

# مقایسه نرخ فرسایش خاک ماسه لای دار تثبیت شده با سیمان و نانورس

شقایق سادات بابایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سید محمدعلی زهردیان\* (دانشیار)

جهانشیر محمدزاده هایلی (استادیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شروز

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)  
دربی ۲ - ۳۶، شماره ۲/۴، ص. ۱۴۳-۱۵۰، (پادداشت نمی)

فرسایش داخلی به عنوان یکی از مهم ترین مشکلات حائز اهمیت در سدهای خاکی شناخته می شود. به طوری که شکست اکثر سدهای خاکی در جهان ناشی از آن است. یکی از روش های کاهش این پدیده استفاده از مواد افزودنی است که به لحاظ اقتصادی و زیست محیطی مناسب باشند. در این پژوهش از سیمان و نانورس به عنوان مواد افزودنی در خاک ماسه لای دار استفاده شد و برای بررسی این پدیده، آزمایش فرسایش حفره ای مبنای کار قرار گرفت. نمونه های حاوی مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد سیمان و ۱، ۰/۵ و ۱/۵ درصد نانورس در بازه زمانی ۰/۱، ۰/۷، ۱/۴، ۲/۸ و ۴/۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. براساس نتایج، پس از گذشت ۲۸ روز شاخص نرخ فرسایش در ۱/۵٪ نانورس و ۱٪ سیمان نسبت به خاک شاهد بیش از سه برابر افزایش داشته که براساس جدول گروه بندی خاک ها بر مبنای شاخص نرخ فرسایش، این امر سبب تغییر گروه خاک از نسبتاً سریع به خیلی آرام می شود و کاهش فرسایش پذیری را به دنبال دارد. از طرفی در تمامی درصدها و بازه های زمانی نیز تنش برشی بحرانی نمونه خاک همراه با سیمان از نانورس بیشتر بوده است.

shaghayeghbabaei123456@gmail.com  
mzomorod@shirazu.ac.ir  
j.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir

واژگان کلیدی: آزمایش فرسایش حفره ای، نانورس، سیمان، فرسایش داخلی.

## ۱. مقدمه

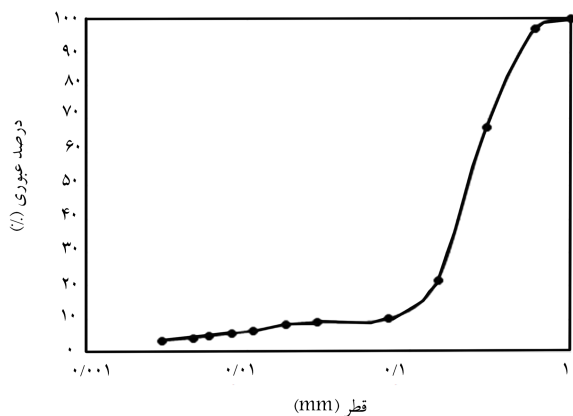
فرسایش فرایندی است که سبب جدایی ذرات خاک از بستر خود شده و به کمک آب به عنوان عامل انتقال دهنده از نقطه ای به نقطه ای دیگر جابه جا می شوند. در این بین رگاب<sup>۱</sup> و فرسایش داخلی<sup>۲</sup> دو عاملی هستند که مشکلات بسیاری را برای سازه های خاکی به وجود می آورند. طبق تحقیقات صورت گرفته در سال های اخیر فرسایش داخلی به عنوان دومین عامل خرابی سدها شناخته می شود.<sup>[۱]</sup> از زمان مشاهده نشست تا زمان رخ دادن شکست در سدها کمتر از ۶ الی ۱۲ ساعت طول می کشد که این موضوع حاکی از سرعت سریع شکست های ناشی از فرسایش داخلی است.<sup>[۱]</sup> از این رو شناخت و بررسی عوامل مؤثر بر این پدیده از اهمیت بسیاری برخوردار است. درک درست شرایط ژئوتکنیکی خاک و اصلاح آن از جمله مسائل مهم در زمینه کنترل و کاهش فرسایش داخلی می باشد. آزمایش فرسایش حفره ای<sup>۳</sup> یکی از کم هزینه ترین، مطمئن ترین و ساده ترین آزمایش هایی است که به منظور بررسی پدیده فرسایش داخلی مورد استفاده قرار می گیرد.<sup>[۲]</sup>

یکی از روش های مؤثر برای کاهش فرسایش پذیری و بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک مخلوط کردن آن با افزودنی های مختلف است. در سال های اخیر از افزودنی های متعارفی چون سیمان، آهک و خاکستر بادی به منظور کاهش پتانسیل فرسایش پذیری و تثبیت خاک استفاده شده است که سبب کاهش پدیده فرسایش داخلی شده است. در این پژوهش از سیمان و نانورس به عنوان مواد افزودنی در خاک ماسه لای دار استفاده شد و برای بررسی این پدیده، آزمایش فرسایش حفره ای مبنای کار قرار گرفت. نمونه های حاوی مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد سیمان و ۱، ۰/۵ و ۱/۵ درصد نانورس در بازه زمانی ۰/۱، ۰/۷، ۱/۴، ۲/۸ و ۴/۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند. براساس نتایج، پس از گذشت ۲۸ روز شاخص نرخ فرسایش در ۱/۵٪ نانورس و ۱٪ سیمان نسبت به خاک شاهد بیش از سه برابر افزایش داشته که براساس جدول گروه بندی خاک ها بر مبنای شاخص نرخ فرسایش، این امر سبب تغییر گروه خاک از نسبتاً سریع به خیلی آرام می شود و کاهش فرسایش پذیری را به دنبال دارد. از طرفی در تمامی درصدها و بازه های زمانی نیز تنش برشی بحرانی نمونه خاک همراه با سیمان از نانورس بیشتر بوده است.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۱۳، اصلاحیه ۱۳۹۹/۲/۲۰، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۹.

DOI:10.24200/J30.2020.54801.2714



شکل ۱. دانه بندی خاک.

