

تأثیر نانورس بر فرسایش داخلی در سدهای خاکی

سید محمدعلی زمردیان^{۱*}، شبنم مغیث پور^۲

۱. دانشیار و عضو هیئت علمی دانشگاه شیراز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد بخش مهندسی آب دانشگاه شیراز

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۲/۱۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۵/۵)

چکیده

دو پدیده‌ی آبستگي و فرسایش داخلی همواره مشکلات فراوانی را برای سدهای خاکی ایجاد کرده‌اند. به طوری که فرسایش داخلی (pipng) به عنوان دومین عامل خرابی سدها شناخته شده است. در این پژوهش نانورس به عنوان یک ماده افزودنی جدید فاقد مشکلات زیست‌محیطی، برای کاهش فرسایش‌پذیری خاک ماسه لای‌دار استفاده شد. برای بررسی فرسایش‌پذیری، از آزمایش فرسایش حفره‌ای استفاده شد. نمونه‌های بدون نانورس و نمونه‌های حاوی مقادیر ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ درصد نانورس مورد آزمایش قرار گرفت. بعد از تعیین مقدار بهینه نانورس، تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر فرسایش بررسی شد. نتایج نشان داد به ازای افزودن مقدار بهینه نانورس (۱ درصد)، شاخص نرخ فرسایش‌پذیری خاک بیش از دو برابر افزایش یافته است که این به معنی کاهش فرسایش‌پذیری است. همچنین به ازای مقدار بهینه نانورس در بیش‌ترین گرادیان هیدرولیکی، فرسایش‌پذیری خاک از گروه به شدت سریع به نسبتاً آرام تغییر یافت.

واژه‌های کلیدی: آزمایش فرسایش حفره‌ای، فرسایش‌پذیری، گرادیان هیدرولیکی، ماسه‌ی لای‌دار.

مقدمه

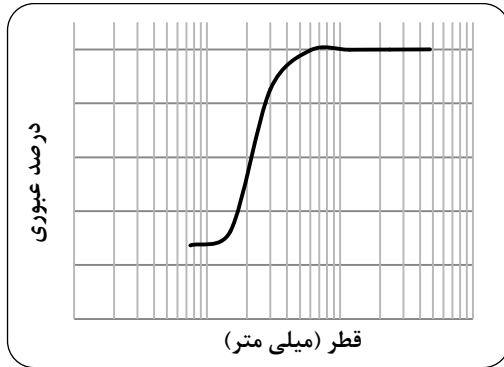
سدهای خاکی و سدهای نفوذناپذیر بسیار مهم و اقتصادی می‌باشد (Washington et al., 2005). همچنین درک درست شرایط ژئوتکنیک و اصلاح خاک برای جلوگیری و به حداقل رساندن فرسایش به منظور اجرای موفق یک پروژه آبی، امری مهم و ضروری است.

یکی از آزمایش‌هایی که برای بررسی فرسایش‌پذیری به کار می‌رود، آزمایش فرسایش حفره‌ای (Hole Erosion Test) است. این آزمایش علاوه بر آنکه ساده و کم‌هزینه است، نتایج قابل اطمینانی نیز ارائه می‌کند (Farrar et al., 2007). ضمن آنکه این آزمایش به طور خاص برای شرایط فرسایش داخلی مطلوب است (Wahl, 2010) تاکنون روش‌های متعددی برای اصلاح خواص ژئوتکنیکی خاک و همچنین برای کاهش فرسایش‌پذیری آن ارائه شده است. در میان این روش‌ها، آزمایش‌های آزمایشگاهی زیادی به منظور مطالعه مشخصات ژئوتکنیکی حاصل از مخلوط خاک و سایر افزودنی‌ها جهت بهبود خواص خاک انجام شده است. در سال‌های گذشته افزودنی‌های شیمیایی از قبیل سیمان، آهک و خاکستر بادی برای تثبیت خاک‌های فرسایش‌پذیر استفاده شده است اما چنین ترکیبات سنتی علاوه بر دارا بودن تهدیدهای گوناگون برای محیط‌زیست، به دلیل افزایش خاصیت قلیایی آب زیرزمینی، به طور مداوم قابل استفاده نیستند. روش دیگر، تزریق مواد مصنوعی می‌باشد. در این روش سیلیکات و سایر مواد به منظور ایجاد چسبندگی

