

بررسی تزریق پذیری توده سنگ ساختگاه سد پیغام چای کلیبر بر اساس داده های صحرایی

قدرت برزگری^{۱*}، سمانه شالچی^۲

۱- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* نویسنده مسئول: gbarzegari@tabrizu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۷

چکیده

استفاده از روش تزریق یکی از متداول ترین روش های بهسازی، علاج بخشی و آب بندی پی سازه های آبی و ساختگاه سدها می باشد. در این روش، با تزریق دوغاب سیمان، درزه ها و شکستگی های توده سنگ پر شده و در نتیجه ویژگی های ژئومکانیکی بهبود یافته و نفوذ پذیری آن کاهش می یابد. رمز موفقیت در استفاده از این روش، ارزیابی صحیح تزریق پذیری توده سنگ و به تبع آن تعیین طرح اختلاط دوغاب و تعیین پارامترهای تزریق است. سد مخزنی پیغام چای، سد خاکی با هسته رسی و با ارتفاع ۴۶ متر از بستر رودخانه می باشد که در ۱۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان کلیبر در حال احداث است. سنگ بستر ساختگاه سد از نوع بازالت می باشد که در بستر رودخانه و تکیه گاه چپ به وسیله رسوبات آبرفتی پوشیده شده است. سنگ بستر مذکور توسط شش دسته درزه اصلی و تعدادی درزه های فرعی و گسل خرد شده است. بر اساس نتایج آزمایش های لوژان در ساختگاه و به موازات محور سد، در بیشتر مقاطع آزمایش نفوذ پذیری کمتر از ۳ لوژان است. شاخص کیفی توده سنگ (RQD) در ساختگاه سد در ۷۵ درصد مقاطع کمتر از ۲۵ درصد و تنها در ۱ درصد مقاطع بیشتر از ۷۵ درصد تعیین شده است. بررسی ارتباط بین شاخص کیفی توده سنگ و مقادیر لوژان نشان می دهد که بیشتر مقاطع در شاخص های کیفی کم تا زیاد از نفوذ پذیری پایینی برخوردار بوده و ارتباط منطقی بین این دو پارامتر وجود ندارد. در شاخص های کیفی مختلف، میزان خوردن سیمان کم بوده و حاکی از وجود توده سنگ با درجه درزه داری کم تا زیاد و با درزه های پر شده و باز شدگی کم و تداوم بسیار کم است. بررسی ارتباط بین میزان خوردن سیمان توده سنگ و رده های مختلف شاخص نفوذ پذیری ثانویه (SPI) نشان داد که در ساختگاه مورد مطالعه ارتباط منطقی بین این متغیرها وجود ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده، توده سنگ تشکیل دهنده ساختگاه مورد مطالعه تزریق پذیری پایینی دارد.

واژه های کلیدی: پی سد، تزریق پذیری، خوردن سیمان، لوژان، شاخص نفوذ پذیری ثانویه (SPI).

مقدمه

یکی از مهم ترین مسائل در سدهای خاکی کنترل میزان نشت و فرار آب از طریق پی و بدنه است. به همین دلیل بر اساس ویژگی های ژئومکانیکی ساختگاه سدها و برای افزایش طول مسیر جریان و به تبع آن کاهش دبی و شیب هیدرولیکی ناشی از نشت، روش های مختلفی وجود دارد. ایجاد پرده آب بند به ویژه در زیر هسته رسی سدهای خاکی یکی از مؤثرترین آنها به شمار می آید (کماسی و بیرانوند، ۱۳۹۹). تمام سدهای خاکی در معرض نشت از طریق بدنه، پی و تکیه گاه ها قرار دارند و هرگونه نشت آب از مخزن سدها می تواند به کارایی و عملکرد سدها اثرگذار باشد (Jafarzadeh and Mousavi, 2012).

(2019). در چین مخلوط‌های سیمانی به‌طور گسترده‌ای برای عملیات تزریق و تحکیم زمین‌های مسئله‌دار استفاده می‌شود. ارزیابی مخلوط‌های سیمانی عمدتاً شامل کارایی روان‌پذیری، پایداری، قابلیت پمپاژ و استحکام می‌باشند؛ اما همه شاخص‌ها برای سنجش کارایی سیمان موردنیاز نیستند (Xu et al., 2020). سیمان ماده اصلی و مهم تشکیل‌دهنده دوغاب است. یکی از مهم‌ترین خواص سیمان اندازه دانه‌های آن است، دانه‌ها باید آن‌قدر ریز باشند که امکان جریان یافتن در داخل درزه-های باریک سنگ‌ها را داشته باشند (Salimian et al., 2017). برای کنترل تأثیر تزریق سیمان در بهبود کیفیت توده‌سنگ‌ها، عمدتاً از آزمایش‌های درجا مانند آزمایش لوژن، تصویربرداری تلویزیونی گمانه‌ای و آزمایش‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود (Fan et al., 2015). اجرای پرده تزریق یک مانع هیدرولیکی را به‌وجود می‌آورد و نشت آب از طریق پی سد را کاهش می‌دهد. باین‌حال به‌دلیل عدم توانایی نفوذ دوغاب در شکستگی‌ها و فضاهای خالی باریک در پی سد، تخمین میزان تأثیر تزریق مشکل است (Li et al., 2017). برای ارزیابی تأثیر ناپیوستگی‌ها در مورد رفتار توده‌سنگ لازم است ویژگی‌های مربوط به ناپیوستگی‌ها به‌دقت بررسی گردد. ویژگی درزه‌ها، نفوذپذیری و خوردند سیمان را به‌شدت تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. این مشخصات شامل بازشدگی، زبری، مقاومت و پرشدگی می‌باشد (Azimian and Ajalloeian, 2014). انتخاب طرح اختلاط صحیح دوغاب تزریقی بر اساس ویژگی‌های ژئومکانیکی توده-سنگ جزو پارامترهای کنترل‌کننده موفقیت عملیات تزریق است.

ویژگی‌های محیط تزریق، مشخصات دوغاب تزریقی و فشار تزریق سه عامل اصلی کنترل‌کننده تزریق پذیری توده سنگ هستند. ازاین‌بین ویژگی‌های محیط تزریق از اهمیت بیشتری برخوردار است چراکه دو عامل دیگر را نیز بر اساس آن تعیین می‌شوند (Nonveiller, 1989). تزریق سیمان برای بهبود ویژگی‌های زمین‌شناسی یک عملیات زیرزمینی است که با عدم قطعیت‌های زیادی همراه بوده و نتایج آن به‌صورت غیرمستقیم قابل‌کنترل می‌باشد. تخمین صحیح میزان تزریق پذیری توده سنگ علاوه بر افزایش ضریب اطمینان موفقیت عملیات تزریق می‌تواند به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای در کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد. همبستگی بین میزان خوردند سیمان

