

ارزیابی تزریق پذیری ساختگاه سد سرابی به منظور طراحی پرده آب بند

عرفان صادقی^{۱*}، علی ارومیه‌ای^۲، عبدالله عابدینی^۳

۱- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- عضو هیئت علمی زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد واحد علوم تحقیقات تهران

Erfan.sadeghi@modares.ac.ir

چکیده

مهمترین مسائل در احداث سدها به خصوص با هدف ذخیره آب، توانایی نگه داری و جلوگیری از اتلاف آن از بدنه و پی سد است. تزریق روشی است که سبب افزایش خواص مقاومتی زمین، کاهش تراوایی و شکل پذیری سنگ‌ها و خاک‌های تزریق شده می‌شود. همچنین با انجام تزریق سبب بیشتر شدن طول مسیر حرکت آب در ساختگاه سد می‌گردد. ساختگاه سد سرابی از سنگ‌های بسیار مقاوم هورنفلس که نسبتاً دارای شکستگی‌ها بسیار زیاد نیز هست تشکیل شده است. سنگ‌های ساختگاه مطابق نتایج آزمایش‌های زمین شناسی مهندسی RMR و RQD انجام شده در رده III (سنگ‌های بسیار خوب) قرار می‌گیرد. قابلیت نفوذپذیری و درصد فراوانی رفتار هیدروژئومکانیکی توده سنگ هورنفلس در جناحین و پی با یکدیگر مقایسه شده و به صورت آماری تحت آنالیز قرار گرفته است. به گونه‌ای که جناح چپ با ۵۱ درصد مقادیر لوژان بالاتر از ۳ نفوذپذیری بیشتری را نسبت به جناح راست و پی مرکزی دارا می‌باشد. این امر می‌تواند ناشی از فشارهای تکتونیکی منطقه باشد که موجب افزایش تعداد درزه‌ها و تغییر هندسه لایه بندی شده است. همچنین حداکثر درصد فراوانی رفتار ژئومکانیکی در جناح چپ رفتار اتساعی و در جناح راست و شالوده مرکزی به رفتار خطی تعلق دارد. فراوانی زیاد رفتار اتساعی ناشی از مقاومت نسبتاً پایین و درزه‌های باز می‌باشد. مقایسه RQD با لوژان نسبت به عمق نشان می‌دهد که میزان نفوذپذیری از سطح به عمق کاهش می‌یابد اما روند کاملاً مشخصی را نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی: سد سرابی، سنگ هورنفلس، نفوذپذیری، رفتار اتساعی، مقدار لوژان

سد سرابی در ۱۰ کیلومتری شرق شهر تویسرکان واقع در استان همدان بر روی رودخانه گزندر واقع شده است. حوزه آبریز این سد در محدوده حوزه آبریز رودخانه قلقل رود قرار دارد. این سد در طبقه بندی انواع سدها در گروه سدهای خاکی - سنگریزه ای با هسته رسی قرار گرفته و ارتفاع آن از پی ۷۷ متر و حجم مخزن حدود ۹/۲ میلیون متر مکعب برآورد گردیده است. محور سد متشکل از سنگ‌های هورنفلس کوردیریت‌دار است. در طراحی پرده آب بند باید تمهیدات خاصی را از جهت فشار تزریق و شکست هیدرولیکی به کار برد. شکست هیدرولیکی متاثر از عواملی مثل مقاومت کششی سنگ، نوع ناپیوستگی و زاویه تقاطع بین گمانه و صفحات ناپیوستگی می‌باشد که تاثیر دو مورد اول بر کنترل شکست هیدرولیکی بیش تر است. بطور کلی هدف از اجرای پرده آئیند جلوگیری از نشت آب و مسدود نمودن مسیر نشت بین مخزن و توده سنگ در پایین دست می‌باشد.