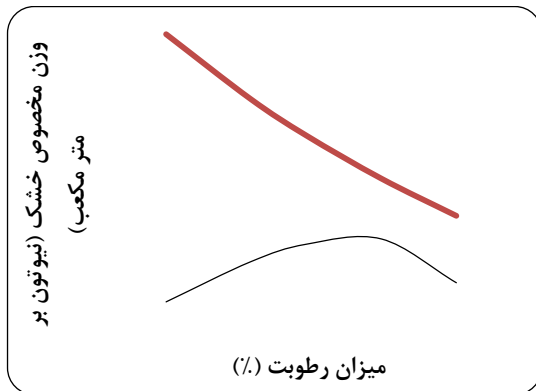
پس از سرریز آب از تاج سدها، فرسایش داخلی به عنوان دومین عامل خرابی سدها شناخته شده است. به طوری که بر اساس آمار موجود، فرسایش داخلی عامل ۳۰ درصد از خرابی سدهای خاکی گزارش شده است (Fell et al., 2005). در کل فرسایش یک فرایند پیش‌رونده است و ممکن است در بدنه، پی و یا از بدنه به پی ایجاد شود. فرسایش از نقطه‌ی تمرکز زه شروع می‌شود و به تدریج با شسته شدن ذرات خاک در اثر گرادیان هیدرولیکی ایجادشده، مجرایی ایجاد می‌گردد. این مجرا در امتداد جریان گسترش یافته و در نهایت به مخزن می‌رسد. زمانی که مجرا به نزدیکی مخزن برسد، جریان شدید آب با سرعت زیاد ایجاد شده و منجر به تخریب سد می‌گردد (Fell et al., 2005). تحقیقات صورت گرفته در مورد فرسایش داخلی نشان می‌دهد که اکثر شکست‌های ناشی از این پدیده خیلی سریع اتفاق می‌افتد به طوری که از زمان مشاهده نشت تا شکست سد کمتر از ۶ تا ۱۲ ساعت به طول می‌انجامد (Foster et al., 2003). این پدیده موجب شکست‌های فاجعه‌باری در سدها گردیده است و خسارات جانی و مالی عمده‌ای را به دنبال داشته است. بنابراین ارائه روش‌هایی برای کاهش نشت و فرسایش در

* نویسنده مسئول : mzomorod@shirazu.ac.ir

شرکت Sigma-Aldrich است و از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شده است. مشخصات فیزیکی این محصول در جدول ۲ و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۱- نمودار دانه بندی خاک



شکل ۲- منحنی تراکم خاک

جدول ۱- مشخصات خاک مورد استفاده

مقدار	پارامتر
SM	طبقه بندی خاک
۲/۷	چگالی ویژه دانه های جامد
۱۷۷۰	وزن مخصوص خشک بیشینه (N/m ³)
۱۲/۸	رطوبت بهینه (%)
۲۰/۸	حد روانی (%)
۲۰/۱	حد خمیری (%)

جدول ۲- مشخصات فیزیکی نانورس مونت موریلونیت

مقدار	پارامتر
۳۰۰ - ۳۷۰	چگالی (kg/m ³)
۱ - ۲	اندازه ذرات (nm)
زرد کم رنگ	رنگ
۱ - ۲	رطوبت (%)

میان ذرات خاک به درون حفره های میان ذرات تزریق می شوند. این روش در اغلب موارد با محیط زیست سازگار نمی باشد زیرا گاهی مواد مورد استفاده در آن شیمیایی و سمی هستند (Zomorodian and Koohepyma, 2015). بنابراین یافتن راهکارهای جدید و سازگار با محیط زیست ضروری است.

در سال های اخیر، مواد نانو که دارای ویژگی های منحصر به فردی هستند و در انواع علوم مهندسی باعث تحولاتی بنیادی شده اند، توجه پژوهشگران را برای اصلاح رفتار خاک ها به خود معطوف کرده اند. اولین کاربرد تکنولوژی نانو در مصالح ساخت و ساز به میانه دهه ۱۹۹۱ برمی گردد. از آن زمان تاکنون مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از ذرات نانو یا فناوری نانو در بسیاری از شاخه های ساخت و ساز انجام شده است (Taha, 2009). سرمایه گذاری کلان کشورهای توسعه یافته بر انجام پژوهش بر روی فناوری نانو، نشانه ای از اهمیت ویژه این فناوری نوین در عصر حاضر است. سالانه حدود ۵/۵ میلیارد دلار در سراسر دنیا صرف سرمایه گذاری بر تحقیقات روی فناوری نانو می شود (Gutierrez, 2005).

بنابراین با توجه به آن که مطالعه در مورد اثر ذرات نانو بر فرسایش پذیری بسیار محدود بوده است، در پژوهش حاضر برای اولین بار تأثیر نانورس بر فرسایش پذیری داخلی بررسی شده است. بدین منظور ۵،۴،۳،۲،۱ و ۶ درصد وزنی نانورس به ماسه لای دار افزوده گردید و آزمایش فرسایش حفره ای انجام شد. همچنین تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر فرسایش داخلی این خاک در حضور و عدم حضور نانورس بررسی شد.

