

بررسی تأثیر تثبیت‌کننده‌های شیمیایی نوین در فرسایش داخلی در سدهای خاکی

سید محمدعلی زهردیان* (دانشیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

حمیدرضا کوه‌پیمایا (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳
دوری ۲ - ۳۰، شماره ۴/۲، ص. ۷۸-۷۳

فرسایش داخلی دومین عامل اصلی تخریب سدهای خاکی پس از سرریز شدن آب از تاج سد است. از این رو مهم است که مقاومت فرسایشی خاک‌ها با استفاده از روش‌های مؤثر و با هزینه‌های مناسب بهبود داده شود. یکی از کارهای مؤثر جهت جلوگیری از فرسایش داخلی در سدهای خاکی، استفاده از تثبیت‌کننده‌ها برای اصلاح پتانسیل فرسایش خاک‌هاست. در این پژوهش، از ماده‌ی شیمیایی بر پایه‌ی لیگنین، لیگنوسولفونات جهت اصلاح فرسایش‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی استفاده شده است. بدین منظور ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی به‌صورت مجزا و سپس اختلاط با درصد‌های مختلف لیگنوسولفونات مورد آزمایش فرسایش در هدهای مختلف قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که فرسایش‌پذیری ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی بسیار سریع است، که با افزایش مقدار ناچیز لیگنوسولفونات به آن، فرسایش‌پذیری مصالح به طور چشمگیری کاهش می‌یابد؛ به‌طوری که با اضافه کردن ۳٪ لیگنوسولفونات به ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی، ضریب فرسایش خاک از ۲۰/۰ به ۱۷/۰۰۰۰ و فرسایش‌پذیری کیفی از گروه به شدت سریع به گروه نسبتاً آهسته کاهش می‌یابد.

mzmorod@shirazu.ac.ir
hr_koohpeyma@yahoo.com

واژگان کلیدی: فرسایش داخلی، سدهای خاکی، تثبیت‌کننده‌ها، لیگنوسولفونات.

۱. مقدمه

از تثبیت‌کننده‌ها جهت اصلاح پتانسیل فرسایش خاک‌هاست. امروزه استفاده از افزودنی‌های شیمیایی یکی از روش‌های رایج افزایش مقاومت فرسایش خاک‌ها در سازه‌های خاکی است. در سال‌های گذشته، افزودنی‌های شیمیایی از قبیل سیمان، آهک و خاکستر بادی برای تثبیت خاک‌های فرسایش‌پذیر استفاده شده است. تاکنون مطالعات متعددی برای پژوهش درباره‌ی توانایی تثبیت‌کننده‌های سنتی روی خاک‌های مسئله‌دار از قبیل: رس نرم و خاک‌های فرسایش‌پذیر هدایت شده‌اند.^[۱]

به هر حال چنین ترکیبات سنتی مانند: سیمان، آهک، و خاکستر بادی به دلیل سلامت شغلی و پیامدهای ایمنی، صرف‌نظر از تهدیدهای گوناگون محیط زیست، به دلیل افزایش خاصیت قلیایی آب زیرزمینی، به‌طور مکرر قابل استفاده نیستند. خاکی که به‌طور سنتی تثبیت شده است، دارای PH برابر با ۹ است، که اغلب در طول عمر آرماتور بتن و ساختمان‌های قاب فولادی تأثیر می‌گذارد. همچنین، جنبه‌های شیمیایی دیگر مانند هدایت الکتریکی و ظرفیت تبادل یونی خاک با افزایش مقدار مواد افزودنی و زمان عمل‌آوری کم می‌شود، که در ظرفیت نگهداری آب تأثیر می‌گذارد.^[۲-۴] برای غلبه بر پیامدهای ذکر شده لازم است یک تثبیت‌کننده‌ی دیگر خاک فراهم شود که بتواند جش زمین را برای بارگذاری قابل دوام بهبود بخشد و به محیط زیست نیز آسیب نرساند. اخیراً ماده‌ی شیمیایی بر پایه‌ی لیگنین،

