مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره نوزدهم، شماره ۲، سال ۱۳۹۸

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانورس بر فرسایش داخلی خاک‌های واگرا در سدهای خاکی

سید محمدعلی زمردیان[۱*]، حمیده غفاری[۲]، محمد ایزدی[۲]

۱- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز
۲- کارشناس ارشد سازه‌های آبی، بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

*mzomorod@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: [۹۷/۰۳/۱۶] تاریخ پذیرش: [۹۷/۱۲/۲۲]

## چکیده

پدیده فرسایش داخلی در سدهای خاکی از عوامل تهدیدکننده پایداری آن‌ها است، و وجود خاک‌های واگرا در هسته خاکریز سد از عوامل تشدیدکننده این پدیده است. در این پژوهش از نانورس به عنوان ماده افزودنی مدرن و سازگار با محیط زیست برای کنترل فرسایش داخلی در خاک‌های واگرا استفاده شده است و به منظور بررسی میزان اثرگذاری نانورس بر فرسایش داخلی از آزمون فرسایش حفره‌ای استفاده شده است. در همین راستا میزان اثرگذاری مقادیر ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۳ درصد نانورس و زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۲، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز و در سه گرادیان هیدرولیکی ۷/۰۵، ۷/۹۶ و ۱۱/۰۵ بررسی شده است. سپس اثر این ماده افزودنی بر خواص خمیری خاک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانورس به خاک باعث افزایش شاخص نرخ فرسایش و کاهش فرسایش‌پذیری خاک می‌شود به گونه‌ای که فرسایش‌پذیری خاک از گروه نسبتاً سریع در خاک شاهد به گروه نسبتاً آرام تغییر پیدا می‌کند. در زمان عمل‌آوری ۱ روز مقدار بهینه نانورس در کاهش فرسایش ۱ درصد بدست آمد که این در دو زمان عمل‌آوری ۲ و ۷ روز ۱/۵ درصد مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که در گرادیان‌های هیدرولیکی بزرگتر تأثیر نانورس در کاهش فرسایش بیشتر است به گونه‌ای که در گرادیان هیدرولیکی ۱۱/۰۵ شاخص نرخ فرسایش به میزان ٦ درصد نسبت به گرادیان ۷/۰۵، افزایش نشان داده است. با افزایش زمان عمل‌آوری، شاخص نرخ فرسایش افزایش پیدا کرده است که در مدت زمان ۲۸ روز میزان افزایش شاخص نرخ فرسایش به ترتیب در گرادیان‌های هیدرولیکی ۱۱/۰۵، ۷/۹٦ و ۷/۰٦ برابر ۲۳/۸ درصد، ۲۳/٤ درصد و ۲۰/۳ درصد، نسبت به خاک شاهد است. همچنین افزودنی نانورس باعث تغییر در خواص خمیری خاک شد به گونه‌ای که مقدار ۱ درصد نانورس باعث افزایش خواص خمیری و ۲ درصد نانورس باعث کاهش خواص خمیری خاک نسبت به نمونه شاهد شده است.

**واژگان کلیدی:** آزمون فرسایش حفره‌ای، فرسایش داخلی، خاک واگرا، گرادیان هیدرولیکی

## ۱- مقدمه

خاک‌ها بیشتر برای پروژه‌های کاربردی مناسب نیستند. پدیده فرسایش در سازه‌های خاکی از جمله بدنه سدهای خاکی، دایک‌ها، دیواره کانال‌های آبرسانی، خاکریزها که تمرکز فشار آب در خاک وجود دارد مشکلاتی بوجود می‌آورد که غیر قابل جبران است. در این میان فرسایش ناشی از پایپینگ از



www.SID.ir

Archive of SID


جدی‌ترین مسائل هیدرولیک است که منجر به شکست سدها و دایک‌ها و ایجاد سیل در پایین‌دست می‌شود. طبق آمار خرابی‌های حاصل از نشت و پایپینگ در شالوده و بدنه، ۳۰ درصد خرابی‌های سدهای خاکی را موجب شده است [1]. فرسایش ناشی از پایپینگ در سدها به صورت یکی از ۳ فرآیند فرسایش رو به عقب (backwater erosion) نشت متمرکز و یا زیرریزی (Suffusion) شروع می‌شود. فرسایش رو به عقب شامل فرآیندی است که در آن فرسایش از نقطه خروجی نشت شروع می‌شود و در اثر پیشرفت فرسایش یک لوله جریان در بدنه سد ایجاد می‌شود. نشت متمرکز شامل ایجاد نشت متمرکز مستقیم از منبع آب به سمت نقطه خروجی است. زیرریزی شامل شستشوی ذرات ریز خاک‌های ناپایدار می‌باشد. پدیده فرسایش یک فرآیند پیش‌رونده است و امکان وقوع آن در بدنه، پی و از بدنه به پی وجود دارد و شروع فرسایش از نقطه‌ای است که زه در آنجا متمرکز شده است و گرادیان هیدرولیکی برای شستن خاک فراهم است یعنی در آن نقطه نیروی مقاوم خاک در برابر فرسایش کمتر از تأثیر نیروی مخرب زه می‌باشد بنابراین ذرات از هم جدا شده و همراه زه آب جابه‌جا می‌شوند و مجرایی بوجود می‌آید که به تدریج در امتداد جریان و در جهت گرادیان هیدرولیکی بزرگ‌تر گسترش می‌یابد و این مجرا سرانجام به مخزن می‌رسد. هنگامی که این مجرا به نزدیکی‌های مخزن برسد جریان شدید آب با سرعت زیاد ایجاد شده و در زمان کوتاهی این مجرا بزرگ‌تر شده و به تخریب سد منجر می‌شود [2]. مشکلات ناشی از فرسایش بازتاب‌های اقتصادی حائز اهمیتی را در پی دارد و اقدامات علاج بخشی معمولاً پر هزینه است. در بسیاری از موارد این اقدامات نتیجه‌ای جز شکست و یا بالا بردن هزینه‌ها در پی نداشته است و خسارات جانی و مالی عمده‌ای را به دنبال داشته است. بنابراین ارائه راهکارهای مقابله و کاهش پدیده فرسایش و اصلاح خاک‌ها امری ضروری است که باید مورد توجه مهندسین قرار گیرد. یکی از موضوعاتی که همواره در انتخاب منابع قرضه ریزدانه باید مورد بررسی و توجه قرار بگیرد عدم وجود انواع مختلف نمک‌های محلول و غیر محلول و در نهایت خاک‌های مسئله‌دار است. یکی از این‌گونه خاک‌ها، خاک‌های واگرا است. عامل واگرایی وجود کانی‌های رسی سدیم دار است که در حضور آب پراکنده شده و به راحتی شسته می‌شوند حتی اگر سرعت جریان آب کم باشد. واگرایی خاک‌ها از دلایل اصلی بسیاری از خرابی‌های سدهای خاکی کوچک، بندها و خاکریزهای طراحی شده در سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۳۸ در سازمان حفاظت خاک آمریکا گزارش شده است. طی سال‌های اخیر تکنیک‌های متعددی برای اصلاح و بهبود کیفیت خاک‌ها ارائه شده است. از جمله اضافه نمودن افزودنی‌هایی از قبیل سیمان، آهک، خاکستر بادی و دیگر مواد شیمیایی می‌باشد که هر یک به نوعی باعث ایجاد یک سری محدودیت‌ها و اشکالات در زمینه‌های اجرایی، اقتصادی و زیست‌محیطی می‌شوند بنابراین ضروری است که روش‌ها و تکنیک‌های نوین و سازگار با محیط‌زیست مورد بررسی واقع شود. در دهه گذشته استفاده از مواد نانو رشد چشمگیری در مهندسی ژئوتکنیک پیدا کرده است. سالانه حدود ۵/۵ میلیارد دلار در سراسر دنیا صرف سرمایه‌گذاری روی پژوهش‌های فناوری نانو می‌شود که نشانگر اهمیت این موضوع است [3]. بنابراین در این پژوهش از نانو رس به منظور بهبود خواص ژئوتکنیک خاک واگرا در مقابله با پدیده فرسایش داخلی بهره گرفته شده است. برای بررسی میزان اثرگذاری نانورس بر فرسایش داخلی خاک واگرا از تست فرسایش حفره‌ای استفاده شده است. این آزمایش علاوه بر ساده و کم هزینه بودن، نتایج قابل اطمینانی را ارائه می‌دهد [4]. تاکنون مطالعات زیادی روی تأثیر مواد نانو بر بهبود خواص خاک‌ها صورت گرفته است. از جمله، زمردیان و همکاران [5] با بررسی تأثیر نانورس بر مقاومت فشاری خاک آلوده به نفت سفید به این نتیجه رسیدند که مقاومت فشاری در حضور نانورس افزایش می‌یابد و میزان ۲ درصد نانورس و زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه را بهینه اعلام نمودند. بهاری و همکاران [6] در مطالعه تأثیر مقادیر مختلف نانورس بر دو نوع رس سیلتی با خاصیت خمیری کم و زیاد به این نتیجه رسیدند که نانورس باعث تغییرات قابل‌توجهی در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر دو نوع خاک می‌شود. مؤمن و زمردیان [7] به بررسی تأثیر نانو سیلیس بر فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن ذرات نانوسیلیس به خاک، فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا از گروه به شدت سریع به گروه تقریباً آهسته می‌رسد. بنابراین با توجه


