مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲ - ۳۶، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۴۵-۱۵۱، (یادداشت فنی)

Research Note

تثبیت خاک واگرا با آهک و بنتونیت با بهسازی خاصیت خمیری برای کاهش اثرات قوس‌زدگی در سدهای خاکی

علیرضا فیروزفر* **(استادیار)**
محمد جعفری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

یکی از عوامل مهم تخریب سدهای خاکی آب‌شستگی است. این پدیده با وقوع یک ترک حتی کوچک در بدنه‌ی سد می‌تواند شروع و گسترش یابد. از علل وقوع ترک پدیده‌ی قوس‌زدگی است و با رعایت محدوده‌ی مناسب شاخص خمیری و نفوذپذیری، می‌توان تا حدود زیادی سد را در برابر تخریب ناشی از آب‌شستگی و قوس‌زدگی ایمن کرد. از آن‌جا که مصالح قرضه‌ی در دسترس همیشه مناسب نیستند می‌توان با اختلاط توأم مصالحی چون آهک و بنتونیت ضمن تثبیت خاک از عواقب افزودن مواد تثبیت‌کننده نیز جلوگیری کرد. این مقاله، مطالعه‌یی است در خصوص خاک قرضه‌ی سد میرزاخانلو واقع در استان زنجان (شهرستان طارم)، که پتانسیل واگرایی بالایی دارد و برای استفاده در بدنه‌ی سد باید اصلاح شود. هدف از اصلاح رسیدن به عدم واگرایی و در عین حال به‌منظور کاهش خطر ترک‌خوردگی، دست‌یابی به شاخص خمیری (PI) در محدوده‌ی ۱۶ تا ۳۰ است. طبق نتایج حاصله، ترکیب ۵ درصد آهک و ۱۵ درصد بنتونیت مناسب‌ترین حالت برای تأمین عدم واگرایی و شاخص خمیری مطلوب است.

واژگان کلیدی: خاک واگرا، قوس‌زدگی، افزودنی آهک، افزودنی بنتونیت، شاخص خمیری.

firoozfar@znu.ac.ir
mohammad.jafari@znu.ac.ir

۱. مقدمه

در سدهای خاکی تأمین خاک مورد نیاز از نزدیک‌ترین منبع به لحاظ اقتصادی حائز اهمیت است. به‌طوری که گاهی علی‌رغم مشکل‌دار بودن خاک در دسترس، ناگزیر به استفاده از آن هستیم. به‌عنوان مثال، سد کنترلی ـ مخزنی گلمن‌دره، یک سد خاکی با هسته‌ی رسی است که روی رودخانه‌ی گلمن‌دره واقع در استان خراسان شمالی احداث شده است. مصالح مورد استفاده در هسته‌ی سد از نوع رس با خاصیت خمیری پایین و دارای پتانسیل روان‌گرایی است که در حین ساخت، این پتانسیل با آزمایش‌های مختلف کنترل شده تا در دوره‌ی بهره‌برداری خطرآفرین نباشد.[۱]

چنانچه خاک قرضه دارای مشکلاتی از قبیل واگرایی باشد اصلاح خاک می‌تواند به‌عنوان گزینه‌یی مناسب‌تر از تأمین خاک از قرضه‌یی دیگر باشد. وجود خاک‌های مشکل‌دار از قبیل خاک‌های واگرا، باعث شسته شدن و فرسایش سریع خاک می‌شود و با بروز پدیده‌ی قوس‌زدگی و شروع ترک موجبات تخریب کلی سد را فراهم می‌آورد. خاک‌های واگرا، خاک‌های ریزدانه‌یی هستند که در آب‌های با غلظت پایین نمک به‌راحتی دچار آب‌شستگی می‌شوند.[۲] زمانی که نیروی وارد بر اجزای سد تغییر یابد، مثلا فشار آب منفذی در هنگام تخلیه‌ی سد کاهش یابد، پدیده‌ی قوس‌زدگی می‌تواند ایجاد شود. برخی از محققین روابطی برای این تغییرات تنش ارائه داده‌اند[۳] ولی انتخاب مصالح نقش مؤثری بر رفتار سد و توزیع تنش‌ها خواهد داشت. برای مثال، خاک‌هایی که انسجام بیشتری دارند مقاومت بیشتری نسبت به شکست هیدرولیکی دارند.[۴] بررسی سدهای مختلف در ایران با کمک ابزارهای دقیق اندازه‌گیری تنش و با کمک مدل‌سازی اجزای محدود، نقش تغییرات نیرویی در آغاز آب‌گیری تا تخلیه‌ی سد و نقش مصالح و مشخصات آن‌ها در انتقال تنش‌های موجود را نشان می‌دهد.[۵] پدیده‌ی قوس‌زدگی عبارت است از «انتقال تنش از توده‌ی خاک در حال گسیختگی به توده‌ی پایدار مجاور».[۶] محققین متعددی با کمک روابط و نظریه‌ها به توجیه و تشریح قوس‌زدگی پرداخته‌اند؛ کوالوسکی، اشنبلی و ترزاقی ازجمله‌ی این افرادند.[۷] بررسی‌های انجام گرفته روی پارامترهای مربوط به فشار آب حفره‌یی، ضریب قوس‌زدگی و تغییر شکل‌ها در سد مسجد سلیمان نشان داد که احتمال بروز ناپایداری در اولین مرحله‌ی آبگیری سد وجود دارد.[۸] در مقابل مطالعات صورت گرفته در خصوص ضریب قوس‌زدگی و تنش‌ها در سد گلابر زنجان حاکی از پایداری مطلوب این سد است.[۹]

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۹/۱۴، اصلاحیه ۱۳۹۷/۳/۲۲، پذیرش ۱۳۹۷/۴/۱۲.
DOI:10.24200/J30.2018.5174.2208

درکنار روابط نظری و توجه به عوامل هندسی تأثیرگذار بر پدیده‌ی قوس‌زدگی، استفاده از مصالح مناسب در بخش‌هایی از سد که به‌ناچار ناهمگونی مصالحی دارند، یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده است. حذف رفتار خمیری مصالح از محاسبات باعث برآورد بیش از میزان واقعی «قوس‌زدگی» می‌شود،[۱۰] چرا که خاصیت خمیری در خاک تأثیر به‌سزایی در ممانعت از ترک دارد.

