

## بهبود خواص خزشی خاک رس اصلاح شده با نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن (مطالعه موردی: منبع قرضه هسته سد شهید شاهچراغی)

فاطمه میرنژاد<sup>۱</sup>، عبدالحسین حداد<sup>۲\*</sup>، عادل عساکره<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۱/۷/۹، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۷/۹

### چکیده

وارفتگی یا خزش به معنی افزایش تدریجی تغییر شکل خاک در طول زمان است که تحت بار ثابت قرار می‌گیرد. پدیده خزش در ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارد و در مواردی که زمان و عوامل مؤثر بر آن دخالت دارند، به‌طور دقیق بررسی می‌شود، زیرا زمانی که نشست در سازه رخ می‌دهد مشکلات زیادی از قبیل به وجود آمدن ترک، افزایش تغییر شکل و تنش ایجاد می‌شود که در نهایت از کارایی، بهره‌برداری و مدت عمر مفید سازه کاسته می‌گردد. اصلاح رفتار خاک با استفاده از مواد افزودنی مختلف از جمله مسائل مهم پیش روی محققین در مهندسی عمران می‌باشد. افزودنی‌های رایجی نظیر آهک، سیمان، قیر، خاکستر بادی، خاکستر چوب، سرباره مس، سرباره آهن و غیره در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته‌اند و مواد نانو و پلیمر که استفاده از آن‌ها در شاخه‌های دیگر علوم مهندسی منجر به تحولاتی بنیادی شده است و دارای خصوصیات منحصر به‌فردی هستند، در مهندسی ژئوتکنیک در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه واقع شده‌اند. در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد افزودنی پلی‌پروپیلن (Polypropylene) و نانوسیلیس (Nano-Silica) بر روی خصوصیات خزشی خاک رس پرداخته شده است، بدین منظور آزمایش‌های تحکیم بر روی خاک تثبیت شده با نانوسیلیس و پلی‌پروپیلن در درصد‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد و در تنش‌های ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال انجام شده و نتایج به‌دست آمده بر حسب نسبت تخلخل - زمان ترسیم شد که نشان‌دهنده کاهش رفتار خزشی خاک رس نرم تحت تأثیر درصد‌های نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد؛ به‌طوری‌که با افزایش نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد وزنی خاک، با توجه به مقاومت خاک در برابر نشست، تغییر شکل‌های پلاستیک ۱۱ درصد کاهش یافته و با افزایش بیشتر نانوسیلیس این تغییر شکل‌ها ۸ درصد افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا دو درصد، نسبت تخلخل ۱۴ درصد کاهش یافته که این کاهش تخلخل می‌تواند منجر به کاهش نشست نمونه شود. نسبت  $C\alpha/Cc$  برای خاک مورد مطالعه در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۰۳ قرار می‌گیرد که تطابق خوبی با سایر تحقیقات دارد.

**کلیدواژه‌ها:** رفتار خزشی خاک رس نرم، آزمایش تحکیم، نانوسیلیس، الیاف پلی‌پروپیلن، منبع قرضه هسته سد شهید شاهچراغی.

### ۱- مقدمه

نشان می‌دهند. به‌طور کلی، رفتار خاک‌های چسبنده نظیر رس نسبت به خاک‌های دانه‌ای، به زمان وابسته است. باید توجه داشت که این پدیده و رفتار آن، مختص سازه‌های بلندمرتبه و پروژه‌های بزرگ نمی‌باشد و در هر جایی که مصالح خاکی هستند امکان رخ دادن این پدیده وجود دارد. با توجه به اهمیت رفتار خزش مخصوصاً در خاک‌های چسبنده، مطالعه و تحقیق در رفتار این خاک‌ها امری مهم و ضروری در مهندسی عمران است. تحقیقات در این زمینه از مشکلات و مسائل به‌وجود آمده بر اثر تغییر شکل‌های بزرگ جلوگیری کرده و نقش مهمی دارد.

پدیده خزش را می‌توان در رفتار بسیاری از مصالح نظیر فولاد، بتن، خاک و سنگ مشاهده کرد. از آنجایی که در این پدیده پارامتر زمان تأثیر دارد، رفتار خاک مورد نظر به عوامل مختلفی نظیر نوع خاک (دانه‌بندی و ترکیبات آن، نحوه شکل‌گیری)، تغییرات آب و هوایی (دما)، تاریخچه بارگذاری، شرایط زیست‌محیطی بستگی دارد. خاک‌های چسبنده در مقایسه با غیرچسبنده، تغییر شکل‌های خزشی بیشتری را در برخی موارد نظیر لغزش شیروانی، نشست سازه (درازمدت) و جابه‌جایی افقی آن، خاکریزها و غیره از خود

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲۳۰۶۶۲۱۰

می‌بخشد و همچنین تجزیه و تحلیل FESEM نشان داد که تخلخل خاک آلی توسط یک ترکیب سیمانی جدید، به‌عنوان هیدرات سیلیکات منیزیم (M-S-H) پر شده است.

Latifi و همکاران (۲۰۱۷) خواص مکانیکی و ریزساختاری کائولن سفید و بنتونیت سبز را با افزودنی مایع مبتنی بر سیلیکات سدیم کم کربن بررسی کرد. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقاومت برشی و تراکم‌پذیری در خاک بود. بهبود خواص مکانیکی به دلیل تشکیل محصولات سیمانی و در نتیجه اصلاح ساختار خاک است. آن‌ها دریافتند که محصولات سیمانی منافذ را پر می‌کند، ذرات خاک را به هم متصل می‌کند و نیروی بین مولکولی را افزایش می‌دهد. Tabarsa و همکاران (۲۰۱۸) پتانسیل پایدارسازی مؤثر لس<sup>۱</sup> را با استفاده از نانورس بررسی کرد. نتیجه نشان داد که افزودن نانورس باعث تغییر شکل‌پذیری، استحکام و رفتار سخت نمونه‌ها می‌شود. همچنین، واگرایی و رفتار فروپاشی ناشی از مرطوب شدن نسبی لس طبیعی با افزودن نانورس تحت تأثیر قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاک‌های لسی که با ۲ درصد نانورس تثبیت شده بودند، بهبود قابل توجهی را نشان دادند.

Zhang (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد نانوبنتونیت<sup>۲</sup> رو خواص خاک رس پرداخت. در این تحقیق آزمایش نصب بر روی تهیه نانوبنتونیت انجام شد و شرایط فشاری بنتونیت مشاهده شد. پس از آن، مقاومت ویسکوزیته نانوبنتونیت با خاک دست نخورده به روش کنترل متغیرها مقایسه شد و نانوبنتونیت به دو گروه آزمایش و کنترل تقسیم شد. مقاومت ویسکوزیته و ویژگی‌های تحکیمی نانوبنتونیت با تغییر دما، محتوای نانوبنتونیت، فشار و نسبت منافذ مشاهده و آنالیز شد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تحکیم نمونه بدون افزودن نانوبنتونیت<sup>۳</sup>  $10^{-3} \times 1/7$  سانتی‌متر مربع بر ثانیه است که با افزودن دو درصد بنتونیت به  $10^{-3} \times 6/6$  کاهش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تحکیم با افزایش فشار تحکیم و کاهش نسبت تخلخل کاهش می‌یابد.

Keramatikerman و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی اثر آترازین (ATZ)<sup>۳</sup> یکی از پرمصرف‌ترین علف‌کش‌ها در جهان به‌ویژه در ایالات متحده و استرالیا است بر روی شاخص تراکم‌پذیری و نفوذپذیری دو خاک رس طبیعی استرالیای غربی آلوده به محتویات مختلف ATZ پرداختند. آن‌ها نسبت تحکیم ثانویه ( $R\alpha$ ) و شاخص تحکیم ثانویه ( $G\alpha$ ) محاسبه کردند و نتایج نشان داد که نمونه‌های حاوی محتوای ATZ بالاتر مقادیر بیشتری از  $R\alpha$  و  $Ca$  داشتند.