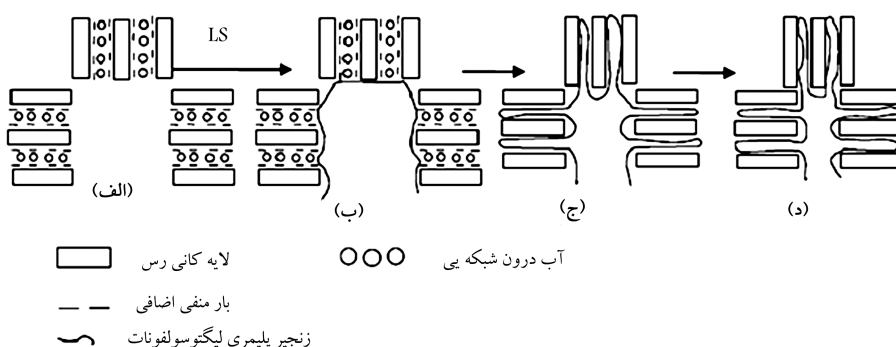
فرسایش داخلی^۱ در سدهای خاکی به عنوان دومین عامل اصلی تخریب سدهای خاکی پس از سرریز آب از تاج سدها محسوب می‌شود، و عبارت‌است از فرایندی که سبب افزایش نشست متمرکز می‌شود و می‌تواند با گسترش حفره‌های بزرگ، سبب خرابی سدهای خاکی همراه با یک تخلیه‌ی غیرقابل کنترل و فاجعه‌بار مخزن سد شود.^[۱]

این موضوع سال‌های زیادی است که شناخته شده است، برای مثال پژوهشگری در سال ۱۹۷۲ برای اولین بار سعی کرد که پروسه و روند فرسایش و رگاب را گسترش دهد و آزمون پین هول را برای شناسایی خاک‌های مستعد فرسایش ابداع نماید. با توجه به حجم عظیم آب پشت سد، تخریب سدها سبب فجایع عظیم انسانی و مالی می‌شود. یک نمونه از مشکلات ناشی از فرسایش داخلی، تخریب سد تیتان است. این سد در سال ۱۹۷۶ تخریب و سبب مرگ و میر تعدادی از اهالی شهر رکسبورگ آیداهو در پایین دست سد و بروز خسارات مالی در حدود ۱ میلیارد دلار شد. به همین دلیل بررسی و شناخت این پدیده و عوامل مؤثر در آن، اهمیت فراوانی دارد.

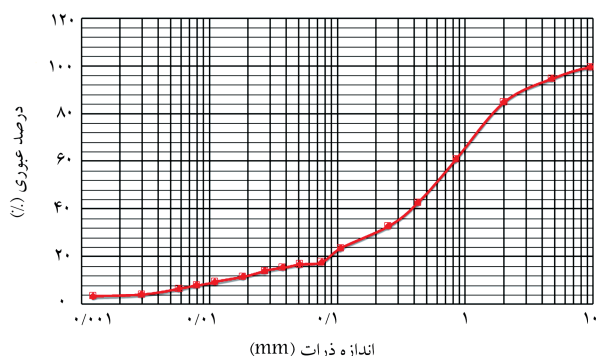
از موارد مؤثر در جلوگیری از فرسایش داخلی در سدهای خاکی، استفاده

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۰/۵، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۲۲، پذیرش ۱۳۹۲/۴/۱.



شکل ۱. مکانیزم تثبیت خاک اصلاح شده با لیگنوسولفونات.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی رس دار کائولینیتی.

جدول ۲. خلاصه‌ی وزن مخصوص بیشینه و درصد رطوبت بهینه.

نوع خاک	$\rho_d \max$ (g/cm ³)	ω_{optm} (%)
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی	۱٫۸۸۰	۱۱٫۵۵
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی + ۴٪ لیگنوسولفونات	۱٫۸۷۵	۱۱٫۷۹
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی + ۱٪ لیگنوسولفونات	۱٫۸۷۰	۱۱٫۷۵
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی + ۲٪ لیگنوسولفونات	۱٫۸۷۲	۱۱٫۷۹
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی + ۳٪ لیگنوسولفونات	۱٫۸۷۰	۱۱٫۶۰

علت استفاده از خاک کائولینیت، علاوه بر بررسی فرسایش پذیری آن، به دلیل خواص پایدار در مقایسه با دیگر کانی‌های رسی و قابلیت تکرار پذیری آزمایش‌ها در این خاک است. در جدول ۲، نتایج آزمون تراکم ماسه‌ی رس دار کائولینیتی و ترکیب آن به صورت ۱، ۰٫۴، ۲ و ۳ درصد لیگنوسولفونات براساس استاندارد ASTM D۶۹۸ آمده است. این تذکر لازم است که چون لیگنوسولفونات کاملاً در آب رطوبت بهینه قابل حل است و مقدار استفاده از آن ناچیز است، تأثیری در نمودار تراکم و نتایج آن نخواهد گذاشت. [۷] گواه این امر را می‌توان با مقایسه‌ی نمودار تراکم ماسه‌ی رس دار کائولینیتی (شکل ۳) و نمودار تراکم ماسه‌ی رس دار کائولینیتی تثبیت شده با ۳٪ لیگنوسولفونات (شکل ۴) مشاهده کرد. جدول ۲، نتایج آزمون تراکم ماسه‌ی رس دار کائولینیتی و ترکیب آن به صورت ۱، ۰٫۴، ۲ و ۳٪ لیگنوسولفونات را نشان می‌دهد.