www.SID.ir

Archive of SID


به اهمیت موضوع فرسایش داخلی به عنوان دومین عامل خرابی سدهای خاکی و وجود خاک‌های مسئله‌ساز واگرا در منابع قرضه و همچنین هزینه بالای تامین منابع قرضه، ضروری است که روش نوین و ایمن استفاده از نانو مواد در بهبود خواص این‌گونه خاک‌ها در برابر فرسایش داخلی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به خشکسالی‌های اخیر کشور و کم شدن نزولات جوی که این مسئله می‌تواند سبب صعود املاح به طبقات بالایی زمین و تشدید واگرایی خاک شود بنابراین ضرورت بهبود خواص این‌گونه خاک‌ها را دوچندان کرده است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- خاک مصرفی

در این پژوهش از خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز استفاده شده است. بر اساس طبقه‌بندی متحد خاک مورد استفاده در گروه رس با خاصیت خمیرایی کم (CL) قرار گرفت. به منظور طبقه‌بندی خاک، آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D422، آزمایش تراکم بر اساس استاندارد ASTM D698 و حدود اتربرگ بر اساس استاندارد ASTM D4318 انجام گرفت. منحنی دانه‌بندی و منحنی تراکم خاک مورد استفاده در شکل‌های (۱ و ۲) قابل مشاهده است و مشخصات خاک در جدول (۱) آورده شده است. برای تعیین درصد واگرایی خاک مذکور از آزمایش هیدرومتری دوگانه استفاده شد. در این آزمایش ابتدا دانه‌بندی خاک به روش استاندارد آزمایش هیدرومتری، یعنی با استفاده از همزن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز، تعیین می‌شود و سپس روی نمونه دیگری از همان خاک، آزمایش هیدرومتری دیگری بدون استفاده از همزن مکانیکی و ماده شیمیایی پراکنده ساز انجام می‌شود و پس از رسم منحنی دانه‌بندی درصد ذرات کوچکتر از 5 میکرون در هر آزمایش تعیین و سپس درصد واگرایی مطابق رابطه (۱) که برابر نسبت درصد ذرات کوچکتر از ۵ میکرون در آزمایش دوم به درصد ذرات کوچکتر از 5 میکرون در آزمایش اول است محاسبه می‌شود.

درصد واگرایی = (A/B)*100 (۱)

در این رابطه A درصد وزنی ذرات با قطر کمتر از ۵ میکرون در آزمایش اول است و B، درصد وزنی ذرات به قطر کمتر از ۵ میکرون در آزمایش دوم است. درصد واگرایی خاک مورد مطالعه در آزمایش هیدرومتری دوگانه ۲۶/۸ بدست آمد که با توجه به جدول (۲) جز خاک غیر واگرا دسته‌بندی می‌شود. با توجه به دسترس نبودن خاک کاملاً واگرا، راه‌حل استفاده از خاک واگرا، تولید این خاک به وسیله مواد شیمیایی پراکنده ساز هگزا متافسفات سدیم می‌باشد. این مواد باعث پراکندگی ذرات خاک شده و خاصیت واگرایی خاک را افزایش می‌دهد. بنابراین مقادیر ۱، ۲، ۳ و ٤ درصد هگزا متافسفات سدیم به خاک اضافه شد که با استفاده از ۳ درصد هگزامتافسفات سدیم به عنوان بهینه نسبت واگرایی خاک ۸۶/۲۳ درصد و در رده کاملاً واگرا به دست آمد.

**جدول ۱.** مشخصات خاک واگرا

| $G_S$ | $P_{d\,max}$ (gr/cm$^3$) | $W_{OPT}$ (%) | LL (%) | PL (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2.45 | 1.62 | 17.8 | 33.85 | 20.33 |

**Table.1.** Physical properties of soils

**جدول ۲.** طبقه‌بندی خاک‌ها مطابق توصیه سازمان حفاظت خاک آمریکا

| Dispersive ratio | type |
|---|---|
| <30% | Non- Dispersive soil |
| 30-50% | Moderate Dispersive |
| 50-70% | Soil with high Dispersive potential |
| 75% < | Quite Dispersive soil |