Mesri (۱۹۷۳) بیان کرد که تحکیم ثانویه، ادامه روند تغییرحجم در طول تحکیم اولیه می‌باشد و این مکانیزم شامل تغییر شکل اجزا و تغییر مکان نسبی آن‌ها می‌باشد. او نتیجه گرفت

مواد افزودنی گاه برای پایداری و تثبیت خاک‌ها، به‌خصوص خاک‌های ریزدانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمول‌ترین این مواد افزودنی، آهک، مخلوط آهک و خاکستر بادی و سیمان می‌باشد. تکنیک‌های مختلف برای بهبود کیفیت خاک به منظورهای زیر، مورد بحث قرار می‌گیرد:

- ۱- کاهش نشست سازه،
- ۲- بهبود مقاومت برشی خاک و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری آن،
- ۳- افزایش ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی خاکریزها و سدهای خاکی،
- ۴- کاهش خصوصیات جمع‌شدگی و تورم خاک (Mitchell, ۱۹۸۱).

محققین بسیاری تأثیر مواد افزودنی را بر روی ویژگی‌های مهندسی خاک بررسی کرده‌اند. واکنش آن‌ها با خاک شامل واکنش‌های کوتاه مدت تبادل کاتیونی و واکنش‌های طولانی مدت پوزولانی است که هر دو باعث بهبود ویژگی‌های مهندسی خاک تثبیت شده می‌شود. افزودن مواد افزودنی به خاک در اکثر مواقع موجب کاهش تورم، کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک خاک و افزایش رطوبت بهینه خاک می‌شود (Guide Technique, ۲۰۰۰؛ Bell, ۱۹۹۶؛ Amo و همکاران، ۲۰۰۵).

Bibak و همکاران (۲۰۲۰) تثبیت و اصلاح خاک‌های رسی نرم را با امکان جایگزینی بخشی از افزودنی‌های معمولی در اصلاح خاک‌های رسی نرم (آهک) با ضایعات بررسی کردند. همچنین سیلیکات سدیم به‌عنوان عامل تسهیل‌کننده واکنش‌ها در فرآیند تثبیت خاک مورد مطالعه قرار گرفت. از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها مشخص شد که بهترین عملکرد خاک تثبیت شده زمانی حاصل می‌شود که ۶٪ آهک، ۶٪ ضایعات صنعتی و ۱/۵٪ سیلیکات سدیم وجود داشته باشد.

Vakili و همکاران (۲۰۱۶) رفتار خاک تثبیت شده با سیلیکات سدیم، کوره سرباره و سیمان را بررسی کرد. آن‌ها این سه افزودنی را با نسبت‌های مختلف به همه نمونه‌ها اضافه کردند تا رفتار نمونه‌های داده شده را بررسی کنند. آن‌ها متوجه شدند که نسبت سیلیکات سدیم از اهمیت بالایی برخوردار است و استفاده از نسبت نامناسب بر پایداری خاک تأثیر منفی خواهد داشت. نتایج نشان داد که افزودن یک درصد سیلیکات سدیم به همراه دو درصد سیمان و پنج درصد سرباره بیشترین مقاومت برشی را داشت.

Hassan و همکاران (۲۰۱۷) استحکام و خواص ریزساختاری خاک آلی تثبیت شده با کلرید منیزیم ( $MgCl_2$ ) را بررسی کرد. نتایج نشان داد که  $MgCl_2$  استحکام فشاری خاک آلی را بهبود



شکل ۱- خاک رس مورد مطالعه

با توجه به مرور منابع صورت گرفته، تأثیر نانوسیلیس و الیاف بر خصوصیات خزشی خاک رس کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو استفاده از این دو ماده افزودنی با توجه به در دسترس بودن و تأثیرگذاری آن‌ها بر روی سایر خواص خاک‌های رسی، در دستور کار این تحقیق قرار گرفت.

در این تحقیق از نانوسیلیس، به شکل پودر سفید با درجه خلوص بالا، محصول شرکت Evonic Industries کشور آلمان که از شرکت پیشگامان نانومواد ایرانیان خریداری و استفاده شده است. نانوسیلیس مجموعه ذرات کوچک  $\text{SiO}_2$  است که از طریق پیوندهای شیمیایی به یکدیگر وصل شده و ذرات بزرگتر تشکیل می‌شوند. مزیت اصلی این ماده نسبت به سیلیس، زیاد بودن سطح ویژه آن است، که در ترکیب با دیگر مصالح موجب برهمکنش بیشتر می‌شود. نانوسیلیس عموماً دارای ساختار بدون شکل (آمورف) <sup>۴</sup> و توخالی (مزوپروس) <sup>۵</sup> است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانو سیلیس در جدول (۲) و تصویر نانوسیلیس مصرفی در شکل (۲) آمده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نانوسیلیس

|   |                 |
|---|-----------------|
| چگالی ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )         | ۲/۴             |
| اندازه ذرات (nm)                          | ۲۰-۳۰           |
| مساحت سطح ویژه ( $\text{m}^2/\text{gr}$ ) | ۲۰۰             |
| خلوص                                      | ۹۹ درصد به بالا |
| $\text{SiO}_2$                            | >99%            |
| Ti  | <120 ppm        |
| Ca  | <70 ppm         |
| Na  | <50 ppm         |
| Fe  | <20 ppm         |



شکل ۲- نانوسیلیس به کار رفته در این تحقیق

که خاک‌هایی که در مرحله اولیه، تراکم‌پذیری زیادی از خود نشان می‌دهند، باید از قابلیت تراکم‌پذیری بالایی در مرحله ثانویه نیز برخوردار باشند.

Gao و همکاران (۲۰۰۷) به ارائه رابطه‌ای میان شاخص تحکیم ثانویه ( $\alpha$ ) و نسبت پیش تحکیم یافتگی پرداختند. خاک رس دارای خاصیت تورم و انقباض بوده و باید این خواص با اضافه کردن مواد افزودنی به آن، مورد بررسی ویژه قرار بگیرد. با توجه به این که ذرات نانو در حد نانومتر است، افزودن مقدار جزئی از این ذرات می‌تواند تأثیرات بسیار زیادی بر روی تغییرات فیزیکی و شیمیایی خاک بگذارد. در این مطالعه به بررسی رفتار خزشی خاک رس اصلاح شده با نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن و ارائه روابطی در جهت تخمین پارامترهای تحکیمی خاک پرداخته شده است. در این پژوهش به بررسی رفتار خزشی خاک رس منبع قرضه سد شهید شاهچراغی پرداخته شده و آزمایش‌هایی برای بررسی رفتار خزشی خاک دست‌خورده، مشابه رفتار یک سازه خاکی، انجام گرفته، همچنین خواص خزشی خاک با ترکیب مواد افزودنی نظیر الیاف پلی‌پروپیلن و نانوسیلیس مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

مواد استفاده شده در این تحقیق، خاک رس منبع قرضه هسته سد شهید شاهچراغی، نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بوده است. روش کار آزمایشگاهی بوده که در ادامه بیان می‌شود.

