مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۷)
دوره‌ی ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۱۲۳-۱۲۸، (یادداشت فنی)

Research Note

مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیرافزودنی نانوسیلیس در فرسایش داخلی خاک‌های واگرا

سید محمدعلی زمردیان * **(دانشیار)**
بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز
مصطفی مومن (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اصفهان

پدیده‌ی واگرایی باعث شکل‌گیری پدیده‌ی پایپینگ یا فرسایش داخلی در سدهای خاکی شده و درنهایت منجر به تخریب آن می‌شود. گستره‌ی وسیع خاک‌های واگرا، همچنین غیراقتصادی بودن جاگزینی منابع قرضه‌ی واگرا با منابع غیر واگرا، اصلاح خاک‌های واگرا را ضروری می‌سازد. از جمله افزودنی‌های شیمیایی جهت تثبیت خاک واگرا، می‌توان به نانوسیلیس اشاره کرد. در پژوهش حاضر، از آزمایش فرسایش حفره (HET) استفاده و با افزودن نانوسیلیس به نمونه‌ی خاک واگرا، فرسایش‌پذیری خاک با درنظرگرفتن دو متغیر زمان عمل‌آوری در دوره‌های ۱، ۷ و ۱۴ روزه و درصد وزنی ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس ارزیابی شده است. طبق نتایج، فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا با نانوسیلیس در درصدهای ۲ و ۳ نسبت به ۱٪، ۲ تا ۱۴ درصد افزایش یافته و با افزایش دوره‌ی زمانی، باعث عملکرد بهتر نانوسیلیس و افزایش ۴ تا ۷ درصدی شاخص نرخ فرسایش در خاک‌های واگرا شده است.

واژگان کلیدی: خاک واگرا، نانوسیلیس، فرسایش داخلی، آزمایش فرسایش حفره، زمان عمل‌آوری.

mzomorod@shirazu.ac.ir
mostafamomen95@yahoo.com

۱. مقدمه

واگرایی، یک پدیده‌ی پیش‌رونده است که از یک نقطه با تمرکز جریان آب شروع می‌شود و به‌تدریج گسترش می‌یابد. نقطه‌ی شروع پدیده‌ی واگرایی می‌تواند ترک‌های حاصل از انقباض، نشست نامساوی و یا ترک‌های هیدرولیکی باشد. پدیده‌ی واگرایی و اهمیت شناخت آن در طرح‌هایی نظیر سدهای خاکی و کانال‌های آب‌رسانی که تمرکز فشار آب در داخل خاک وجود دارد، اهمیت بسیار زیادی دارد.[۱] آزمایش هیدرومتری دوگانه یا واگرایی، آزمایش سوراخ سوزنی یا پین هول و آزمایش‌های شیمیایی از جمله روش‌های شناسایی خاک‌های واگرا در آزمایشگاه هستند و همچنین به آزمایش‌های دیگری، مانند: آزمایش میزان پراکندگی، آزمایش استوانه‌ی چرخان، آزمایش فلوم، آزمایش شناخت کانی‌های رس و آزمایش فیلتر می‌توان اشاره کرد.[۲]

همچنین آزمایش کلوخه‌ی خاک یا کرامب از جمله روش‌های شناسایی خاک‌های واگرا در محل است که به ۴ درجه‌بندی: بدون واکنش، واکنش خفیف، واکنش متوسط، و واکنش شدید (در واکنش شدید ذرات کلوئیدی تماماً کف ظرف را می‌پوشانند) تقسیم می‌شود.[۳] شناسایی خاک‌های واگرا به دو صورت شناسایی در محل و شناسایی در آزمایشگاه انجام می‌پذیرد. برای شناسایی خاک‌های واگرا در محل و صحرا باید از شواهد سطحی و تجربی استفاده کرد. فرسایش سطحی ایجاد شده توسط آب باران و شسته شدن خاک‌های مجاور و رودخانه‌ها نیز شواهد خوبی برای واگرایی خاک هستند.[۴] گستره‌ی وسیع خاک‌های واگرا در ایران و جهان، پتانسیل زیاد احداث سازه‌های آبی در مناطق مذکور، صدمات وارد به آن‌ها در اثر استفاده از خاک‌های واگرا و همچنین غیراقتصادی بودن جایگزینی منابع قرضه‌ی واگرا با منابع غیر واگرا، اصلاح خاک‌های واگرا را ضروری می‌سازد.[۵] نخستین بار در استرالیا، مسئله‌ی فرسایش و ایجاد حفره‌های بزرگ در بسیاری از سدهای خاکی کوتاه باعث شد انجمن حفاظت خاک استرالیا، مطالعات گسترده‌یی جهت حفاظت و جلوگیری از فرسایش ناشی از خاک‌های واگرا انجام دهند.[۶]