مشکلات ژئوتکنیکی مثل نشت، اجرای نامناسب دیوار آب‌بند، گسلش و لغزش عامل اصلی شکست سدها در ۲۵ درصد موارد در سرتاسر جهان است (Akinrinmade et al., 2013). امروزه در بسیاری از موارد سدهای خاکی بر روی لایه‌های آبرفتی که نفوذپذیری قابل‌ملاحظه‌ای دارند، احداث می‌گردند. لذا محاسبه مقدار جریان آب از پی و کنترل نشت از پی از اهمیت بالایی برخوردار است (قنبری و زریابی، ۱۳۹۳). وقوع نشت از طریق پی و یا بدنه سدها باعث افزایش شیب هیدرولیکی در پایین‌دست شده و منجر به فرسایش و ناپایداری گردد. کنترل نشت پس از ساخت سد بسیار سخت و گران‌قیمت است، ازاین‌رو باید روش‌های مناسبی برای کنترل نشت در مرحله طراحی اتخاذ شود (Ullah et al., 2019). نتایج تحلیل نرم-افزاری نشان می‌دهند که با افزایش طول مسیر جریان (افزایش عمق دیوار آب‌بند و یا طول پتوی رسی) می‌توان گرا دیان هیدرولیکی را کاهش داد (Fakhari and Ghanbari, 2013). وجود تراوش از سدهای خاکی اجتناب‌ناپذیر بوده و اگر شرایط مناسبی برای فرسایش خاک وجود داشته باشد، موجب شسته شدن نقاط مستعد می‌شود و چنانچه در ابتدای بروز، اقدامات لازم صورت نگیرد به تخریب سد منجر می‌شود (فرخزاد و همکاران، ۱۳۹۸). تحقیقات مختلفی در زمینه بررسی میزان نشت از پی سد و نحوه کنترل آن در سدهای خاکی انجام شده است. نوری و سلماسی (۱۳۹۶) به بررسی عددی تأثیر پتوی رسی در کاهش نشت از پی سدها پرداخته‌اند. مظفری (۱۳۹۸) مشکل فرار آب سد شاه قاسم را با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی بررسی کرده و با تعیین محتمل‌ترین مسیر نشت، راهکارهایی را برای کاهش آن ارائه نموده‌اند. مقیمی و همکاران (۱۳۹۹)، قابلیت آزمایش لوژن در محاسبه میزان نشت از پرده آب‌بند سد سیمره در استان ایلام را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در مقایسه با سایر روش‌های اصلاح و بهسازی زمین در مهندسی عمران، فرآیند تزریق، روش نسبتاً جدیدی است بنابراین برای توسعه آن انجام آزمایش‌ها و تحقیقات جدید ضروری به نظر می‌رسد (Heidarzadeh et al., 2013). پیش‌بینی صحیح قابلیت تزریق سوسپانسیون‌های سیمانی می‌تواند منجر به انتخاب مناسب اجزای دوغاب، تعیین منطقی فاصله و توالی گمانه‌های تزریق و به حداقل رساندن عدم قطعیت در طراحی و اجرای عملیات تزریق شود (Markou,

تعیین طرح اختلاط دوغاب تزریقی می‌باشد که توسط Foyo et al. (2005) ارائه شده است.

در این مقاله با استفاده از همبستگی بین پارامترهای شاخص کیفی سنگ (RQD)، نفوذپذیری لوژان، شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) و میزان خوردند سیمان به بررسی تزریق پذیری توده سنگ ساختمانی سد پیغام‌چای کلیبر پرداخته شده است. سنگ‌بستر ساختمانی این سد از توده‌های نفوذی ماگمایی خردشده تشکیل شده است و نتایج به‌دست‌آمده برای این نوع لیتولوژی می‌تواند منحصربه‌فرد باشد. سد مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و در ۱۵ کیلومتری جنوب شهرستان کلیبر واقع شده است. این سد از نوع خاکی با هسته رسی، با ارتفاع ۴۶ متر از بستر رودخانه و به طول تاج ۷۶۵ متر است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی و عکس هوایی ساختمانی سد مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

به‌عنوان شاخصی از تزریق‌پذیری توده سنگ با سایر پارامترهای قابل‌اندازه‌گیری از جمله نفوذپذیری و شاخص کیفی توده سنگ یکی از مباحث اصلی تحقیقات اخیر در این زمینه بوده است. سهرابی بیدار و همکاران (۱۳۹۹) بر اساس مطالعاتی که در ساختمانی سد خراسان دو انجام دادند به این نتیجه رسیدند که خوردند سیمان با شاخص کیفی سنگ و فاصله‌داری درزه‌ها رابطه معکوس ولی با بازشدگی و عدد لوژن رابطه مستقیم دارد. (Sadeghiyeh et al. (2013) ارتباط بین پارامترهای شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI)، مقدار لوژن، شاخص کیفی سنگ (RQD) و خوردند سیمان (CT) در ساختمانی سد استور را بررسی نموده و به این نتیجه رسیدند که رابطه معکوس بین نفوذپذیری و شاخص کیفی سنگ وجود دارد اما تزریق پذیری توده سنگ بشدت تحت‌تأثیر رگه‌ها و بازشدگی درزه‌هاست. شاخص SPI یکی از پارامترهای اساسی برای رده‌بندی توده سنگ به‌منظور تعیین نیاز به بهسازی و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و عکس ماهواره‌ای ساختمانی سد پیغام‌چای کلیبر.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی ساختگاه مورد مطالعه

آبرفتی پوشیده شده‌است و شیب آن ملایم می‌باشد. این مواد آبرفتی، در واقع پادگانه‌هایی هستند که به ترتیب از کناره به طرف محور رودخانه، جوان‌تر می‌شوند. پوشش آبرفتی در تکیه‌گاه چپ گسترش نسبتاً زیادی دارد و ضخامت آن حدود ۶۰ متر است این آبرفت‌ها در عمق سیمانی شده هستند، ولی در تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه ضخامتی در حدود ۵ الی ۲۰ متر دارد. گسل خوردگی از جمله پدیده‌های تکتونیکی است که تقریباً در تمامی سطح منطقه مورد مطالعه نمایان است. ایجاد گسل‌های موجود به فاز کوهزایی آلپی نسبت داده می‌شود (شرکت مهندسی مشاور نهادآب، ۱۳۹۳). بر اساس اطلاعات حاصل از گمانه‌های تزریق پرده‌ی آب‌بند، سطح آب زیرزمینی در تکیه‌گاه راست در عمق ۱۵ تا بیش از ۳۵ متری، در بستر ساختگاه به‌طور متوسط در عمق ۵ متری و در تکیه‌گاه چپ در عمق ۵ تا ۲۰ متری از سطح زمین قرار دارد. در شکل ۲ تصویری از عملیات تزریق پرده آب‌بند ساختگاه سد نشان داده شده است. شکل ۳ نقشه و نیم‌رخ زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه سد پیغام‌چای کلیبر را نشان می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه در زون البرز- آذربایجان قرار دارد. بخش شرقی- شمال شرق زون مذکور که محدوده مورد مطالعه در آن واقع است و به زون قفقاز متصل است (آق‌نابتی، ۱۳۸۵). سنگ‌بستر در ساختگاه سد، از گدازه‌های بازیک و شیل کربناته تشکیل شده است. همچنین نفوذ توده‌های ماگمایی در این منطقه بخصوص جناح راست و بستر رودخانه پیغام چای کاملاً مشهود می‌باشد. سنگ‌بستر در جناح چپ و بستر رودخانه به‌وسیله رسوبات حاصل از عملکرد رودخانه (شامل پادگانه‌های آبرفتی ریزدانه و نهشته‌های رودخانه‌ای و واریزه‌ها) پوشیده شده است. محور سد در دره‌ای نسبتاً کم‌عرض، پایین‌تر از تلاقی دوشاخه رودخانه به یکدیگر قرار دارد. دره در محل محور سد حالت نامتقارن دارد. تکیه‌گاه راست دارای شیب تند (حدود ۲۸ درجه) بوده ولی شیب تکیه‌گاه چپ ملایم (حدود ۵ درجه) است. در دامنه راست، بیرون‌زدگی سنگ‌بستر باعث ایجاد شیب تند شده است، درحالی‌که دامنه چپ از مواد