مواد و روش ها

خاک مورد استفاده

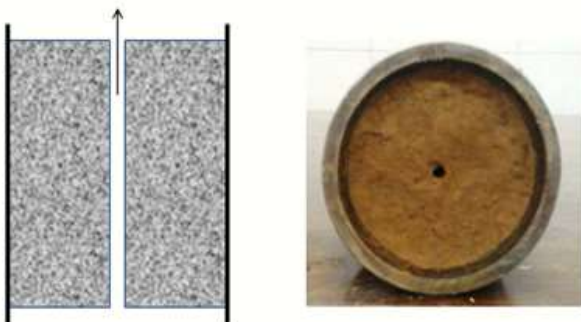
به منظور دانه بندی خاک مورد استفاده در این پژوهش، آزمایش های دانه بندی و حدود اتربرگ به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM D422 و ASTM D4318 انجام شد. بر اساس طبقه بندی متحد، خاک مورد استفاده در گروه ماسه لایه دار قرار گرفت. همچنین با انجام آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D698 وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه خاک مشخص گردید. منحنی دانه بندی و تراکم این خاک به ترتیب در شکل ۱ و ۲ و مشخصات کلی آن در جدول ۱ آورده شده است.

ماده افزودنی مصرفی

در این پژوهش از نانورس مونت موریلونیت به عنوان ماده افزودنی به خاک، استفاده شده است. این نانورس محصول

به منظور واکنش احتمالی و ایجاد پیوند بهتر میان نانورس و خاک، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محفظه‌های پلاستیکی و عایق (برای حفظ رطوبت نمونه‌ها) نگهداری شدند. پس از گذشت زمان عمل‌آوری، هر نمونه در سه لایه در قالب دستگاه فرسایش حفره‌ای ریخته شد و به منظور اعمال انرژی تراکم استاندارد هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم گردید. سپس با استفاده از یک مته در امتداد محور طولی نمونه یک سوراخ به قطر ۶ میلی‌متر ایجاد گردید (شکل ۳).

سوراخ ایجاد شده به قطر ۶ میلی‌متر



شکل ۳- نمونه خاک قرارگرفته در قالب دستگاه فرسایش حفره‌ای

روش انجام آزمایش فرسایش حفره‌ای

ابتدا قالب حاوی نمونه درون دستگاه فرسایش حفره‌ای قرار می‌گیرد. سپس با توجه به گرادیان هیدرولیکی مناسب و مورد نیاز برای آزمایش هر نمونه خاک، مقدار ارتفاع آب بالادست و پایین‌دست تنظیم می‌شود. آزمایش با عبور آب از درون حفره ایجادشده شروع می‌شود و تا زمانی که قطر حفره ایجادشده افزایش فاحشی پیدا کند یا سرعت جریان بیش از حد افزایش یابد، ادامه پیدا می‌کند. در طول آزمایش، در فاصله زمانی ۳۰ ثانیه تا ۱ دقیقه، حجم آب خروجی از نمونه به منظور تعیین دبی و همچنین ارتفاع آب در پیژومترهای بالادست و پایین‌دست قرائت و ثبت می‌گردد. شکل ۴ نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌ای را نشان می‌دهد.

دستگاه فرسایش حفره‌ای که در این پژوهش ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت، در شکل ۵ آورده شده است.

تحلیل داده‌های آزمایش فرسایش حفره‌ای

پس از انجام آزمایش فرسایش داخلی و برداشت داده‌ها در طول آزمایش، نمودارهای نرخ فرسایش/زمان، تنش برشی هیدرولیکی/زمان و در نهایت نرخ فرسایش/تنش برشی هیدرولیکی با استفاده از روابط ۱ و ۲ رسم می‌گردد. این روابط توسط Wan and Fell (2002)، ارائه شده است:

آزمایش فرسایش داخلی

آزمایش مورد استفاده در این پژوهش، آزمون تخصصی فرسایش داخلی، به نام آزمایش فرسایش حفره‌ای است که برای اولین بار توسط Wan and Fell (2002)، ارائه شده است. در این آزمایش با ایجاد یک حفره در نمونه خاک و عبور دادن جریان آب از آن، تغییرات قطر و پس از آن سرعت فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی محاسبه می‌شود. سپس پارامترهای فرسایش با استفاده از شاخص نرخ فرسایش (Erosion Rate Index) بیان می‌شود. Wan and Fell (2002)، بر اساس این شاخص خاک‌ها را از لحاظ فرسایش‌پذیری به شش گروه، مطابق جدول ۴ تقسیم کردند.