در راستای بررسی فرسایش داخلی و اصلاح خاک‌های مستعد فرسایش، نکته‌ی حائز اهمیت استفاده از تثبیت‌کننده‌های مدرن و ایمن به جای تثبیت‌کننده‌های سنتی و مضر است. قابل ذکر است که تثبیت‌کننده‌های مدرن برخلاف نوع سنتی آن‌ها، هیچ‌گونه تأثیر مخربی در محیط زیست و در ساختار درونی خاک و سازه‌های ساخته شده در مجاورت خاک نخواهند گذاشت.[۷] تثبیت خاک به روش شیمیایی در مورد اغلب خاک‌ها استفاده می‌شود.[۸] برای این‌کار راهکارهای مختلفی ارائه و مطالعات مختلفی انجام شده است که به طورکلی شامل تثبیت خاک به وسیله‌ی موادی است که مهم‌ترین آن‌ها شامل: آهک، سیمان، سولفات کلسیم و سولفات آلومینیم است. همچنین می‌توان به فیلترهای مناسب و یا روش الکترواسمز برای کاهش واگرایی اشاره کرد.[۹]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۵/۵/۲۰، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۳.
DOI:10.24200/J30.2018.1342

با توجه به دلایل ذکرشده و اهمیت جلوگیری از فرسایش داخلی در سدهای خاکی، ضروری است که مطالعات گسترده‌تری بر روی تثبیت انواع خاک با تثبیت‌کننده‌های جدید و کنترل و مهار فرسایش داخلی با راهکارهای ایمن و بی‌ضرر صورت پذیرد. در سال‌های اخیر، مواد نانو که ویژگی‌های منحصر به فردی دارند و در انواع علوم مهندسی باعث تحولاتی بنیادی شده‌اند، توجه پژوهشگران را برای اصلاح رفتار خاک‌ها به خود معطوف کرده‌اند. از جمله، ذرات نانوسیلیس را می‌توان به‌عنوان یک روش مؤثر و عملی جهت تثبیت رفتار خاک در نظر گرفت.[۱۰] نانوسیلیس و ژل سیلیس کلوئیدی که ژل آن با تنظیم کردن PH و مقاومت یونی ذرات محلول سیلیس کلوئیدی به‌دست می‌آید، یکی از بهترین مواد شیمیایی مورد استفاده برای تثبیت و پایدار ساختن خواص خاک هستند.

بنابراین با توجه به آنکه مطالعه در مورد اثر ذرات نانو در فرسایش‌پذیری بسیار محدود بوده است، در پژوهش حاضر برای اولین بار تأثیر نانوسیلیس در فرسایش‌پذیری داخلی بررسی شده است. بدین منظور ۱، ۲ و ۳ درصد وزنی نانوسیلیس به خاک واگرا اضافه و آزمایش فرسایش حفره‌یی انجام شده است. همچنین تأثیر گرادیان هیدرولیکی در فرسایش داخلی خاک در حضور و عدم حضور نانوسیلیس و زمان عمل‌آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

خاک رس مورد استفاده در پژوهش حاضر، براساس یک مدل‌سازی آزمایشگاهی و در جهت دسترسی به نمونه‌هایی با درصد واگرایی بالا ساخته شده است. لذا به نمونه‌ی خاک اولیه درصدهای مختلف پودر هگزامتافسفات سدیم به عنوان یک ماده‌ی پراکنش‌گرا، اضافه شده است. جدول ۱، نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های ساخته‌شده با درصدهای مختلف هگزامتافسفات سدیم را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که خاک رس اولیه از قرضه‌ی خاک رس در منطقه‌ی استهبان تهیه شده است.

چنانچه در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با افزودن هگزامتافسفات سدیم، درصد واگرایی نمونه‌ها افزایش یافته است، به نحوی که نمونه‌ی ساخته شده با ۲٪ هگزامتافسفات سدیم، حدود ۶۱٫۲۵٪ واگرایی دارد؛ که با توجه به نتایج، نمونه‌های ساخته‌شده در طبقه‌ی خاک‌های کاملاً واگرا طبقه‌بندی می‌شوند. جهت اطمینان کامل از واگرایی خاک و مقرون‌به‌صرفه بودن، در پژوهش حاضر ۲٪ به‌عنوان درصد بهینه برای واگرایی خاک در نظر گرفته شده است.

