

ارزیابی نفوذپذیری و تزریق پذیری نهشته‌های کواترنری و توده‌سنگ‌های رسوبی ساختگاه سد نرگسی

رسول اجل لوئیان^{۱*}، عبدالعظیم عظیمیان^۲، ناصر حافظی مقدس^۳، فریدون بهرامی سامانی^۴

پذیرش مقاله: ۹۲/۰۸/۰۴

دریافت مقاله: ۹۱/۰۸/۰۳

چکیده

یکی از مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت سدها مسئله نشت آب از محل پی و تکیه‌گاه‌ها است که علاوه بر هدر رفتن آب ذخیره شده در پشت سد، پایداری سازه سد را نیز به خطر می‌اندازد. بدین منظور مطالعات وسیعی جهت تعیین مقدار نفوذپذیری توده‌سنگ‌های ساختگاه سد و روش‌های آب‌بندی آن انجام شده است. در این ارتباط، مقاله حاضر به طور موردی به موضوع نشت در سد نرگسی پرداخته است. این سد بر روی نهشته‌های کواترنری و سازندهای رسوبی بختیاری، میشان و گچساران قرار دارد. بر مبنای آزمایش‌های فشار آب (لوفران و لوژون) موضوع نشت در این ساختگاه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص نفوذپذیری ثانویه در سال ۲۰۰۵ توسط فویو و همکاران به منظور بررسی تاثیر ویژگی‌های درزه‌داری سنگ در نفوذپذیری آنها معرفی گردید. اهمیت این روش امکان تشخیص بین تفاوت بین جک هیدرولیکی و شکست هیدرولیکی می‌باشد. بر اساس شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) و داده‌های حاصل از آزمایش لوژون و همچنین ویژگی‌های مغزه‌های حفاری، نفوذپذیری توده‌های سنگی بررسی گردید. همچنین با توجه به نقش خصوصیات زمین شناسی مهندسی، ناحیه‌بندی نفوذپذیری و کیفیت توده‌سنگ در محیط نرم‌افزار Rockwork 14 به منظور ارائه دید سه بعدی و قضاوت مهندسی ساده‌تر انجام و نتایج آن بصورت مقاطع مناسب ارائه شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که بجز برخی موارد، همبستگی خوبی میان مقادیر SPI و RQD وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان نشت آب از تکیه‌گاه چپ می‌باشد و سازند میشان از لحاظ نفوذپذیری وضعیت بهتری نسبت به سازندهای گچساران و بختیاری دارد.

کلید واژه‌ها: شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI)، آزمایش فشار آب، سد نرگسی، نفوذپذیری، نشت، نرم‌افزار Rockwork 14

۱. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اصفهان، ایران rasajl@sci.ui.ac.ir

۲. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه محیط زیست، بوشهر، ایران azim.azimian1366@gmail.com

۳. گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۴. بخش مهندسی ژئوتکنیک، شرکت مهندسی مشاور تماوان، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

نفوذپذیری ثانویه (SPI) و داده‌های حاصل از آزمایش لوژون و همچنین ویژگی‌های مغزه‌های حفاری، نفوذپذیری توده‌های سنگی بررسی گردید. در این تحقیق کیفیت توده‌سنگ ساختمانی سد نرگسی بر اساس شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) طبقه‌بندی شده است و با توجه به SPI و RQD مقاطع مورد آزمایش و با بررسی رابطه بین این دو نسبت به عمق، نفوذپذیری و قابلیت تزریق دوغاب سیمان در این مقاطع مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین به منظور ارائه دید سه بعدی و قضاوت مهندسی ساده‌تر از تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی در اعماق مختلف ساختمانی سد نرگسی از نرم‌افزار Rockwork 14 استفاده شده است که نتایج آن بصورت اشکال مناسب ارائه شده است. در پایان بر اساس لوژون بدست آمده از آزمایش‌های فشار آب، هدایت هیدرولیکی محاسبه و میزان نشت از ساختمانی برآورد گردیده است.

۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

پارامترهای زمین‌شناسی نقش بسیار مهمی در طراحی و نحوه اجرای سدها دارند. مثال‌های بسیاری را می‌توان مطرح نمود که عدم توجه دقیق به شرایط و وضعیت زمین‌شناسی ساختمانی برای ساختن آن مشکلات فراوانی به پروژه وارد نموده است. از جمله عوامل تأثیرگذار در این ارتباط خصوصیات هیدرولیکی و نفوذپذیری ساختمانی سد می‌باشد که کاملاً وابسته به سنگ‌شناسی و وضعیت ساختاری منطقه است. بدین لحاظ ذیلاً به اختصار به موضوع زمین‌شناسی و لیتولوژی لایه‌های مرتبط با ساختمانی پرداخته می‌شود. سد خاکی نرگسی بر روی رودخانه شیرین‌رود در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. با توجه به برداشت‌های سطحی زمین‌شناسی و داده‌های به دست آمده حاصل حفاری گمانه‌های اکتشافی، ساختمانی سد بر روی نهشته‌های کواترنری و سنگ‌های رسوبی متعلق به دوره نئوژن قرار دارد.

علاوه بر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شکل‌پذیری، نفوذپذیری توده‌سنگ از جمله مهمترین پارامترها در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی همچون سدها و تونل‌ها می‌باشد. نفوذپذیری و تزریق‌پذیری توده‌سنگ‌ها به وسیله محققین مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته است (Ewert, Kiraly, 2002; Karaguzel and Kilic 2000; Ewert, 1981; 1997a,b,c; Ajalloeian and Coli et al., 2008; Foyo et al. 2002, 2005; Gurocak; Uromeihy and Farrokhi 2011; Moein, 2009; Ajalloeian; Ajalloeian et al., 2011; and Alemdag 2011; Azimian and Ajalloeian 2013; et al., 2012). سد نرگسی یک سد خاکی با هسته رسی می‌باشد که در استان فارس در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی کازرون و ۶۰ کیلومتری جنوب غربی شیراز بر روی رودخانه شیرین‌رود قرار دارد (شکل ۱). سد در حال ساخت نرگسی دارای طول تاج ۶۰۰ متر و ارتفاع از پی ۷۷ متر با حجم مخزن ۱۱۳ میلیون متر مکعب که هدف آن مهار و ذخیره آب مصرفی و صنعتی، تولید انرژی و آبیاری زمین‌های کشاورزی می‌باشد. در ساختمانی و محدوده مخزن سد نرگسی تعداد ۴۴ گمانه اکتشافی به تراژ ۲۲۸۶.۴ متر به منظور شناخت خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و هیدروژئولوژی مصالح خاکی و سنگی حفاری گردیده که از این تعداد ۱۶ گمانه اکتشافی در محور سد حفاری گردیده است (شکل ۲) (مهندسین مشاور تماون ۱۳۸۸). در نیمرخ ارائه شده شکل ۲، قسمت هاشورزده نشان دهنده شیب لایه‌بندی در سازندها و انحناهای آن‌ها نشان دهنده تغییر جهت محور سد می‌باشد. در این ۱۶ گمانه اکتشافی حفاری شده در ساختمانی سد تعداد ۲۰۲ آزمون لوژون جهت ارزیابی میزان نفوذپذیری و نشت و تعیین رفتار هیدرولیکی در مقاطع مختلف انجام شده است. شاخص نفوذپذیری ثانویه در سال ۲۰۰۵ توسط فویو و همکاران به منظور بررسی تاثیر ویژگی‌های درزه‌داری سنگ در نفوذپذیری آنها معرفی گردید. شاخص نفوذپذیری ثانویه از آزمون فشار آب (WPT) با توجه معادله ارائه شده توسط فویو و همکاران (۲۰۰۵) محاسبه می‌گردد. بر اساس شاخص



راهنما: کیلومتر ۱۰ ۲۰ ۳۰ ۴۰ ۵۰ مقیاس



شکل ۱. راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

۱-۲. نهشته‌های کواترنری

نهشته‌های کواترنری در محدوده ساختگاه شامل آبرفت‌های بستر رودخانه، واریزه‌های دامنه‌ای و تراس‌های آبرفتی می‌باشد. آبرفت‌ها (Qal) شامل شن ماسه‌ای به رنگ خاکستری روشن با مقداری قلوه سنگ و تراس‌های از سیلت و رس با عدسی‌هایی از خاک‌های ریزدانه می‌باشد. ضخامت آنها براساس داده‌های به دست آمده از عملیات حفاری اکتشافی حدود ۱۳/۵ تا ۲۷/۸ متر گزارش شده است. مواد واریزه‌ای (Qs-Qd) شامل سیلت ماسه‌ای خاکستری رنگ با مقداری قلوه سنگ و تخته سنگ می‌باشد که دانه‌های تشکیل دهنده آنها سنگ مارن و آهک می‌باشد. ضخامت این مصالح ۰ تا ۶ متر در تکیه‌گاه راست و ۰ تا ۲/۵ متر در تکیه‌گاه چپ بر اساس داده‌های حاصل از عملیات حفاری می‌باشد. براساس رده‌بندی یونیفاید (Unified) نهشته‌های کواترنری عمدتاً در رده GP- GM, GP-GC, GP-GW, SM-SW, SM SC, ML قرار می‌گیرند و تعداد ۹۲ آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) در مصالح

آبرفتی به منظور بررسی میزان مقاومت این مصالح انجام شد که نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که این مصالح متراکم تا بسیار متراکم ولی عمدتاً بسیار متراکم می‌باشند و نیازی به برداشتن آنها نمی‌باشد. با توجه به انرژی جریانی که این رسوبات را برجای گذاشته است، دانه‌بندی و اندازه ذرات آنها متفاوت و اغلب دانه درشت می‌باشد و حاوی ذرات دانه‌ریز بسیار کمی است، بنابراین دارای چسبندگی کم بوده و نفوذپذیری بالایی دارند.

۲-۲. سازندهای رسوبی

سازند بختیاری به سن پلیوسن شامل کنگلومرای توده‌ای با مقاومت متوسط و سیمان آهکی ضعیف تا متوسط می‌باشد. دانه‌های کنگلومرا شامل سنگ آهک، سنگ مارن، ماسه سنگ و چرت می‌باشد. شیب و جهت شیب این لایه به ترتیب ۳۱۵- ۳۱۰ / ۵-۷ می‌باشد. این سازند بصورت ناپیوستگی زاویه‌دار بر روی سازند میشان قرار دارد. سازند میشان به سن میوسن