ناهمگون بودن مصالح هسته با شالوده و پوسته می‌تواند عامل مهمی در بروز پدیده‌ی قوس‌زدگی باشد. در فونداسیون‌های شیب‌دار قوس‌زدگی می‌تواند در نواحی با تنش پایین رخ دهد. همچنین این نواحی مستعد شکست هیدرولیکی‌اند؛[۱۱] در نواحی تحت خطر ترک‌خوردگی، بالا بودن خاصیت خمیری خاک می‌تواند تأثیری مناسب درکاهش احتمال قوس‌شدگی داشته باشد. بنابراین رعایت استاندارد ـ نظیر دانه‌بندی و حدود خمیری در انتخاب مصالح، ازجمله روش‌های مناسب جلوگیری از تخریب سد است. دانه‌بندی مناسب خاک در هسته معمولاً عبارت است از CL، $SC-CL$، $SM-ML$، ML[۱۲] میزان نفوذپذیری مورد نیاز برای مصالح هسته از ۱×۱۰^{-۳} تا ۱×۱۰^{-۱۰} متر بر ثانیه متغیر است.[۱۱]

درناحیه‌ی رس تماسی، برخی از مشخصات خمیری مطلوب رس عبارت است از: حد مایع (LL) مساوی یا بیشتر از ۲۵-۳۰ درصد، شاخص خمیری (PI) بزرگ‌تر یا مساوی ۱۲-۱۵ درصد، میزان ذرات ریز عبوری از الک ۲۰۰ بیشتر یا مساوی ۵۰ درصد، و نیز میزان ذرات رسی بزرگ‌تر یا مساوی ۲۰-۲۵ درصد.[۱۳] محدوده‌ی مناسب شاخص خمیری برای مقابله با پدیده‌ی قوس‌زدگی ۱۶ الی ۳۰ است.[۱۱]

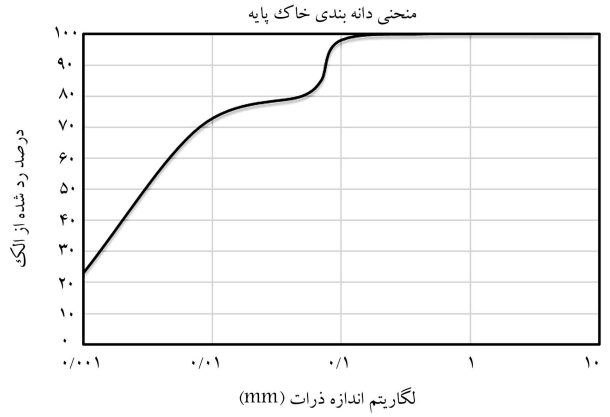
هدف این پژوهش، تثبیت خاک واگرا با آهک به‌منظور استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی است، با در نظرگرفتن این مطلب که آهک باعث کاهش خاصیت خمیری خاک خواهد شد. کاهش خاصیت خمیری می‌تواند مقاومت خاک در برابر ترک و قوس‌شدگی راکاهش دهد و نهایتاً احتمال وقوع پدیده‌ی قوس‌زدگی درصورت استفاده از خاک مورد نظر در هسته و ناحیه‌ی تماسی فونداسیون و هسته وجود خواهد داشت. بدین منظور علاوه بر تثبیت واگرایی، خاصیت خمیری خاک نیز اصلاح می‌شود زیرا خاصیت خمیری مناسب نقش مهمی در جلوگیری از عواقب پدیده‌ی قوس‌زدگی (ایجاد ترک) دارد.

نمونه‌یی از خاک‌های رسی واگراکه پتانسیل واگرایی بالایی دارند به‌عنوان مصالح پایه در این تحقیق مورد آزمایش قرار می‌گیرد. با شناسایی نوع خاک و رده‌بندی آن، آزمون‌های تعیین واگرایی شامل پین‌هول، آب‌سنجی (هیدرومتری) دوگانه، شیمیایی و کرامب انجام می‌پذیرد. آهک به‌عنوان ماده‌ی شیمیایی پیشنهادی برای تثبیت واگرایی و بنتونیت برای بهبود خواص خمیری انتخاب می‌شود. با افزودن آهک واگرایی اصلاح شده، و بهبود خاصیت خمیری با افزودنی بنتونیت جبران می‌شود. چرخه‌ی افزودن آهک و بنتونیت تا تأمین اهداف مورد نظر ادامه می‌یابد و در نهایت نمونه‌ی بهینه انتخاب می‌شود.

۲. مصالح مورد استفاده

۱.۲. خاک

خاک واگرای مورد استفاده در پژوهش حاضر، از منابع قرضه‌ی سد «میرزاخانلو» تهیه شده است. محل احداث این سد در فاصله‌ی ۷۷ کیلومتری شهر زنجان و در شهر درام از توابع شهرستان طارم استان زنجان قرار دارد. وزن مخصوص دانه‌های خاک (G_s) بر اساس استاندارد ASTM D۸۵۴ ۲٫۶۴ تعیین شد و طبق نتایج



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی نمونه‌ی خاک اصلاح نشده بر اساس استاندارد ASTM – D ۴۲۲.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی افزودنی‌ها (مشخصات بنتونیت ازکارخانه‌ی پودر اراک و مشخصات آهک ازکارخانه‌ی آهک لرستان).

