

ارزیابی تأثیر ماده‌ی افزودنی نانورس بر فرسایش داخلی در خاک ریز با پردازش تصویر

Research Note

محمد جعفر عطایی نوقاب (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید محمد علی زهردیان* (دانشیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

فرسایش داخلی از عوامل اصلی تخریب سدهای خاکی است که برای مقابله با آن از تزریق یا افزودن مواد شیمیایی به خاک استفاده می‌شود. در این پژوهش از نانورس به عنوان ماده افزودنی بدون خطرات زیست محیطی استفاده شد و فرسایش‌پذیری نمونه‌های حاوی نانورس با مقادیر ۰، ۱، ۵، ۱۰ درصد وزنی خاک خشک و زمان عمل‌آوری ۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز با استفاده از روش پردازش تصویر بررسی شد. به منظور انجام مقایسه‌ی بین مواد افزودنی مدرن و سنتی، نمونه‌ی ۵٪ وزنی خاک خشک رس متخلخل استفاده شد. نتایج نشان از تأثیر مثبت نانورس بر کاهش فرسایش‌پذیری خاک شاد داشت؛ به طوری که نمونه‌ی ۱٪ نانورس با زمان عمل‌آوری ۱۴ روز بیشترین مقاومت را نشان داد. افزایش زمان عمل‌آوری تا ۱۴ روز در همه‌ی نمونه‌ها باعث کاهش فرسایش‌پذیری شد و بعد از آن تأثیر به سزایی بر آن نداشت. در مقایسه بین مواد افزودنی سنتی و مدرن نیز فرسایش‌پذیری در نمونه‌ی حاوی ۵٪ رس بنتونیتی ۱۰ برابر نسبت به نمونه‌ی حاوی ۱٪ نانورس کاهش داشت.

واژگان کلیدی: فرسایش داخلی، نانورس، پردازش تصویر، عمل‌آوری.

۱. مقدمه

آب اصلی‌ترین عامل شکل‌گیری و ادامه‌ی حیات در کره‌ی زمین است. به طوری که در هر منطقه که آب به طور معمول در دسترس بشر نباشد با ساخت سازه‌ی متناسب با عامل محدودکننده امکان دسترسی و حتی در برخی مواقع مصون ماندن از خطرآفرینی نظیر سیلاب ایجاد شده است. نمونه‌ی از سازه‌های یاد شده که با اهداف مختلفی نظیر جلوگیری از سیل‌زدگی یا هدایت جریان ساخته می‌شود خاک‌ریز^۱ یا گور نام دارد. خاک‌ریز، سازه‌ی است مصنوعی که به منظور جلوگیری و کاهش خطرات ناشی از سیل در مسیر جریان (چه موازی با جریان و چه در جهت عمود بر آن) مانند سد عمل می‌کند. بسته به هدف از ساخت، در حالت‌های غیرتراکم^۲، نیمه‌تراکم^۳، کاملاً تراکم^۴ و هیدرولیکی^۵ با درصدهای مختلف رطوبتی خاک ساخته می‌شود. از جمله مهم‌ترین اهداف ساخت خاک‌ریز می‌توان به حفاظت مناطق شهری یا دارای سازه‌ی خاص و زمین‌های کشاورزی در برابر سیلاب اشاره کرد. از آنجا که پس از ساخت خاک‌ریز تراز جریان آب در هنگام وقوع سیلاب در ارتفاع بالاتری واقع می‌شود، استقامت و پایداری سازه از اهمیت بالایی برخوردار است؛ زیرا ممکن است شکست خاک‌ریز در هنگام سیلاب خسارت بیشتری نسبت به عدم وجود آن به بار آورد. شکست خاک‌ریز همواره خطری برای جان مردم، زمین‌های کشاورزی، و ساختمان‌های موجود در پایین دست محسوب می‌شود؛ به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۱۸، پذیرش ۱۳۹۸/۳/۲۸.

DOI:10.24200/J30.2019.52533.2486

همین منظور باید عوامل تهدیدکننده‌ی پایداری سازه را شناخت و برای مقابله با آنها راه‌کارهای مناسبی ارائه داد.

از زمان پیدایش سازه‌های خاکی و آبی، همواره دو پدیده‌ی روگذری^۶ و فرسایش داخلی^۷ مشکلات فراوانی را برای این سازه‌ها ایجاد کرده‌اند. تاکنون فرسایش داخلی دومین عامل خرابی سدها شناخته شده است. به طوری که حدود ۳۰٪ شکست سدهای خاکی به دلیل فرسایش داخلی بوده است.

از آنجا که خاک‌های ریزدانه، در بسیاری از سازه‌ها از جمله سدهای خاکی نقش تعیین‌کننده‌ی دارند، پژوهشگران تأثیر افزودنی‌های متداول مانند قیر، بنتونیت، آهک، کلسیم‌کلرید و... را بر خواص این خاک‌ها بررسی کرده‌اند. در سال‌های اخیر، مواد نانو که دارای ویژگی‌های منحصر به فردی هستند و در انواع علوم مهندسی باعث تحولاتی بنیادی شده‌اند، توجه پژوهشگران را برای اصلاح رفتار خاک‌ها به خود معطوف کرده‌اند. سرمایه‌گذاری کلان کشورهای توسعه‌یافته بر انجام پژوهش بر روی فناوری نانو، نشانه‌ی از اهمیت ویژه‌ی این فناوری نوین در عصر حاضر است. سالانه حدود ۵/۵ میلیارد دلار در سراسر دنیا صرف سرمایه‌گذاری بر تحقیقات فناوری نانو می‌شود.^[۱]

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در مورد استفاده از مواد نانو به ویژه نانورس برای اصلاح خواص ژئوتکنیکی خاک انجام شده است که در ادامه به مواردی از آنها اشاره می‌شود.

پدیدار و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر نانورس بر تثبیت خاک ماسه‌ی تحت

Archive of SID

آنها برای این منظور درصدهای متفاوتی از نانورس (۲٪ تا ۳٪ وزنی) را به خاک لس اضافه کردند که نتایج آزمایش‌ها نشان از بهبود خواص لس از جمله خاصیت خمیری، مقاومت و سفتی آن در اثر افزودن نانورس در تمام نمونه‌ها داشته است. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده، بهترین نتایج مربوط به نمونه‌ی حاوی ۲٪ نانورس بوده است.^[۱۰]

به منظور بررسی روند و عوامل مؤثر بر فرسایش چندین روش چه آزمایشگاهی و چه غیرآزمایشگاهی ایجاد و توسعه یافته‌اند. از جمله آزمایش فلووم^[۱۱]، آزمایش کانال^[۱۲]، سیلندر چرخان^[۱۳]، آزمایش فرسایش حفره‌یی^[۱۴]، آزمایش فرسایش جت^[۱۵] و آزمایش شیار^[۱۶]

وال^[۱۴] (۲۰۱۰) به مقایسه‌ی دو آزمایش فرسایش حفره‌یی و فرسایش جت پرداخت و عنوان کرد آزمایش فرسایش جت بیشترین پتانسیل عملی برای بررسی خصوصیات طیف گسترده‌یی از خاک‌ها ارائه می‌دهد. در حالی که آزمایش فرسایش حفره‌یی به طور خاص برای شرایط فرسایش داخلی مطلوب است. از این رو وال بر انتخاب آزمایش متناسب با سازوکار فرسایش برای تطبیق و کارایی بهتر تأکید کرده است.^[۱۷] الخولی و همکاران^[۱۵] (۲۰۱۵) با یک روش جدید آزمایشگاهی به بررسی فرسایش داخلی در خاک‌ریزهایی با درصدهای متفاوت ماسه، سیلت و رس پرداختند. آنها پی بردند که کمی تغییر در درصد رس، به طور قابل ملاحظه‌یی بر نرخ فرسایش تأثیر می‌گذارد.^[۱۸]

با توجه به پیچیدگی پدیده‌ی فرسایش داخلی و محدودیت روش‌های موجود، به منظور رسیدن به درکی صحیح از روند و ارائه‌ی راهکارهایی مؤثر برای کنترل و کاهش خسارات ناشی از فرسایش داخلی انجام تحقیقاتی در این زمینه ضروری است که در این پژوهش به منظور برداشتن گامی در این مسیر، بررسی تأثیر ماده‌ی افزودنی نانورس بر روند پدیده‌ی فرسایش داخلی خاک‌ریز مطابق روشی نو و متناسب با سازوکار فرسایش با استفاده از روش پردازش تصویر صورت گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. نانورس

در این پژوهش از نانورس مونتریلونیت استفاده شده است. این نانورس محصول شرکت Sigma-Aldrich است که مشخصات فیزیکی آن در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۲ آورده شده است.

