

تشبیت خاک واگرا با آهک و بنتونیت با بهسازی خاصیت خمیری برای کاهش اثرات قوس زدگی در سدهای خاکی

Research Note

علیرضا فیروزفر* (استادیار)

محمد جعفری (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه زنجان

یکی از عوامل مهم تخریب سدهای خاکی آب شستگی است. این پدیده با وقوع یک ترک حتی کوچک در بدنه سد می تواند شروع و گسترش یابد. از علل وقوع ترک پدیده قوس زدگی است و با رعایت محدوده مناسب شاخص خمیری و نفوذپذیری، می توان تا حدود زیادی سد را در برابر تخریب ناشی از آب شستگی و قوس زدگی ایمن کرد. از آنجا که مصالح قرضه در دسترس همیشه مناسب نیستند می توان با اختلاط توأم مصالحی چون آهک و بنتونیت ضمن تشبیت خاک از عواقب افزودن مواد تشبیت کننده نیز جلوگیری کرد. این مقاله، مطالعه ای است در خصوص خاک قرضه سد میرزاخانلو واقع در استان زنجان (شهرستان طارم)، که پتانسیل واگرایی بالایی دارد و برای استفاده در بدنه سد باید اصلاح شود. هدف از اصلاح رسیدن به عدم واگرایی و در عین حال به منظور کاهش خطر ترک خوردگی، دستیابی به شاخص خمیری (PI) در محدوده ۱۶ تا ۳۰ است. طبق نتایج حاصله، ترکیب ۵ درصد آهک و ۱۵ درصد بنتونیت مناسب ترین حالت برای تأمین عدم واگرایی و شاخص خمیری مطلوب است.

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

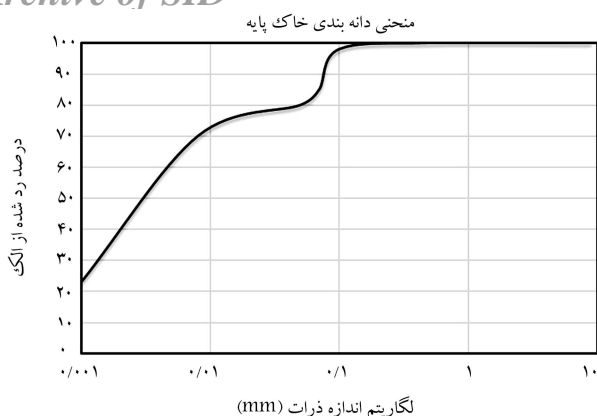
۱. مقدمه

در سدهای خاکی تأمین خاک مورد نیاز از نزدیک ترین منبع به لحاظ اقتصادی حائز اهمیت است. به طوری که گاهی علی رغم مشکل دار بودن خاک در دسترس، ناگزیر به استفاده از آن هستیم. به عنوان مثال، سد کنترلی - مخزنی گلن دره، یک سد خاکی با هسته رسی است که روی رودخانه گلن دره واقع در استان خراسان شمالی احداث شده است. مصالح مورد استفاده در هسته سد از نوع رس با خاصیت خمیری پایین و دارای پتانسیل روان گرایی است که در حین ساخت، این پتانسیل با آزمایش های مختلف کنترل شده تا در دوره بهره برداری خطر آفرین نباشد.^[۱] چنانچه خاک قرضه دارای مشکلاتی از قبیل واگرایی باشد اصلاح خاک می تواند به عنوان گزینه ای مناسب تر از تأمین خاک از قرضه ای دیگر باشد. وجود خاک های مشکل دار از قبیل خاک های واگرا، باعث شسته شدن و فرسایش سریع خاک می شود و با بروز پدیده قوس زدگی و شروع ترک موجبات تخریب کلی سد را فراهم می آورد. خاک های واگرا، خاک های ریزدانه ای هستند که در آب های با غلظت پایین نمک به راحتی دچار آب شستگی می شوند.^[۱] زمانی که

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴/۹/۱۳۹۶، اصلاحیه ۲۲/۳/۱۳۹۷، پذیرش ۱۲/۴/۱۳۹۷.

DOI:10.24200/J30.2018.5174.2208



شکل ۱. منحنی دانه بندی نمونه‌ی خاک اصلاح نشده بر اساس استاندارد ASTM - D ۴۲۲.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی افزودنی‌ها (مشخصات بنتونیت از کارخانه‌ی پودر ارک و مشخصات آهک از کارخانه‌ی آهک لرستان).