زمین شناسی منطقه

از نظر مورفولوژی ساختگاه سد سرابی به صورت V شکل می‌باشد که شیب تکیه‌گاه‌های چپ و راست آن تقریباً برابر است. ضخامت هوازدگی تکیه‌گاه‌ها حدود ۱۰ متر و ضخامت آبرفت حدود ۵ متر برآورد شده است. شیب لایه‌های متامورف به طرف پایاب سد و تکیه‌گاه چپ است. محور سد و کل دریاچه بر روی توده‌های متامورف میکاشیست - هورنفلس قرار دارند. زمین شناسی ساختگاه سد شامل نهشته‌های شیلی ژوراسیک می‌باشد که توسط توده گرانیتوئید الوند به صورت یک باتولیت بزرگ قطع شده است و سبب دگرگونی سنگ شیل از محل باتولیت به طرف محیط خارجی آن شده است. حاصل فرآیند‌های دگرگونی بر روی این سنگ‌ها تشکیل اسلیت‌ها، اسلیت‌های لکه‌دار، هورنفلس‌ها و انواع گوناگون شیست‌های لکه‌دار، شیست‌های استارولیت‌دار، کیانیت، آندالوزیت و غیره است. محدوده محور و دریاچه سد در یال جنوب شرقی توده گرانیتی کوه الوند قرار دارند. از عمده‌ترین و اصلی‌ترین شکستگی‌های منطقه می‌توان به راندگی اصلی بین زون سنندج - سیرجان و واحد زاگرس رورانده اشاره کرد که مرز بسیار مشخصی را ایجاد کرده است. از سایر گسل‌های منطقه می‌توان گسل تبریزجان - ورکانه، گسل یلفان - علی‌آباد - منگاو و زون گسلی غرب روستای علی‌آباد دماق را نام برد.

آزمایش لوژان (پله‌ای فشار آب)

رایج‌ترین آزمایش در تعیین تزریق پذیری سنگ‌ها، آزمایش لوژان است. این آزمایش به صورت پله‌ای و در ۵ مرحله (پله) اجرا می‌گردد، که تا مرحله سوم فشار آزمایش افزایش می‌یابد و از مرحله سوم تا پنجم از فشار آزمایش کاسته می‌گردد به گونه‌ای که فشار مراحل دوم و چهارم و فشار مراحل اول و پنجم برابر گردد. فشارهای اعمال شده نسبت به عمق و مقاومت سنگ متغیر هستند (رزازاده ح. و همکاران، ۱۳۹۰). در محدوده سد سرابی در مطالعات فاز یک و دو در مجموع ۱۰ گمانه حفر شده که به طور کلی در ۷ قطعه از آن که در محل ساختگاه سد قرار داشت، آزمایش نفوذپذیری لوژان انجام پذیرفته است. کمترین میزان نفوذپذیری مربوط به جناح چپ بوده و سنگ‌ها از نفوذپذیری نسبتاً بالایی برخوردارند و در جناح راست نفوذپذیری سنگ‌ها از حد نفوذپذیری متوسط تا

بسیار زیاد می‌باشد. مطابق جدول ۱ در جناح راست ۷۱/۴ درصد مقاطع نفوذپذیری کمتر از ۳ واحد لوژان و ۲۸/۶ درصد بیشتر از ۳ بوده و در جناح چپ ۷۵/۶ درصد مقاطع نفوذپذیری کمتر از ۳ واحد لوژان و ۲۴/۴ درصد بیشتر از ۳ بوده، همچنین در هسته مرکزی ۹۶/۵ درصد نفوذپذیری‌ها کمتر از ۳ واحد لوژان و ۳/۵ درصد بیشتر از ۳ واحد بوده است.