۲.۲. خاک

خاک مورد بررسی در این پژوهش ترکیبی از ماسه با دانه‌بندی یک‌نواخت و خاک عبوری از الک ۴ منطقه‌ی باجگاه شیراز (با نسبت ترکیب ۴ به ۱) است. آزمایش‌های

جدول ۱. مشخصات فیزیکی نانورس مونتریلونیت.

پارامتر	مقدار
جرم مخصوص (kg/m^3)	۳۷۰-۳۰۰
اندازه‌ی ذرات (mm)	۱-۲
رنگ	زرد کمرنگ
رطوبت (%)	۱-۲
هدایت الکتریکی (MV)	۲۵
ضریب تبادل یونی ($meq/10^6 gr$)	۴۸

فرسایش ناشی از باد پرداختند. آنها با دو تیمار شاهد (آب) و محلول نانورس اقدام به انجام آزمایش کردند که نتایج تأثیر قابل توجه نانورس در افزایش مقاومت خاک نسبت به نمونه‌ی شاهد در برابر فرسایش ناشی از باد را نشان می‌دهد.^[۴]

تقوی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر نانورس بر نرخ نشست در سدهای خاکی پرداختند. آنها در این پژوهش با دو درصد نانورس (۵، ۰ و ۱) و سه ضخامت (۳، ۵ و ۱۰ سانتی متر) اقدام به ساخت یک لایه‌ی نفوذناپذیر (بلانکت) در شیب بالادست کردند. سپس با استفاده از نرم‌افزار Geo Studio (seep/w) میزان نشست در هر یک از نمونه‌ها را بررسی کردند که نتایج نشان داد که نرخ نشست در نمونه‌ی حاوی ۵٪ نانورس $10^{-6} \times 9/4$ و $10^{-6} \times 8/93$ و $10^{-6} \times 8/01$ متر مکعب بر ثانیه و در نمونه‌ی حاوی ۱٪ نانورس $10^{-6} \times 2/1$ و $10^{-6} \times 1/44$ و $10^{-6} \times 7/8$ متر مکعب بر ثانیه به ترتیب برای ضخامت‌های ۳، ۵، ۱۰ سانتی‌متر بوده است که نشان از تأثیر قابل توجه نانورس در کاهش نشست دارد.^[۳]

عباسی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی به بررسی تأثیر نانورس بر تثبیت دو نوع خاک رسی واگرا با خاصیت خمیری کم و زیاد پرداختند. آنها با استفاده از آزمایش بین‌هول نمونه‌های حاوی ۱، ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی خاک خشک با سه زمان ماندگاری (۱، ۳، ۷ روز) را بررسی کردند که نتایج نشان داد افزودن نانورس به طور چشمگیری پتانسیل تورم‌پذیری را کاهش داده است که البته این میزان در خاک رسی با خاصیت خمیری زیاد بیشتر بوده است.^[۴]

زمردیان و مومن (۱۳۹۷) نیز در پژوهشی به بررسی تأثیر نانوسلیس بر فرسایش داخلی در خاک واگرا پرداختند که نتایج نشان از تأثیر چشمگیر نانوسلیس بر کاهش فرسایش‌پذیری و همچنین تأثیر مستقیم زمان عمل‌آوری بر عملکرد نانوسلیس داشته است.^[۵] عساکره و آوازه (۲۰۱۶) نیز به بررسی تأثیر نانورس بر رفتار خاک واگرا پرداختند که نتایج نشان داد افزودن درصد کمی نانورس به خاک می‌تواند تا حدی واگرایی در خاک را بهبود بخشد. ولی افزودن بیش از اندازه‌ی آن به خاک باعث افزایش پتانسیل واگرایی می‌شود.^[۶]

بازیار و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی تأثیر نانورس بر هدایت هیدرولیکی در هسته‌ی ساخته شده از ماسه‌ی رس‌دار متراکم پرداختند. آنها با استفاده از رس کائولین و ماسه‌ی فیروزکوه دو نمونه با مقادیر نسبی ۱ به ۹ و ۱ به ۴ به ترتیب از رس و ماسه ساختند. سپس با افزودن مقادیر متفاوتی از نانورس ۱ تا ۴ درصد، به بررسی تأثیر آن پرداختند که نتایج نشان داد افزودن نانورس تا ۳٪ (درصد بهینه) باعث کاهش قابل توجه هدایت هیدرولیکی و رسیدن آن به مقداری قابل قبول برای هسته‌ی سدهای خاکی شده است.^[۷]

بدو و حسین‌زاده (۱۳۹۶) در پژوهشی به بررسی تأثیر افزودن نانورس در بهبود خصوصیات خاک رسی نازلوی ارومیه و ماسه‌ی فیروزکوه پرداختند. نتایج نشان داد که نانورس باعث افزایش شاخص خمیری و رطوبت بهینه و کاهش وزن مخصوص خشک بیشینه‌ی رس نازلو شده است. همچنین باعث کاهش ضریب نفوذپذیری هر دو خاک شده است؛ به طوری که در رس، ضریب نفوذپذیری خاک تا حد استاندارد برای ساخت آستررسی کاهش داشته است، ولی در ماسه این مقدار به حد استاندارد نرسیده است.^[۸]

زمردیان و همکاران (۲۰۱۷) نیز به بررسی تأثیر نانورس و نانوسیلیکا بر افزایش مقاومت خاک آلوده به مواد نفتی و خاک تمیز پرداختند که برای خاک تمیز درصد‌های ۱ و ۵٪ به ترتیب برای نانورس و نانوسیلیکا تأثیر قابل ملاحظه‌یی بر بهبود فرسایش خاک را نشان داد. بنا به گزارش آنها به طور کلی در مقایسه با درصد وزنی نانوسیلیکای اضافه شده، نانورس درصد وزنی بهینه‌تری برای هر دو خاک آلوده و تمیز را داراست.^[۹] طبرسا و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تأثیر نانورس بر بهبود خواص لس پرداختند.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی نانورس مونتمریلونی.

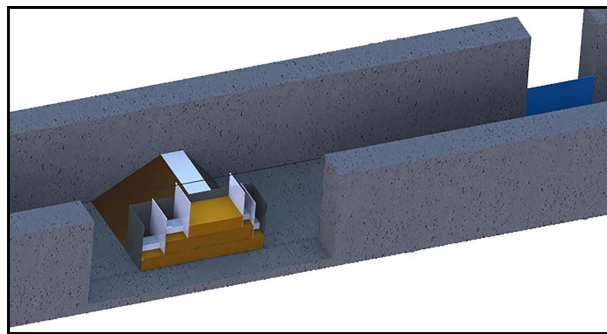
فرمول	مقدار (%)
Na ₂ O	۰٫۹۸
MgO	۳٫۲۹
Al ₂ O ₃	۱۹٫۶
SiO ₂	۵۰٫۹۵
K ₂ O	۰٫۸۶
CaO	۱٫۹۷
TiO ₂	۰٫۶۲۱

جدول ۳. مشخصات فیزیکی خاک مورد بررسی.

پارامتر	مقدار
Gs	۲٫۷
$\rho_{d \max}$	۱۷۷۰ kg/m ³
ω_{op}	٪۱۲٫۸
D ₅₀	0/19mm
LL	non plastic
pL	non plastic

جدول ۴. مقادیر جرم مخصوص بیشینه خشک و رطوبت بهینه‌ی نمونه‌ها.

نمونه	رطوبت بهینه (%)	جرم مخصوص خشک بیشینه (kg/m ³)
خاک شاهد	۱۲٫۸	۱۷۷۰
نانورس ۱٪	۱۳	۱۸۴۷
نانورس ۱٫۵٪	۱۲٫۳	۱۸۶۲
بنتونیت ۵٪	۱۳	۱۹۱۰
بنتونیت ۱۰٪	۱۳٫۶	۱۸۹۵
بنتونیت ۱۵٪	۱۴	۱۸۷۳



شکل ۳. نمایی از فلوم بتنی.

