

ارزیابی و تحلیل ارتباط نتایج آزمون فشار آب و خوردند دوغاب سیمانی

در عملیات تزریق سد سیمره

حسن بخشنده امنیه^{۱*}، مجید مسعودی^۲

پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۲۳

دریافت مقاله: ۹۳/۰۷/۲۷

چکیده

یکی از ویژگی‌هایی که در بررسی ژئوتکنیکی توده‌سنگ‌ها ارزیابی می‌گردد، نفوذپذیری است که از آزمون فشار آب و عدد لوژن تعیین می‌گردد و از آن در تعیین تزریق‌پذیری ساختگاه سد و تونل و پیش‌بینی مقدار خوردند استفاده می‌گردد. در این تحقیق، با استفاده از اطلاعات سد سیمره، ارتباط بین عدد لوژن و خوردند تحلیل گردید و تاثیر وضعیت کیفی توده‌سنگ و عمق مقطع، بر این رابطه مطالعه گردید. نتایج نشان داد بر اساس مقادیر RQD، در گروه سنگ‌های با کیفیت بسیار خوب با ضریب همبستگی ۰/۸۲ بیشترین ارتباط بین لوژن و خوردند وجود دارد و براساس عمق نیز، در مقاطع بسیار عمیق با ضریب ۰/۸۵، بالاترین همبستگی دیده می‌شود. علت همبستگی بالا در سنگ‌های با کیفیت مطلوب و در اعماق زیاد که تعداد درزه‌ها و میزان بازشدگی محدود است، مسیرهای مشخص نفوذ سیال است. در نتیجه نفوذپذیری با روندی یکنواخت برای آب و دوغاب همراه است. در سنگ‌های ضعیف با وجود احتمالی پرشدگی‌های رسی، شکستگی و بازشدگی‌های مختلفی دیده می‌شود که باعث نفوذ متفاوت آب نسبت به دوغاب می‌شود. لذا در سنگ‌های با کیفیت بسیارخوب یا در اعماق زیاد، آزمون فشار آب می‌تواند در پیش‌بینی میزان تزریق‌پذیری استفاده گردد.

کلید واژه‌ها: تزریق، خوردند، لوژن، RQD، عمق مقطع

۱. دانشیار، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان Bakhshandeh@kashanu.ac.ir

۲. دانشجوی دکترای تخصصی معدن، گروه معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

در منطقه مورد مطالعه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به منظور تعیین کیفیت توده سنگ موثر است.

۴- شکل و گسترش درزه‌ها: شکل درزه‌ها عمدتاً به نوع سنگ و ساختار آن وابسته است. در سنگ یکنواخت مانند گرانیت یا سنگ‌های نازک و لایه‌ای که دارای ترکیب یکنواخت هستند صفحات درزه بیشتر دایره‌ای یا بیضی شکل با محور افقی طولانی است. طول درزه اثر مهمی بر گسترش دوغاب در توده سنگ دارد (James Warner, 2004). هر چه طول درزه کوتاه‌تر باشد به چال‌های تزریق بیشتری نیاز خواهد بود. بنابراین تعیین طول درزه‌ها در طراحی و بهینه‌سازی آزمون لوژن و تزریق نقش مهمی دارد.

۵- فاصله‌داری درزه‌ها: در عملیات نفوذ آب و دوغاب، درزه‌های باز و تزریق‌پذیر مورد توجه هستند. هر اندازه فاصله‌داری این درزه‌ها بیشتر باشد عملیات ساده‌تر انجام می‌گردد. زیرا فاصله‌داری کم درزه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل نشست سطحی، ریزش چال‌ها می‌گردد. این امر باعث بالارفتن هزینه تزریق شده و چه بسا نیازمند استفاده از ترمیم سطحی ویژه با روش غیرمعمول تزریق است (Ewert, 1998).

۶- پرشدگی درزه‌ها: این پارامتر می‌تواند توسط گرادیان هیدرولیکی بالا فرسایش یافته و باعث افزایش تست فشار برکنش شود. نفوذ آب و دوغاب در این حالت مشکل‌تر از حالت معمولی است. استفاده از شکست هیدرولیکی برای تحکیم پرکننده‌های ضعیف توصیه شده است (Houlsby, 1999).

۷- بازشدگی درزه‌ها: این عامل یکی از مهمترین ویژگی‌های درزه است که نقش مهمی در میزان نفوذ سیال در توده سنگ دارد و می‌توان میزان آن را از مغزه‌های حفاری تعیین نمود. بطور طبیعی با افزایش این پارامتر، حجم خوردن آب و دوغاب افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، با توجه به میزان آب‌خوری و تزریق‌پذیری توده سنگ درزه‌دار، ارتباط بین این دو پارامتر و حالت‌های مختلف موجود بین آنها بررسی شده است. همچنین با استفاده از نتایج آزمون فشار آب و عملیات تزریق ساختگاه سد

در پروژه‌های سدسازی و تونل، بررسی وضعیت آب‌گذری ساختگاه، مهم‌ترین بخش فازهای شناسایی، اجرا و بهره‌برداری است که به شرایط زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژی توده سنگ وابسته است. میزان نفوذپذیری توده سنگ با استفاده از آزمون فشار آب و عدد لوژن تعیین می‌گردد. از نتایج این آزمون در عملیات تزریق استفاده می‌شود. این عملیات، به منظور بهبود ساختگاه از لحاظ نشست آب و تحکیم توده سنگ انجام می‌شود. بررسی رابطه بین نتایج آزمایش فشار آب و عملیات تزریق از اهمیت بالایی برخوردار است و باعث می‌شود با تعیین دقیق‌تر میزان تزریق‌پذیری توده سنگ و بهینه نمودن عملیات تزریق، پروژه از لحاظ فنی و اقتصادی به خوبی هدایت شود (Nonveiller, 2007).

بطور کلی ویژگی ناپیوستگی‌ها، میزان نفوذپذیری توده سنگ در عملیات آزمون فشار آب و تزریق را تحت تاثیر قرار می‌دهد که شناخت و بررسی آنها در روند انجام هر دو عملیات موثر است. مهم‌ترین خصوصیات عبارتند از:

۱- شیب و امتداد درزه‌ها: این دو پارامتر، فاکتورهای اصلی در مطالعات درزه‌نگاری می‌باشد. امتداد درزه، سطح مشترک سطح درزه و سطح افق می‌باشد. صفحه قائم بر امتداد درزه یک فصل مشترک با سطح افق درزه و یک فصل مشترک با سطح دارد که زاویه دو فصل مشترک شیب درزه می‌باشد (Widmann, 2004).

۲- زبری درزه: این ویژگی بر نحوه حرکت دوغاب در سطح درزه موثر است. افزایش زبری باعث بالارفتن میزان اصطکاک بین سطح درزه و دوغاب و بدنبال آن افت شدیدتر فشار سیال حین حرکت در ناپیوستگی خواهد شد. این مسأله باعث کاهش شعاع تاثیر و در نتیجه افت کارایی آزمون لوژن و تزریق می‌شود.

۳- ضریب کیفیت سنگ: عبارت از درصدی از کل مغزه باز یافت شده است که در آن قطعات بکر و سالم سنگ، طولی برابر یا بیش از ۱۰ سانتی‌متر دارند. تعیین میزان این ضریب

در متر است. در واقع پس از اتمام موفقیت آمیز آزمون فشار آب، در هر پله سه پارامتر فشار مؤثر در مقطع، P ، دبی ویژه، Q و مقدار لوژن، Lu ، مشخص می‌شود. در نتیجه به تعداد پله‌های آزمایش، زوج‌های (P, Q) وجود خواهد داشت. مقادیر P و Q باید الزاماً به ترتیب برحسب MPa و $lit/min.m$ باشند (Dalmalm, 2010). با در نظر گرفتن این آحاد می‌توان مقدار لوژن را به صورت میزان نرخ جذب آب در یک دقیقه در طول واحد مقطع، تحت فشار ۱ مگاپاسکال، تعریف کرد. یکای پارامتر Lu به صورت $lit/m.min.MPa$ است که با نام لوژن نیز معرفی شده است. به عنوان مثال این که یک محدوده از سنگ پی دارای نفوذپذیری ۱ لوژن باشد بدین معناست که در این محدوده توده سنگ در یک مقطع ۱ متری توانایی پذیرش ۱ لیتر آب در ۱ دقیقه تحت فشار ۱ مگاپاسکال را داراست (Hakansson, Hassler, Still, 2000).