جدول ۳- آنالیز شیمیایی نانورس

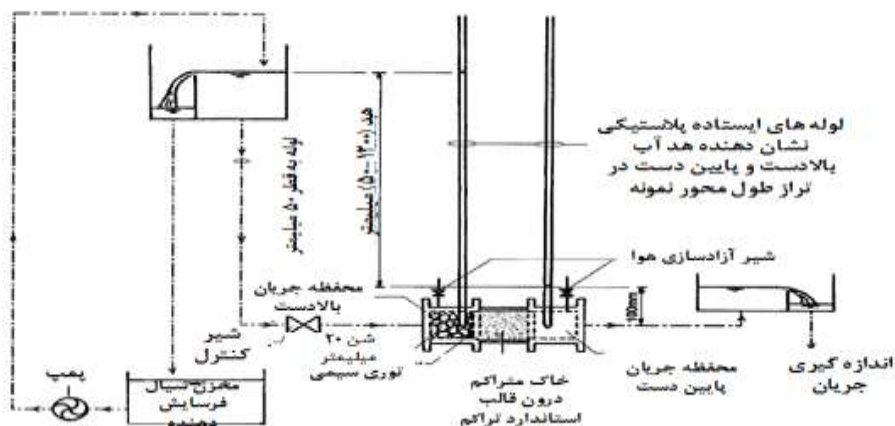
فرمول	مقدار(%)
Na ₂ O	۰/۹۸
MgO	۳/۲۹
Al ₂ O ₃	۱۹/۶
SiO ₂	۵۰/۹۵
K ₂ O	۰/۸۶
CaO	۱/۹۷
TiO ₂	۰/۶۲
Fe ₂ O ₃	۵/۶۲
LOI	۱۵/۴۵

جدول ۴- گروه‌بندی خاک بر اساس شاخص نرخ فرسایش (ون و فل، ۲۰۰۴)

شماره گروه	مقدار شاخص نرخ فرسایش	سرعت فرسایش خاک
۱	<۲	به شدت سریع
۲	۲-۳	خیلی سریع
۳	۳-۴	نسبتاً سریع
۴	۴-۵	نسبتاً آرام
۵	۵-۶	خیلی آرام
۶	>۶	به شدت آرام

آماده‌سازی نمونه‌ها

با مشخص بودن وزن مخصوص بیشینه خاک موردنظر و همچنین حجم قالب دستگاه فرسایش حفره‌ای، وزن خاک لازم تعیین گردید. برای اختلاط هرچه بهتر نانورس با خاک، مقادیر مختلف نانورس در میزان آب معادل با رطوبت بهینه خاک حل شده، سپس به خاک اضافه شد و به خوبی با آن مخلوط گردید.



شکل ۴- نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌ای (Wan and fell, 2004)



شکل ۵- نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌ای مورد استفاده در این پژوهش

بر اساس روابط ۱ و ۲، تعیین قطر در هر لحظه لازم است. بدین منظور بسته به شرایط جریان (آرام یا متلاطم) از روابط ۳ و ۴ که توسط Wan and Fell (2002) پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود:

$$\varphi_i = \left(\frac{16 Q_i f_{L_i}}{\Pi \rho_w g S_i} \right)^{1/3} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

$$\varphi_i = \left(\frac{64 Q_i^2 f_{T_i}}{\Pi^2 \rho_w g S_i} \right)^{1/5} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

در این روابط:

f_{L_i} : فاکتور اصطکاک در شرایط جریان آرام ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)

f_{T_i} : فاکتور اصطکاک در شرایط جریان متلاطم (kg/m^3)

Q_i : دبی در زمان t (m^3/s)

قطر ابتدایی سوراخ درون نمونه مشخص و برابر با ۶ میلی‌متر است. در انتهای آزمایش نیز قطر نهایی با استفاده از

$$\varepsilon_i = \frac{\rho_d}{2} \frac{d\varphi_i}{dt} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$\tau_i = \rho_w g S_i \frac{\varphi_i}{4} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در این روابط پارامترها به شکل زیر تعریف می‌شوند:

ε_i : نرخ توده فرسایش یافته (kg/s/m^2)

ρ_w : دانسیته مایع فرسایش دهنده (kg/m^3)

g : شتاب جاذبه زمین (9.8 m/s^2)

S_i : گرادیان هیدرولیکی عبوری از نمونه خاک در زمان t

τ_i : تنش برشی هیدرولیکی روی سطح حفره ایجاد شده

در زمان t (N/m^2)

