

بررسی واگرایی خاک‌های ریزدانه منابع قرضه هسته سد خاکی حاجیلر ورزقان و ارتباط آن با سنگ مادر

نازیلا داداش زاده^۱، ابراهیم اصغری کلجاهی^{۲*}، حدیثه منصوری^۳

پذیرش مقاله: ۹۸/۰۵/۲۳

دریافت مقاله: ۹۷/۱۲/۱۲

چکیده

سد خاکی حاجیلر در بخش خاروانا از توابع شهرستان ورزقان در حال احداث است. هسته این سد خاکی با ارتفاع ۹۵ متر از نوع رسی می‌باشد. برای تامین مصالح هسته این سد تعداد ۱۱ منبع قرضه رسی بررسی شده که برخی از آنها به دلیل بالا بودن خاصیت واگرایی خاک مورد استفاده واقع نشده است. بیشتر خاک‌های ریزدانه منطقه دارای خاصیت واگرایی بالایی می‌باشند. برونزد سازندهای تبخیری در منطقه پروژه زیاد بوده و شواهد صحرایی مبنی بر واگرایی خاکها همچون فرسایش شیاری، فرسایش کوزه‌ای، ایجاد گودال و تونل در خاک و گل آلود شدن آب‌ها پس از بارندگی دیده می‌شود. در این تحقیق به بررسی مشخصات خاک ۵ منبع قرضه هسته رسی سد با تأکید بر سنگ مادر خاک‌ها، کانی شناسی و نتایج آزمایشات واگرایی پرداخته شده است. بدین منظور ضمن بررسی‌های محلی همراه با تعیین سنگ مادر مرتبط با منابع قرضه، نمونه‌هایی از منابع قرضه برداشت شده و پتانسیل واگرایی آن‌ها در آزمایشگاه با آزمایشات کرامب، هیدرومتری دو گانه، پین هول و تجزیه شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که خاک‌های رسی با سنگ منشأ رسوبات تبخیری نئوژن، دارای پتانسیل واگرایی بالایی بوده و بر اساس نتایج آزمایشات هیدرومتری دوگانه، درصد واگرایی خاک‌ها بین ۴۵ تا ۶۸ درصد و بر اساس نتایج آزمایشات پین هول در گروه D1 قرار دارند. خاک‌های ریزدانه اطراف رودخانه حاجیلر (از جمله منبع قرضه نزدیک روستای کلو) که سنگ منشأ آذرین دارند، غیرواگر می‌باشند.

کلید واژه‌ها: خاک‌های واگرا، آزمایش پین هول، سد حاجیلر، دشت لیلاب، مصالح قرضه

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- دانشیار گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران e-asghari@tabrizu.ac.ir
۳- پژوهشگر پسا دکتری، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران h.mansouri@tabrizu.ac.ir
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

یکی از عوامل مهم در تخریب و بی‌ثمر شدن سدهای خاکی، فرسایش درونی و ایجاد مجاری ناشی از آب‌شستگی در بدنه و به ویژه هسته رسی این سدها می‌باشد. این مسأله معمولاً در صورت استفاده از خاک‌های رسی واگرا (Dispersive) رخ می‌دهد (Sherard et al., 1972). خاک واگرا به خاکی اطلاق می‌شود که در آن ذرات خاک در مجاورت جریان آب حتی در سرعت‌های پایین چسبندگی خود را از دست می‌دهند و به سهولت شسته می‌شوند (Bhuvaneshwari et al., 2007). نقطه شروع پدیده واگرایی می‌تواند ترک‌های حاصل از انقباض خاک، نشست نابرابر و یا منافذ ناشی از ریشه گیاهان باشد (Dixit and Gupta, 2011). البته در سیلت غیرچسبنده و ماسه خیلی ریز که اساساً دارای چسبندگی کم یا فاقد چسبندگی می‌باشند، نیز فرسایش درونی خاک مشاهده می‌شود اما ماهیت آن مکانیکی بوده و با پدیده واگرایی ناشی از خواص شیمیایی خاک متفاوت است (Fang et al., 2001). خاک‌های واگرا جزو خاک‌های رسی می‌باشند و حداقل مقدار رس در آن‌ها ۱۰ درصد است (Rezaei et al., 2012). از نظر شیمیایی تفاوت بین رس‌های واگرا و غیرواگرا در نوع کاتیون‌های موجود در آب منفذی خاک رس می‌باشد. رس‌های واگرا دارای مقدار زیادی کاتیون سدیم و رس‌های معمولی دارای مقدار زیادتری کاتیون‌های کلسیم، پتاسیم و منیزیم می‌باشند (Sheraed et al., 1976). Sayehvand and Dehghani, 2004). دلیل اصلی فرسایش رس‌ها در اثر پدیده واگرایی، زیاد شدن نیروی دافعه الکتریکی بین ذرات از نیروی جاذبه و اندروالسی در بین آن‌ها است (Umesh et al., 2011; Rezaei et al., 2012). نیروی دافعه از وجود لایه دوگانه در اطراف ذرات کانی‌های رسی ناشی می‌شود. وجود بیش از اندازه یون سدیم در خاک‌های واگرا باعث افزایش ضخامت لایه آب دوگانه شده و در نتیجه نیروی جاذبه بین ذرات کاهش می‌یابد (Flores- Berrones and Lopez-Acosta, 2011). پتانسیل واگرایی و فرسایش پذیری در یک خاک بستگی به

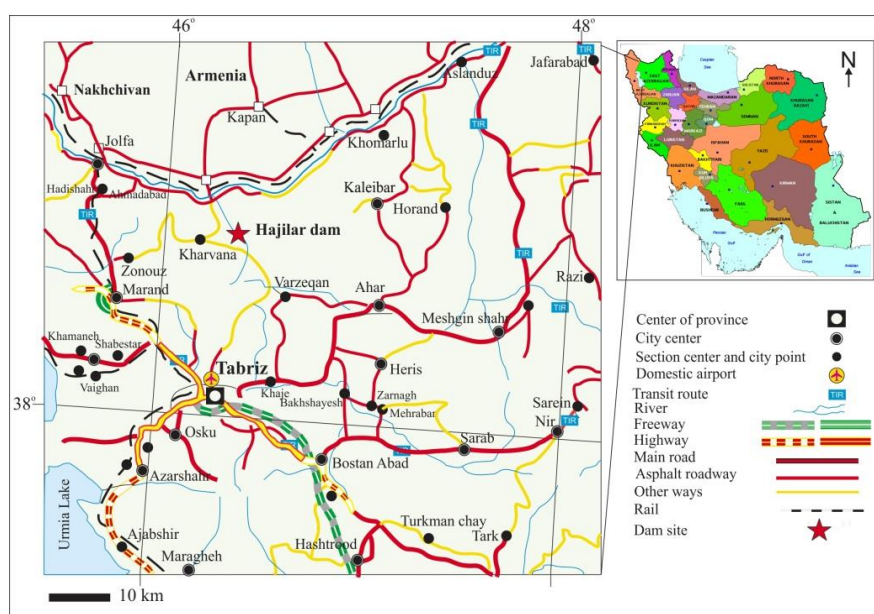
عوامل متعددی از جمله کانی‌شناسی، شیمی خاک و نمک‌های محلول در آب منفذی خاک و آب جاری، مقدار رس، ساختار خاک، حدود آتربرگ، عدد فعالیت، pH خاک و آب، پتانسیل انقباض و تورم، نوع آنیون‌ها و کاتیون‌ها، درصد رطوبت و وضعیت تراکم خاک دارد (Sayehvand and Dehghani, 2004). تعیین دقیق منشأ رس‌های واگرا ممکن نیست (McCook and McElroy, 1991). آنچه مسلم می‌باشد این است که سنگ مادر تأثیر زیادی در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارد (Gray and Murphy, 2002). سنگ‌ها و کانی‌های حاوی کاتیون سدیم در پوسته زمین با گذشت زمان از طریق فرایندهای هوازدگی شیمیایی و فیزیکی، خاک سدیم‌دار تولید می‌کنند (گودرزی، ۱۳۹۱). اصطلاح خاک شور عمدتاً در کشاورزی و زمانی که درصد نمک‌های سدیم در خاک افزایش یابد به کار می‌رود. مطالعه Nagy و همکاران (۲۰۱۶) نشان می‌دهد که پتانسیل واگرایی خاک‌های شور بالا است. She et al. (2014) نشان داده‌اند که افزایش شوری خاک سبب افزایش نیروی دافعه بین ذرات رس می‌گردد. (Gray and Murphy 2002) نشان دادند که هر چه درصد سیلیس در سنگ مادر بالاتر باشد، درصد سدیم در خاک ایجاد شده بیشتر خواهد بود. تجزیه فلدسپارهای سدیم‌دار در این نوع سنگ‌ها می‌تواند به تولید رس‌های سدیم‌دار منجر شود (McCook and McElroy, 1991). علاوه بر سنگ‌های سیلیسی، تجزیه سنگ‌های دریایی غنی از رس مثل گلسنگ و شیل نیز می‌تواند به تولید خاک‌های شور یا واگرا منجر شود (Gray and Murphy, 2002; Bhuvaneshwari et al., 2007). خامه‌چیان و همکاران (۱۳۷۹) منشأ اصلی خاک‌های واگرا در دشت خوزستان را به سازندهایی از جنس آهک، شیل، مارن و لایه‌های نمک، انیدریت و ژپس نسبت داده‌اند. به طوری که رودخانه‌ها با عبور از مسیر پریپچ و خم این سازندها باعث فرسایش و حمل رسوبات به سمت دشت خوزستان می‌شوند. گرمای شدید و تبخیر زیاد در منطقه نیز باعث بالا آمدن املاح (توسط خاصیت موینگی) به سطح خاک شده و بر شوری رس‌های این دشت و خاصیت