۳. مفهوم خوردند

خوردند، V ، مقدار حجم یا وزن دوغابی است که در حین فرآیند تزریق، در واحد طول مقطع جذب شده است. در جدول ۱ ارتباط مشخصات هیدرولیکی مسیره‌های آب‌بر در توده‌سنگ و چگونگی توزیع جذب دوغاب، بیان شده است. به منظور مقایسه بهتر نفوذپذیری، مقادیر تحت فشار کم MPa ۰/۱ نیز ارائه شده است.

سیمره، ارتباط بین این پارامترها بر اساس شاخص کیفیت سنگ و عمق مقاطع تزریق، تحلیل شده است.

۲. آزمون فشار آب (WPT)

تعیین تراوایی سنگ‌های درزه‌دار معمولاً به وسیله‌ی آزمایش‌های برجا صورت می‌گیرد. که آزمایش پمپاژ آب (لوژن) و آزمایش‌های پر کردن گمانه‌ها با آب (لفران) کاربرد بیشتری دارد. در آزمایش پمپاژ آب که معمولاً با نام آزمون فشار آب (WPT) خوانده می‌شوند، آب در مقطع خاصی از گمانه و تحت فشار متغیری تزریق می‌شود. این آزمون به عنوان بهترین روش ارزیابی وضعیت هیدرولیکی یک مقطع شناخته شده است. آزمون لوژن در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی به همراه عملیات حفاری همچنین در عملیات حفاری-تزریق قبل از اجرای عملیات تزریق دوغاب، در یک مقطع انجام می‌شود (Shroff, Shal, 2002). نتایج این آزمون، داده‌های مستقیم و قابل اعتمادی در ارتباط با برخی از مشخصات هیدرولیکی چون میزان پرشدگی درزه‌های هادی، زبری آن‌ها و شعاع تأثیر جریان در درزه‌ها ارائه نمی‌نماید. مقدار لوژن در پله i ام، Lu_i ، با رابطه ۱ محاسبه می‌گردد.

$$Lu_i = \frac{Q_i}{P_i}$$

که در آن P_i ، فشار مؤثر در مقطع تزریق در پله‌ی i ام برحسب مگاپاسکال و Q_i ، دبی ویژه در پله i ام برحسب لیتر بر دقیقه

جدول ۱. دسته‌بندی اسمی (کیفی) مقادیر خوردند و ارائه‌ی مقدار جذب آب مورد انتظار معادل آن (شرکت مهندسی مشاور استراتوس، ۱۳۸۵)

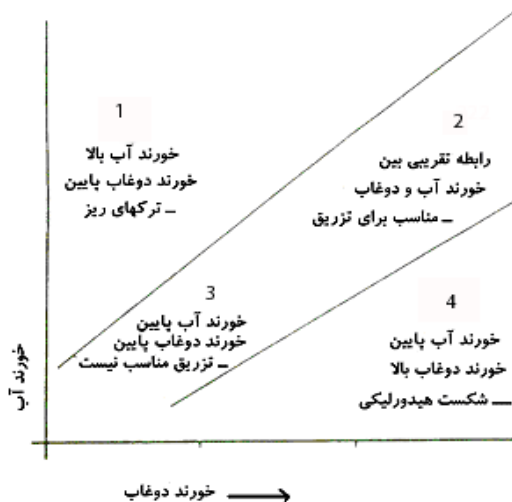
مقادیر نرخ جذب	خوردند (Kg/m)	وضعیت خوردند
نرخ WPT (Lit.min-1.m-1) در 0.1MPa	نرخ WPT (Lit.min-1.m-1) در 1MPa	
۰/۱ تا ۵	۱ تا ۲۰	کمتر از ۵۰
۰/۱ تا ۱۰	۱ تا ۳۰	۵۰ تا ۱۰۰
۰/۵ تا ۲۰	۵ تا ۴۰	۱۰۰ تا ۵۰۰
۵ تا ۴۰	بیش از ۴۰	۵۰۰ تا ۱۰۰۰
۱۰ تا ۴۰	بیش از ۴۰	۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰
۲۰ تا ۴۰	بیش از ۴۰	بیش از ۲۰۰۰
		عملاً نامحدود

۴. ارتباط خوردند و عدد لوژن

میزان خوردند دوغاب سیمانی یکی از مهم ترین مشخصات مقاطع تزریقی است. بررسی ارتباط آن با تست لوژن یا بطور دقیق تر مقادیر نرخ WPT از اهمیت بالایی برخوردار است (Tolppanen, 2003). ایجاد یک ارتباط منطقی و عملی بین عدد لوژن و خوردند منجر به دستیابی به مدل پیش بینی کننده ی مقدار خوردند در مقاطع آتی می شود که در تخمین میزان سیمان مصرفی و برآورد هزینه ی تزریق بسیار پر اهمیت است. همچنین در تعیین امکان یا ضرورت اجرای عملیات تزریق کارگشا است (Byle, M.J., 2001).

آزمون های فشار آب نه تنها باید امکان برآورد نفوذپذیری، بلکه امکان تخمین تزریق پذیری و میزان آب بندی حاصل از تزریق را فراهم کنند. اورت در سال ۱۹۹۸ روابط مختلف بین خوردند آب و دوغاب را بصورت شکل ۱ نشان داد. باتوجه به این شکل حالت های زیر را می توان بین لوژن و خوردند دوغاب سیمانی در نظر گرفت:

۱- توده سنگ هایی که در آن خوردند آب بالا اما خوردند دوغاب پایین است. این توده سنگ ها حاوی تعداد زیادی ترک های ریز می باشند و عملاً قادر به جذب مقدار زیادی آب بوده اما خوردند دوغاب آنها متناسب با میزان جذب آب نیست.



شکل ۱. روابط مختلف بین خوردند آب و دوغاب (Barton, 2002).

دلیل این امر می تواند شکست هیدرولیکی توده سنگ به دلیل فشار بالای تزریق دوغاب باشد.

با توجه به توضیحات بالا می توان گفت اجرای برنامه تزریق تنها در محدوده ۲ ارزشمند و مفید واقع خواهد شد. در حالت ۱، احداث یک پرده آب بند مناسب به علت خوردند کم دوغاب میسر نیست. در حالت ۴ نیز به علت شکست مصنوعی محیط و افزایش فضای هادی ناپوستگی ها، میزان خوردند دوغاب افزایش می یابد. در این حالت، معضل صرف زمان و هزینه زیاد را به دنبال خواهد داشت، علاوه بر آن، ایجاد یک پرده تزریق مناسب هم چنان مورد تردید باقی خواهد ماند (Garshol, 2003).

۲- توده سنگ هایی که در آن ها خوردند آب و دوغاب، هر دو بالا است، در این حالت یک رابطه ی تقریبی بین خوردند آب و دوغاب وجود دارد. این حالت وقتی قابل انتظار است که بازشدگی درزه ها برای ورود و انتقال سوسپانسیون های دوغاب به اندازه ی کافی بزرگ باشد.

۳- توده سنگ هایی که در آن ها خوردند آب و دوغاب هر دو پایین است. درزه ها در این حالت اکثراً بسته و یا دارای بازشدگی بسیار کمی هستند. تزریق در این حالت، به جز در موارد خاص، غیر منطقی و در بیشتر شرایط نامطلوب است.

۴- توده سنگ هایی که خوردند آب پایین و خوردند دوغاب بالا دارند. این حالت به لحاظ زمین شناسی قابل توجه نیست.

۵. موقعیت جغرافیایی سد سیمره

سمت شرق، این ساختار با تغییر نسبتاً ناگهانی در محدوده مقابل روستای تلخاب مجدداً تبدیل به یال پرشیب طاقدیس می‌گردد. در یک بررسی کلی و با توجه به مجموعه اطلاعات جمع‌آوری شده از بازدیدهای صحرایی و نیز نقشه‌های زمین‌شناسی موجود چنین استنباط می‌گردد که جناح راست طاقدیس راوندی (نسبت به رودخانه) در یال شمالی پرشیب و در یال جنوبی کم‌شیب است، در حالی که در جناح چپ با فاصله گرفتن از رودخانه یال شمالی کم‌شیب و یال جنوبی پرشیب‌تر می‌شود و در مجموع ساختار کاملاً نامتقارنی پدید می‌آید.