مشخصات مصالح مصرفی چون: دانه‌بندی (ASTM D۴۲۲)، تعیین وزن مخصوص بیشینه و درصد رطوبت بهینه (ASTM D۶۹۸)، حدود اتربرگ (ASTM D۴۳۱۸)، چگالی مخصوص دانه‌های جامد خاک، G_s (ASTM D۸۵۴) مواردی هستند که جهت شناسایی، طبقه‌بندی و تعیین خواص خاک‌ها استفاده می‌شوند که

جدول ۱. میزان واگرایی نمونه‌های تهیه شده.

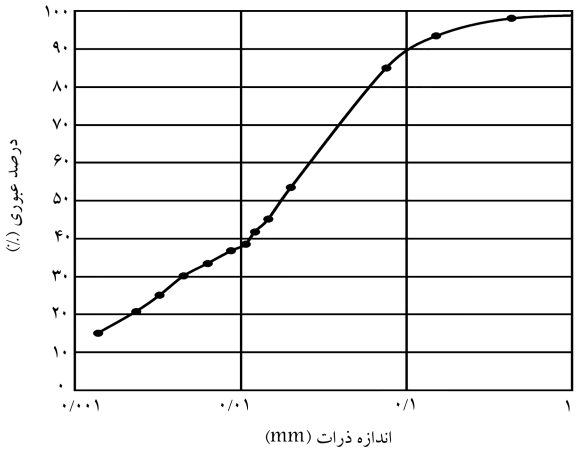
درصد اختلاط با هگزامتافسفات سدیم	درصد واگرایی در آزمایش هیدرومتری دوگانه	طبقه‌بندی در آزمایش هیدرومتری دوگانه
۱	۵۸٫۳۰	کاملا واگرا
۲	۶۱٫۲۵	کاملا واگرا
۳	۶۳٫۸۱	کاملا واگرا

نتایج آزمایش‌های مذکور به این شرح است: در آزمایش دانه‌بندی، خاک‌های حاوی رس واگرا به روش تر و بر روی بخش عبوری از الک #۲۰۰ آزمایش شده‌اند. شکل‌های ۱ و ۲، به ترتیب منحنی دانه‌بندی و منحنی آزمایش تراکم استاندارد را نشان می‌دهند و همچنین در جدول ۲، بقیه‌ی مشخصات حد خمیری و روانی و طبقه‌بندی خاک مشاهده می‌شود و نیز چگالی مخصوص خاک واگرا موردنظر که از الک #۴ عبور کرده است، ۲٫۷۵ است. خاک رس واگرا موردآزمایش براساس سیستم طبقه‌بندی متحد در گروه CL قرار می‌گیرد.

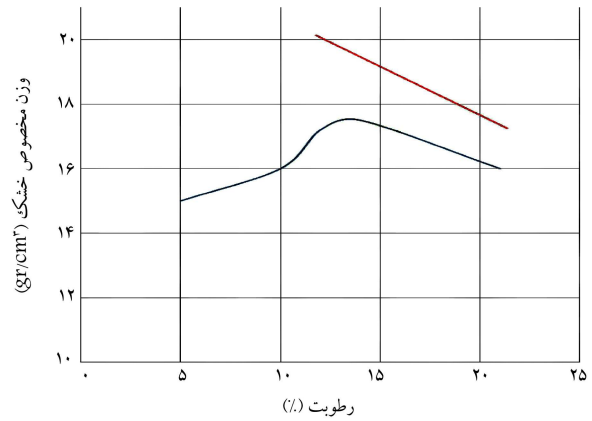
در پژوهش حاضر به جهت استفاده از نمونه‌هایی با درصدهای مختلف مواد نانوسیلیس، چند آزمایش تراکم انجام شده است، که نتایج نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. مطابق جدول ۳، با افزایش درصد نانو، میزان رطوبت افزایش پیدا می‌کند و با افزایش بیشتر از ۱٪ نانو وزن مخصوص خشک رو به کاهش است. پس از شناسایی خاک موردنظر به بررسی مواد ترکیب شده با رس واگرا پرداخته شده است، و نانوسیلیس استفاده شده را که مشخصات آن در جدول ۴ ارائه شده است، از شرکت نانوسیلیس ایساتیس یزد که مطابق شکل ۳ به‌صورت پودر است، خریداری شده است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی خاک واگرا.

نوع خاک	LL	PL	PI	طبقه‌بندی خاک
رس واگرا	۲۹	۱۹	۱۰	CL



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی رس واگرا.