مشخصات	آهک	بنتونیت
SiO_2	۱٫۱۵	۵۵٫۳۵
Al_2O_3	۰٫۳۶	۱۴٫۰۷
Fe_2O_3	۰٫۱۱	۲٫۷۹
CaO	۵۶٫۶۸	۱٫۰۹
Na_2O	۰٫۰۸	۴٫۹۱
K_2O	۰٫۰۳	۰٫۲۱
MgO	۱٫۳۵	۳٫۸۶
سایر موارد	۳۹٫۹۲	۴۰٫۲

حاصل از آب‌سنجی (ASTM D۴۲۲)، دانه‌بندی این خاک مطابق شکل ۱ ارائه می‌شود. همچنین براساس روش طبقه‌بندی متحده، این خاک ازنوع رس با خاصیت خمیری بالا (CH) است.

۲.۲. آهک

آهک مورد استفاده در این پروژه با کیفیت هیدراته‌ی بالا و تولید شده توسط شرکت آهک لرستان است که در جدول ۱ مشخصات آن ثبت شده است.

۳.۲. بنتونیت

بنتونیت مورد استفاده در این پژوهش از نوع سدیمی است که ازکارخانه‌ی پودراراک تهیه شده است؛ مشخصات شیمیایی این ماده در جدول ۱ و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است.

۳. آماده کردن نمونه‌ها

ابتدا خاک حمل شده به آزمایشگاه در دمای اتاق پهن وکاملاً خشک می‌شود. چون خاک به‌صورت کلوخه در آمده بود، آن را با چکش لاستیکی می‌کوبند تا از آسیب رسیدن به بافت خاک جلوگیری شود. مطالعات نشان داده که اگر خاک لایه‌ی رسی متراکم قبل ازکوبیده شدن توسط غلتک، از الک نمره‌ی چهار (۴٫۷۵ میلی‌متر)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی بنتونیت مورد استفاده (اخذ شده از کارخانه‌ی پودر اراک).

مشخصات	مقادیر (٪)
قابلیت جذب آب	۱۰۰-۱۱۰
درصد کانی مونت موریونیت	بیش از ۷۵
حد روانی	۲۳۰
حد خمیری	۱۱۰
ذرات عبوری از الک ۲۰۰	۹۹/۰۸

عبور داده شود، شرایط تراکم بهتری بر آن حاکم خواهد شد زیرا چنین خاکی کلوخه‌ی کم‌تری دارد.[۱۱] لذا در این پژوهش نیز از الک نمره ۴ استفاده شد. در ساخت نمونه‌ها برای آزمایش‌های مختلف، ابتدا خاک به میزان لازم از الک مربوط به استاندارد آن آزمایش عبور داده شد (آزمایش حدود اتربرگ: الک نمره ۴۰، آزمایش پین‌هول و آب‌سنجی مضاعف: الک شماره ۱۰). برای این که مخلوط‌های خاک و افزودنی‌ها در تمامی آزمایش‌ها یکنواخت باشد، از هر مخلوط به مقدار مورد نیاز برای تمامی آزمایش‌های پیش‌بینی شده تهیه شد. نمونه‌های ساخته شده با خاک خالص به مدت ۲۴ ساعت و خاک مخلوط شده با درصدهای مختلف افزودنی‌ها (متراکم شده در درصد رطوبت بهینه) به مدت ۷ روز در کیسه‌های پلاستیکی دربسته نگه‌داری شد و پس از آن آزمایش‌های مختلف روی آنها انجام گرفت.

با توجه به این که گذشت زمان باعث تغییر تأثیر مواد افزودنی بر خاک است و نیز با توجه به محدودیت زمان انجام پژوهش، زمان عمل‌آوری به‌عنوان زمانی مؤثر بر نتایج خروجی معادل ۷ روز انتخاب می‌شود.

درصد وزنی انتخابی آهک و بنتونیت در تثبیت نمونه‌ها بسیار حائز اهمیت است. عوامل مختلفی بر انجام واکنش خاک رس و آهک مؤثر است؛ ازجمله این موارد می‌توان به میزان رس اشاره کرد. اگر میزان رس از حد معینی کم‌تر باشد، واکنش‌ها انجام نمی‌شود؛ به همین علت وجود رس کافی برای انجام واکنش لازم است.[۱۴] می‌توان گفت باید حداقل ۲۵ درصد از دانه‌های خاک کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر باشد تا تثبیت با آهک ثمر دهد.[۱۵] همچنین میزان PH محیط مهم است، به‌طوری که باید حداقل مقدار PH از ۱۲/۴ بیشتر باشد تا باعث انجام واکنش بین آهک و رس شود.[۱۶] نوع و غلظت کاتیون‌های موجود در محیط و نوع کانی رسی نیز اهمیت دارد.[۱۷] اگر میزان آهک از حد بهینه بیشتر باشد، مقداری آهک مصرف نشده در محیط وجود خواهد داشت که باعث کاهش مقاومت خاک تثبیت شده با آهک می‌شود.[۱۸] مقدار افزودنی بنتونیت در خاک‌های ریزدانه کم‌تر از ۶ درصد و در خاک‌های درشت‌دانه کم‌تر از ۱۵ درصد توصیه می‌شود.[۱۶] انتخاب درصدهای ترکیبی باید به‌گونه‌یی باشد که نفوذپذیری نیز در محدوده‌ی قابل قبول سد قرار گیرد. بنتونیت باعث کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود.[۱۹و۲۰]

تأثیر آهک بر نفوذپذیری متغیر است به طوری که برخی محققین کاهش نفوذپذیری[۱۹،۲۱و۲۲] و برخی دیگر افزایش آن را گزارش کرده‌اند.[۲۳و۲۴] در جدول ۳ به‌طور خلاصه ترکیب نمونه‌های ساخته شده ارائه شده است؛ در این جدول S نشان‌گر خاک رس، L نشان‌گر آهک و B نشان‌گر بنتونیت است.