۵-۲. گسل‌های ساختگاه

به‌طور کلی تا پایان مطالعات مرحله دوم ۱۳ گسل اصلی در محل سد شناسایی شده است. بررسی عکس‌های هوایی جدید همراه با پیمایش‌های صحرایی نشان می‌دهد که تعدادی بزرگ درزه یا گسله امتداد لغز با طول قابل توجه در راستایی مورب نسبت به محور طاقدیس در هر دو یال طاقدیس راوندی وجود دارند که با توجه به شرایط زمین‌شناسی منطقه می‌توان آنها را از نوع درزه‌های برشی دانست. به استثنای لایه‌بندی دو دسته درزه اصلی و یک دسته درزه فرعی، مجموعه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ را شکل می‌دهند. مشخصات هندسی این دسته درزه‌ها بشرح جدول ۲ می‌باشد. بالای شکستگی‌ها و گسل‌های محدوده محور سد می‌باشد که این مهم در طراحی پرده آب‌بند سد در نظر گرفته شده است.

ساختگاه سد و نیروگاه سیمره بر روی رودخانه سیمره در حدود ۴۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان دره‌شهر از استان ایلام و ۷/۵ کیلومتری روستای چشمه شیرین واقع بوده و هدف از احداث آن استفاده از پتانسیل بالقوه نیروی برق رودخانه سیمره است. سد سیمره به صورت یک سد بتنی دو قوسی نازک به ارتفاع ۱۳۰ متر از بستر فعلی رودخانه (و حدود ۱۸۰ متر از سنگ بستر) طراحی شده است. رقوم تاج سد ۷۳۰ متر بوده و در رقوم نرمال سطح آب در ارتفاع ۷۲۰ متری از سطح دریا‌های آزاد قرار دارد. طول تاج سد در رقوم تاج ۲۰۲ متر می‌باشد. گنجایش مخزن سد ۳/۲۱۵ میلیارد مترمکعب می‌باشد.

۵-۱. زمین‌شناسی ساختمانی ساختگاه سد سیمره

محل سد سیمره در دامنه شمالی طاقدیس راوندی قرار گرفته است. محور این طاقدیس به طور عمومی روندی شمال غرب- جنوب شرقی داشته که در محدوده ساختگاه به واسطه عملکرد نیروهای تکتونیکی روند آن به صورت موضعی شرقی- غربی می‌گردد. زاویه شیب یال شمالی که محور سد در آن واقع شده تدریجاً افزایش می‌یابد. بطوری که از ۱۵ تا ۲۰ درجه در فاصله ۳۰۰ متری محور طاقدیس به ۳۰ تا ۳۵ درجه در محدوده محور سد رسیده و نهایتاً به سمت شمال در محلی که تشکیلات آسماری توسط رسوبات دشت سیلابی و یا گچساران پوشیده می‌شود به ۴۵ تا ۵۰ درجه می‌رسد. یال جنوبی طاقدیس منظم‌تر می‌باشد و زاویه شیب لایه‌ها کلاً بین ۱۰ تا ۲۵ درجه تغییر می‌کند. این در حالی است که درگذر به

جدول ۲. دسته درزه‌های اصلی ساختگاه سیمره همراه با مشخصات هندسی آنها (شرکت مهندسی مشاور استراتوس، ۱۳۸۵)

دسته درزه	جهت شیب	شیب
دسته درزه اصلی J1 (موازی محور طاقدیس)	۱۷۵-۱۷۰	۶۵-۷۵
دسته درزه اصلی J2 (عمود بر محور طاقدیس)	۲۷۵-۲۷۰	۸۰-۹۰
دسته درزه فرعی J3	۱۳۰-۱۲۰	۷۰-۸۰
لایه بندی	۰۲۰-۰۱۰	۳۵-۲۵

مطالعات مرحله اول و دوم از نقطه نظر شاخص کیفی سنگ، توده سنگ شرایط خوبی را ارائه می‌دهد. میانگین R.Q.D در کلیه گمانه‌های حفر شده در جناح راست در رده خوب (۷۶) تا عالی (۹۶) می‌باشد. گمانه‌های تکیه‌گاه چپ نیز در رده خوب (۷۹) تا عالی (۹۳) و گمانه‌های بستر نیز در رده خوب (۷۴) تا عالی (۹۴) قرار دارند. متوسط R.Q.D برای توده سنگ جناح راست، چپ و بستر رودخانه به ترتیب عبارت است از: ۸۷، ۸۸ و ۹۰ درصد که نشان‌دهنده شرایط خوب تا عالی می‌باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که در زون‌های گسله شاخص کیفی کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌نماید. نمونه‌های بارز آن گمانه‌های HM-3 و HM-7 می‌باشد که به ترتیب مقدار شاخص کیفی متوسط سنگ در حد ۷۶ و ۸۰ را نشان می‌دهند. از دیگر نکات مهم در تغییرات درصد شاخص کیفی سنگ، افزایش درصد شاخص، با دور شدن محل گمانه از دامنه‌های پرشیب مشرف به دره می‌باشد که علت این امر را باید در ایجاد درزه‌های رهایی در توده سنگ و کلاً تمایل سنگ به نوعی انبساط در اثر حذف بار رویی به واسطه عملکرد فرسایشی رودخانه جستجو نمود. این مورد به وضوح در گمانه‌های HM-10 (نزدیک پرتگاه) و HM-21 (دور از پرتگاه) در تکیه‌گاه راست با R.Q.D به ترتیب ۸۶ و ۹۱ و نیز گمانه‌های HM-5 (نزدیک پرتگاه) و HM-1 (دور از پرتگاه) در تکیه‌گاه چپ با R.Q.D به ترتیب ۸۵ و ۹۳ کاملاً مشهود می‌باشد.

۳-۵. مروری بر مطالعات مکانیک سنگ ساختگاه سد سیمره مجموعه فعالیت‌های انجام شده جهت برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شامل برداشت اطلاعات ناپیوستگی و سایر مشخصات ساختمانی توده سنگ‌ها، حفاری‌های اکتشافی، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیک سنگ و آزمایش‌های برجای مکانیک سنگ می‌باشد. بر اساس درزه‌نگاری تفصیلی و دقیق سطحی و غیرسطحی که طی فاز اول مطالعات انجام شده است، مشخصات سیستم درزه‌های موجود در ساختگاه سد در جدول ۳ توضیح داده شده است. لازم به ذکر است که: ۱- لایه بندی فاقد هرگونه بازشدگی می‌باشد و بر اساس بررسی مغزه‌های بدست آمده از حفاری اکتشافی عموماً حالت صفحه‌ای - زبر دارد. ۲- دسته درزه‌های J₁ و J₂ و J₃ در ۶۵ درصد موارد دارای سطح درز مواج - زبر و بازشدگی کمتر از ۲ میل متر دارند. ۳- با توجه به روند چین خوردگی‌های اصلی منطقه و آنالیز آماری انجام شده دسته درزه‌های J₁ و J₂ کم و بیش به موازات و عمود بر محور چین خوردگی شکل گرفته‌اند و می‌توانند معرف سیستم درزه‌های کششی باشند.

۵-۴. ارزیابی ویژگی‌های ژئوتکنیکی

به منظور بررسی و ارزیابی پارامترهای ژئوتکنیکی محل سد و سازه‌های وابسته، اطلاعات به دست آمده از گمانه‌های حفاری شده در مطالعات مرحله اول مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. این نتایج مشتمل بر تغییرات شاخص کیفی سنگ (R.Q.D) در هرگمانه و تغییرات کلی آن نسبت به عمق می‌باشد. بطور کلی باتوجه به مجموع نتایج به دست آمده از

جدول ۳. مشخصات سیستم درزه‌های موجود در توده سنگ‌های سد سیمره (شرکت مهندسی مشاور استراتوس، ۱۳۸۵)

دسته درزه	شیب	جهت شیب	فاصله داری (سانتی‌متر)	وضعیت آب (%)		پرشدگی (%)				
				مرطوب	خشک	رس	۱- کلسیت	خرده سنگ	لوم	فاقد پرشدگی
J ₁	۶۵-۷۵	۱۷۰-۱۷۵	۵۵	-	۱۰۰	۲۶	۱۸	۳	۳۴	۱۹
J ₂	۸۰-۹۰	۲۷۰-۲۷۵	۶۵	-	۱۰۰	۲۶	۱۵	۶	۳۸	۱۵
J ₃	۷۰-۸۰	۱۲۰-۱۳۰	۴۰	-	۱۰۰	۲۰	۱۹	۳	۳۳	۲۵
لایه بندی	۲۵-۳۵	۱۰-۳۰	۱۳۵		۱۰۰					۱۰۰

سد سیمره بررسی شده که در جدول ۴ نشان داده شده است. در این جدول Depth، معرف عمق مقطع تزریقی، RQD، شاخص کیفیت سنگ، Lu، عدد لوژن، V، حجم خوردند هستند.