شکل ۲. نمودار تراکم رس واگرا.

جدول ۳. میزان درصد رطوبت بهینه و تراکم.

نوع خاک	درصد رطوبت	بیشینه‌ی جرم مخصوص خشک خاک (gr/cm^3)
خاک واگرا	۱۳٫۹	۱٫۷۵۱
خاک واگرا با ۱٪ نانوسیلیس	۱۵٫۸۰	۱٫۷۳۲
خاک واگرا با ۲٪ نانوسیلیس	۱۷٫۲۶	۱٫۷۱۸
خاک واگرا با ۳٪ نانوسیلیس	۱۸٫۸۳	۱٫۶۶۲

جدول ۴. مشخصات نانوسیلیس.

درجه خلوص	٪۹۹
اندازه‌ی ذرات	۳۰ـ۲۰ نانومتر
چگالی	۱٫۷۱ (gr/cm^3)

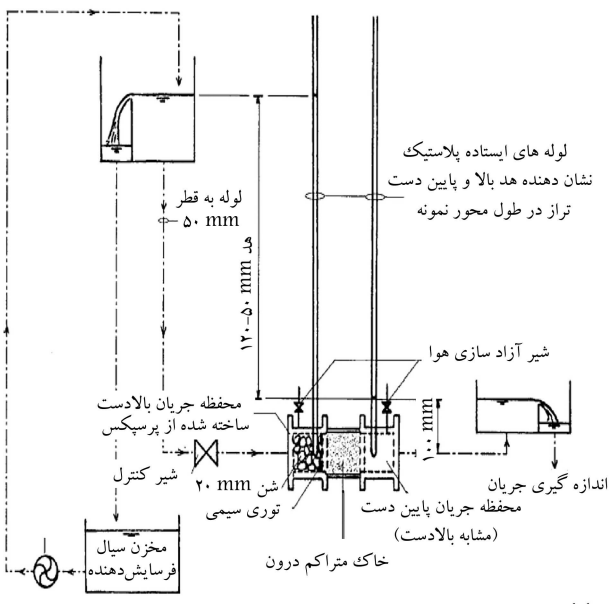
شکل ۳. نانوذرات سیلیس.

جهت انجام آزمایش فرسایش داخلی و پژوهش در مورد آن، نیاز به یک آزمایش تخصصی فرسایش است و به همین دلیل آزمایش فرسایش حفره (HET) [1] جهت پژوهش حاضر انتخاب شده است که دستگاه مذکور در دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان ساخته شده است. این آزمایش که در شکل ۴ نشان داده شده است، در واقع گونه‌یی از آزمایش فرسایش در طول حفره و ترک براساس طرح فل و همکاران (۲۰۰۳) است.

۳. تئوری فرسایش داخلی

فرسایش داخلی به‌عنوان فرایندی است که به موجب آن ذرات ریزدانه به طور محلی به درون یک لایه‌ی درشت‌دانه‌تر جابه‌جا می‌شوند و حفره‌های شکل‌دهنده‌ی آن می‌توانند سبب گسیختگی و تخریب شوند.

مطابق شکل ۴، نمونه‌ی خاک درون قالب آزمایش فرسایش که در واقع همان قالب آزمایش تراکم استاندارد است، متراکم و سوراخی به قطر ۶ میلی‌متر درون نمونه ایجاد می‌شود. آزمایش مذکور جهت مطالعه‌ی نرخ فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی بحرانی برای شروع فرسایش و ارتباط دو عامل ذکرشده با دیگر خواص خاک گسترش یافته است.



شکل ۴. شماتیک دستگاه آزمایش فرسایش حفره (فل و همکاران ۲۰۰۳).

تنش برشی هیدرولیکی در امتداد حفره‌ی اولیه‌ی شکل داده شده در هر زمان در طول آزمایش، با استفاده از رابطه‌ی ۱ در حالت جریان آرام و رابطه‌ی ۲ برای جریان آشفته تعیین می‌شود:

$$\tau = f_L \overline{V} \qquad (۱)$$

$$\tau = f_T \overline{V}^2 \qquad (۲)$$

که در آن، $f_L(kg/m^2/s)$، $f_T(kg/m^3)$ ضرایب اصطکاک و $\overline{V}$ سرعت جریان (m/s) و برابر است با: $\bar{V} = \frac{4Q}{\pi\phi^2}$، Q دبی جریان (m^3/s) و ϕ قطر سوراخ (m) است.