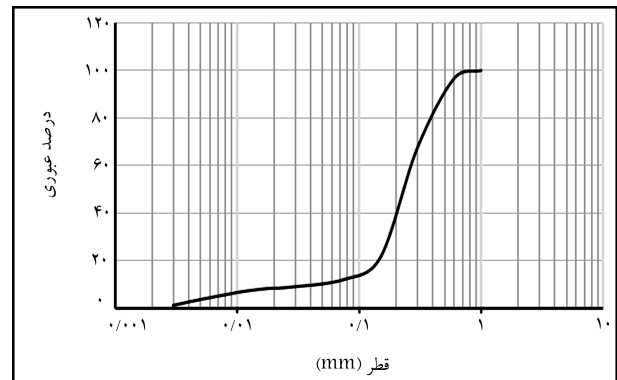
افزوده شد که برای ایجاد یکنواختی رطوبت، نمونه درون سطل پلاستیکی درب‌دار به مدت ۲۴ ساعت قرار گرفت. در نمونه‌های حاوی نانورس تأثیر ماندگاری نیز بررسی شده است که برای این منظور پس از اضافه کردن رطوبت وزنی بهینه، نمونه‌ها به مدت ۲ و ۴ هفته درون سطل نگه داشته شده‌اند.

جدول ۴ مقادیر جرم مخصوص خشک و رطوبت بهینه برای هر کدام از نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

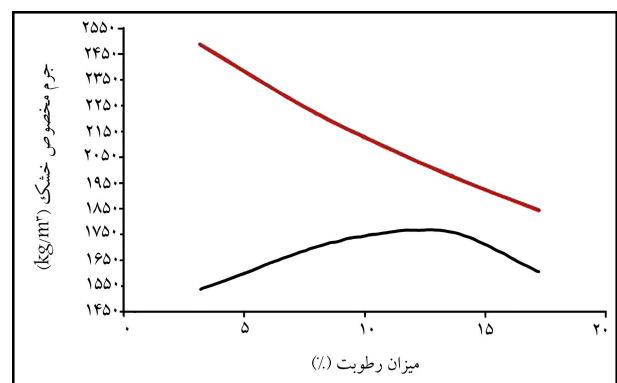
۴.۲. انجام آزمایش

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک رسوب دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه شیراز، در فلوم بتنی به ابعاد ۰٫۵ متر عرض، ۰٫۵ متر عمق و ۱٫۶۵ متر طول انجام شد. شکل ۳ نمایی از فلوم را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۳ در قسمتی از دیواره‌ی کانال، شیشه‌ی برای مشاهده‌ی روند فرسایش و تصویربرداری از آن تعبیه شده است. خاک ریز در مجاورت شیشه و در ابعاد ۱۵ × ۱۵ × ۵۵ سانتی‌متر و شیب بالادست ۱:۱ و پایین دست ۲:۱ ساخته می‌شود. به منظور کاهش جرم خاک مورد نیاز برای ساخت خاک‌ریز، یک مدل فلزی با ابعاد ۱۵ × ۳۵ × ۵۵ سانتی‌متر و شیب برابر در بالادست و پایین دست با



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک مورد بررسی.



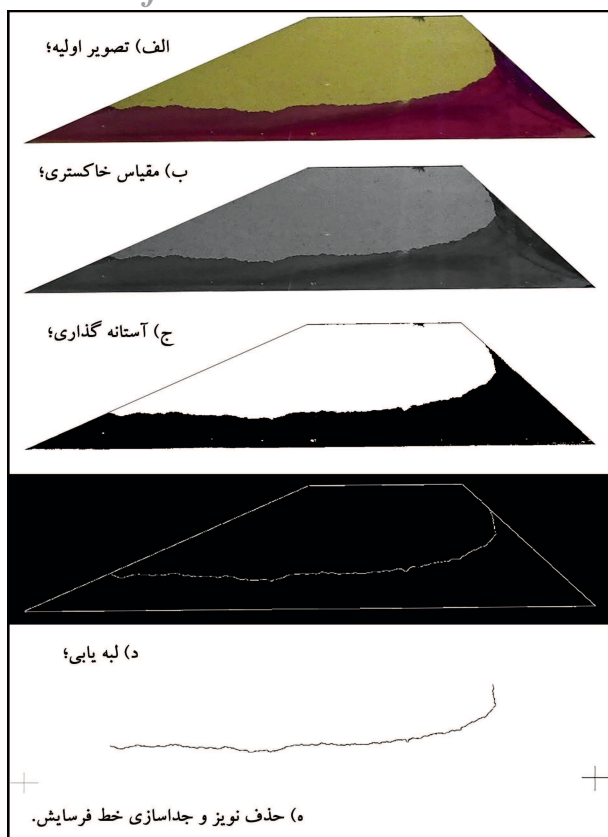
شکل ۲. منحنی تراکم خاک مورد بررسی.

دانه بندی (D₄₂₂)، تراکم استاندارد (D₆₉₈)، حدود اتربرگ (D₄₃₁₈) و چگالی مخصوص دانه‌های خاک (D₈₅₄) بر طبق استاندارد ASTM صورت پذیرفت که شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی دانه‌بندی (به همراه نتیجه‌ی آزمایش هیدرومتری بخش ریزدانه)، منحنی تراکم و جدول ۳ نیز مشخصات فیزیکی خاک را نشان می‌دهد.

خاک مورد بحث بر طبق روش طبقه‌بندی متحد در گروه ماسه‌ی لای‌دار (SM) قرار می‌گیرد.

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

جرم خاک مورد نیاز برای هر آزمایش با توجه به ارتفاع نهایی خاک‌ریز و چگالی بیشینه‌ی خشک خاک محاسبه شد. سپس با توجه به هدف آزمایش میزان رطوبت وزنی بهینه‌ی به دست آمده از آزمایش تراکم یا درصد کمتر یا بیشتر از آن به خاک



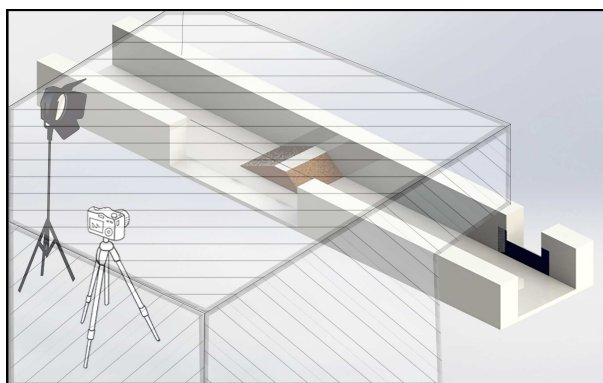
شکل ۶. مراحل پردازش تصاویر.

با توان ۳ وات در آن جای‌گذاری شد. همچنین از محلول پتاسیم پرمنگنات نیز به عنوان ماده‌ی رنگی برای ایجاد تمایز بین خاک فرسایش‌یافته و خاک ریز استفاده شد. پردازش تصویر انجام شده با استفاده از الگوریتم لبه‌یاب کنی^{۱۶} صورت گرفته است. الگوریتم‌های زیادی به منظور آشکارسازی لبه‌ها در مبحث پردازش تصویر ارائه شده است. اساس بسیاری از این الگوریتم‌ها، مشتق‌گیری از تابع شدت تصویر است. الگوریتم کنی، در سال ۱۹۸۳ مطرح و با استقبال بسیار زیاد صاحب‌نظران رو به رو شد. هم‌اکنون از این الگوریتم به عنوان یک آشکارساز در صنعت به صورت گسترده استفاده می‌شود. شکل ۶ مختصری از عملیات پردازش تصویر انجام شده را نشان می‌دهد.

در شکل ۶، الف یک فریم از فیلم ضبط شده از آزمایش است. هر فریم به فریم‌هایی به فاصله‌ی زمانی ۵ ثانیه تبدیل شده است. در این حالت مدل رنگی تصویر RGB (متشکل از سه رنگ قرمز، سبز و آبی) است. در تصویر ب مدل رنگی تصویر از سطح RGB به سطح خاکستری ۸ بیتی تبدیل شده است. در سطح خاکستری ۸ بیتی هر پیکسل از تصویر می‌تواند شدت نوری بین ۰ تا ۲۵۵ را به خود اختصاص دهد که ۰ نشان‌دهنده‌ی رنگ سیاه و ۲۵۵ نشان‌دهنده‌ی رنگ سفید است. در مرحله‌ی ج عمل آستانه‌گذاری بر روی تصویر برای متمایز کردن مرزها و سهولت در تقطیع و لبه‌یابی انجام شده است. تابع آستانه‌گذاری با مشخص کردن یک مقدار از شدت روشنایی به عنوان آستانه، مقدار شدت روشنایی تمام پیکسل‌های کمتر از آن را صفر و بیشتر از آن را مساوی با آن را یک می‌کند که ۰ متعلق به رنگ سیاه و ۱ متعلق به رنگ سفید است. در واقع پس از آستانه‌گذاری تصویر به سطح دودویی (سیاه و سفید) تغییر می‌یابد. در مرحله‌ی د نیز لبه‌یابی توسط تابع لبه‌یاب کنی صورت پذیرفته است



شکل ۴. جای‌گذاری مفتول فولادی.



