیر رطوبت بر فرسایش پذیری

نتایج مربوط به آزمایش تابع فرسایش برای نمونه شاهد و نمونه حاوی درصد بهینه نانوسیلیس با رطوبت‌های مختلف، در شکل‌های (۹) و (۱۰) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌های متراکم شده در میزان رطوبت بهینه دارای کمترین



شکل ۱۱. نتایج عکس SEM با بزرگ‌نمایی ۲۰۰۰۰ برابر: الف) نمونه خاک شاهد، ب) نمونه حاوی ۱/۵ درصد نانوسیلیس و پ) نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس

کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت رطوبت خاک جهت تراکم باید نه کم و نه زیاد باشد بلکه باید در مقدار بهینه‌ای قرار داشته باشد. در این میزان رطوبت بهینه، خاک دارای بیشترین تراکم و وزن مخصوص خشک است که باعث ایجاد بیشترین مقاومت در برابر فرسایش می‌شود.

نتایج آزمایش میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

عکس میکروسکوپی از سطح نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی ۱/۵ و ۲ درصد نانوسیلیس، نشان می‌دهد که با افزودن ذرات نانوسیلیس به خاک، ساختار خاک متراکم‌تر می‌شود که موجب کاهش فرسایش‌پذیری می‌گردد. در واقع به‌دلیل قابلیت جذب آب سطحی این ذرات و وجود بارهای سطحی زیاد، این ماده کل سطح خاک را پوشانده و موجب ایجاد چسبندگی و کاهش فضای خالی بین ذرات خاک می‌گردد. افزودن مقدار بیشتر از ۱/۵ درصد نانوسیلیس تأثیر منفی بر خواص مکانیکی خاک دارد. به‌طوری‌که افزایش بیش از حد مقدار ذرات نانوسیلیس موجب انباشتگی و کلوخه‌ای شدن ذرات خاک می‌شود. لذا، درصد وزنی بهینه اختلاط نانوسیلیس با خاک برای داشتن بیشترین مقاومت در برابر فرسایش ۱/۵ درصد انتخاب گردید (شکل ۱۱).

ضریب فرسایش‌پذیری می‌باشند یا به‌عبارت دیگر بیشترین مقاومت در برابر فرسایش را از خود نشان می‌دهند. به‌طور کلی می‌توان گفت در رطوبت‌های کم‌تر از رطوبت بهینه، آب نقش روغن‌کاری و نرم کردن محیط را ایفا می‌کند که به بهبود تراکم و دادن آزادی حرکت به ذرات خاک کمک می‌کند لذا موجب افزایش وزن مخصوص خشک خاک و کاهش فرسایش‌پذیری می‌گردد. اما در رطوبت‌های بیشتر از رطوبت بهینه، آب خود مانعی برای تراکم بهتر خاک می‌گردد. چرا که ذرات آب در بین دانه‌ها قرار می‌گیرند و مانع نزدیک شدن ذرات به یکدیگر می‌گردند. به تعبیر دیگر وجود بیش از حد آب باعث می‌گردد انرژی اعمالی به توده، توسط ذرات آب جذب شده و به دانه‌های خاک منتقل نگردد و فقط موجب افزایش فشار آب حفره‌ای شود. لذا وزن مخصوص خشک خاک کاهش و فرسایش‌پذیری افزایش می‌یابد. قابل ذکر است میزان افزایش ضریب فرسایش‌پذیری در نمونه دارای رطوبت ۲ درصد بیشتر از رطوبت بهینه نسبت به نمونه دارای رطوبت ۲ درصد کم‌تر از رطوبت بهینه بیشتر است. به‌عبارت دیگر نمونه دارای رطوبت بیشتر از بهینه فرسایش‌پذیری بیشتری دارد. زیرا در این حالت با افزایش فشار آب منفذی و جذب انرژی توسط آب، وزن مخصوص خشک خاک و در نتیجه مقاومت در برابر فرسایش

نتیجه گیری

۲. با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک، فرسایش پذیری نسبت به نمونه شاهد ۹۲ درصد کاهش می یابد.
۳. افزودن مقادیر بیش از حد ذرات نانوسیلیس به دلیل عدم امکان پخش همگن ذرات نانو و ایجاد کلوخه های ناپایدار، تأثیر منفی بر روی خواص مکانیکی خاک دارد.
۴. نمونه های متراکم شده در میزان رطوبت بهینه، بیشترین مقاومت در برابر فرسایش را از خود نشان می دهند.
۵. سمت خشک منحنی تراکم در مقایسه با سمت تر دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میزان رطوبت می باشد.
۶. همان طور که اشاره شد استفاده از باکتری نیز تأثیر مثبتی در کاهش فرسایش پذیری دارد اما با توجه به زمان عمل آوری باکتری و شرایط مورد نیاز جهت نگهداری آن، استفاده از ماده افزودنی نانوسیلیس عملی تر به نظر می رسد.
۷. افزودن درصد کمی ماده نانوسیلیس به خاک می تواند به عنوان یک تثبیت کننده جهت اصلاح خاک در نظر گرفته شود.