جدول ۱. خلاصه وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبت بهینه.

W <sub>opt</sub>	$\gamma_d (\frac{kN}{m^3})$	نوع خاک
۱۱٫۵۵	۱۸٫۱۰	ماسه لای دار
۱۱٫۰۴	۱۸٫۹۵	ماسه لای دار + ۲۵٪ سیمان
۱۰٫۱۴	۱۸٫۷۵	ماسه لای دار + ۵٪ سیمان
۹٫۸۹	۱۸٫۶۹	ماسه لای دار + ۱٪ سیمان
۱۱٫۴۶	۱۸٫۴۸	ماسه لای دار + ۲٪ سیمان
۱۲٫۰۲	۱۸٫۲۸	ماسه لای دار + ۳٪ سیمان
۹٫۱۵	۱۸٫۴۷	ماسه لای دار + ۵٪ نانورس
۹٫۵۷	۱۸٫۲۹	ماسه لای دار + ۱٪ نانورس
۹٫۸۹	۱۸٫۱۹	ماسه لای دار + ۱٫۵٪ نانورس

جدول ۲. مشخصات خاک مورد استفاده.

پارامتر	مقدار
طبقه بندی خاک	SM
چگالی ویژه ی دانه های جامد	۲٫۷
وزن مخصوص خشک	۱٫۸۷۱۰
بیشینه $(\frac{kN}{m^3})$	
رطوبت بهینه (%)	۱۱٫۵۵

دانه بندی، هیدرومتری و تراکم به ترتیب بر اساس استاندارد ASTM ۴۲۲، ASTM D ۶۹۸ و ASTM D ۴۲۲-۶۳.D انجام شد. بر اساس طبقه بندی متحد خاک مورد استفاده در گروه ماسه لای دار قرار گرفت. منحنی دانه بندی در شکل ۱، مشخصات تراکمی نمونه ها در جدول ۱ و مشخصات کلی خاک نیز در جدول ۲ آورده شده است.

## ۲.۲. مواد افزودنی مصرفی

### ۲.۲.۱. نانورس

در این پژوهش از نانورس مونت موریلونیت به عنوان یکی از مواد افزودنی به خاک، استفاده شده است. این نانورس توسط شرکت Sigma-Aldrich تولید و از شرکت

بنابراین یافتن روشی نوین و سازگار با محیط زیست حائز اهمیت است. یکی از این روش های نوین استفاده از مواد نانو است. این مواد به دلیل ویژگی های خاص و تحولاتی که در علوم مختلف ایجاد کرده اند در سال های اخیر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته اند. برای اولین بار در نیمه دهه ۱۹۹۱ از این تکنولوژی در مواد و مصالح ساخت و ساز استفاده شد و تاکنون تحقیقات در این زمینه در شاخه های مختلف علوم ادامه داشته است.<sup>[۹]</sup> با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر روی تأثیر نانوسیلیس بر خاک و اگر نتایج نشان می دهد که نانوسیلیس سبب کاهش چشمگیر فرسایش می شود و از طرفی زمان عمل آوری نیز تأثیر زیادی بر روی عملکرد این ماده دارد.<sup>[۱۰]</sup> بر اساس پژوهش های انجام شده بر روی تأثیر نانورس بر تثبیت خاک ماسه ای تحت فرسایش بادی مشاهده می شود که افزایش مقدار نانورس سبب افزایش مقاومت خاک در برابر این نوع از فرسایش می شود.<sup>[۱۱]</sup> تحقیقات صورت گرفته بر روی خاک های مستعدار نشان می دهند که افزودن نانورس به انواع این خاک ها سبب بهبود وضعیت آن ها می شود به طوری که افزودن درصد های پایین این ماده (۵/۱ و ۲٪) به خاک و اگر ای موجود در تصفیه خانه فاضلاب شهر میناب میزان واگرایی این خاک را تا حدودی کم می کند ولی با افزایش درصد نانورس از ۴٪ به بالا پتانسیل واگرایی خاک دوباره روند صعودی خود را طی می کند.<sup>[۱۲]</sup>

بررسی تأثیر نانورس و نانوسیلیس بر افزایش مقاومت خاک تمیز و خاک آلوده به مواد نفتی نیز نشان می دهد که برای خاک تمیز به ترتیب ۱ و ۱٫۵ درصد نانورس و نانوسیلیس تأثیر قابل ملاحظه ای بر بهبود فرسایش خاک دارند و نانورس نسبت به نانوسیلیس درصد وزنی بهینه تری برای هر دو خاک را دارا می باشد.<sup>[۱۳]</sup> همچنین آزمایشات ژئوتکنیکی بر روی خاک های رملی منطقه های شبکه سد بوستان گنبد اینچه برون استان گلستان نیز نشان می دهد که افزودن نانورس به این خاک ها سبب کاهش رملندگی می شود و بر روی خواص خمیری، تغییر شکل پذیری و مقاومت خاک تأثیر می گذارد.<sup>[۱۴]</sup> پژوهش های صورت گرفته بر روی تأثیر نانورس بر خاک رسی و اگر با خاصیت خمیری زیاد و کم توسط آزمایش پین هول نیز نشان می دهد که هرچه درصد نانورس اضافه شده به خاک افزایش یابد پتانسیل تورم پذیری خاک کاهش می یابد که این مقدار در خاک رسی با خاصیت خمیری زیاد بیشتر است.<sup>[۱۵]</sup> بررسی تأثیر نانورس بر هدایت هیدرولیکی هسته ساخته شده از ماسه رس دار متراکم سد خاکی نیز نشان داد که افزودن مقادیر ۱ تا ۳ درصد نانورس باعث کاهش قابل توجه هدایت هیدرولیکی و رسیدن آن به مقدار مطلوب برای هسته سدهای خاکی می شود.<sup>[۱۶]</sup> با توجه به نتایج مطلوب استفاده از نانورس در زمینه بهبود خاک، تأثیر این ماده بر روی فرسایش پذیری نیز مطلوب بوده و سبب کاهش آن شده است.<sup>[۱۷]</sup> با وجود این که نانورس بر خلاف سیمان با محیط زیست سازگارتر است ولی به لحاظ اقتصادی هزینه های زیادی را در بر دارد که امکان اجرا کردن آن در پروژه های بزرگ را کاهش می دهد. در پژوهش حاضر به بررسی درصد های پایین نانورس و سیمان در بازه های زمانی مختلف پرداخته شد و بر اساس شاخص نرخ فرسایش آن ها مقایسه ای بین این دو ماده ای افزودنی صورت گرفت و مقادیر بهینه که هم به لحاظ زیست محیطی و هم به لحاظ اقتصادی مناسب باشند انتخاب شد.