φ_i : قطر سوراخ ایجاد شده با فرض وجود مقطع دایره‌ای

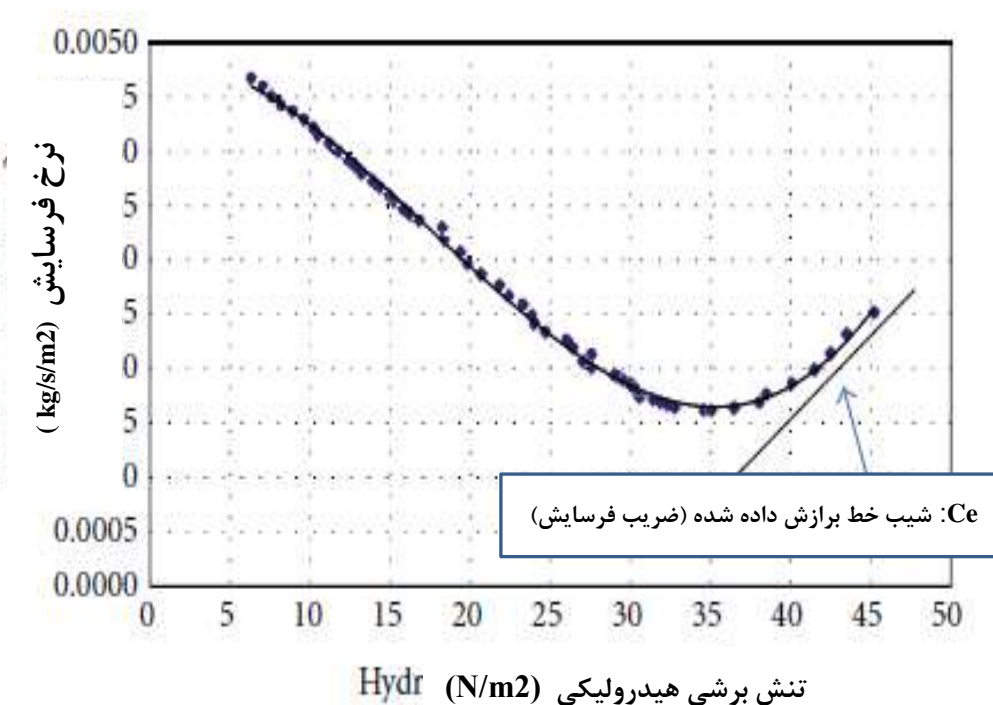
در زمان t (m)

ρ_d : دانسیته خشک خاک (kg/m^3)

ضریب نرخ فرسایش (C_e) برابر با شیب خطی قسمت ثانویه نمودار نرخ فرسایش/تنش برشی هیدرولیکی می‌باشد. این نمودار در شکل ۶ ارائه شده است. از آنجا که اعداد C_e به دست آمده در آزمایش‌ها بسیار کوچک و در حدود (10^{-1} تا 10^{-6}) هستند، در تحلیل‌ها از $-\log C_e$ استفاده می‌شود که آن را با I نمایش داده و شاخص نرخ فرسایش می‌نامند. سپس گروه فرسایش‌پذیری خاک بر اساس جدول ۴ تعیین می‌گردد.

کولیس اندازه‌گیری می‌شود. با مشخص کردن نوع جریان، مقادیر ضرایب اصطکاک برای شروع و انتهای آزمایش محاسبه می‌گردد. بر اساس نظر Wan and Fell (2002)، تغییر ضرایب اصطکاک نسبت به زمان خطی است؛ بنابراین با داشتن ضریب اصطکاک در هر زمان، قطر حفره نیز، در هر زمان قابل محاسبه است.

نمودار نرخ فرسایش/تنش برشی هیدرولیکی نمونه‌ای از خاک‌ها در شکل ۶ ارائه شده است. ضریب فرسایش خاک یا



شکل ۶- نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ فرسایش

پایین دست ۱۲۰ میلی‌متر و طول نمونه ۱۱۵ میلی‌متر) انجام شد. بر اساس نتایج به دست آمده، بدون در نظر گرفتن نمونه حاوی ۱ درصد نانورس، با افزایش میزان نانورس شاخص نرخ فرسایش افزایش یافته است (شکل ۷).

نتایج و بحث

بررسی فرسایش‌پذیری خاک شاهد

خاک شاهد (خاک فاقد نانورس) در گرادیان‌های هیدرولیکی متفاوت مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. در تمام آزمایش‌های انجام شده هد پایین دست در ۱۲ سانتی‌متر ثابت نگه داشته شد و تنها هد بالادست تغییر یافت. نمونه‌های مورد آزمایش در همه گرادیان‌ها به جز زمانی که اختلاف هد ۵ سانتی‌متر اعمال شد، در دقایق اول گسیخته شدند. نتیجه آزمایش‌ها در جدول ۵ آورده شده است. بر اساس این نتایج، خاک شاهد دارای فرسایش-پذیری به شدت سریع می‌باشد.