* منطقه‌ها شورخوردۀ توسط پرده پوشیده شده است
شکل ۵. محل استقرار دوربین و تجهیزات تصویربرداری.

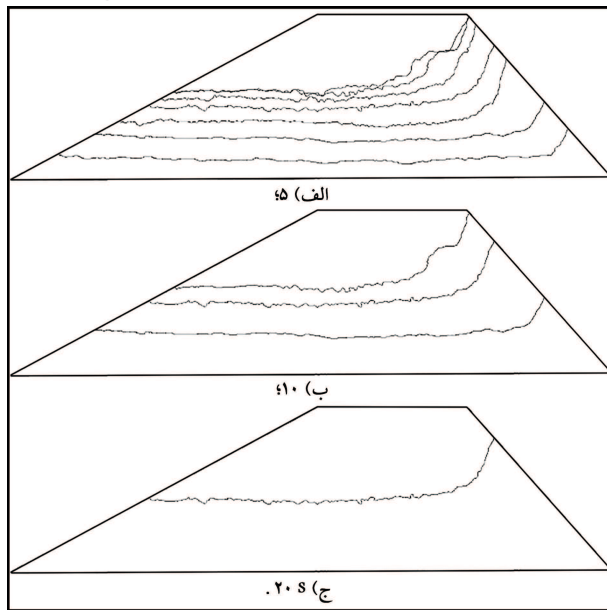
خاک ریز ساخته و در کانال نصب شد. از آن‌جا که بخ دادن پدیده‌ی فرسایش داخلی به صورت طبیعی زمان‌بر است، برای شبیه‌سازی و تسریع وقوع این پدیده، قبل از خاک‌ریزی و تراکم کردن لایه‌ی اول در ساخت خاک‌ریز، مفتول فولادی به قطر ۱۲ میلی‌متر در کف کانال و در مجاورت شیشه قرار داده شده و سپس خاک‌ریزی و تراکم لایه‌ی اول صورت گرفته است (شکل ۴). عمل خاک‌ریزی و تراکم برای لایه‌های دوم و سوم نیز به طور مشابه انجام شده است.

پس از ساخت خاک‌ریز، آب وارد کانال شد و با وجود خاک‌ریز در کانال شروع به ذخیره شدن و افزایش ارتفاع کرد که به منظور ایجاد ارتفاع (آب) ثابت در حین آزمایش در بالادست خاک‌ریز و به فاصله‌ی ۱٫۵ متری از آن یک سرریز جانبی ایجاد شده است شکل ۵ سرریز جانبی از نوع مستطیلی لبه‌تیز، با ارتفاع تاج (از کف کانال) ۱۳٫۵ سانتی‌متر و طول تاج ۳۰ سانتی‌متر است؛ پس از رسیدن آب به ارتفاع ۱۴ سانتی‌متری خاک‌ریز، مفتول فولادی قرار داده شده در کف کانال کشیده شد و هم‌زمان با آن دوربین واقع در رو به روی وجه شیشه‌ی کانال مطابق شکل ۵ شروع به ضبط تصاویر کرد. زمان اتمام آزمایش نیز هنگامی که سطح آب از سطح خاک‌ریز در اثر فرسایش جدا شود، در نظر گرفته شده است.

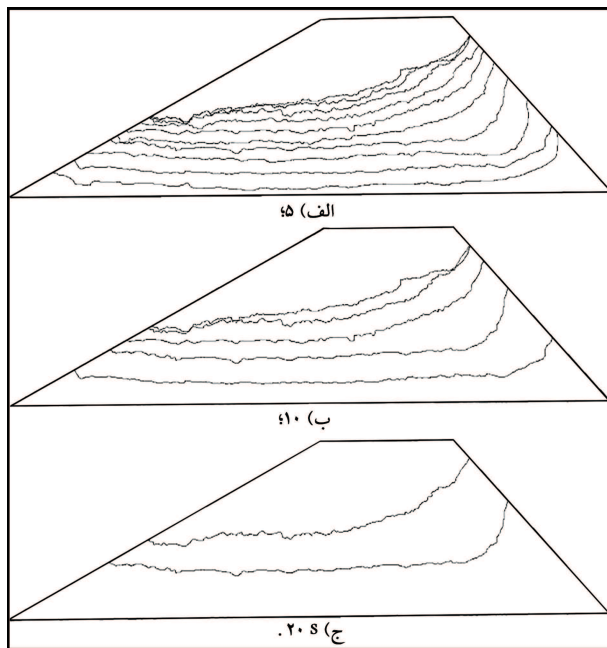
دبی مورد استفاده برای تمام آزمایش‌ها ثابت و با توجه به دبی‌سنج واقع در آزمایشگاه برابر ۱٫۷۵ لیتر بر ثانیه بوده است.

۵.۲. پردازش تصویر

برای ثبت تصاویر در این پژوهش از یک دوربین عکس‌برداری با قابلیت فیلم‌برداری HD و نرخ ثبت ۳۰ فریم بر ثانیه استفاده شد. برای نورپردازی با شدت یکسان و کاهش نویزهای ناخواسته، محدوده‌ی فیلم‌برداری توسط پرده پوشیده و یک نورافکن



شکل ۷. خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر آزمایش خاک شاهد بدون ماندگاری به فاصله‌ی زمانی.



شکل ۸. خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر آزمایش خاک شاهد با ماندگاری هفت روز با فاصله‌ی زمانی.

جدول ۵. آزمایش‌های خاک شاهد.

مدت آزمایش (ثانیه)	ماندگاری	رطوبت (%)	نمونه مورد بررسی
۳۵	۰	۱۲٫۸	خاک شاهد
۵۰	۷ روز	۱۲٫۸	خاک شاهد
۴۵	۱۴ روز	۱۲٫۸	خاک شاهد
۴۹	۲۸ روز	۱۲٫۸	خاک شاهد

که در آن لبه‌ی تمام اشیاء داخل تصویر به رنگ سفید نشان داده شده است که از این بین فقط خط مربوط به فرسایش ناشی از روگذری مدنظر بوده است و بقیه‌ی خطوط سفید نویز محسوب شده‌اند و در تصویر مرحله‌ی ه تمام آنها با اعمال چند فیلتر حذف شده‌اند. این تصویر خروجی عملیات پردازش تصویر صورت گرفته است که برای تبدیل عکس به نمودار (رقومی کردن) استفاده شده است.

۶.۲. معادلات و شبکه‌ی عصبی

برای بررسی وجود رابطه‌ی بین پارامترهایی نظیر تراکم و زمان سپری شده از شروع آزمایش، تصاویر خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر رقومی شده و سپس داده‌های حاصل توسط شبکه‌ی عصبی و روش سطح پاسخ بررسی شده‌اند.

۱.۶.۲. شبکه‌ی عصبی

در این پژوهش برای عمق‌سنجی خط فرسایش، از داده‌های حاصل از رقومی شدن تصاویر خطوط فرسایش برای آموزش شبکه‌ی عصبی (پرسپترون) استفاده شد. برای یافتن بهترین نگاشت نیز بین مقادیر ورودی و خروجی در شبکه‌ی طراحی شده از دو لایه‌ی پنهان، هریک با ۱۰ نورون و از سه تابع انتقال تانژانت سیگموئید، لگاریتم سیگموئید و بیشینه‌ی هموار استفاده شد. برای انتخاب بهترین شبکه مقادیر میانگین مربعات خطای شبکه‌ها با هم مقایسه شدند و شبکه‌ی دارای کمترین خطا به عنوان بهینه‌ترین شبکه انتخاب شد.