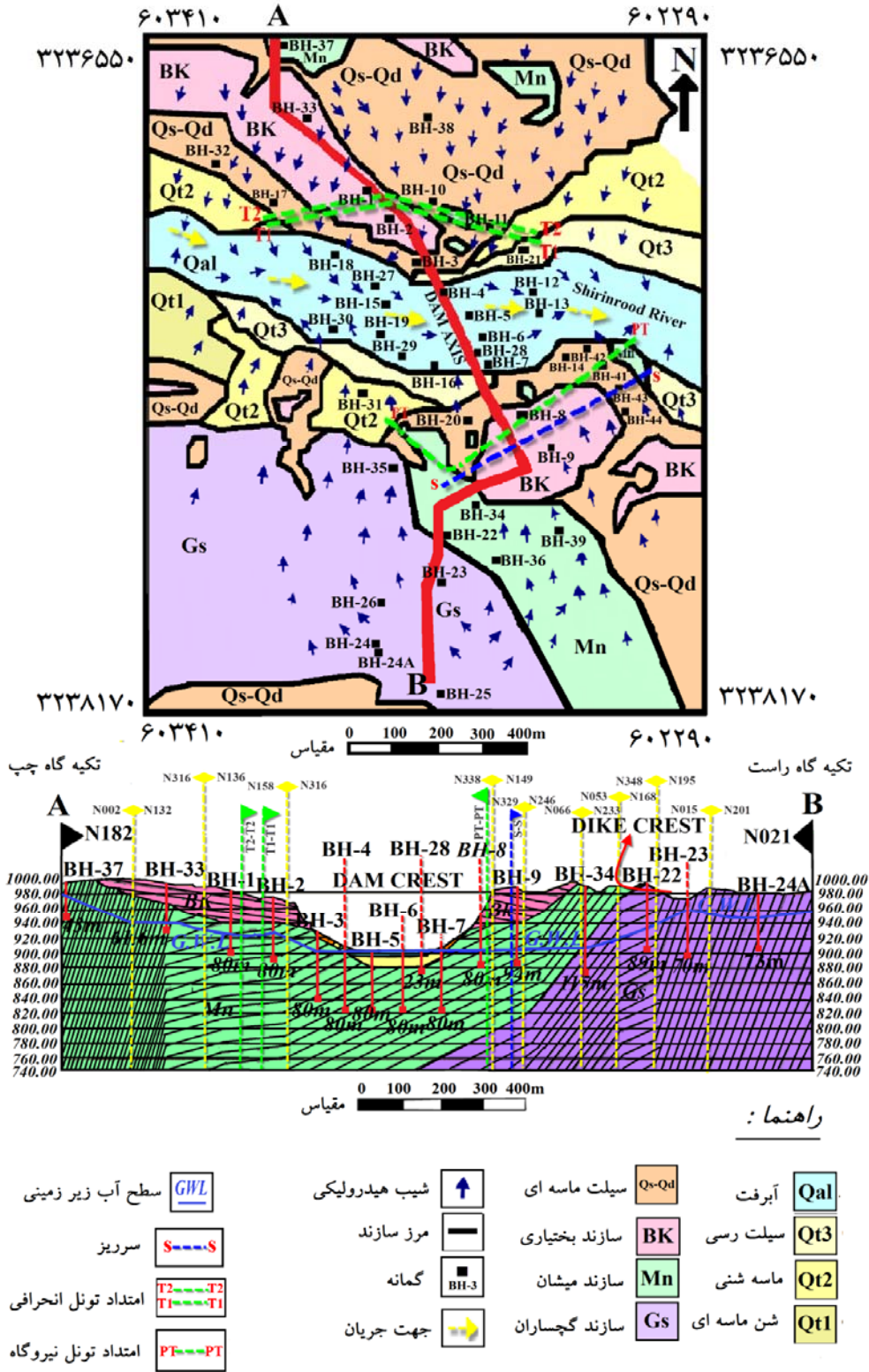
زون تقسیم‌بندی می‌شود که شامل زون A با لوژون بیشتر از ۶۰، زون B با لوژون بین ۳۰-۶۰، زون C با لوژون بین ۱۰-۳۰، زون D با لوژون بین ۳-۱۰ و در نهایت زون E با لوژون کمتر از ۳ می‌باشد. معمولاً در لوژون کمتر از ۵ نیاز به عملیات تزریق نمی‌باشد (Kutzner, 1996).

در طی عملیات حفاری، آزمایشات فشار آب (لوفران و لوژون) در ساختگاه سد نرگسی انجام گردید. هدف اصلی این آزمایش‌های تعیین نفوذپذیری هر بخش از توده‌سنگ و نهشته‌های آبرفتی در پی و تکیه‌گاه‌ها می‌باشد که امکان تعیین زون‌های مختلف به منظور بهسازی را فراهم می‌نماید. تعداد ۵۰۸ آزمایش فشار آب در طی مطالعات انجام شده است (تعداد ۱۵۹ آزمایش نفوذپذیری با بار آبی ثابت در نهشته‌های کواترنری و ۳۴۹ آزمایش لوژون در توده‌سنگ). آزمایش لوفران با بار آبی ثابت در گمانه‌ها برای تعیین نفوذپذیری نهشته‌های کواترنری و در بعضی از مقاطع از سازند بختیاری به دلیل داشتن سیمان ضعیف انجام گردید. مطابق نتایج این آزمایش‌های، نفوذپذیری نهشته‌های کواترنری متوسط تا زیاد می‌باشد ($K=5 \times 10^{-4} \text{cm/s}$) که در شکل ۳ توزیع آنها نمایش داده شده است. با توجه به نفوذپذیری متوسط تا زیاد نهشته‌های کواترنری، ضخامت زیاد و متراکم بودن آنها طبق نتایج به دست آمده از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، نیازی به برداشتن آبرفت با توجه هزینه زیاد نمی‌باشد و برای جلوگیری از افزایش فشار بالارونده، ناپایداری شیب پایین‌دست، رگاب از میان پی و فرسایش مصالح به وسیله مهاجرات داخل درزه‌های باز در پی و تکیه‌گاه‌ها، یک دیوار آب‌بند به عمق ۲۷ متر پیشنهاد می‌گردد. همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های نفوذپذیری با بار آبی ثابت در بعضی از مقاطع از توده‌سنگ کنگلومرای سازند بختیاری، نفوذپذیری این سازند متوسط تا زیاد می‌باشد. ($K=2.41 \times 10^{-4} \text{cm/s}$).

بالایی شامل سنگ مارن به رنگ خاکستری متمایل به سبز تا خاکستری روشن با بین لایه‌ای از سنگ آهک فسیل‌دار می‌باشد. شیب و جهت شیب این لایه‌ها در تکیه‌گاه راست ۳۵-۲۳۵-۴۱/۲۰۷-۳۴ و در تکیه‌گاه چپ ۲۱۵-۲۱۰ / ۴۵-۳۵ می‌باشد. سازند گچساران به سن میوسن پایینی شامل لایه‌های چند رنگی از سنگ مارن، انیدریت، ژپس مارن آهکی، مارن فسیل‌دار، سنگ آهک مارنی، ماسه‌سنگ و ماسه‌سنگ آهکی با مقاومت متوسط تا ضعیف می‌باشد. شیب و جهت شیب این لایه‌ها در تکیه‌گاه راست ۲۲۸-۲۱۵ / ۷۶-۳۲ می‌باشد.

۳. نفوذپذیری

آزمایش فشار آب برای تعیین نقش نفوذپذیری سنگ، قسمتی از مطالعات اساسی در زمین‌شناسی مهندسی سازه‌های آبی می‌باشد. هر چند آزمایش فشار آب بطور مستقیم اطلاعاتی را در مورد ویژگی‌های درزه و ضریب نفوذپذیری توده‌سنگ‌ها بیان نمی‌کند، ولی اطلاعاتی را در مورد پتانسیل جذب آب توسط توده‌سنگ‌ها بیان می‌کند و بیشتر به خصوصیات هندسی و درجه هوازگی مسیرهای آب بستگی دارد. نتایج آزمایشات فشار آب می‌تواند برای تشخیص مناطقی از پی سد که نشان‌دهنده کیفیت توده‌سنگ متفاوت می‌باشد، استفاده شود. کیفیت توده‌سنگ مقطع مورد آزمایش از آزمایش فشار آب بدست می‌آید که با مقایسه با درجه درزه‌داری به دست آمده از مغزه‌های حفاری به عنوان منبعی مفید برای طراحی بهسازی زمین می‌باشد. میزان نشست آب را به سادگی نمی‌توان از مقادیر آزمایش‌های فشار آب پیش‌بینی نمود، زیرا نفوذپذیری متوسط سنگ نه تنها با مقادیر جذب آب در آزمایش‌های فشار آب هماهنگ نیست بلکه ضریب نفوذپذیری به طور اساسی تحت کنترل صفحات جدایی و نوع روندهای هیدرولیکی است که در امتداد درزه‌های مختلف ظاهر می‌گردد. بر اساس طبقه‌بندی هولسبی (Houlsby, 1990) توده‌سنگ براساس عدد لوژون به ۵



شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی مهندسی و مقطع عرضی محور سد

SPI شاخص نفوذپذیری ثانویه $\text{lit/s} \times \text{m}^2$ که m^2 مساحت سطح گمانه است. C ثابتی است که توسط اسنو (۱۹۶۸) برای ویسکوزیته سنگ در دمای 10° پیشنهاد شده و برابر با $10^{-10} \times 1/49$ می‌باشد. L_e : طول مقطع آزمایشی (متر)، R: شعاع گمانه (متر)، T: دوره هر سطح فشار (ثانیه)، H: فشار کلی اعمال شده توسط ستون آب بر حسب متر (m)، Q: آب جذب شده توسط درز و شکاف توده سنگ بر حسب لیتر.

شاخص پیشنهادی دارای ویژگی‌های زیر است: الف) شاخص براساس پارامترهای کلاسیک مانند فشار و خوردند آب بنا نهاده شده است. بنابراین برخلاف لوژون این شاخص لازم نیست به ضریب نفوذپذیری تبدیل گردد. ب) واحد شاخص (l/s.m^2) بیان می‌کند که چه مقدار آب در فشار آب آزمایش، در واحد زمان بر حسب l/s از طریق سطح فضای گمانه تزریق بر حسب m^2 جذب شده است. در نتیجه شاخص منحصراً مخصوص توده‌های درز و شکاف‌دار و برای کیفیت توده سنگ قطعه مورد آزمایش تعریف می‌شود.

این شاخص دارای دو جنبه مهم زیر است: ۱- مبنایی جهت طبقه‌بندی توده سنگ است.

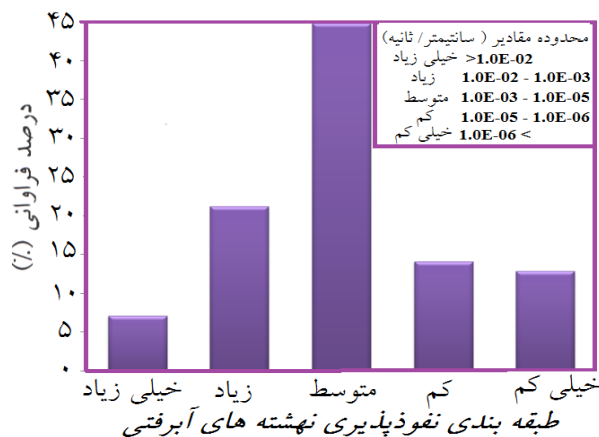
۲- بیان‌کننده نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی است.

براساس SPI سنگ به چهار رده A, B, C و D طبقه‌بندی می‌شود که در جدول ۱ نشان داده شده است. طبقه‌بندی مطرح شده نشان‌دهنده خصوصیات استحکامی سنگ سالم نیست، بلکه کیفیت توده سنگ را بر اساس خصوصیات نفوذپذیری رده‌بندی می‌کند (Foyo et al., 2005).