مشخصات	آهک	بنتونیت
SiO ₂	۱,۱۵	۵۵,۳۵
Al ₂ O ₃	۰,۳۶	۱۴,۰۷
Fe ₂ O ₃	۰,۱۱	۲,۷۹
CaO	۵۶,۶۸	۱,۰۹
Na ₂ O	۰,۰۸	۴,۹۱
K ₂ O	۰,۰۳	۰,۲۱
MgO	۱,۳۵	۳,۸۶
سایر موارد	۳۹,۹۲	۴۰,۲

حاصل از آبسنجی (ASTM D۴۲۲)، دانه بندی این خاک مطابق شکل ۱ ارائه می شود. همچنین بر اساس روش طبقه بندی متحده، این خاک از نوع 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 از کارخانه‌ی پودر ارک 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 و کاملاً خشک می شود. چون خاک به صورت کلوخه در آمده بود، آن را با چکش لاستیکی می کوبند تا از آسیب رسیدن به بافت خاک جلوگیری شود. مطالعات نشان داده که اگر خاک لایه‌ی رسی مترکم قبل از کوبیده شدن توسط غلتک، از الک نمره‌ی چهار (۴/۷۵ میلی متر)

در کنار روابط نظری و توجه به عوامل هندسی تأثیرگذار بر پدیده‌ی قوس زدگی، استفاده از مصالح مناسب در بخش‌هایی از سد که به ناچار ناهمگونی مصالحی دارند، یکی از راهکارهای مقابله با این پدیده است. حذف رفتار خمیری مصالح از محاسبات باعث برآورد بیش از میزان واقعی «قوس زدگی» می شود،^[۱۱] چرا که خاصیت خمیری در خاک تأثیر به‌سزایی در ممانعت از ترک دارد.

ناهمگون بودن مصالح هسته با شالوده و پوسته می تواند عامل مهمی در بروز پدیده‌ی قوس زدگی باشد. در فونداسیون‌های شیب دار قوس زدگی می تواند در نواحی با تنش پایین رخ دهد. همچنین این نواحی مستعد شکست هیدرولیکی اند؛^[۱۱] در نواحی تحت خطر ترک خوردگی، بالا بودن خاصیت خمیری خاک می تواند تأثیری مناسب در کاهش احتمال قوس زدگی داشته باشد. بنابراین رعایت استاندارد - نظیر دانه بندی و حدود خمیری در انتخاب مصالح، از جمله روش‌های مناسب جلوگیری از تخریب سد است. دانه بندی مناسب خاک در هسته معمولاً عبارت است از CL، SC - CL، SM - ML،^[۱۲] میزان نفوذپذیری مورد نیاز برای مصالح هسته از 1×10^{-2} تا 1×10^{-10} متر بر ثانیه متغیر است.^[۱۱]

در ناحیه‌ی 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 قوس زدگی ۱۶ الی ۳۰ است.^[۱۱]

هدف این پژوهش، تثبیت خاک واگرا با آهک به منظور استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی است، با در نظر گرفتن این مطلب که آهک باعث کاهش خاصیت خمیری خاک خواهد شد. کاهش خاصیت خمیری می تواند مقاومت خاک در برابر ترک و قوس زدگی را کاهش دهد و نهایتاً احتمال وقوع پدیده‌ی قوس زدگی در صورت 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 می شود زیرا خاصیت خمیری مناسب نقش مهمی در جلوگیری از عواقب پدیده‌ی قوس زدگی (ایجاد ترک) دارد.

نمونه‌ی از خاک‌های رسی واگرا که پتانسیل واگرایی بالایی دارند به عنوان مصالح پایه در این تحقیق مورد آزمایش قرار می گیرد. با شناسایی نوع خاک و رده بندی آن، آزمون‌های تعیین واگرایی شامل پین هول، آبسنجی (هیدرومتری) دوگانه، شیمیایی و کرامب انجام می پذیرد. آهک به عنوان ماده‌ی شیمیایی پیشنهادی برای تثبیت واگرایی و بنتونیت برای بهبود خواص خمیری انتخاب می شود. با افزودن آهک واگرایی اصلاح شده، و بهبود خاصیت خمیری با افزودنی بنتونیت جبران می شود. چرخه‌ی افزودن آهک و بنتونیت تا تأمین اهداف مورد نظر ادامه می یابد و در نهایت نمونه‌ی بهینه انتخاب می شود.