لیگنوسولفونات^۲، جنبه‌های امیدبخشی را در تثبیت خاک‌های مسئله‌دار از خود نشان داده است. در این نوشتار سعی بر آن است که فرسایش پذیری ماسه‌ی رس دار کائولینیتی و تأثیر لیگنوسولفونات در فرسایش پذیری آن بررسی شود.

۲. مکانیزم تثبیت با لیگنوسولفونات

لیگنوسولفونات، ماده‌ی قهوه‌یی رنگ با PH در حدود ۴ و قابل اشتعال است و براساس معیار کمیته‌ی ایمنی و سلامت شغلی^۳ جزء مواد خطرناک محسوب نمی‌شود. نمای شماتیک خاک اصلاح شده با لیگنوسولفونات^۴ براساس آنالیزاشعه‌ی ایکس^۵ در شکل ۱ آمده است. شکل ۱ الف، ذرات خاک اصلاح نشده با بار منفی را در یک لایه‌ی درون شبکه‌ی بی از کانی‌های رس نشان می‌دهد. آب پس از ترکیب با لیگنوسولفونات در یک واکنش آبی شرکت و ترکیب‌هایی با بار مثبت ایجاد می‌کند. [۷]

پس از ترکیب مخلوط آب - لیگنوسولفونات با خاک (شکل ۱ ب)، بارهای مثبت جذب سطح کانی‌های رس می‌شود و به دلیل وجود نیروی الکترواستاتیکی، پیوندهایی را به وجود می‌آورد. لیگنوسولفونات‌های دارای بار مثبت، جذب کانی‌های رس با بار منفی می‌شود و واکنش لایه‌ی دوگانه‌ی آب را سبب می‌شود (شکل ۱ ج). سپس زنجیره‌ی پلیمری لیگنوسولفونات^۶ با ذرات خاک ترکیب و گلوله‌های خاکی را به وجود می‌آورد (شکل ۱ د).

۳. خاک مصرفی

خاک مورد استفاده در این پژوهش، خاک کائولینیت رده‌ی از الک نمره ۱۰ است، که از منطقه‌ی مرند واقع در استان آذربایجان شرقی است. به منظور طبقه‌بندی خاک، آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ بر روی آن به ترتیب براساس استاندارد ASTM D۴۲۲ و ASTM D۴۳۱۸ انجام شده است. نمودار دانه بندی و خواص خاک مورد استفاده به ترتیب در شکل ۲ و جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک مورد مطالعه.

نوع خاک	حد روانی	حد خمیری	شاخص طبقه‌بندی
ماسه‌ی رس دار کائولینیتی	۲۵/۳۵	۱۴/۲۲	۱۱/۱۳ SC

۵. آماده‌سازی نمونه

نمونه‌های مورد استفاده در آزمون‌ها شامل ماسه‌ی رس‌دار کائولینیتی و درصد‌های مختلف لیگنوسولفونات است. ابتدا مقدار مشخص لیگنوسولفونات (۴، ۱، ۰، ۱، ۲ و ۳ درصد) در مقدار موردنیاز آب رطوبت تراکم، حل و سپس محلول آب - لیگنوسولفونات به خاک افزوده می‌شود تا به میزان مطلوب رطوبت تراکم دست یابد. پس از آن، نمونه‌ها به مدت ۷ روز جهت تکمیل مراحل تثبیت توسط لیگنوسولفونات (مطابق شکل ۱)، درون محفظه‌ی پلاستیکی دربسته قرار داده می‌شوند. پس از آن خاک مرطوب درون قالب دستگاه فرسایش با چکش تراکم استاندارد کوبیده و مجدداً دو طرف نمونه درون قالب با لایه‌های پلاستیکی مسدود و به مدت ۳ ساعت دیگر نمونه درون قالب آزمون نگهداری می‌شود، علت این عمل جهت رسیدن به تعادل درون خاک پس از کوبیده‌شدن است. گام بعدی در ساخت نمونه، حفر سوراخ ۶ میلی‌متری درون نمونه و در قسمت وسط آن است، حفر سوراخ در نمونه، جهت شبیه‌سازی نشست متمرکز و شروع فرسایش است.