۵. بررسی و تحلیل نفوذپذیری ساختگاه بر اساس لوژون

در واحدهای مختلف سنگی

کیفیت توده سنگ در سازند بختیاری ضعیف متمایل به متوسط (به دلیل سیمان ضعیف) می‌باشد که دلیل اصلی نفوذپذیری بالایی این واحد سنگی می‌باشد. در کنگلومرای بختیاری تکیه‌گاه راست بیشترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده، آشفته می‌باشد و در تکیه‌گاه چپ بیشترین رفتارهای هیدرولیکی مشاهده شده، جک هیدرولیکی (اتساع) می‌باشد. به طور کلی کمترین و بیشترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده در این



شکل ۳. توزیع و درصد فراوانی آزمایش نفوذپذیری با بار آبی

ثابت در نهشته‌های کوتاه‌تری

۴. شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI)

یکی از روش‌های دیگری که در دهه اخیر جهت بررسی و بیان آزمایش فشار آب مطرح می‌باشد روش شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) می‌باشد. شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) توده سنگ شکاف‌دار بیان می‌کند که در آزمایش فشار آب ضریب نفوذپذیری در توده تقریباً متخلخل متغیر است و ویژگی‌های مسیرهای آب توده‌های سنگی شکاف‌دار و توده‌های متخلخل به شدت متفاوت هستند (Foyo et al., 2005). اهمیت روش شاخص نفوذپذیری ثانویه امکان تشخیص بین تفاوت بین جک هیدرولیکی و شکست هیدرولیکی می‌باشد. جک هیدرولیکی در حالت الاستیک و شکست هیدرولیکی در حالت پلاستیک رخ می‌دهد (Ajalloeian and Moein 2009). در شکست هیدرولیکی شکاف‌های موجود باز شده یا شکاف‌های جدیدی ایجاد می‌گردد و نفوذپذیری ناگهان افزایش می‌یابد ولی در رفتار جک هیدرولیکی شکاف‌های باز شده بعد از پایان آزمایش به حالت اولیه خود برمی‌گردد. به لحاظ اینکه لوژون بصورت کیفی برخورد می‌کند باید نفوذپذیری به صورت کمی بررسی شود، بنابراین به طور جزئی‌تر از روش SPI استفاده شده است. بنابراین شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) بصورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

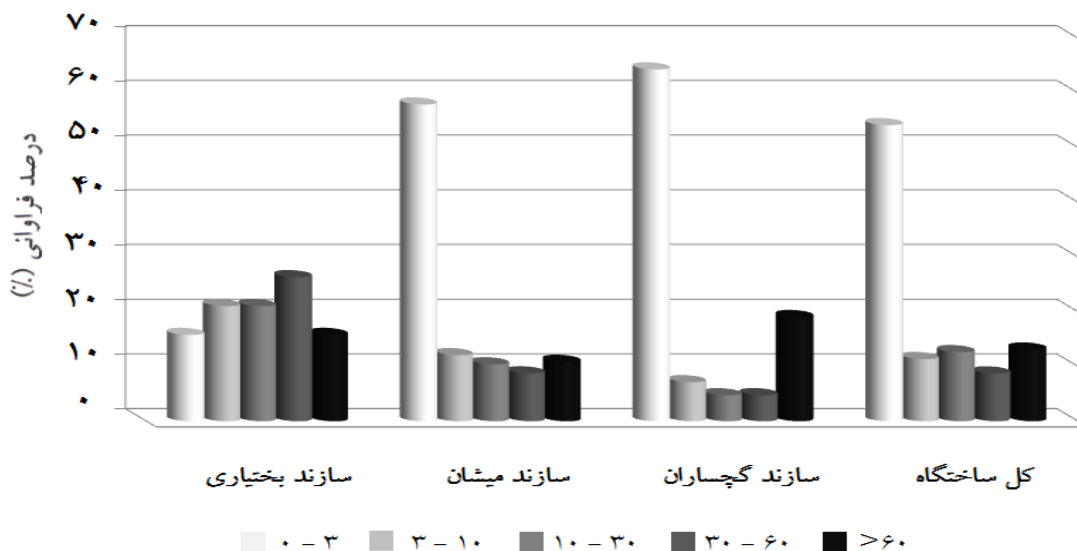
$$SPI = c \frac{\ln\left(\frac{2le}{r} + 1\right)}{(2\pi le)} \left(\frac{Q}{HT}\right) \quad (1)$$

موارد را به سلامت سنگ و یا بسته بودن درز و شکاف‌ها و پر بودن آنها توسط رس و کلسیت در سازند می‌شان نسبت داد. توده‌سنگ‌های سازند گچساران که در تکیه‌گاه راست رخنمون دارد، به دلیل ماهیت لیتولوژی آن دارای درز و شکاف بسیار کم است و مقدار RQD آن از متوسط تا عالی می‌باشد. علیرغم شرایط فوق، همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود این سازند از نظر نفوذپذیری وضعیت مساعدی را نشان می‌دهد. در این سازند نیز مانند سازند می‌شان با افزایش عمق، میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد و به طور نسبی شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD) با میزان نفوذپذیری دارای ارتباط مستقیم می‌باشد. بیشترین و کمترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده در این سازند، خطی و پرشدگی می‌باشد (اشکال ۶ و ۷). با توجه به مطالب بیان شده در این مقاله، بیشترین نفوذپذیری مربوط به سازند بختیاری است بنابراین سازند بختیاری، مشکل آفرین می‌باشد. در عمق‌های زیرین سازند می‌شان قرار دارد و به لحاظ لیتولوژی این سازند دارای نفوذپذیری کم و در بعضی مقاطع عدم آبگذری را نشان می‌دهد، بنابراین از نقطه نظر زمین‌شناسی از بین این سازندها سازند می‌شان می‌تواند به عنوان سنگ بستر مد نظر قرار گیرد. به دلیل انحلال‌پذیری ژئوپس و انیدریت، در زمان آبگیری سد لازم است تمهیدات لازم در جهت مقابله با این مشکل اندیشیده شود.

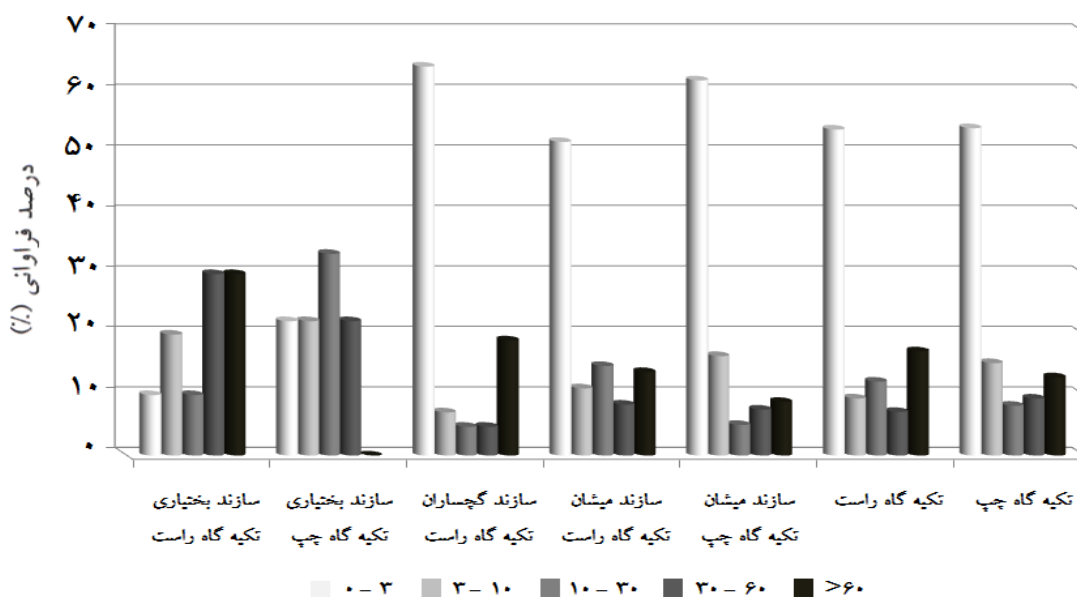
سازند، به ترتیب پرشدگی و آشفته می‌باشد. در سازند بختیاری تکیه‌گاه چپ نسبت به تکیه‌گاه راست مقدار لوژون کمتری داشته، که دلیل اصلی آن کیفیت ضعیف توده‌سنگ می‌باشد. در سازند بختیاری به دلیل وجود تعداد درزه و شکاف کم، دلیل اصلی نفوذپذیری زیاد، هوازگی توده‌سنگ و سیمان ضعیف می‌باشد. توده‌سنگ‌های سازند می‌شان به دلیل ماهیت لیتولوژی آن دارای درز و شکاف بسیار است و مقدار RQD آن از خیلی ضعیف تا عالی می‌باشد. علیرغم شرایط فوق، همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌شود این سازند از نظر نفوذپذیری وضعیت مساعدی را نشان می‌دهد. در سازند می‌شان تکیه‌گاه چپ به دلیل کیفیت مناسب‌تر توده‌سنگ، نفوذپذیری کمتری دارد. در سازند می‌شان (تکیه‌گاه چپ و راست) حدود ۴۲ درصد از مقاطع غیر قابل نفوذ می‌باشد و بیشترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده در سازند می‌شان جک هیدرولیکی و کمترین رفتار هیدرولیکی پرشدگی و آبستگی می‌باشد. در این سازند کیفیت توده‌سنگ (RQD) با میزان لوژون در اکثر موارد دارای ارتباط مستقیم می‌باشد. به طور کلی با افزایش عمق در این سازند، میزان نفوذپذیری کاهش می‌یابد. نفوذپذیری تکیه‌گاه چپ بر اساس لوژون، کیفیت بهتری نسبت به تکیه‌گاه راست دارد و در مجموع فراوانی محدوده‌ی نفوذپذیری با لوژون ۳-۰ با ۶۲ درصد، نسبت به سایر محدوده‌ها بیشتر می‌باشد (شکل ۵) که می‌توان این

جدول ۱. طبقه‌بندی توده‌سنگ براساس شاخص نفوذپذیری ثانویه

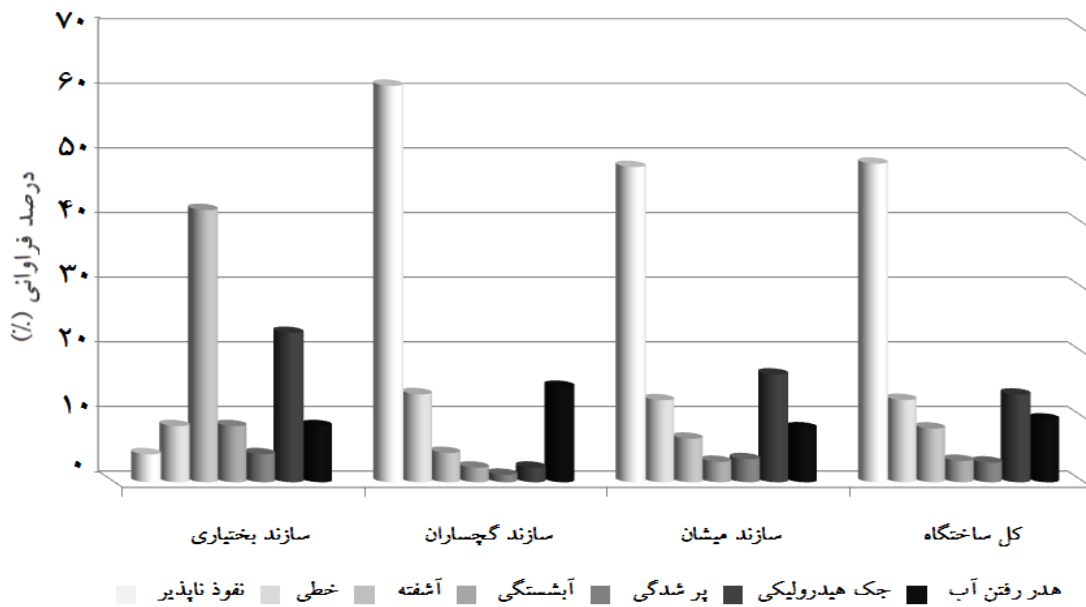
شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) ($l/s \cdot m^2$)				
$SPI \geq 1.72 \times 10^{-12}$	$1.72 \times 10^{-13} < SPI \leq 1.72 \times 10^{-12}$	$2.16 \times 10^{-14} < SPI \leq 1.72 \times 10^{-13}$	$SPI \leq 2.6 \times 10^{-14}$	
D	C	B	A	رده توده‌سنگ
بسیار ضعیف	ضعیف	نسبتاً خوب	عالی	طبقه‌بندی سنگ
به صورت گسترده	دارد	به صورت محلی	ندارد	نیاز به بهسازی