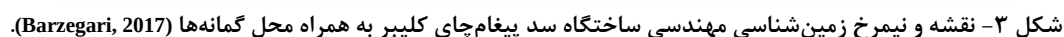
شکل ۲- تصویری از عملیات تزریق پرده آب‌بند ساختگاه سد پیغام‌چای کلیبر (دید به سمت تکیه‌گاه چپ).

بررسی وضعیت درزه‌ها در ساختگاه سد

مؤثر می‌باشد. در عملیات نفوذ آب و دوغاب، درزه‌های باز و تزریق‌پذیر بیشتر اهمیت دارند. هر چه فاصله‌داری درزه‌ها بیشتر باشد عملیات تزریق راحت‌تر انجام می‌گیرد، زیرا فاصله داری کم درزه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل نشت سطحی و

به‌طور کلی ویژگی ناپیوستگی‌ها، میزان نفوذپذیری توده سنگ در عملیات آزمون فشار آب و تزریق را تحت تأثیر قرار می‌دهد که شناخت و بررسی آن‌ها در روند انجام هر دو عملیات

ریزش چال‌ها می‌گردد (Ewert, 1998). زبری درزه‌ها بر نحوه حرکت دوغاب در سطح درزه مؤثر است. افزایش زبری باعث بالا رفتن میزان اصطکاک بین سطح درزه و دوغاب و به دنبال آن افت شدیدتر فشار سیال حین حرکت در ناپیوستگی‌ها خواهد شد. پیرشدگی درزه‌ها نیز یکی از عوامل کنترل‌کننده تزریق‌پذیری توده‌سنگ می‌باشد (Houlsby, 1999). بازشدگی درزه‌ها یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های درزه است که نقش مهمی در میزان نفوذ سیال در توده‌سنگ دارد و می‌توان میزان آن را



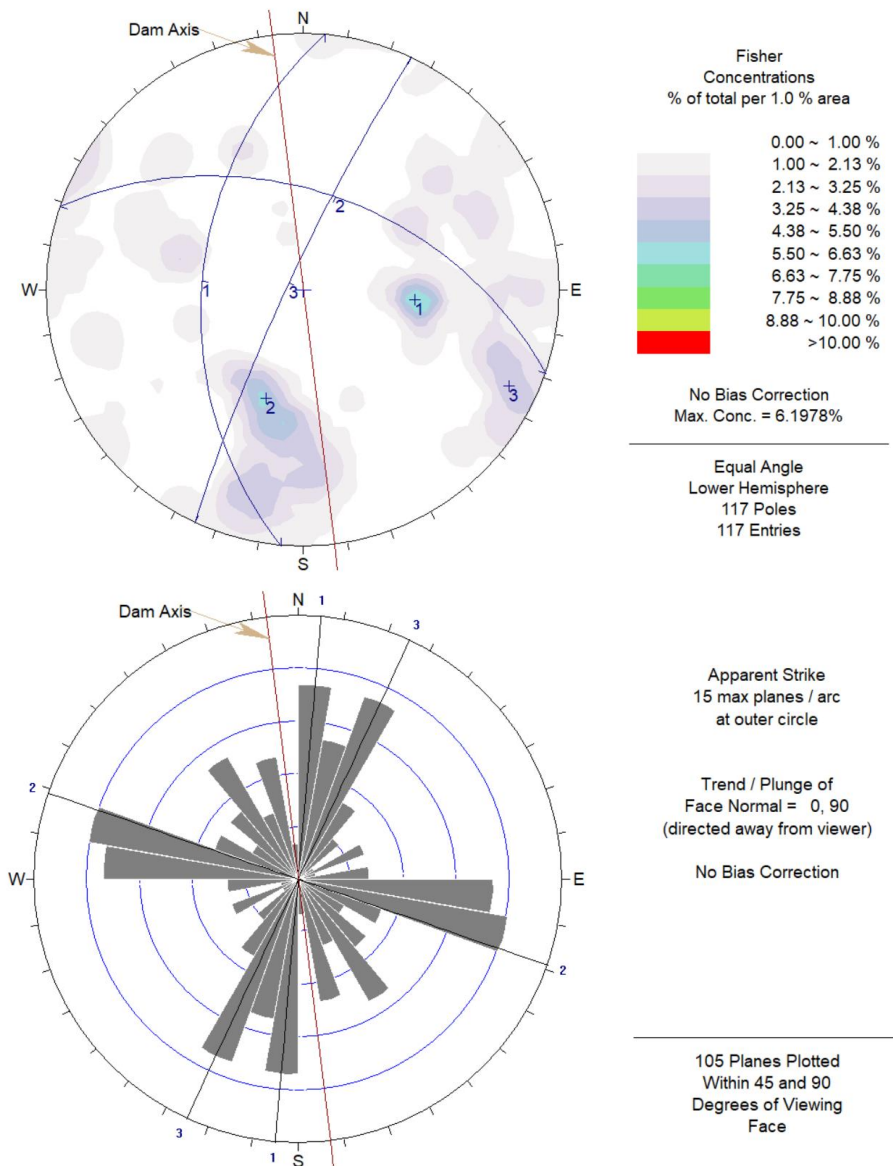
جدول ۱- مشخصات دسته درزه‌های اصلی توده سنگ ساختمانی سد پیغام‌چای (Barzegari, 2017).

مشخصات	دسته درزه	دسته درزه	دسته درزه	دسته درزه
	جهت یافتگی	شیب/ جهت شیب	اول	دوم
	سوم	دسته درزه	دسته درزه	دسته درزه
بازشدگی (mm)	۰/۵>	۴۰	۴۷/۲۷۵	۴۸/۰۱۹
	۰/۵-۲/۵	۳۰		
	۲/۵-۱۰	۳۰		
	۱۰<	-		
پزشدگی	خرده‌سنگ	۱۰		
	کلسیت	۴۰		
	اکسید آهن	۵۰		
فاصله‌داری (cm)	<۲	۱۰		
	۲-۶	۲۰		
	۶-۲۰	۳۰		
	۲۰-۶۰	۳۰		
	۶۰-۲۰۰	۱۰		
تداوم (m)	<۱	۱۰		
	۱-۳	۲۰		
	۳-۱۰	۴۰		
	>۱۰	۳۰		
زبری سطح	صفحه‌ای زبر	۳۰		
	مواج زبر	۳۰		
	پله‌ای زبر	۴۰		