جدول ۱- تغییرات نفوذپذیری در توده سنگ های ساختگاه سد (Ewert , k.f 1997)

نفوذناپذیری		نفوذپذیری زیاد		نفوذپذیری متوسط		نفوذپذیری کم		نفوذپذیری بسیار زیاد		محدوده
۰-۳		۳۰-۶۰		۱۰-۳۰		۳-۱۰		>۶۰		
درصد	تعداد قطعه	درصد	تعداد قطعه	درصد	تعداد قطعه	درصد	تعداد قطعه	درصد	تعداد قطعه	
۳۱	۷۵/۶	۳	۷/۳۱	۶	۱۴/۶۳	۱	۲/۴۳	۰	۰	تکیه‌گاه چپ
۲۵	۷۱/۴	۱	۲/۸۶	۶	۱۷/۱۴	۳	۸/۵۷	۰	۰	تکیه‌گاه راست
۲۸	۹۶/۵	۰	۰	۱	۳/۵	۰	۰	۰	۰	بستر رودخانه (هسته مرکزی)

به طور کلی در نفوذپذیری ساختگاه پی سد سرابی مشاهده می‌شود که علی‌رغم هوازگی توده سنگ در بخش‌های سطحی و ارتباط درز و ترک‌ها و همچنین کمتر بودن شاخص کیفی، توده سنگ دارای نفوذپذیری است و با افزایش عمق و برطرف شدن زون هوازده و کاهش درز و شکاف‌ها، نفوذپذیری کاسته می‌شود. همچنین نفوذپذیری توده سنگ‌ها به میزان توسعه درزه‌های باز و پراکنده بودن آن‌ها نیز بستگی دارد، که با مطالعه گمانه‌ها می‌توان گفت که ۸۳ درصد قطعات نفوذپذیر مقاطعی هستند که درزه‌های نسبتاً باز و مختلف‌الجهت دارند. در جدول ۲ تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق در اعماق ۰-۲۵ متر و بیشتر از ۲۵ متر ارائه شده است.

جدول ۲- بررسی تغییرات نفوذپذیری نسبت به عمق

عمق بین ۰-۲۵ متر			عمق >۲۵			نفوذپذیری (لوژان)
جناح چپ	جناح راست	هسته مرکزی	جناح چپ	جناح راست	هسته مرکزی	
۳/۹	۵/۷	۷/۸	۴۴/۸	۶۵/۷	۸۸/۶	درصد فراوانی مقاطع با لوژان کمتر از ۳
۳۹/۷	۲۲/۸	۳/۰۶	۱۱/۶	۵/۸	۰/۵۴	درصد فراوانی مقاطع با لوژان بیشتر از ۳

تزریق آزمایشی جهت طراحی پرده آب بند و نتایج آن

تزریق آزمایشی به منظور دستیابی به شرایط تزریق پذیری توده سنگ و نهایتاً تعیین پارامترهایی نظیر فواصل گمانه های تزریق پرده آب بند، شعاع موثر نفوذ دوغاب، فشار و ترکیب بهینه دوغاب مورد استفاده در عملیات اجرا می گردد. این عملیات در تکیه گاه راست ساختگاه سد در حوالی گمانه های GOD177 و GQU188 در رقوم ۲۲۰۶ متری از سطح دریا و در ارتفاع ۶۸ متر بالاتر از بستر رودخانه در روی محور سد صورت گرفت. آزمایش تزریق سیمان در سه گمانه های آزمایشی که به صورت قائم حفر و به فاصله ۳ متر از یکدیگر با آرایش مثلث متساوی الاضلاع و با یک گمانه کنترلی در مرکز به منظور بررسی دقیق عملیات تزریق در سه گمانه قبل انجام گرفت. تناسب غلظت دوغاب تهیه شده با نفوذپذیری قطعه در تزریق آزمایشی انجام شده طبق نظر (Houlsby. A.C, 1990) در نظر گرفته شده است. الگوی تزریق دوغاب در طرح آزمایشی در جدول ۳ ارائه گردیده است. در تزریق آزمایشی فشار تزریق بر اساس وزن مخصوص سنگ و عمق قطعات تزریق تعیین شده است و از فشار ۳ اتمسفر در عمق ۵-۱ شروع شده و تا ۲۵ اتمسفر در اعماق بیش از ۵۰ متر رسیده است. جدول ۴ فشارهای اعمال شده را نسبت به عمق نشان می دهد.