برای شبیه‌سازی نشست متمرکز، قالب در قسمت حفر سوراخ قرار داده می‌شود و سوراخ به آرامی توسط مته‌ی موردنظر حفر می‌شود (شکل ۶). پس از آماده‌شدن نمونه، قالب در قسمت موردنظر در دستگاه فرسایش حفره قرار داده می‌شود و پس از آب‌بندی، شیرهای تخلیه هوا باز و سپس شیر متصل به پایین دست نمونه به آرامی باز می‌شود، در این مرحله دقت در پرکردن محفظه‌های بالادست و پایین دست بسیار مهم است، زیرا در صورت پرکردن محفظه‌ها با سرعت، وجه پایین دست نمونه شروع به تخریب و ریزش می‌کند؛ که در این صورت امکان مسدودشدن سوراخ به شدت افزایش می‌یابد. این تذکر لازم است که از آب شرب جهت انجام آزمایش‌های فرسایش داخلی استفاده شده است.

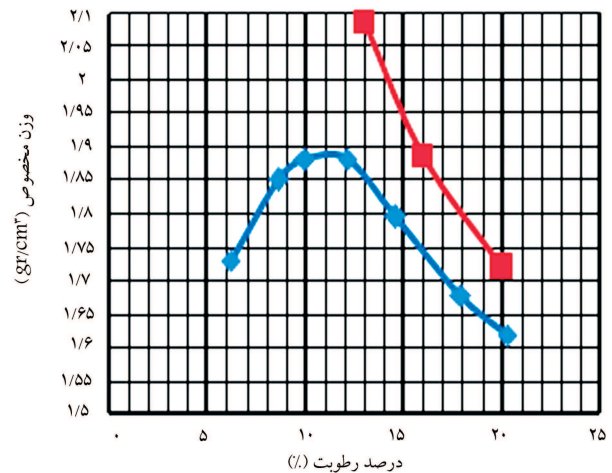
شکل ۵، شماتیک دستگاه فرسایش حفره جهت انجام آزمایش فرسایش داخلی و ارزیابی شاخص نرخ فرسایش را نشان می‌دهد. دستگاه فرسایش حفره‌ی ساخته‌شده، توانایی اعمال هد آب تا ۱۸۵۰ میلی‌متر را دارد، که به وسیله‌ی آن می‌توان شاخص نرخ فرسایش خاک‌های با فرسایش‌پذیری کم را مورد ارزیابی و شناسایی قرار داد. شکل ۶، مرحله‌ی حفر سوراخ جهت شبیه‌سازی نشست متمرکز و شروع فرسایش را نشان می‌دهد.

۶. بحث و نتایج

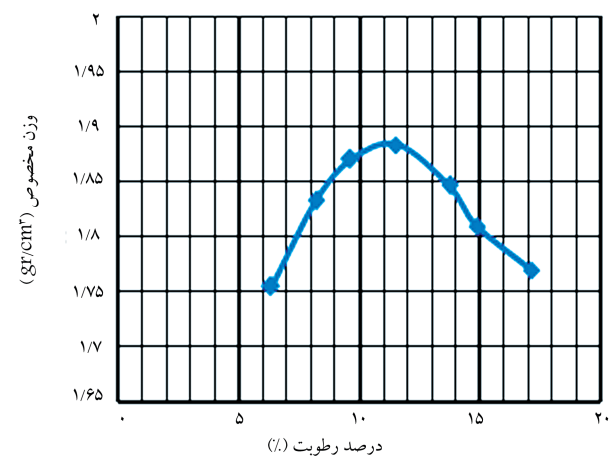
پس از انجام آزمایش فرسایش داخلی بر روی نمونه‌ها و آنالیز داده‌ها، نمودارهای نرخ توده‌ی فرسایش‌یافته/زمان، تنش برشی هیدرولیکی در برابر زمان و در نهایت، نمودار تنش برشی هیدرولیکی/نرخ توده‌ی فرسایش‌یافته براساس رابطه‌های ۱ و ۲ ترسیم می‌شود:

$$\tau_t = \rho_w g S_t \frac{\phi_t}{\varphi} \quad (1)$$

که در آن، τ_t تنش برشی هیدرولیکی روی سطح سوراخ ایجادشده در زمان t (N/m²)، ρ_w دانسیته‌ی (چگالی) سیال فرسایش‌دهنده؛ g شتاب جاذبه (۹/۸ m/s²)، S_t گرادینان هیدرولیکی در طول نمونه‌ی خاک در زمان t ؛ ϕ_t قطر سوراخ پیش شکل‌گرفته در زمان t (m) است، این تذکر لازم است که قطر سوراخ در طول آزمون به روش اندازه‌گیری غیرمستقیم و با استفاده از تعیین دبی جریان و



شکل ۳. نمودار تراکم ماسه‌ی رس‌دار کائولینیتی.