### ۲-۱- مواد

خاک مورد نظر این تحقیق، از محل قرضه‌ی خاک رس هسته سد شهید شاهچراغی تهیه شده است. برای انجام آزمایش‌های مرتبط با این تحقیق، ابتدا خاک مصرفی از الک ۲۰۰ عبور داده شده و با توجه به این که ۹۵ درصد دانه‌ها از الک ۲۰۰ عبور کرده، بنابراین نوع خاک ریزدانه بوده و جهت تعیین نوع دانه‌بندی آن از آزمایش هیدرومتری استفاده شده است. مشخصات اولیه خاک رس در جدول (۱) و تصویر خاک مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات خاک مصرفی

| مشخصات خاک ریزدانه | مقادیر    | روش           |
|--------------------|-----------|---------------|
| نوع خاک            | CL        | ASTM D2478-11 |
| نام معدنی          | کائولینیت | Das 1979      |
| حد خمیری (PL)      | ۱۷٪       | ASTM D4318    |
| حد روانی (LL)      | ۲۵٪       | ASTM D4318    |
| شاخص خمیری (PI)    | ۸٪        | ASTM D4318    |
| چگالی ویژه         | ۲/۶۷      | ASTM D854     |

است. رینگ محصور کننده دستگاه تحکیم با آب پر شده و به مدت ۲۴ ساعت زمان داده شد تا اشباع شود، این کار برای اشباع کردن نمونه صورت گرفته است. سپس نمونه‌ها تحت بارگذاری تک-مرحله‌ای به مدت چهار روز قرار گرفتند. نمونه‌های دیگری هم به همین منوال برای آزمایش چند مرحله‌ای آماده شدند؛ بعد از آن نمونه‌ها به صورت پله‌ای تحت بارگذاری قرار گرفتند. هر سطح از تنش به مدت ۲۴ ساعت روی نمونه حفظ شد و پس از آن با افزایش بار (دو برابر بار قبلی)، بارگذاری شد. نحوه ساخت نمونه و دستگاه تحکیم در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- نحوه ساخت نمونه و دستگاه تحکیم در آزمایشگاه

برنامه آزمایش‌های آزمایشگاهی در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به جدول (۴)، ۹ نوع نمونه، شامل خاک رس بدون مواد افزودنی، خاک رس با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانوسیلیس و خاک رس با درصدهای ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ درصد الیاف پلی پروپیلن مهیا شد. همچنین از هر نوع به تعداد سه نمونه تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

جدول ۴- برنامه آزمایشات آزمایشگاهی روی خاک سد شهید

| شاه‌چراغی |                    |              |                            |             |
|-----------|--------------------|--------------|----------------------------|-------------|
| کد نمونه  | درصد نانوسیلیس (%) | درصد خاک (%) | درصد الیاف پلی پروپیلن (%) | تعداد نمونه |
| S         | صفر                | ۱۰۰          | -                          | ۳           |
| S-Na0.25% | ۰/۲۵               | ۹۹/۷۵        | -                          | ۳           |
| S-Na0.5%  | ۰/۵                | ۹۹/۵         | -                          | ۳           |
| S-Na1%    | ۱                  | ۹۹           | -                          | ۳           |
| S-Na2%    | ۲                  | ۹۸           | -                          | ۳           |
| S-PP0.25% | -                  | ۹۹/۷۵        | ۰/۲۵                       | ۳           |
| S-PP0.5%  | -                  | ۹۹/۵         | ۰/۵                        | ۳           |
| S-PP1%    | -                  | ۹۹           | ۱                          | ۳           |
| S-PP2%    | -                  | ۹۸           | ۲                          | ۳           |

الیاف پلی پروپیلن مصرفی با توجه به ضایعاتی بودن آن و همین‌طور عدم ایجاد آلودگی زیست‌محیطی در خاک به‌عنوان افزودنی دوم جهت کنترل خزش خاک رسی انتخاب شد. از خواص این ماده می‌توان به مقاومت در برابر ساییدگی، مقاومت در برابر خزش، مقاومت خمشی و کششی بالا و در دسترس بودن آن اشاره داشت. مشخصات الیاف مذکور در جدول (۳) و تصویر الیاف پلی پروپیلن در شکل (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| رنگ ظاهری                        | سفید  |
| نوع الیاف                        | منفرد |
| وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌مترمکعب) | ۱     |
| طول الیاف (میلی‌متر)             | ۱۲    |
| قطر (میکرون)                     | ۲۳    |
| مقاومت کششی (مگاپاسکال)          | ۴۰۰   |
| هدایت الکتریکی                   | پایین |
| هدایت حرارتی                     | پایین |
| مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها  | بالا  |



شکل ۳- الیاف پلی پروپیلن به کار رفته در این تحقیق

## ۲-۲- روش تحقیق

آزمایش اصلی استفاده شده در این تحقیق، آزمایش تحکیم بوده است. این آزمایش، بر اساس استاندارد (ASTM D 2435-90) انجام می‌شود. هدف از انجام آزمایش تحکیم، تعیین پارامترهای مؤثر در پیش‌بینی مقدار نشست و میزان آن در سازه‌های متکی بر خاک‌های رسی است.

در سازه‌های خاکی نظیر کانال‌های آبیاری، سد خاکی و غیره تلاش می‌شود خاک ریزدانه رسی در درصد رطوبت بهینه متراکم شده تا بیشترین سطح مقاومتی حاصل گردد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا موادهای افزودنی شامل نانوسیلیس یا الیاف پلی پروپیلن با رطوبت بهینه (به‌دست آمده از آزمایش تراکم برای هر درصد متفاوت) خاک مخلوط شده و با درصدهای وزنی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد، به خاک اضافه شد. مخلوط خاک، آب و نانوسیلیس بر اساس وزن مخصوص خشک در داخل قالب دستگاه تحکیم در سه لایه ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم شده

و از ۰/۵ درصد به بالا نسبت تخلخل در فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال ۴ درصد، فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال ۱۲ درصد، فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال ۹ درصد و فشار ۸۰۰ کیلوپاسکال ۵ درصد رو به افزایش می‌رود. با افزایش نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد زمان پایان تحکیم اولیه مانند خاک فاقد نانوسیلیس است، اما بعد از آن این زمان کاهش می‌یابد. یعنی تنش وارده توسط اسکلت خاک متحمل و اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر زائل می‌گردد، زیرا طبق نظریه Noll و همکاران (۱۹۹۲)، نفوذپذیری کاهش می‌یابد به دلیل آن که ذرات نانو در بین حفرات خاک رس قرار گرفته است. این امر سبب می‌شود که فشار آب حفره‌ای سریع‌تر جای خود را به تنش مؤثر دهد زیرا مقدار سیال موجود در بین منافذ کاهش یافته و متعاقباً فشار آب حفره‌ای کمتر شده است. تا تنش ۴۰۰ کیلوپاسکال، با افزودن ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد نانوسیلیس به خاک، خاک حالت متراکم‌تر شده و نسبت تخلخل خاک کاهش یافته است. این امر به علت قرار گرفتن ذرات نانو در درون منافذ خاک و افزایش قفل و بست بین دانه‌ها است. دلیل این امر، بار سطحی آن‌ها و سطح ویژه بالا بوده که سبب فعل و انفعالات بین ذره‌ای می‌باشد. اما از ۰/۵ درصد به بالا، تخلخل در خاک افزایش می‌یابد که آن هم می‌تواند از یک طرف به دلیل تجمع و از طرف دیگر به علت وجود تخلخل درون ذره‌ای ذرات نانو باشد که درون سوراخ‌ها به علت جذب و هیدراسیون بالا در طی فرایند تولید، وجود دارد. درصدهای ۱ و ۲ درصد با شیب تندتری در نمودار تخلخل- زمان تغییر می‌یابند اما مقدار ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد همانند سطوح تنش پایین بوده است به همین دلیل در سطح تنش بالاتر (مانند ۴۰۰، ۸۰۰ کیلوپاسکال) روند تغییرات متفاوت است. در این موضوع میزان تخلخل بیشتر از بدون نانوسیلیس تا زمان ۲۴۰ دقیقه بوده، اما بعد از آن تخلخل بیشتری را نمایش می‌دهند. چون خاک مورد تحقیق که خاک نرم بوده است در سطح تنش بالا، ذرات خود دچار تغییراتی می‌شوند که این امر می‌تواند ناشی از ویژگی‌های خود خاک باشد که دلیل به وجود آمدن این حالت می‌شوند.