نرخ فرسایش نیز با استفاده از رابطه‌ی ۳ تعیین می‌شود (ون و فل، ۲۰۰۴):

$$\varepsilon_t = \frac{\rho_d}{2}\frac{d\phi_t}{d_t} \qquad (۳)$$

که در آن، ρ_d چگالی خشک خاک $(\frac{kg}{m^3})$ و $\frac{d\phi_t}{d_t}$ تغییرات قطر در برابر زمان است.

ضرایب اصطکاک در روابط ۱ و ۲ را می‌توان با استفاده از روابط ۴ و ۵ به‌دست آورد (ون و فل، ۲۰۰۴):

$$f_L = \frac{\rho_W g \pi s \phi^3}{16Q} \qquad (۴)$$

$$f_T = \frac{\rho_W g \pi^2 s \phi^5}{64Q^2} \qquad (۵)$$

که در آن‌ها، ϕ قطر سوراخ (m)، s گرادیان هیدرولیکی، g شتاب جاذبه(m/s) و ρ_W چگالی سیال فرسایش‌دهنده است. ϕ به ترتیب برای شرایط جریان لایه‌یی و آشفته با استفاده از فرمول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است:

$$\phi_t = \left[\frac{16 Q_t f_{Lt}}{\pi \rho_{W_t} g s_t}\right]^{\frac{1}{4}} \qquad (۶)$$

$$\phi_t = \left[\frac{64 Q_t^2 f_{Tt}}{\pi^2 \rho_{W_t} g s_t}\right]^{\frac{1}{5}} \qquad (۷)$$

در محاسبات آزمایش HET توجه به شرایط جریان لایه‌یی و یا آشفته بسیار مهم است. برای این منظور باید ابتدا عدد رینولدز جریان با استفاده از فرمول ۸ تعیین شود:

$$R_e = \frac{\rho_W \overline{V} \phi}{\mu} \qquad (۸)$$

که در آن، μ ویسکوزیته‌ی سیال است، اگر عدد R_e کوچک‌تر از ۵۰۰۰ باشد، جریان لایه‌یی و اگر بزرگ‌تر از ۵۰۰۰ باشد، جریان آشفته است.

در آزمایش (HET)، S و Q در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری می‌شوند. قطر لوله ϕ در شروع آزمایش ۶ میلی‌متر ($t = ۰$) است. هر دو ضرایب اصطکاک f_{Lt} و f_{Tt} فرض شده است که به طور خطی با زمان تغییر می‌کند. رابطه‌ی ۹، رابطه‌ی بین نرخ فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

$$\dot{\varepsilon}_t = Ce(\tau_t - \tau_c) \qquad (۹)$$

که در آن، $\dot{\varepsilon}_t$ نرخ فرسایش به ازاء واحد سطح سوراخ (حفره) در زمان t $(kg/s/m^۲)$؛ C_e ضریب فرسایش خاک (S/m)؛ τ_t تنش برشی هیدرولیکی در طول حفره یا سوراخ در زمان t $(N/m^۲)$ و τ_c تنش برشی بحرانی $(N/m^۲)$ هستند. اغلب از $(-\log C_e)$ برای همبستگی و ترسیم نتایج استفاده می‌شود که به طور قراردادی شاخص نرخ فرسایش (I) نام دارد:

$$I = -\log(C_e) \qquad (۱۰)$$

همچنین مقدار I بین ۰ تا ۶ متغیر است. مقدار کوچک I، دلالت بر فرسایش‌پذیری سریع‌تر خاک دارد (ون و فل، ۲۰۰۴).

۴. روش ساخت نمونه

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها براساس وزن مخصوص بیشینه و درصد رطوبت بهینه آماده می‌شوند. برای نمونه‌های مختلف (۱ تا ۱۴ روزه)، درصدهای مختلف نانوسیلیس را به خاک همانند شکل ۵ اضافه می‌کنند و براساس درصد رطوبت بهینه‌ی تعیین‌شده در آزمایش تراکم استاندارد، به وسیله‌ی چکش استاندارد (۲٫۵kg)، درون قالب تراکم استاندارد که همان قالب آزمایش فرسایش حفره است، در ۳ لایه مطابق استاندارد ASTM D۶۹۸، متراکم می‌شود.

شکل ۵. ترکیب نانوسیلیس با خاک واگرا.