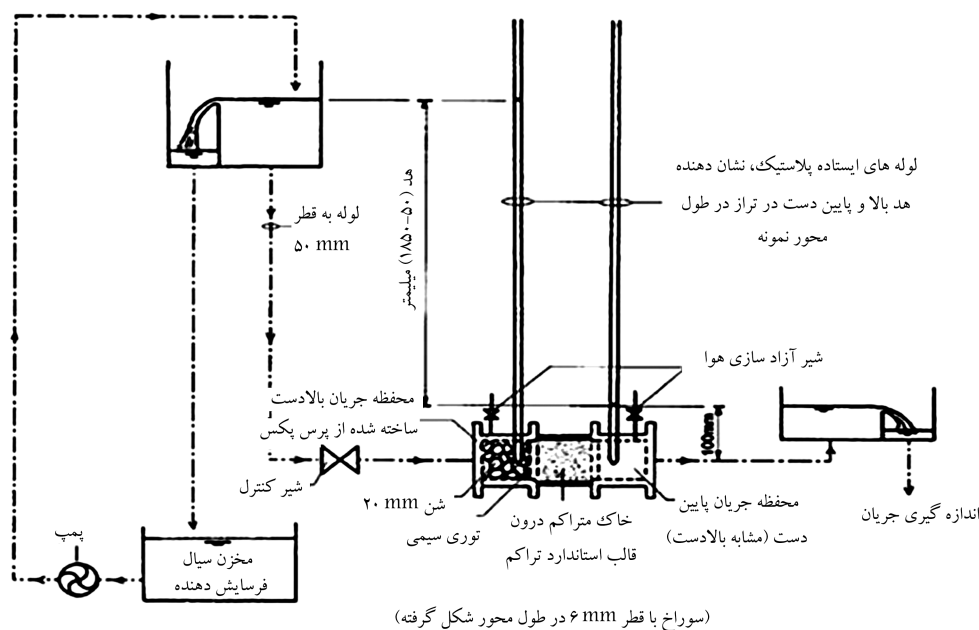


شکل ۴. نمودار تراکم ماسه‌ی رس‌دار کائولینیتی تثبیت‌شده با ۳٪ لیگنوسولفونات.

با مقایسه‌ی شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان دریافت که لیگنوسولفونات تأثیری در نمودار تراکم نخواهد گذاشت. با توجه به اینکه لیگنوسولفونات به‌طور کامل در آب قابل حل است، بعد از ترکیب محلول آب - لیگنوسولفونات با خاک، چگالی بخش جامد آن را نیز تغییر نمی‌دهد.

۴. آزمون فرسایش داخلی

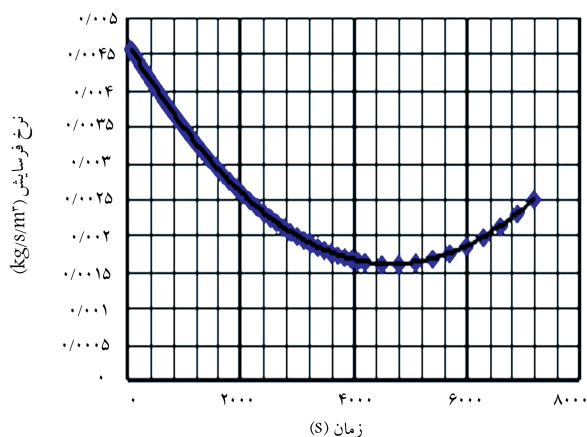
آزمون مورد استفاده، آزمون تخصصی فرسایش داخلی به نام آزمون فرسایش حفره و براساس طرح فل و همکاران (۳، ۲۰۰۳)^[۸] که با اصلاحات انجام گرفته است، توانایی آزمون بر روی خاک‌های با فرسایش‌پذیری بسیار کم را نیز دارد (توانایی اعمال هد آب تا ۱۸۵۰ میلی‌متر افزایش یافته است). این آزمون، که نوعی مدل‌کردن فرسایش در طول حفره است، جهت مطالعه‌ی نرخ فرسایش و تنش برشی هیدرولیکی بحرانی برای شروع فرسایش، و ارتباط این دو عامل با دیگر خواص خاک گسترش یافته است. قطر نمونه‌ی مورد استفاده در این آزمون نسبت به دیگر آزمون‌های فرسایش داخلی، بزرگ است. در شکل ۵، جزئیات دستگاه به‌صورت شماتیک نشان داده شده است.^[۸] علت استفاده از این آزمون سادگی، کم‌هزینه‌بودن و البته قابل اطمینان‌بودن نتایج آن در مقایسه با دیگر آزمون‌هاست.^[۹]



شکل ۵. جزئیات دستگاه فرسایش حفره (HET).