۲.۶.۲. روش سطح پاسخ

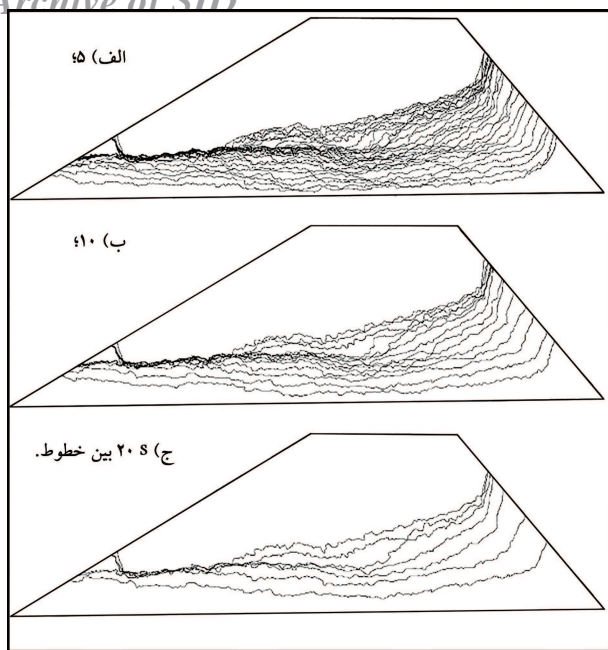
روش سطح پاسخ یا به اختصار RSM^{۱۷}، مجموعه‌ی از روش‌های ریاضی است که رابطه‌ی بین یک یا چند متغیر پاسخ را با چندین متغیر مستقل (مورد مطالعه) تعیین می‌کند. هدف در روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) است. از مزایای این روش نسبت به شبکه‌ی عصبی ارائه‌ی روابط تخمین زده شده بین متغیرهای ورودی و پاسخ است که با توجه به آنها می‌توان حساسیت پاسخ را نسبت به هر یک از عوامل (متغیرهای ورودی) نیز مشخص کرد.

۳. بحث و نتایج

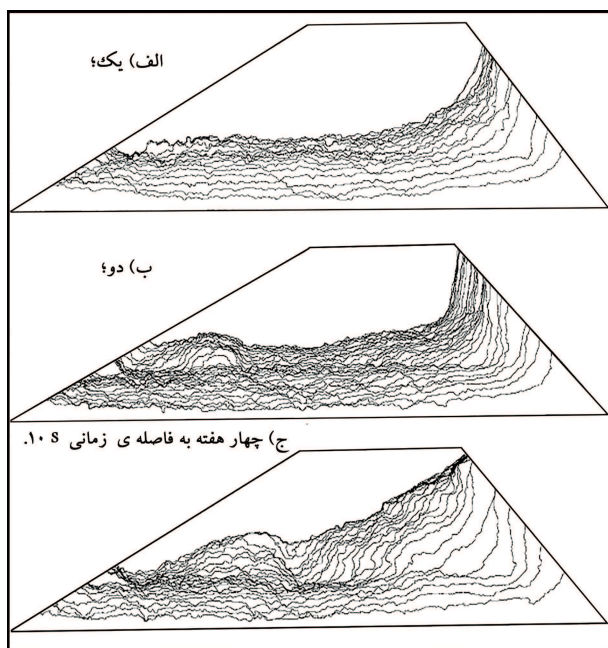
با توجه به نتایج آزمایش تراکم، با افزودن رطوبت بهینه به خاک شاهد، آماده‌سازی و انجام آزمایش مانند آنچه بیان شد، صورت گرفت. در شکل ۷ خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر فیلم ضبط شده‌ی آزمایش خاک شاهد بدون ماندگاری با فاصله‌های زمانی ۵، ۱۰ و ۲۰ ثانیه نشان داده شده است.

از آنجا که تأثیر ماندگاری در نمونه‌های حاوی نانورس بررسی شده است، به همین منظور تأثیر آن بر خاک شاهد نیز بررسی شد. شکل ۸ خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر نمونه‌ی شاهد با ماندگاری یک هفته را نشان می‌دهد. جدول ۵ مدت زمان و چگونگی آزمایش‌های خاک شاهد را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۵، ماندگاری باعث افزایش مدت زمان آزمایش‌ها شده است؛ اما این افزایش زمان در نمونه‌هایی با بیش از یک هفته ماندگاری تفاوت چندانی ندارد.



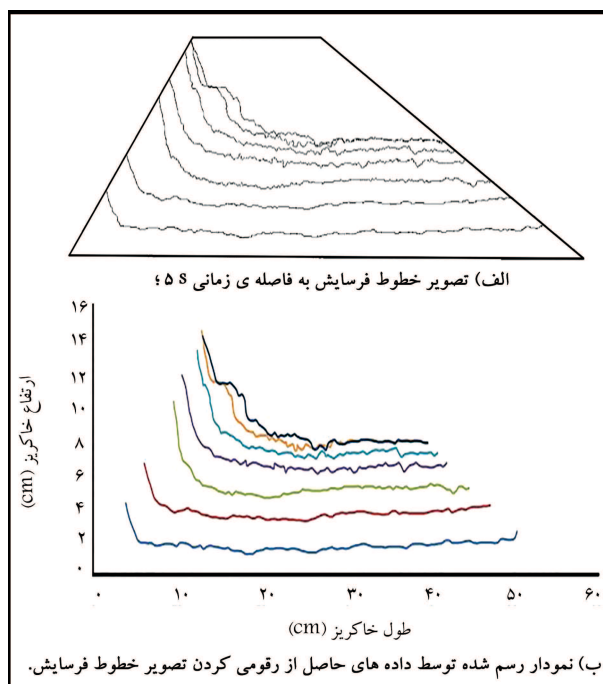
شکل ۱۰. خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر نمونه حاوی ۱٪ نانورس بدون ماندگاری و فاصله‌ی زمانی.



شکل ۱۱. خطوط فرسایش نمونه‌های حاوی ۱٪ نانورس با ماندگاری.

در شکل ۱۳ نشان داده شده و در ادامه مدت زمان آزمایش‌ها نیز در جدول ۷ گزارش شده است.

با توجه به تصاویر خطوط فرسایش و مدت زمان آزمایش آنها، رابطه‌ی مستقیم بین افزایش درصد بنتونیت و کاهش فرسایش پذیری یا افزایش چسبندگی و مقاومت خاک در برابر فرسایش مشهود است. در دو نمونه حاوی ۵ و ۱۰ درصد بنتونیت شرط توقف آزمایش به وقوع پیوسته است، اما در نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ بنتونیت به علت فرسایش ناچیز پس از گذشت ۴ ساعت از زمان آزمایش، فیلم برداری بدون رخ دادن شرط توقف، متوقف شده است.



شکل ۹. نمودار رسم شده توسط داده‌های حاصل از رقومی کردن تصویر خطوط فرسایش.

۱.۳. مقایسه‌ی خطوط فرسایش حاصل از پردازش تصویر با نمودار حاصل از رقومی کردن آنها

به منظور مقایسه‌ی خطوط فرسایش نمونه‌ها در زمان‌های مختلف با یکدیگر، تصاویر خطوط فرسایش رقومی شدند. شکل ۹ تصویر و نمودار رسم شده با استفاده از داده‌های رقومی شده برای خاک شاهد را بدون ماندگاری نشان می‌دهد.

با توجه به شکل ۹، نمودار رسم شده توسط داده‌های حاصل از رقومی شدن تصویر، تطابق بالایی با آن دارند که در نتیجه می‌توان از این داده‌ها برای تحلیل و مقایسه‌ی فرسایش در نمونه‌های مختلف استفاده کرد.

۲.۳. تأثیر مقادیر متفاوت نانورس

نمونه‌های حاوی نانورس با دو درصد متفاوت ۱ و ۱/۵ درصد وزنی و با ماندگاری ۰، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آزمایش شدند. مقادیر درصد نانورس افزوده شده در این پژوهش با توجه به نتایج مطالعات پیشین (نیدو و ریمیا (۲۰۱۳)^[۱۹]، زمردیان و همکاران (۲۰۱۷)^[۹]، عربانی و همکاران (۲۰۱۲)^[۲۰]) و مقدار بهینه‌ی نانورس در آنها انتخاب شده است. درصد رطوبت وزنی اضافه شده به تمام نمونه‌ها برابر با مقدار بهینه برای هر یک از آنها بوده است. در ادامه تصاویر خطوط فرسایش شکل ۱۰ تا ۱۲ و مدت زمان انجام آزمایش نمونه‌های حاوی نانورس جدول ۶ آورده شده است.

به منظور مقایسه‌ی تأثیر مواد افزودنی سنتی و مدرن، نمونه‌هایی حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رس بنتونیت نیز آزمایش شد.