۴. آزمایش‌ها

بررسی واگرایی خاک با استفاده از انجام آزمایش‌های پین‌هول و آب‌سنجی دوگانه، شیمیایی و کرامب صورت می‌پذیرد. برای تعیین مشخصات پلاستیک خاک از آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D۴۳۱۸ استفاده می‌شود. از آزمایش نفوذپذیری با بار متغیر نیز برای تعیین نفوذپذیری و از آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق روش ASTM D۶۹۸ برای تعیین درصد رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص خشک استفاده می‌شود.

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی.

نام ترکیب	درصد آهک	درصد بنتونیت
S	۰	۰
S + ٪۰/۶ L	۰/۶	۰
S + ٪۱ L	۱	۰
S + ٪۱/۵ L	۱/۵	۰
S + ٪۱/۵ L + ٪۳ B	۱/۵	۳
S + ٪۳ L + ٪۵ B	۳	۵
S + ٪۳ L + ٪۱۰ B	۳	۱۰
S + ٪۵ L + ٪۱۰ B	۵	۱۰
S + ٪۵ L + ٪۱۵ B	۵	۱۵
S + ٪۵ L + ٪۲۰ B	۵	۲۰

جدول ۴. نتایج ارزیابی پتانسیل واگرایی خاک پایه از آزمایش آب‌سنجی دوگانه و پین‌هول.

نتایج آزمایش پین‌هول روی خاک اصلاح نشده (روش C)			
هد آب میلی‌متر	مدت آزمایش هد مشخص (دقیقه)	تیرگی آب در انتهای آزمایش	قطر سوراخ انتهای آزمایش (میلی‌متر)
۵۰	۱۰	کدر	۱/۷
ASTM D۴۶۴۷: کلاس D (واگرا)			
نتایج آزمایش آب‌سنجی دوگانه روی خاک اصلاح نشده			
درصد ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر (آب‌سنجی دوگانه)		درصد ریزتر از ۰/۰۰۵ میلی‌متر (آب‌سنجی ساده)	
٪۲۴/۲		٪۴۳/۹۶	
٪۵۵ = (۴۳/۹۶ ÷ ۲۴/۲) × ۱۰۰ = درصد واگرایی			
ASTM D۴۲۲۱ : پتانسیل واگرایی بالا			

۱.۴. بررسی واگرایی

بررسی‌های صورت‌گرفته روی خاک پایه‌ی مورد استفاده در آزمایش‌های این پژوهش بیان‌گر پتانسیل بالای واگرایی این خاک است. نتایج آزمایش‌های آب‌سنجی دوگانه و پین‌هول انجام یافته روی خاک پایه در جدول ۴ ارائه شده است.

۱.۱.۴. آزمایش پین‌هول (ASTM D۴۶۴۷)

این آزمایش با افزودن آهک به‌منظور بهبود واگرایی آغاز می‌شود. نمونه‌ها با افزایش ۰/۶ درصد آهک همچنان در محدوده‌ی واگرایی قرار دارند و بنابراین درصد آهک افزوده می‌شود. با افزودن ۱/۶ درصد آهک واگرایی خاک به‌طور کامل رفع نشده است؛ بنابراین میزان آهک افزوده می‌شود و با مشاهده‌ی رفع مشکل واگرایی در ۱/۵ درصد آهک، طبق نتایج آزمایش حدود اتربرگ شاخص خمیری مخلوط خاک

و آهک کاهش یافته و در محدوده‌ی قابل قبول قرار ندارد. بر این اساس، آزمایش روی نمونه‌های با افزودنی ترکیبی آهک و بنتونیت انجام می‌شود. با افزودن آهک شاهدِ تثبیت واگرایی هستیم اما با افزودن بنتونیت با هدف افزایش شاخص خمیری، به علت نوع بنتونیت (سدیم‌دار) واگرایی دوباره بروز می‌یابد و بنابراین مجدداً آهک برای تثبیت افزوده می‌شود. در نهایت ترکیب همزمان ۵ درصد آهک و ۱۵ درصد بنتونیت باعث تثبیت واگرایی شده و شاخص خمیری نیز در محدوده‌ی مناسب قرار می‌گیرد.

در بنتونیت سدیم‌دار که نوعی رس از گروه مونت‌موریلونیت است، بین واحدهای ساختاری یون سدیم و در بنتونیت کلسیم‌دار، یون کلسیم قرار می‌گیرد.[۲۰] یون کلسیم این بنتونیت به دلیل داشتن دو بارِ مثبت می‌تواند با هر دو سمت واحدهای ساختاری بنتونیت ارتباط برقرار کند و بدین ترتیب، در مقایسه با بنتونیت سدیم‌دار ـ که دارای یون سدیم تک‌ظرفیتی است ـ می‌تواند از واگرایی بیشتر حین تماس با آب جلوگیری کرده یا آن را کاهش دهد. بنتونیت سدیم‌دار در مقایسه با بنتونیت کلسیم‌دار از کارایی بهتری برخوردار است.[۲۵] در تحقیق حاضر هدف برطرف کردن مشکل واگرایی خاک با کمک آهک بوده است بنابراین تأثیر بنتونیت به‌طور مستقیم مورد بررسی قرار نگرفته است. با وجود تثبیت شدن خاک با ۱٫۵ درصد آهک، افزودن بنتونیت برای بهبود شاخص خمیری به دلیل ساختار سدیمی آن، باعث واگرایی مجدد نمونه می‌شود. در نهایت ترکیب ۵ درصد آهک با ۱۵ درصد بنتونیت به‌عنوان میزان بهینه انتخاب شد. با افزودن ۲۰ درصد بنتونیت شاهد واگرایی خاک در آزمایش پین‌هول هستیم.