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

جدول ۲. مشخصات فیزیکی بتونیت مورد استفاده (اخذ شده از کارخانه ی پودر اراک).

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

جدول ۳. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی.

نام ترکیب	درصد آهک	درصد بتونیت
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

عبور داده شود، شرایط تراکم بهتری بر آن حاکم خواهد شد زیرا چنین خاکی کلوخه ی کمتری دارد.^[۱۱] لذا در این پژوهش نیز از الک نمره ۴ استفاده شد. در ساخت نمونه ها برای آزمایش های مختلف، ابتدا خاک به میزان لازم از الک مربوط به استاندارد آن آزمایش عبور داده شد (آزمایش حدود اتربرگ: الک نمره ۴۰، آزمایش بین هول و آبسنجی مضاعف: الک شماره ۱۰). برای این که مخلوط های خاک و افزودنی ها در تمامی آزمایش ها یکنواخت باشد، از هر مخلوط به مقدار مورد نیاز برای تمامی آزمایش های پیش بینی شده تهیه شد. نمونه های ساخته شده با خاک خالص به مدت ۲۴ ساعت و خاک مخلوط شده با درصد های مختلف افزودنی ها (متراکم شده در درصد رطوبت بهینه) به مدت ۷ روز در کیسه های پلاستیکی دربسته نگه داری شد و پس از آن آزمایش های 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 عمل آوری به عنوان زمانی مؤثر بر نتایج خروجی معادل ۷ روز انتخاب می شود.

درصد وزنی انتخابی آهک و بتونیت در تثبیت نمونه ها بسیار حائز اهمیت است. عوامل مختلفی بر انجام واکنش خاک رس و آهک مؤثر است؛ از جمله این موارد می توان به میزان رس اشاره کرد. اگر میزان رس از حد معینی کم تر باشد، واکنش ها انجام نمی شود؛ به همین علت وجود رس کافی برای انجام واکنش لازم است.^[۱۴] می توان گفت باید حداقل ۲۵ درصد از دانه های خاک کوچک تر از ۰٫۰۷۵ میلی متر باشد تا تثبیت با آهک ثمر دهد.^[۱۵] همچنین میزان PH محیط مهم است، به طوری که باید حداقل مقدار PH از ۱۲٫۴ بیشتر باشد تا باعث انجام واکنش بین آهک و رس شود.^[۱۶] نوع و غلظت کاتیون های 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 می شود.^[۱۸] مقدار افزودنی بتونیت در خاک های ریزدانه کم تر از ۶ درصد و در خاک های درشت دانه کم تر از ۱۵ درصد توصیه می شود.^[۱۶] انتخاب درصد های ترکیبی باید به گونه یی باشد که نفوذ پذیری نیز در محدوده ی قابل قبول سد قرار گیرد. بتونیت باعث کاهش ضریب نفوذ پذیری می شود.^[۲۰،۱۹]

تأثیر آهک بر نفوذ پذیری متغیر است به طوری که برخی محققین کاهش نفوذ پذیری^[۲۲،۲۱،۱۹] و برخی دیگر افزایش آن را گزارش کرده اند.^[۲۳،۲۲] در جدول ۳ به طور خلاصه ترکیب نمونه های ساخته شده ارائه شده است؛ در این جدول S نشانگر خاک رس، L نشانگر آهک و B نشانگر بتونیت است.

۴. آزمایش ها

بررسی واگرایی خاک با استفاده از انجام آزمایش های بین هول و آبسنجی دوگانه، شیمیایی و کرامب صورت می پذیرد. برای تعیین مشخصات پلاستیک خاک از

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

نتایج آزمایش بین هول روی خاک اصلاح نشده (روش C)			
مدت	تیرگی آب	قطر سوراخ	هد آب
آزمایش هد	در انتهای	آزمایش	میلی متر
مشخص	آزمایش	(میلی متر)	
(دقیقه)			
۱۰	کدر	۱٫۷	۵۰
ASTM D۴۶۴۷: کلاس D (واگر)			
نتایج آزمایش آبسنجی دوگانه روی خاک اصلاح نشده			
درصد ریزتر از ۰٫۰۵	درصد ریزتر از ۰٫۰۵	میلی متر	میلی متر
		(آبسنجی دوگانه)	(آبسنجی ساده)
		٪۲۴٫۲	٪۴۳٫۹۶
$۵۵\% = (۴۳/۹۶ \div ۲۴/۲) \times ۱۰۰$ درصد واگرایی			
ASTM D۴۲۲۱: پتانسیل واگرایی بالا			

آزمایش حدود اتربرگ طبق استاندارد ASTM D۴۳۱۸ استفاده می شود. از آزمایش نفوذ پذیری با بار متغیر نیز برای تعیین نفوذ پذیری و از آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد طبق روش ASTM D۶۹۸ برای تعیین درصد رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص خشک استفاده می شود.