۳.۳. تأثیر افزودن درصد‌های مختلف رس بنتونیت بر خاک شاهد

تصاویر خطوط فرسایش به دست آمده از پردازش تصویر برای هر یک از آزمایش‌ها

جدول ۷. مدت زمان فیلم برداری در نمونه‌های حاوی بنتونیت.

۱۵	۱۰	۵	بنتونیت (%)
۱۴	۱۳٫۶	۱۳	رطوبت (%)
۲۴۰	۱۰۰	۶۰	مدت فیلم برداری (دقیقه)

* مدت زمان فیلم برداری شده را نشان می‌دهد، زمان آزمایش طولانی‌تر بوده است.

جدول ۸. معادلات برآورد شده.

نوع معادله	شاخص p-value	R ^۲ تصحیح شده	R ^۲ پیش بینی شده
خطی با برهم کنش دوتایی	< ۰٫۰۰۰۱	۰٫۷۵۳۰	۰٫۷۵۳۱
درجه دو	< ۰٫۰۰۰۱	۰٫۸۴۸۴	۰٫۸۴۸۵
درجه سه	< ۰٫۰۰۰۱	۰٫۹۱۸۱	۰٫۹۱۸۲
درجه سه (ریشه دوم)	< ۰٫۰۰۰۱	۰٫۹۴۲۶	۰٫۹۴۲۷

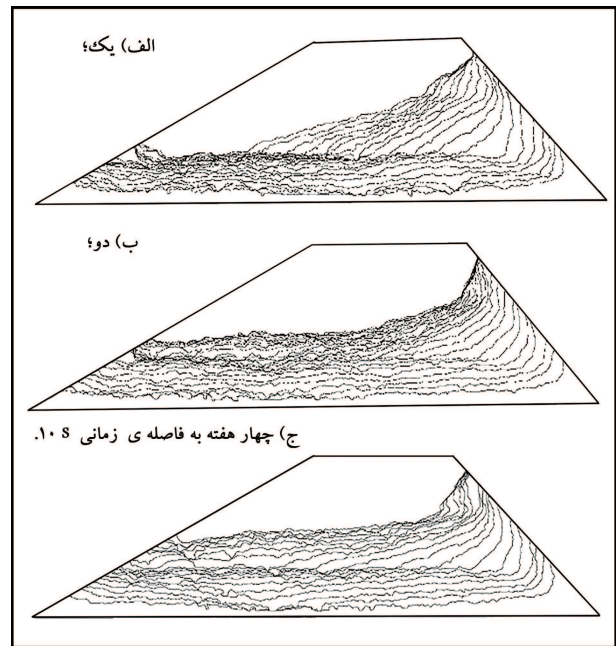
با توجه به تصاویر، عملکرد بنتونیت را می‌توان به علت افزایش چسبندگی بین ذرات خاک دانست. زیرا در شکل ۱۳ سطح ناهمواری در خطوط فرسایش نسبت به نمونه‌ی شاهد دیده می‌شود که نشان از کنده شدن تجمعی ذرات به علت افزایش چسبندگی بین آنها دارد. در نمونه‌های حاوی ۱۰٪ ب و ۱۵٪ ج بنتونیت این ناهمواری‌های کم و کمتر شده است که علت آن نیز می‌تواند افزایش چسبندگی بین ذرات باشد؛ به نحوی که در نمونه‌ی حاوی ۱۵٪ این چسبندگی به قدری زیاد شده است که دیگر گرادبان هیدرولیکی و حجم آب مخزن در آزمایش توان ایجاد فرسایش و کندن ذرات را ندارند.

۴.۳. مقایسه‌ی تأثیر رس بنتونیت و نانورس بر فرسایش خاک شاهد

با توجه به مدت زمان آزمایش‌ها در نمونه‌های حاوی نانورس، نمونه‌ی حاوی ۱٪ نانورس با ماندگاری ۱۴ روز، بهترین عملکرد را در میان این نمونه‌ها دارد که به مقایسه‌ی آن با خاک حاوی ۵٪ بنتونیت پرداخته شده است. با توجه به جدول‌های ۶ و ۷ مدت زمان این دو آزمایش تفاوت زیادی با همدیگر دارند که نشان از تأثیر بیشتر درصد رس بنتونیت بر چسبندگی ذرات خاک و کاهش میزان فرسایش آن دارد. البته تفاوت در درصد این دو ماده افزودنی و همچنین مدت زمان ماندگاری را نیز باید در نظر داشت و به همین دلیل نمی‌توان تمام اختلاف در مدت زمان آزمایش را ناشی از تأثیر نوع ماده افزودنی دانست.

۵.۳. مدل‌های ارائه شده و شبکه‌ی عصبی

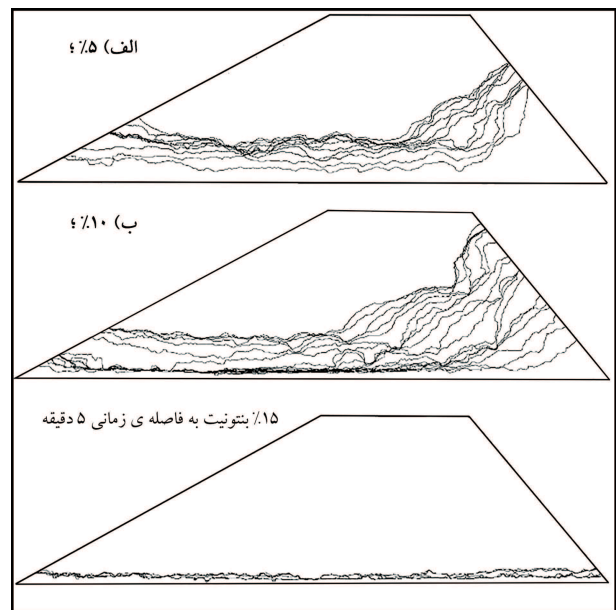
داده‌های حاصل از رقومی کردن تصاویر خطوط فرسایش نمونه‌های حاوی نانورس با ماندگاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز توسط روش سطح پاسخ و شبکه‌ی عصبی مصنوعی تحلیل شدند که ۴ معادله و یک شبکه‌ی متناظر با داده‌ها حاصل شد. در ادامه جدول‌های ۸ و ۹ که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ضریب تبیین معادلات برآورد شده و میزان خطای شبکه‌ی عصبی و معادلات بر حسب شاخص RMSE آورده شده‌اند. با توجه به ضریب تبیین معادلات ارائه شده، معادلات درجه ۳ (درجه ۳ و ۳ درجه ۳ با تبدیل ریشه‌ی دوم) بیشترین هم‌خوانی را با داده‌های واقعی دارند. به منظور



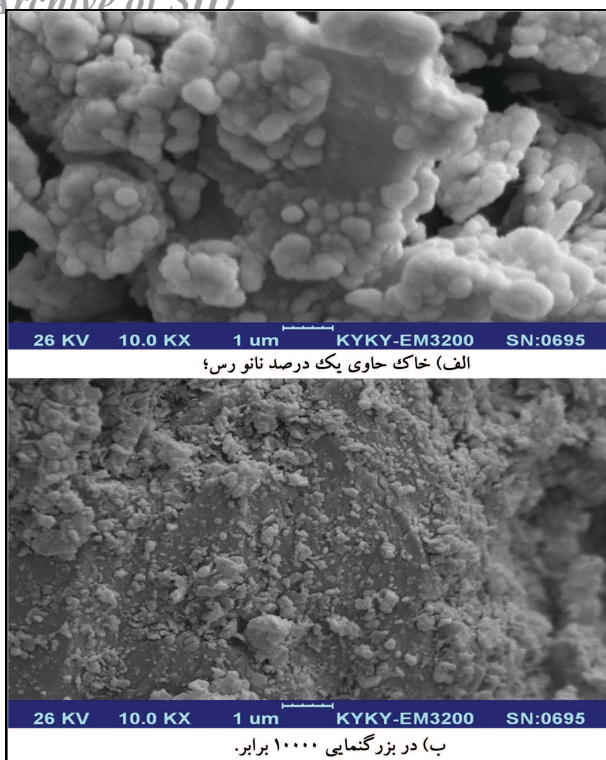
شکل ۱۲. خطوط فرسایش نمونه‌های حاوی ۱۰٫۵٪ نانورس با ماندگاری.

جدول ۶. مدت زمان آزمایش نمونه‌های حاوی نانورس.