**Table.2.** Soil classification according to Dispersive ratio according to US soil conservation advice


www.SID.ir

Archive of SID


**شکل ۱.** منحنی تراکم خاک

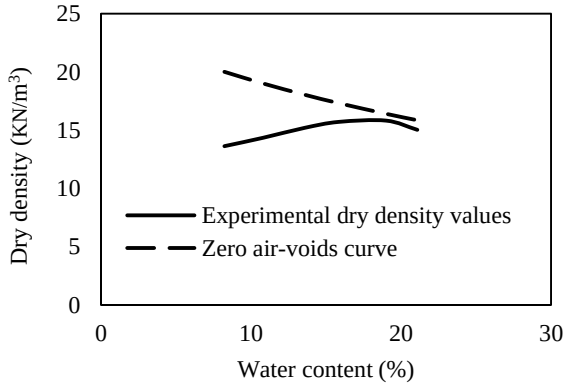


**Fig. 1.** Standard Proctor- compaction curve for soil

**شکل ۲.** منحنی دانه‌بندی خاک

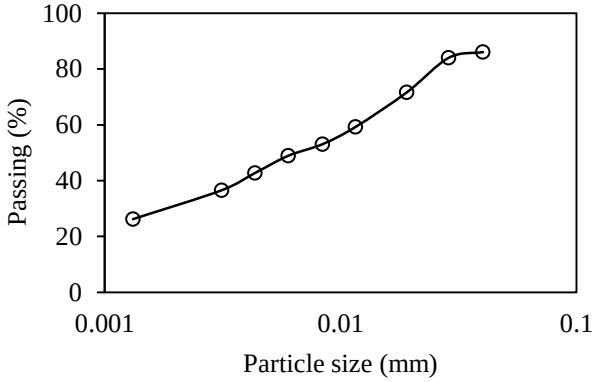


**Fig. 2.** Particle-size distribution curve for soil

**۲-۲- ماده افزودنی مصرفی**

در این پژوهش از نانورس مونت موریلونیت به عنوان ماده افزودنی به خاک، استفاده شده است. این نانورس محصول شرکت Sigma-Aldrich است و از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان در مشهد خریداری شده است. آنالیز شیمیایی این محصول در جدول (۳) و مشخصات فیزیکی آن در جدول (٤) آورده شده است.

**۲-۳- آزمون فرسایش داخلی**

آزمایش فرسایش حفره‌ای یا Hole Erosion Test از آزمایش‌های متداول برای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری فرسایش داخلی درون خاکریزها است. این آزمایش بر اساس طرح ون و فل [8] است که قابلیت سنجش فرسایش‌پذیری خاک‌های با فرسایش‌پذیری کم را دارد. این آزمایش بر اساس فرسایش با ایجاد حفره‌ای به قطر ٦ میلی‌متر درون خاک است که با ایجاد گرادیان هیدرولیکی و عبور جریان داخل حفره، و با اندازه‌گیری تغییرات قطر حفره، سرعت فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی محاسبه می‌شود و در نهایت با بدست آوردن شاخص نرخ فرسایش، میزان فرسایش‌پذیری تخمین زده می‌شود. بر اساس شاخص فرسایش‌پذیری، خاک‌ها در شش گروه طبقه‌بندی شده‌اند که در جدول (۵) نشان داده شده است. در این آزمایش نمونه خاک درون قالب تراکم استاندارد به قطر ۱۰۵ میلیمتر و طول ۱۱۵ میلی‌متر آماده‌سازی می‌شود. در این آزمایش یک منبع آب جریان آب درون نمونه را تأمین می‌کند و یک لوله که انتهای آن یک شیر کنترل است آب را از مخزن به سمت نمونه هدایت می‌کند. فیلتر بالادست (قبل از نمونه خاک ) از ذرات شن به قطر ۲۰ میلی‌متر تشکیل شده است و به


www.SID.ir

Archive of SID


منظور جلوگیری از فرار ذرات از یک توری فلزی استفاده می‌شود.

**جدول ۳.** آنالیز شیمیایی نانورس

| Component | Value (wt %) |
|---|---|
| Na2O | 0.98 |
| MgO | 3.29 |
| Al2O3 | 19.6 |
| SiO2 | 50.95 |
| K2O | 0.86 |
| Cao | 1.97 |
| TiO2 | 0.62 |
| Fe2O3 | 5.62 |
| LOI | 15.45 |

**Table.3.** Chemical analysis of nanoclay material

در نهایت فیلتر پایین‌دست نمونه و لوله خروجی آب قرار دارد. در محفظه‌های فیلترهای بالادست و پایین‌دست نمونه دو لوله عمودی برای قرائت ارتفاع پیزومتریک و گرادیان هیدرولیکی قبل و بعد از نمونه قرار دارد. با اندازه‌گیری نرخ جریان در طول آزمایش، قطر سوراخ ایجاد شده محاسبه می‌شود که برای این منظور از مخزنی که در پایین‌دست نمونه قرار دارد استفاده می‌شود. نمایی از آزمون فرسایش حفره‌ای در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

**جدول ٤.** مشخصات فیزیکی نانورس

| Property | Value |
|---|---|
| Mineral | Montmorillonite |
| Form | Powder |
| Colour | Off-white |
| Odor | Odorless |
| Particle density (Mg/m3) | 3.0–3.7 |
| Size (nm) | 1–2 |
| Specific surface area (m2/g) | 220–270 |

**Table.4.** Physical properties of nanoclay material.

**شکل ۳.** نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌ای [9]

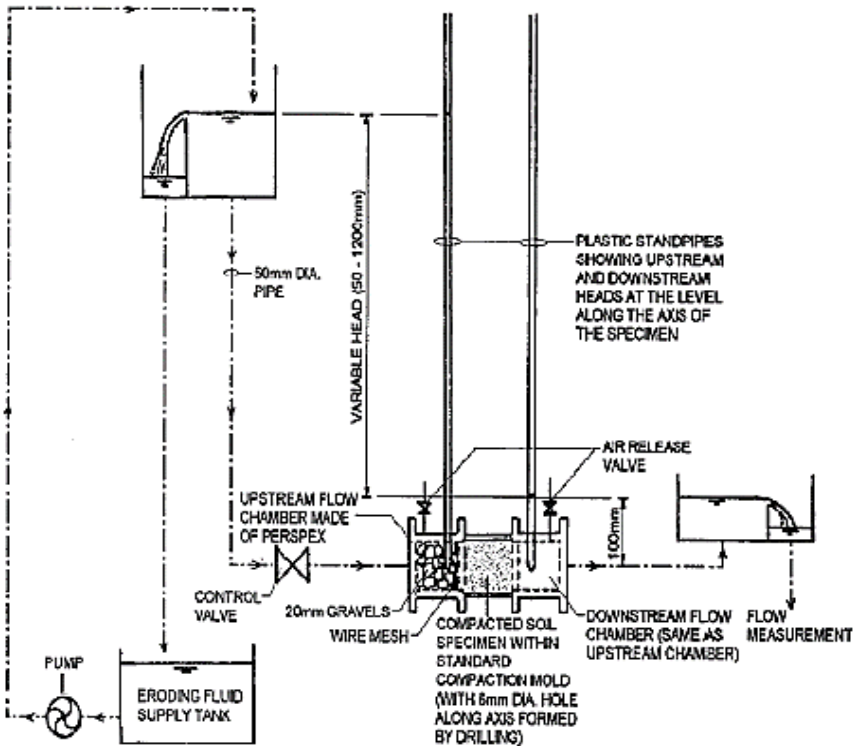


**Fig. 3.** Schematic diagram of Hole Erosion Test Assembly

**جدول ۵.** گروه‌بندی خاک بر اساس شاخص نرخ فرسایش [9]

| Soil erosion rate | erosion rate index | Group number |
|---|---|---|
| Extremely fast | <2 | 1 |
| Very Fast | 2-3 | 2 |
| Fairly fast | 3-4 | 3 |
| Fairly calm | 4-5 | 4 |
| very slow | 5-6 | 5 |
| Extremely calm | >6 | 6 |