۱.۴. بررسی واگرایی

بررسی های صورت گرفته روی خاک پایه ی مورد استفاده در آزمایش های این پژوهش بیانگر پتانسیل بالای واگرایی این خاک است. نتایج آزمایش های آبسنجی دوگانه و بین هول انجام یافته روی خاک پایه در جدول ۴ ارائه شده است.

۱.۱.۴. آزمایش بین هول (ASTM D۴۶۴۷)

این آزمایش با افزودن آهک به منظور بهبود واگرایی آغاز می شود. نمونه ها با افزایش درصد آهک همچنان در محدوده ی واگرایی قرار دارند و بنابراین درصد آهک افزوده می شود. با افزودن ۱٫۶ درصد آهک واگرایی خاک به طور کامل رفع نشده است؛ بنابراین میزان آهک افزوده می شود و با مشاهده ی رفع مشکل واگرایی در ۱٫۵ درصد آهک، طبق نتایج آزمایش حدود اتربرگ شاخص خمیری مخلوط خاک

سن عمل آوری	نام خاک	SAR	تثبیت
	خاک	۱۲٫۳	×
	خاک + ۱٫۵٪ آهک	۱٫۶	✓
۷ روزه	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 در مورد 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 $LL = 40$ است؛ نتایج آزمایش تعیین حد خمیری خاک رس در آزمایش فتیله نشان‌دهنده‌ی $PL = 22$ 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

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 شاهد 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.^[۲۴] یون کلسیم این بنتونیت به دلیل داشتن دو بار مثبت می‌تواند با هر دو سمت واحدهای ساختاری بنتونیت ارتباط برقرار کند و بدین ترتیب، در مقایسه با بنتونیت سدیم‌دار - که دارای یون سدیم تک‌ظرفیتی است - 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.

۳.۱.۴. آزمایش آب‌سنجی دوگانه (ASTM D۴۲۲۱)

واکنش تبادل کاتیونی با افزودن آهک به نمونه‌ی خاک شروع و ضمن کاهش شاخص خمیری موجب فولکوله شدن ذرات می‌شود.^[۱۷] لذا درصد ذرات ریز کاهش می‌یابد و در نتیجه، با توجه به معیار درصد واگرایی که نسبت درصد ذرات ریزتر از 0.075 میلی‌متر را در دو حالت 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 در گالکین (هگرا متانسفات 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 مقیاسه‌ی درصد ذرات ریزتر از ۵ میکرون، در حالت بدون گالکین نسبت به حالتی که از گالکین 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

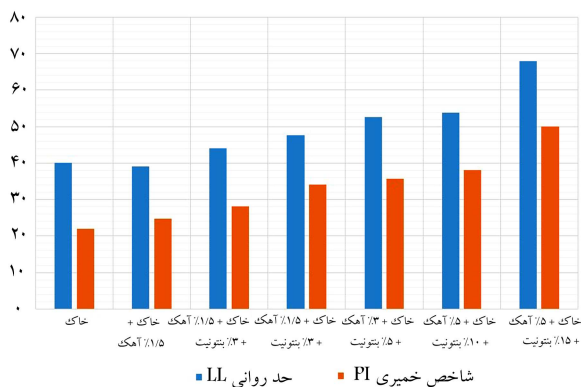
۶. نتیجه گیری

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 گزینه‌ی اقتصادی مطرح شود. از این رو 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 در کنار سایر عوامل - از قبیل شرایط ساختگاه، عوامل هندسی و نحوه‌ی اجرا - می‌تواند عامل تعیین‌کننده‌ی 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 بر کنترل دارند معیار شاخص خمیری در لایه‌ی رس تماسی و هسته‌ی سدهای خاکی است. پس لازم است توجه