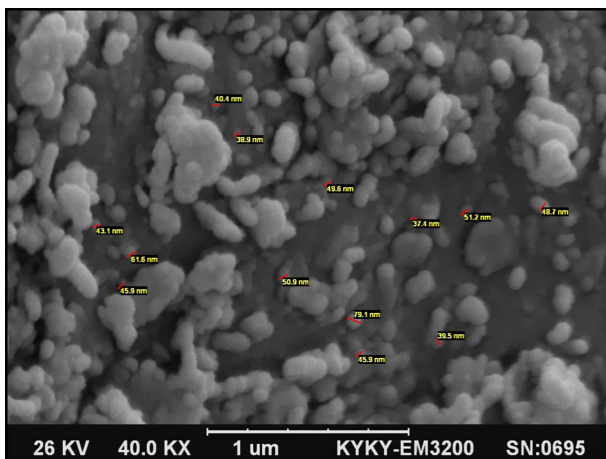
مقدار نانورس (%)	رطوبت (%)	مدت ماندگاری (روز)	مدت آزمایش (ثانیه)
۱	۱۳	۰	۱۴۵
۱	۱۳	۷	۱۸۵
۱	۱۳	۱۴	۳۱۵
۱	۱۳	۲۸	۲۵۰
۱٫۵	۱۲٫۳	۷	۲۰۰
۱٫۵	۱۲٫۳	۱۴	۲۴۰
۱٫۵	۱۲٫۳	۲۸	۱۹۵



شکل ۱۳. خطوط فرسایش نمونه‌های حاوی.



شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دو نمونه خاک شاهد.



شکل ۱۷. نمونه‌ی حاوی ۶ درصد نانورس در بزرگ‌نمایی ۴۰۰۰۰ برابر.

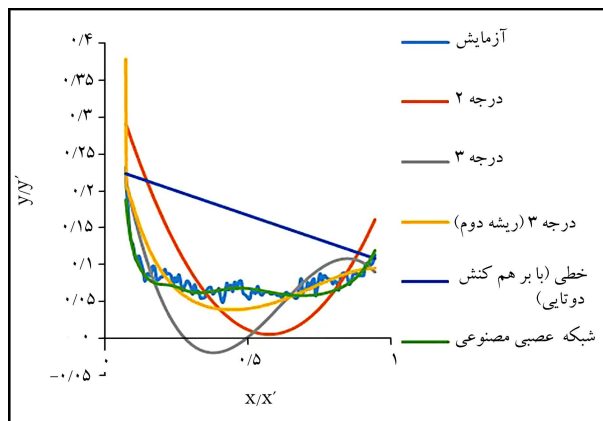
یکخواخت‌ترو با خلل و فرج بسیار ریزتری دیده می‌شود که نشان از تأثیرگذاری نانورس در کاهش تخلخل خاک دارد.

شکل ۱۷ نیز ذرات نانورس را در نمونه‌ی حاوی ۶ درصد نانورس با بزرگ‌نمایی ۴۰۰۰۰ برابر نشان می‌دهد که اندازه‌ی کوچک‌ترین ذره (نانورس) مشخص شده در تصویر برابر با ۲۸٫۲ نانومتر است؛ در حالی که شرکت سازنده ابعاد آن را ۱-۲ نانومتر اعلام کرده است که می‌توان این طور استنباط کرد که ذرات نانورس به علت بار سطحی و سطح ویژه‌ی زیاد، تمایل زیادی برای به هم چسبیدن یا لخته‌یی^{۲۰} شدن دارند که این امر می‌تواند از طریق پیوندهای لیمبه‌لیمبه^{۲۱} و لیمبه به سطح^{۲۲} شکل بگیرد.

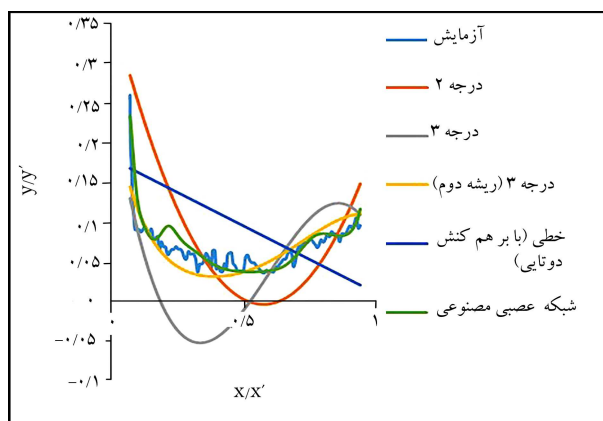
با توجه به مطالب بیان شده، درصد بهینه‌ی باید برای عملکرد نانورس وجود داشته باشد. به نحوی که اگر میزان نانورس افزوده شده (و خوب مخلوط شده)

جدول ۹. ارزیابی معادله‌ها و شبکه‌ی عصبی.

معادله‌ها و شبکه‌ی عصبی	RMSE
معادله‌ی خطی با برهم کنش‌های دوتایی	۰٫۰۸۸۲۵۵
معادله‌ی درجه‌ی دو	۰٫۰۶۹۱۳۴
معادله‌ی درجه‌ی سه	۰٫۰۵۰۷۹۹
معادله‌ی درجه‌ی سه (ریشه دوم)	۰٫۰۷۱۷۵
شبکه‌ی عصبی مصنوعی	۰٫۰۲۰۴۹۳



شکل ۱۴. خطوط فرسایش برآورد شده برای نمونه‌ی حاوی ۱٪ نانورس با ماندگاری ۱۴ روز، در انتهای زمان آزمایش.



شکل ۱۵. خطوط فرسایش برآورد شده برای نمونه‌ی حاوی ۱٫۵٪ نانورس با ماندگاری ۲۸ روز، در انتهای زمان آزمایش.

بررسی بیشتر و مشاهده‌ی تطابق‌پذیری معادلات و شبکه‌ی متناظر شده با داده‌های واقعی، در زمان‌های متفاوتی از نمونه‌های مختلف نمودار خط فرسایش هر یک از معادلات رسم شد. شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نمونه‌ی از این نمودارها را نمایش می‌دهند.

۶.۳. نتایج عکس میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM)^{۱۹}

به منظور بررسی بیشتر و درک بهتر از نحوه‌ی عملکرد نانورس از سه نمونه خاک شاهد، نمونه‌های حاوی ۱ و ۶ درصد نانورس، در چندین بزرگ‌نمایی عکس‌برداری شد. شکل ۱۶ نشان‌دهنده‌ی عکسی با بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر از خاک شاهد و خاک حاوی یک درصد نانورس است.

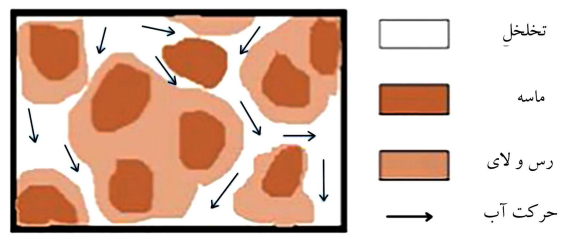
با توجه به شکل ۱۶ سطح خاک در نمونه‌ی شاهد دارای خلل و فرج بزرگ و زیادی است؛ در حالی که در نمونه‌ی دارای یک درصد نانورس، سطح نمونه بسیار

افزودنی مشاهده شده است که می‌تواند مؤید این امر (نحوه‌ی عملکرد نانورس) باشد.