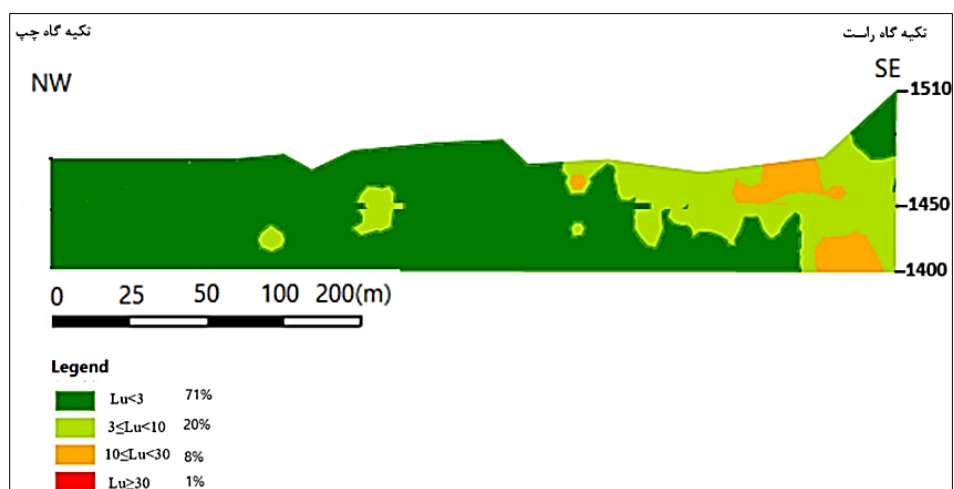
بررسی نفوذپذیری توده سنگ پی سد

نفوذپذیری این تکیه‌گاه نشان می‌دهد که نهشته‌های آبرفتی تشکیل‌دهنده این تکیه‌گاه، نفوذناپذیر تا نفوذپذیری کمتر از ۵-۱۰ سانتیمتر بر ثانیه دارند. علت این موضوع مربوط به فراوانی مواد ریزدانه در این آبرفت‌ها و وجود عدسی‌های رسی در برخی نقاط می‌باشد. شکل ۵ پهنه‌بندی نفوذپذیری ساختمانی سد پیغام‌چای را با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۷۱ درصد مقاطع آزمایش نفوذپذیری کمتر از ۳ لوژان دارند. حدود ۲۰ درصد مقاطع آزمایش دارای نفوذپذیری بین ۳ تا ۱۰ لوژان و ۸ درصد مقاطع نفوذپذیری بین ۱۰ تا ۳۰ لوژان دارند، تنها ۱ درصد مقاطع دارای نفوذپذیری بیش‌تر از ۳۰ لوژان می‌باشد.

تکیه‌گاه راست سد پیغام‌چای، به‌طور عمده از جنس سنگ‌های بازالتی واحد Kb است. در این تکیه‌گاه تعداد دو گمانه در راستای محور سد حفاری‌شده و پس از انجام آزمایش نفوذپذیری به روش لوژان، تزریق شده است. نفوذپذیری در این تکیه‌گاه از رده کم ($Lu < 3$) تا متوسط ($10 \leq Lu < 30$) تغییر می‌کند و حدود ۶۳ درصد مقاطع آزمایش، نفوذپذیری کمتر از ۳ لوژان دارند. در بستر رودخانه تعداد ۲۸ گمانه حفاری و تزریق شده است. حدود ۷۸ درصد مقاطع آزمایش در بستر رودخانه دارای لوژان کمتر از ۳ لوژان هستند. در تکیه‌گاه چپ تعداد ۹ گمانه در رسوبات آبرفتی حفاری شده و آزمایش نفوذپذیری بیشتر به روش لفران صورت گرفته است. بررسی



شکل ۴- استریونت و رزداگرام دسته درزه‌های اصلی توده سنگ ساخگاه سد مورد مطالعه.



شکل ۵- پهنه‌بندی نفوذپذیری توده سنگ در راستای نیمرخ طولی ساخگاه سد مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار ArcGIS.

سنگ در دمای ۱۰ درجه پیشنهاد شده و برابر با 1.49×10^{-10} می‌باشد. L_e : طول مقطع آزمایش (متر)، r : شعاع گمانه (متر)، T : مدت زمان هر پله (ثانیه)، H : فشار مؤثر اعمال شده توسط ستون آب بر حسب متر (m)، Q : آب جذب شده توسط درز و شکاف توده سنگ (لیتر).

بر اساس SPI، توده سنگ با توجه به خصوصیات نفوذپذیری به چهار رده A، B، C و D طبقه‌بندی می‌شود که در جدول ۲ نشان داده شده است.

یکی از روش‌هایی که در دهه اخیر جهت بررسی و بیان نفوذپذیری توده سنگ بکار می‌رود شاخص نفوذپذیری ثانویه یا SPI می‌باشد که نفوذپذیری توده سنگ را بر حسب مقدار آب جذب شده (لیتر) از طریق واحد سطح گمانه (مترمربع) در واحد زمان (ثانیه) بیان می‌کند. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود (Foyo et al., 2005):

$$SPI = C \frac{\ln \left(\frac{2L}{r} + 1 \right)}{(2\pi Le)} + \left(\frac{Q}{HT} \right) \quad (1)$$

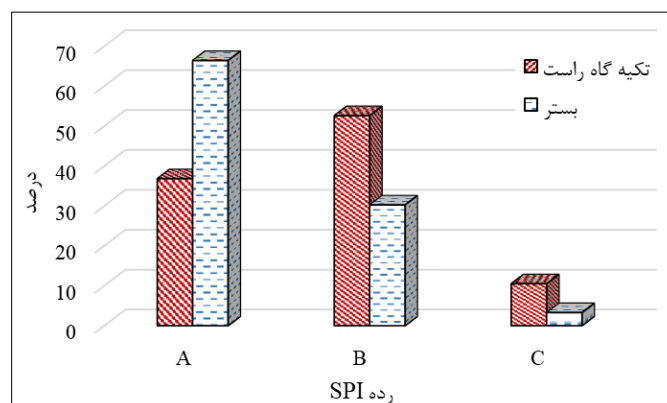
که در آن SPI شاخص نفوذپذیری ثانویه $\text{lit/s} \times \text{m}^2$ ، m^2 مساحت سطح گمانه است. C ثابتی است که برای ویسکوزیته

جدول ۲- طبقه‌بندی توده سنگ بر اساس SPI (Foyo et al., 2005).

SPI ($L/s \times m^2$) شاخص نفوذپذیری ثانویه	$SPI \leq 2.16 \times 10^{-14}$	$2.16 \times 10^{-14} < SPI \leq 1.72 \times 10^{-13}$	$1.72 \times 10^{-13} < SPI \leq 1.72 \times 10^{-12}$	$SPI \geq 1.72 \times 10^{-12}$
رده‌بندی نفوذپذیری توده سنگ	CLASS A	CLASS B	CLASS C	CLASS D
نیاز به تزریق	نیاز به تزریق ندارد	نیاز به تزریق به طور موضعی	نیازمند تزریق	نیازمند تزریق گسترده
حدود تقریبی بر حسب لوژان	<1	1-8	8-80	>80

زیر رسوبات آبرفتی در قسمت بستر نیز از مجموع ۱۵۲ مقطع آزمایش، تعداد ۱۰۱ مورد در رده A، تعداد ۴۶ مورد در رده B و تعداد ۵ مورد در رده C قرار می‌گیرد؛ بنابراین انتظار می‌رود در تکیه‌گاه راست، توده سنگ خورند سیمان کم تا متوسط داشته باشد (رده B). ولی در توده سنگ قسمت بستر، خورند سیمان توده سنگ در بیشتر مقاطع (مقاطع A) خیلی کم باشد و در سایر مقاطع کم تا متوسط (رده B) تا نسبتاً خوب (رده C) داشته باشد.