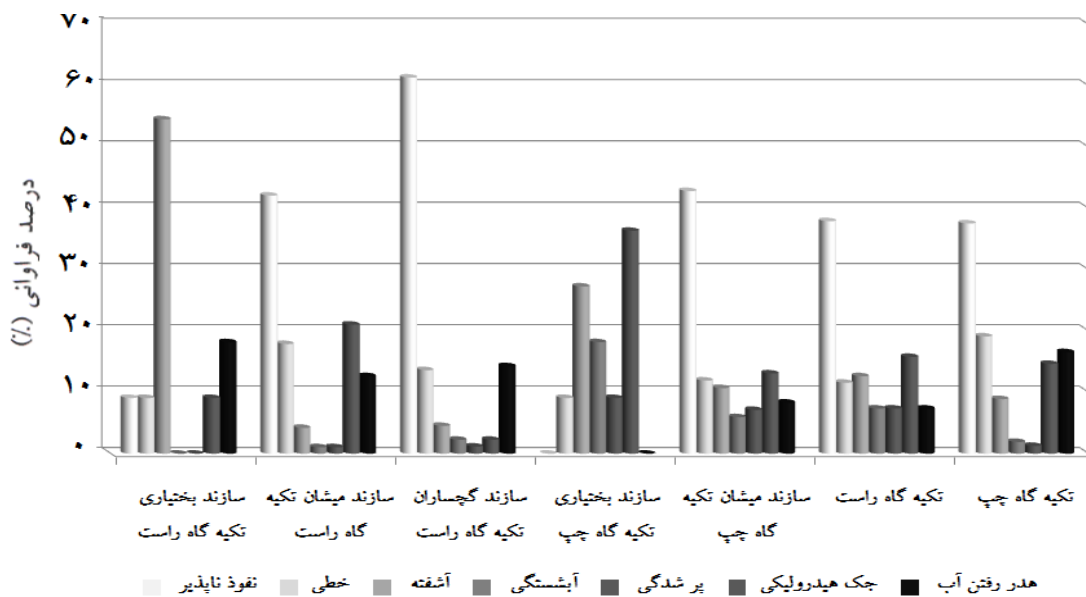
شکل ۴. توزیع اعداد لوژون در سازندهای سنگی ساختگاه (پی، تکیه گاه چپ و راست) سد نرگسی



شکل ۵. محدوده های نفوذپذیری تکیه گاه های ساختگاه سد



شکل ۶. درصد فراوانی هر یک از رفتارهای هیدرولیکی در سازندهای مختلف موجود در پی، تکیه‌گاه چپ و راست



شکل ۷. درصد فراوانی رفتارهای هیدرولیکی در تکیه‌گاه‌ها

در مجموع ۵ گمانه انجام شده است. به دلیل لیتولوژی کنگلومرای این سازند و سیمان ضعیف در بعضی از مقاطع از این سازند، آزمایش لوفران برای تعیین میزان نفوذپذیری انجام شده است. سازند بختیاری تکیه‌گاه چپ دارای RQD ضعیف (به دلیل دارا بودن سیمان ضعیف و خیلی ضعیف) است به

۶. ارزیابی نفوذپذیری و قابلیت تزریق‌پذیری در واحدهای

مختلف سنگی براساس SPI

۱-۶. سازند بختیاری

توده‌های سنگی این سازند فقط در تراز بالایی تکیه‌گاه چپ و راست قرار می‌گیرند. در این سازند، تعداد ۱۹ آزمایش لوزون

زیادی از تشکیلات سنگی محور و ساختگاه سد را در برمی‌گیرد و در تکیه‌گاه‌ها و مخزن سد حضور دارد. شاخص نفوذپذیری ثانویه ۳۶ درصد از مقاطع توده‌سنگ‌های این سازند در رده A قرار دارند. با توجه به لیتولوژی و قابلیت شکل‌پذیری توده‌سنگ‌های این سازند RQD بیش از ۷۱٪ از مقاطع در رده خوب و عالی و ۲۹٪ باقیمانده نیز در رده متوسط و ضعیف قرار دارند. اختصاص نفوذپذیری کم و بازشدگی RQD بالا این مقاطع حکایت از درزه‌داری کم و بازشدگی اندک درزه‌ها دارد، بنابراین در این مقاطع از سازند میشان نیاز به تزریق و بهسازی نیست. در ۳۰ درصد از مقاطع نیز SPI آنها در رده B است که نیاز به بهسازی و تزریق محلی دارند و RQD آنها نیز اکثراً در رده خوب می‌باشد (شکل ۹ و ۱۰). درصد مقطعی که در رده C قرار می‌گیرند نیز ۲۷/۵ درصد می‌باشد که در این مقاطع لازم است تزریق و بهسازی انجام شود. RQD در اکثر مقاطع در رده خوب تا عالی می‌باشد که دلالت بر وجود یک یا چند درزه عریض می‌باشد دارد که باید از دوغاب سیمان غلیظ استفاده شود. بعضی نیز در رده خیلی ضعیف قرار دارند که نفوذپذیری زیاد آنها به دلیل وجود چندین درزه و یا دسته درزه می‌باشد که باید از دوغاب رقیق استفاده نمود مانند گمانه BH-34 در اعماق ۵-۴۰ متری با وجود درجه درزه‌داری زیاد، بیشتر مقاطع در رده C و D قرار می‌گیرند که در این مقاطع باید از دوغاب رقیق با نسبت آب به سیمان ۳:۱ استفاده نمود. حدود ۶/۵ درصد از مقاطع رده D را نشان می‌دهد که نیاز به تزریق به طور گسترده می‌باشد. در سازند میشان تکیه‌گاه چپ، هیچکدام نفوذپذیری رده D مشاهده نشده که این وضعیت نشان‌دهنده نفوذپذیری کم این تشکیلات است و این سازند نیاز به تزریق و بهسازی به صورت منظم و گسترده در تکیه‌گاه چپ ندارد. در این سازند در حدود ۸۰ درصد مقاطع بین کیفیت توده‌سنگ حاصل از SPI با درجه درزه‌داری ارتباط دقیقی وجود دارد. به طور کلی میزان نفوذپذیری تکیه‌گاه چپ نسبت به تکیه‌گاه راست در این سازند کمتر بوده که دلیل اصلی کیفیت بهتر توده‌سنگ‌های تکیه‌گاه چپ نسبت به تکیه‌گاه راست می‌باشد.

طوری که بیش از ۸۰ درصد توده‌سنگ که در آن آزمایش انجام شده است، RQD کمتر از ۵۰ درصد یعنی ضعیف و خیلی ضعیف می‌باشند ولی در تکیه‌گاه راست دارای RQD متوسط تا عالی است به طوری که ۱۰۰ درصد توده‌سنگ که در آن آزمایش انجام شده است، RQD بیش‌تر از ۶۰ درصد یعنی متوسط تا عالی می‌باشند که نشان‌دهنده وجود درز و شکاف کم و سیمان قوی می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ۸ مشاهده می‌شود، در این سازند حدود ۵۸ درصد از مقاطع هیچگونه ارتباطی بین RQD و SPI وجود ندارد چرا که درجه درزه‌داری کم (RQD خوب تا عالی) می‌باشد ولی بیشتر مقاطع (۹۰ درصد) دارای شاخص نفوذپذیری ثانویه رده C و D هستند که نشان‌دهنده وجود درزه‌های با فعالیت زیاد می‌باشد که در این شرایط دوغاب غلیظ پیشنهاد می‌گردد. اما در گمانه‌های BH-1 و BH-2 در حدود ۸۵ درصد از مقاطع ارتباط دقیقی بین درزه‌داری و SPI وجود دارد، چنانچه با افزایش درجه درزه‌داری، همه مقاطع در رده C قرار می‌گیرند که در این شرایط دوغاب رقیق با نسبت آب به سیمان ۳:۱ پیشنهاد می‌گردد. در رابطه با نفوذپذیری این سازند علیرغم اینکه RQD آن در بیشتر مقاطع رده‌های متوسط تا خوب قرار دارد، SPI خوبی را نشان نمی‌دهد، به طوری که حدود ۵ درصد از مقاطع دارای SPI رده A می‌باشند و معمولاً نیاز به تزریق و بهسازی ندارند. ۵ درصد از مقاطع نیز در رده B قرار می‌گیرند که نیاز به بهسازی و تزریق محلی می‌باشد و حدود ۹۰ درصد از مقاطع در رده C, D است که نیاز تزریق به طور گسترده می‌باشد. دلیل اصلی این نفوذپذیری بالا در کنگلومرای بختیاری، سیمان ضعیف و شسته شدن مواد سیمانی در طی آزمایش فشار آب می‌باشد.

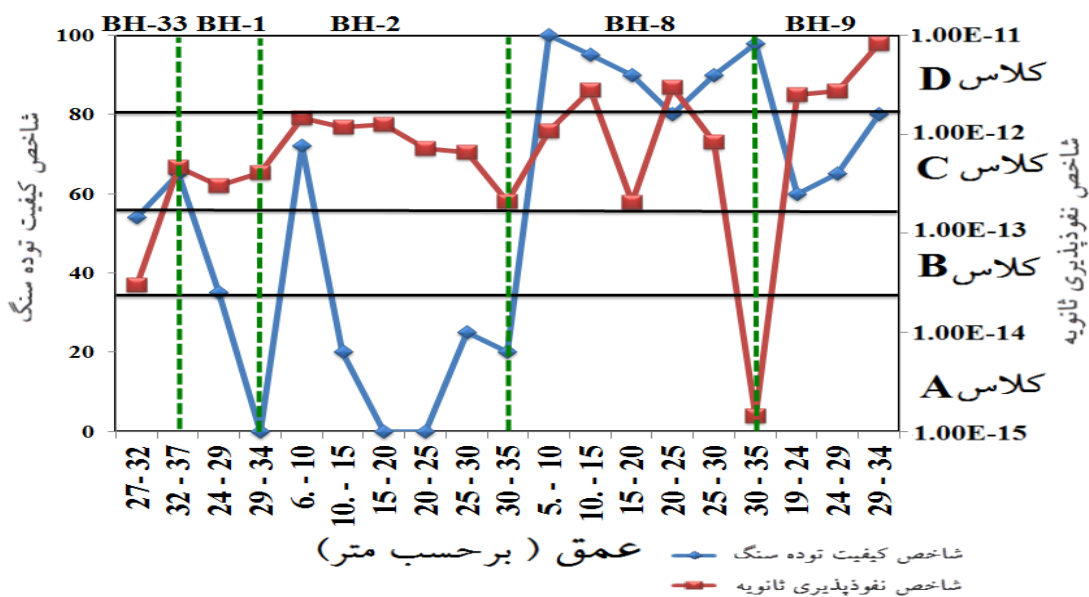
۶-۲. سازند میشان

با توجه به قرارگیری این سازند در پی و بخش اعظم تکیه‌گاه‌های سد و اینکه در زیر سازند بختیاری قرار دارد، این سازند نقش مهمی در آبگذری ایفا می‌کند و آبگذری زیاد و یا آبگذر نبودن آن تأثیر زیادی در کل طرح دارد زیرا بخش