و بالا رفتن امکان شستشویی سریع‌تر خاک، پتانسیل واگرایی خاک بیش از واقعیت خواهد بود. متراکم کردن خاک با رطوبتی بیش از رطوبت بهینه نیز سبب ورقه ورقه شدن خاک و افزایش خاصیت واگرایی آن می‌گردد. اگر چه آزمایشات آزمایشگاهی روشهای مفیدتری برای شناسایی خاک‌های واگرا هستند، اما نشانه‌های صحرایی و توجه به واحدهای سنگی موجود نیز می‌تواند کمک مؤثری در شناخت این نوع خاک‌ها داشته باشد.

در این مقاله به بررسی پتانسیل واگرایی منابع قرضه رسی مورد استفاده در سد خاکی حاجیلر و ارتباط واگرایی این منابع با سازندهای موجود در منطقه پرداخته شده است. این سد در شمال استان آذربایجان شرقی، در بخش خاروانا بر روی رودخانه حاجیلرچای از سرشاخه‌های رودخانه ارس در حال احداث می‌باشد. ساختگاه سد در نزدیکی روستای قره قیه، به مختصات جغرافیایی $16^{\circ} 48' 38''$ شمالی و $46^{\circ} 16' 46''$ شرقی واقع شده است. شکل ۱ راه‌های دسترسی به محل سد را نشان می‌دهد. بر اساس طراحی شرکت مهندسی مشاور بندآب (۱۳۸۸)، ارتفاع این سد حدود ۹۵ متر از تراز پی سد است. حجم رس مورد نیاز برای هسته سد مذکور حدود ۲۶۰ هزار متر مکعب می‌باشد.

واگرایی می‌افزاید. با دور شدن از سازندهای مذکور، به خصوص سازند گچساران که گستردگی زیادی در منطقه دارد، کاهش در میزان واگرایی به علت شستشوی ناشی از عملیات کشاورزی یا طغیان‌های رودخانه‌ای چشم‌گیر است. مطالعات گودرزی (۱۳۹۱) نیز نشان داده که واحدهای مختلف زمین‌شناسی در استان لرستان در تشکیل خاک‌های واگرا مؤثر هستند. خاک‌های پیرامون سازندهای حاوی نمک سدیم همچون سازند گچساران پتانسیل واگرایی بالایی داشته و با دور شدن از این سازندها پتانسیل واگرایی نیز کاهش می‌یابد. اصغری کلجاهی (۱۳۷۸) معتقد است که سنگ منشأ خاک‌های واگرا در ایران معمولاً سازندهای تیخیری و نمکدار هستند.

علی‌رغم ارتباط بین خاک واگرا و سنگ منشأ آن، این مسأله به صورت مشخص مورد توجه مهندسین قرار نگرفته است. معمولاً پتانسیل واگرایی خاک‌ها در آزمایشگاه با استفاده از آزمون‌هایی همچون کرامب (Crumb)، هیدرومتری دوگانه و پین هول (سوراخ سوزنی یا Pinhole) اندازه‌گیری می‌شود. نتایج این آزمایشات، از جمله آزمون پین هول به میزان رطوبت خاک بستگی دارد. اگر خاکی واگرا با رطوبتی کمتر از رطوبت بهینه در این آزمون متراکم گردد، در اثر خشک شدن سریع و در نتیجه ایجاد ترک‌های سطحی بیشتر