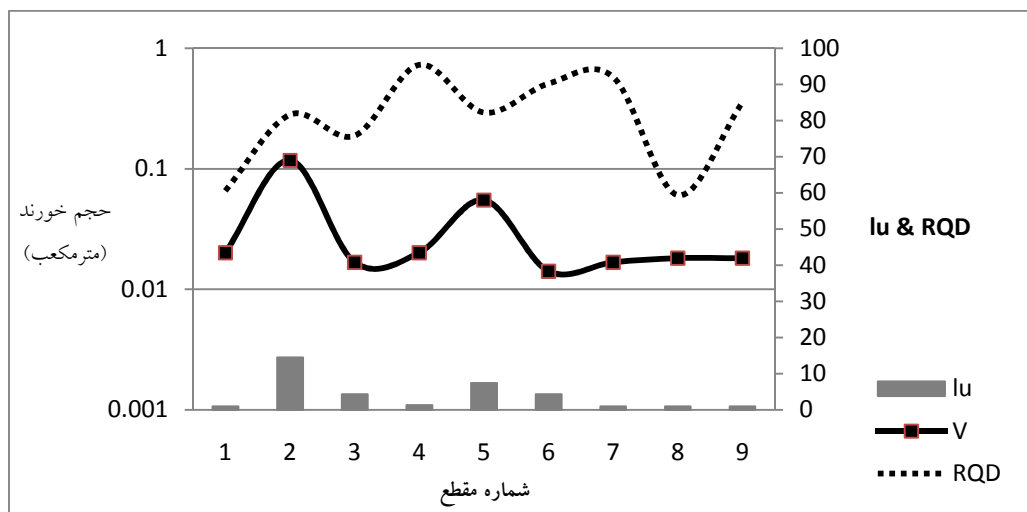
۶. تحلیل و ارزیابی روند تغییرات مقادیر خوردند و لوژن براساس نتایج اطلاعات سد سیمره
در این بخش ارتباط حجم خوردند و عدد لوژن بر اساس نتایج ثبت شده حاصل از آزمایش‌های فشار آب و عملیات تزریق در گمانه‌های C-191، P-22، P-20، P-23 و P-17 در ساختگاه

جدول ۴. اطلاعات اکتشافی و تزریق ثبت شده در سایت سد سیمره (شرکت مهندسی مشاور استراتوس، ۱۳۸۵)

C-191				p-23			
عمق مقطع (متر)	RQD	لوژن	حجم خوردند (مترمکعب)	عمق مقطع (متر)	RQD	لوژن	حجم خوردند (مترمکعب)
۰-۵	۶۰/۶	۱	۰/۰۲۰۰۸۸	۰-۵	۴۴/۸	۵۱/۳	۰/۱۸۳۳۱۹
۵-۱۰	۸۱/۶	۱۴/۵	۰/۱۱۷۳۰	۵-۱۰	۵۴	۷۲/۲	۰/۱۳۰۹۷۳
۱۰-۱۵	۷۵/۸	۴/۳	۰/۰۱۶۷۲۶	۱۰-۱۵	۸۳/۴	۱۰/۳	۰/۰۲۸۳۱۹
۱۵-۲۰	۹۵/۴	۱/۳	۰/۰۲۰۰۸۸	۱۵-۲۰	۸۴/۶	۵	۰/۰۲۰۶۶۴
۲۰-۲۵	۸۲/۲	۷/۴	۰/۰۵۴۹۵۶	۲۰-۲۵	۹۱	۴/۱	۰/۰۵۲۴۷۸
۲۵-۳۰	۹۰/۲	۴/۳	۰/۰۱۴۱۱۵	۲۵-۳۰	۸۷/۶	۹۵	۳/۳۰۳۵۴
۳۰-۳۵	۹۲	۱	۰/۰۱۶۷۲۶	۳۰-۳۵	۷۲/۴	۶/۱	۰/۰۷۹۲۹۲
۳۵-۴۰	۵۹/۴	۱	۰/۰۱۸۰۹۷	۳۵-۴۰	۹۲/۴	۱/۸۲	۰/۱۳۵۵۷۵
۴۰-۴۵	۸۵	۱	۰/۰۱۸۰۹۷	۴۰-۴۵	۹۴	۱	۰/۰۰۵۱۳۳
P-22				p-17			
عمق مقطع (متر)	RQD	لوژن	حجم خوردند (مترمکعب)	عمق مقطع (متر)	RQD	لوژن	حجم خوردند (مترمکعب)
۰-۵	۶۳/۸	۱۱/۴	۰/۰۲۲۹۶۵	۰-۵	۶۱	۱۹/۲۲	۰/۰۰۹۴۶۶۷
۵-۱۰	۹۲/۲	۴۱/۵	۰/۰۳۴۴۲۵	۵-۱۰	۸۰	۱۵/۷۴	۰/۰۰۹۴۶۶۷
۱۰-۱۵	۹۱	۲۰/۵	۰/۰۷۲۶۹۹	۱۰-۱۵	۸۰/۸	۵۲/۲۴	۰/۰۲۲۱
۱۵-۲۰	۷۳	۳۹/۴	۷/۷۴۳۳۳۳	۱۵-۲۰	۹۶/۸	۲/۹۴	۰/۰۱۵۷۸۳۳
۲۰-۲۵	۹۵/۴	۱	۰/۱۶۳۷۶۱	۲۰-۲۵	۵۷	۱۱/۰۷	۰/۰۱۵۷۸۳۳
۲۵-۳۰	۹۴	۳/۱	۰/۱۱۳۴۵۱	۲۵-۳۰	۷۶/۲۸	۱	۰/۰۱۲۶۲۵
۳۰-۳۵	۹۴/۲	۷	۰/۱۰۳۴۰۳	۳۰-۳۵	۷۶	۱	۰/۰۰۹۴۶۶۷
۳۵-۴۰	۹۰/۶	۱	۰/۰۰۵۷۰۸	۳۵-۴۰	۴۴/۴	۵/۱۶	۰/۰۱۲۹۳۵
۴۰-۴۵	۹۶/۲	۱	۰/۰۱۱۴۶	۴۰-۴۵	۸۷/۸	۱	۰/۰۱۵۷۸۳۳
۴۵-۵۰	۸۸/۶	۶/۴	۰/۰۲۳۵۴	۴۵-۵۰	۶۱/۸	۱/۳۳	۰/۰۱۸۹۴۱۷
۵۰-۵۳	۴۵/۳	۱۸/۵	۰/۲۷۱۹۹۱	۵۰-۵۵	۷۸/۸	۱۰/۹	۰/۰۱۸۹۴۱۷
P-20				۵۵-۶۰	۷۲/۸	۳۳	۰/۰۱۷۳۳۳۳
عمق مقطع (متر)	RQD	لوژن	حجم خوردند (مترمکعب)	۶۰-۶۵	۷۶	۹/۵۳	۰/۰۱۲۶۲۵
۰-۵	۶۴/۴	۳/۸	۰/۰۱۳۴۵۱	۶۵-۷۰	۵۷	۲۰/۷۴	۲/۸۹۱۶۶۶۷
۵-۱۰	۸۹/۴	۲/۷	۰/۰۱۳۴۵۱	۷۰-۷۵	۶۴/۲	۵۴/۹	۹/۶۰۲۶۷۵
۱۰-۱۵	۹۴/۴	۲۲/۴	۰/۰۱۰۰۸۸	۷۵-۸۰	۹۴/۶	۷	۰/۱۳۲۵
۱۵-۲۰	۹۱/۴	۶۹/۹	۰/۵۳۹۸۲۳	۸۰-۸۵	۶۸/۴	۱/۳	۰/۰۹۴۷
۲۰-۲۵	۸۳/۸	۱	۰/۰۱۶۸۱۴	۸۵-۹۰	۹۲/۶	۲/۴	۰/۱۶۴۱۴۱۷
۲۵-۳۰	۷۵/۸	۲۲/۸	۸/۱۲۸۳۱۹	۹۰-۹۵	۹۶/۲	۱/۱	۰/۰۶۳۱۳۳۳
۳۰-۳۵	۵۱/۴	۱/۳۴	۰/۰۲۶۹۰۳	۹۵-۱۰۰	۹۱/۲	۱/۱	۰/۰۸۲۰۶۶۷
۳۵-۴۰	۹۸/۴	۱	۰/۰۲۳۵۴				
۴۰-۴۵	۹۸	۱	۰/۰۲۰۱۱۷				
۴۵-۵۰	۹۲	۱	۰/۰۱۶۸۱۴				
۵۰-۵۳	۹۵	۱۹/۵	۲/۸۳۱۶۸۱				

گردید. روش‌های رگرسیون چندجمله‌ای، کریجینگ در اولویت‌های بعدی قرار دارند.