در شکل ۶ نمودار فراوانی تغییرات SPI در تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه ساختگاه سد مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در تکیه‌گاه راست رده B بیشترین فراوانی و رده C کمترین فراوانی را دارند و در توده سنگ بستر رودخانه نیز رده A بیشترین فراوانی و رده C کمترین فراوانی را دارد. در هیچ‌کدام از آزمایش‌ها مشاهده نشده است. در تکیه‌گاه راست از ۱۹ مقطع آزمایش نفوذپذیری تعداد ۱۰ مقطع در رده B، تعداد ۷ مقطع در رده A و تعداد ۲ مقطع در رده C قرار دارد. در توده سنگ واقع در

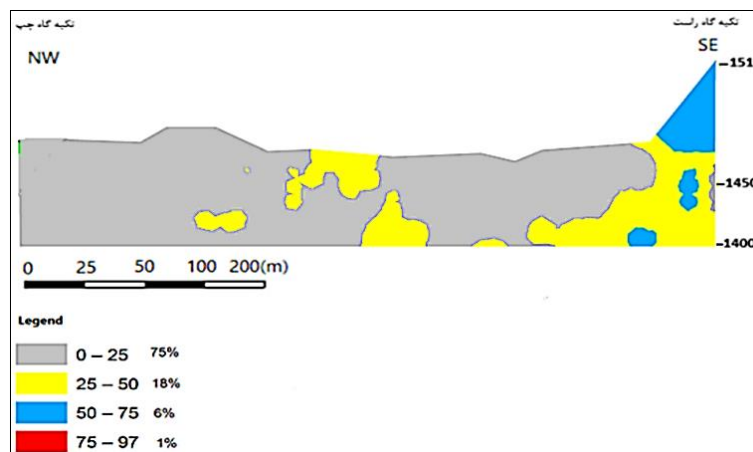


شکل ۶- نمودار تغییرات SPI در تکیه‌گاه راست و بستر رودخانه ساختگاه سد پیغام‌چای.

درجه درزه‌داری یا شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) ساختگاه

شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD) در ساختگاه سد پیغام‌چای را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد ۷۵ درصد RQD محدوده بین ۲۵-۵۰ درصد (بسیار ضعیف)، ۱۸ درصد بین ۵۰-۷۵ درصد (ضعیف)، ۶ درصد بین ۷۵-۱۰۰ درصد (عالی) قرار دارد.

یکی از عواملی که بر نفوذپذیری و تزریق‌پذیری توده‌سنگ تأثیر دارد کیفیت توده‌سنگ است. با کاهش کیفیت توده‌سنگ و افزایش خردشدگی، انتظار می‌رود تزریق‌پذیری افزایش یابد. از سوی دیگر با کاهش مقاومت توده‌سنگ احتمال رخ داد شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد. شکل ۷ پهنه‌بندی

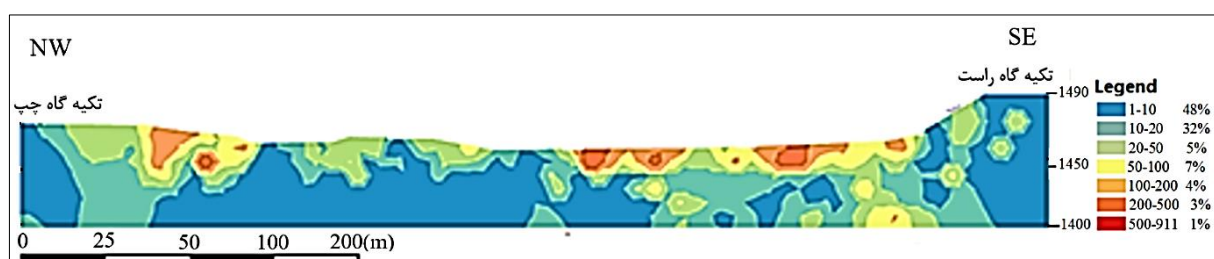


شکل ۷- پهنه‌بندی RQD در نیمرخ طولی ساختگاه سد پیغام‌چای با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS.

ارزیابی تزریق‌پذیری توده‌سنگ ساختگاه سد پیغام‌چای

استفاده از تزریق و یا دیوار آب‌بند ندارد. برای تزریق در بخش آبرفتی (حداصل بین آبرفت و توده‌سنگ) از تیوپ مانشت استفاده شده است. در این بررسی از گمانه‌های تزریق ردیف پایین‌دست با تعداد مقطع تزریق ۴۸۹ استفاده شده است. در شکل ۸ پهنه‌بندی میزان خورند سیمان در ساختگاه سد پیغام‌چای با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۹۲ درصد مقاطع کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم بر متر طول گمانه خورند سیمان دارند و ۷ درصد مقاطع دارای خورند سیمان بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر متر و تنها ۱ درصد مقاطع از خورند سیمان بیش از ۵۰۰ کیلوگرم بر متر برخوردار هستند.

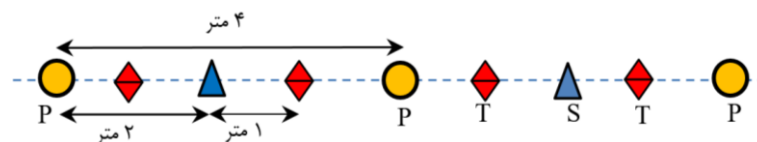
برای آب‌بندی ساختگاه سد پیغام‌چای کلیبر، از تلفیق دیوار آب‌بند (برای نهشته‌های آبرفتی) و پرده تزریق (برای توده‌سنگ) دو ردیفه استفاده شده است. با توجه به این‌که تکیه‌گاه راست سد از سنگ تشکیل شده لذا برای آب‌بندی این بخش از پرده تزریق با حداکثر عمق ۶۰ متر استفاده شده است. در قسمت بستر به دلیل این‌که توده‌سنگ به‌وسیله آبرفتی با ضخامت حدود ۱۴ متر پوشانده شده است از دیوار آب‌بند ۱۶ متری و پرده تزریق با حداکثر عمق ۴۵ متر برای توده‌سنگ زیرین استفاده شده است. جنس تشکیلات پی در تکیه‌گاه چپ از نوع نهشته‌های آبرفتی سیمانی شده با نفوذپذیری پایین و نزدیک به صفر تشکیل شده که نیازی به آب‌بندی بیشتر با