جدول ۳- الگوی غلظت دوغاب در طرح تزریق آزمایشی

نفوذپذیری لوژان	۱-۱۰	۱۱-۳۰	۳۱-۶۰	۶۰-۱۰۰
ترکیب دوغاب سنگ ها	۱:۳	۱:۲	۱:۱/۵	۱:۱
بتنویت (درصد وزن سیمان)	٪۶	٪۳	٪۳	٪۲

جدول ۴- فشار اعمال شده در تزریق آزمایشی در اعماق مختلف

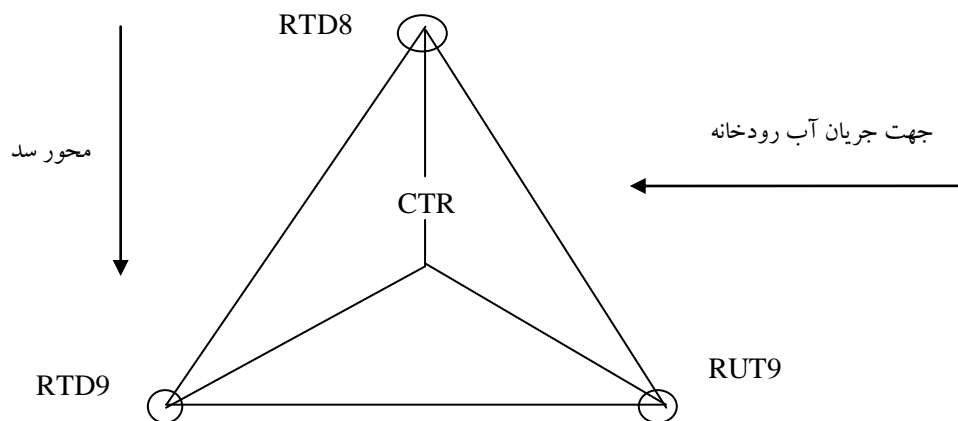
عمق (متر)	۱-۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰	۲۰-۲۵	۲۵-۳۰	۳۰-۳۵	...
فشار مانومتر (atm)	۳	۵	۷	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸	