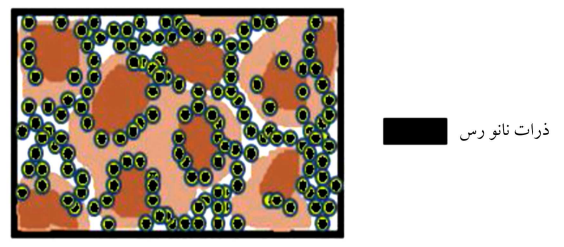
۴. نتیجه‌گیری

با توجه به پیچیدگی پدیده‌ی فرسایش داخلی و محدودیت روش‌های موجود، به منظور رسیدن به درکی صحیح از روند و ارائه‌ی راه‌کارهایی مؤثر برای کنترل و کاهش خسارات ناشی از فرسایش داخلی انجام تحقیقاتی در این زمینه ضروری است که در این پژوهش بررسی تأثیر ماده‌ی افزودنی نانورس بر روند پدیده‌ی فرسایش داخلی خاک ریز مطابق روشی نو و متناسب با سازوکار فرسایش با استفاده از پردازش تصویر صورت گرفت که نتایج زیر حاصل شد:

- افزودن نانورس به خاک باعث افزایش مقاومت آن در برابر فرسایش می‌شود. به طوری که با توجه به زمان آزمایش‌ها برای نمونه‌های حاوی ۱٪ نانورس با ماندگاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روز این میزان ۴، ۷ و ۵ برابر نمونه‌ی خاک شاهد بوده است. همچنین این افزایش برای نمونه‌های حاوی ۱٫۷۵٪ نانورس به ترتیب ۴، ۵ و ۴ برابر خاک شاهد بوده است.
- تأثیر نانورس بر کاهش فرسایش‌پذیری با افزایش زمان عمل‌آوری تا حدی افزایش داشته است و پس از آن تأثیر قابل توجهی ندارد.
- در زمان عمل‌آوری یک هفته برای دو درصد متفاوت ۱ و ۱٫۵ نانورس، نمونه ۱٪ مقاومت بیشتری در برابر فرسایش از خود نشان داده است.
- در مقایسه‌ی عملکرد بین نانورس و رس بنتونیت به عنوان ماده‌ی افزودنی سنتی، نمونه‌ی دارای ۵٪ رس بنتونیت مقاومت بیشتری در برابر فرسایش از خود نشان داده است؛ البته با درصد متفاوت در اختلاط.
- بر اساس عکس‌های SEM گرفته شده، ذرات نانورس با لخته‌بی شدن باعث پر شدن بهتر تخلخل خاک، یکنواخت شدن و متراکم‌تر شدن سطح خاک و در نهایت مقاومت بیشتر خاک در برابر فرسایش می‌شود.
- افزودن نانورس به خاک باعث افزایش چسبندگی و جدا شدن ذرات به صورت توده‌بی شده است.
- نانورس افزوده شده به ازای درصد مشخصی بهترین عملکرد را داشته است و به ازای مقادیر کمتر یا بیشتر عملکرد آن کاهش می‌یابد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۸. نحوه‌ی عملکرد ذرات نانورس.

به خاک کمتر از یا مساوی با آن باشد، ذرات نانورس با ایجاد زنجیره‌هایی از خود به دور ذرات خاک، آنها را در برمی‌گیرند و باعث افزایش چسبندگی و کاهش نفوذپذیری می‌شوند که این زنجیره‌ها در درصد بهینه تا حد زیادی باعث پر شدن خلل و فرج بین ذرات خاک می‌شوند. اما چنانچه درصد نانورس افزوده شده بیشتر از مقدار بهینه شود، افزایشی در عملکرد نانورس مشاهده نمی‌شود یا مقدار آن ناچیز است و حتی در مواردی باعث کاهش آن می‌شود که علت آن را می‌توان میل به پیوند ذرات نانورس با همدیگر (لخته‌بی شدن) و کم شدن یا عدم شرکت در به هم چسبانندن ذرات خاک و افزایش تخلخل در اثر لخته‌بی شدن ذرات نانورس دانست. شکل ۱۸ نحوه‌ی عملکرد نانورس را مطابق آنچه گفته شد، نشان می‌دهد.

در شماری از پژوهش‌های انجام شده (بازیار و همکاران (۲۰۱۸)، طبرسا و همکاران (۲۰۱۷)، محمدی و نیازیان (۲۰۱۳)^[۲۱]، بدو و حسین‌زاده (۱۳۹۳)^[۲۲]، نیدو و ریمیا (۲۰۱۳)، مجید و طاها (۲۰۱۲)^[۲۳]، عربانی و همکاران (۲۰۱۲)) که به منظور بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تحت تأثیر افزودن نانورس و برخی دیگر از نانو مواد به خاک صورت پذیرفته است نیز وجود درصدی بهینه برای ماده‌ی

پانویس‌ها

1. levee
2. un-compacted
3. semi-compacted
4. compacted
5. hydraulic fill
6. overtopping
7. piping
8. flume test
9. channel test

10. rotating cylinder
11. hole erosion test (HET)
12. jet erosion test (JET)
13. silt test
14. Wahl
15. Elkholy et al.
16. canny
17. response surface methodology
18. digitize
19. scanning electron microscopy
20. flocculate

(References) منابع

1. Gutierrez, M. S. "Potential applications of nanomechanics in geotechnical engineering", *In Proc of the International Workshop on Micro-Geomechanics across Multiple Strain Scales, Cambridge, UK*, **20**, pp. 29-30 (2005).
2. Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K. and et al. "The impacts of nanoclay on sandy soil stability and atmospheric dust control", *Agriculturae Conspectus Scientificus*, **814**, pp. 193-196 (2017)
3. Taghvaei, P., Mousavi, S. F., Shahnazari, A. and et al. "Experimental and numerical modeling of nano-clay effect on seepage rate in earth dams", *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, **5**(1), (2019).
4. Abbasi, N., Farjad, A. and Sepehri, S. "The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clayey soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, **36**(1), pp.327-335 (2018).
5. Zomorodian, S. M. A. and Momen, M. "Experimental study of the effectiveness of nano-silica additive on the internal erosion of divergent soils", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **34.2**(1.2), pp. 143-148 (2018).
6. Asakereh, A. and Avazeh, A. "The effects of nano clay on dispersive soils behavior (case study of minab city)", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **49**(3), pp.153-156 (2017).
7. Baziar, M. H., Saeidaskari, J. and Alibolandi, M. "Effects of nanoclay on the treatment of core material in earth Dams", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**(10), :04018250 (2018).
8. Badv, k. and hoseynzade, s. "Teof aof nano-clay to nazloo cand firoozkouh sfor clayey las", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **33.2**(4.1), pp. 125-133 (2018).
9. Zomorodian, S. A., Shabnam, M., Armina, S. and et al. "Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanosilica as additives", *Applied Clay Science*, **140**, pp. 140-147 (2017).
10. Tabarsa, A., Latifi, N., Meehan, C. L. and et al. "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay—a sustainable material for construction", *Construction and Building Materials*, **158**, pp.454-463 (2018).
11. Shaikh, A., Ruff, J. F. and Abt, S. R. "Erosion rate of compacted Na-montmorillonite soils." *J. Geotech. Engrg.*, **3**, pp. 296-305. (1988).
12. Arulanandan, K. , E. B. "Perry erosion in relation to filter design criteria in earth dams", *Journal of Geotechnical Engineering* , **109** (5), pp.682-698 (1983).
13. Chapuis, R. P. and Gatién, T. "An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays", *Canadian Geotechnical Journal*, **23**(1), pp.83-87 (1986).
14. Maranha das Neves, E. "Analysis of crack erosion in dam cores The crack erosion test", *de Mello Volume:Attribute to prof.Dr.rictor FB demello, Sao Paulo, Brazil*, pp. 284-298 (1989).
15. Hanson, G. J. " Development of a jet index to characterize erosion resistance of soils in earthen spillways" ,*Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, **34**(5), pp. 2015-2020 (1991).
16. Wan, C.F. and Fell, R. "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **1304**, pp. 373-380 (2004).
17. Wahl, T. L. "Relating HET and JET test results to internal erosion field tests" , *In Joint federal interagency conference on sedimentation and hydrologic modeling* (2010).
18. Elkholy, M., Sharif, Y. A., Chaudhry, M. H. and et al. "Effect of soil composition on piping erosion of earthen levees", *Journal of Hydraulic Research*, **53**(4), pp. 478-487 (2015).
19. Neethu, S. V. and Remya, S. "Engineering behaviour of nanoclays stabilized soil", *In Proceedings of Indian Geotechnical Conference*, pp. 22-24. (2013).
20. Arabani, M., Haggi, A. K., Mohammadzade Sani, A. and et al. "Use of nanoclay for improvement the microstructure and mechanical properties of soil stabilized by cement", *In Proceedings of the 4th International Conference on Nanostructures* (2012).
21. Mohammadi, M. and Niazian M. R. "Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of rasht clay", *Journal of Advanced Science and Technology*, **33**, pp. 37/-46. (2013).
22. Badv, k. and hoseynzade, s. "Investigating the effect of nanoclay on the geotechnical behavior of the uremia nazluy clay and the firuzkouh sand", *Eighth National Civil Engineering Congress , Noushivani Industrial University of Babol* (2014).
23. Majeed, Z. H. and Taha, M. R. "Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil", *Journal of Asian Scientific Research*, **2**(11), pp.587-592 (2012).