جدول ۳. طبقه‌بندی خاک‌ها در برابر فرسایش. [۸]

توصیف	شاخص نرخ فرسایش I	شماره‌ی گروه
به شدت سریع	< 2	۱
بسیار سریع	$2 - 3$	۲
نسبتاً سریع	$3 - 4$	۳
نسبتاً آهسته	$4 - 5$	۴
بسیار آهسته	$5 - 6$	۵
به شدت آهسته	> 6	۶



شکل ۷. نمونه‌ی از نمودار نرخ فرسایش در برابر زمان.

که در آن، C_e عدد نرخ فرسایش یا ضریب فرسایش است، که از نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ توده‌ی فرسایش یافته به دست می‌آید. مطابق جدول ۳، شش گروه برای طبقه‌بندی فرسایش داخلی خاک‌ها وجود دارد، که هر چه عدد شاخص نرخ فرسایش بیشتر باشد، فرسایش‌پذیری کمتر است. نتایج به دست آمده، نمونه‌ی از آزمون‌ها در شکل ۷ براساس نرخ توده‌ی



شکل ۶. بخش حفر سورخ در نمونه.

البته روند افزایش دبی در زمان انجام آزمون به دست می‌آید.

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\rho_d}{\gamma} \frac{d\phi_t}{dt} \quad (2)$$

که در آن، $\dot{\varepsilon}_t$ نرخ توده‌ی فرسایش یافته؛ ρ_d دانسیته‌ی خشک خاک (kg/m^3) است.

براساس نمودارهای ترسیم شده، عددی به نام نرخ فرسایش (C_e) از شیب تقریباً خطی قسمت ثانویه نمودار تنش برشی هیدرولیکی/نرخ توده‌ی فرسایش یافته، که در واقع بهترین خط برازش داده شده است، تعیین می‌شود. نحوه‌ی طبقه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک‌ها براساس نظرون و فل (۲۰۰۳)، [۸] در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول عدد I ، شاخص نرخ فرسایش است، که طبق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$I = -\log C_e \quad (3)$$

بهرتر نشان می‌دهد و باعث عملکرد بهتر لیگنوسولفونات می‌شود. دلیل این امر آن است که در گرادیان‌های بالا چون سرعت جریان فرسایش زیاد است، لیگنوسولفونات با ایجاد یک زنجیره پلیمری بین ذرات خاک از نفوذ جریان به داخل ذرات جلوگیری می‌کند و باعث عدم جدایی و جابه‌جایی سریع ذرات خاک می‌شود. شایان ذکر است که در گرادیان‌های بالا، نمونه‌های ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی، که با لیگنوسولفونات تثبیت نشده‌اند، دارای روند فرسایش پذیری شدیدی می‌شوند؛ به طوری که از حد ۱۰۰ میلی‌متر به بالا، این نمونه‌ها کاملاً گسیخته و خاک از جداری قالب آزمایش جدا می‌شود، که نشان‌دهنده‌ی فرسایش بسیار سریع نمونه است. لیگنوسولفونات در گرادیان‌های بالا مقاومت بیشتری را از خود نشان داده و دارای عملکرد متمایزی است، به طوری که در حد ۴۰۰ میلی‌متر فقط با اضافه کردن ۳٪ ماده‌ی شیمیایی تثبیت‌کننده به خاک، فرسایش‌پذیری کیفی از گروه به شدت سریع به گروه نسبتاً آهسته و ضریب فرسایش خاک^۸ از ۰/۰۱۰۲۰ به ۰/۰۰۰۰۱۷ کاهش یافته است.

شکل ۹، نمودار مقایسه‌ی شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی تثبیت شده با ۳٪ لیگنوسولفونات و ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی اصلاح نشده، در هدهای مختلف را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر عملکرد بهتر لیگنوسولفونات در اصلاح پتانسیل فرسایش خاک در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر است.