بر اساس تزریق آزمایشی می توان به نتایجی همچون موارد زیر دست یافت

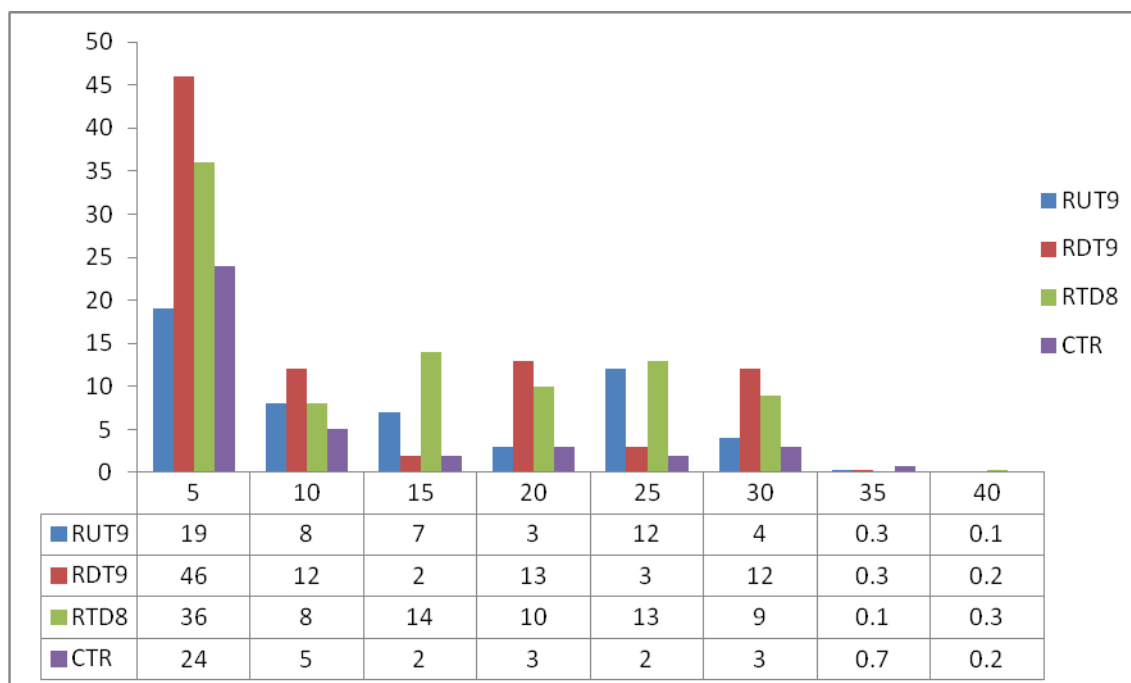
۱- بر اساس اطلاعات بدست آمده از حفاری گمانه های تزریق آزمایش سیمان در سنگ می توان گفت شاخص کیفی توده سنگ (RQD) در گمانه ها به طور کلی در رده متوسط تا خوب بوده است.

۲- در نمودارهای ۱ و ۲ تغییرات نفوذپذیری بر حسب عمق در گمانه های تزریق آزمایشی ارائه شده است. در موقعیت تزریق آزمایشی (تکیه گاه راست) بخش های ابتدایی به دلیل وجود لایه های سست و هوازده نفوذپذیری نسبتاً بالایی داشته و با افزایش عمق و وضعیت مناسب لایه ها نفوذپذیری کمتر شده است. تاثیر دوغاب پس از تزریق اولین گمانه باعث کاهش نفوذپذیری شده است. به عنوان مثال در گمانه RTD9 در مقطع اول با توجه به لوژان ۴۶ خوردند گمانه ۱۰۶ کیلوگرم بر متر بوده است در صورتی که در مقطع دوم به دلیل تزریق مناسب مقطع اول میزان نفوذپذیری و خوردند به ترتیب به میزان ۱۲ و ۵۰ کیلوگرم بر متر کاهش یافته است. نتایج گمانه کنترلی