هنگامی که فشار از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد، کاهش نسبت تخلخل در نمونه بدون مواد افزودنی به اندازه ۵ درصد، با افزودن ۰/۲۵ نانوسیلیس ۷ درصد و حاوی ۰/۵ درصد نانوسیلیس ۹ درصد، مشاهده می‌شود. نمونه خاک حاوی ۱ و ۲ درصد نانوسیلیس، ۲ درصد نسبت تخلخل کاهش می‌یابد، همچنین با اعمال فشار از ۲۰۰ به ۴۰۰ کیلوپاسکال با افزایش نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد، ۱ درصد نسبت تخلخل افزایش می‌یابد و سپس با افزایش نانوسیلیس تا ۲ درصد نسبت تخلخل تا ۱ درصد کاهش می‌یابد. زمانی که فشار از ۴۰۰ به ۸۰۰ کیلوپاسکال افزایش می‌یابد در تمامی نمونه‌ها، کاهش قابل ملاحظه‌ای نسبت تخلخل تا ۲۵ درصد مشاهده شده است.

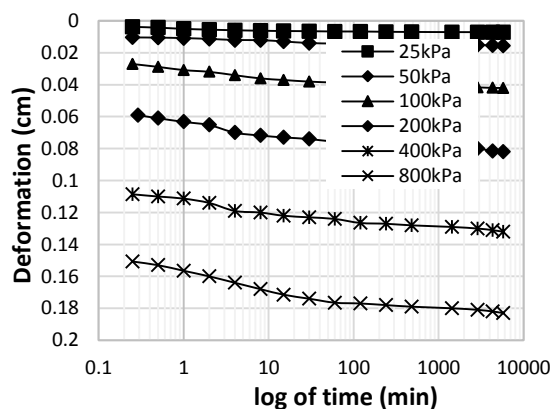
از آنجایی که خطای تکرارپذیری زیاد نبود روند آزمایش‌ها مطابق جدول (۴) پیگیری شده است.

### ۳- نتایج

نتایج آزمایش تحکیم در سه قسمت خاک رس و خاک رس مسلح شده با نانوسیلیس و خاک رس مسلح شده با الیاف پلی‌پروپیلن بررسی شده است.

#### ۳-۱- آزمایش تحکیم روی خاک رس

به منظور بررسی رفتار خزشی خاک بدون مواد افزودنی آزمایش‌های تحکیمی در فشارهای سربارهای قائم مختلف ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۸۰۰ کیلوپاسکال انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها مبنای مقایسه‌ای خواهد داشت. نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۵) نشان داده شده است.



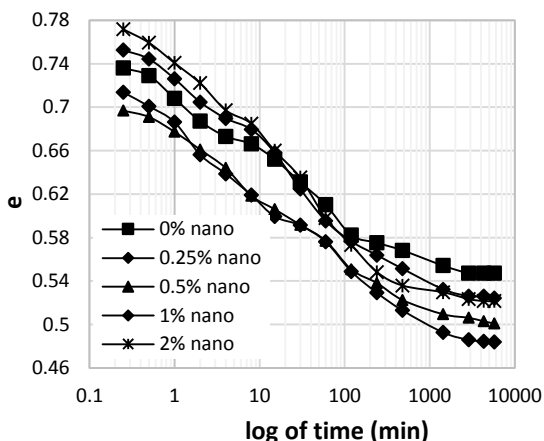
شکل ۵- نمودار نشست- زمان خاک بدون ماده افزودنی با اعمال فشارهای مختلف

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای نمودارهای رسم شده شیب سرعت بیشتری دارد اما بعد از ۲۴ ساعت تغییر شکل‌ها تقریباً ثابت شده و در انتها، شیب نمودارها کاهش یافته و میل به افقی شدن می‌یابند. با افزایش فشار سربار قائم در آزمایشات تحکیم نرخ افزایش نشست افزایش یافته است. همچنین شیب نمودار با اعمال فشار بیشتر بزرگتر می‌شود در نتیجه ضریب تحکیم ثانویه افزایش می‌یابد.

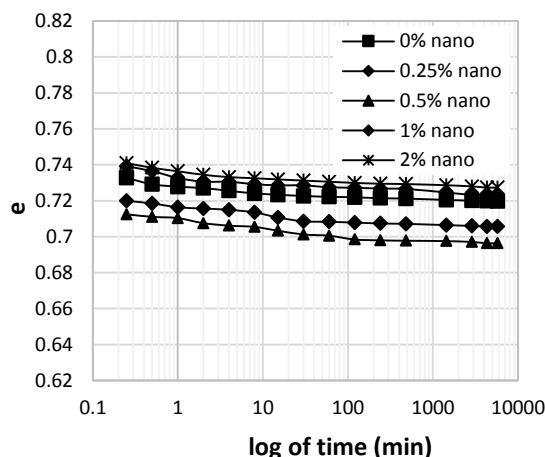
#### ۳-۲- تغییرات تحکیم خاک رس بهبود یافته با درصدهای

##### متفاوت نانوسیلیس

بر اساس نتایج شکل‌های (۶)، (۷)، (۸) و (۹)، واکنش خاک تحت تأثیر درصدهای متفاوت نانوسیلیس و فشارهای سربار متفاوت بررسی شده است. با اعمال فشارهای متفاوت با افزایش نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد وزنی، مقدار تخلخل خاک کاهش یافته

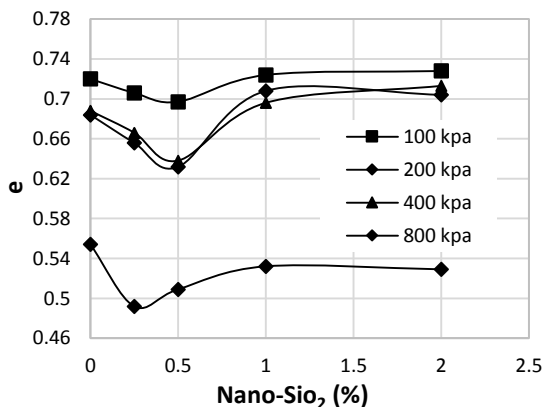


شکل ۹- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و نانوسیلیس تحت فشار ۸۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۶- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و نانوسیلیس تحت فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال

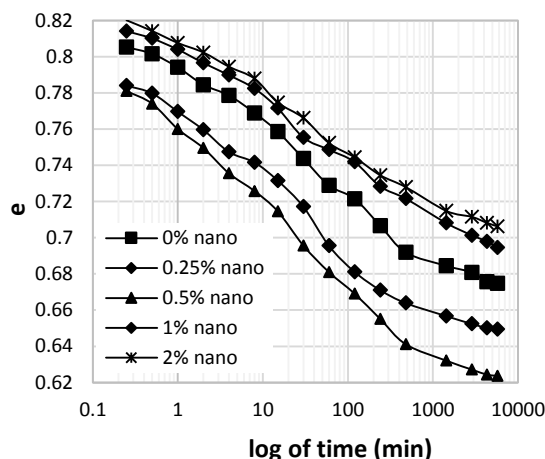
مطابق شکل (۱۰) نقطه بهینه برای نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد بوده و بعد از آن نسبت تخلخل افزایش یافته است. این بدان معناست که با افزودن نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد وزنی نسبت تخلخل کاهش چشمگیری دارد و در نتیجه باعث کاهش خاصیت خزشی خاک می‌شود و سپس تغییرات نسبت تخلخل مجدد افزایش می‌یابد با افزودن ۱ تا ۲ درصد نانوسیلیس روند تغییرات نسبت تخلخل ثابت می‌شود.