پس از بررسی پارامترهای $RMSE$ ، MAE و R^2 روش انحنای کمینه به عنوان بهترین روش برای میان‌یابی ارتفاع سطح ایستابی آب در بدنه و تکیه‌گاه‌های سد شاه‌قاسم انتخاب



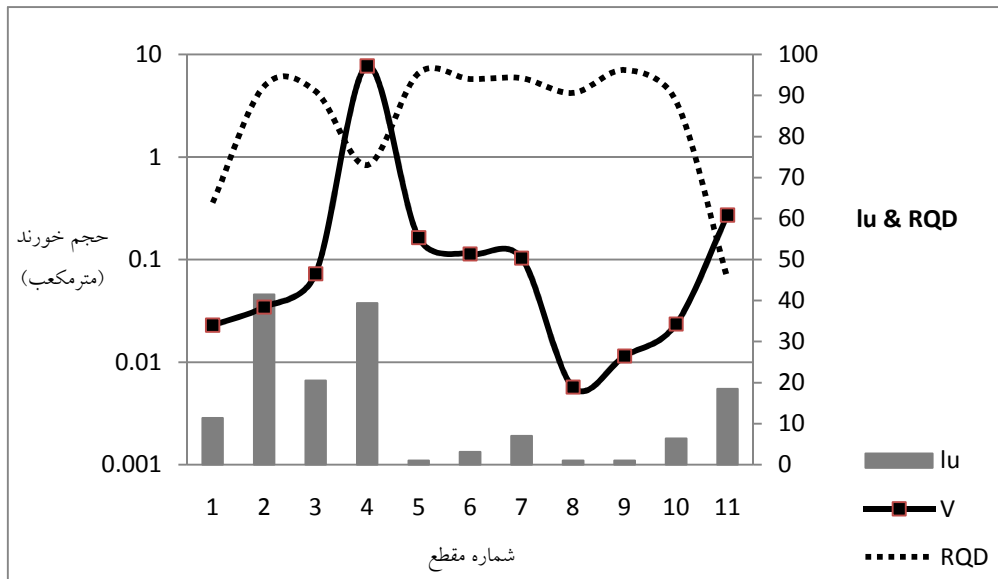
شکل ۲- نمودار حجم خوردن، لوژن و RQD در گمانه C-191

وجود مقدار لوژن بالا در مقطع ۴ نشان‌دهنده یک مجرای باز و تمیز برای نفوذ زیاد آب و دوغاب است. با توجه به آنکه در مقاطع ۶ و ۱۱ نفوذ آب خیلی زیاد نیست، خوردن بالای دوغاب، وقوع پدیده شکست هیدرولیکی به علت اعمال فشار زیاد در حین عملیات تزریق را نشان می‌دهد.

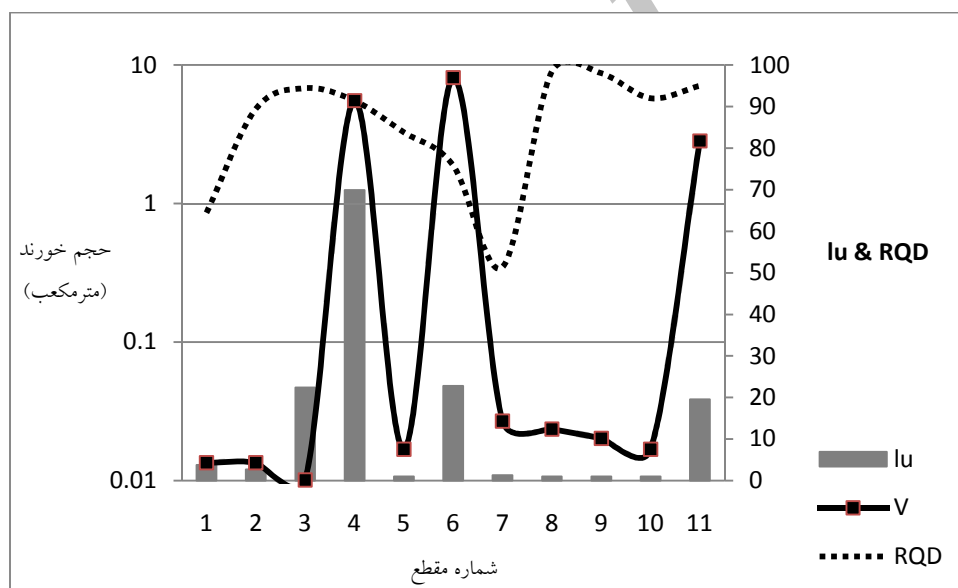
در گمانه P-23 نیز در اغلب مقاطع ارتباط مستقیم عدد لوژن و خوردن دوغاب مشاهده می‌شود. در شکل ۵ در مقطع ۲، افزایش لوژن و کاهش خوردن همراه با RQD پایین، می‌تواند ناشی از کیفیت ضعیف سنگ و وجود درزه‌های باریک یا پرشدگی درزه‌ها باشد که باعث کاهش خوردن دوغاب با وجود نفوذ آب بالا شده است. در مقطع ۸ افزایش میزان نفوذ دوغاب و کاهش جذب آب نسبت به مقطع ۷، می‌تواند ناشی از وقوع پدیده شکست هیدرولیکی در این عمق از گمانه باشد. خوردن بالای دوغاب و جذب اندک آب در مقطع ۱۱ نیز وقوع پدیده شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

در گمانه P-22، نیز مطابق شکل ۳ در بیشتر مقاطع رابطه مستقیمی بین عدد لوژن و خوردن دوغاب مشاهده می‌شود. در این گمانه، در مقطع شماره ۲، مقادیر لوژن بالا و خوردن دوغاب پایین، نشان‌دهنده آن است که درزه‌هایی با بازشدگی پایین، یا وجود مقداری پرشدگی، توانایی جذب بالای آب را داشته ولی در جذب دوغاب با ذرات بزرگتر، ناتوان بوده‌اند. در مقطع شماره ۴، خوردن آب و دوغاب بالایی مشاهده می‌شود که بدلیل پایین بودن مقدار RQD، یا کاهش کیفیت توده‌سنگ و افزایش درزه‌داری و بازشدگی درزه‌ها می‌باشد. در این مقطع، به دلیل بالا بودن مقادیر خوردن آب و سیمان، احتمال وجود حفره نیز وجود دارد.

در گمانه P-20، در بیشتر مقاطع، رابطه بین عدد لوژن و حجم خوردن دوغاب مستقیم است. با توجه به شکل ۴ در مقطع ۳ وجود لوژن بالا و خوردن دوغاب پایین، حضور درزه‌هایی با بازشدگی اندک یا همراه با پرشدگی را نشان می‌دهد. در مقاطع ۴، ۶ و ۱۱ خوردن دوغاب بالایی مشاهده می‌شود.



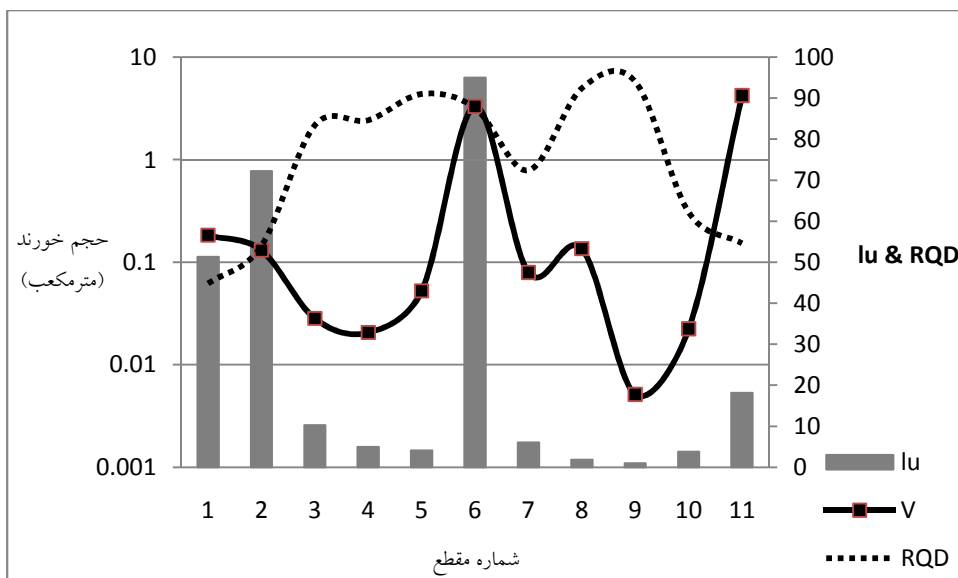
شکل ۳. نمودار حجم خوردن، لوژن و RQD در گمانه P-22