خاک بایستی به‌اندازه‌ی کافی کم باشد تا ذرات خاک بتوانند به راحتی روی هم بغلندند. 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 حفره‌ی 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]

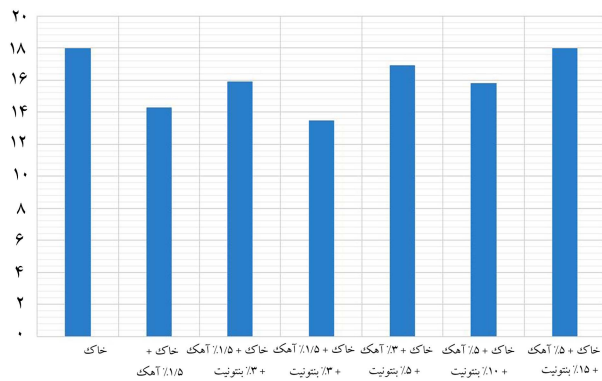
علاوه بر این، تعویض کاتیونی باعث تغییر ساختار خاک به فولکوله و در نتیجه باعث افزایش مقاومت دانه‌های خاک در برابر جابه‌جایی و منجر به افزایش حد خمیری می‌شود.^[۳۰] شاخص خمیری که حاصل تفاضل حد خمیری و حد روانی است، با افزودن آهک کاهش می‌یابد. بدیهی است که بنتونیت خاصیت خمیری خاک را بهبود می‌بخشد، زیرا دارای 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.^[۳۰] در شکل‌های ۲ و ۳ نتایج آزمایش‌های حدود اتربرگ انجام شده روی نمونه‌های مختلف نشان داده شده است.

مقایسه حد روانی و خمیری خاک اصلاح شده



شکل ۲. نمودار تغییرات حدود خمیری خاک اصلاح شده.

شاخص خمیری ۷ روزه PI



شکل ۳. نمودار تغییرات شاخص خمیری ۷ روزه.

جدول ۶. نتایج واگرایی و شاخص خمیری.

سن عمل‌آوری	نام ترکیب	نتایج	شاخص خمیری
۱۸	خاک	واگرا	۱۸
-	خاک + ۰٫۶٪ آهک	واگرا	-
-	خاک + ۱٪ آهک	متوسط واگرا	-
۱۴٫۳	خاک + ۱٫۵٪ آهک	غیر واگرا	۱۴٫۳
۱۵٫۹	خاک + ۱٫۵٪ آهک + ۳٪ بنتونیت	متوسط واگرا	۱۵٫۹
۱۳٫۵	خاک + ۳٪ آهک + ۵٪ بنتونیت	غیر واگرا	۱۳٫۵
۱۶٫۹	خاک + ۲٪ آهک + ۱۰٪ بنتونیت	متوسط واگرا	۱۶٫۹
۱۵٫۸	خاک + ۵٪ آهک + ۱۰٪ بنتونیت	غیر واگرا	۱۵٫۸
۱۸	خاک + ۵٪ آهک + بنتونیت*	غیر واگرا	۱۸
-	خاک + ۵٪ آهک + ۲۰٪ بنتونیت	متوسط واگرا	-

* نمونه‌ی بهینه

Archive of SID

در جدول ۶ خلاصه نتایج برخی از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر ارائه شده است. با توجه به نتایج نهایی آزمایش‌ها، نمونه $S + 15\% L + 5\% B$ 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 و آگرایی هدف کاربرد مناسب‌تری دارد. در صورت افزایش بیش از حد بنتونیت به مخلوط آهک و خاک، و آگرایی افزایش می‌یابد. بنابراین درصد بنتونیت بهتر است در محدوده‌ی زیر ۲۰ درصد قرار داشته باشد.

شود که اگر ماده‌ی افزودنی تثبیت‌کننده موجب کاهش خاصیت خمیری می‌شود، برای جبران این کاهش ماده‌ی مکمل در نظر گرفته شود. به‌منظور اصلاح و آگرایی خاک و آگرایی سد میرزاخانلو، آهک به میزان ۱۰٪ 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.

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 embankment 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 hydraulics", *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 diamantropic 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*, 73rd Annual Meeting of ICOLD, Tehran, Iran, No.101-S5 (2005).
9. Nouri Geidari, M. H., Alielah, 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", *5th 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 Conference 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 Robbinson, R.G. "Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils", IIT Madras, Chennai, 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).