استفاده از مواد افزودنی نوین به عنوان یکی از روش های اصلاح خاک، روشی کارآمد تلقی می گردد. در این تحقیق، از ماده افزودنی نانوسیلیس جهت کاهش فرسایش پذیری خاک استفاده گردید که نتایج این پژوهش را می توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

۱. ذرات نانوسیلیس هنگامی که با آب ترکیب می شوند به شکل ذرات با مقاومت بالا در می آیند و با جذب آب سطحی می توانند موجب ایجاد خاصیت سیمانی در خاک شوند. همچنین سطح ویژه بالای این ذرات که ناشی از ریز بودن آنها است باعث چسبندگی بیشتر ذرات خاک به یکدیگر، کاهش فضای خالی خاک، ایجاد ساختار متراکم تر و در نتیجه افزایش تنش برشی بحرانی و مقاومت خاک در برابر فرسایش می گردد. لذا افزودن این ماده به خاک در کاهش فرسایش پذیری خاک مؤثر است.

منابع مورد استفاده

۱. آب روشن، م. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی فرسایش پذیری خاک های چسبنده متراکم شده در خاکریزها. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
۲. آب روشن، م. و زمردیان، م. ع. ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی فرسایش پذیری خاک های چسبنده متراکم شده در خاکریزها. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب (۸): ۱۱۶-۱۰۸.
۳. امین، م. ۱۳۹۴. کاهش فرسایش پذیری ماسه با استفاده از تزریق باکتری. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
4. Briaud, J. L., F. Ting, H. C. Chen, Y. Cao, S.W. Han and K. Kwak. 2001. Erosion function apparatus for scour rate predictions. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127: 105-113.
5. Dermatas, D. and X. G. Meng. 2003. Utilization of fly ash for stabilization/solidification of heavy metal contaminated soils. *J. Geotech. Eng.* 70(3): 377-394.
6. Dupas, J. and A. Pecker. 1979. Static and dynamic properties of sand-cement. *J. Geotech. Eng.* 105: 419-436.
7. Gutierrez, M. S. 2005. Potential applications of nano-mechanics in geotechnical engineering. *Proceedings of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales.* UK. 29-30.
8. Kaur, P. and Sinagh, G. 2012. Soil improvement with lime. *J. Mech. and Civil Eng.* 51-53.
9. McCarthy, M. J., L. J. Csetenyi, A. Sachdeva and R. K Dhir. 2012. Fly ash influences on sulfate-heave in lime-stabilised soils: *Proceedings of the ICE, August* 165: 147-158.
10. Najah, L., Ahmad, F. and M. A. M. Said. 2013. Influence of polymer on properties of soils. *Electronic J. Geotech. Eng.* 1909-1915.
11. Osinubi K. J, A. O. Eberemu and O. S. Aliu . 2007. Stabilization of laterite with cement and bagasse ash admixture: *The 1st ICERE, 16-19 July, Ghana.*
12. Osinubi K. J. and A. B. Medubi. 1997. Evaluation of cement and phosphatic waste admixture on tropical black clay

- road foundation: The 4th Conference in SEAM, 9-11 July, Ghana.
13. Shields, A. 1936. Anwendung der Aenlichkeitsmechanik und derTurbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Preussischen Versuchsanstalt fur Wasserbau.
 14. Taha, M. R. 2009. Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures. Proceedings of the NICOM3, Prague.
 15. Wan, C. F. and Fell, R. 2004. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 130: 373-380.
 16. Wartman, J., D. G. Grubb and Nasim, A. S. M. 2004. Select engineering characteristics of crushed glass. J. Materials in Civil Eng. 16: 526 - 539.
 17. Rumer, R. R. and Ryan M. E. 1995. Assessment of barrier containment technologies for environmental remediation applications. Wiley-Interscience.
 18. Zhang, G. 2007. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior. J. ASCE. 35: 1-13.

The Effect of Nanosilica Additive on Soil Erodibility

S. M. A. Zomorodian^{1*} and A. Soleymani²

(Received: May 8-2016 ; Accepted: August 22-2016)

Abstract

Erosion is one of the main factors of destruction of hydraulic structures. Therefore, soil improvement is necessary to improve soil quality and reduce soil erosion. Due to the adverse effects of substances such as lime and ash and also the increasing usage of nanotechnology in various branches of engineering sciences, using nanoparticles as new additives is an efficient way. In this study, to investigate the effect of nanosilica additive on soil, erosion function apparatus (EFA) is used. Samples containing nanosilica with 0, 1, 1.5, 2 and 4 percent (w/w) of dry soil were compacted in the standard compaction mold. They were tested in a close flume and with variable discharges. Erodibility parameters showed that by addition of 1.5% nanosilica to the dry soil, erodibility decreased by 92% as compared with untreated soil. The optimal amount of nanosilica was chosen as 1.5%. The results showed that samples compacted with the optimum moisture content causes the least erodibility. Scanning Electron Microscope (SEM) tests results showed that by addition of nanosilica to the dry soil, soil structure becomes more dense which reduces the risk of erosion.

Keywords: Erodibility coefficient, Erosion function apparatus, Nanosilica, Soil improvement

1. Dept. of Water Eng., Faculty of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

2. Dept. of Hydraulic Eng. Water Emg., Faculty of Agric., Shiraz Univ., Shiraz, Iran.

*: Corresponding Author, Email: mzomorod@shirazu.ac.ir