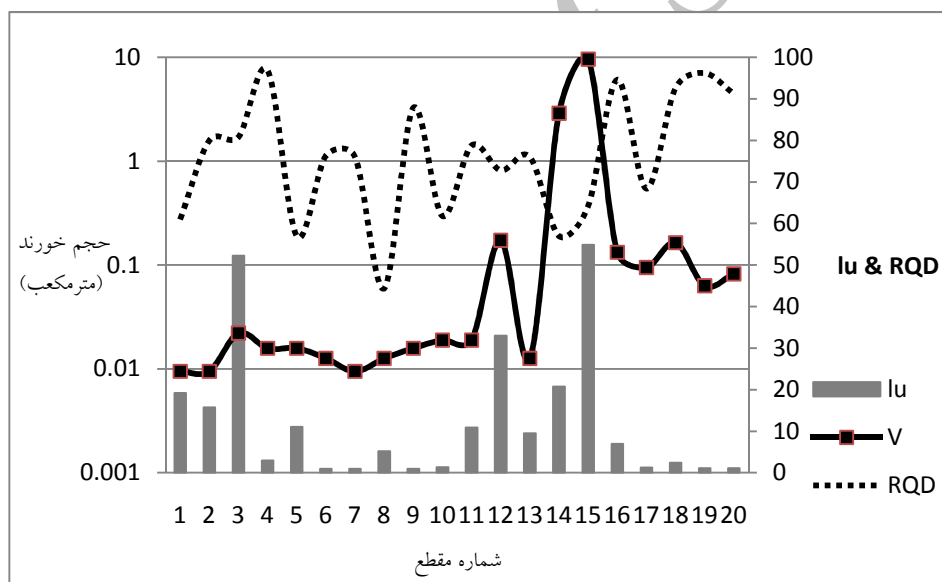
شکل ۴. نمودار حجم خوردن، لوژن و RQD در گمانه P-20

همراهند که جذب آب افزایش نیافته است. افزایش بسیار زیاد خوردن دوغاب در مقطع ۱۵، می‌تواند ناشی از پدیده شکست هیدرولیکی باشد. وجود RQD های بالا در مقاطع ۴ و ۱۶ نشان از کیفیت مطلوب توده سنگ و در نتیجه نفوذ آب و دوغاب پایین می‌باشد.

در گمانه P-17، مطابق شکل ۶، مانند گمانه‌های قبلی، وجود ارتباط مستقیم بین عدد لوژن و خوردن دوغاب، قابل مشاهده است. در مقاطع ۳ و ۱۵ نفوذ آب بالایی دیده می‌شود که با توجه به RQD بالاتر در مقطع ۳ می‌توان گفت درزه‌داری مقطع ۱۵ بیشتر بوده ولی درزه‌ها با پرشدگی



شکل ۵. نمودار حجم خوردن، لوژن و RQD در گمانه P-23



شکل ۶. نمودار حجم خوردن، لوژن و RQD در گمانه P-17

حد، در عملیات تزریق بوده که باعث شکست هیدرولیکی سنگ می‌شود و درزه‌های موجود باز شده و توسعه پیدا می‌کند. در این صورت ترک‌های پنهان گسترش یافته و در نتیجه حجم زیادی از دوغاب در سنگ نفوذ می‌کند. به منظور جلوگیری از وقوع چنین شرایطی باید فشار اعمالی در فرآیند تزریق با دقت و بر اساس نتایج آزمون فشار آب و وضعیت کیفی مغزه‌های بدست آمده از گمانه‌ها تعیین شده، از اعمال فشار زیاد، بدون بررسی شرایط ساختگاه پرهیز گردد.

باتوجه به روند نشان داده شده در شکل‌های ۲ تا ۶ مشاهده می‌شود در برخی از مقاطع مانند مقطع ۲ در شکل ۲، مقاطع ۴، ۶ و ۱۱ در شکل ۴، مقطع ۶ در شکل ۵، مقاطع ۱۶ و ۱۸ در شکل ۶، با وجود مقادیر بالای RQD مقادیر خوردن دوغاب سیمانی نیز زیاد می‌باشد در صورتی‌که در شرایط عادی، وجود RQD بالا نشان دهنده‌ی کیفیت خوب سنگ و کاهش درزه‌ها بوده و باید خوردن دوغاب نیز پایین باشد. علت این اختلاف و عدم انطباق نتایج، اعمال فشار بیش از

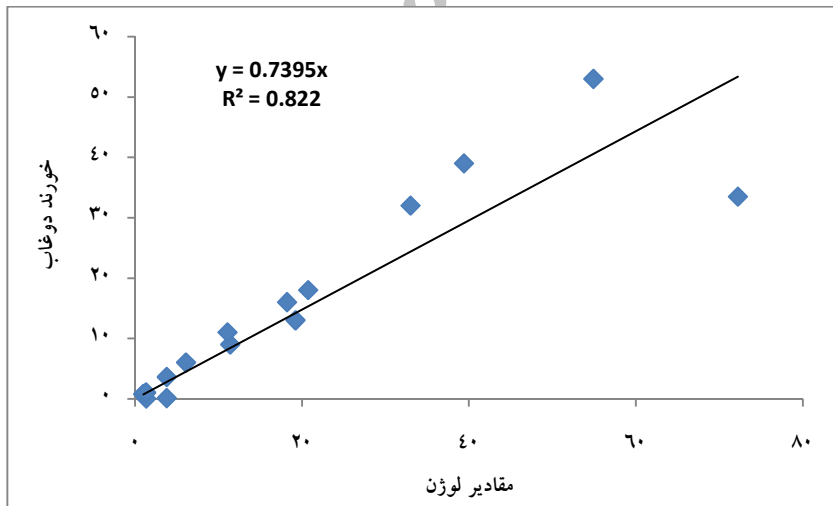
ضریب همبستگی بین آنها در شکل ۷ نشان داده شده است. به دلیل تعدد بررسی‌ها و مقایسه بین پارامترها و وجود حالت‌های مختلف تعیین ضریب همبستگی در کل مقاله، مقادیر نهایی ضریب همبستگی محاسبه شده در هر قسمت، ارائه شده است.

۱-۷. کیفیت سنگ در محدوده بسیار خوب

در این گروه مقادیر لوژن و خوردند دوغاب، برای مقاطعی که دارای RQD، از ۹۰ تا ۱۰۰ هستند بررسی گردید و ضرایب همبستگی بین پارامترهای لوژن و خوردند، همچنین بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردند دوغاب، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است. در شکل ۷ به عنوان نمونه روند تغییرات مقادیر لوژن و خوردند و ضریب همبستگی بین آنها نشان داده شده است.

۷. تحلیل ارتباط مقادیر لوژن و خوردند دوغاب، بر اساس شاخص کیفیت سنگ (RQD)

در این بخش، به منظور درک هرچه بهتر ارتباط خوردند آب و دوغاب سیمانی، ارتباط بین این دو پارامتر، بر اساس شاخص کیفیت سنگ بررسی می‌شود. با توجه به تقسیم‌بندی Deer در سال ۱۹۹۶ که بر اساس مقادیر RQD، سنگ‌ها را تقسیم‌بندی کرده است، در این تحقیق، نتایج مربوط به مقاطع تزریق مختلف به ۴ گروه تقسیم‌بندی شده، همبستگی بین حجم خوردند و عدد لوژن و نیز همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند با تغییرات عمق بررسی شده است. لازم به ذکر است در این تحقیق در تعیین تمامی ضرایب همبستگی بین پارامترهای مذکور، از همبستگی خطی استفاده شده و در نهایت ضریب همبستگی (R^2) بین آنها محاسبه شده است. نمونه‌ای از روند تغییرات خوردند دوغاب و لوژن و تعیین



شکل ۷. روند تغییرات مقادیر خوردند دوغاب و لوژن و ضریب همبستگی بدست آمده

باتوجه به ضرایب محاسبه‌شده، رابطه مستقیمی بین عدد لوژن و حجم خوردند دیده می‌شود. بین مقادیر عمق با عدد لوژن و عمق با حجم خوردند با تقریب خوبی، رابطه معکوس وجود دارد. که نشان‌دهنده آن است که با افزایش عمق مقاطع تزریقی، خوردند آب و دوغاب کاهش می‌یابد که این پدیده با

جدول ۵. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند، لوژن و عمق، خوردند و عمق

نام پارامتر	ضریب همبستگی
لوژن	۰/۸۲۲۴۱
خوردند	-۰/۷۳۴۹۷
لوژن	-۰/۷۵۴۸۹
خوردند	عمق

کاهش تعداد و میزان بازشدگی درزه‌ها، باتوجه به کیفیت بسیارخوب سنگ در این گروه، قابل توجه می‌باشد.