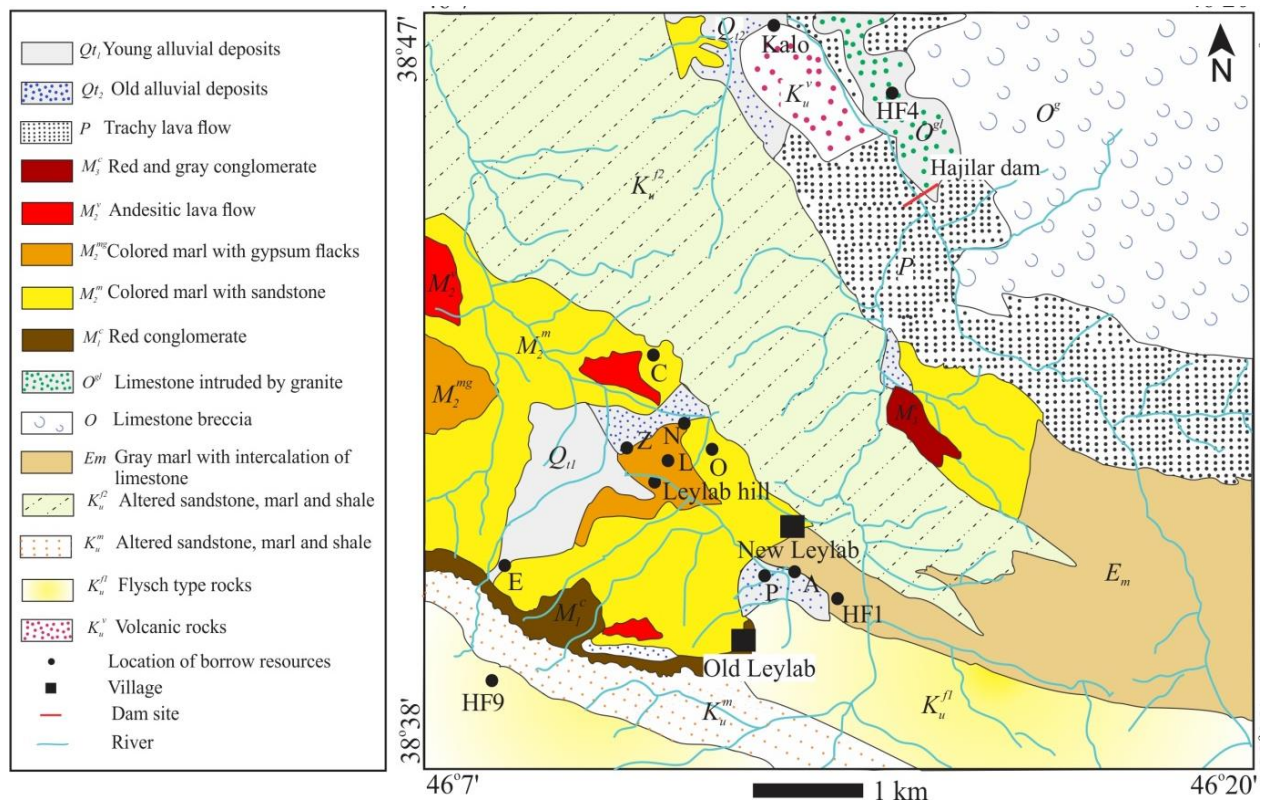
شکل ۱. راه‌های دسترسی به محل سد حاجیلر

۲. زمین شناسی منطقه

بر اساس تقسیم بندی نبوی (۱۳۵۵)، منطقه مورد مطالعه در زون زمین ساختی البرز- آذربایجان واقع شده است. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. عمده واحدهای سنگی رخنمون یافته در منطقه مورد مطالعه مربوط به کرتاسه بالایی، پالئوسن، ائوسن، الیگوسن، میوسن، پلیوسن و کواترنری می باشند. واحدهای سنگی کرتاسه گسترش وسیعی داشته و بخش های زیادی از مساحت حوضه آبریز رودخانه حاجیلر را به خود اختصاص داده اند. اغلب سنگ های رخنمون یافته در حوضه آبریز، نهشته های تیپ فلیش، ماسه سنگ، سنگ آهک و سنگ های آتشفشانی زیردریایی (اغلب با ترکیب اسیدی تا متوسط) به سن کرتاسه پسین است. واحدهای سنگی پالئوسن در شمال غرب منطقه مورد مطالعه گسترش زیاد داشته و شامل ماسه سنگ، میکروکنگلومرها همراه با میان لایه های مارنی، سنگ آهک و سنگ های آذرین می باشد. رخساره مارنی میوسن که جوان تر از کنگلومرای قاعده ای

است، بخش وسیعی از شمال بخش خاروانا و روستای لیلاب را می پوشاند. دشت روستای لیلاب که وسیع ترین دشت منطقه بوده و دارای ذخایر رس بالا است از فرسایش و رسوب برونزدهای تبخیری میوسن تشکیل شده و انتظار می رود که دارای املاح و به خصوص یون سدیم زیادی باشد. این واحد متشکل از مارن سبز، خاکستری و صورتی با میان لایه های ماسه سنگ شیلی و سنگ آذرین خاکستری تیره است. از دیگر واحدهای آذرین این دوره سنگ آندزیتی با بافت پورفیری در شمال بخش خاروانا است (درویش زاده، ۱۳۷۰).

واحدهای سنگی پلیوسن به دلیل فعالیت فراوان آتشفشانی این دوران غالباً منشاء ولکانیکی و ولکانیکی- رسوبی دارند. بیشترین گسترش واحدهای سنگی پلیوسن در بخش جنوب شرقی منطقه و شامل کنگلومرای نیمه سخت به همراه میان لایه هایی از ایگنمبریت و توف لاپیلی می باشد.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه تهیه شده بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ سبیه رود

(سازمان زمین شناسی کشور، ۱۳۷۶) و موقعیت منابع قرصه رس و واحدهای سنگ ماد

شکل ۲ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. بیشتر این منابع در دشت لیلاب قرار دارند. بعد از بازدیدهای صحرائی این منابع قرضه و بررسی شواهد صحرائی واگرایی، نمونه‌هایی از منابع قرضه رسی HF1, L, A, N و یک نمونه از خاک درجا روی سنگ مادر تبخیری به نام تپه لیلاب جدید، برداشت شده است. مشخصات این منابع به شرح زیر است:

۳- منبع قرضه HF1: این منبع در بالادست سد، نزدیک روستای قره‌قیه واقع بوده و حاصل هوازگی واحدهای سنگی Qt¹-Em، نهشته‌های دشت‌های آبرفتی قدیمی و مارن خاکستری و ماسه سنگ می‌باشد (شکل ۲). با حفر ۵ ترانسه ۴ متری نمونه برداری شده است.

۴- منبع قرضه L: این منبع در حوالی روستای لیلاب جدید قرار داشته و خاکهای آن حاصل هوازگی واحدهای سنگی M₂^m و M₂^{mg}، مارنهای الوان با میان لایه‌های ماسه سنگی میوسن بوده و با حفر ۸ ترانسه نمونه برداری شده است.

۵- منبع قرضه N: این منبع قرضه در غرب ساختگاه سد، در نزدیکی روستای لیلاب جدید قرار دارد و حاصل هوازگی واحدهای سنگی M₂^m و M₂^{mg}، مارنهای الوان با میان لایه‌های ماسه سنگی میوسن بوده (شکل ۲) و با حفر ۹ ترانسه نمونه برداری شده است.

۶- منبع قرضه A: این منبع از نزدیکی روستای لیلاب قدیم و حاصل هوازگی Qt¹ و Em، زمان ائوسن و کواترنری، تناوبی از نهشته‌های دشت‌های آبرفتی قدیمی و مارن‌های خاکستری و ماسه سنگ‌های آهک‌دار بوده و با حفر چند چاهک دستی نمونه برداری شده است.

۷- نمونه خاک برجا روی تپه لیلاب: نمونه‌هایی از تپه‌های مجاور روستای لیلاب جدید با مختصات ۶۰۴۹۴۹ و ۴۲۸۴۱۶۹ در زون 38S سیستم UTM حاصل هوازگی واحد سنگی M₂^{mg} میوسن (تناوبی از مارنهای الوان با عدسک‌های گچی) می‌باشند و از سطح زمین نمونه برداری شده است. این محل جزو منابع قرضه نبوده و صرفاً برای بررسی مشخصات خاک برجا محل، نمونه برداری شده است.

رسوبات کواترنری را به صورت پراکنده در بیشتر نقاط منطقه طرح در پهنه‌های مختلف می‌توان دید. رسوبات آبرفتی مربوط به دشت‌های درون کوهساری، مخروط افکنه‌ها و تراس‌های رودخانه‌ای است که ذرات تشکیل دهنده آن‌ها از قلوه‌سنگ، ماسه، سیلت و مارن تشکیل شده است.

۳. شواهد صحرائی واگرایی خاک‌های منطقه

قدم اول در شناسایی خاک‌های واگرا، مشاهدات صحرائی و یافتن الگوهای فرسایش غیرطبیعی در منطقه است (Bhuvaneshwari et al., 2007). الگوهای خاص فرسایشی، دره‌های فرسایشی، بریدگی‌های جاده‌ای، تونل‌های فرسایشی و دره‌ها و گودال‌های کوچک ناشی از فرسایش، وجود آب‌های گل‌آلود در موقع بارندگی و سنگ مادر سدیم‌دار می‌تواند نشانه‌های خاک‌های واگرا باشد (Fang et al., 2001; Nagy et al., 2016).

در بازدیدهای محلی، اشکال فرسایشی خاک‌های واگرا در اطراف ساختگاه سد دیده شده است. فرسایش شیاری، فرسایش کوزه‌ای، ایجاد گودال و تونل در خاک، از جمله نشانه‌های واگرا بودن خاک‌های ریزدانه منطقه هستند (شکل ۳- a و b). از دیگر نشانه‌های وجود خاک‌های واگرا در منطقه، گل‌آلود شدن آب‌های جاری ناشی از بارندگی است (شکل ۳- c). بررسی سنگ مادر خاک‌های رسی منطقه نشان می‌دهد که برونزدهای تبخیری میو- پلیوسن می‌توانند منشأ اصلی خاک‌های ریزدانه منطقه باشند. در شکل ۳- c و d، تصاویری از برونزدهای تبخیری منطقه نشان داده شده است.