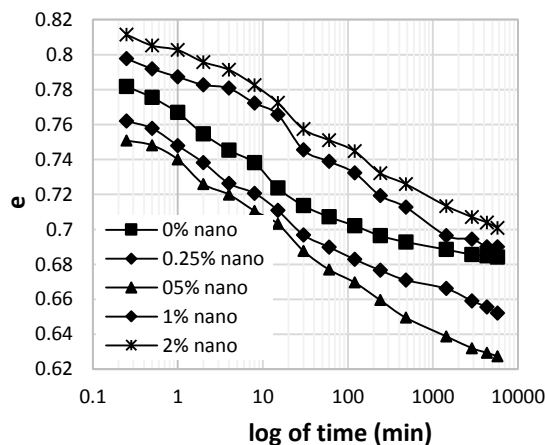
شکل ۱۰- نمودار نسبت تخلخل- درصد مواد افزودنی (نانو) با اعمال فشارهای مختلف

### ۳-۳- تغییرات تحکیم خاک رس مسلح شده با درصدهای متفاوت الیاف پلی پروپیلن

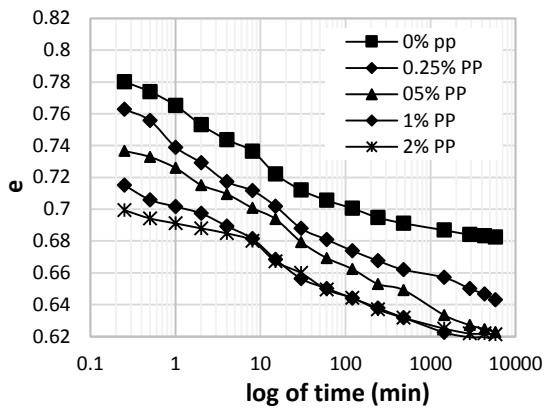
شکل‌های (۱۱) تا (۱۴)، نمودار نسبت تخلخل در برابر زمان آزمایش خزشی تک مرحله‌ای، روی خاک تسلیح شده با درصدهای مختلف الیاف پلی پروپیلن در فشارهای سربار ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوپاسکال را نمایش می‌دهند. بر اساس نتایج، با افزایش پلی پروپین تا ۲ درصد، مقدار تخلخل خاک روند کاهشی را طی



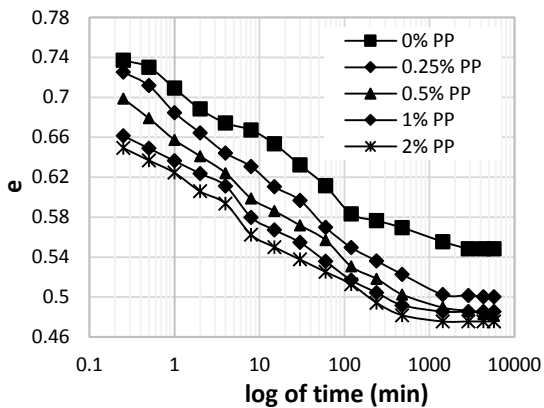
شکل ۷- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و نانوسیلیس تحت فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال



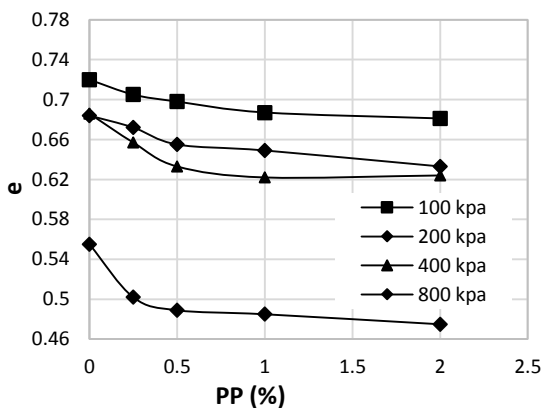
شکل ۸- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و نانوسیلیس تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۳- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و الیاف پلی پروپیلن تحت فشار ۴۰۰ کیلوپاسکال



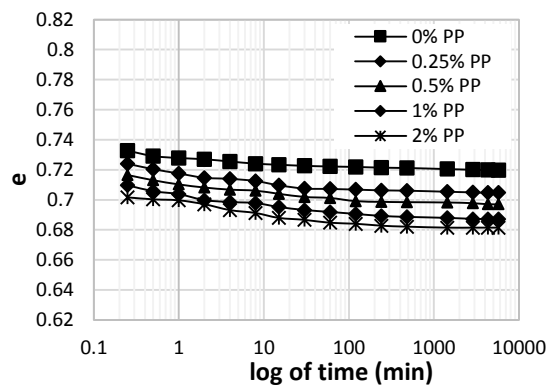
شکل ۱۴- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و الیاف پلی پروپیلن تحت فشار ۸۰۰ کیلوپاسکال



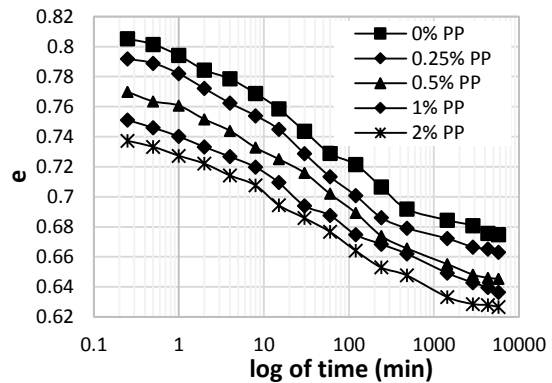
شکل ۱۵- نمودار نسبت تخلخل- درصد الیاف پلی پروپیلن تحت فشارهای سربار مختلف

جدول (۵) و (۶) به ترتیب، نتایج کلی تأثیر نانوسیلیس و الیاف پلی پروپیلن را نشان می‌دهد.

می‌نماید که این روند کاهشی برای حالتی که از نانوسیلیس استفاده شده است مقدار ۰/۵ درصد است و از این مقدار به بعد روند افزایشی نسبت تخلخل مشاهده می‌شود و با افزایش تنش از ۱۰۰ تا ۸۰۰ کیلوپاسکال نسبت تخلخل روند کاهشی می‌یابد، به طوریکه با افزایش تنش از ۴۰۰ به ۸۰۰ کیلوپاسکال کاهش قابل توجهی تا ۲۳ درصد مشاهده شده است. مطابق شکل (۱۱)، با افزایش درصد الیاف پلی پروپیلن مقادیر نسبت تخلخل نسبت به حالت‌های دیگر الیاف بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار از ۱۰۰ به ۲۰۰ کیلوپاسکال مقادیر نشست بیشتر شده و همچنان تأثیر الیاف ۲ درصد بیشتر از دیگر موارد است.



شکل ۱۱- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و الیاف پلی پروپیلن تحت فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال



شکل ۱۲- نمودار نسبت تخلخل- زمان مخلوط خاک و الیاف پلی پروپیلن تحت فشار ۲۰۰ کیلوپاسکال

مطابق شکل (۱۵) نقطه بهینه برای الیاف پلی پروپیلن تا ۰/۵ درصد بوده و بعد از آن تغییرات ثابت می‌شود. این بدان معناست که با افزودن الیاف پلی پروپیلن تا ۰/۵ درصد نسبت تخلخل کاهش چشمگیری دارد و سپس تغییرات نسبت تخلخل با روند ثابت کاهش می‌یابد در نتیجه خاصیت خزشی خاک مورد مطالعه نیز کم می‌شود.

جدول ۵- نتایج کلی آزمایش نشست ثانویه روی خاک سد شهید شاه چراغی با استفاده از افزودنی نانوسیلیس