۲.۱.۴. آزمایش آب‌سنجی دوگانه (ASTM D4221)

واکنش تبادل کاتیونی با افزودن آهک به نمونه‌ی خاک شروع و ضمن کاهش شاخص خمیری موجب فولکوله شدن ذرات می‌شود.[۱۷] لذا درصد ذرات ریزکاهش می‌یابد و در نتیجه، با توجه به معیار درصد واگرایی که نسبت درصد ذرات ریزتر از ۰٫۰۰۵ میلی‌متر را در دوحالت با ماده‌ی پراکنده‌ساز و بدون آن را بیان می‌کند، کاهش درصد واگرایی در آزمایش آب‌سنجی دوگانه است. اضافه کردن بیشتر آهک با کاهش شاخص خمیری موجب کم‌تر شدن درصد واگرایی می‌شود، به‌نحوی که با افزایش آهک بیشتر از ۱٫۵ درصد وزن خشک خاک، واگرایی به صفر همگرا می‌شود. با توجه به کاهش شاخص خمیری و در راستای جبران آن، بنتونیت به مخلوط اضافه می‌شود که با توجه به سدیم‌دار بودن بنتونیت مورد استفاده در این پژوهش، در آزمون آب‌سنجی دوگانه سدیم موجود در بنتونیت نقش سدیم موجود درگالکن (هگزا متافسفات سدیم) را ایفا می‌کند[۲۶] و سبب می‌شود تا بدون اضافه کردن ماده‌ی پراکنده ساز به مخلوط درون استوانه، ذرات ریز پس از ۲ ساعت همچنان معلق بماند و به میزان کمی در استوانه‌ی مدرج ته‌نشین شوند. بدین ترتیب در مقایسه‌ی درصد ذرات ریزتر از ۵ میکرون، در حالت بدون گالکن نسبت به حالتی که از گالکن استفاده می‌شود، درصد واگرایی بیش از ۵۰ درصد است و نمونه‌ها به‌صورت واگرا طبقه‌بندی می‌شوند. طبق بررسی‌های صورت گرفته در ترکیب بهینه، یعنی ۵ درصد آهک و ۱۵ درصد بنتونیت، مخلوط به‌صورت متوسط واگرا طبقه‌بندی می‌شود. می‌توان گفت برای رسیدن به هدف این پژوهش آزمایش آب‌سنجی دوگانه معیار برتری نخواهد بود.

۳.۱.۴. آزمایش شیمیایی

در این تحقیق معیارهای بررسی واگرایی خاک رسی با کمک آزمایش شیمیایی به‌صورت بررسی هدایت الکتریکی (SAR، نسبت جذب سدیم) است[۲۷] که نتایج در جدول ۵ ارائه می‌شود. در آزمایش شیمیایی یاد شده، چنانچه هدایت الکتریکی

جدول ۵. نتایج آزمایش شیمیایی در زمان عمل‌آوری ۷ روزه.

سن عمل‌آوری	نام خاک	SAR	تثبیت
۷ روزه	خاک	۱۲٫۳	×
	خاک + ۱٫۵٪ آهک	۱٫۶	√
	خاک + ۵٪ آهک + ۱۵٪ بنتونیت	۱۲٫۱	×
	خاک + ۵٪ آهک+ ۲۰٪ بنتونیت	۱۲٫۴	×

نمونه‌ها افزایش و میزان مواد معلق کاهش یابد، چنین برداشت می‌شود که واگرایی کاهش یافته است.

پدیده‌ی واگرایی در خاک‌های رسی یک پدیده‌ی فیزیکی و شیمیایی است و خصوصیات شیمیایی خاک به نوع، میزان کاتیون‌ها و آب نفوذی اطراف دانه‌های رسی بستگی دارد که در ایجاد این پدیده مؤثرند.[۲۶]

با افزودن آهک، یون کلسیم جایگزین سدیم می‌شود و باعث افزایش هدایت الکتریکی نمونه می‌شود. روند افزایش هدایت الکتریکی با افزایش درصد کمی از آهک هم بسیار بالاست که نشان‌دهنده‌ی ایجاد واکنش سریع بین رس و آهک است.[۲۸] با افزودن آهک به خاک رس کاتیون Ca^{+2} در آب بین حفرات خاک آزاد شده و باعث افزایش غلظت کاتیون‌ها در مخلوط می‌شود. یون Ca^{+2} به سطح منفی کانی‌های رسی نزدیک، و جایگزین کاتیون Na^{+} خاک می‌شود و واکنش تعویض کاتیونی اتفاق می‌افتد.[۱۷]

با توجه به استفاده از بنتونیت سدیمی در پژوهش حاضر، این افزودنی باعث افزایش غلظت سدیم موجود در خاک شده و با افزایش درصد بنتونیت نسبت به آهک و در درصدهای بالای آن، مشاهده می‌شود که نمونه‌ها واگرا می‌شوند. نتایج آزمایش شیمیایی نیز مانند آزمایش آب‌سنجی دوگانه تحت تأثیر بنتونیت مورد استفاده قرار گرفته است. ترکیبی که در آزمایش پین‌هول غیر واگرا تشخیص داده شد، در این آزمایش به دلیل افزایش یون سدیم، واگرا رده‌بندی شد.