۴. مواد و روش‌ها

۴-۱. مطالعات صحرائی و نمونه برداری

به منظور تأمین منابع قرضه ریزدانه هسته رسی سد حاجیلر، تعداد ۱۱ منبع قرضه به اسامی E, HF9, HF1, HF4, C, Z, O, N, A, L، روستای کلو به وسیله شرکت مهندسین مشاور بندآب بررسی شده است. موقعیت این منابع در



شکل ۳. (a) فرسایش کوزه‌ای در منبع قرضه N. (b) نمونه‌ای از فرسایش شیاری و ایجاد گودال در نزدیکی تپه‌های روستای لیلاب. (c) تصویری از آبهای گل آلود ناشی از بارندگی، (d) تصویری از سنگ مادر تبخیری خاک‌های واگرا در منطقه

جدول ۱. مشخصات منابع قرضه رسی بررسی شده

Borrow source	UTM, 38S		Location	Lithology
	X (m)	Y (m)		
C	607010	4283407	400 m away from the new Leylab village	M ₂ ^m
E	602705	4283423	Northeastern of Kharvana	Qt ¹
O	605901	4282342	West of the dam site and south of the new Leylab village	M ₂ ^m
Z	606066	4286261	Northwestern of the dam site on the top of the Leylab village	Qt ²
P	609667	4281521	Close to the dam site	Qt ²
HF1	611273	4281335	On the top of the dam site close to the Qaraghayeh village	Qt ¹ -E _m
A	616066	4286262	Close to the old Leylab village	E _m and Qt ²
L	606689	4283339	Close to the new Leylab village	M ₂ ^m and M ₂ ^{mg}
Kalo	61126	4288367	5 km north of the dam site	Qt ²
N	606822	4283798	Close to the new Leylab village	M ₂ ^m and M ₂ ^{mg}
HF9	602358	4282310	In situ soils and slope deposits	K _u ^m
Leylab hill	604349	4284169	The hill adjacent to the new Leylab village	M ₂ ^{mg}

۴-۲. مطالعات آزمایشگاهی

در آن رطوبت، انجام شده است.

در آزمایش هیدرومتری دوگانه، خاک عبوری از الک ۴۰ یک بار با ماده پراکنده ساز و یک بار بدون ماده پراکنده ساز، هیدرومتری شده است. درصد ذرات کوچکتر از ۰/۰۰۵ میلی متر در آزمایش بدون ماده پراکنده ساز تقسیم بر درصد این ذرات با ماده پراکنده ساز، درصد واگرایی نامیده می‌شود.

در این پژوهش آزمایش پین هول به روش A ذکر شده ASTM D4647 انجام شده است. جدول ۲ خلاصه معیارهای آزمایش پین هول به روش A را نشان می‌دهد. در این آزمون دو دانه بندی متفاوت به عنوان فیلتر، شامل فیلتر ریز یعنی ماسه کوارتزی عبوری از الک شماره ۸ و مانده بر روی الک شماره ۱۶ و فیلتر درشت یعنی ماسه عبوری از الک شماره ۴ و مانده روی الک شماره ۱۰ و دو حالت متفاوت به شرح زیر آزمایش شده است:

الف- آزمایشات پین هول با فیلتر ریز در دو حالت نگهداری نمونه به مدت ۲۴ ساعت در رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر (حاصل از آزمایش تراکم استاندارد) و بدون نگهداری در چنین حالتی، انجام شده است.

ب- آزمایشات پین هول با فیلتر درشت نیز در دو حالت نگهداری نمونه به مدت ۲۴ ساعت در رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر (حاصل از آزمایش تراکم استاندارد) و بدون نگهداری در چنین حالتی، انجام شده است.

به منظور بررسی اولیه خاک منابع قرضه، آزمایش‌های فیزیکی شامل دانه بندی و طبقه بندی خاک (ASTM D3282)، تعیین حدود آتبرگ (ASTM D4318) و تراکم (ASTM D698) انجام شده است.

برای تعیین درصد مواد حل شونده نمونه‌ها، ۱۰۰ گرم از خاکی که به مدت ۵ ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد خشک شده بود در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر ریخته شد. بعد از هم زدن و نگهداری نمونه‌ها در این شرایط به مدت ۲۴ ساعت، سوسپانسیون آب و خاک از کاغذ صافی عبور داده شد. از اختلاف وزن نمونه خشک شده بر روی کاغذ صافی با نمونه اولیه به عنوان درصد مواد حل شونده در نظر گرفته شده است.

کانی شناسی یکی از نمونه‌ها از منبع N نیز به روش XRD تعیین گردیده است. در ادامه پتانسیل واگرایی نمونه‌ها با آزمایش‌های کرامب (ASTM D6572)، هیدرومتری دوگانه (ASTM D4221)، پین هول (ASTM D4647) و شیمیایی (ASTM D6572) مورد بررسی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که به منظور بررسی دقیق‌تر ارتباط بین واگرایی و سنگ مادر، آزمون‌های هیدرومتری دوگانه و شیمیایی علاوه بر نمونه‌های مورد مطالعه بر روی نمونه‌های منابع قرضه کلو و HF9 نیز انجام گردیده است. آزمایش کرامب بر روی خاک عبوری از الک شماره ۴ و نمونه تهیه شده با ۶ درصد رطوبت و ۱۶ ساعت نگهداری

جدول ۲. درجه بندی واگرایی خاک‌ها با آزمایش پین هول به روش A (ASTM D4647)

Hole size after test (mm)	Cloudiness of flow at the end of test		Final flow rate through specimen (ml/s)	Test time for given head (min)	Head (mm)	Dispersive classification*
	From top	From side				
≥ 2.0	Very dark	Dark	1.0-1.4	5	50	D1
> 1.5	Dark	Moderately dark	1.0-1.4	10	50	D2
≤ 1.5	Moderately dark	Slightly dark	0.8-1.0	10	50	ND4
≥ 1.5	Slightly dark	Barely visible	1.4-2.7	5	180	ND3
			0.8-3.2	5	380	
< 1.5	Barely visible	Clear	> 3.0	5	1020	ND2
1.0	Perfectly clear	Perfectly clear	≤ 3.0	5	1020	ND1

* D1 و D2: واگرا ND3 و ND4: کم تا متوسط واگرا ND1 و ND2: غیر واگرا

HF1، A، N و یک نمونه از خاک برجا روی تپه لیلاب جدید در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نمونه‌ها عمدتاً از ذرات سیلت و رس تشکیل شده و بر اساس سیستم طبقه بندی یونیفاید در رده‌های CL، ML و CH قرار دارند. درصد رس و مقدار ماده حل شونده در نمونه تپه لیلاب جدید بیشتر از بقیه نمونه‌ها است. نمونه N با ۵۲ درصد رس، بیشترین حد روانی، شاخص خمیری و درصد رطوبت بهینه و در مقابل کمترین دانسیته خشک حداکثر را دارا می‌باشد.

با استفاده از شاخص خمیری و حد روانی، موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در نمودار هولتز و کوکس (Holtz and Kovacs, 1981) مشخص شده است. با توجه به شکل ۴ می‌توان انتظار داشت که کانی‌های رسی نمونه‌ها از نوع ایلیت و مونت‌موریونیت باشند. نتایج آنالیز XRD، بر روی نمونه N نیز حاکی از وجود کانی‌های رسی مونت‌موریونیت، کائولینیت، ایلیت و کلریت است (شکل ۵).