| $\frac{C_{\alpha}}{C_c}$ | پارامتر $C_{\alpha}$ | پارامتر CC | نسبت تخلخل<br>نهایی | نسبت تخلخل در انتهای<br>تحکیم اولیه | نسبت تخلخل<br>اولیه | نانوسیلیس (%) | سربرار اعمالی<br>(کیلوپاسکال) |
|--------------------------|----------------------|------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------|-------------------------------|
| ۰/۰۱۰۰                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۵۲۹    | ۰/۷۱۹               | ۰/۷۲۱                               | ۰/۷۳۲               | صفر           | ۱۰۰                           |
| ۰/۰۰۸۴                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۶۲۵    | ۰/۷۰۵               | ۰/۷۰۷                               | ۰/۷۲۰               | ۰/۲۵          |                               |
| ۰/۰۰۷۸                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۶۷۳    | ۰/۶۹۶               | ۰/۶۹۸                               | ۰/۷۱۲               | ۰/۵           |                               |
| ۰/۰۱۳۸                   | ۰/۰۰۰۸۰              | ۰/۰۰۵۷۷    | ۰/۷۲۴               | ۰/۷۲۷                               | ۰/۷۳۹               | ۱             |                               |
| ۰/۰۱۵۱                   | ۰/۰۰۰۸۰              | ۰/۰۰۵۲۹    | ۰/۷۲۷               | ۰/۷۳۰                               | ۰/۷۴۰               | ۲             |                               |
| ۰/۰۳۰۹                   | ۰/۰۱۲۵               | ۰/۰۴۰۴     | ۰/۶۷۴               | ۰/۷۲۱                               | ۰/۸۰۵               | صفر           | ۲۰۰                           |
| ۰/۰۲۴۲                   | ۰/۰۱۲۰               | ۰/۰۴۹۵     | ۰/۶۴۹               | ۰/۶۸۱                               | ۰/۷۸۴               | ۰/۲۵          |                               |
| ۰/۰۲۲۶                   | ۰/۰۱۲۲               | ۰/۰۵۳۹     | ۰/۶۲۳               | ۰/۶۶۹                               | ۰/۷۸۱               | ۰/۵           |                               |
| ۰/۰۳۴۳                   | ۰/۰۱۱۹               | ۰/۰۳۴۶     | ۰/۶۹۴               | ۰/۷۴۲                               | ۰/۸۱۴               | ۱             |                               |
| ۰/۰۲۷۶                   | ۰/۰۱۰۱               | ۰/۰۳۶۵     | ۰/۷۰۶               | ۰/۷۴۴                               | ۰/۸۲۰               | ۲             |                               |
| ۰/۰۱۲۶                   | ۰/۰۰۴۸۰              | ۰/۰۳۸۰     | ۰/۶۸۴               | ۰/۷۰۲                               | ۰/۷۸۱               | صفر           | ۴۰۰                           |
| ۰/۰۱۹۵                   | ۰/۰۰۸۲۶              | ۰/۰۴۲۳     | ۰/۶۵۲               | ۰/۶۸۳                               | ۰/۷۶۱               | ۰/۲۵          |                               |
| ۰/۰۲۹۶                   | ۰/۰۱۱۴               | ۰/۰۳۸۵     | ۰/۶۲۷               | ۰/۶۷۰                               | ۰/۷۵۰               | ۰/۵           |                               |
| ۰/۰۳۶۵                   | ۰/۰۱۱۴               | ۰/۰۳۱۲     | ۰/۶۸۹               | ۰/۷۳۲                               | ۰/۷۹۷               | ۱             |                               |
| ۰/۰۳۷۸                   | ۰/۰۱۲۰               | ۰/۰۳۱۷     | ۰/۷۰                | ۰/۷۴۵                               | ۰/۸۱۱               | ۲             |                               |
| ۰/۰۱۲۵                   | ۰/۰۰۹۳۳              | ۰/۰۷۴۱     | ۰/۵۴۷               | ۰/۵۸۲                               | ۰/۷۳۶               | صفر           | ۸۰۰                           |
| ۰/۰۲۱۴                   | ۰/۰۱۷۰               | ۰/۰۷۹۴     | ۰/۴۸۴               | ۰/۵۴۸                               | ۰/۷۱۳               | ۰/۲۵          |                               |
| ۰/۰۲۰۲                   | ۰/۰۱۴۳               | ۰/۰۷۰۷     | ۰/۵۰۰               | ۰/۵۵۰                               | ۰/۶۹۷               | ۰/۵           |                               |
| ۰/۰۱۶۲                   | ۰/۰۱۳۸               | ۰/۰۸۴۷     | ۰/۵۲۴               | ۰/۵۷۶                               | ۰/۷۵۲               | ۱             |                               |
| ۰/۰۱۴۲                   | ۰/۰۱۳۶               | ۰/۰۹۵۲     | ۰/۵۲۲               | ۰/۵۷۳                               | ۰/۷۷۱               | ۲             |                               |

جدول ۶- نتایج کلی آزمایش نشست ثانویه روی خاک سد شهید شاه چراغی با استفاده از افزودنی پلی پروپیلن

| $\frac{C_{\alpha}}{C_c}$ | پارامتر $C_{\alpha}$ | پارامتر CC | نسبت تخلخل<br>نهایی | نسبت تخلخل در انتهای<br>تحکیم اولیه | نسبت تخلخل<br>اولیه | پلی پروپیلن (%) | سربرار اعمالی<br>(کیلوپاسکال) |
|--------------------------|----------------------|------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------|
| ۰/۰۱۱۴                   | ۰/۰۰۰۵۵              | ۰/۰۰۴۸۱    | ۰/۷۱۹               | ۰/۷۲۲                               | ۰/۷۳۲               | صفر             | ۱۰۰                           |
| ۰/۰۰۶۱                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۸۶۶    | ۰/۷۰۴               | ۰/۷۰۶                               | ۰/۷۲۴               | ۰/۲۵            |                               |
| ۰/۰۰۶۴                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۸۱۸    | ۰/۶۹۷               | ۰/۶۹۹                               | ۰/۷۱۶               | ۰/۵             |                               |
| ۰/۰۰۵۷                   | ۰/۰۰۰۵۳              | ۰/۰۰۹۱۴    | ۰/۶۸۸               | ۰/۶۹۰                               | ۰/۷۰۹               | ۱               |                               |
| ۰/۰۰۹۶                   | ۰/۰۰۰۷۹              | ۰/۰۰۸۱۸    | ۰/۶۸۱               | ۰/۶۸۴                               | ۰/۷۰۱               | ۲               |                               |
| ۰/۰۳۰۹                   | ۰/۰۱۲۵               | ۰/۰۴۰۴     | ۰/۶۷۴               | ۰/۷۲۱                               | ۰/۸۰۵               | صفر             | ۲۰۰                           |
| ۰/۰۲۶۷                   | ۰/۰۱۱۷               | ۰/۰۴۳۷     | ۰/۶۶۳               | ۰/۷۰۰                               | ۰/۷۹۱               | ۰/۲۵            |                               |
| ۰/۰۳۴۳                   | ۰/۰۱۱۷               | ۰/۰۳۴۱     | ۰/۶۴۵               | ۰/۶۸۹                               | ۰/۷۶                | ۰/۵             |                               |
| ۰/۰۲۷۲                   | ۰/۰۱۰۱               | ۰/۰۳۷۰     | ۰/۶۳۶               | ۰/۶۷۴                               | ۰/۷۵۱               | ۱               |                               |
| ۰/۰۲۸۷                   | ۰/۰۱۰۱               | ۰/۰۳۵۱     | ۰/۶۲۶               | ۰/۶۶۴                               | ۰/۷۳۷               | ۲               |                               |
| ۰/۰۱۲۴                   | ۰/۰۰۴۷۹              | ۰/۰۳۸۵     | ۰/۶۸۲               | ۰/۷۰۰                               | ۰/۷۸۰               | صفر             | ۴۰۰                           |
| ۰/۰۱۸۶                   | ۰/۰۰۷۹۹              | ۰/۰۴۲۸     | ۰/۶۴۳               | ۰/۶۷۳                               | ۰/۷۶۲               | ۰/۲۵            |                               |
| ۰/۰۲۹۷                   | ۰/۰۱۰۶               | ۰/۰۳۵۶     | ۰/۶۲۲               | ۰/۶۶۲                               | ۰/۷۳۶               | ۰/۵             |                               |
| ۰/۰۲۰۰                   | ۰/۰۰۶۹۳              | ۰/۰۳۴۶     | ۰/۶۱۷               | ۰/۶۴۳                               | ۰/۷۱۵               | ۱               |                               |
| ۰/۰۲۳۲                   | ۰/۰۰۶۱۳              | ۰/۰۲۶۴     | ۰/۶۲۱               | ۰/۶۴۴                               | ۰/۶۹۹               | ۲               |                               |
| ۰/۰۱۲۵                   | ۰/۰۰۹۳۳              | ۰/۰۷۴۱     | ۰/۵۴۸               | ۰/۵۸۳                               | ۰/۷۳۷               | صفر             | ۸۰۰                           |
| ۰/۰۱۵۳                   | ۰/۰۱۳۰               | ۰/۰۸۴۷     | ۰/۵                 | ۰/۵۴۹                               | ۰/۷۲۵               | ۰/۲۵            |                               |
| ۰/۰۱۶۴                   | ۰/۰۱۳۳               | ۰/۰۸۰۸     | ۰/۴۸۰               | ۰/۵۳۰                               | ۰/۶۹۸               | ۰/۵             |                               |
| ۰/۰۱۱۸                   | ۰/۰۰۸۲۶              | ۰/۰۶۹۷     | ۰/۴۸۵               | ۰/۵۱۶                               | ۰/۶۶۱               | ۱               |                               |
| ۰/۰۱۴۹                   | ۰/۰۰۹۸۶              | ۰/۰۶۵۹     | ۰/۴۷۵               | ۰/۵۱۲                               | ۰/۶۴۹               | ۲               |                               |