تأثیر مقادیر متفاوت نانورس بر فرسایش

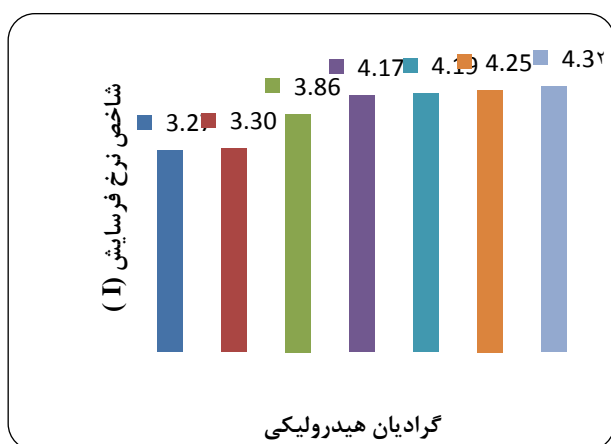
آزمایش فرسایش حفره‌ای بر نمونه‌های حاوی نانورس در گرادیان هیدرولیکی ثابت ۷/۲ (هد بالادست ۹۵۰ میلی‌متر، هد

جدول ۵- بررسی فرسایش‌پذیری خاک شاهد

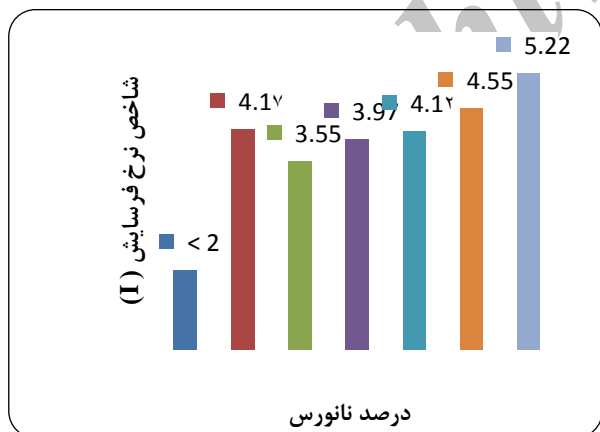
گرادیان هیدرولیکی	شاخص نرخ فرسایش‌پذیری	سرعت فرسایش خاک
۰/۴	۲/۳۰۱	خیلی سریع
۱/۱	< ۲	به شدت سریع
۲/۳	< ۲	به شدت سریع
۷/۲	< ۲	به شدت سریع
۸/۵	< ۲	به شدت سریع
۹/۴	< ۲	به شدت سریع
۱۰/۳	< ۲	به شدت سریع

این اتفاق شده است. به عبارتی ذرات نانورس با پر کردن خلل و فرج میان ذرات ماسه و کاهش هدایت هیدرولیکی آن مانع فرسایش خاک در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر می‌شوند.

به بیان دیگر بر اساس آنچه Bahari and shahnazari (2015) در بررسی مقاومت خاک بیان کردند، ترکیب خاک با نانورس به نیروهای داخلی نگه‌دارنده ذرات کمک می‌کند که در برابر فشارهای بیشتر، کم‌تر از خود تغییر شکل نشان دهند؛ درواقع نیروهای داخلی بین ذرات را افزایش می‌دهد و این امر به ایجاد چسبندگی بیشتر و مقاومت فشاری بیشتر کمک می‌کند. بنابراین فرسایش نیز در گرادیان‌های بالاتر کاهش می‌یابد.



شکل ۷- تأثیر نانورس بر شاخص نرخ فرسایش



شکل ۸- تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانورس

نتایج عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

به‌منظور بررسی بهتر عملکرد نانورس از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. با مقایسه عکس SEM نمونه خاک شاهد و نمونه حاوی ۱ درصد نانورس که در شکل ۹ آورده شده است می‌توان دریافت با افزودن نانورس، سطح نمونه‌ها یکنواخت‌تر و متراکم‌تر شده است و این نتیجه قرارگیری ذرات نانورس در