۲-۷. کیفیت سنگ در محدوده خوب

در این دسته مقاطع با سنگ‌هایی با RQD، بین ۷۵ تا ۹۰ قرار دارند. ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردن، همچنین بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردن دوغاب، محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است. در این گروه همبستگی کمتری بین حجم خوردن و عدد لوژن مشاهده می‌شود و رابطه معکوس مطلوبی بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردن وجود ندارد.

جدول ۶. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردن، لوژن

و عمق، خوردن و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۵۸۶۳۰۸	حجم خوردن لوژن
-۰/۴۲۶۹	عمق لوژن
-۰/۶۲۱۴	عمق حجم خوردن

۳-۷. کیفیت سنگ در محدوده متوسط

مقاطع که دارای RQD، بین ۵۰ تا ۷۵ هستند در این دسته جای گرفته‌اند. نتایج ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردن، همچنین بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردن دوغاب، در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردن، لوژن

و عمق، خوردن و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۵۴۴۲۸۳	حجم خوردن لوژن
-۰/۳۹۷۹۴	عمق لوژن
-۰/۵۶۹۸۴	عمق حجم خوردن

در این دسته نیز رابطه بین عدد لوژن و حجم خوردن زیاد نیست. با توجه به جدول ۷ در این گروه رابطه معکوس ضعیفی بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردن مشاهده می‌شود که به علت کاهش کیفیت سنگ است و نشان می‌دهد با

افزایش عمق، با کاهش کیفیت سنگ، خوردن آب و دوغاب کاهش نیافته است.

۴-۷. کیفیت سنگ در محدوده ضعیف

مقاطع با RQD کمتر از ۵۰ در این دسته جای دارند که نتایج ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردن، همچنین بین عمق با عدد لوژن و حجم خوردن دوغاب، در جدول ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردن، لوژن

و عمق، خوردن و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۷۵۸۷۲۳	حجم خوردن لوژن
-۰/۲۲۴۱۷	عمق لوژن
-۰/۵۱۰۲۷	عمق حجم خوردن

ارتباط بین عدد لوژن و حجم خوردن در این دسته مستقیم بوده و از همبستگی بالایی برخوردارند. ضریب همبستگی معکوس بین عمق با لوژن کمتر از عمق با خوردن دوغاب است چراکه در سنگ‌های با کیفیت ضعیف در اعماق زیاد، درزه‌داری زیاد بوده ولی به علت افزایش فشار روباره، بازشدگی کم و در نتیجه نفوذ آب، بیشتر از دوغاب سیمانی است. لازم به ذکر است ضرایب همبستگی معکوس بین عمق مقاطع با خوردن آب و سیمان، در این گروه، به علت کاهش بیشتر کیفیت سنگ و در نتیجه افزایش تعداد درزه‌ها و بازشدگی آنها و در نهایت افزایش نفوذ آب و دوغاب، از سایر گروه‌ها، کمتر است.

باتوجه به مجموع مقادیر بدست آمده از ضرایب همبستگی مقاطع مختلف براساس شاخص کیفیت سنگ مشاهده می‌شود که در مقاطع با RQD بالا بیشترین ارتباط بین خوردن آب و سیمان با ضریب همبستگی ۰/۸۲ وجود دارد. درحالی‌که در سایر مقاطع، همبستگی ضعیف‌تری برقرار است. علت همبستگی بالا آن است که در سنگ‌های با کیفیت مطلوب، درزه‌هایی با بازشدگی محدود وجود دارد که مسیرهای

جدول ۹. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند، لوژن و عمق، خوردند و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۷۶۵۰۰۸	حجم خوردند - لوژن
-۰/۷۲۵۴	شاخص کیفیت سنگ - لوژن
-۰/۷۵۴۴۹	شاخص کیفیت سنگ - حجم خوردند

در این دسته که دارای کمترین فشار حاصل از وزن روباره است، با توجه به ضریب همبستگی ۰/۸۶ بین مقادیر خوردند و لوژن، ارتباط مستقیم بین عدد لوژن و حجم خوردند دیده می‌شود. ضرایب همبستگی معکوس بالا بین RQD با عدد لوژن و حجم خوردند، به دلیل آن است که در اعماق سطحی RQD پایین بوده و کیفیت سنگ ضعیف است و در نتیجه خوردند آب و دوغاب زیاد می‌باشد.

۲-۱. مقاطع در عمق متوسط

در این دسته اطلاعات مقطعی که دارای عمق ۱۰ تا ۱۵ متری هستند بررسی می‌گردد. ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردند دوغاب و بین RQD با لوژن و خوردند، در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند، لوژن و عمق، خوردند و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۵۸۲۵۵	حجم خوردند - لوژن
-۰/۳۵۷۹۱	شاخص کیفیت سنگ - لوژن
-۰/۳۹۹۰۵	شاخص کیفیت سنگ - حجم خوردند

در این دسته از مقاطع، در مقایسه با گروه قبلی، رابطه بین عدد لوژن و حجم خوردند از همبستگی کمتری برخوردار است و در این دسته بین RQD با عدد لوژن و حجم خوردند نیز همبستگی معکوس کمتری مشاهده می‌شود.

مشخصی برای نفوذ سیال می‌باشند در نتیجه میزان نفوذپذیری با روندی یکنواخت، برای آب و دوغاب سیمانی دیده می‌شود. درحالی‌که در سنگ‌های با کیفیت پایین‌تر، شکستگی‌های متعددی وجود دارد که می‌توانند دارای بازشدگی‌ها و جهت‌داری‌های متفاوتی باشند. این تنوع در درزه‌داری و بازشدگی و نیز امکان وجود پرشدگی‌های رسی در آنها، باعث نفوذ راحت‌تر آب در این درزه‌ها شده ولی دوغاب سیمانی با خصوصیات متفاوتی از ژئولوژی و دانه‌بندی مصالح نسبت به آب و نمی‌تواند به راحتی در درزه‌ها نفوذ کند. مقادیر ضریب همبستگی معکوس و زیاد ۰/۷- در مقاطع با کیفیت مطلوب سنگ، بین عمق با خوردند آب و سیمان نیز تایید کننده‌ی این انطباق است و نشان می‌دهد در مقاطع عمیق با RQD بالا با افزایش عمق، خوردند آب و سیمان کاهش یافته است.

۸. تحلیل ارتباط مقادیر لوژن و خوردند دوغاب، بر اساس عمق مقطع تزریق یافته

در این قسمت، اثر افزایش عمق بر روی روند تغییرات حجم خوردند دوغاب و آب، بررسی شده است. به‌طور کلی انتظار می‌رود با افزایش عمق و در نتیجه افزایش فشار روباره بر لایه‌های زیرین، حجم خوردند آب و دوغاب کاهش یابد ولی نتایج نشان می‌دهد که کیفیت سنگ، میزان RQD، پرشدگی درزه‌ها و وقوع شکست هیدرولیکی نیز نقش مهمی ایفا کرده و نتیجه فوق همیشه برقرار نیست. در این بخش مقاطع گمانه‌های تزریقی، براساس عمق به ۴ دسته تقسیم‌بندی شده است.

۱-۱. مقاطع سطحی

این گروه مقطعی که تا عمق ۱۰ متر قرار دارند، را شامل می‌شود. ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردند دوغاب و بین RQD با لوژن و خوردند، در جدول ۹ نشان داده شده است.

۳-۱. مقاطع عمیق

در این دسته مقاطع دارای عمق ۳۰ تا ۵۰ متر می‌باشند. ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردند دوغاب و نیز بین RQD با لوژن و خوردند، در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند، لوژن و عمق، خوردند و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۶۲۴۱	حجم خوردند / لوژن
-۰/۴۰۰۲	شاخص کیفیت سنگ / لوژن
-۰/۴۵۵۴	شاخص کیفیت سنگ / حجم خوردند

در این دسته نیز رابطه تقریباً مستقیمی بین عدد لوژن و حجم خوردند مشاهده می‌شود که نسبت به گروه قبلی این همبستگی بیشتر است.