نمونه‌ها جهت زمان عمل‌آوری در دوره‌های ۱، ۷ و ۱۴ روزه آماده می‌شوند و برای ثابت ماندن رطوبت هر قالب در محفظه‌ی پلاستیکی قرار داده می‌شوند. قبل از انجام آزمایش در مرکز هر قالب مطابق شکل ۶ سوراخی به قطر ۶ میلی‌متر ایجاد می‌شود. پس از این مرحله، بلافاصله قالب در محل موردنظر در دستگاه فرسایش مطابق شکل ۷ قرار داده می‌شود. درنهایت با بازشدن شیر ورود و خروج آب، نمونه‌ی خاکی تحت آزمایش فرسایش، به مدت ۲ ساعت قرار می‌گیرد و آزمایش شروع می‌شود.

نمونه‌های تهیه شده در دستگاه آزمایش در هدهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر قرار داده می‌شوند و سپس فرسایش‌پذیری خاک ترکیب شده با مواد نانوسیلیس در هدهای متفاوت بررسی می‌شود و پس از اتمام آزمایش با داده‌هایی مانند هد بالادست و پایین‌دست، میزان دبی خروجی، در هر دقیقه و میزان قطره‌ی حفره، می‌توان نرخ فرسایش هر نمونه را به‌دست آورد. مقادیر شاخص نرخ فرسایش (I) از ۰ تا ۶ است، مقدار کوچک (I) دلالت بر فرسایش‌پذیری سریع‌تر خاک دارد و این شاخص به ذرات ریزخاک‌ها و اندازه‌ی ذرات رس، حالت خمیری، واگرایی، درصد رطوبت تراکم، چگالی، درجه‌ی اشباع، تثبیت‌کننده‌ها بستگی دارد و با استفاده از جدول ۵ می‌توان فرسایش‌پذیری خاک را در یکی از گروه‌های ذکر شده قرار داد.

شکل ۶. تصویر ایجاد سوراخ در قالب آزمایش فرسایش.

شکل ۷. دستگاه آزمایش فرسایش.

جدول ۵. عبارات کیفی برای شاخص نرخ فرسایش (ون و فل، ۲۰۰۴).

شماره‌ی گروه	شاخص نرخ فرسایش (I)	توصیف
۱	< ۲	به‌شدت سریع
۲	۲_۳	بسیار سریع
۳	۳_۴	تقریبا سریع
۴	۴_۵	تقریبا آهسته
۵	۵_۶	بسیار آهسته
۶	> ۶	به‌شدت آهسته

جدول ۶. فرسایش‌پذیری خاک واگرا تحت تأثیر زمان و هدهای مختلف.

رس واگرا	شاخص نرخ فرسایش (I)		
	هد ۱۰۰	هد ۲۰۰	هد ۴۰۰
۱ روزه	$I < ۲$	$I < ۲$	$I < ۲$
۷ روزه	$I < ۲$	$I < ۲$	$I < ۲$
۱۴ روزه	$I < ۲$	$I < ۲$	$I < ۲$

۵. تجزیه و تحلیل داده‌ها

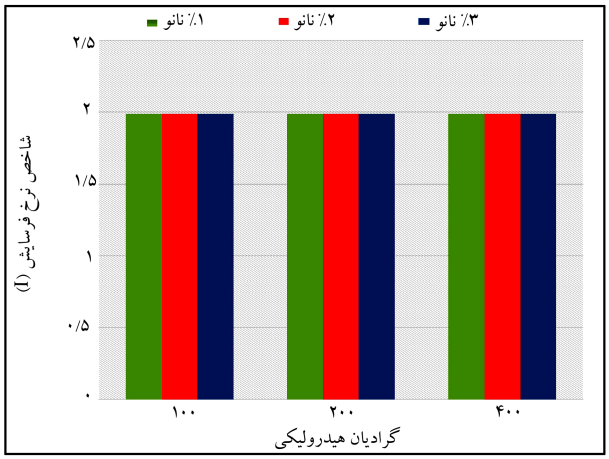
جدول ۶، میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا در زمان‌های مختلف و هدهای تعیین شده را نشان می‌دهد. از نتایج جدول ۶ در رابطه با فرسایش‌پذیری خاک‌های واگرا می‌توان دریافت که خاک‌های واگرا در دوره‌ی زمانی و هدهای متفاوت، تغییری در روند فرسایش‌پذیری خود ندارند و در هر صورت خاک‌های واگرا مطابق جدول ۵ در گروه فرسایش‌پذیری به‌شدت سریع قرار می‌گیرند.

شکل‌های ۸ تا ۱۰، نشان‌دهنده‌ی نرخ فرسایش خاک‌های واگرای تثبیت شده با ۱، ۲ و ۳ درصد نانوسیلیس، در زمان‌های عمل‌آوری ۱، ۷ و ۱۴ روزه تحت هدهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر است.