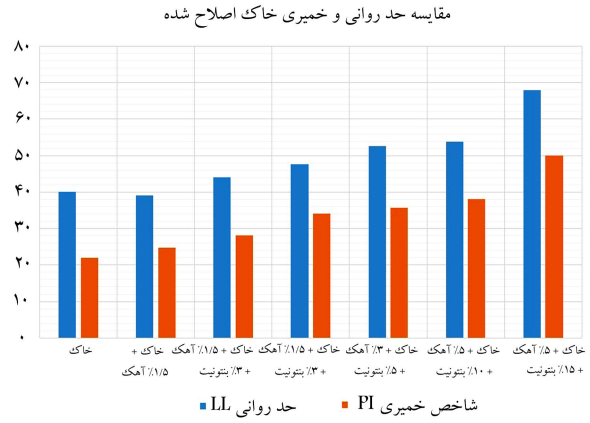
نتایج به دست آمده از هرکدام از آزمایش‌های پین‌هول، شیمیایی و آب‌سنجی دوگانه دلیل قطعی برای شناسایی خاک واگرا نیست؛ بنابراین معمولاً چند آزمایش توأمان انجام می‌شود و نتیجه‌گیری کلی درمورد واگرایی یا عدم واگرایی وابسته به قضاوت مهندسی است.

۵. بررسی خواص خمیری نمونه‌ها

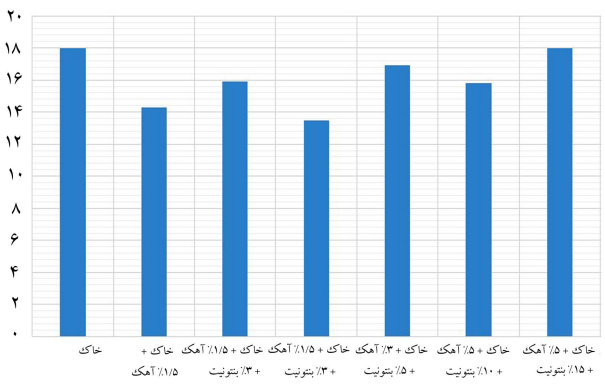
نتایج آزمایش تعیین حد روانی خاک رس در آزمایش جام کاساگرانده نشان می‌دهد که خاک طبیعی دارای حد روانی $LL = ۴۰$ است؛ نتایج آزمایش تعیین حد خمیری خاک رس در آزمایش فتیله نشان‌دهنده‌ی $PL = ۲۲$ است. افزودن آهک به خاک رس باعث کاهش حد روانی آن می‌شود. با افزودن آهک به خاک رس، کاتیون Ca^{+2} بین حفرات خاک آزاد و باعث افزایش غلظت کاتیون‌ها در مخلوط می‌شود. یون Ca^{+2} به سطح منفی کانی‌های رسی نزدیک شده و جایگزین کاتیون Na^{+} خاک می‌شود (واکنش تعویض کاتیونی اتفاق می‌افتد) لذا ضخامت لایه آب دوگانه کاهش یافته و در نتیجه باعث کاهش حد روانی خاک اصلاح شده با آهک می‌شود.[۱۷] حد خمیری میزان چسبندگی ذرات خاک در برابر ترک‌خوردگی را بیان می‌کند.[۲۹] میزان چسبندگی و در نتیجه میزان مقاومت برشی بین ذرات

خاک بایستی به‌اندازه‌ی کافی کم باشد تا ذرات خاک بتوانند به‌راحتی روی هم بغلتند. با این حال، در همان زمان، مقاومت برشی بین ذرات باید به‌اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا توده‌ی خاک را همگن نگه دارد و از ترک خوردن جلوگیری کند. بنابراین حد خمیری میزان درصد رطوبتی است که خاک دارای مقاومت برشی تقریباً مشخصی است. همان‌طور که اشاره شد با افزودن آهک به خاک رس، ضخامت لایه‌ی دوگانه کاهش می‌یابد و باعث افزایش نیروی جاذبه بین ذرات رس و در نتیجه افزایش مقاومت بین سطوح ذرات رس می‌شود. در نهایت گران‌روی آب حفره‌یی شده افزایش می‌یابد و برای رسیدن به حد خمیری آب بیشتری نسبت به خاک بدون آهک نیاز است لذا باعث افزایش سریع در حد خمیری مایع می‌شود.[۳۰]

علاوه بر این، تعویض کاتیونی باعث تغییر ساختار خاک به فولکوله و در نتیجه باعث افزایش مقاومت دانه‌های خاک در برابر جابه‌جایی و منجر به افزایش حد خمیری می‌شود.[۲۰] شاخص خمیری که حاصل تفاضل حد خمیری و حد روانی است، با افزودن آهک کاهش می‌یابد. بدیهی است که بنتونیت خاصیت خمیری خاک را بهبود می‌بخشد، زیرا دارای ماهیت رسی بوده و در درجه‌ی اول درصد ذرات رسی موجود در خاک کنترل‌کننده‌ی حد خمیری و حد روانی است.[۳۱] لذا با افزودن بنتونیت به خاک، درصد ذرات رسی موجود در مخلوط بیشتر شده و خاک خمیری‌تر می‌شود و در نتیجه حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد.[۲۰] در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ انجام شده روی نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار تغییرات حدود خمیری خاک اصلاح شده.



شکل ۳. نمودار تغییرات شاخص خمیری ۷ روزه.