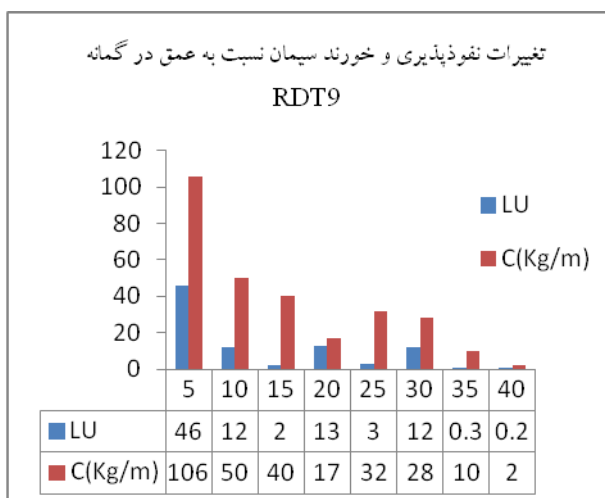
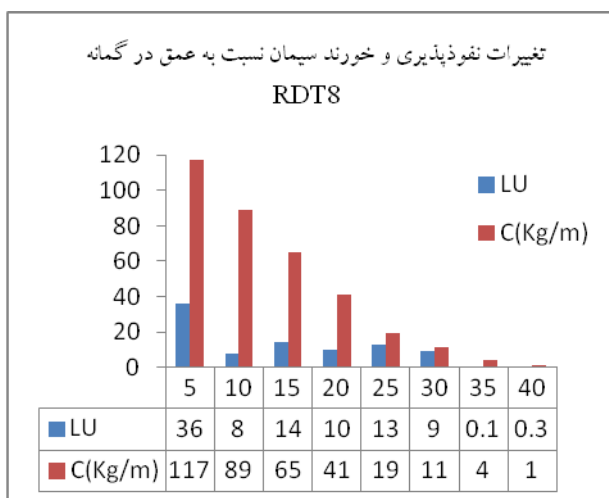
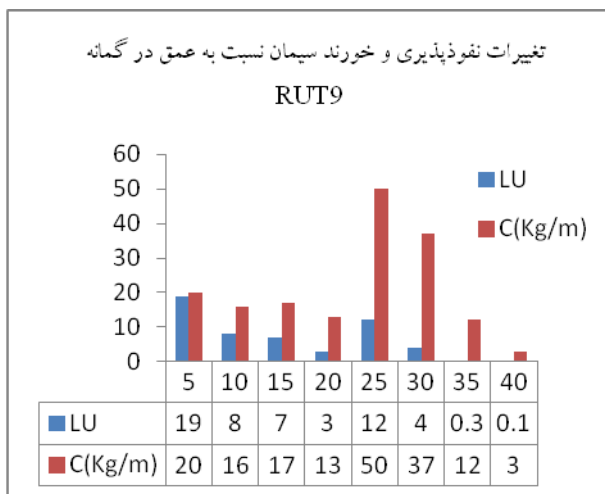
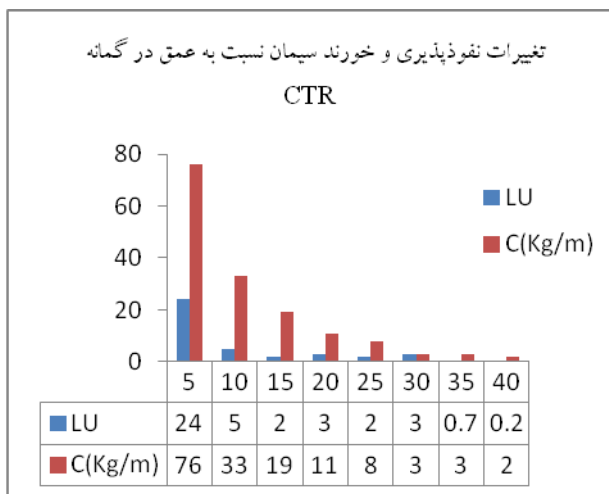
CTR که در مرکز مثلث حفاری شده است، نشان می‌دهد که نفوذپذیری توده سنگ در اعماق ۰-۲۰ متر در حد متوسط و در سایر قطعات توده سنگ کاملاً نفوذ ناپذیر است. نحوه آرایش گمانه‌های تزریق آزمایشی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نحوه آرایش گمانه‌های تزریق آزمایشی



نمودار ۱- تغییرات نفوذپذیری بر حسب عمق در گمانه‌های تزریق آزمایشی



نمودار ۲- تغییرات نفوذپذیری و خوردند سیمان نسبت به عمق در گمانه‌های تزریق آزمایشی