با توجه به نتایج نانورس موجب کاهش فرسایش‌پذیری خاک شده است به‌طوری‌که با افزودن ۱ درصد نانورس به خاک، شاخص نرخ فرسایش‌پذیری از کمتر از ۲ به ۴/۱۷ رسیده یعنی بیش از ۲ برابر افزایش یافته است. گرچه با افزودن ۲ درصد نانورس میزان افزایش شاخص نرخ فرسایش‌پذیری در مقایسه با ۱ درصد نانورس کم‌تر است اما بعد از آن با افزایش میزان نانورس، شاخص نرخ فرسایش‌پذیری افزایش یافته تا جایی که در ازای افزودن ۶ درصد نانورس به خاک، شاخص نرخ فرسایش به ۵/۲۲ رسیده است؛ یعنی این پارامتر بیش از ۲/۵ برابر افزایش داشته و در واقع فرسایش‌پذیری خاک از گروه ۱ (به‌شدت سریع) به گروه ۵ (خیلی آرام) تغییر یافته است. البته قابل‌ذکر است افزودن درصدهای کم‌تر از ۶ درصد نیز تأثیر قابل‌توجهی بر شاخص فرسایش‌پذیری خاک داشته است و تمام مقادیر نانورس افزوده شده گروه فرسایش‌پذیری خاک را تغییر داده‌اند.

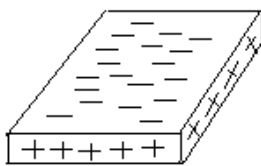
به‌طورکلی بر اساس مطالب ذکرشده، افزودن ۱ درصد نانورس به خاک تأثیر مثبت قابل‌توجهی بر فرسایش‌پذیری خاک داشته است. همچنین این مقدار کم نسبت به سایر مقادیر دارای صرفه اقتصادی بیشتری است به همین دلیل برای بررسی گرادیان هیدرولیکی بر فرسایش‌پذیری خاک حاوی نانورس، ۱ درصد نانورس به نمونه‌های خاک افزوده شد.

تأثیر مقادیر متفاوت گرادیان هیدرولیکی

با افزایش گرادیان هیدرولیکی، شاخص نرخ فرسایش‌پذیری نمونه افزایش و بدین ترتیب فرسایش خاک به طور قابل‌توجهی کاهش یافته است. شکل ۸ این تغییرات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر با آنکه شاخص نرخ فرسایش‌پذیری افزایش یافته است، گروه فرسایش‌پذیری خاک تغییر نکرده است. اما به هر حال خاک حاوی ۱ درصد نانورس برخلاف خاک شاهد در گرادیان‌های بالاتر فرسایش‌پذیری کمتری داشته است. با توجه به آن که خاک مورد آزمایش ماسه لای‌دار بوده است بنابراین قسمت اعظم آن را ذرات ماسه تشکیل داده‌اند. بنا بر آنچه Bendahmane *et al.* (2008)، اعلام کردند با افزایش گرادیان هیدرولیکی، فرسایش رو به عقب ذرات ماسه و با کاهش گرادیان هیدرولیکی، ریزی ذرات رس موجب فرسایش و تخریب سازه می‌شود و وسعت فرسایش به مقدار رس وابسته است. بنابراین بر اساس این گفته همان‌طور که در خاک شاهد مشاهده شد، در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر، ذرات ماسه باعث فرسایش بیشتر خواهند بود اما در نمونه حاوی نانورس، وجود ذرات نانورس مانع

به نظر می‌آید این است که به واسطه نوع و نحوه قرارگیری بار الکتریکی ذرات نانورس سه اتفاق محتمل است:

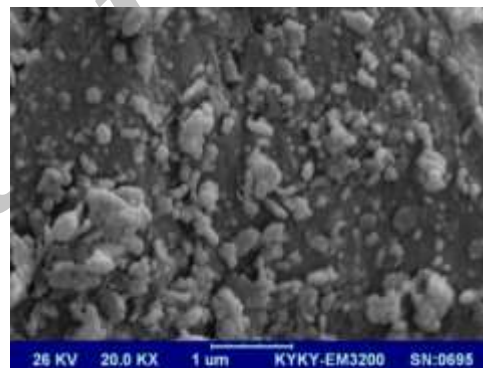
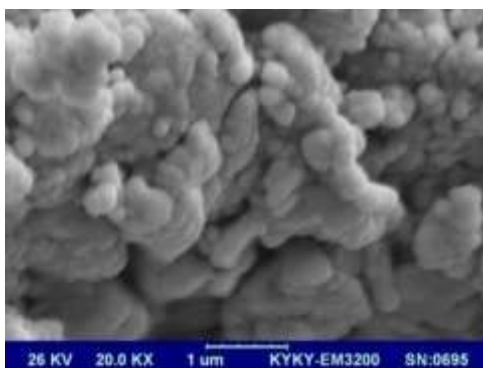
- پر کردن فضای خالی بین ذره‌ها با لخته‌ای شدن خود ذرات نانورس
 - ایجاد زنجیره‌هایی از ذرات نانورس اطراف ذرات خاک
 - ایجاد نیروهای بین ذره‌ای با ذرات رس موجود در خاک
- بنابراین به طور کلی می‌توان گفت موجب چسبندگی ذرات خاک می‌شود.