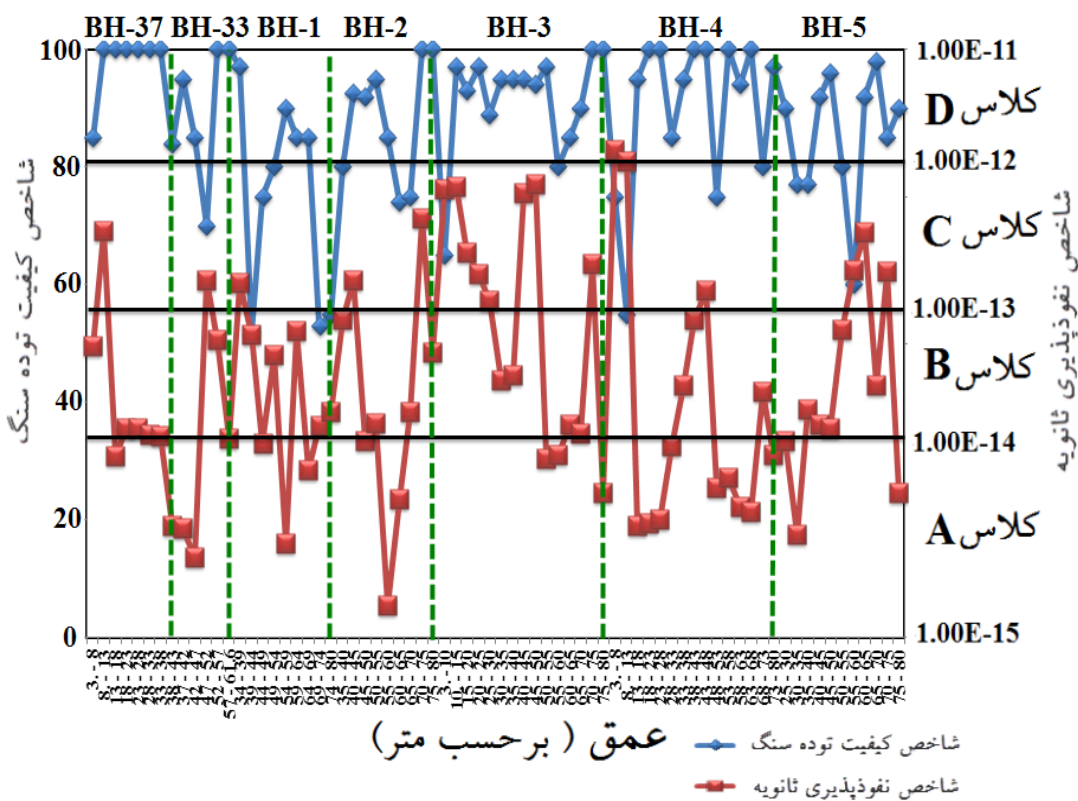
۳-۶. سازند گچساران

به دست آمده از SPI بالا می‌باشد باید مورد توجه قرار گیرد مانند گمانه BH-24A در عمق بین ۳۸-۴۳ متری از سطح زمین با وجود درجه درزه‌داری پایین، کیفیت توده‌سنگ به دست آمده از SPI، در رده C قرار دارد که نشان دهنده وجود یک درزه با فعالیت زیاد می‌باشد. در این شرایط دوغاب غلیظ پیشنهاد می‌گردد. در بعضی از مقاطع با وجود درجه درزه‌داری بالا، SPI نیز بالا می‌باشد مانند گمانه BH-34 که در اعماق ۷۰-۱۱۵ متری رده D را نشان می‌دهد که در این شرایط دوغاب رقیق نظیر ۳:۱ جهت بهسازی پیشنهاد می‌گردد. به طور کلی در سنگ‌های که کلاس D را نشان می‌دهد، بعد از انجام عملیات تزریق انجام آزمایش فشار آب جهت تشخیص بهبود وضعیت زمین الزامی است. در شکل ۱۲ رده‌بندی و پهنه‌بندی توده‌سنگ‌های ساختگاه براساس SPI نشان داده شده است. براساس نتایج به دست آمده از این زون‌بندی، در تکیه‌گاه چپ بیشترین سنگ‌ها در رده C و B و در تکیه‌گاه راست بیشتر سنگ‌ها در رده A و C و در بستر بیشتر در رده A قرار دارند. در تکیه‌گاه چپ در مقایسه با کل ساختگاه سد کمترین نفوذپذیری و بالاترین کیفیت توده‌سنگ را دارد و در این جناح سنگ‌ها بسیار ضعیف (کلاس D) وجود ندارد.

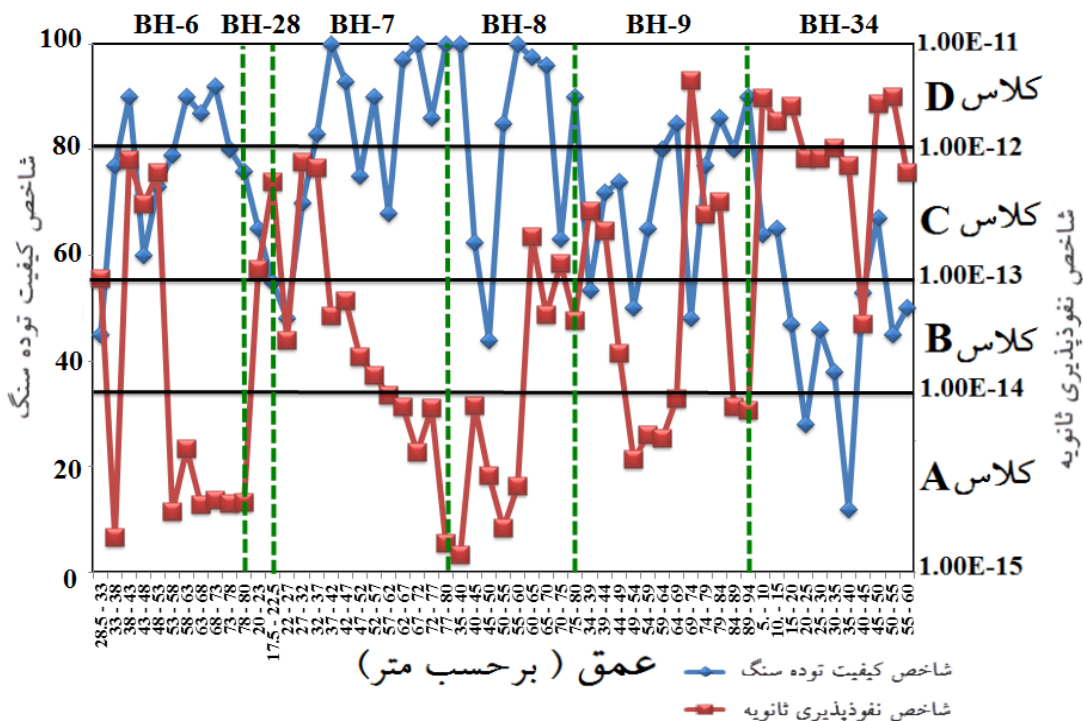
توده‌های سنگی این سازند فقط در تکیه‌گاه راست قرار می‌گیرند. بنابراین میزان نفوذپذیری این سازند تاثیر مهمی بر میزان نفوذپذیری در تکیه‌گاه راست خواهد داشت. در این سازند در بیش از ۵۵٪ مقاطع دارای RQD خوب تا عالی و در ۴۵٪ از مقاطع دارای RQD متوسط تا ضعیف می‌باشد. همان‌طور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در این سازند حدود ۸۸ درصد از مقاطع ارتباط دقیقی بین RQD و SPI وجود دارد. شاخص نفوذپذیری ثانویه ۴۶ درصد از مقاطع توده‌سنگ‌های این سازند در رده A قرار دارند که دلیل نفوذپذیری کم و RQD بالا این مقاطع درزه‌داری کم و بازشدگی اندک درزه‌ها می‌باشد، بنابراین در این مقاطع نیاز به تزریق و بهسازی نیست. ۱۱/۴۰ درصد از مقاطع نیز در رده B قرار می‌گیرند که نیاز به بهسازی و تزریق محلی می‌باشد و در حدود ۴۲/۶۰ براساس SPI در رده C و D قرار می‌گیرند که به طور گسترده نیاز به تزریق دارند. در ۲۲٪ از مقاطع این سازند در رده B و D قرار دارند که وجود پرشدگی ناشی از هوازدگی نشان دهد بایستی قبل از عملیات تزریق مقطع شسته شود. قطعاتی که در آنها درجه درزه‌داری پایین ولی نفوذپذیری



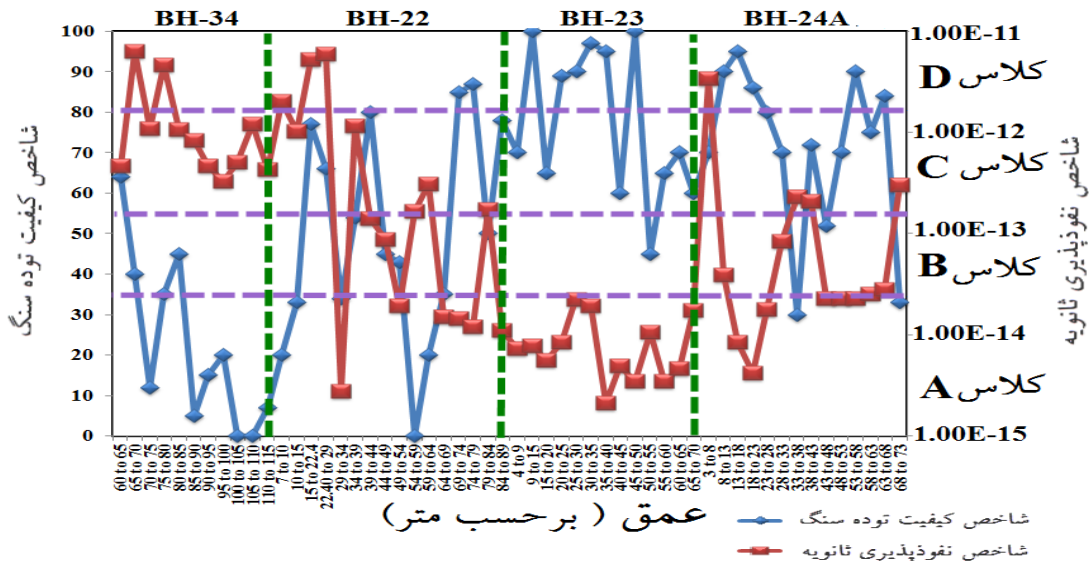
شکل ۸. مقادیر RQD و SPI نسبت به عمق در گمانه‌های مختلف سازند بختیاری



شکل ۹. مقادیر RQD و SPI نسبت به عمق در گمانه‌های مختلف سازند میشان (تکیه‌گاه چپ و بستر)



شکل ۱۰. مقادیر RQD و SPI نسبت به عمق در گمانه‌های مختلف سازند میشان (بستر و تکیه‌گاه راست)



شکل ۱۱. مقادیر RQD و SPI نسبت به عمق در گمانه های مختلف سازند گچساران

برحسب ثانیه، شعاع گمانه برحسب متر و H و P_e فشار مؤثر در مقطع آزمایش که H برحسب متر و P_e برحسب بار می باشد.

با توجه به اینکه در ساختگاه سد نرگسی گمانه حفاری بصورت تلسکوپی به سه قطر ۷۶، ۸۶ و ۱۰۱ میلی متری حفاری شده اند و با در نظر گرفتن طول مقاطع آزمایش ۵ متری رابطه های ۶ و ۷ بین شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) و لوژون به دست آمد. با توجه به اینکه در معادله شاخص نفوذپذیری ثانویه، شعاع گمانه مدنظر است بنابراین در معادله های ارائه شده قطر حفاری به شعاع حفاری شده گمانه تبدیل شده است.

$$(۶) \text{ (حفاری با شعاع ۳۸ میلی متری)}$$

$$SPI \approx (2.25 \times 10^{-14}) \times LU$$

$$(۷) \text{ (حفاری با شعاع ۴۳ میلی متری)}$$

$$SPI \approx (2.44 \times 10^{-14}) \times LU$$

$$(۸) \text{ (حفاری با شعاع ۵۰/۵ میلی متری):}$$

$$SPI \approx (2.38 \times 10^{-14}) \times LU$$

مقادیر لوژون معادل به دست آمده در این تحقیق، برای طبقه بندی SPI به طور تقریبی به صورت جدول ۲ می باشد.