## ۲. مواد و روش ها

### ۲.۱. خاک مورد استفاده

برای تعیین دانه بندی، درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص بیشینه خاک و نمونه های مورد استفاده در این پژوهش با درصد های مختلف مواد افزودنی، آزمایش های

### ۱.۳. روش انجام آزمایش فرسایش حفره‌یی

در ابتدای آزمایش قالب همراه نمونه درون دستگاه فرسایش حفره‌یی قرار می‌گیرد. از آن جایی که گزادیان هیدرولیکی در آزمایش ثابت و برابر ۷/۲ و طول نمونه نیز برابر ۱۱/۱ است پس لازم است که مقدار ارتفاع آب بالادست روی ۹۲ سانتی متر و مقدار ارتفاع آب پایین دست روی ۱۲ سانتی متر تنظیم گردد سپس هواگیری انجام می‌گیرد و بعد از آن شیر تخلیه آب پایین دست به آرامی و به صورت کامل باز می‌شود. در این مرحله باید پرکردن محفظه‌های بالادست و پایین دست به دقت انجام شود زیرا اگر به صورت سریع پر شوند امکان شسته شدن و ریزش وجه پایین دست نمونه وجود دارد که این امر می‌تواند سبب مسدود شدن سوراخ گردد. این آزمایش با عبور جریان آب از درون حفره ایجاد شده شروع می‌شود و تا زمانی که قطر حفره افزایش زیادی پیدا کند و یا سرعت جریان بیش از حد زیاد شود ادامه می‌یابد. در طول آزمایش، در فاصله زمانی یک دقیقه، ارتفاع آب در پیرومترهای بالادست و پایین دست و همینطور حجم آب خروجی از دستگاه به منظور تعیین آبدهی قرائت و ثبت می‌گردد. شکل ۳ نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌یی را نشان می‌دهد.<sup>[۱۹]</sup>

### ۲.۳. تحلیل داده‌های آزمایش فرسایش حفره‌یی

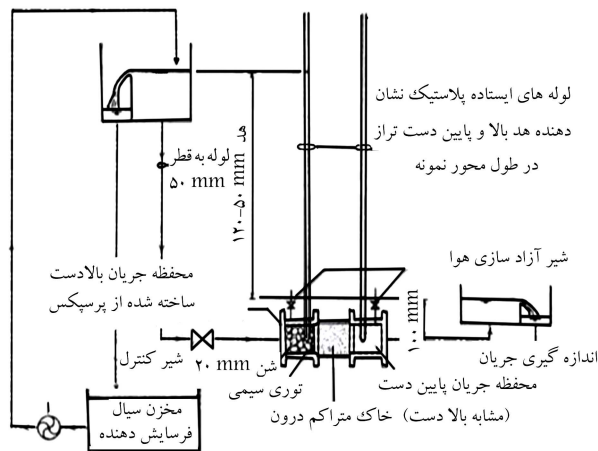
پس از انجام آزمایش فرسایش داخلی، نمودارهای قطر/زمان، نرخ فرسایش/زمان، تنش برشی هیدرولیکی/زمان و در نهایت نرخ فرسایش/تنش برشی هیدرولیکی با استفاده از روابط ۱ و ۲ که توسط ون و فل (۲۰۰۲)<sup>[۱۸]</sup> ارائه شده است رسم می‌گردد. با توجه به روابط ۱ و ۲، تعیین قطر در هر لحظه لازم است. بدین منظور بسته به آرام یا متلاطم بودن جریان از روابط ۳ و ۴ که توسط ون و فل (۲۰۰۲)<sup>[۱۸]</sup> پیشنهاد شده است، استفاده می‌شود.

$$\varepsilon_t = \frac{\rho_d}{\gamma} \frac{d\phi_t}{dt} \quad (1)$$

$$\tau_t = \rho_w g S_t \frac{\phi_t}{\gamma} \quad (2)$$

$$\phi_t = \left[ \frac{16 Q_t f L t}{\Pi \rho_w g S_t} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\phi_t = \left[ \frac{64 Q_t^2 f T t}{\Pi^2 \rho_w g S_t} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$



شکل ۳. نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌یی.<sup>[۱۹]</sup>

پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شده است. مشخصات فیزیکی این محصول در جدول ۳ و مشخصات شیمیایی آن نیز در جدول ۴ آورده شده است.