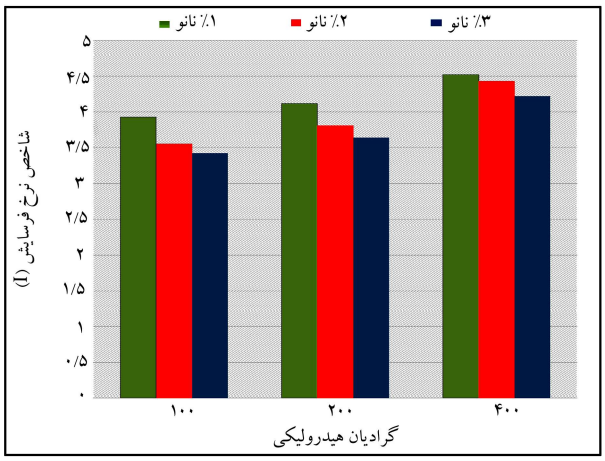
با توجه به شاخص نرخ فرسایش تحت هدهای ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ ارائه شده در شکل ۸ مشخص است که خاک واگرا تثبیت شده با نانو در دوره‌ی زمانی یک روزه، خاک در گروه فرسایش‌پذیری به‌شدت سریع قرار می‌گیرد. همچنین مطابق شکل ۹، خاک تثبیت شده در دوره‌ی زمانی ۷ روزه تحت هدهای متفاوت در گروه فرسایش‌پذیری تقریباً سریع و تقریباً آهسته است. شکل ۱۰، شاخص نرخ فرسایش خاک تثبیت شده در دوره‌ی زمانی ۱۴ روزه را نشان می‌دهد که خاک بیشتر در گروه تقریباً آهسته قرار دارد. اما میزان افزایش نرخ فرسایش نسبت به دوره‌ی زمانی ۷ روزه بیشتر است که عامل این کاهش نرخ فرسایش را می‌توان پیوند قوی و مناسب بین ذرات نانوسیلیس با خاک واگرا دانست. علاوه‌بر این، فرسایش‌پذیری خاک‌های ترکیب‌شده با نانوسیلیس در گرادیان‌های بالاتر، کاهش پیدا کرده و نرخ فرسایش رو به افزایش بوده است.

۶. نتیجه‌گیری

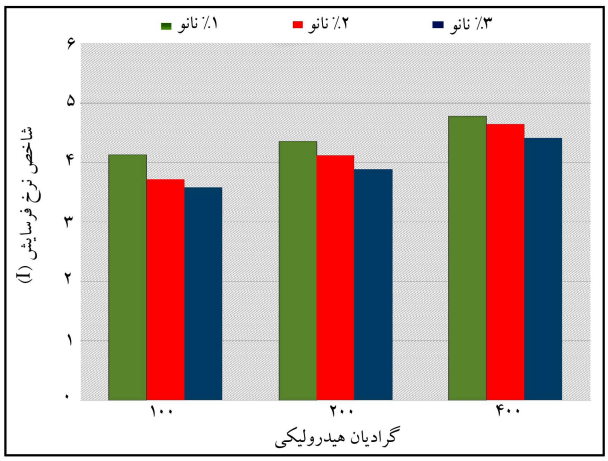
مقدار استفاده از نانوسیلیس در آزمایش‌ها ناچیز است و با وجود مقدار کم، تأثیر چشم‌گیری در اصلاح پتانسیل فرسایشی مصالح داشته است. از آنجایی که نانوسیلیس، سطح ویژه‌ی بسیار بالایی دارد، باعث می‌شود که به‌طور بسیار فعالی با ذرات خاک



شکل ۸. شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های تثبیت شده‌ی رس واگرا ۱ روزه.



شکل ۹. شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های تثبیت شده‌ی رس واگرا ۷ روزه.



شکل ۱۰. شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های تثبیت شده‌ی رس واگرا ۱۴ روزه.