**Table.5.** Soil grouping based on erosion rate index


www.SID.ir

Archive of SID

**۲-۴- روش انجام آزمایش‌ها**

ابتدا باید نمونه‌های آزمایش تهیه بشود. به این منظور با توجه به وزن مخصوص خشک بیشینه و رطوبت بهینه خاک که از آزمایش تراکم به دست آمده است و همچنین حجم قالب، جرم خاک مورد نیاز به دست آورده می‌شد. سپس مقادیر نانورس (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۳ درصد وزن خشک خاک) به مقدار آب بهینه اضافه می‌شد و به صورت کامل با مقدار خاک مورد نظر اختلاط داده می‌شد. به منظور بررسی تأثیر زمان ماندگاری بر میزان عملکرد نانورس در خاک، نمونه خاک‌ها در مدت زمان‌های ۱، ۲، ۷، ۱٤ و ۲۸ روز در محفظه‌های پلاستیکی به منظور یکنواخت شدن رطوبت و واکنش احتمالی و ایجاد پیوند بهتر میان نانو رس و خاک مورد بررسی قرار گرفت. سپس نمونه‌ها به صورت ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه در قالب دستگاه فرسایش حفره‌ای متراکم شد سپس با استفاده از مته سوراخی به قطر ٦ میلی‌متر در وسط نمونه و در امتداد محور طولی نمونه ایجاد شد. سپس قالب درون دستگاه قرار داده می‌شود و پس از آب‌بندی و باز کردن شیرهای تخلیه هوا گرادیان‌های هیدرولیکی مورد نظر ایجاد شد. با عبور آب درون حفره، آزمایش شروع شد. در طول آزمایش‌ها در فواصل زمانی ٦۰ ثانیه حجم آب خروجی به منظور تعیین دبی و همچنین ارتفاع آب در پیزومترهای بالادست و پایین‌دست بررسی و قرائت می‌شود. در شکل (٤) نمایی از دستگاه فرسایش حفره‌ای استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است و در شکل (۵) حفره ایجاد شده در خاک نمایش داده شده است.

**شکل ٤.** نمایی از دستگاه فرسایش حفره ای استفاده شده در این پژوهش

**Fig. 4.** Photograph of hole erosion device used in this research

**شکل ۵.** حفره ایجاد شده در خاک موجود در قالب دستگاه فرسایش حفره‌ای

**Fig. 5.** Schematic of Hole in the standard compaction mold

**۲-۵- تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش فرسایش حفره‌ای**

پس از انجام آزمایش‌ها داده‌های اندازه‌گیری شده مربوط به هد آب بالادست و پایین‌دست، دبی، زمان و قطر حفره ایجاد شده در خاک قبل و بعد از آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته می‌شود و نمودارهای نرخ فرسایش/ زمان، تنش برشی هیدرولیکی/ زمان و نرخ فرسایش/ تنش برشی هیدرولیکی با استفاده از روابط ارائه شده توسط [8] به دست آورده می‌شود. این روابط در قالب روابط ۲ و ۳ نشان داده شده است.

$$\tau_t = \rho_w \, g \, S_t \, \frac{\varphi_t}{4} \qquad (۲)$$

که در آن، $\tau_t$ تنش برشی هیدرولیکی وارد شده به سطح حفره در زمان t ($N/m^2$)، $\rho_w$ چگالی سیال، g شتاب جاذبه ($m/s^2$)، $S_t$ گرادیان هیدرولیکی در طول نمونه خاک در زمان t، $\varphi_t$ قطر حفره در زمان t می‌باشد.

$$\varepsilon_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{d\varphi_t}{dt} \qquad (۳)$$

که در آن، $\varepsilon_t$ نرخ فرسایش، $\rho_d$ چگالی خشک خاک ($kg/m^3$) می‌باشد. برای محاسبه این روابط نیاز به محاسبه قطر در هر زمان هستیم. بنابراین از روابط (٤ و ۵) که به ترتیب در جریان آرام و آشفته استفاده می‌شود.

$$\varphi_t = \left[\frac{16 \, Q_t \, f_{lt}}{\pi \, \rho_w \, g \, S_t}\right]^{1/3} \qquad (٤)$$

$$\varphi_t = \left[\frac{64 \, {Q_t}^2 \, f_{Tt}}{\pi^2 \, \rho_w \, g \, S_t}\right]^{1/5} \qquad (۵)$$


www.SID.ir

Archive of SID


در این روابط $f_{lt}$ (kg/m$^2$/s) و $f_{Tt}$ (kg/m$^3$) ضرائب اصطکاک هستند که تنش برشی را به متوسط سرعت جریان ارتباط می‌دهند. $Q_t$ (m$^3$/s) دبی جریان نسبت به زمان است. در طول آزمایش‌ها دبی جریان به صورت حجمی و همچنین گرادیان هیدرولیکی در زمان‌های مشخص اندازه‌گیری می‌شوند. ضرائب اصطکاک در روابط بالا با استفاده از روابط (٦ و ٧) که به ترتیب برای جریان آرام و آشفته محاسبه می‌شود. این ضرائب به صورت خطی نسبت به زمان تغییر می‌کنند.

$$f_L = \frac{\rho_w\, g\, \pi\, s\, \varphi^3}{16\, Q} \qquad (٦)$$

$$f_T = \frac{\rho_w\, g\, \pi^2\, s\, \varphi^5}{64\, Q^2} \qquad (٧)$$

قطر حفره در ابتدای آزمایش مشخص و برابر ٦ میلی‌متر است. در پایان آزمایش‌ها نیز قطر حفره با استفاده از کولیس اندازه-گیری می‌شود. با مشخص کردن نوع جریان، ضرایب اصطکاک برای شروع و انتهای آزمایش محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه ضرایب اصطکاک نسبت به زمان به صورت خطی تغییر می-یابند بنابراین با رسم منحنی و محاسبه و به دست آوردن ضرایب اصطکاک در هر زمان قطر حفره در هر زمان محاسبه می‌شود. در نهایت با رسم منحنی نرخ فرسایش/ تنش برشی هیدرولیکی، شاخص نرخ فرساش خاک با استفاده از رابطه (٨) محاسبه می‌شود.

$$I = -\log(C_e) \qquad (٨)$$

در این رابطه Ce ضریب فرسایش خاک است. این ضریب برابر با شیب خط قسمت ثانویه نمودار نرخ فرسایش/ تنش برشی هیدرولیکی است. با توجه به این که مقادیر ضریب فرسایش خاک بسیار کوچک ($^{-1}$ ١٠ تا $^{-6}$ ١٠) است بنابراین از پارامتر I به عنوان شاخص نرخ فرسایش در طبقه بندی گروه فرسایش‌پذیری خاک استفاده می‌شود.