آزمایش‌های شیمیایی بر اساس بررسی مقدار کاتیون سدیم به عنوان عامل اصلی در ایجاد واگرایی در خاک رس بنا شده است. جهت بررسی خصوصیات آب منفذی و ارتباط آن با واگرایی، ابتدا رطوبت خاک با افزودن آب مقطر تا حد روانی رسیده و سپس عصاره اشباع تهیه شده است. غلظت مهمترین کاتیون‌های موجود در عصاره اشباع شامل Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} تعیین گردیده و بر اساس آن مجموع کل املاح موجود یا TDS و درصد سدیم یا PS با استفاده از روابط زیر تعیین شده است (Ingle and Metcalf, 1972):

$$TDS = Na^+ + K^+ + Ca^{+2} + Mg^{+2} \quad (1)$$

$$PS = \frac{Na^+}{TDS} \times 100 \quad (2)$$

۵. نتایج

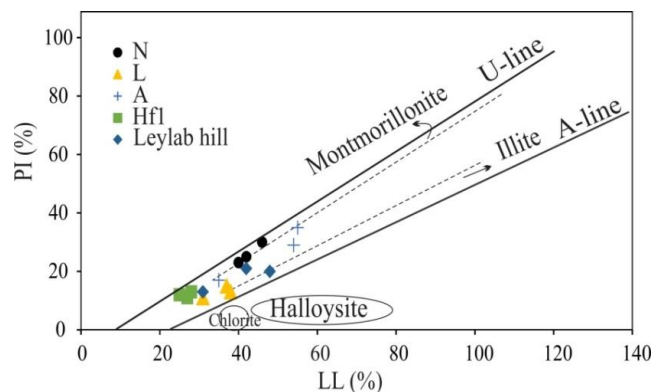
نتایج آزمایشات فیزیکی و آزمایشات واگرایی به شرح زیر است:

۵-۱. نتایج آزمایشات فیزیکی نمونه‌ها

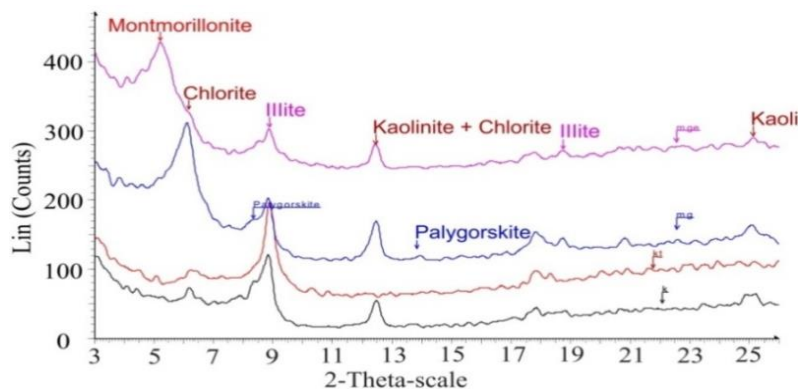
مشخصات فیزیکی نمونه‌های مأخوذه از منابع قرضه L،

جدول ۳. مشخصات فیزیکی مصالح قرضه ریزدانه

Borrow source	Number of samples	Fine contents and classification			Soluble materials (%)	Plasticity		Standard compaction test results	
		Silt (%)	Clay (%)	USCS		LL (%)	PI (%)	$\gamma_d(\max)$ (gr/cm ³)	W _{opt} (%)
HF1	3	55	45	CH / ML	1.0	30-58	16-20	1.77	17-21
A	3	57	43	CH / CL	1.2	28-55	9-47	1.95	15-18
L	2	48	52	CH / CL	1.9	43-60	11-13	1.76	18-20
N	2	48	52	CL / CH	1.9	41-56	27-40	1.67	18-23
Leylab hill	2	39	61	CH	3.9	48-63	22-35	1.66	17-20



شکل ۴. موقعیت نمونه‌های آزمایش شده در نمودار هولتز و کوکس (Holtz and Kovacs, 1981)



شکل ۵. نتایج آنالیز XRD بر روی نمونه قرضه N

۲-۵. نتایج آزمایشات واگرایی

نتایج آزمایشات مختلف واگرایی به شرح زیر است:

نتایج آزمون کرامب: نتایج این آزمایش بر روی نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس این آزمون، تقریباً همه نمونه‌های مورد بررسی واگرایی کامل نشان می‌دهند.

نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه: نتایج آزمایش هیدرومتری دوگانه در جدول ۵ نشان داده شده است. بر

اساس معیار ارائه شده به وسیله بل و مود (Bell and Maud, 1994)، به جز نمونه‌های منابع قرضه کلو و HF9، دیگر نمونه‌های مورد بررسی واگرایی متوسط تا شدید نشان می‌دهند. چنانچه در این جدول دیده می‌شود بیشترین درصد واگرایی مربوط به نمونه تپه لیلاب است.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های کرامب بر روی نمونه‌ها

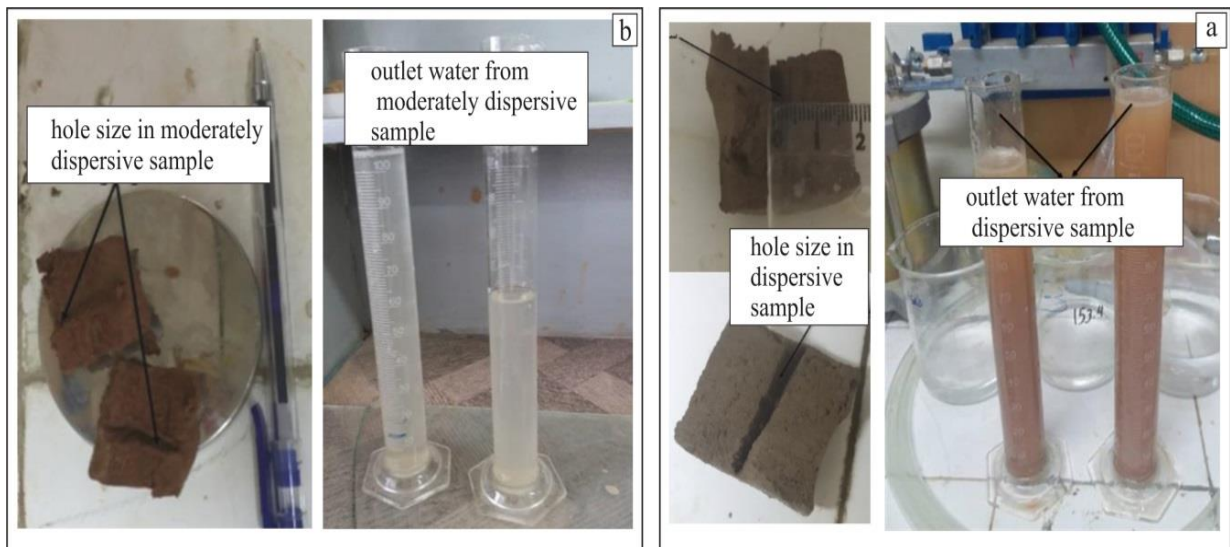
Sample name	Observations in Crumb test	Temperature (° C)
A	Colloidal solution was formed and the color of water was completely changed up to high distance from the soil surface. The water was completely dark (completely dispersive)	20
HF1	The soil particles deposited and color of water was changed (dispersive)	19
N	Colloidal solution was formed and the color of water was completely changed up to high distance from the soil surface. The water was completely dark (completely dispersive)	24
L	Colloidal solution was formed and the color of water was completely changed up to high distance from the soil surface. The water was completely dark (completely dispersive)	24
Leylab hill	Colloidal solution was formed and the color of water was completely changed up to high distance from the soil surface. The water was completely dark (completely dispersive)	24

جدول ۵. نتایج آزمایشات هیدرومتری دو گانه

Sample name	Dispersivity percent	Determination of sample dispersivity based on Bell and Maud (1994) method
Kalo	8-38	Non-dispersive to moderately dispersive
HF9	5-32	Non-dispersive to moderately dispersive
HF1	35>	Moderately to highly dispersive
A	58-45	Moderately to highly dispersive
L	62-40	Moderately to highly dispersive
N	63-58	Moderately to highly dispersive
Leylab hill	68-53	Moderately to highly dispersive

در شکل ۶ تصویری از آب خروجی موقع آزمایش و گشاد شدگی سوراخ بعد از آزمون پین هول برای نمونه‌های واگرا و نیمه واگرا نشان داده شده است. نمونه‌ها بر اساس قطر سوراخ و شدت جریان خروجی در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج آزمایشات پین هول: خاکها بر اساس نتایج این آزمایش به ۶ گروه D1، D2، ND4، ND3، ND2 و ND1 طبقه بندی می‌شوند. در این طبقه بندی خاک D1 کاملاً واگرا و خاک ND1 کاملاً غیرواگرا می‌باشد (Sherard et al., 1976).