### ۲.۲.۲. سیمان

دومین ماده افزودنی استفاده شده در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ ۲ می‌باشد که توسط شرکت سیمان فارس و خوزستان تولید شده است. مشخصات فیزیکی این محصول در جدول ۵ و مشخصات شیمیایی آن نیز در جدول ۶ آورده شده است. به منظور بررسی فرسایش داخلی در این پژوهش، از آزمایش فرسایش حفره‌یی (HET) که نخستین بار توسط ون و فل (۲۰۰۲)<sup>[۱۸]</sup> ارائه شده، استفاده شده است. در این آزمایش با ایجاد یک حفره درون نمونه و عبور آب از درون آن، تغییرات قطر، سرعت فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی محاسبه می‌شود و پس از آن پارامترهای فرسایش توسط شاخص نرخ فرسایش<sup>۴</sup> بیان می‌شود. براساس این شاخص خاک‌ها از لحاظ فرسایش‌پذیری مطابق جدول ۷ به شش گروه، تقسیم می‌شوند.<sup>[۱۸]</sup>

### ۳. آماده‌سازی نمونه

با مشخص بودن حجم قالب دستگاه فرسایش حفره‌یی و وزن مخصوص بیشینه خاک مورد نظر، وزن خاک لازم تعیین شد. پس از تعیین وزن خاک، برای اختلاط بهتر مواد افزودنی با خاک مقادیر مختلف نانورس و سیمان به طور جداگانه در مقدار رطوبت بهینه خاک حل شده، سپس به خاک اضافه شده و به خوبی با آن مخلوط گردید. برای ایجاد پیوند بهتر میان مواد افزودنی و خاک، در ابتدا نمونه‌ها درون محفظه‌های پلاستیکی به مدت یک روز نگهداری شده و سپس هر نمونه در سه لایه، در قالب دستگاه فرسایش حفره‌یی ریخته شده و به منظور اعمال انرژی تراکم استاندارد هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم گردیده است. از طرفی برای حفظ رطوبت نمونه‌ها، آن‌ها دوباره در زمان عمل‌آوری مدنظر (۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) نیز در محفظه‌های عایق و پلاستیکی قرار داده شدند. سپس با استفاده از یک مته سوراخی به قطر ۶ میلی‌متر در امتداد محور طولی نمونه مطابق با شکل ۲ ایجاد گردید.

جدول ۳. مشخصات فیزیکی نانورس مونت موریلونیت.

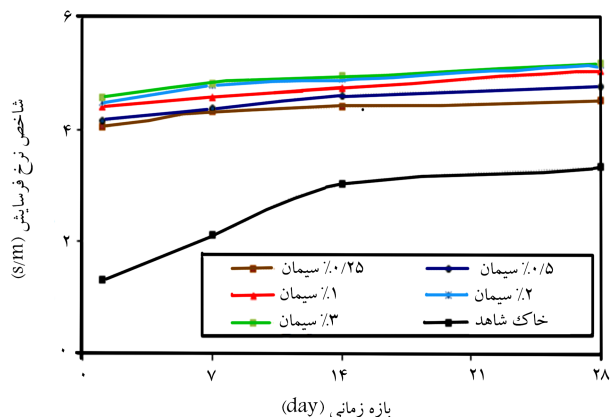
مقدار	پارامتر
۳۰۰-۳۷۰	جرم مخصوص ( $\frac{kg}{m^3}$ )
۱-۲	اندازه ذرات (nm)
زرد کم‌رنگ	رنگ
۱-۲	رطوبت (%)



شکل ۲. نمونه خاک قرار گرفته در قالب دستگاه فرسایش حفره‌یی.

جدول ۴. مشخصات شیمیایی نانورس مونت موریلونیت.

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

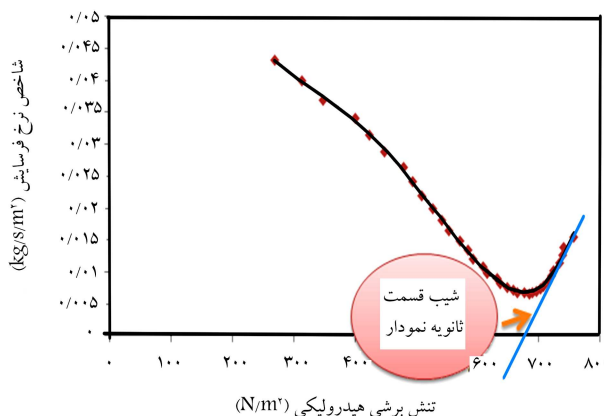


شکل ۵. شاخص نرخ فرسایش سیمان و خاک شاهد در بازه زمانی ۱ الی ۲۸ روزه.

واقعی نمونه نیست ولی قسمت ثانویه نمودار مقدار فرسایش حفره را نشان می‌دهد. با برزش بهترین خط از قسمت ثانویه نمودار نرخ فرسایش به تنش برشی هیدرولیکی و تعیین شیب آن، ضریب نرخ فرسایش ( $c_e$ ) به دست می‌آید. از آن جایی که  $c_e$  به دست آمده از آزمایش‌ها عددی کوچک و در بازه  $10^1$  تا  $10^6$  می‌باشد، در تحلیل‌ها از  $\log c_e$  استفاده می‌شود که آن را شاخص نرخ فرسایش نامیده و با  $I$  نشان می‌دهند. سپس گروه فرسایش‌پذیری خاک بر اساس جدول ۷ تعیین می‌گردد.

جدول ۵. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند تیپ ۲.

مقدار	پارامتر
۳٫۱۸۴	جرم مخصوص ( $\frac{g}{cm^3}$ )
۰٫۵	درصد ذرات باقی‌مانده روی الک ۹۰ میکرون (الک شماره ۱۷۰)
خاکستری	رنگ
۲۵٫۳۸	درصد آب غلظت طبیعی (%)



شکل ۴. نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ فرسایش.

که در این روابط:

$$\rho_w: \text{جرم مخصوص مایع فرسایش دهنده } (\frac{kg}{m^3});$$

$$\rho_d: \text{جرم مخصوص خشک خاک } (\frac{kg}{m^3});$$

$$\phi: \text{قطر سوراخ ایجاد شده با فرض وجود مقطع دایره‌یی در زمان } t(m);$$

$$g: \text{شتاب جاذبه زمین } (\frac{m}{s^2});$$

$$\tau: \text{تنش برشی هیدرولیکی روی سطح حفره‌یی ایجاد شده در زمان } t(\frac{N}{m^2});$$