## ٣- بحث و نتایج

### ٣-١- بررسی فرسایش‌پذیری خاک شاهد

به منظور مقایسه و بررسی میزان اثرگذاری نانورس بر خاک واگرا ابتدا آزمایش‌هایی روی خاک واگرا بدون اضافه کردن نانورس در گرادیان‌های هیدرولیکی مورد نظر ٧/٠٥، ٧/٩٦ و ١١/٠٢ انجام گرفت و میزان فرسایش‌پذیری خاک با محاسبه نرخ فرسایش بدست آورده شد. نتایج به دست آمده در جدول (٦) مشاهده می‌شود. بر اساس این نتایج خاک شاهد دارای فرسایش‌پذیری نسبتاً سریع است.

**جدول ٦.** میزان فرسایش پذیری خاک شاهد

| Hydraulic gradient | erosion rate index | Soil erosion rate |
|---|---|---|
| 7.05 | 3.327 | Fairly fast |
| 7.96 | 3.77 | Fairly fast |
| 11.02 | 3.95 | Fairly fast |

**Table. 6.** The amount of erosion of the soil without nanoclay

### ٣-٢- تأثیر مقادیر نانورس بر فرسایش خاک

در این مرحله از آزمایش تأثیر ٠/٥، ١، ١/٥ و ٣ درصد نانورس بر میزان فرسایش‌پذیری خاک واگرا در گرادیان هیدرولیکی ٧/٩٦ بررسی شده است که نتایج در شکل (٦) آورده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود با اضافه شدن ٠/٥ درصد نانورس به خاک، میزان شاخص نرخ فرسایش از میزان ٣/٧ در نمونه شاهد به ٤/٢ رسیده است و افزایش ١٣/٥ درصدی نشان داده است که این باعث تغییر گروه فرسایش‌پذیری خاک از نسبتاً سریع به گروه نسبتاً آرام شده است. به همین ترتیب با اضافه شدن ١ درصد نانورس، شاخص نرخ فرسایش نسبت به ٠/٥ درصد نانورس افزایش نشان داده است که این میزان افزایش نسبت به خاک شاهد باعث تغییر گروه فرسایش‌پذیری خاک به گروه نسبتاً آرام شده است اما نسبت به ٠/٥ درصد نانورس، میزان افزایش آن به میزانی نبوده است که گروه فرسایش‌پذیری خاک دوباره تغییر یابد. با اضافه شدن ١/٥ درصد نانورس شاخص نرخ فرسایش نسبت به ١ درصد نانورس حدوداً ٢ درصد کاهش نشان داده است اما همچنان خاک در گروه فرسایشی نسبتاً آرام است. نکته قابل‌توجهی که در این شکل مشاهده می‌شود این است که اضافه نمودن ٣ درصد نانورس به خاک شاهد، گروه فرسایش‌پذیری خاک تغییر نیافته است که می‌تواند نشانگر این موضوع باشد که لزوماً با افزایش میزان نانورس به خاک میزان فرسایش‌پذیری خاک کاهش پیدا نمی‌کند بلکه مقداری بهینه وجود دارد که با افزایش میزان نانورس به مقداری بیش از


www.SID.ir

Archive of SID


بهینه، تأثیر مثبتی در کاهش فرسایش‌پذیری نشان نمی‌دهد. مقدار بهینه نانورس در زمان نگهداری یک روز برابر ۱ درصد بدست آمده است همچنان که زمردیان و مغیث‌پور [10] میزان ۱ درصد نانورس را به عنوان بهینه در کاهش فرسایش خاک ماسه لای‌دار در زمان عمل‌آوری یک روز مشاهده کردند. در شکل (۷) نتایج مربوط به زمان عمل‌آوری ۲ روز و در شکل (۸) نتایج مربوط به زمان عمل‌آوری ۷ روز آورده شده است. همان‌گونه که در این دو شکل مشخص است با افزایش میزان نانورس از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد، شاخص نرخ فرسایش افزایش یافته است که در هر سه میزان نانورس نسبت به خاک شاهد گروه فرسایش‌پذیری خاک از نسبتاً سریع به نسبتاً آرام تغییر یافته است. در این دو شکل میزان ۱/۵ درصد نانورس به عنوان بهینه در کاهش فرسایش بدست آمده است. بنابراین در زمان ماندگاری ۱ روز میزان یک درصد نانورس بهینه بدست آمد که با افزایش زمان ماندگاری به دلیل ایجاد واکنش و پیوند بهتر میان نانورس و ذرات خاک، میزان ۱/۵ درصد نانورس تأثیر بهتری در کاهش فرسایش خاک نشان داده است. به دلیل اینکه سطح ویژه نانورس نسبت به خاک زیاد است بنابراین تمایل زیادی به جذب آب دارد. با جایگزینی ذرات ریز نانورس با وزن مخصوص کمتر با ذرات خاک، ذرات نانورس در بین خلل و فرج خاک قرار گرفته و حفره‌های ریز خاک را پر می‌کنند و به دلیل ایجاد پیوند و واکنش با ذرات خاک بنابراین به چسبندگی خاک افزوده می‌شود. با افزایش ذرات نانو رس به یک مقدار بحرانی، بنابراین به همان نسبت از زاویه اصطکاک داخلی خاک کاسته می‌شود. و از آنجایی که مقاومت خاک ترکیبی از چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد بنابراین مقاومت در برابر فرسایش روند نزولی پیدا خواهد کرد. بهاری و همکاران [6] بیان داشتند که با افزودن نانورس به خاک سیلتی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک بهبود پیدا می‌کند و تغییرات قابل‌توجهی در چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک ایجاد می‌شود به گونه‌ای که با افزایش درصد نانورس از ۰/۵ تا ۲ درصد به خاک سیلتی این دو پارامتر مقاومتی خاک افزایش می‌یابد. طبرسا [11] اظهار داشت که با افزایش درصد نانورس (۱، ۲ و ۳ درصد) به خاک ریزدانه نرم چسبندگی خاک افزایش می‌یابد و زاویه اصطکاک داخلی به نسبتاً کاهش می‌یابد که این می‌تواند دلیلی بر نتایج به دست آمده از این پژوهش باشد.