شکل ۶. آب خروجی و گشاد شدگی سوراخ بعد از آزمون پین هول برای نمونه‌ای (a) واگرا و (b) نیمه واگرا

نتایج آزمایش شیمیایی: به منظور بررسی ارتباط بین ترکیب شیمیایی عصاره اشباع خاک با نتایج بدست آمده از دیگر آزمون‌های واگرایی، آزمایش شیمیایی بر روی نمونه‌های برداشت از منابع قرصه HF1 و N انجام شده است. لازم به ذکر است که منبع قرصه HF1 کمترین میزان واگرایی و منبع قرصه N واگرایی شدیدی را در آزمون‌های کرامب، هیدرومتری دوگانه و پین هول نشان داده‌اند. همچنین به منظور بررسی دقیق‌تر ارتباط بین واگرایی و سنگ مادر آزمایش شیمیایی بر روی نمونه‌های منابع قرصه HF9 و کلو که سنگ مادر غیرتبخیری دارند، نیز انجام شده است. در شکل ۷ موقعیت نمونه‌های مورد بررسی در نمودار شرارد و همکاران (Sherard et al., 1976) نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود نتایج این آزمون تطابق خوبی با نتایج دیگر آزمون‌های واگرایی دارد، زیرا در این آزمون نیز نمونه‌های منبع HF1 نیمه واگرا و نمونه‌های منبع N واگرا می‌باشند. آزمایشات تجزیه شیمیایی همچنین بیانگر آن

همان طور که قبلاً اشاره شد، آزمایش پین هول با دو فیلتر ماسه‌ای با دانه بندی متفاوت و در شرایط نگهداری نمونه به مدت ۲۴ ساعت و بدون نگهداری، انجام شده است. نتایج این آزمایشات در جدول ۶ ارائه شده است.

بر اساس نتایج آزمایشات پین هول، وقتی آزمایش با فیلتر ریز با ۲۴ ساعت نگهداری در رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر انجام شود، شدت آب خروجی و قطر سوراخ در مقایسه با آزمایش با فیلتر درشت، بدون نگهداری، کم‌تر می‌باشد. نتایج مذکور در مورد آزمایش با فیلتر ریز نیز مشابه است. کم‌ترین شدت خروج آب و قطر سوراخ در اکثر نمونه‌ها، در شرایطی است که فیلتر ریز بوده و نگهداری ۲۴ ساعت رعایت شود.

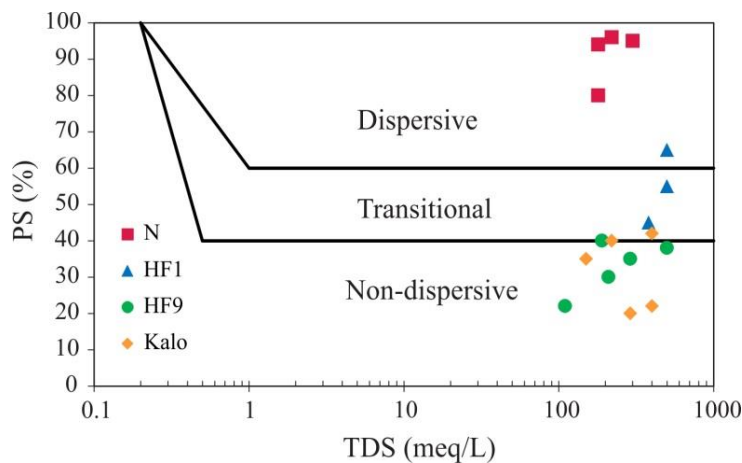
در هر چهار حالت مورد بررسی، بیشترین قطر سوراخ و شدت خروج آب مربوط به نمونه تپه لیلاب است. بر اساس نتایج این آزمایشات نیز همه نمونه‌های مورد بررسی کاملاً واگرا تا نیمه واگرا هستند.

است که نمونه‌های متعلق به منابع قرضه HF9 و کلو غیرواگرا می‌باشند.

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های پین هول و مقایسه نتایج با شرایط متفاوت استفاده از ماسه فیلتر و زمان نگهداری

Sample name	Head (mm)	Time (min)	Cloudiness of flow from side*	Cloudiness of flow from top	Hole size after test (mm)	Final flow rate through specimen (ml/s)	Dispersive classification	Remarks
HF1	50	5	MD	SD	1.2-1.7	0.9-1	ND4	Sand passing sieve No. 8 and retaining on No. 16, maintain for 24 h at optimum moisture
A	50	10	SD	D	1.5-2.3	1.1-1.8	D2	
N	50	5	VD	D	2.1-2.3	1.9-2.0	D1	
L	50	5	VD	D	2.0-2.9	2.7-2.9	D1	
Leylab hill	50	5	VD	D	2.8-3.2	2.9-3.0	D1	
HF1	50	5	MD	SD	1.3-1.4	1.0-2.1	ND3-ND4	Sand passing a sieve No. 4 and retaining on No. 10, maintain for 24 h at optimum moisture
A	50	10	SD	D	1.6-2.3	1.5-2.0	D2	
N	50	5	VD	D	2.5-2.8	2.5-2.8	D1	
L	50	5	VD	D	2.1-2.9	2.7-2.9	D1	
Leylab hill	50	5	VD	D	2.7-2.9	2.9-3.0	D1	
HF1	50	5	MD	D	1.7-2.0	1.6-1.9	D2	Sand passing sieve No. 8 and retaining on No. 16, without maintain at optimum moisture
A	50	5	D	VD	2.9-3.1	2.0-2.0	D2	
N	50	5	VD	D	2.8-3.0	2.4-3.0	D1	
L	50	5	VD	D	3.0-3.0	2.2-3.0	D1	
Leylab hill	50	5	VD	D	2.8-2.9	2.9-3.0	D1	
HF1	50	5	D	VD	1.8-2	1.4-1.5	D2	Sand passing sieve No. 4 and retaining on No. 10, without maintain at optimum moisture
A	50	5	D	VD	2.9-3.1	2.1-2.3	D2	
N	50	5	VD	D	2.8-3.2	2.5-2.8	D1	
L	50	5	VD	D	2.8-3.2	2.7-2.8	D1	
Leylab hill	50	5	D	D	3.0	2.5	D1	

* D: Dark, SD: Slightly dark, MD: Moderately dark, VD: Very Dark

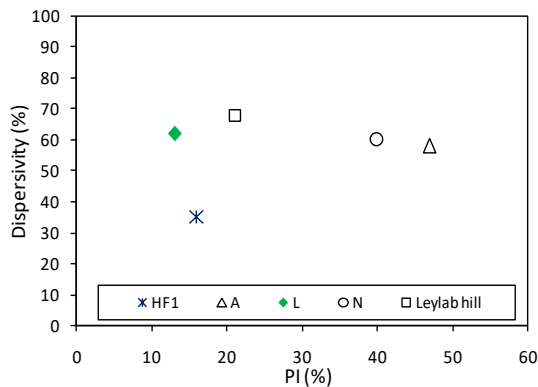


شکل ۷. موقعیت نمونه‌های مورد بررسی در نمودار شرارد و همکاران (Sheraed et al., 1976)

۶. بحث

۶-۱. ارتباط نتایج آزمایشات واگرایی با مشخصات فیزیکی در این مطالعه پتانسیل واگرایی برخی از منابع قرضه تعیین شده برای سد حاجیلر با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی کرامب، هیدرومتری دوگانه، پین هول و تجزیه شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. تطابق زیادی بین نتایج آزمون‌های واگرایی مختلف دیده می‌شود. به طور مثال نمونه‌های تپه لیلاب و قرضه N بیشترین درصد واگرایی را در آزمون هیدرومتری دوگانه نشان داده‌اند. در آزمون پین هول نیز بیشترین قطر سوراخ و شدت خروج آب متعلق به همین نمونه‌ها است. نتایج آزمایشات شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار یون سدیم بالا در خاک منبع قرضه N، سبب افزایش درصد واگرایی آن در آزمایش هیدرومتری دوگانه و قرار گرفتن آن در رده D1 آزمایش پین هول می‌شود. در مقابل درصد پایین یون سدیم در نمونه‌های کلو و HF9، درصد واگرایی پایین آن‌ها را در آزمون هیدرومتری دو گانه به دنبال داشته است.