خلل و فرج و همچنین سطح خاک است. در واقع ذرات نانورس به هم می‌چسبند به عبارت دیگر این ذرات ساختار لخته‌ای یا فولوکوله پیدا می‌کنند. علت این امر را می‌توان مربوط به شکل صفحه‌های رس و نحوه قرارگیری بار الکتریکی بر روی آن دانست (مطابق شکل ۹). در واقع ذرات به علت نیروی جاذبه الکتریکی بین لبه‌های دارای بار مثبت و سطوح دارای بار منفی در کنار یکدیگر نگاه‌داشته می‌شوند. در این حالت است که ذرات به دلیل اتصالات لبه به سطح حالت لخته‌ای به خود می‌گیرند. گرچه هنوز تصور درست و دقیقی از مکانیزم اثر نانو ذرات در خاک وجود ندارد اما آنچه در این پژوهش و در مورد نانورس



شکل ۹- نمایی از صفحه رس و نحوه قرارگیری بار الکتریکی بر آن



ب

الف

شکل ۱۰- تصاویر SEM با بزرگنمایی ۲۰۰۰۰ برابر (الف). نمونه خاک شاهد (ب). نمونه حاوی ۱ درصد نانورس

درصد نانورس به خاک، شاخص نرخ فرسایش پذیری به ترتیب بیش از ۲ و ۲/۵ برابر افزایش یافته است.

۳. نانورس در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر دارای عملکرد بهتری است.

۳- بر اساس عکس‌های SEM گرفته‌شده، ذرات نانورس با لخته شدن (فولوکوله) باعث پر شدن بهتر تخلخل خاک، یکنواخت شدن و متراکم‌تر شدن سطح خاک و در نهایت مقاومت بیشتر خاک در برابر فرسایش می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش تأثیر نانورس بر فرسایش پذیری ماسه‌ی لای‌دار، با استفاده از آزمایش فرسایش حفره‌ای، بررسی شده است. نتایج شامل بررسی فرسایش‌پذیری خاک فاقد و حاوی مقادیر متفاوت نانورس و همچنین بررسی تأثیر گرادیان هیدرولیکی می‌باشد. نتایج به دست آمده را می‌توان به این صورت برشمرد:

۱. افزودن نانورس به خاک موجب افزایش چسبندگی و کاهش فرسایش‌پذیری آن شده است.
۲. در یک گرادیان هیدرولیکی مشخص، با افزودن ۱ و ۶

REFERENCES

Bahari, M., Shahnazari, A. (2015). Experimental study of the fine-grained earthen bed stabilization using nanoclay. *Journal of Water and Soil Science*, 19(72), 107-114. (In Farsi)

Bendahmane, F., Marot, D., and Alexis, A. (2008). Experimental parametric study of suffusion and backward erosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1), 57-67.

- Farrar, J.A., Torres, R.L. and Erdogan, Z. (2007). Bureau of reclamation erosion testing for evaluation of piping and internal erosion of dams. *Geotechnics of Soil Erosion Journal*, Geo-Denver, New Peaks in Geotechnics, pp. 1-10.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005). *Geotechnical engineering of dams*, Publishd By: A.A. Balkema Publishers Leiden, The Netherland, A Member of Taylor & Francis Group Plc.912.
- Foster, M. A., Fell, R., and Spannagle, M. (2003). A method for estimating the relative likelihood of failure of embankment dams by internal erosion and piping . *Canadian Geotechnical Journal*, 37(5), 1025–1061.
- Gutierrez, M.S. (2005). Potential Applications of Nano-mechanics in Geotechnical Engineerin. In: *Proceedings of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales*, Cambridge, UK, pp.29-30.
- Taha, M.R. (2009). Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, Prague, Czech Republic, pp 377–382.
- Wan, C.F., and Fell, R. (2002). Investigation of internal erosion and piping of soils in embankment dams by the slot erosion test and the hole erosion test. UNICIV Report No. R-412, The University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Wan, C.F., and Fell, R. (2004). Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 373-380.
- Washington, D., and Rdriguez, D., and Ogunro, V. O. (2005). An effective approach to prevent piping in older dams using cutoff walls construction design. In: *international conference on energy, enviromental and disasters-inceed*.
- Wahl, Tony L. (2010). Relating het and jet test results to internal erosion field tests. In: *Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling*, June 27 - Las Vegas, NV.
- Zomorodian, S. M. A., and Koohepyma, H. R. (2015). Investigation of effect-iveness of modern chemical stabilizers on internal erosion in embankment dams. *Sharif Journal Civil Engineering*, 30(2), 73-78. (In Farsi)

Archive of SID