۴-۷. مقاطع بسیار عمیق

در این گروه مقاطع با عمق بیش از ۵۰ متر بررسی شده است. ضرایب همبستگی بین لوژن و خوردند دوغاب و نیز بین RQD با لوژن و خوردند، در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۱۲. ضرایب همبستگی بین مقادیر لوژن و خوردند،

لوژن و عمق، خوردند و عمق.

ضریب همبستگی	نام پارامتر
۰/۸۵۰۲۶۳	حجم خوردند / لوژن
-۰/۷۰۴۷۳	شاخص کیفیت سنگ / لوژن
-۰/۷۳۲۰۱	شاخص کیفیت سنگ / حجم خوردند

این دسته شامل عمیق‌ترین مقاطع تزریق می‌باشد. رابطه بین عدد لوژن و حجم خوردند مستقیم بوده و نسبت به گروه‌های قبلی همبستگی بیشتری دیده می‌شود. ارتباط RQD با عدد لوژن و حجم خوردند نیز دارای رابطه معکوس با همبستگی بیشتری می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده از ضرایب همبستگی بر مبنای تغییرات عمق مقطع مشاهده می‌شود که در مقاطع بسیار عمیق

بیشترین میزان انطباق بین مقادیر خوردند آب و سیمان با ضریب همبستگی ۰/۸۵ در مقایسه با مقاطع سایر عمق‌ها وجود دارد. این نتایج با اطلاعات بدست آمده بر مبنای شاخص کیفیت سنگ تطابق خوبی دارد. چرا که در مقاطع بسیار عمیق به علت افزایش فشار روباره، تعداد درزه‌ها و میزان بازشدگی آنها کاهش یافته، در نتیجه RQD افزایش می‌یابد و مطابق مقاطع با کیفیت بالا، همگرایی خوبی بین خوردند آب و دوغاب سیمان وجود دارد. در این حالت نیز مقادیر ضریب همبستگی معکوس و زیاد ۰/۷- مویید این نکته است و نشان می‌دهد در مقاطع بسیار عمیق با افزایش RQD خوردند آب و سیمان هر دو کاهش یافته است.

۹. نتیجه‌گیری

بطور کلی می‌توان از نتایج آزمون فشار آب و مقدار عدد لوژن بدست آمده از آن، برای پیش‌بینی میزان تزریق و خوردند دوغاب استفاده نمود. با توجه به بررسی اطلاعات سایت سد سیمره، مشاهده می‌شود که در تقسیم‌بندی نتایج بر اساس مقادیر RQD، همبستگی بین عدد لوژن و حجم خوردند در گروه سنگ‌های با کیفیت بسیار خوب با ضریب همبستگی ۰/۸۲، بیشتر از سنگ‌های با کیفیت خوب و متوسط و ضعیف با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۵۴ و ۰/۷۵ است. در سنگ‌های با کیفیت بسیار خوب و RQD بالا که تعداد و نیز میزان بازشدگی درزه‌ها کمتر است، با افزایش عمق، مقادیر لوژن و خوردند هر دو کاهش یافته ارتباط نزدیکی با هم دارند. صحت این موضوع را می‌توان در مقادیر ضریب همبستگی بالا و معکوس ۰/۷۳- و ۰/۷۵- بین عمق مقاطع با لوژن و خوردند مشاهده کرد. در مقابل، در سنگ‌های با کیفیت ضعیف، کمترین میزان همبستگی معکوس بین عمق با لوژن و خوردند دوغاب با ضرایب ۰/۲۲- و ۰/۵۱- نسبت به سایر گروه‌ها وجود دارد. چراکه در این گروه با پایین‌ترین کیفیت سنگ، با افزایش عمق، شرایط نفوذ از سایر گروه‌ها بهتر بوده، خوردند آب و دوغاب بیشتر است.

پدیده‌هایی چون وجود حفرات کارستی، پرشدگی درزه‌ها و شکست هیدرولیکی، همبستگی مطلوبی بین مقادیر لوژن و خوردند دوغاب سیمانی دیده نمی‌شود. با توجه به مجموع محاسبات این تحقیق، نتیجه‌گیری می‌شود که با مقایسه نتایج تقسیم‌بندی مقاطع براساس RQD و نیز عمق، مشاهده می‌شود در مقاطع با کیفیت بالای سنگ، که معادل با افزایش عمق می‌باشد، بیشترین میزان همبستگی بین مقادیر خوردند آب و دوغاب سیمانی نسبت به سایر مقاطع وجود دارد. به بیان دیگر، در اینگونه مقاطع می‌توان بهترین پیش‌بینی از میزان تزریق‌پذیری توده‌سنگ براساس میزان خوردند آب بدست آمده از آزمون لوژن، ارائه نمود.

در تقسیم‌بندی نتایج بر اساس عمق مقاطع تزریق‌یافته، از مجموع محاسبات می‌توان گفت که در مقاطع بسیار عمیق، ضریب همبستگی بالا، ۰/۸۵، بین لوژن و خوردند دوغاب وجود دارد و پس از آن در مقاطع سطحی ضریب همبستگی ۰/۷۶ برقرار است. در مقاطع متوسط و عمیق، کمترین همبستگی با ضرایب ۰/۵۸ و ۰/۶۲ دیده می‌شود. در مقاطع بسیار عمیق، ضرایب همبستگی معکوس ۰/۷۰- و ۰/۷۳- نشان می‌دهد که با افزایش عمق و در نتیجه افزایش کیفیت سنگ، بازشدگی درزه‌ها کاهش یافته و مقادیر لوژن و خوردند دوغاب کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است در مقاطع موجود در اعماق میانی و در سنگ‌های دارای کیفیت متوسط، به دلیل

منابع

شرکت مهندسی مشاور استراتوس، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و نتایج تزریق در سایت سیمره، ۱۳۸۵.

- Nonveiller, E., 2007. Grouting Theory and Practice: Elsevier, Amsterdam.
- Ewert, F.K., 1998. Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites: Springer, Verlage, Berlin.
- Widmann, R., 2004. International Society for Rock Mechanics-Commission on rock grouting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract, 33(8): 803-847.
- Houlsby, A.C., 1999. Engineering of grouting curtains to standars. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, GT9: 953-970.
- James Warner, P.E., 2004. Practical Handbook of Grouting Soil, Rock, and Structures. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Houlsby, A.C., 1990. Construction and Design of Cement Grouting. John Willy & sons.
- Shroff, V., Shal, L., 2002. Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction: A.A. Balkema, Rotterdam.
- Joseph, P., Welsh, P.E., George, K., Burke, P.E., 2000. Advances in Grouting Technology. Geotechnical Engineering Conference, Australia.
- Dalmalm, T., 2010. Choice of Grouting Methods for Injected Hard Rock Based on Sealing Time Prediction: Division of Soil and Rock Mechanics Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology.
- Hakansson, U., Hassler, L., Still, H., 2000. Rheological Properties of Cement-Based Grouts- Measuring Techniques: International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg.
- Tolppanen, P., Syrjänen, P., 2003. Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway - Literature Study: Julkaisija, www.mtry.org.
- Byle, M.J., 2001. Hydrofracture in Rock Grouting: Hydraulic Frac Workshop 2001, A workshop held in conjunction with the 38th U.S. Rock Mechanics Symposium, Schlumberger. www-old.dpr.csiro.au.
- Barton, N., 2002. Some new Q-value correlations to assist insite characterisation and tunnel design: International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstract, 39: 185-216.
- Janson, T., 1998. Controlling Grout Spreading in Tunnel Grouting -Analyses and Developments of the GIN-method. Tunnelling and Underground Space Technology, 15: 343-352.
- Garshol, K.F., 2003. Pre-Excavation Grouting in Tunneling: MBT (Switzerland) Ltd., www.degussa-ugc.com.
- Twiss, R., Mooros., 2002. Geotechnical Engineering Hand book. Volume 2, John Willy & Sons.

-
- Yang, M.J., Yue, Z.Q., Lee, P.K.K., Su, B., Tham, L.G., 2002. Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation: NRC Research Press Web site , <http://cgj.nrc.ca>.
- Amodei, B., wibowoj, 2003. Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway - Literature Study: Julkaisija, www.mtry.org.

Archive of SID