۶. نتیجه گیری

به لحاظ اقتصادی بهترین راه تأمین مواد مورد نیاز در ساخت سدهای خاکی، استفاده از منابع مربوط به نزدیک‌ترین قرضه به محل ساختگاه سد است. با توجه به این که ممکن است خاک منابع مورد نظر دارای شرایط مناسبی برای استفاده در پروژه نباشد، بررسی گزینه‌ی اصلاح مشخصات خاک می‌تواند به‌عنوان گزینه‌یی اقتصادی مطرح شود. از این‌رو در پژوهش حاضر هدف اصلی عبارت است از اصلاح خاک واگرا با کمک افزودنی ترکیبی آهک و بنتونیت، که با مطالعه‌ی موردی روی خاک نمونه‌برداری شده از محل قرضه‌ی «سد میرزاخانلو» انجام گرفته است. با توجه به این نکته که عدم تأمین خصوصیات خمیری مناسب درکنار سایر عوامل ـ از قبیل شرایط ساختگاه، عوامل هندسی و نحوه‌ی اجرا ـ می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌یی در شروع یا تشدید پدیده‌ی قوس‌زدگی در سدهای خاکی باشد. در این پژوهش، از آهک برای اصلاح واگرایی و از بنتونیت برای اصلاح خواص خمیری استفاده شد. اگرچه در این مطالعه فقط از یک نمونه خاک واگرا استفاده شده اما روش مورد استفاده قابل تعمیم است و در بردارنده‌ی یک نکته‌ی اساسی در اصلاح خاک‌های واگرا جهت استفاده در سدهاست. در اکثر مسائل مربوط به تثبیت خاک‌های واگرا در سدسازی به تغییرات خصوصیات خمیری حاصل از به کارگیری مواد افزودنی توجه چندانی نمی‌شود، در حالی که این موضوع می‌تواند آغاز یک مشکل بزرگ باشد. پدیده‌ی قوس‌زدگی و ترک‌های ناشی از نشست‌ها و تغییرات و انتقال تنش در نواحی مختلف سدهای خاکی می‌تواند با خصوصیات خمیری مناسب مصالح تا حد زیادی کنترل شود؛ لذا یکی از معیارهایی که لزوم برکنترل دارند معیار شاخص خمیری در لایه‌ی رس تماسی و هسته‌ی سدهای خاکی است. پس لازم است توجه

جدول ۶. نتایج واگرایی و شاخص خمیری.

سن عمل‌آوری	نام ترکیب	نتایج پین‌هول	شاخص خمیری
۷ روز	خاک	واگرا	۱۸
	خاک + ۰٫۶٪ آهک	واگرا	-
	خاک + ۱٪ آهک	متوسط واگرا	-
	خاک + ۱٫۵٪ آهک	غیر واگرا	۱۴٫۳
	خاک + ۱٫۵٪ آهک + ۳٪ بنتونیت	متوسط واگرا	۱۵٫۹
	خاک + ۳٪ آهک + ۵٪ بنتونیت	غیر واگرا	۱۳٫۵
	خاک + ۳٪ آهک + ۱۰٪ بنتونیت	متوسط واگرا	۱۶٫۹
	خاک + ۵٪ آهک + ۱۰٪ بنتونیت	غیر واگرا	۱۵٫۸
	خاک + ۵٪ آهک + ۱۵٪ بنتونیت*	غیر واگرا	۱۸
	خاک + ۵٪ آهک + ۲۰٪ بنتونیت	متوسط واگرا	-

* نمونه‌ی بهینه

شود که اگر ماده‌ی افزودنی تثبیت‌کننده موجب کاهش خاصیت خمیری می‌شود، برای جبران این کاهش ماده‌ی مکمل در نظر گرفته شود.

به‌منظور اصلاح واگرایی خاک واگرای قرضه‌ی سد میرزاخانلو، آهک به میزان ۱٫۵٪ کارساز است، اما افزودن آن باعث کاهش دامنه‌ی خمیری خاک می‌شود. دلیل این امر را می‌توان به واکنش سریع تبادل کاتیونی آهک با خاک نسبت داد، ولی در نمونه‌های اصلاح شده با افزودنی آهک و بنتونیت، به دلیل افزایش کانی‌های رسی مخلوط و خمیری‌تر شدن آن، کل مخلوط وضعیت بهتری پیدا می‌کند و این افزودنی با میزان ۱۵ درصد وزن خشک خاک می‌تواند مناسب‌ترین حالت در ترکیب با آهک باشد.

در جدول ۶ خلاصه نتایج برخی از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر ارائه شده است. با توجه به نتایج نهایی آزمایش‌ها، نمونه‌ی B ٪۱۵ + L ٪۵ + S که غیر واگراست و همچنین دارای شاخص خمیری در محدوده‌ی مناسب است، به‌عنوان نمونه‌ی بهینه انتخاب می‌شود. با توجه به شبیه‌سازی واقعی‌تر از آب‌شستگی سدهای خاکی در آزمایش پین‌هول با قضاوت مهندسی می‌توان گفت نتایج این آزمایش در تثبیت خاک واگرای هدف کاربرد مناسب‌تری دارد.

در صورت افزایش بیش از حد بنتونیت به مخلوط آهک و خاک، واگرایی افزایش می‌یابد. بنابراین درصد بنتونیت بهتر است در محدوده‌ی زیر ۲۰ درصد قرار داشته باشد.