**شکل ٦.** تغییرات شاخص نرخ فرسایش نسبت به درصد نانورس در مدت زمان عمل‌آوری یک روز

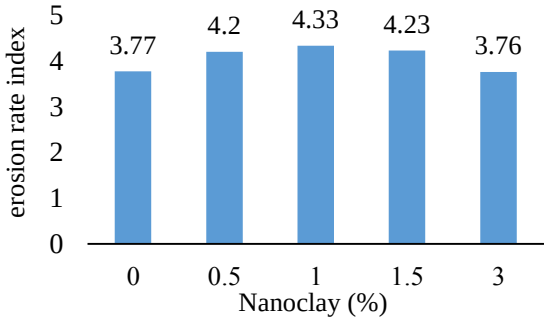


**Fig. 6.** Variation of erosion rate index versus amount of nanoclay for one-day curing period

**شکل ۷.** تغییرات شاخص نرخ فرسایش نسبت به درصد نانورس در مدت زمان عمل‌آوری دو روز

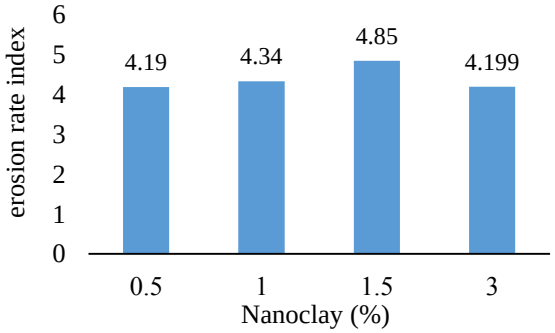


**Fig. 7.** Variation of erosion rate index versus amount of nanoclay for 2-day curing period

**شکل ۸.** تغییرات شاخص نرخ فرسایش نسبت به درصد نانورس در مدت زمان عمل‌آوری هفت روز

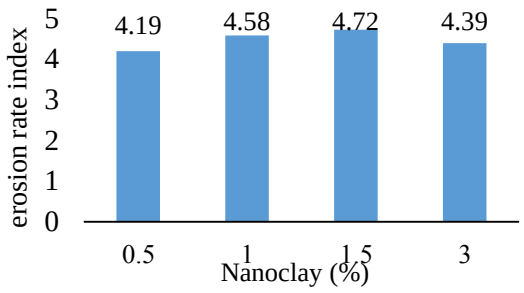


**Fig. 8.** Variation of erosion rate index versus amount of nanoclay for 7-day curing period


www.SID.ir

Archive of SID


### ۳-۳- تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر میزان فرسایش خاک

به منظور بررسی تأثیر گرادیان هیدرولیکی بر شاخص نرخ فرسایش خاک، آزمایش‌ها روی نمونه خاک حاوی ۱ درصد نانورس در زمان عمل‌آوری ۱ روز انجام گرفته است. نتایج در شکل (۹) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در گرادیان هیدرولیکی بیشتر شاخص نرخ فرسایش بیشتری بدست آمده است که نشان دهنده مقاومت نسبتاً خوب خاک حاوی نانورس در برابر نیروی فرساینده جریان می‌باشد. به گونه‌ای که در گرادیان هیدرولیکی ۱۱/۰۵ حدوداً به میزان ٦ درصد شاخص نرخ فرسایش نسبت به گرادیان ۷/۰۵، افزایش نشان داده است. با این حال با افزایش گرادیان هیدرولیکی میزان افزایش شاخص نرخ فرسایش به گونه‌ای نبوده است که گروه فرسایش‌پذیری خاک نسبت گرادیان‌های کوچکتر تغییر یابد و در هر ۳ گرادیان هیدرولیکی افزودن ۱ درصد نانورس باعث تغییر گروه فرسایش‌پذیری خاک از نسبتاً سریع به نسبتاً آرام شده است. نیروهایی که به خاک موجود در قالب آزمایش فرسایش حفره‌ای وارد می‌شود به دو صورت می‌باشد. نیروی برشی حاصل از جریان آب درون حفره موجود در خاک و نیروی قائم که از طرف جریان آب در اثر گرادیان موجود به سطح خاک وارد می‌شود و باعث فشرده شدن و انسجام خاک می‌شود. بهاری و شاه نظری [12] با بررسی تأثیر نانورس در تثبیت خاک ریزدانه بیان نمودند که با افزودن نانورس به خاک، میزان مقاومت برشی، چسبندگی و تراکم‌پذیری خاک افزایش می‌یابد که این باعث پایداری و استحکام بیشتر خاک می‌شود. بنابراین نمونه‌های حاوی نانو رس تحت بارگذاری، تراکم-پذیرتر می‌شوند و به این دلیل است که ذرات نانو رس در ساختار و اسکلت خاک تغییراتی ایجاد می‌نماید که سبب کاهش نسبت تخلخل نهایی و افزایش شاخص فشردگی خاک می‌شود. بنابراین در گرادیان‌های هیدرولیکی بیشتر به دلیل اینکه نیروی فشاری بیشتری به سطح خاک وارد می‌شود، مطابق با [12] پایداری خاک در برابر فرسایش بیشتر می‌شود. از طرف دیگر با افزوده شدن چسبندگی و مقاومت برشی خاک در فشارهای بالاتر، پایداری حفره در برابر نیروی برشی وارد شده افزایش می‌یابد. همچنان که زمردیان و همکاران [10 , 13] به نتایج مشابه با این پژوهش دست پیدا نمودند.

**شکل ۹.** تاثیر گرادیان هیدرولیکی بر شاخص نرخ فرسایش در ۱ درصد نانورس و در زمان عمل‌آوری ۱ روز

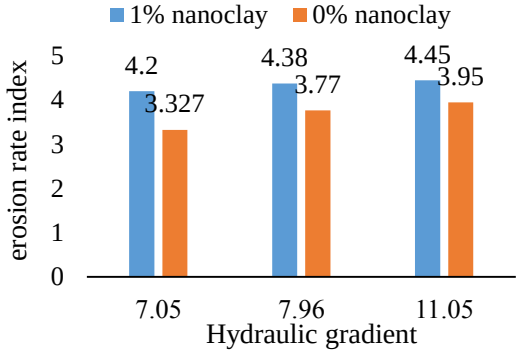


**Fig. 9.** Influence of hydraulic gradient on erosion rate index in the soil with 1% nanoclay and for one-day curing period.

### ۳-۴- تأثیر زمان عمل‌آوری بر میزان فرسایش

به منظور بررسی تأثیر مدت زمان عمل‌آوری خاک حاوی نانورس بر میزان فرسایش‌پذیری آن، آزمایش‌ها روی نمونه خاک حاوی یک درصد نانورس و در مدت زمان نگهداشت ۱، ۲، ۷، ١٤ و ۲۸ روز و در هر ۳ گرادیان هیدرولیکی ۷/۰٦، ۷/۹٦ و ۱۱/۰۵ انجام گرفت. نتایج بدست آمده در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از ۱ روز به ۲۸ روز شاخص نرخ فرسایش افزایش یافته است که بیشترین شاخص نرخ فرسایش در مدت زمان ۲۸ روز بدست آمده است به گونه‌ای که نسبت به خاک شاهد میزان افزایش شاخص نرخ فرسایش به ترتیب در گرادیان‌های هیدرولیکی ۱۱/۰۵، ۷/۹٦ و ۷/۰٦ برابر ۲۳/۸ درصد، ۲۳/٤ درصد و ۲۰/۳ درصد افزایش است که در مقایسه با نمونه خاک‌های ۱ روزه به ترتیب برابر ۱۰درصد، ۱۳/٤ درصد و ۱۳/۱ درصد افزایش است. با این حال با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، میزان افزایش شاخص نرخ فرسایش‌پذیری به گونه‌ای نبوده است که گروه فرسایش‌پذیری خاک تغییر یابد و در همه مدت زمان‌ها گروه فرسایش‌پذیری خاک از گروه نسبتا سریع در خاک شاهد به نسبتاً آرام تغییر یافته است. نانورس‌ها آبدوست هستند و به دلیل داشتن سطح