۷. بررسی ارتباط بین لوژون و SPI

در این تحقیق با بررسی SPI و لوژن، این نتیجه گرفته شد که در اصل این دو پارامتر یکی می باشند و تنها ضرایب موجود در این دو معادله متفاوت است. با کمی تغییر در معادله اصلی شاخص نفوذپذیری ثانویه (رابطه ۱)، رابطه ۲ بدست می آید:

$$SPI = \frac{1.49 \times 10^{-10} \left[\ln \left(\frac{2le}{r} + 1 \right) \right]}{(2\pi)} \left(\frac{Q}{le.H.T} \right) \quad (۲)$$

با فرض اینکه بخش اول معادله یک ضریب ثابت (A) می باشد در این صورت A عبارتست از:

$$A = \frac{1.49 \times 10^{-10} \left[\ln \left(\frac{2le}{r} + 1 \right) \right]}{(2\pi)} \quad (۳)$$

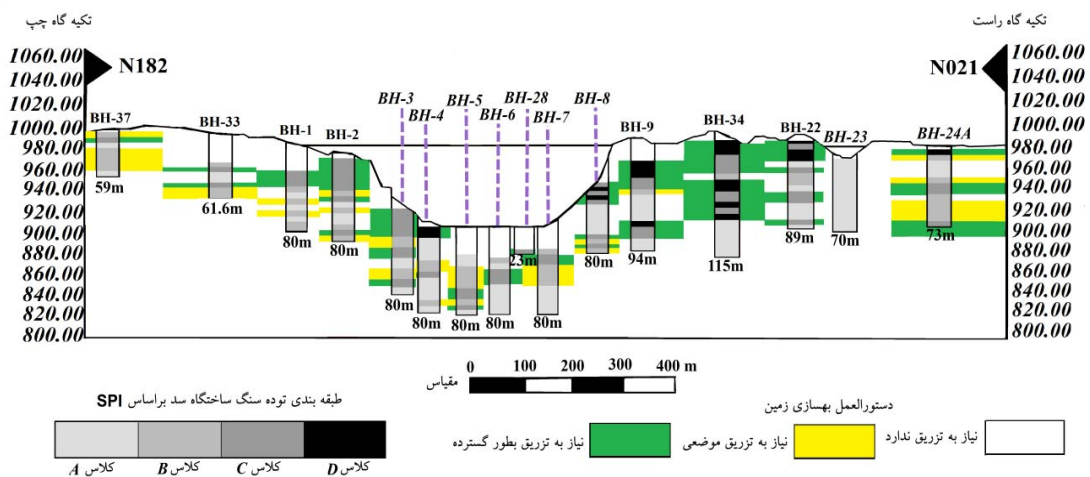
که در این صورت شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) عبارت است از:

$$SPI = A \left(\frac{Q}{le.H.T} \right) \quad (۴)$$

با مقایسه رابطه SPI (رابطه ۴) با رابطه لوژون (رابطه ۵) این نتیجه گرفته می شود که در واقع این دو پارامتر یکی است.

$$LU = \left(\frac{Q}{le.P_e.T} \right) \times 10 \quad (۵)$$

که در معادلات ذکر شده، Q برابر با جذب آب برحسب لیتر، l_e طول مقطع آزمایش برحسب متر، T زمان جذب آب



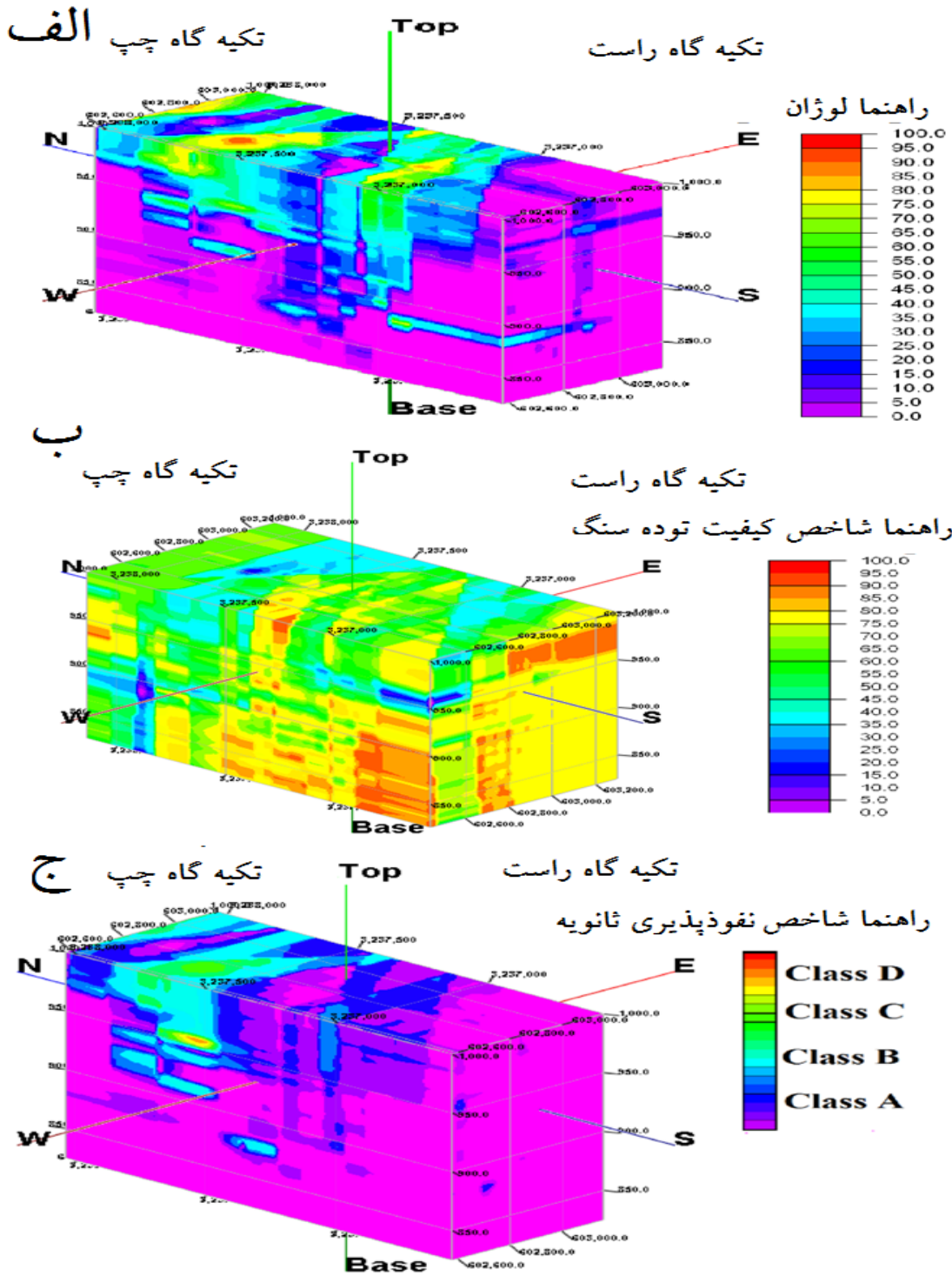
شکل ۱۲. طبقه‌بندی توده‌سنگ‌های ساختگاه سد با استفاده از SPI

جدول ۲. مقادیر لوژون معادل، برای طبقه‌بندی SPI

کلاس سنگ	طبقه‌بندی نفوذپذیری (فویو)	لوژون معادل (فویو)	لوژون معادل در این تحقیق		
			مقاطع با شعاع ۵۰.۵ میلی‌متری	مقاطع با شعاع ۴۳ میلی‌متری	مقاطع با شعاع ۳۸ میلی‌متری
A	$\leq 2.16 \times 10^{-14}$	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
B	$2.16 \times 10^{-14} - 1.72 \times 10^{-13}$	۱ - ۸	۱ - ۷.۲۲	۱ - ۷.۰۵	۱ - ۷.۶۴
C	$1.72 \times 10^{-13} - 1.72 \times 10^{-12}$	۸ - ۸۰	۷.۲۲ - ۷۲.۲۶	۷.۰۵ - ۷۰.۵۰	۷.۶۴ - ۷۶.۴۴
D	$\geq 1.72 \times 10^{-12}$	≥ 80	≥ 72.20	≥ 70.50	≥ 76.44

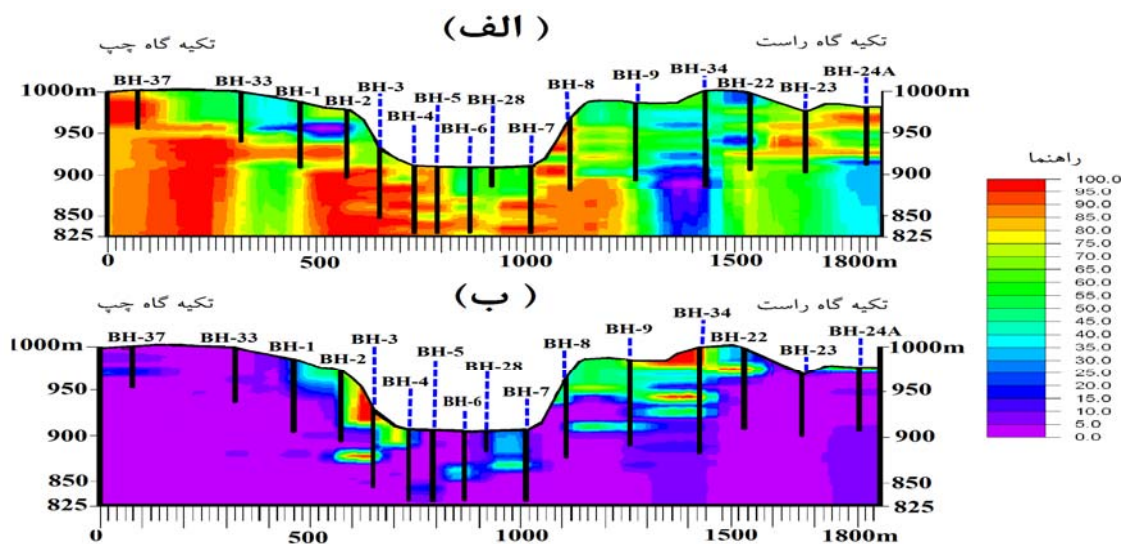
مدلسازی از نتایج آزمایش‌های فشار آب (WPT)، محاسبه شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) و اندازه‌گیری شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD)، به عنوان مهمترین پارامترهای ارزیابی فرار آب در پی و تکیه‌گاه‌های سد استفاده شد. فرآیند مدلسازی به گونه‌ای بوده که نتایج آزمایش‌های مورد نظر در کلیه گمانه‌ها به اشتراک گذاشته شده و یک همبستگی بین گمانه‌های انجام شده است. بدین ترتیب مقادیر حدواسط پارامترهای مورد نظر در بین گمانه‌ها نیز بدست آمده است. در نهایت مقایسه مدل‌های سه‌بعدی با داده‌های زمین‌شناسی سطحی و زیرسطحی، شرایط مناسبی برای تجزیه و تحلیل مسیرهای فرار آب در زیر پی سد فراهم نموده است. در شکل ۱۴ تغییرات شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD) و لوژون در طول محور سد با استفاده از نرم‌افزار (Rock work 14) پهنه‌بندی گردیده است.