تحکیم ثانویه افزایش می‌یابد اما بعد از آن روند کاهشی طی می‌کند. یعنی مقدار خزش با افزودن ۲ درصد نانوسیلیس کاهش می‌یابد و همچنین مقدار خزش با افزایش سربار افزایش می‌یابد. (۳) با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا ۰/۵ درصد مقدار ضریب تحکیم ثانویه افزایش می‌یابد و سپس روند کاهشی طی می‌کند. با افزایش الیاف پلی‌پروپیلن تا ۲ درصد به خاک مقدار خزش کاهش چشمگیری دارد. (۴) با افزایش پلی‌پروپیلن تا ۲ درصد، مقدار تخلخل خاک روند کاهشی را طی می‌نماید که این روند کاهشی برای حالتی که از نانوسیلیس استفاده شده است مقدار ۰/۵ درصد است و از این مقدار به بعد روند افزایشی تخلخل را شاهد بودیم. (۵) بر اساس نتایج حاصله از آزمایش‌ها مشخص شد خاک رس مورد استفاده در این تحقیق خاصیت خزشی دارد که با استفاده از افزودنی نانوسیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن می‌توان اثرات دراز مدت خزش را کاهش داد.

#### ۵- مراجع

- Al-Shamrani MA, "Application of the  $C\alpha/Cc$  concept to secondary compression of sabkha soils", Canadian Geotechnical Journal, 1968, Vol. 35, 15-26 <https://doi.org/10.1139/t97-053>
- Amu OO, Fajobi AB, Oke BO, "Effect of eggshell powder on the stabilizing potential of lime on an expansive clay soil", Journal of Applied Sciences, 2005, 5 (8), 1474-1478. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.1474.1478>
- ASTM, "Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils", Annual Book of ASTM Standards, D-2435-90, 04-08: 313-323, 1993a.
- Bell F, "Lime stabilization of clay minerals and soils", Engineering geology, 1996, 42 (4), 223-237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bibak H, Khazaei J, Moayed H, "Investigating the effect of a new industrial waste on strengthening the soft clayey soil", Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38, 1165-1183. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01079-6>
- Gao Y, Zhu H, Yang X, "Application of a relationship between  $c\alpha$  and  $ocr^*$  in 1-d compression analysis for clays", ASCE, Geoshanghai Conference, 2007, 42-47. [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)4](https://doi.org/10.1061/40862(194)4)
- Hassan WHW, Rashid ASA, Latifi N, Horpibulsuk S, Borhamdin S, "Strength and morphological characteristics of organic soil stabilized with magnesium chloride", Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 50,454-459, 2017. <https://doi.org/10.1144/qjgegh2016-124>
- Keramatikerman M, Chegenizadeh A, Pu H, "Effect of atrazine contamination on compressibility and permeability characteristics of clay", 2017, Geotechnical Testing Journal, 2017, 40 (6). <https://doi.org/10.1520/GTJ20160270>

Walker و Raymond (۱۹۶۸) با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی روی رس‌های حساس نشان دادند در تمامی محدوده‌های تنش، نرخ تحکیم ثانویه در ارتباطی خطی با شاخص تراکم می‌باشد. آن‌ها مقدار متوسط نسبت  $C\alpha/Cc$  را حدود ۰/۰۲۵ پیشنهاد نمودند.

Mesri و Godlewski (۱۹۷۷) در ادامه مطالعات خود، رابطه میان  $Cc$  و  $C\alpha$  را دنبال نمودند و این‌طور بیان کردند: "هیچ دلیلی برای وجود تفاوت میان مکانیزم تغییر حجم در مراحل اولیه و ثانویه تحکیم یافت نشد" و نتیجه گرفتند که مکانیزم تغییر حجم-ویسکوز یا غیر ویسکوز-عکس‌العمل زنجیره‌ای و در نتیجه زمان بر می‌باشد. آن‌ها نسبت را برای ۲۲ نهشته طبیعی خاک محاسبه نموده و مقدار این نسبت را در محدوده ۰/۰۲۵ تا ۰/۱ با مقادیر بالاتر برای خاک‌های بسیار آلی پیشنهاد نمودند.

Al-Shamrani (۱۹۸۸) برای خاک منطقه سیخا، نسبت  $C\alpha/Cc$  را به‌دست آورد. براساس پیشنهاد مصری (۱۹۷۷)، این نسبت باید برابر  $(0.04 \pm 0.01)$  یعنی در محدوده (۰/۰۳ تا ۰/۰۵) قرار می‌گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت  $C\alpha/Cc$  برای خاک مورد مطالعه در محدوده پیش‌بینی شده قرار دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پدیده خزش در خاک‌های رسی در ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارد و از این پدیده به‌عنوان تحکیم ثانویه یاد شده است و در مواردی که زمان و عوامل مؤثر بر آن دخالت دارند، باید به‌طور دقیق بررسی گردد. زیرا زمانی که نشست در سازه رخ می‌دهد مشکلات زیادی از قبیل به‌وجود آمدن ترک، افزایش تغییرشکل و تنش ایجاد می‌شود که در نهایت از کارایی، بهره‌برداری و مدت عمر مفید سازه کاسته می‌گردد.

در این مطالعه به بررسی تأثیر استفاده از مواد افزودنی روی رفتار خزشی خاک رس سد شهید شاهچراغی دامغان و ارائه روابطی در جهت تخمین پارامترهای تحکیمی خاک پرداخته شده است.

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش به قرار زیر است:

(۱) در خاک خالص بدون مواد افزودنی ضریب تحکیم ثانویه تا بار اعمالی ۲۰۰ کیلو پاسکال افزایش می‌یابد و سپس مقدار ضریب تحکیم ثانویه کم می‌شود. این بدین معنی است که خزش در بار اعمالی ۲۰۰ کیلو پاسکال بیشتر از سایر بارهای اعمالی است.

(۲) با افزایش نانوسیلیس تا ۰/۵ درصد زمان پایان تحکیم اولیه مانند خاک فاقد نانوسیلیس است، اما بعد از آن این زمان کاهش می‌یابد. یعنی تنش وارده توسط اسکلت خاک متحمل و اضافه فشار آب حفره‌ای زودتر زائل می‌گردد. همچنین مقدار ضریب

- Latifi N, Vahedifard F, Ghazanfari E, Horpibulsuk S, Marto A, Williams J, "Sustainable improvement of clays using low-carbon nontraditional additive", *International Journal of Geomechanics*, 2017, 18 (3), 04017162.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001086](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001086)
- Mesri G and Godlewski PM, "Time and stress-compressibility interrelationship", *ASCE, Journal of the Geotechnical Engineering*, 1977, 103 (5), 417-430. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000421>
- Mesri G, "Coefficient of secondary compression", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, American Society of Civil Engineering*, 1973, 99, 123-137.  
<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001840>
- Mitchell JK, "Soil improvement-state-of-the-art report", *The 10<sup>th</sup> international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm, 1981, 4, 506-565.
- Noll MR, Bartlett C, Dochat TM, "In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica", *National Outdoor Action Conference*, Las Vegas, NV, 1992, 57-443.
- Tabarsa A, Latifi N, Meehan CL, Manahiloh KN, "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay-A sustainable material for construction", *Construction and Building Materials*, 2018, 158, 454-463.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096>
- Vakili MV, Chegenizadeh A, Nikraz H, Keramatikerman M, "Investigation on shear strength of stabilised clay using cement, sodium silicate and slag", *Applied Clay Science*, 2016, 124, 243-251.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Walker LK, Raymond GP, "The prediction of consolidation rate in a cemented clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 1968, 5 (4), 192-216.  
<https://doi.org/10.1139/t68-022>
- Zhang J, "Strength and consolidation properties of clay modified by nano bentonite", *Ferroelectrics*, 2021, 580 (1), 143-158.  
<https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1905735>