$$\varepsilon: \text{نرخ توده فرسایش یافته } (\frac{kg}{m^2});$$

$$St: \text{گرادیان هیدرولیکی عبوری از نمونه خاک در زمان } t;$$

$$f_{LT}: \text{فاکتور اصطکاک در شرایط جریان آرام } (\frac{kg}{m^2});$$

$$f_{TT}: \text{فاکتور اصطکاک در شرایط جریان متلاطم } (\frac{kg}{m^2});$$

$$Q: \text{دبی در زمان } t(\frac{m^3}{s}).$$

قطر ابتدایی حفره درون نمونه ۶ میلی‌متر است. در انتهای آزمایش نیز قطر نهایی با استفاده از کولیس اندازه‌گیری می‌شود. با مشخص کردن نوع جریان، مقادیر ضرایب اصطکاک در هر لحظه محاسبه می‌گردد. بر اساس تحقیقات صورت گرفته<sup>[۱۸]</sup> تغییرات ضرایب اصطکاک نسبت به زمان خطی است، بنابراین با داشتن ضرایب اصطکاک در هر زمان، مقدار قطر حفره در هر زمان نیز قابل محاسبه است. با بهره‌گیری از تغییرات قطر در هر زمان و روابط ۱ و ۲ مقدار نرخ فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی در هر لحظه محاسبه شده و نمودار آن ترسیم می‌گردد. نمودار نرخ فرسایش/تنش برشی هیدرولیکی نمونه‌یی از خاک‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. بر اساس نظرون و فل<sup>[۱۸]</sup> قسمت اولیه نمودار نشان‌دهنده شسته شدن و دفع خاک‌های دست خورده درون حفره ناشی از حفاری مته می‌باشد و بیانگر فرسایش

## ۴. بحث و نتایج

### ۴.۱. فرسایش‌پذیری خاک شاهد

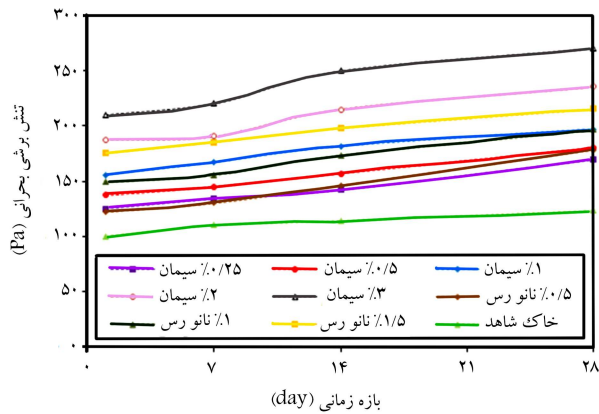
از آن جایی که گرادیان هیدرولیکی ثابت  $7/2$  بیشترین مقدار گرادیان قابل اجرا در پژوهش حاضر بود، آزمایش فرسایش حفره‌یی بر روی خاک شاهد در این گرادیان انجام گردید. بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل ۵ خاک شاهد در بازه زمانی ۱ روزه دارای نرخ فرسایش‌پذیری کمتر از ۲ است که با توجه به جدول ۷ بیانگر فرسایش‌پذیری به شدت سریع است که همین امر سبب گسیختگی نمونه در دقایق اولیه می‌شود.

### ۴.۲. تأثیر مقادیر مختلف سیمان بر فرسایش

نتایج آزمایش فرسایش حفره‌یی بر روی مقادیر مختلف سیمان در بازه زمانی ۱ روزه نیز در شکل ۵ نشان داده شده است که بر طبق آن ۰٫۲۵ درصد سیمان سبب افزایش بیش از سه برابر نرخ فرسایش‌پذیری نمونه خاک نسبت به خاک شاهد می‌شود و همین امر سبب تغییر گروه خاک از گروه به شدت سریع به نسبتاً آهسته می‌شود. با افزایش درصد سیمان روند افزایش شاخص‌های نرخ فرسایش‌پذیری ادامه می‌یابد به گونه‌یی که در ۰٫۵ درصد سیمان مقدار شاخص فرسایش‌پذیری نسبت به حالت ۰٫۲۵ درصد سیمان افزایش ۲٫۹ درصدی داشته است. نکته قابل توجه آن است که افزایش درصد سیمان سبب تغییر گروه خاک نمی‌شود و فرسایش‌پذیری در گروه نسبتاً آهسته باقی می‌ماند.

جدول ۶. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲.

ترکیب شیمیایی مقدار (%)	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	FCaO	LOI
	۲۱٫۳۶	۴٫۹۹	۵٫۲۹	۶۰٫۸۵	۲٫۸۰	۰٫۳۶	۰٫۹۱	۱٫۹۴	۰٫۸	۰٫۸۸

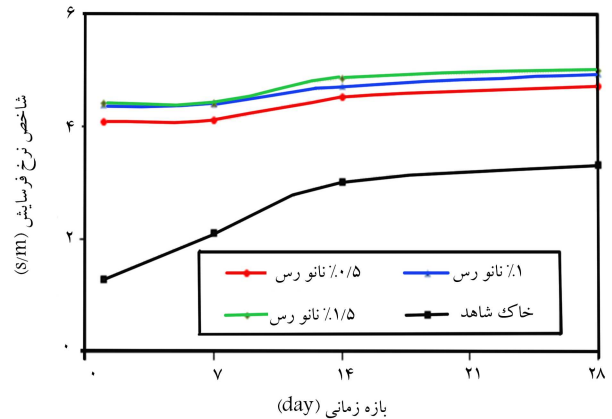


شکل ۷. نمودار درصد مواد افزودنی در برابر تشنش برشی بحرانی در بازه زمانی ۱ الی ۲۸ روزه.

درصد نانورس در بازه زمانی ۲۸ روزه شده است. نتایج نشان داد که هرچه زمان بگذرد مقادیر شاخص فرسایش نیز افزایش می‌یابد ولی لزوماً این افزایش تغییر گروه خاک را به دنبال ندارد به طور مثال در زمان‌های ۷ و ۱۴ روزه این مواد افزودنی سبب ایجاد تغییر گروه خاک نشدند در صورتی که با گذشت ۲۸ روز، ۱ درصد سیمان و ۱٫۵ درصد نانورس به ترتیب به اعداد ۵٫۴ و ۵ رسیده و سبب تغییر گروه خاک از گروه نسبتاً آهسته به خیلی آهسته شده‌اند که این امر حاکی از آن است که علاوه بر تأثیری که افزایش درصد مواد افزودنی به خاک بر فرسایش پذیری دارد زمان نیز تأثیر قابل توجهی بر روی آن می‌گذارد.