فشار، مواد و سایر خصوصیات تزریق

یکی از موارد مهم در کارآیی عملیات تزریق و موفقیت آمیز بودن آنها، فشار تزریق است. فشار تزریق باید به گونه‌ای انتخاب شود که ضمن فراهم آوردن شرایط مناسب جهت پرکردن درزه‌ها و شکاف‌ها از ایجاد شکست هیدرولیکی و تخریب آنها جلوگیری نماید. به دلیل پراکندگی و غیر هم جهت بودن درزه‌ها در ساختگاه سد سرابی بعد از جریان خطی، جریان اتساعی در توده سنگ‌ها به وفور دیده می‌شود. با توجه به اینکه نوع جریان که در تعیین میزان فشار در طرح تزریق موثر است، در سد سرابی جهت رسیدن به تزریق مطلوب و با توجه به نتایج اعمال فشار تست آب، تزریق گمانه‌های اکتشافی و با توجه به وضعیت درزه‌ها و مقاومت آنها، فشار اعمال شده در گمانه‌های پرده آب بند حاکی از این است که فشارهای اعمال شده در گمانه‌های اکتشافی حین اجرا بیش از فشارهای اعمالی در گمانه‌های تزریق آزمایشی باشد. به دلیل فراوانی زیاد شکستگی‌ها و غیر هم جهت بودن و بازشدگی نسبتاً متوسط درزه‌ها اعمال فشارهای اخذ

شده از تزریق آزمایشی نتوانست نتیجه مطلوبی را در تزریقات مراحل اول و دوم ارائه نماید به گونه‌ای که گمانه‌های مرحله سوم و حتی کنترلی نیز دارای خوردند دوغاب نسبتاً بالایی بودند. با توجه به ساختارهای زمین شناسی در محل ساختگاه تغییر اساسی در طراحی و آرایش گمانه‌های پرده آب بند صورت گرفت که در شکل ۲ قابل مشاهده است. در جدول ۵ مقایسه ای از فشار اعمال شده در تزریق آزمایشی و اجرایی گمانه‌های پرده آب بند ارائه شده است. با توجه به اطلاعات به دست آمده از تزریق آزمایشی، نتایج جدول ۳ و داده‌های ژئوتکنیکی در رابطه با مواد تزریق نتایج زیر به دست می‌آید.

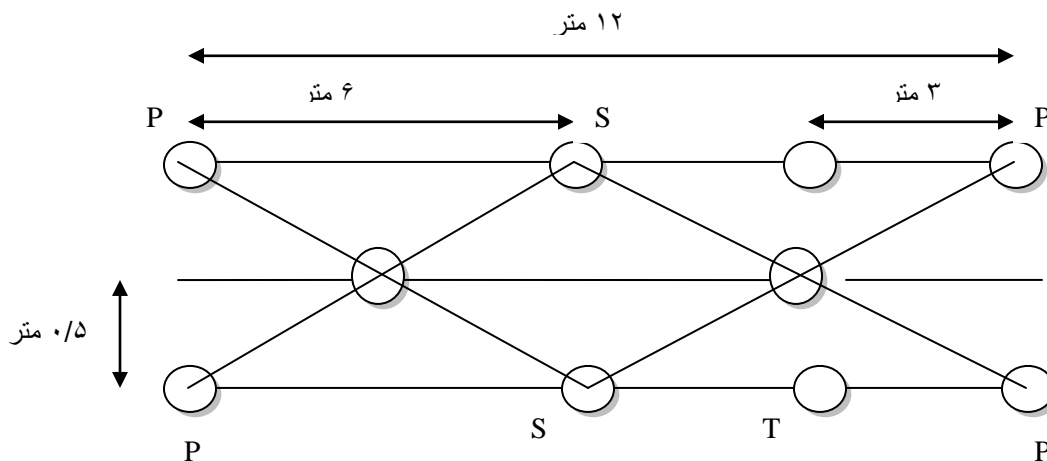
۱- نسبت پیشنهادی دوغاب در مقاطع با نفوذپذیری کم تا متوسط برابر ۳:۱ و ۲:۱ می‌باشد که با افزایش نفوذپذیری این نسبت کاهش یافته تا به ۱:۱ هم خواهد رسید. به عنوان ترکیب شروع تزریق از سیمان ۳ تا ۶ درصد بنتونیت استفاده می‌گردد.