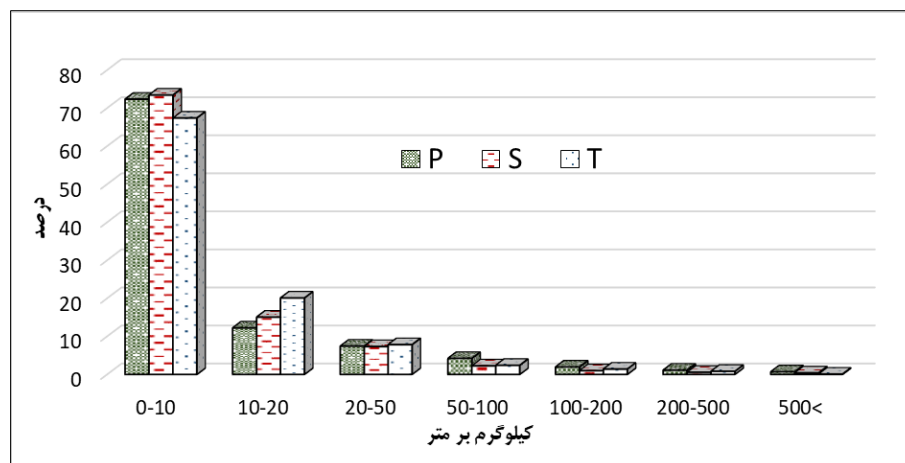
شکل ۸- پهنه‌بندی میزان خورند سیمان در امتداد نیمرخ طولی ساختگاه سد پیغام‌چای با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS.

علیرغم این که انتظار می‌رود با افزایش سری گمانه‌ها میزان خوردن سیمان کاهش پیدا کند اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در مقاطع مختلف گمانه‌های سری دوم و سوم نسبت به گمانه‌های سری اول خوردن سیمان بیشتری دارند. دلیل این امر ناشی از درزه‌داری بسیار زیاد با تداوم کم و همراه با پرشدگی می‌باشد که امکان ارتباط درزه‌ها و یا اتصال آنها را کاهش داده است.

فاصله گمانه‌های تزریق در سری‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. تغییرات میزان سیمان‌خوری مقاطع تزریق بر اساس سری تزریق در نمودار شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی میزان خوردن سیمان در سری‌های مختلف گمانه‌های تزریق (اول، دوم و سری سوم) به تفکیک نشان می‌دهد در هر سه سری در حدود ۷۰ درصد مقاطع کمتر از ۱۰ کیلوگرم بر متر خوردن سیمان دارند. موضوع قابل‌توجه این است که



شکل ۹- فاصله سری‌های مختلف گمانه‌های تزریق پرده آب‌بند پی سد پیغام‌چای.



شکل ۱۰- رده‌بندی میزان خوردن سیمان به تفکیک گمانه‌های سری مختلف.

تزریق‌پذیری این سنگ‌ها پایین است. در این صورت لازم است از سیمان‌های دانه‌ریزتر (با بلین بالا) برای تزریق استفاده نمود. (ب) مقاطع با نفوذپذیری و خوردن سیمان پایین. این حالت بیانگر وجود درزه‌های بسیار ریز و یا درزه‌های پر شده و یا سنگ‌های با درجه درزه‌داری پایین است. تزریق در این توده سنگ‌ها وقتی پیشنهاد می‌شود که ارزش اقتصادی آب نشتی بیش از هزینه تزریق باشد. (ج) مقاطع با نفوذپذیری و خوردن سیمان بالا. این حالت نشانگر وجود توده‌سنگ با درزه‌های فراوان، بدون پرشدگی و یا با بازشدگی خوب می‌باشند که تزریق‌پذیری خوبی داشته و برای تزریق مناسب است.

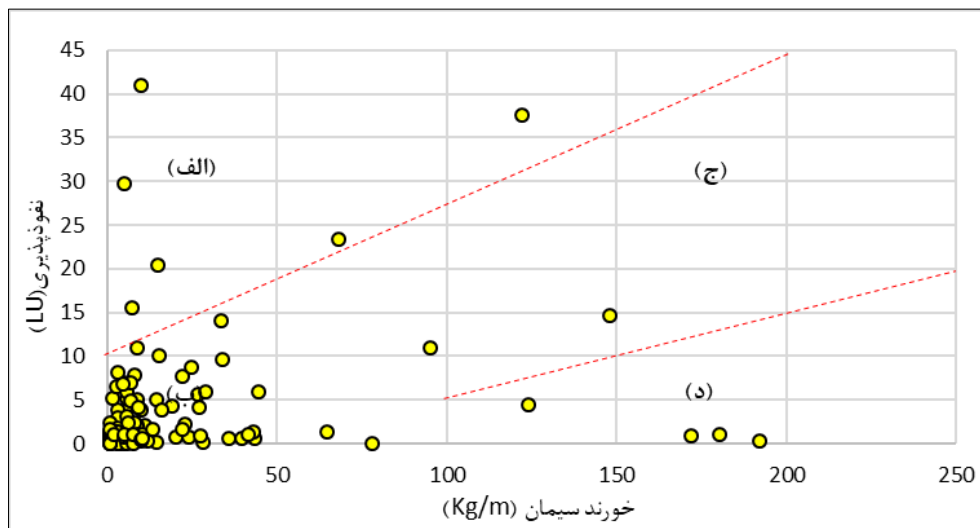
نتایج و بحث

ارتباط بین نفوذپذیری (لوژان) و خوردن سیمان در ساختگاه سد

یکی از روش‌های ارزیابی تزریق‌پذیری توده‌سنگ، مقایسه میزان خوردن سیمان با نفوذپذیری آن است. به‌طورکلی آن که در نگاه اول می‌توان انتظار داشت این است که این دو متغیر باهم همبستگی خوبی داشته باشند ولی در بسیاری از موارد چنین رابطه‌ای مشاهده نمی‌گردد. مقایسه این دو متغیر در مطالعه موردی به‌صورت نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان پارامترهای نفوذپذیری و خوردن سیمان را در چهار حالت رده‌بندی کرد (Houlsby, 1990):
(الف) مقاطع با نفوذپذیری بالا و خوردن سیمان کم. این حالت بیشتر در توده‌سنگ‌های حاوی ترک‌های ریز مشاهده می‌گردد.

بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل ۱۰، قریب به ۹۰ درصد مقاطع تزریق در مطالعه موردی در رده ب (نفوذپذیری پایین، خوردن سیمان کم) قرار می گیرند که تزریق پذیری پایین ساختگاه را نشان می دهد.

(د) مقاطع با نفوذپذیری کم و خوردن سیمان زیاد. علت اصلی این پدیده را می توان به وقوع شکست هیدرولیکی، باز شدن درزه های بسته و یا فرسایش و شسته شدن مواد پرکننده درزه ها نسبت داد. در عملیات تزریق با تعیین فشار مناسب تزریق بر اساس کیفیت توده سنگ سعی می شود تا حد ممکن از وقوع این حالت پیشگیری به عمل آید.



شکل ۱۱- نمودار تغییرات بین میزان خوردن سیمان و نفوذپذیری در مقاطع تزریق.