جدول ۷. گروه بندی خاک بر اساس شاخص نرخ فرسایش [۱۸].

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 آهسته
۵	۵-۶	خیلی آهسته
۶	> ۶	به شدت آهسته



شکل ۸. شاخص نرخ فرسایش نانورس و خاک شاهد در بازه زمانی ۱ الی ۲۸ روزه.

#### ۵.۴. تأثیر مواد افزودنی و گذر زمان بر تشنش برشی بحرانی

بررسی تشنش برشی بحرانی به دست آمده برای درصد‌های مختلفی از مواد افزودنی به خاک نشان می‌دهد که هر چه مقدار مواد افزودنی به خاک بیشتر شود تشنش برشی بحرانی خاک نیز افزایش یافته و آستانه‌ی حرکت آن بالاتر می‌رود. از طرفی گذر زمان نیز تأثیر قابل توجهی بر تشنش برشی بحرانی داشته و سبب افزایش مقدار آن می‌شود. شکل ۷ نمونه‌های سیمان و نانورس در بازه زمانی ۱ الی ۲۸ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشهود است تشنش برشی بحرانی با زمان و درصد مواد افزودنی رابطه مستقیم داشته و از آن جایی که افزایش این دو پارامتر سبب بهبود فرسایش پذیری خاک می‌شوند پس می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تشنش برشی بحرانی نیز سبب بهبود فرسایش پذیری می‌شود.

#### ۶.۴. نتایج SPSS

پس از وارد کردن داده‌ها در نرم‌افزار spss تأثیر زمان و درصد مختلف مواد افزودنی بر خاک ماسه لای‌دار بررسی شد. نتایج تجزیه واریانس مطابق جدول ۸ نشان داد که درصد مختلف مواد افزودنی و زمان نگهداشت آن‌ها در خاک ماسه لای‌دار در سطح ۱ درصد معنی‌دار هستند در حالی که اثر متقابل این دو عامل در خاک معنی‌دار نگردیده که این امر حاکی از آن است که دو فاکتور زمان و درصد مواد اثر مستقل از یکدیگر بر روی شاخص‌های نرخ فرسایش دارند. با توجه به آن که ۱

#### ۳.۴. تأثیر مقادیر مختلف نانورس بر فرسایش

با توجه به شکل ۶ و در بازه زمانی ۱ روزه نمونه‌های همراه با مقادیر مختلف نانورس سبب کاهش فرسایش پذیری خاک می‌شوند به گونه‌ی که ۰٫۷ درصد نانورس در خاک سبب افزایش بیش از سه برابر شاخص نرخ فرسایش نسبت به خاک شاهد و سبب تغییر گروه خاک از گروه به شدت سریع به گروه نسبتاً آهسته می‌شود. با وجود آن که همچنان افزایش درصد نانورس تا ۱٫۵ درصد سبب افزایش نرخ فرسایش می‌شود ولی این افزایش تغییر گروه خاک را به دنبال نداشته و خاک در همان گروه نسبتاً آهسته باقی می‌ماند.

#### ۴.۴. تأثیر زمان نگهداشت بر فرسایش

شکل‌های ۵ و ۶ نمونه‌های خاک شاهد و نمونه‌های همراه با مواد افزودنی (سیمان و نانورس) که با آزمایش فرسایش حفره‌ی مورد بررسی قرار گرفتند را در بازه‌های زمانی ۱، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد. نتایج نمونه‌های خاک شاهد حاکی از تأثیر مثبت زمان بر شاخص نرخ فرسایش آن‌ها می‌باشد به طوری که در بازه زمانی ۷ روزه با افزایش شاخص نرخ فرسایش نمونه خاک از گروه به شدت سریع به گروه خیلی سریع و در بازه زمانی ۱۴ روزه نیز از به شدت سریع به نسبتاً سریع تغییر گروه داده است. زمان بر روی نمونه‌های سیمان و نانورس نیز تأثیر مثبت قابل توجهی گذاشته و به ترتیب سبب افزایش ۱۱٫۷ و ۱۵٫۴ درصدی ۰٫۲۵ درصد سیمان و

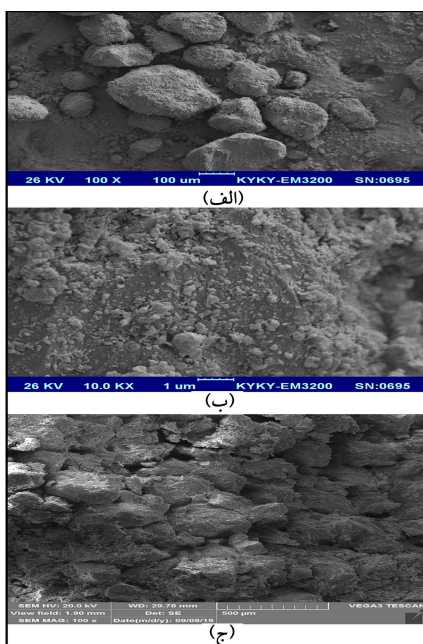
جدول ۸. نتایج تجزیه واریانس تأثیر زمان و درصد مواد افزودنی مختلف بر خاک ماسه لای‌دار.