۲- با توجه به خصوصیات درزه و شکستگی‌ها و ملاک آب بندی، سیمان مورد نیاز برای تزریق می‌بایست از نوع تیپ II با بلیت بالای $\frac{CM^2}{Kg}$ ۶۰۰۰ باشد.

۳- با توجه به میزان بازشدگی و احتمال گیرش اولیه بالای دوغاب و نرسیدن به تزریق مطلوب در ساختگاه از فوق روان کننده‌ها دیرگیر نیز در ترکیبات دوغاب استفاده گردید.

جدول ۵- مقایسه فشار اعمال شده در تزریق آزمایشی و فاز اجرایی گمانه‌های پرده آب بند

عمق (متر)	۱-۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵	۱۵-۲۰	۲۰-۲۵	۲۵-۳۰	۳۰-۳۵	۳۵-۴۰	۴۰<
فشار مانومتر اعمال شده در تزریق آزمایشی: atm	۳	۵	۷	۱۰	۱۲	۱۵	۱۸	۲۲	
فشار مانومتر اعمال شده در مرحله اجرایی: atm	۸	۱۰	۱۵	۲۱	۲۷	۳۱	۳۵	۳۵	۳۵



شکل ۲ - آرایش و توالی گمانه‌ها در پرده تزریق پیشنهادی

نتیجه گیری

ساختار زمین شناسی و شرایط ژئوتکنیکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار در فرایند تزریق هستند. به طوری که با اخذ اطلاعات مناسب از ساختگاه بر مبنای اکتشافات صحرائی می تواند حتی بعد از اتمام مراحل مطالعاتی و در دوره اجرا به ایجاد شناخت کاملی از مجاری تمرکز نشست، عمق لایه ها و دیگر پارامترهای منتهی شود چرا که این پارامترها تاثیر مستقیم در مواردی از قبیل پرده تزریق، آرایش گمانه ها و غیره خواهد داشت.

۱- با توجه به نتایج حفاری ها کیفیت توده سنگ های ساختگاه در حد متوسط تا خوب متغیر است و میانگین شاخص کیفی توده سنگ -ها ۷۹ درصد ارزیابی شده است. همچنین با افزایش عمق از میزان هوازدگی کاسته شده و بر این مقدار افزوده می شود.

۲- نفوذپذیری توده سنگ به میزان توسعه درزه های باز بستگی دارد، که با مطالعه مقاطع گمانه ها می توان گفت حدود ۸۴ درصد قطعات نفوذپذیر، مقاطعی هستند که درزه های باز نسبتا توسعه یافته دارند.

۳- از کل ۱۰۵ قطعه آزمایش شده گمانه های محل ساختگاه تقریبا ۳۵ درصد کل رفتارها مربوط به رفتار خطی و حدود ۲۷ درصد مربوط به رفتار اتساعی و شستشویی هستند.

۴- پرده آب بند مذکور سه ردیفه به گونه ای که دو ردیف از گمانه ها در فاصله ۰/۵ متری از محور در قسمت بالادست و پایین دست با زاویه ۲۰ درجه نسبت به قائم و آزمون N_{100} در جهات مخالف و فواصل طولی ۱/۵ متری از هم قرار گرفته اند و گمانه های پرده ردیف سوم به صورت قائم بر روی محور سد به فاصله ۱/۵ متری از هم حفاری می گردند.

منابع

۱- راززاده ح، فاطمی عقدا س م. و نورزادع، (۱۳۹۰). ارزیابی طراحی پرده آب بند سد خاکی البرز با استفاده از نفوذپذیری و خوردند سیمان، نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد ۴، شماره ۲ و صفحات ۹۷۰-۹۵۵

2- Ewert, k.f (1997). "Permibility, Groutability and Grouting of rock related to dam sites", part 4, Groutability and Grouting of rock, dam engineering, vol. 8, issue 4, pp. 271-325.

3-Houlsby. A.C. (1990). "Constraction and Design of Cement Grouting", John Willy & Sons, Inc. New York