(ج) دارای شاخص کیفی سنگ بالا و میزان خوردن سیمان بالا: که نشان دهنده درزه داری پایین ولی بازشدگی و یا قابلیت اتساع بالا است.
(د) دارای شاخص کیفی سنگ بالا و خوردن سیمان پایین: که در توده سنگ های با درزه و شکاف کمتر و پر شده و یا بازشدگی بسیار کم مشاهده می گردد.

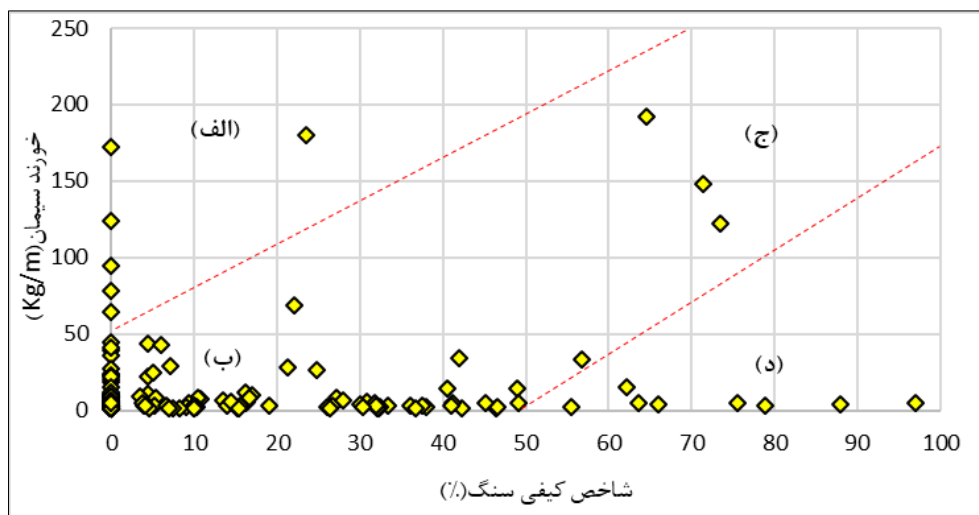
بر اساس شکل ۱۱، در اکثر مقاطع، خوردن سیمان در محدوده (ب) و تعدادی در محدوده (د) قرار می گیرد که نشان دهنده خوردن سیمان پایین در شاخص های کیفی مختلف است و حاکی از وجود توده سنگ با درجه درزه داری کم تا زیاد با درزه های پر شده و یا بازشدگی و تداوم بسیار کم است.

ارتباط بین شاخص کیفی سنگ و خوردن سیمان

بدون شک یکی از پارامترهای مؤثر بر میزان تزریق پذیری توده سنگ، درزه داری و کیفیت توده سنگ است. شاخص کیفی توده سنگ تا حدودی میزان درزه داری توده سنگ در عمق گمانه نشان می دهد. تغییرات بین خوردن سیمان و شاخص کیفی سنگ ساختگاه سد مورد مطالعه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است را می توان به صورت زیر رده بندی کرد:

(الف) دارای شاخص کیفی سنگ پایین و خوردن سیمان بالا: که در این حالت میزان درزه و شکاف و بازشدگی در توده سنگ زیاد بوده است.

(ب) دارای شاخص کیفی سنگ پایین و خوردن سیمان پایین: که نشان دهنده پرشدگی و یا بازشدگی بسیار کم درزه ها می باشد.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات بین RQD و خورند سیمان در ساختگاه سد.

ارتباط بین شاخص نفوذپذیری ثانویه و خورند سیمان

به طور تجربی و با توجه به ویژگی‌های درزه‌داری و شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) انتظار می‌رود که مقاطع رده A، سیمان‌خوری در حد ۰ تا ۵۰ کیلوگرم بر متر، رده B سیمان‌خوری در حد ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر، رده C سیمان‌خوری در حد ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلوگرم بر متر و رده D سیمان‌خوری بیش از ۵۰۰ کیلوگرم بر متر داشته باشند. بررسی مقاطع تزریق در ساختگاه سد مورد مطالعه نشان می‌دهد در کل بر اساس رده‌بندی SPI از ۱۵۳ مقطع آزمایش، ۶۶ درصد مقاطع که از نوع A می‌باشند سیمان‌خوری در حد یک تا ۱۹۲ کیلوگرم بر متر، ۲۹/۴ درصد مقاطع که از نوع B هستند دارای سیمان‌خوری یک تا ۱۸۰ کیلوگرم بر متر، ۴/۶ درصد مقاطع که از نوع C هستند میزان سیمان‌خوری در حد ۵ تا ۱۴۸ کیلوگرم بر متر داشته‌اند. از بین مقاطع نوع A، ۹۷ درصد مقاطع سیمان‌خوری بین صفر تا ۵۰ کیلوگرم بر متر نشان دادند. ۳ درصد بقیه مقاطع، سیمان‌خوری بین ۵۰-۲۰۰ کیلوگرم بر متر دارند. میانگین سیمان‌خوری مقاطع نوع A در

حدود ۸/۵ کیلوگرم بر متر طول گمانه است. از بین مقاطع نوع B، ۹ درصد مقاطع سیمان‌خوری بین ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم بر متر داشته و ۹۱ درصد بقیه، کمتر از ۵۰ کیلوگرم بر متر سیمان‌خوری داشته‌اند. حداکثر سیمان‌خوری در این مقاطع ۱۸۰ و میانگین سیمان‌خوری حدود ۲۴ کیلوگرم بر متر به دست آمده است. در کل مقاطع نوع C، میانگین سیمان‌خوری در حد ۵۶/۳ کیلوگرم بر متر می‌باشد در این مقاطع، حداکثر سیمان‌خوری ۱۴۸ کیلوگرم بر متر و حداقل آن برابر ۵ کیلوگرم بر متر به دست آمده است. علیرغم این که بر اساس رده‌بندی SPI، رده‌های B و C می‌بایست تزریق پذیری متوسط تا خوب داشته باشند میزان سیمان‌خوری کمتری نشان داده‌اند که علت آن را می‌توان در تأثیر درزه‌ها جستجو کرد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملاً از روی SPI، نمی‌توان به طور قطعی به میزان سیمان‌خوری و تزریق‌پذیری در این نوع ساختگاه‌ها پی برد. شکل ۱۳ میانگین خورند سیمان در سه رده A، B و C را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳- میانگین خورند سیمان در رده‌های مختلف SPI.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست آمده، ساختگاه مورد مطالعه از تزریق پذیری پایین برخوردار می‌باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی و شرکت مهندسی مشاور نهادآب به خاطر ارائه نتایج آزمایش‌ها و داده‌های صحرائی و مساعدت در انجام مطالعات حاضر تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

آقاباتی، ع.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی، تهران.

سهرابی بیدار، ع.، مظفری، م.، ذوالفقاری، ع.، رستگاریا، ا.، ۱۳۹۹. بررسی تزریق پذیری و خورند سیمان در ساختگاه سد خراسان II، پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۶(۲): ۱-۱۲

شرکت مهندسی مشاور نهادآب، ۱۳۹۳. گزارش زمین‌شناسی مهندسی، طرح توسعه بهره‌برداری از رودخانه پیغام‌چای، طرح سد مخزنی پیغام‌چای کلیبر، مطالعات مرحله دوم. فرخزاد، ف.، شعبانی، م. ج.، شجاعی، ف.، ۱۳۹۸. تحلیل عددی تأثیر بلانکت رسی و دیوار آب‌بند بر کاهش نشت از پی سد خاکی، دو فصلنامه علمی کارافن، ۴۵: ۱۲۶-۱۰۷.