از آنجایی که آزمایشات واگرایی وضعیت واگرایی خاک را معمولاً به صورت کیفی بیان می‌کنند (مرندی و حمیدی، ۱۳۹۴)، لذا برقراری ارتباط بین نتایج این آزمون‌ها با دیگر مشخصات فیزیکی خاک همچون دانه بندی و طبقه بندی خاک، وزن مخصوص و حدود آتربریگ مشکل است (Bhuvaneshwari et al., 2007; Nagy et al., 2016). شرارد و همکاران (Sheraed et al., 1972) با بررسی‌های خود بر روی ۸۰ نمونه خاک واگرا و ۱۱۵ نمونه خاک غیرواگرا، به عدم ارتباط بین حدود آتربریگ و پدیده واگرایی پی برد. در شکل ۸ ارتباط بین شاخص خمیری و درصد واگرایی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۸. ارتباط بین درصد واگرایی و شاخص خمیری نمونه‌های آزمایش شده

همان طور که دیده می‌شود در اینجا نیز ارتباط قوی بین شاخص خمیری و درصد واگرایی خاک وجود نداشته ولی تقریباً با افزایش شاخص خمیری، واگرایی افزایش می‌یابد. در مطالعه (Belarbi et al., 2013) نیز ارتباط ضعیفی بین افزایش شاخص خمیری خاک و افزایش درصد واگرایی دیده می‌شود. مظفری‌نیا و همکاران (۱۳۹۳) در مورد رابطه خاصیت خمیری و واگرایی نمونه‌ها و موقعیت خاک‌های واگرا در نمودار خمیری کاساگرانده نشان داده‌اند که نمونه‌های واگرا در نزدیکی خط A قرار داشته و دارای حد خمیری در حدود ۱۹ تا ۲۳ درصد می‌باشند. اما نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این قاعده کلی نمی‌باشد، به طوری که نمونه‌های مورد مطالعه در بین خطوط A و U در نمودار کاساگرانده قرار داشته و بعضاً برخی از نمونه‌ها با درصد واگرایی بالا همچون نمونه N به خط U نزدیکتر هستند و حد خمیری نمونه‌ها نیز در محدوده ۱۹ تا ۲۹ درصد واقع است (شکل ۴).

واگرایی خاک ارتباط مستقیم با کانی‌شناسی رس دارد. کانی‌هایی مثل مونت‌موریونیت تمایل زیادی به واگرایی دارند (Barkhordari et al., 2014)، اما در کائولینیت و هیالوسیت واگرایی چندانی مشاهده نمی‌شود، ایلیت هم تمایل نسبی به واگرایی دارد (Mitchell, 1993). با توجه به این که بر اساس شکل ۴ و نتایج آنالیز XRD (شکل ۵) کانی‌های رسی در نمونه‌ها اکثراً از نوع مونت‌موریونیت و ایلیت هستند، لذا پتانسیل واگرایی نمونه‌های مورد بررسی بالا

است.

زیاد از هوازدگی و فرسایش آنها تشکیل شده‌اند. منابع قرضه HF9 و کلو در آزمون‌های هیدرومتری دوگانه و شیمیایی غیرواگرا شناسایی شدند. شکل ۲ نشان می‌دهد که سنگ مادر این منابع قرضه می‌تواند واحدهای غیرتبخیری کرتاسه پسین - پالئوسن (ماسه سنگ، کنگلومرا، سنگ آهک و آندزیت) باشد.

بدین ترتیب با توجه به سنگ‌شناسی منطقه، خاک‌هایی رسی که دارای پتانسیل واگرایی بالایی هستند، مربوط به رسوبات تبخیری نئوژن می‌باشند. نهشته‌های آبرفتی جوان مربوط به کواترنری واگرایی متوسط تا زیاد و نهشته‌های مربوط به کواترنری (نهشته‌های آبرفتی قدیمی) پتانسیل واگرایی کم تا غیرواگرا از خود نشان داده‌اند. بنابراین بر اساس ارتباط مشاهده شده بین پتانسیل واگرایی خاکها و سنگ مادر می‌توان حالت‌های زیر را برای سایر منابع خاک رس انتظار داشت:

منبع قرضه C در ارتباط با واحدهای تبخیری میوسن و منابع قرضه Z و P در ارتباط با نهشته‌های آبرفتی جوان هستند، لذا انتظار آن می‌رود که پتانسیل واگرایی متوسط تا زیادی از خود نشان دهند.

خاک منبع قرضه E در ارتباط با نهشته‌های کواترنری قدیمی بوده و لذا انتظار آن می‌رود که مشابه با منبع قرضه HF1 پتانسیل واگرایی کم تا غیرواگرا از خود نشان دهد. خاک منبع قرضه HF4 در ارتباط با واحدهای غیر تبخیری پالئوسن بوده و لذا می‌تواند غیرواگرا باشد.

۷. نتیجه‌گیری

- بیشتر سازندهای زمین‌شناسی منطقه سد حاجیلر، از نوع تبخیری نئوژن می‌باشند که این سازندها سنگ مادر رس‌های موجود در دشت‌های منطقه بوده و دارای املاح بیشتری می‌باشند.

- نشانه‌های صحرایی در دامنه‌ها و دشت‌های منطقه حاکی از وجود پتانسیل واگرایی در خاک‌های رسی منطقه است.

- بیشتر خاک‌های تشکیل‌دهنده منابع قرضه ریزدانه مورد مطالعه بر اساس طبقه بندی یونیفاید در گروه خاک‌های

نتایج آزمایشات پین هول نشان داد که دانه بندی ماسه فیلتر بر شدت آب خروجی و قطر سوراخ مؤثر است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از فیلتر درشت بدون نگهداری نمونه به مدت ۲۴ ساعت، سبب افزایش شدت جریان خروجی و قطر سوراخ می‌شود. کمترین شدت آب خروجی در شرایطی است که ماسه فیلتر ریز بوده و نمونه‌ها ۲۴ ساعت نگهداری شوند. بر اساس این نتایج توصیه می‌شود در ساخت هسته سد، استفاده از دانسیته بیش از ۹۸ درصد تراکم استاندارد و رطوبتی بین رطوبت بهینه و ۲ تا ۴ درصد بیشتر از آن استفاده شود. عدم رعایت تراکم مورد نیاز، ممکن است مشکلاتی را در استفاده از خاکهای واگرا به عنوان هسته نفوذناپذیر سد بوجود آورد.