واکنش دهند. بهبود خواص پارامترهای خاک واگرا توسط نانو ذرات سیلیس خود به عوامل متعددی وابسته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به زمان عمل‌آوری نانوسیلیس در ترکیب با رس واگرا اشاره کرد. در تثبیت رس واگرا با نانوسیلیس در زمان ۱ روزه، شاخص نرخ فرسایش کمتر از ۲ به‌دست می‌آید، در نتیجه نمونه‌های تثبیت شده در روز اول هیچ‌گونه مقاومتی در برابر فرسایش‌پذیری خاک نداشته‌اند و به همین دلیل ذرات

نانو جهت عملکرد بهتر خود، نیاز به زمان عمل‌آوری دارند. اما در زمان عمل‌آوری ۷ روزه، شاخص نرخ فرسایش بسته به میزان متفاوت درصد نانو و گرادیان هیدرولیکی از ۳٫۹۲ تا ۴٫۵۲ است. در نتیجه افزایش زمان عمل‌آوری از ۱ به ۷ روزه، باعث عملکرد بهتر ذرات نانو می‌شود که افزایش شاخص نرخ فرسایش حدوداً برابر ۵۰٪ است. همچنین شاخص نرخ فرسایش با اضافه کردن ۱ تا ۳ درصد نانو و گرادیان متفاوت در زمان ۱۴ روزه از ۳٫۵۸ تا ۴٫۷۸ است که با افزایش زمان عمل‌آوری از ۷ به ۱۴ روزه، مجدداً شاخص نرخ فرسایش نسبتاً ۵٪ افزایش یافته است.

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در فرایند تثبیت با نانو، مقدار اضافه کردن ذرات است که با افزایش درصدهای نانوسیلیس بیشتر از ۱٪، میزان نرخ فرسایش رو به کاهش است. به‌عنوان نمونه با توجه به نتایج ارائه شده، در دوره‌های زمانی ۷ و ۱۴ روزه در هد ۱۰۰ میلی‌متر با اضافه کردن نانو از ۱ تا ۳ درصد، شاخص نرخ فرسایش روند نزولی داشته است، که نسبتاً ۱۳٪ کاهش یافته است که به‌دلیل پوسته‌یی یا ورقه بودن ذرات نانو است. در نتیجه در زمان اضافه شدن ذرات نانو بیشتر از ۱٪، عامل کُند حرکت کردن و تشکیل یک ناحیه‌ی ضعیف به شکل تخلخل می‌شود و باعث کاهش عملکرد ضعیف ذرات می‌شود.

عامل بعدی در روند فرسایش‌پذیری خاک واگرا تثبیت شده با نانوسیلیس، گرادیان هیدرولیکی است که با افزایش گرادیان از ۱۰۰ به ۴۰۰ میلی‌متر باعث ایجاد پیوند قوی‌تر بین ذرات در تثبیت و اصلاح خاک می‌شود. درپایان می‌توان ۱٪ نانو را به‌عنوان درصد بهینه، البته تحت زمان عمل‌آوری و همچنین گرادیان هیدرولیکی مناسب، معرفی کرد.

پانوشت

1. hole erosion test

منابع (References)

1. Vakili, A.H. and Zomorodian, M.A. "Assess the potential divergence stabilized with lime and pozzolan", The 8th Congress International Civil Engineering, 7, Shiraz University (2009).
2. Ladryan, A., Farimah, F. And Farzin, Kh. "Effects of nano silica in the soil shear strength divergent", The 15th Conference of Civil students across the country, Urmia University (2014).
3. Vafai, A., Soleimani Kotnayi, S. and Janalizadeh, A. "The effect of nano-silica and nano also evaluate the joint effect of cement and sand on the shores of the Caspian resistive behavior", *An International Conference on the Sustainable Development of Civil Engineering and Architecture*, Tabriz, Iran (2014).
4. Bhuvaneshwari, S., Soundara, B., Robinson, R.G. and Gandhi, S.R. "Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils", *First International Conference on Soil and Rock Engineering Organized by Srilankan Geotechnical Society*, Columbo, Srilanka (2007).
5. Roshanzamir, M. and Yosefzade. "Divergent soil and comparing them with various additives", The Second National Seminar on Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Channels (2010).
6. Decker, R.S. and Dunnigan, L.P. "Development and use of the soil conservation service dispersion test", *ASTM STP 623*, pp. 94-109 (1977).
7. Kinney , J.L. "Laboratory procedures for determining the dispersibility of clayey", Report No. REC-79-10, USBR , Denver , Colorado (1979).
8. Ingles, O.G. and Metcalf, G.B. "Soil stabilization: Principle and practice", Butterworth Pty Limited, Australia (1972).
9. Umesha, T.S., Dinesh. S.V. and Sivapullaiah, P.V. "Control of dispersivity of soil using lime and cement", *International journal of Geology*, **1**(3), pp. 8-16 (2009).
10. Changizi, F. and Haddad, A. "Effect of Nano-SiO2 on the geotechnical properties of cohesive soil", *Geotech. Geol. Eng.*, **34**(2), pp. 725-733 (2015).