www.SID.ir

Archive of SID


ویژه بسیار بزرگ آن‌ها، همواره اندرکنش بسیار شدیدی بین نانو رس‌ها و محیط اطرافشان وجود دارد[14]. بنابراین هرچه مدت زمان عمل‌آوری آن‌ها بیشتر باشد نیروهای بین ذره‌ای آن‌ها در مجاورت رطوبت افزایش می‌یابد و با پر کردن خلل و فرج خاک و اتصال ذرات خاک به هم، باعث انسجام و ثبات بیشتر خاک می‌شوند بنابراین فرسایش‌پذیری خاک را کاهش می‌دهند. همچنین از دیگر دلایلی که می‌تواند نشان دهنده تأثیر مثبت زمان عمل‌آوری در کاهش فرسایش باشد این است که جذب رطوبتی ذرات رس زمان‌بر است [15]. بنابراین به منظور عملکرد بهتر در خاک باید زمان کافی برای جذب رطوبت و انجام واکنش‌های شیمیایی در آن در نظر گرفته شود. اما همان‌گونه که در این پژوهش مشاهده شده است میزان کاهش در فرسایش خاک با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، به اندازه‌ای نبوده است که گروه فرسایش‌پذیری خاک تغییر پیدا کند همچنان که فرجاد و عباسی [16] اظهار داشتند که مدت زمان عمل‌آوری تأثیر قابل‌توجهی در میزان کاهش فرسایش‌پذیری با استفاده از نانو رس در خاک رسی متورم شده نخواهد داشت.

**شکل ۱۰.** تاثیر زمان عمل‌آوری بر شاخص نرخ فرسایش

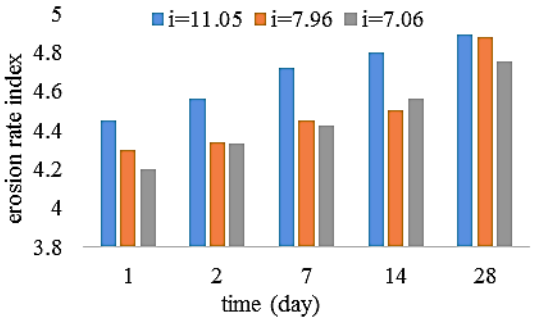


**Fig. 10.** Influence of curing period on erosion rate index in the soil with 1% nanoclay.

### ۳-۵- تأثیر میزان نانورس بر خواص خمیری خاک واگرا

به منظور مشاهده تأثیر نانورس بر خواص خمیری خاک از حدود اتربرگ شامل حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری استفاده شده است. نتایج حاصل از اضافه کردن ۱ و ۲ درصد نانورس در زمان عمل‌آوری ۱ روز در شکل (۱۱) نشان داده شده و با خاک شاهد مقایسه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با اضافه شدن ۱ درصد نانورس به خاک حد روانی به میزان حدوداً ٤ درصد افزایش و حد خمیری به میزان ٤/۲ درصد افزایش نشان داده است و همچنین شاخص خمیری به میزان تقریباً ۳ درصد افزایش یافته است. نکته قابل توجه در این شکل کاهش در خواص خمیری خاک با اضافه شدن ۲ درصد نانورس به خاک است که نیاز به بررسی دارد. با اضافه شدن نانورس به خاک به دلیل داشتن سطح ویژه بزرگ، باعث ایجاد فعل و انفعالات بین ذره‌ای گسترده‌تری در خاک می‌شوند و به دلیل ازدیاد بار الکتریکی، تمایل زیادی به جذب آب دارند بنابراین ضخامت آب لایه دوگانه اطراف ذرات رسی افزایش می‌یابد [14 , 17]. با افزایش ضخامت لایه آب دوگانه، حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. با اضافه شدن ۲ درصد نانورس به خاک به دلیل ازدیاد در یون‌های منفی و تعادل با یون‌های مثبت موجود در خاک واگرا، این یون‌ها به تعادل رسیده و بنابراین باعث کاهش حد روانی و خمیری و بالتبع شاخص خمیری خاک می‌شوند. تبرسا [11] به این نتیجه رسید که با اضافه کردن نانورس به مقدار بیش از ۲ درصد به خاک ریزدانه، مقدار تغییرات شاخص خمیری آن‌چنان محسوس و چشم‌گیر نیست. همچنین محمدزاده و همکاران [18] با بررسی تأثیر نانورس بر خواص ژئوتکنیکی ماسه رس-دار نشان دادند که با اضافه کردن یک درصد نانورس به خاک، حد روانی و حد خمیری افزایش و شاخص خمیری خاک کاهش می‌یابد.

**شکل ۱۱.** تاثیر نانورس بر خواص خمیری خاک

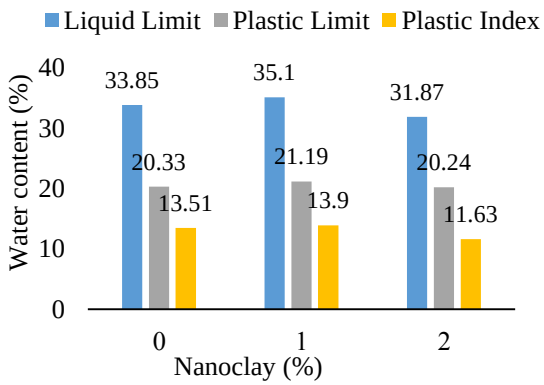


**Fig. 11.** Influence of nanoclay on atterberg limits.


www.SID.ir

Archive of SID


نتایج بدست آمده در این بخش از پژوهش و مربوط به بررسی خواص خمیری خاک در حضور نانورس، تأیید کننده نتایج بدست آمده در بخش‌های قبلی مربوط به فرسایش‌پذیری این-گونه خاک‌ها است. بنابراین در زمان عمل‌آوری ۱ روز، ذرات نانورس با اضافه نمودن خواص خمیری خاک باعث بهبود خواص ژئوتکنیکی و درنهایت کاهش فرسایش‌پذیری خاک می‌شوند.

## ٤- نتیجه‌گیری

۱- با افزودن نانورس به خاک شاخص نرخ فرسایش افزایش و فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد که مقدار بهینه نانورس بستگی به زمان عمل‌آوری خاک دارد به گونه‌ای که هر چه زمان عمل‌آوری خاک بیشتر باشد مقدار بهینه نانورس در کاهش فرسایش افزایش می‌یابد. در زمان عمل‌آوری ۱ روز مقدار بهینه نانورس ۱ درصد بدست آمد که این در زمان‌های عمل آوری ۲ و ۷ روز، ۱/۵ درصد مشاهده شد.

۲- نانورس در گرادیان هیدرولیکی بزرگتر تاثیر بیشتری در کاهش فرسایش نشان می‌دهد.