لیگنوسولفونات بعد از ترکیب با خاک و تثبیت آن، با ایجاد یک زنجیره پلیمری از نفوذ سیال فرسایش‌دهنده بین ذرات خاک جلوگیری می‌کند، به طوری که جدا شدن

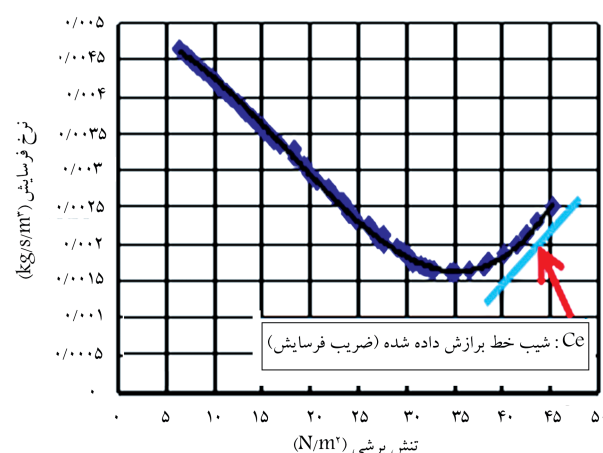


شکل ۹. نمودار مقایسه‌ی شاخص نرخ فرسایش ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی تثبیت نشده و تثبیت شده با ۳٪ لیگنوسولفونات در هدهای مختلف.



شکل ۱۰. تصویر قطر نهایی سوراخ پیش شکل‌گرفته‌ی ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی بعد از انجام آزمایش فرسایش حفره - هد ۵۰ میلی‌متر.

فرسایش‌یافته در برابر زمان ارائه شده است. در این شکل، روند فرسایش نمونه‌ی خاک درون قالب قابل مشاهده است، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر دست‌خوردگی در حین حفاری سوراخ درون نمونه است. همچنین نمودار نرخ فرسایش در برابر تنش برشی هیدرولیکی^۷ نمونه‌ی از خاک در شکل ۸ ارائه شده است، بر این اساس شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های مختلف متغیر است و قسمت تقریباً خطی نمودار، نشان‌دهنده‌ی فرسایش در نمونه است. نکته‌ی جالب توجه در این نمودار، قسمت اولیه‌ی آن است، این قسمت در واقع نشان‌دهنده‌ی شسته شدن و دفع خاک‌های دست‌خورده درون سوراخ ناشی از حفاری مته است و نمی‌تواند بیانگر فرسایش ذاتی خود نمونه باشد. جدول ۴، نتایج شاخص نرخ فرسایش به دست آمده از آزمایش‌های فرسایش داخلی بر روی ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی تثبیت نشده و تثبیت شده با درصد‌های مختلف لیگنوسولفونات به ترتیب برای هدهای ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، با افزایش مقدار درصد لیگنوسولفونات در تثبیت و اصلاح خاک، فرسایش‌پذیری مصالح کاهش می‌یابد (افزایش شاخص نرخ فرسایش). این کاهش فرسایش‌پذیری در گرادیان‌های هیدرولیکی بالاتر، خود را



شکل ۸. نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ فرسایش.

جدول ۴. شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های تثبیت نشده و تثبیت شده‌ی ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی با لیگنوسولفونات در هدهای مختلف.

ترکیب خاک	هد ۵۰ (mm)	هد ۱۰۰ (mm)	هد ۲۰۰ (mm)	هد ۳۰۰ (mm)	هد ۴۰۰ (mm)
(I)	(I)	(I)	(I)	(I)	(I)
K	۲/۹۰	۳/۸۰	۴/۱۱	۴/۱۷	۴/۳۲
K + ۰/۴L	۳/۵۲	۳/۸۰	۴/۱۱	۴/۱۷	۴/۳۲
K + ۱L	۳/۶۳	۳/۹۰	۴/۱۴	۴/۲۲	۴/۳۸
K + ۲L	۳/۶۸	۳/۹۵	۴/۲۵	۴/۲۸	۴/۶۴
K + ۳L	۳/۸۴	۴/۱۱	۴/۴۴	۴/۶۶	۴/۷۷

K: ماسه‌ی رس‌دار کاتولینیتی؛ L: لیگنوسولفونات؛ I: شاخص نرخ فرسایش؛

$I < 2$: نمونه به طور کامل گسیخته شده است.