ماسه‌ی لای‌دار			ماسه لای‌دار با نانورس			ماسه لای‌دار همراه با سیمان		
میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات	میانگین مربعات	درجه آزادی	منابع تغییرات
۲,۵۱۷	۳	زمان	۰,۳۲۴**	۲	درصد مواد	۰,۶۵۳**	۴	درصد مواد
			۰,۷۲۶**	۳	زمان	۰,۹۲۶**	۳	زمان
۰,۰۱۸	۴	خطا	۰,۰۰۳ <sup>ns</sup>	۶	درصد مواد*زمان	۰,۰۱۳ <sup>ns</sup>	۱۲	درصد مواد*زمان
			۰,۰۰۳	۲۴	خطا	۰,۰۱۱	۴۰	خطا
						عدم اختلاف معنی‌دار <sup>ns</sup>		
						** معنی‌دار سطح ۱ درصد		

جدول ۹. نتایج مقایسه‌ی میانگین تأثیر زمان و درصد مواد افزودنی مختلف بر خاک ماسه لای‌دار.

ماسه‌ی لای‌دار		ماسه لای‌دار با نانورس			ماسه لای‌دار همراه با سیمان			
میانگین	زمان	میانگین	زمان	درصد مواد افزودنی	میانگین	زمان	درصد مواد افزودنی	
۱,۳ <sup>a</sup>	۱	۴,۲۹۴ <sup>a</sup>	۱	۴,۳۶۱۵ <sup>a</sup>	۰,۵	۴,۳۴۲ <sup>a</sup>	۱	۴,۳۱۵۵ <sup>a</sup>
۲,۱ <sup>b</sup>	۷	۴,۳۱۵۷ <sup>a</sup>	۷	۴,۶۰۳۷ <sup>b</sup>	۱	۴,۵۷۰۹ <sup>b</sup>	۷	۴,۴۹۶ <sup>b</sup>
۳,۰۱۲ <sup>c</sup>	۱۴	۴,۶۹۲۷ <sup>b</sup>	۱۴	۴,۶۷۳۴ <sup>c</sup>	۱,۵	۴,۷۲۸۴ <sup>c</sup>	۱۴	۴,۷۰۵۸ <sup>c</sup>
۳,۳۲ <sup>d</sup>	۲۸	۴,۸۸۶۷ <sup>c</sup>	۲۸			۴,۹۲۹۵ <sup>d</sup>	۲۸	۴,۸۳۱۲ <sup>d</sup>
								۴,۸۶۴۹ <sup>ed</sup>

میانگین‌هایی که دارای یک حرف لاتین مشترک هستند. فاقد تفاوت معنی‌دار به روش دانکن هستند.



الف) نمونه خاک شاهد بزرگنمایی ۱۰۰ برابر؛

ب) نمونه حاوی ۱ درصد نانورس با بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر؛

ج) نمونه حاوی ۱ درصد سیمان با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر.

شکل ۸. تصاویر SEM با بزرگنمایی متفاوت.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر سیمان و نانورس بر کاهش فرسایش‌پذیری با استفاده از آزمایش فرسایش حفره‌ی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شامل بررسی شاخص نرخ فرسایش در خاک شاهد (فاقد مواد افزودنی) و خاک همراه با سیمان و نانورس در درصدی‌های

درصد سیمان و ۱/۵ درصد نانورس در مدت زمان ۲۸ روزه به عنوان مقادیر بهینه در این پژوهش انتخاب شدند نتایج حاصل از مقایسه میانگین در هر دو خاک در این درصد‌ها نیز در جدول ۹ نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار آن‌ها در زمان نگهداشت ۲۸ روزه نسبت به سایر مقادیر است. از طرفی بررسی خاک شاهد در بازه‌های زمانی مختلف نیز نشان داد که تأثیر زمان در خاک شاهد در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.

## ۷.۴. نتایج عکس میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شکل ۸ عکس‌های SEM خاک شاهد و خاک حاوی یک درصد سیمان و یک درصد نانورس را در بازه زمانی ۲۸ روزه نشان می‌دهد. مقایسه خاک شاهد و خاک حاوی یک درصد سیمان با بزرگنمایی یکسان بیانگر آن است که در نمونه حاوی سیمان به دلیل وجود مصالح آهکی در ساختار آن و انجام عمل آبیوشی با گذشت ۲۸ روز بین ذرات خاک و مخلوط آب و سیمان ساختار لخته‌ی ایجاد شده و فضای خالی اطراف ذرات خاک پر شده‌اند که همین امر سبب چسبندگی بسیار زیاد ذرات خاک به یکدیگر شده است.

از این رو می‌توان بیان نمود که سیمان نسبت به خاک شاهد قابلیت بالاتری در کاهش روند فرسایش دارد. در خاک حاوی نانورس نیز به دلیل شکل صفحه‌های رسی و نحوه قرارگیری بارهای الکتریکی بر روی آن‌ها نیروی جاذبه الکتریکی سبب جذب نیروهای مخالف یکدیگر و باعث تولید ساختار لخته‌ی در آن‌ها شده است. همین امر سبب پر شدن فضای خالی بین ذرات خاک و متراکم شدن آن‌ها می‌شود و در نهایت چسبندگی ذرات خاک را به دنبال دارد. با وجود آن‌ها که بزرگنمایی عکس SEM خاک حاوی نانورس با خاک شاهد و خاک حاوی سیمان متفاوت است ولی نتایج نشان می‌دهد که عملکرد خاک همراه با مواد افزودنی بهتر از خاک شاهد است. از طرفی بررسی دقیق‌تر ساختار خاک حاوی نانورس نیز نشان می‌دهد که بین سیمان و نانورس، سیمان خاصیت چسبندگی بالاتری دارد و در کاهش فرسایش‌پذیری خاک مؤثرتر است.

کاهش فرسایش پذیری وجود دارد اما در هیچکدام از حالات موجود نانورس عملکرد بهتری نسبت به سیمان ندارد. در این پژوهش به دلیل محدودیت های موجود امکان ترکیب سیمان با نانورس و افزودن آن ها به خاک نیست ولی انتظار می رود که اگر این دو ماده به منظور کاهش فرسایش پذیری خاک ترکیب شوند نتایج مطلوبی به دست آید ولی توجه به این نکته نیز الزامی است که از آن جایی که نانورس در درصد های بالاتر بهتر عمل می کند نسبت ترکیب این دو ماده باید متفاوت و درصد نانورس بیشتر باشد.