۲-۶. ارتباط بین خاک‌های رسی واگرا و سنگ مادر

در این مطالعه سعی گردیده است که با مطالعات زمین شناسی صحرایی و تعیین سنگ مادر خاکهای رسی آبرفتی منطقه، به ارتباط بین سنگ مادر و میزان واگرایی خاک پی برده شود. در نقشه زمین شناسی (شکل ۲) واحدهای تبخیری که محتمل‌ترین واحدهای زمین شناسی بوجود آورنده خاکهای واگرا هستند از سایر واحدهای زمین شناسی متمایز شده‌اند. این نقشه به وضوح ارتباط بین منابع قرضه مورد بررسی و سنگ مادر را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که منبع قرضه HF1 با واحدهای سنگی Qt^1-E_m ، نهشته‌های دشت‌های آبرفتی قدیمی و مارن‌ها و ماسه سنگها در ارتباط است. نمونه‌های این منبع کمترین میزان واگرایی را در بین دیگر نمونه‌ها نشان داده است. کم بودن پتانسیل واگرایی نهشته‌های آبرفتی قدیمی از نهشته‌های آبرفتی جوان می‌تواند در اثر از بین رفتن تدریجی یون سدیم و یا جایگزینی آن با یون کلسیم باشد. نمونه‌های منابع قرضه N، L و تپه لیلاب جدید به ترتیب بیشترین میزان واگرایی را نشان داده‌اند. همان طور که در نقشه زمین شناسی دیده می‌شود این منابع قرضه ارتباط مستقیم با واحدهای تبخیری، مارنی و آهکی میوسن ($M_2^m-M_2^{mg}$) داشته و به احتمال

- بر اساس نتایج آزمایشات پین هول کمترین شستگی خاک واگرا مربوط به حالتی است که خاک در رطوبت بهینه و دانسیته حداکثر متراکم گردد. در این حالت دبی خروجی کمتر و اندازه سوراخ کوچکتر می‌باشد و رنگ آب خروجی نیز تا حدی روشن تر است.

تقدیر و تشکر

از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، شرکت پژوهش عمران راهوار و شرکت مهندسین مشاور بندآب به خاطر ارائه اطلاعات و مساعدت در انجام مطالعات و از آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تبریز به خاطر مساعدت در ساخت دستگاه پین هول و در اختیار گذاشتن سایر تجهیزات آزمایشگاهی قدردانی می‌شود.

CL و CH قرار دارند که در زمره خاک‌های مناسب برای استفاده در هسته سدهای خاکی می‌باشند.
- از ۱۱ منبع قرضه مشخص شده برای استفاده در هسته رسی، ۵ منبع در رده کاملاً واگرا، ۴ منبع در رده واگرایی کم تا متوسط و بقیه در رده غیرواگرا قرار دارند.
- نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های منابع قرضه N-L-A و HF1 و یک نمونه از خاک برجا تپه نزدیک لیلاب جدید، حاکی از آن است که مصالح منابع قرضه مذکور همه دارای پتانسیل واگرایی بوده ولی درجه واگرایی آنها متفاوت است.
- نتایج آزمایش‌های واگرایی دارای همخوانی قابل قبولی بوده و نمونه تپه لیلاب جدید که از خاک رس درجا سازندهای تبخیری برداشته شده بود، خاصیت واگرایی بیشتری نشان می‌دهد.

منابع

- اصغری کلجاهی، ا.، ۱۳۷۸، "شناسایی منابع قرضه ریزدانه مناسب از نظر واگرایی بر اساس مطالعات زمین‌شناسی مهندسی"، اولین کنفرانس زمین‌شناسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت معلم، ۴۱۵-۴۲۴.
درویش زاده، ع.، ۱۳۷۰، "زمین شناسی ایران"، نشر دانش امروز، ۹۰۱ صفحه.
سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۷۶، "نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ : ۱ سیاه رود".
شرکت مهندسین مشاور بندآب، ۱۳۸۸، "طرح توسعه رودخانه حاجیلر- مطالعات مرحله دوم- گزارش فنی سد و تأسیسات وابسته".
خامه چیان، م.، رحیمی، ح.، سلوکی، ح.، ۱۳۷۹، "بررسی خاک‌های واگرا در ارتباط با شرایط زمین شناسی در استان خوزستان"، فصلنامه علوم زمین، دوره ۹، شماره ۳۶، ۴۴-۵۹.
گودرزی، ذ.، ۱۳۹۱، "شناسایی و مطالعه خاک‌های واگرا در استان لرستان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، ۱۴۶ صفحه.
مردی، م.، حمیدی، ص.، ۱۳۹۴، "اعتبارسنجی آزمایش‌های واگرایی در خاک‌های با خواص خمیری و پتانسیل واگرایی کم (مطالعه موردی بخشی از مناطق ایران)"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، شماره ۴۵، ۵۱-۶۳.
مظفری‌نیا، ع.، قنبری، ع.، اصغری کلجاهی، ا.، ۱۳۹۳، "بررسی استفاده از خصوصیات خمیری در شناسایی خاک‌های واگرا"، دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، کرمانشاه.
نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵، "دیباچه‌ای بر زمین شناسی ایران"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- ASTM D4221, 2018. Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydrometer, ASTM International, West Conshohocken.
ASTM D4318, 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken.
ASTM D3282, 2015. Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, ASTM International, West Conshohocken.
ASTM D4647, 2015. Standard Test Method for Identification and Classification of Dispersive Clay Soils by the Pinhole Test, ASTM International, West Conshohocken.
ASTM D6572, 2013. Standard Test Methods for Determining Dispersive Characteristics of Clayey Soils

- by the Crumb Test, ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D698, 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken.
- Barkhordari, K., Abbaspour, M., Beygi, M., Nikdel, S., 2014. A Comparison between methods for determining divergence of soil and proposed a new method based on soil activity number. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 19.
- Belarbi, A., Zadjoui, A., Bekkouche, A., 2013. Dispersive clay: influence of physical and chemical properties on dispersion degree. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18: 1727-1738.
- Bell, F., Maud, R., 1994. Dispersive soils: a review from a South African perspective. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 27: 195-210.
- Bhuvaneshwari, S., Soundra, B., Robinson, R., Gandhi, S., 2007. Stabilization and microstructural modification of dispersive clayey soils, *Proceedings of the First International Conference on Soil and Rock Engineering*, Srilankan Geotechnical Society, Colombo, Sri Lanka, 1-7.
- Dixit, M., Gupta, S., 2011. Problems in characterization and identification of dispersive soils-a case study. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4: 143-146.
- Fang, Y., Chung, Y., Yu, F., Chen, T., 2001. Properties of soil-cement stabilised with deep mixing method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 5: 69-74.
- Flores-Berrones, R., Lopez-Acosta, N.P., 2011. Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures, *Soil Erosion Studies*. IntechOpen.
- Gray, J., Murphy, B., 2002. Parent material and world soil distribution, 17th world congress of soil science. Bangkok, Thailand. Citeseer.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., 1981. An introduction to geotechnical engineering. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Ingles, O. G. and Metcalf, J. B., 1972. *Soil stabilization: principles and practice*, 374 P.
- McCook, D., McElroy, C., 1991. Soil mechanics note No. 13: Dispersive clays. The soil mechanics laboratory at Fort Worth, Texas.
- Mitchell, J., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons, Inc, New York, 592 P.
- Nagy, G., Nagy, L., Kopecskó, K., 2016. Examination of the physico-chemical composition of dispersive soils. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 60: 269-279.
- Rezaei, M., Ajalloeian, R., Ghafoori, M., 2012. Geotechnical properties of problematic soils emphasis on collapsible cases. *International Journal of Geosciences*, 3: 105-110.
- Sayehvand, S., Dehghani, M., 2004. Identification and management of dispersive soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*: 1-44.
- She, D., Fei, Y., Liu, Z., Liu, D., Shao, G., 2014. Soil erosion characteristics of ditch banks during reclamation of a saline/sodic soil in a coastal region of China: field investigation and rainfall simulation. *Catena*, 121: 176-185.
- Sherard, J., Dunnigan, L.P., Decker, R.S., 1976. Identification and nature of dispersive soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 287-301.
- Sherard, J.L., Decker, R.S., Ryker, N.L., 1972. Piping in earth dams of dispersive clay, *Performance of Earth and Earth-Supported Structures*. ASCE, 589 P.
- Umesh, T., Dinesh, S., Sivapullaiah, P.V., 2011. Characterization of dispersive soils. *Materials Sciences and Applications*, 2: 629-633.