۷. نتیجه گیری

در این نوشتار، تأثیر تثبیت توسط لیگنوسولفونات در کاهش فرسایش پذیری ماسه ی رس دار کائولینیتی با استفاده از آزمون آزمایشگاهی فرسایش حفره مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شامل ارزیابی شاخص نرخ فرسایش مصالح مورد مطالعه، تأثیر مقدار لیگنوسولفونات در کاهش فرسایش پذیری مصالح، تأثیر گرادیان های هیدرولیکی متفاوت در روند فرسایش پذیری مصالح تثبیت نشده و تثبیت شده با مواد شیمیایی است. نتایج به دست آمده به این شرح است:

- با توجه به مقایسه ی نتایج آزمون های انجام شده می توان نتیجه گرفت که با اضافه کردن ۴٪ لیگنوسولفونات، فرسایش پذیری خاک را تا حدود زیادی می توان کاهش داد.
- خاک کائولینیت مورد مطالعه، فرسایش داخلی شدیدی را از خود نشان می دهد و در حقیقت جزء خاک های با فرسایش بسیار سریع محسوب می شود.
- لیگنوسولفونات در گرادیان های هیدرولیکی بالا، تأثیر خود را بهتر نشان می دهد و دارای عملکرد متمایزی است.
- فقط با اضافه کردن ۳٪ لیگنوسولفونات به ماسه ی رس دار کائولینیتی، ضریب فرسایش خاک از ۰/۱۰۲۰ به ۰/۰۰۰۰۱۷ و فرسایش پذیری کیفی از گروه به شدت سریع به گروه نسبتاً آهسته کاهش می یابد.



شکل ۱۱. تصویر قطر نهایی سوراخ پیش شکل گرفته ی ماسه ی رس دار کائولینیتی تثبیت شده با ۴٪ لیگنوسولفونات بعد از انجام آزمایش فرسایش حفره - هد ۵۰ میلی متر.

و جابه جایی ذرات کندتر صورت می پذیرد. با مقایسه ی شکل های ۱۰ و ۱۱ می توان به چگونگی عملکرد لیگنوسولفونات در کاهش فرسایش پذیری ماسه ی رس دار کائولینیتی پی برد. شکل ۱۰، تصویر قطر نهایی سوراخ پیش شکل گرفته جهت شبیه سازی نشت متمرکز و شروع فرسایش ماسه ی رس دار کائولینیتی بعد از انجام آزمایش فرسایش حفره را نشان می دهد.

شکل ۱۱، تصویر قطر نهایی سوراخ پیش شکل گرفته ی ماسه ی رس دار کائولینیتی تثبیت شده با ۴٪ لیگنوسولفونات بعد از انجام آزمایش فرسایش حفره را نشان می دهد.

پانویس ها

1. internal erosion
2. Lignosulfonate
3. national occupational health and safety commission
4. Lignosulfonate treated soil
5. X ray diffraction
6. Lignosulfonate Polymer chain
7. Hydraulic shear stress
8. coefficient of soil erosion

منابع (References)

1. Torres, R.L. "Geotechnical engineering group of bureau of reclamation, denver, colorado", *Considerations for Detection of Internal Erosion in Embankment Dams*, ASCE, Biennial Geotechnical Seminar Conference (2008).
2. Foster, M.A., Fell, R. and Spannagle, M. "The statistics of embankment dam failures and accidents", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**(5), pp. 1000-1024 (2000).
3. Balasubramaniam, A.S., Bergado, D.T., Buensuceso, B.R. and Yang, W.C. "Strength and deformation characteristics of lime-treated soft clays", *Geotechnical Engineering*, **20**(1), pp. 49-65 (1989).
4. Rollings, R.S. and Burkes, M.P. "Sulfate attack on cement-stabilized sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **125**(5), pp. 364-372 (1999).
5. Chen, R., Drnevich, V.P. and Daita, R.K. "Short-term electrical conductivity and strength development of lime kiln dust modified soils", *Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering*, **135**(4), pp. 590-594 (2009).
6. Nalbantoglu, Z. and Tuncer, E.R. "Compressibility and hydraulic conductivity of a chemically treated expansive clay", *Canadian Geotechnical Journal*, **38**(1), pp. 154-160 (2001).
7. Indraratna, B., Mahamud, M.A.A. and Vinod, J.S. "Stabilization of an erodible soil using chemical admixtures", *International Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 45-54 (2010).
8. Fell, R., Wan, C., Cyganiewicz J. and Foster M. "Time for development of internal erosion and piping in embankment dams", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **129**(4), pp. 307-314 (2003).
9. Farrar, J.A., Torres, R.L. and Erdogan, Z. "Bureau of reclamation erosion testing for evaluation of piping and internal erosion of dams", *Geotechnics of Soil Erosion, Geo-Denver*, New Peaks in Geotechnics, pp. 1-10 (2007).