## EXTENDED ABSTRACT

# Improving the Creep Properties of Modified Clay with Nanosilica and Polypropylene Fibers (Case Study: Shahid Shahcheraghi Dam Central Borrow Pits)

Fatemeh Mirnezhad, Abdolhosein Haddad\*, Adel Asakare

Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 27 May 2022; Review: 18 August 2022; Accepted: 01 October 2022

---

### Keywords:

Creep behavior of soft clay, Consolidation test, Nanosilica, Polypropylene fibers, Shahid shahcheraghi dam central borrow pits.

---

## 1. Introduction

Long-time Settlements or creep means the gradual increase in deformation of the soil over time, which is subjected to a constant load. The phenomenon of creep is very important in geotechnics and it is carefully investigated in cases where time and factors affecting it are involved, because when settlement occurs in the structure, many problems such as creating cracks, increase in deformation and stress are created, which , reduces the efficiency, utilization and useful life of the structure. Modifying the behavior of soil by using different additives is one of the important issues for the progress of researchers in civil engineering. Common additives such as lime, cement, bitumen, fly ash, wood ash, copper slag, iron slag, etc. have been investigated in previous studies, and nano and polymer materials, whose use in other branches of engineering science has led to fundamental changes and have unique characteristics, have been more interested in geotechnical engineering in recent years.

## 2. Methodology

The main test used in this research was the consolidation test. This test is performed according to the standard (ASTM D 2435-90). The program of laboratory tests of 9 types of samples, including clay without additives, clay with 0.25, 0.5, 1 and 2% of nanosilica and clay with 0.25, 0.5, 1 and 2% of polypropylene fibers were prepared. Also, 3 samples of each type were prepared and tested.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Consolidation test on clay

At the beginning of the graphs, the slope is steeper, but after 24 hours, the deformations are almost fixed, and at the end, the slope of the graphs decreases and tends to become horizontal. With the increase of vertical overhead pressure in consolidation tests, the rate of increase of settlement increases. Also, the slope of the graph increases with applying pressure, as a result of which the secondary consolidation coefficient increases.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: f.mirnejad20@gmail.com (Fatemeh Mirnezhad), haddad@semnan.ac.ir (Abdolhosein Hadad), asakareh@semnan.ac.ir (Adel Asakare).

### 3.2. Nanosilica

By applying different pressures with the increase of nanosilica up to 0.5 wt%, the amount of soil porosity is reduced and from 0.5% to above, the porosity ratio is 4% at 100kPa pressure, 12% at 200kPa pressure, 9% at 400kPa pressure and 5% at 800kPa pressure. By adding 0.25 and 0.5 percent of nanosilica to the soil, up to the stress of 400kPa, the soil became denser and the soil porosity ratio decreased. The percentages of 1 and 2% change with a steeper slope in the porosity-time graph, but the values of 0.25 and 0.5% were the same as the low stress levels, that is why the change process is different at higher stress levels (such as 400, 800kPa). When the pressure increases from 100 to 200kPa, the reduction of the porosity ratio is observed in the sample without additives as much as 5%, with the addition of 0.25% nanosilica 7% and containing 0.5% nanosilica 9%. In the soil sample containing 1 and 2% of nanosilica, the porosity ratio decreases by 2%, also by applying pressure from 200 to 400 kilopascals with the increase of nanosilica to 0.5%, the porosity ratio increases by 1% and then by increasing the nanosilica to 2% of the porosity ratio it is reduced to 1%. When the pressure increases from 400 to 800kPa in all samples, a significant decrease in the porosity ratio is observed up to 25%.

### 3.3. Polypropylene fibers

According to the obtained results, with the increase of polypropylene up to 2%, the porosity of the soil goes through a decreasing trend, and this decreasing trend is 0.5% for the case where nanosilica is used, and from this value onwards, the increasing trend of the porosity ratio is observed. As the stress increases from 100 to 800kPa, the porosity ratio decreases, so that a significant decrease of 23% has been observed with the increase of stress from 400 to 800kPa.

With the increase in the percentage of polypropylene fibers, the values of the porosity ratio decrease more than other types of fibers. Also, with the increase of overhead stress from 100 to 200 kilopascals, the values of settlement increased and still the effect of fibers is 2% more than other cases. The optimal point for polypropylene fibers is up to 0.5% and after that the changes are fixed.

## 4. Conclusions

The results obtained in this research are as follows:

- 1) In pure soil without additives, the secondary consolidation coefficient increases up to the applied load of 200kPa, and then the value of the secondary consolidation coefficient decreases. This means that the creep at the applied load of 200kPa is more than the other applied loads.
- 2) With the increase of nanosilica up to 0.5%, the initial consolidation time is similar to the soil without nanosilica, but after that process, this time decreases. This means that the stress caused by the tolerant soil skeleton and excess pore water pressure will be reduced sooner. Also, the value of the secondary consolidation coefficient increases, but then it goes down. That is, the amount of creep decreases with the addition of 2% nanosilica, and also the amount of creep increases with the increase of overhead.
- 3) With the increase of polypropylene fibers up to 0.5%, the value of the secondary consolidation coefficient, increases and then goes on a decreasing trend. By adding polypropylene fibers up to 2% to the soil, the amount of creep decreases significantly.
- 4) With the increase of polypropylene up to 2%, the amount of soil porosity goes through a decreasing process, which is a decreasing process for the case in which nanosilica is used. Its value is equal to 0.5% and from this value onwards, we saw the increasing trend of porosity.
- 5) Based on the results obtained from the experiments, it was found that the clay used in this research has a creeping property, and the long-term effects of creeping can be reduced by using nanosilica and polypropylene fibers.

## 5. References

- Amu OO, Fajobi AB, Oke BO, "Effect of Eggshell Powder on the Stabilizing Potential of Lime on an Expansive Clay Soil", *Journal of Applied Sciences*, 2005, 5 (8), 1474-1478.  
<https://doi.org/10.3923/jas.2005.1474.1478>
- Bibak H, Khazaei J, Moayedi H, "Investigating the Effect of a New Industrial Waste on Strengthening the Soft Clayey Soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38, 1165-1183.  
<https://doi.org/10.1007/s10706-019-01079-6>
- Gao Y, Zhu H and Yang X, "Application of a Relationship between  $C\alpha$  and  $OCR^*$  in 1-D Compression Analysis for Clays", *ASCE, Geoshanghai Conference*, 2007, 42-47. [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)4](https://doi.org/10.1061/40862(194)4)

- Hassan WHW, Rashid ASA, Latifi N, Horpibulsuk S, Borhamdin S, "Strength and morphological characteristics of organic soil stabilized with magnesium chloride", *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50,454-459, 2017. <https://doi.org/10.1144/qjegh2016-124>
- Tabarsa A, Latifi N, Meehan CL, Manahiloh KN, "Laboratory investigation and field evaluation of loess improvement using nanoclay-A sustainable material for construction", *Construction Building Materials*, 2018, 158, 454-463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.096>
- Vakili MV, Chegenizadeh A, Nikraz H, Keramatikerman M, "Investigation on shear strength of stabilized clay using cement, sodium silicate and slag", *Applied Clay Science*, 2016, 124, 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.02.019>
- Zhang J, "Strength and consolidation properties of clay modified by nano bentonite", *Ferroelectrics*, 2021, 580 (1), 143-158. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1905735>