۳- با افزایش مدت زمان عمل‌آوری، شاخص نرخ فرسایش افزایش می‌یابد اما این میزان کاهش فرسایش به گونه‌ای نیست که گروه فرسایش‌پذیری خاک در زمان‌های بیشتر از یک روز تغییر یابد و در همه مدت زمان‌های ۱، ۲، ۷، ١٤ و ۲۸ روز گروه فرسایش‌پذیری خاک از میزان نسبتا سریع در خاک شاهد به میزان نسبتاً آرام تغییر پیدا می‌کند.

٤- افزودن نانورس به خاک واگرا باعث تغییر در خواص خمیری خاک می‌شود که میزان تغییرات آن بستگی به مقدار نانو رس دارد به گونه‌ای که با افزودن ۱ درصد نانورس به خاک حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری خاک افزایش پیدا می‌کند که این در مقدار ۲ درصد نانورس به صورت کاهش در خواص خمیری خاک مشاهده شده است.

## ٥- مراجع References

[1] Guy L. H. & Shawki. 1992 Water Dams and Civilization. *World Bank Technical Paper*, Longman, London, No.115, 5-13.

[2] Fell R., MacGregor P., Stapledon D. & Bell G. 2005 Geotechnical Engineering of Dams. Published by: *A.A.Balkema Publishers Leiden, The Netherland, a member of Taylor & Francis Group* plc.912.

[3] 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, 29-30.

[4] Farrar J.A., Torres R.L. & 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, 1-10.

[5] Zomorodian S. M. A., Moghispour Sh., Soleymani A. & Brendan C. O'Kelly. 2017 Strength enhancement of clean and kerosene-contaminated sandy lean clay using nanoclay and nanocilica as additives. *Applied Clay Science*, 140 (2017), 140–147.

[6] Bahari M., Nikookar M., Arabani M., Khodaparast Haghi A. & Khodabandeh H. 2013. Stabilization of Silt by Nano-clay. *7th National Congress on Civil Engineering, 7-8 May, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.*

[7] Momen M. & Zomorodian S.M.A. 2015 Effect of NanoSilica on Dispersive Clayey Soils Erosion. *The First International Congress on New Horizons in the Civil Engineering, Architecture, Culture and Urban Management of Iran*. (In Persian)

[8] Wan C.F. & 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.

[9] Wan C.F. & Fell R. 2004 Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 373-380.

[10] Zomorodian S.M.A & Moghispour sh. 2017 The effect of nanoclay on internal erosion in soil dams. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48 (1), 187-194. (In Persian)

[11] Tabarsa A. 2017 The effect of nanoclay on the geotechnical behavior of fine-grained soft soils. *Journal of Engineering Geology*, 11(2). (In Persian)

[12] 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 Persian)

[13] Zomorodian S. M. A. & Koohpeyma 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 Persian)

[14] Lan T. & Kaviratna P. D. 1995 Mechanism of clay tactiod exfoliation in epoxy-clay nanocomposites. *Chem, Master*, 2144-2150.

[15] ASTM. 2001 Annual book of ASTM standards, *ASTM*.

[16] Farjad A. & Abbasi N. 2017 Application of Nanoclay Particles for Stabilization of Expansive Clayey Soils. *Journal of Water and Soil Science*, 21 (2). (In Persian)

[17] Mitchel J. K. & Soga K. 2005 Fundamentals of soil behavior. *John Wiley & Sons*, Third edition.

[18] Mohammadzadeh Sani A., Arabani M., khodaparast haghi A. Jamshidi Chenari R. (2010). The Effect of Nanoclay on Geotechnical Properties of Clay Sand. *The Fourth International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics of Iran*, Tehran, Iran .(In Persian)


www.SID.ir

Archive of SID


# Laboratory Study on the Effectiveness of nanoclay in Internal Erosion of Dispersive Clayey Soils in Embankmen Dams

**S. M. A. Zomorodian[1*], H. Ghaffari[2], M. Izadi[2]**

1- Associate Professor of water engineering, Shiraz University, Iran. (Corresponding Author)
2- M.Sc. Student Hydraulic Structure, Water Engineering Department, Shiraz University, Iran.

***mzomorod@shirazu.ac.ir**

**Abstract**

The phenomenon of internal erosion in embankment dams is one of the threats to their stability and the presence of Dispersive Clayey soils on the embankment dam is one of the exacerbating and one of the reasons that causes internal erosion which is associated with dam damages. Basically, Dispersive Clayey Soils in the vicinity of moisture and saturation will highly lose resistance Due to the presence of $Na^+$. Due to the mentioned fact, stabilization of these soils seems to be of essential importance for the sake of making proper embankment of hydraulic projects. One way for soil amendment and confronting soil erosion is the injection of additives. In this research, nanoclay (montmorillonite) has been used as a modern and eco-friendly additives for controlling internal erosion in Dispersive soils. nanoclay materials had particle size ranges of 1–2 nm and specific surface area value of 220–270 $m^2/g$ . The dispersion ratio of soil was equal to 86%. In order to investigate the erodibility values, samples containing 0, 0.5, 1, 1.5 and 3 (weight percent) of dry soil were tested by Hole Erosion Test. After determining the optimal percentage of nanoclays, effects of hydraulic gradient (i= 7.05, 7.96, 11.05) and processing time (t= 1, 2, 7,14, 28 day) on erodibility of samples containing the optimum amount of nanoclays and also the effect of optimal amount of nanoclays on atterberg limits of soil were investigated. Experiment results on Dispersive Clayey Soils without nanoclay showed that the index of erosion rate of soil was in the fairly fast group. The results show that adding nanoclay to soil increases the index of erosion rate and decreases soil erodibility. So that the erosion of the soil changes from fairly fast group in the control soil to laminar group. At the processing time of 1 day, the optimum amount of nanoclay in reducing erosion was obtained 1% and the index of erosion rate was 4.33. The optimum amount of nanoclay in the processing times of 2 and 7 days was observed equal to 1.5% and the index of erosion rate was 4.85 and 4.72, respectively. It was also observed that in larger hydraulic gradients, the effect of nanoclay in reducing erosion is more. In addition for optimal amount of nanoclays with increasing hydraulic gradient and processing time, the index of erosion rate increased and sample's erodibility decreased. So that, in the hydraulic gradient equal to 11.05, the index of erosion rate increased by 5%. Also the index of erosion rate has increased with increasing processing time. So, at the processing time of 28 days, the amount of increasing in the index of erosion rate in hydraulic gradients equal to 11.05, 7.96 and 7.06, is 23.8%, 23.4% and 20.3%, to the control soil, respectively. Also adding the optimum amount of nanoclays because of absorbing water, has expands atterberg limits of soil. So that with adding 1 percent nanoclays increased liquid limit (about 4 percent), plastic limit (about 4.2 percent) and plastic index (about 3 percent) of dispersive clayey soil and adding 2 percent nanoclays decreased atterberg limits of soil, compared to the control sample.

**Key word:** Hole Erosion Test, Internal Erosion, Dispersive Clayey Soils, Hydraulic Gradient.


www.SID.ir