قنبری، ع.، زریابی، س.، ۱۳۹۳. روش ساده برای محاسبه مقدار نشت از پی سدهای خاکی با وجود بلانکت و دیوار آب‌بند، نشریه مهندسی عمران و محیط‌زیست، ۴۴(۲): ۷۵.

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که در توده سنگ ساختگاه سد پیغام‌چای سه دسته درزه اصلی وجود دارد. پهنه‌بندی نفوذپذیری توده سنگ در ساختگاه سد نشان داد که ۷۱ درصد مقاطع آزمایش نفوذپذیری کم‌تر از ۳ لوژان دارند و تنها ۱ درصد مقاطع آزمایش نفوذپذیری بیشتر از ۳۰ لوژان دارند. پهنه‌بندی شاخص کیفیت توده سنگ در ساختگاه سد با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نشان داد که ۷۵ درصد شاخص کیفی سنگ محدوده بین ۲۵-، ۰-۱۸ درصد محدوده بین ۵۰-۲۵، ۶ درصد محدوده بین ۷۵-۵۰ و یک درصد محدوده بین ۱۰۰-۷۵ می‌باشند. پهنه‌بندی میزان خورند سیمان در ساختگاه سد با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS نشان داد که در بیشتر مقاطع تزریق، میزان خورند سیمان در حد ۱۰-۱ کیلوگرم بر متر بوده و ۴۸ درصد مقاطع این میزان خورند سیمان را دارند و فقط در یک درصد مقاطع تزریق، میزان خورند سیمان بیش از ۵۰۰ کیلوگرم بر متر بوده است. بررسی تغییرات بین عدد لوژان و خورند سیمان نشان می‌دهد که در بیشتر مقاطع، نفوذپذیری و خورند سیمان در حد کم بوده و فقط در چند مورد، متوسط خورند سیمان بیش از ۱۰۰ کیلوگرم بر متر بوده که در نفوذپذیری‌های پایین رخ داده و بیشتر آن‌ها مربوط به رده B هستند. در شاخص‌های کیفی مختلف میزان خورند سیمان پایین بوده و حاکی از وجود توده-سنگ با درجه درزه‌داری کم تا زیاد با درزه‌های پر شده و یا بازشدگی و تداوم بسیار کم می‌باشد. بررسی میزان خورند سیمان توده سنگ ساختگاه مورد مطالعه در رده‌های مختلف شاخص نفوذپذیری ثانویه نشان می‌دهد که ارتباط مشخصی بین این رده‌ها و میزان تزریق پذیری وجود ندارد. بر اساس

- Transaction B: Geotechnical Engineering, 11(1): 71-77.
- Houlsby, A. C., 1999. Engineering of grouting curtains to standards. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(9): 953-970.
- Houlsby, AC., 1990. Construction and design of cement grouting. Wiley, New York, 442 p.
- Jafarzadeh, F., Mousavi, S.H., 2012. Effect of specimen's age on mechanical properties of plastic concrete walls in dam foundations, Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 17: 473-482.
- James Warner, P. E., 2004. Practical handbook of grouting. soil, rock, and structures, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 720 p.
- Li, X., Zhong, D., Ren, B., Fan, G., Cui, B., 2017. Prediction of curtain grouting efficiency based on ANFIS. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78: 281-309.
- Markou, L., 2019. Efficiency of soil groutability criteria for cement suspension grouting. Geotechnical Engineering Foundation of the Future, 1-9; DOI: 10.32075/17ECMGE-2019-0197.
- Nonveiller, E., 1989. Grouting theory and practice. Development of Geotechnical Engineering, Elsevier.
- Salimian, M., Baghbanan, H., Hashemolhosseini, A., Dehghanipoodeh, M., Norouzi, S., 2017. Effect of grouting on shear behavior of rock joint. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 98: 159-166.
- Sadeghiyeh S.A., Hashemi, M., Ajalloeian, R., 2013. Comparison of permeability and groutability of Ostur dam site rock mass for grout curtain design, Rock Mechanics Rock Engineering, 46:341-357.
- Ullah, A., Kassim, A., Alam, I., Muhammad, J., Izwan, S.A., 2019. Efficiency analysis of seepage of Baz Ali small dam, kurram agency using clay blanket and cut-off wall with sand filter. Bulletin of the Geological Society of Malaysia, 67: 125-130.
- Xu, J., Xiao, Ch., Nawu, H., Kang, X., 2020. Reuse of excavated clayey silt in cement – fly ash – Bentonite hybrid backfill grouting during shield Tunneling. Sustainability, 12 (3): 1-20.
- کماسی، م.، بیرانوند، ب.، ۱۳۹۹. بررسی دبی نشت و عملکرد پرده آببند سد خاکی ایوشان با استفاده از تحلیل عددی، نشریه مهندسی منابع آب، ۱۳(۴): ۱-۱۴.
- مظفری، م.، ۱۳۹۸. بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی، نشریه هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۴۵-۱۵۶.
- مقیمی، ه.، راوش، ف.، بخشایش، م. ک.، ۱۳۹۹. بررسی قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آببند سد سیمره در استان ایلام، نشریه هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۵-۱.
- نوری، م.، سلماسی، ف.، ۱۳۹۶. بررسی عددی تأثیر پتوی رسی در کاهش نشت از پی سدهای خاکی، نشریه هیدروژئولوژی، ۲(۱): ۵۸-۷۰.
- Akinrinmade, A.O., Ogunsanwo, O., Ige, O.O., 2013. Geophysical and Geotechnical Investigation of river Ero, Ajuba, Southwestern Nigeria for dam development. International Journal of Science and Technology, 2(1): 518-528.
- Azimian, A., Ajalloeian, R., 2014. Permeability and groutability appraisal of the Nargesi dam site in Iran based on the secondary permeability index, joint hydraulic aperture and Lugeon tests. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74: 845-859.
- Barzegari, G., 2017. Geotechnical evaluation of dam foundation with special reference to in situ permeability: A case study. Geotechnical and Geological Engineering, 35: 991-1011.
- Ewert, F.K., 1998. Rock grouting with emphasis on dam sites. Springer, Verlage, Berlin, 428 p.
- Fakhari, A., Ghanbari, A., 2013. A simple method for calculating the seepage from earth dams with clay core. Journal of GeoEngineering, 8(1): 27-32.
- Fan, G., Zhong, D., Yan, F., Yue, P., 2015. A hybrid fuzzy evaluation method for curtain grouting efficiency assessment based on an AHP method extended by D numbers, Expert Systems with Applications, 44: 289-303.
- Foyo A, Sa'nchez MA, Tomillo C., 2005 A proposal for a secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations, Engineering Geology, 77: 69-82
- Heidarzadeh, M., Mirghasemi, A.A., Eslamian, F., Sadr-Lahijan, S.M., 2013. Application of cement grouting for stabilization of course materials. International Journal of Civil Engineering,