۴. با توجه به تنش های برشی بحرانی به دست آمده برای مقادیر مختلف مواد افزودنی و در بازه های زمانی مختلف، گذر زمان و افزایش مواد افزودنی سیمان و نانورس سبب افزایش تنش برشی بحرانی و کاهش فرسایش پذیری خاک می شود.
۵. بررسی معنی داری نشان داد که زمان و درصد مواد مستقل از یکدیگرند و به طور همزمان تأثیر معناداری روی شاخص نرخ فرسایش ندارند.
۶. بر اساس عکس های SEM گرفته شده ذرات سیمان و نانورس با لخته شدن، خلل و فرج بین ذرات خاک را پر کرده و سبب یکنواختی، تراکم و کاهش فرسایش پذیری خاک می شوند که این امر در سیمان شدیدتر است.

مختلف، تأثیر این مواد افزودنی در کاهش فرسایش پذیری، تأثیر زمان نگهداشت در شاخص نرخ فرسایش و همینطور بررسی سطح معنی داری درصد مواد و زمان نگهداشت بر خاک است. نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد:

۱. با توجه به نتایج آزمایشات انجام شده ۱/۵٪ نانورس و ۳٪ سیمان سبب افزایش شاخص نرخ فرسایش و تغییر گروه خاک از گروه به شدت سریع به نسبتاً آهسته شده اند.
۲. زمان نگهداشت در کاهش فرسایش پذیری تأثیر به سزایی دارد به طوری که در روز ۲۸م، ۱/۵٪ نانورس و ۱٪ سیمان سبب تغییر گروه خاک از گروه به شدت سریع به خیلی آهسته و کاهش فرسایش پذیری خاک شده اند از این رو می توان این مقادیر را در زمان ۲۸ روز به عنوان مقادیر بهینه در این پژوهش در نظر گرفت.
۳. با توجه به نتایج به دست آمده و بدون در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی کاهش فرسایش پذیری با افزودن سیمان به خاک بیشتر از نانورس است ولی در حالت بهینه آن ها که عدد نرخ فرسایش به ترتیب ۴۱°۵ و ۵ می باشد، اختلاف بین این دو عدد چیزی در حدود ۸۲°۰ درصد می باشد که مقداری ناچیز و کمتر از یک است و می توان گفت که در حالت بهینه نتیجه تقریباً یکسانی برای

## پانویس ها

1. piping
2. internal erosion
3. hole erosion test
4. erosoin rate index
5. statistical package for the social science
6. scanning electron microscopy

## منابع (References)

1. Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D. and et al. "Geotechnical Engineering Of Dams", Published By: A A. Balkema Publishers Leiden, The Netherland, A Member Of Taylor & Francis Group PLC. 912 (2005).
2. Foster, M.A., Fell, R. and Spannagle, M. "A method for estimating the relative likelihood of failure of embankment dams by internal erosion and piping", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), pp. 1025-1061 (2003).
3. Farrar, J.A., Torres, R.L. and Erdogan, Z. "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 (2007).
4. Yarmahmoudi, A. "Stabilization of cohesive red clay soil using portland cement and iron or mine tailing", M.Sc. Dissertation, University Of Sirjan, (in persian) (2018).
5. Shooshpasha, A., Abbasi, M. And Najafnia, H. "Investigation of the combined effect of cement and nanosilica on shear strength of Babolsar sandy soils", *Amir Kabir Civil Engineering Journal*, **50**(1), pp. 179-188 (in persian) (2019).
6. Taherkhani, H. "Investigation and comparison of compressive strength of clay soils stabilized with cement, lime and nano-polymer CBR Plus", *Modarres Civil Engineering Journal*, **16**(4), pp. 161-173 (in persian) (2016).
7. Cheshmi, A., Eshaghi, A. and Hassanpour, J. "Influence of lime and cement on the swelling properties of sulfated clay", *Journal of Advanced Applied Geology*, **6**(4), pp. 43-50 (in persian) (2017).
8. Zomorodian, S.M.A. and Koohepeima, H.R. "Investigating the effect of new chemical stabilizers on internal erosion in earth dams ", *Sharif Civil Engineering Journal*, **30-2**(4/2), pp. 73-78 (in persian) (2015).
9. Taha, M.R. "Geotechnical properties of soil-ball milled soil mixtures", proceedings of the 3rd international symposium on nano technology in construction, Prague, Czech Republic, pp. 377-382 (2009).
10. 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 (in persian) (2018).
11. Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K. and et al. "The Impacts of Nanoclay on Sandy Soil Stability and Atmospheric Dust Control", *Agriculturae Conspectus Scientificus*, **81**(4), pp. 193-196 (in persian) (2017).
12. Asakere, A. and Avaze, A. "The effect of nanoclay on divergent soils behavior (case study of minab city)", *Amir Kabir Civil Engineering Journal*, **49** (3), pp. 503-512 (in persian) (2017).

13. Zomorodian, S.M.A., Moghispour, Sh., Soleymani, A. 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).
14. Tabarsa, A.R. "The effect of adding nanoclay on geotechnical behavior of soft granular soils", *Engineering Geology Journal*, **11**(2), pp. 225-246 (in persian) (2017).
15. Abbasi, N., Farjad, A., and Sepehri, S. "The use of nanoclay particles for stabilization of dispersive clay soils", *Geotechnical and Geological Engineering*, **36**(1), pp. 327-335 (in persian) (2018).
16. 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), pp. 04018250(1-11) (in persian) (2018).
17. Zomorodian, S.M.A. and Moghispour, sh. "The effect of nanoclay on internal erosion in earth dams", *Iran Water and Soil Research*, **48**(1), pp. 187-194 (in persian) (2017).
18. Wan, C.F. and Fell, R. "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 (2002).
19. Wan, C.F. and Fell, R. "Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **130**(4), pp. 373-380 (2004).