منابع (References)

1. Yazarlu, R., Majidi Hasan Abadi, O., Gholizadeh, J. and et al. "Dispersivity assessment of the fine graded soil used in the core of the earth dams: the case of galmen darreh dam", *4th National Conference of Applicable Researches on Civil Engineering*, Architecture, and Urbanism (2016).
2. ICOLD (ICOI) Dispersive Soils in embankmeny dams-review (Bulletin No. 77), Paris (1990.D).
3. Djarwadi, D., Suryolelono, K.B., Suhendro, B. and et al. "Failure criterion of soils during hydraulic fracturing test", *Proceedings 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Build Environment in Developing Country*, Bandung. pp. G.30-G.35 2-3November (2009).
4. Djarwadi, D., Suryolelono, K.B., Suhendro, B., and et al. "Selection of soils as clay core embankment materials for rock fill dams to resist hydrauli", *2nd International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction Materials 2014* (SCESCM 2014).
5. Mollaei, R., Mollaei, M., Noori Gheidari, M. and et al. "Evaluation of gelabar earth dam behavior during construction and first watering by the method of limited components and comparison with real amount resulted by precise instruments data",*European Online Journal of Natural and Social Sciences 2014; www.european-science.com*, **3**(4), Special Issue on Architecture, Urbanism, and Civil Engineering ISSN pp. 1805-3602
6. Guo, P. and Zhou, S. "Arch in granular materials as a free surface problem", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **37**, pp.1045-1068 (2012).
7. Jafari, H. "Stabilization of diamantric clay soils using aluminum sulfate", Master's dissertation (2010).
8. Maleki, M. and Alavifer, A., *Safety Evaluation of Masjed-e-soleyman, During Construction and First Stage Impounding*, 73^{rd} Annual Meeting of ICOLD, Tehran, Iran, No.101-S5 (2005).
9. Nouri Geidari, M. H., Alielahi, H. and Mollaei, R. "Numerical analysis of the arching coefficient and principle Stresses in golabar earth dam" *National Conference on Architecture, Civil, and Urban Development*, Tabriz, Iran (2014).
10. Maksimovic, M. "Optimal position of central clay core of rock-fill dam in respect to arching and hydraulic fracture", International Congress on Large Dam, Madrid, pp 789-800 (1973).
11. Embankment Dam Design Standards No. 13. Chapter 2: Embankment Design (2012).
12. Baghbanian, AS., Tajik, H. and Nikoodl, M. "Application of kaolin and bentonite in improvement of soil used in dams of soil", *Proceedings of the Third Conference on Engineering and Environmental Geology of Iran, Bu-Ali Sina University*, Hamedan, Iran, September 18-20, 93-104 (2003).
13. Jafari, M. and Firoozfar, A. "Analysis of lateral problems in using of corrected dispersive soil in hydraulic structure", 5^{th} *International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics* (2016).
14. Kassim, K.A. and Chern, K.K. "Lime stabilized malaysian cohesive soil", *Jurnal Kejuruteraan Awam*, **16**(1), pp. 13-32 (2004).
15. Beeghly, J.H. "Recent experiences with lime-fly ash stabilization of pavement subgrade soils, base, and recycled asphalt", *In Proceedings of International Ash Utilization Symposium*, pp. 435-452 (2003).
16. Ouhadi, V., Yong, R., Amiri, M. and et al. "Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays", pp. 111-118 (2014).
17. Naderi, H. "Effect of granular slag of isfahan iron furnace on the resistance and characteristics of clay soil clay lime concentrated in sulfate adhesion", Master's Degree (1388).
18. Ali Jawaid, S.M. "Stabilization of organic soil using-alaked lime", *Proceeding of 4th International Confrence on Civil Engineering*, Sharif University of Technology, Tehran, 182 Iran, pp. 326-333 (1999).
19. Firoozfar, A. and Khosroshiri, N. "Kerman clay improvement by lime and bentonite to be used as materials of landfill liner", Geotechnical and Geological Engineering, 1-13 (2016).

20. Kumar, S. and Yong, W.L. "Effect of bentonite on compacted clay landfill barriers", *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, **11**(1), pp. 71-89 (2002).
21. Galvão, T.C.D.B., Elsharief, A. and Simões, G.F. "Effects of lime on permeability and compressibility of two tropical residual soils", *Journal of Environmental Engineering*, pp. 881-885 (2004).
22. Bozbey, I. and Guler, E. "Laboratory and field testing for utilization of an excavated soil as landfill liner material", *Waste Management*, **26**(11), pp. 1277-1286 (2006).
23. 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).
24. Jafari, M. "Dispersive soil modification to be used for the clay core of dams considering arching effect", A Thesis Presented for Degree of Master of Science in Geotechnical Engineering (2017).
25. Clem, R. and Doehler, R. "Indastrail of Bentonit", American Colloid Company (1961).
26. Hadi, M., Ajul Luian, R. and Sadeghpour, A. "Assessment of the effect of bentonite additive on the properties of soil density", *Journal of Engineering Geology*, **6**(3), (Autumn 2014).
27. Gerber, F.A. and Harmse, H.J. "Proposed procedure for identification of dispersive soil by chemical testing". *The Civil Engineer in South Africa*, **29**, pp. 397-399 (2008).
28. Bhuvaneshwari, S., Soundara, B. and Robbinnson, R.G. "Stabilization and microstructural modifacation of dispersive clayey soils", IIT Madras,Chennia,Tamil Nadu,India (2008).
29. Yong, R.N. and Warkentin, B.P., *Introduction to Soil Behavior*, Mc.Millan Company, NY (1975).
30. Dash, S.K. and Hussain, M. "Lime stabilization of soils: reappraisal", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**(6), pp. 707-714 (2011).
31. Seed, H.B., Woodward, R.J. and Lundgren, R. "Clay mineralogical aspects of the atterberg limits", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **90**(4), pp. 107-134 (1964).