۸. مدل‌سازی سه بعدی نفوذپذیری زمین در ساختگاه سد از جمله مهمترین پارامترهای ارزیابی میزان نفوذپذیری توده‌سنگ عدد لوژان، شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD) و شاخص نفوذپذیری ثانویه (SPI) می‌باشد. این پارامترها نقش مهمی در شناسایی پتانسیل فرار آب و مسیرهای جریان آب زیرزمینی دارند. به منظور مدلسازی سه بعدی پارامترهای فوق در محل ساختگاه سد نرگسی، اطلاعات به دست آمده از ۴۴ گمانه حفاری شده، توسط نرم‌افزار راک‌ورک ۱۴ (Rock work) (14) مورد آنالیز قرار گرفتند (شکل ۱۳). این نرم‌افزار با مدلسازی سه بعدی پارامترهای مورد نظر، امکان بررسی روند افزایشی، کاهش و یا ردیابی حالات ممکن پارامترهای برداشت شده را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار یکی از ابزارهای مدلسازی قدرتمند چندگانه در زمین‌شناسی می‌باشد و تقریباً در زمره نرم‌افزارهایی است که بیشتر از دیگر نرم‌افزارهای زمین‌شناسی امکان آنالیزهای سه بعدی را فراهم می‌نماید. برای



شکل ۱۲. مدل سه بعدی نفوذپذیری توده سنگ براساس عدد لوژان (الف)، شاخص کیفیت توده سنگ RQD (ب)

و شاخص نفوذپذیری ثانویه (ج)



شکل ۱۳. (الف) تغییرات شاخص کیفیت توده سنگ (RQD) و (ب) لوژون در طول محور سد

۹. مقدار نشت آب از ساختگاه

با توجه به اینکه ماده سنگ نفوذناپذیر فرض می‌شود و جریان آب از درز و شکاف‌های موجود در توده سنگ عبور می‌کند، برای تخمین میزان نشت باید ویژگی‌های درزه‌ها مورد توجه قرار گیرند. شرایط و ویژگی‌های درزه‌ها در یک منطقه یکنواخت نیستند و در هر محلی می‌تواند تغییر کند، ولی در محاسبات معمولاً یکنواخت فرض می‌شوند. تعیین میزان نشت از درزه‌ها مستلزم پذیرفتن پیش‌فرض‌های زیر است:

(الف) جریان آب در درزه‌ها آرام باشد.
 (ب) مقدار جریان در طول زمان ثابت و یکنواخت باشد.
 میزان نشت آب از تکیه‌گاه‌های سد و در نهایت ساختگاه بر اساس بار هیدرولیکی در گمانه‌های BH.8 در تکیه‌گاه راست و BH.3 در تکیه‌گاه چپ محاسبه گردید، برای محاسبه میزان نشت آب از ساختگاه سد نرگسی از رابطه ۹ استفاده گردیده است (Todd, 2005).

$$q = \frac{\bar{K}}{2L} (h_1^2 - h_2^2) \quad (9)$$

که q حجم آب بر حسب متر مکعب بر ثانیه در واحد عرض لایه، K هدایت هیدرولیکی معادل بر حسب متر بر ثانیه، h_1 بار هیدرولیکی آب مخزن بعد از آبیگری بر حسب متر، h_2 بار هیدرولیکی آب زیرزمینی در تکیه‌گاه‌ها بر حسب متر و L

فاصله نقاط اندازه‌گیری بار هیدرولیکی (h_2, h_1) بر حسب متر می‌باشد.

هدایت هیدرولیکی با توجه به اعداد لوژون به دست آمده در آزمایش فشار آب برای مقاطع مختلف، از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. با توجه به لیتولوژی و درز و شکاف سنگ‌ها در سازندها سنگی سد نرگسی، در این سازندها هدایت هیدرولیکی یکسان نیست و در مقاطع مختلف هدایت هیدرولیکی متفاوت است و باید یک هدایت هیدرولیکی معادل جهت استفاده در رابطه محاسبه نمود. و با استفاده از رابطه ۱۱ هدایت هیدرولیکی معادل تکیه‌گاه‌های سد با توجه به هدایت هیدرولیکی مقاطع واحدهای سنگی (K_1, K_2, \dots, K_n) و ضخامت آنها (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) محاسبه می‌شود:

$$K = 1.15E - 7 \times N \quad (m/s) \quad (10)$$

$$\bar{K} = \frac{(K_1 Z_1 + K_2 Z_2 + \dots + K_n Z_n)}{(Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n)} \quad (m/s) \quad (11)$$

که در این روابط K_n نفوذپذیری بدست آمده از طریق لوژون برای مقطع n ام، Z_n ضخامت مقطع n ام، N عدد لوژون مقطع است.

مقدار نشت برای ساختگاه سد در صورت عدم اجرای پرده آب‌بند در جدول ۳ آمده است که مقدار آن در تکیه‌گاه‌ها بر حسب مترمکعب در سال در واحد عرض لایه است. بر اساس نفوذپذیری معادل ۳ لوژون میزان نشت از ساختگاه در

عرض لایه خواهد شد. بنابراین با توجه به محاسبات صورت پذیرفته با اجرای پرده آب‌بند نشت از ساختگاه سد ۸۳ درصد کاهش خواهد یافت.

صورت اجرای پرده آب‌بند محاسبه گردیده است (جدول ۴)، در این صورت مقدار نشت آب از تکیه‌گاه‌های ساختگاه سد نرگسی در مجموع برابر ۹۵۶/۴۲ مترمکعب در سال در واحد

جدول ۳. مقادیر نشت از تکیه‌گاه‌ها در صورت عدم اجرای پرده آب‌بند

موقعیت	K (m/s)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	L (m)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /y)
تکیه‌گاه راست	۱/۹۰×۱۰ ^{-۶}	۱۰۴	۶۱.۶۰	۱۹۵	۰.۰۰۰۰۳۴۲	۱۰۸۷/۴۱
تکیه‌گاه چپ	۲/۱۳×۱۰ ^{-۶}	۱۳۷	۱۶.۳۰	۱۳۳	۰.۰۰۰۰۱۴	۴۴۱۵/۰۴

جدول ۴. مقادیر نشت از تکیه‌گاه‌ها در صورت اجرای پرده آب‌بند

موقعیت	K (m/s)	h ₁ (m)	h ₂ (m)	L (m)	Q (m ³ /s)	q (m ³ /y)
تکیه‌گاه راست	۳/۴۵×۱۰ ^{-۷}	۱۰۴	۶۱.۶۰	۱۹۵	۰.۰۰۰۰۰۶۲۶	۱۹۷/۴۱
تکیه‌گاه چپ	۳/۴۵×۱۰ ^{-۷}	۱۳۷	۱۶.۳۰	۱۳۳	۰.۰۰۰۰۰۲۴	۷۵۹/۰۱

۱۰. آب‌بندی و تزریق‌پذیری محور سد

به طور کلی نشت از زیر پی سد باعث از دست دادن آب، افزایش فشار بالا برنده، فرسایش در طی زمان و در نهایت به خطر افتادن پایداری سد می‌گردد (Fransson et al, 2010). از طرفی در بسیاری از موارد محاسبات نادرست رفتار نشت پی، سبب تزریق اضافه و در نتیجه تحمیل هزینه‌های غیرضروری می‌گردد. به دلیل ناهمگن بودن سنگ، نوع نفوذپذیری توده‌سنگ در مقابل آب، یکی از پیچیده‌ترین فاکتورها با حداقل قابلیت اندازه‌گیری می‌باشد. در این شرایط جریان آب در زیر پی، به اجزاء انتقال دهنده آب و رفتار سنگ در رابطه با جریان آب بستگی دارد. تصمیم درست در مورد اجرای پرده تزریق، تابع هزینه عملیات در رابطه با حجم آب از دست رفته و هزینه آب‌بندی خواهد بود (Gothäll and Stille 2010). در دهه‌های اخیر، تزریق در سنگ به منظور آب‌بند کردن زیر سطح زمین یک روش استاندارد در ساخت سدها می‌باشد. هر چند عملیات تزریق به منظور کاهش نفوذپذیری در سنگ (احداث پرده آب‌بند) صورت می‌گیرد، اما در تزریق سنگ امکان پر شدن کلیه حفره‌ها غیرممکن است. زیرا در بسیاری از موارد که بازشدگی و توسعه ناپیوستگی‌ها کوچک است،

مسیرهای هیدرولیکی غیر قابل دسترس می‌باشند. بنابراین در طی عملیات تزریق ممکن است قسمت معینی از حفره‌ها آب‌بندی نگردد. بدین ترتیب اجرای پرده آب‌بند، باعث پدید آوردن یک دیواره با نفوذپذیری پایین‌تر در داخل سنگ شود (Fransson et al, 2007). با توجه به این که پرده‌های آب‌بند قبل از آبیگری مخزن احداث می‌شوند، بنابراین در صورتی که پس از آبیگری، سد آب‌بند باشد، به عنوان تأیید بر اثبات موفقیت‌آمیز بودن عملیات تزریق تلقی می‌شود. عملیات تزریق زمانی موفقیت‌آمیز قلمداد می‌شود که اولاً در طی عملیات تزریق مقدار قابل توجهی سوسپانسیون سیمان تزریق شده باشد و پس از آبیگری سد، نشت کمی مشاهده شود (Maghous et al, 2007). به این دلیل آب‌بندی سد از اهمیت قابل توجهی در پروژه‌های مهندسی برخوردار خواهد بود. یکی از مشکلات آب‌بندی در ساختگاه سد نرگسی موازی بودن صفحات لایه‌بندی با جهت جریان آب می‌باشد بنابراین اجرای طرح آب‌بندی مناسب برای جلوگیری از فرار آب ضروری می‌باشد. نوع دوغاب (پایدار و ناپایدار) انتخاب شده برای استفاده در فرایند تزریق، نقش مهمی در موفقیت‌آمیز بودن عملیات تزریق دارد. دلایل متعددی برای استفاده از

تزریق با شکست روبرو خواهد شد، با توجه به دلایل فوق به منظور آب‌بند کردن سازند گچساران، استفاده از دیوار آب‌بند به جای پرده تزریق پیشنهاد می‌گردد. در تکیه‌گاه چپ پرده تزریقی به عمق ۶۰-۴۵ متر در یک ردیف خطی با فاصله داری ۲ متر، و در بستر رودخانه نیز پرده تزریقی به عمق ۳۵-۴۵ متر در یک ردیف خطی با فاصله‌داری ۲ متر در زیر دیوار آب‌بند و در تکیه‌گاه راست (سازند میشان) پرده تزریقی به عمق ۵۷-۱۰۶ متر در یک ردیف خطی با فاصله‌داری ۲ متر پیشنهاد می‌گردد.

۱.۱ نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

۱- بیشترین فراوانی رده کیفیت توده‌سنگ این سه واحد سنگی براساس SPI مربوط به رده A با ۳۶ درصد در کل ساختگاه سد است که نیاز به تزریق و بهسازی ندارد و بیشترین مورد آن مربوط به سازند گچساران است. در این سازند به دلیل لیتولوژی آن، درز و شکاف کمتری ایجاد شده و درزه‌های موجود نیز بسته می‌باشند و کمترین مورد رده A مربوط به سازند بختیاری با ۵ درصد می‌باشد (به دلیل سیمان ضعیف).

۲- رده B که نیاز به تزریق و بهسازی محلی دارد با ۲۲.۵ درصد در مرتبه دوم از نظر درصد فراوانی قرار می‌گیرد و بیشتر مربوط به سازند میشان با ۳۰ درصد است. به دلیل ماهیت مارنی و آهکی تشکیلات سنگی این سازند، درز و شکاف بیشتری ایجاد شده و درزه‌های موجود نیز می‌توانند در اثر انحلال گسترش یابند. بنابراین بهتر است که درز و شکاف‌های موجود در این سازند به وسیله دوغاب سیمان پر و مسدود شوند.

۳- رده دوم با ۳۲ درصد مربوط به رده C در کل ساختگاه می‌باشد که بیشتر در سازند بختیاری (۶۳٪) دیده شده و نیاز به تزریق و بهسازی دارد. به دلیل ماهیت این زون و وجود سیمان ضعیف بین قطعات تشکیل دهنده و همچنین احتمال

دوغاب غلیظ، یا دوغاب پایدار (با آب‌اندازی کمتر از ۵٪ پس از دو ساعت) وجود دارد که با خواص نهایی دوغاب پس از گیرش، یعنی کیفیت تزریق انجام شده ارتباط دارد. مهمترین مزایای دوغاب پایدار نسبت به دوغاب رقیق (ناپایدار) عبارتند از: پر کردن کامل فضاهای خالی و درزه‌ها به وسیله سیمان و جلوگیری از تشکیل حباب در داخل درزه‌ها به دلیل وجود آب اضافی، مقاومت مکانیکی بالاتر، کاهش احتمال انقباض دوغاب سفت شده و بنابراین جلوگیری و محدود کردن ایجاد ترک‌های ریز در دوغاب سخت شده، پیوند بهتر با سطح سنگ (به دلیل فشار تزریق بالاتر مورد نیاز)، مقاومت بالا در مقابل شسته‌شدگی و قابل پیش‌بینی بودن فرآیند تزریق (Lombardi, 2003). برای ساده کردن فرآیند تزریق در یک پروژه، فقط باید از یک نوع دوغاب استفاده کرد که مناسب‌ترین و بهترین دوغاب باشد. با توجه به دلایل فوق، استفاده از دوغاب پایدار (غلیظ) در طی فرآیند تزریق در ساختگاه سد نرگسی پیشنهاد می‌گردد. در توده‌سنگ کنگلومرایی سازند بختیاری بدلیل وجود درزه و شکاف خیلی کم، استفاده یک دوغاب پایدار (غلیظ) با نسبت آب به سیمان (w/c) ۱:۱ و با سیمانی با بلین ۵۵۰۰-۶۵۰۰ (cm²/g) جهت فرآیند تزریق پیشنهاد می‌گردد. در سازند میشان بدلیل وجود درزه و شکاف فراوان با بازشدگی مکانیکی گوناگون، استفاده از یک دوغاب پایدار با نسبت آب به سیمان (w/c) ۱:۰/۶ یا ۱:۰/۷ و سیمانی با بلین کمتر از ۴۵۰۰ (cm²/g) (سیمان پرتلند تیپ II) جهت فرآیند تزریق پیشنهاد می‌گردد. چسبندگی دوغاب پایدار دارای فوق روان‌کننده نسبت به دوغاب دارای بتونیت کمتر است و بنابراین شعاع نفوذ بیشتری خواهد داشت، به این دلیل برای رسیدن به شعاع نفوذ دوغاب حداکثری در دوغاب پایدار استفاده از ۲-۶٪ فوق روان‌کننده در دوغاب پیشنهاد می‌گردد. در سازند گچساران بدلیل داشتن توده‌سنگ ژیبسی و انیدریتی و مقاومت مکانیکی بسیار پایین ژیبس و انیدریت، در صورت ایجاد ترک و شکاف، دانه‌های ژیبس و انیدریت در آب حل شده و این شکاف و ترک‌ها به کانال‌ها و تونل‌های زیرزمینی تبدیل خواهد شد و عملیات

است که جریان در شکاف‌های اطراف مقاطع به صورت آرام و یکنواخت است و مصالح آن فرسایش نمی‌یابد.

۷- در توده‌سنگ کنگلومرایی سازند بختیاری بدلیل وجود درزه و شکاف خیلی کم، استفاده یک دوغاب پایدار (غلیظ) با نسبت آب به سیمان (w/c) ۱:۱ و با سیمانی با بلین ۵۵۰۰ - ۶۵۰۰ (cm²/g) جهت فرآیند تزریق پیشنهاد می‌گردد. در سازند میشان بدلیل وجود درزه و شکاف فراوان با بازشدگی مکانیکی گوناگون، استفاده از یک دوغاب پایدار با نسبت آب به سیمان (w/c) ۱: ۰/۶ یا ۱: ۰/۷ و سیمانی با بلین کمتر از ۴۵۰۰ (cm²/g) (سیمان پرتلند تیپ II) جهت فرآیند تزریق پیشنهاد می‌گردد.

۸- در سازند گچساران بدلیل داشتن توده‌سنگ ژیبسی و انیدریتی و مقاومت مکانیکی بسیار پایین ژیبس و انیدریت، در صورت ایجاد ترک و شکاف، دانه‌های ژیبس و انیدریت در آب حل شده و این شکاف و ترک‌ها به کانال‌ها و تونل‌های زیرزمینی تبدیل خواهد شد و عملیات تزریق با شکست روبرو خواهد شد. بنابراین به منظور آب‌بند کردن سازند گچساران، استفاده از دیوار آب‌بند به جای پرده تزریق پیشنهاد می‌گردد.

۹- در تکیه‌گاه چپ پرده تزریقی به عمق ۶۰-۴۵ متر در یک ردیف خطی با فاصله‌داری ۲ متر، و در بستر رودخانه نیز پرده تزریقی به عمق ۳۵-۴۵ متر در یک ردیف خطی با فاصله‌داری ۲ متر در زیر دیوار آب‌بند و در تکیه‌گاه راست (سازند میشان) پرده تزریقی به عمق ۵۷-۱۰۶ متر در یک ردیف خطی با فاصله‌داری ۲ متر پیشنهاد می‌گردد.

شستشوی این مواد به وسیله آب مخزن و افزایش مقاومت این زون، لازم است که بین آن به وسیله دوغاب سیمان پر شود.

۴- براساس نتایج بدست آمده از زون‌بندی سنگ‌های ساختگاه بر اساس SPI، در تکیه‌گاه چپ بیشترین سنگ‌ها در رده C و B و در تکیه‌گاه راست بیشتر سنگ‌ها در رده A و C و در بستر بیشتر در رده A قرار دارند. در تکیه‌گاه چپ در مقایسه با کل ساختگاه سد کمترین نفوذپذیری و بالاترین کیفیت توده‌سنگ را دارد و در این جناح سنگ‌ها بسیار ضعیف (کلاس D) وجود ندارد.

۵- نتایج آزمایش لوژون و مدل‌سازی سه بعدی توسط نرم‌افزار راک‌ورک ۱۴ (Rock work 14) نشان می‌دهد که در سازند گچساران و میشان حدود ۷۰ درصد از مقاطع دارای نفوذپذیری کمتر از ۱۰ لوژون بوده و به طور کلی تکیه‌گاه چپ از لحاظ نفوذپذیری وضعیت بهتری نسبت تکیه‌گاه راست دارد.

۶- با توجه به ارزیابی توده‌سنگ‌های ساختگاه سد در برابر جریان آب با استفاده از نتایج و تفاسیر نمودارهای P-Q، در سازند بختیاری بیشترین رفتار هیدرولیکی مربوط به جریان آشفته و جک هیدرولیکی (اتساع) می‌باشد که نشان‌دهنده وجود سیمان ضعیف، درزه‌های کششی، درزه‌هایی با بازشدگی قابل ملاحظه و یا درزه‌هایی با پرشدگی توسط مواد سست است و پتانسیل بالای تزریق‌پذیری در این سازند می‌باشد. بیشترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده در سازند میشان جک هیدرولیکی می‌باشد که نشان دهنده فرسایش پرکننده شکاف می‌باشد و بالاخره در سازند گچساران بیشترین رفتار هیدرولیکی مشاهده شده، خطی می‌باشد که نشان دهنده این

منابع

- مهندسین مشاور تماون، ۱۳۸۸. گزارش سیمای طرح سد نرگسی، کارفرما: آب منطقه‌ای استان فارس.
- Ajalloeian, R., Fatehi, L., Ganjalipour, K., 2011. Evaluation of hydrojacking and hydrofracturing behavior in Aghajari formation (Gotvand dam site foundation), Iran. *Journal of Geology and Mining Research*, 3(3): pp. 46-53.
- Ajalloeian, R., Habibi, V., Sharifipour, M., Azimian, A., 2012. Evaluation Engineering Geology Properties of Jamishan Dam Site with Emphasis on Its Groutability. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17(Bund. T): 2777-2793.

- Ajalloeian, R., Moein, F., 2009. Evaluation of Damsites Groutability Using Secondary Permeability Index, Rock Classification (Case Studies). *American Journal of Applied Sciences*, 6: 1235-1241.
- Azimian, A., Ajalloeian, R., 2013. Comparison between lugeon with secondary permeability index obtained of water pressure test in rock masses. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18(Bund. H): 1603-1612.
- Coli, N., Pranzini, G., Alfi, A., Boerio, V., 2008. Evaluation of rock-mass permeability tensor and prediction of tunnel inflows by means of geostructural surveys and finite element seepage analysis. *Engineering Geology*, 10:174-184.
- Ewert, F.K., 1981. Untersuchungen zu Felsinjektionen Teil 2. Types and dam sites are needed. *Munster. Forsch Geol Paleont* 53.
- Ewert, F.K., 1997a. Permeability, groutability and grouting of rocks related to dam sites Part 1, Springer verlag. Berlin, pp. 31-77.
- Ewert, F.K., 1997b. Permeability, groutability and grouting of rocks related to dam sites Part 2, Springer verlag. Berlin, pp. 123-176.
- Ewert, F.K., 1997c. Permeability, groutability and grouting of rocks related to dam sites Part 3, Springer verlag. Berlin, pp. 271-325.
- Fransson, A., Tsang, C.F., Rutqvist, J., Gustafson, G., 2007. A new parameter to assess hydromechanical effects in single-hole hydraulic testing and grouting, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 44:1011-1021.
- Fransson, A., Tsang, C.F., Rutqvist, J., Gustafson, G., 2010. Estimation of deformation and stiffness of fractures close to tunnels using data from single-hole hydraulic testing and grouting. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47 (6): 887- 893.
- Foyo, A., Sanchez, M.A., 2002. Permeability tests for rock masses. A proposal for a new expression for the equivalent Lugeon unit (ELU). *Dam Engineering*, 8(3):199-218.
- Foyo, A., Sanchez, Miguel A., Carmen, Tomillo., 2005. A proposal for a Secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations. *Engineering Geology*, 77: 69-82.
- Gothäll, R., Stile, H., 2010. Fracture-fracture interaction during grouting. *Tunneling and Underground Space Technology*, 25: 331-339.
- Gurocak, Z., Alemdag, S., 2011. Assessment of permeability and injection depth at the Atasu dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64: 400-409.
- Houlsby, A.c., 1990. *Construction and Design of Cement Grouting*. John-Wiley, 427p.
- Karagqzel, R., Kilic, R., 2000. The effect of the alteration degree of ophiolitic melange on permeability and grouting. *Engineering Geology*, 57: 1 - 13.
- Kiraly, L., 2002. Karstification and groundwater flow. In: Gabrovsek F. (Ed.) *Evolution of Karst from Prekarst to Cessation*. Založba ZRC, Postojna-Ljubljana, pp. 155-190.
- Kutzner, T.C., 1996. *Grouting of Rock and Soil*, A., A., Balkema/ Rotterdam/ Brook Field, 271 p.
- Lombardi, A.C., 2003. Grouting of rock masses. 3rd International Conference on Grouting and Grout Treatment, P. 1-42.
- Maghous, S., Saada, Z., Dormieux, L., Canou, J., Dupla, J.C., 2007. A model for in situ grouting with account for particle filtration. *Computers and Geotechnics*, 34:164-174.
- Todd, D.K., Mays, L.W., 2005. *Ground Water Hydrology*, John Wiley & Sons, Inc, 636p.
- Uromeihy, A., Farrokhi, R., 2011. Evaluating Groutability at the Kamal-Saleh Dam based on Lugeon Tests. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64:382-387