هیدروژئولوژی، سال هفتم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۱
Hydrogeology, Volume 7, No. 1, Summer 2022

رابطه بین میزان خورند دوغاب سیمان با شاخص کیفی سنگ و تراوایی در واحدهای رادیولاریتی و آهکی ساختگاه سد رودبال داراب

مریم پازکی[۱]، مرتضی مظفری[۲]*، الهام فیجانی[۲]، عبداله سهرابی بیدار[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استادیار گروه هیدروژئولوژی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: mmozafari@ut.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۹

چکیده

بررسی رابطه بین ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ و تزریق‌پذیری آن در برآورد هزینه ساخت پرده تزریق سدها اهمیت زیادی دارد. به‌دلیل قرارگیری برخی سدها در مناطق کارستی، بیشتر روابط به‌دست‌آمده بین این ویژگی‌ها مربوط به سنگ‌های کربناته است. بنابر برخی پژوهش‌ها، نتایج آزمایش لوژان معیار مناسبی برای تخمین مقدار سیمان‌خوری در سنگ‌های آهکی است. سد رودبال داراب با حجم مخزن ۸۲ میلیون مترمکعب، بر روی سنگ‌آهک سروک و واحدهای رادیولاریتی کرتاسه ساخته شده است. در این پژوهش، با تجزیه‌وتحلیل داده‌های گمانه‌های اکتشافی پرده تزریق، میزان همبستگی و رابطه بین سیمان‌خوری با مقادیر شاخص کیفی و تراوایی سنگ‌های آهکی و رادیولاریتی ساختگاه سد رودبال تعیین شده است. با بررسی شاخص کیفی سنگ مشخص شد که سنگ‌های آهکی کیفیت بهتری نسبت به واحد رادیولاریتی دارد. نتایج آزمایش لوژان نشانگر نفوذپذیرتر بودن سنگ‌های آهکی نسبت به واحد رادیولاریتی بود. داده‌های سیمان‌خوری نشان می‌داد که مقاطع با خورند زیاد، بیشتر در سنگ‌های آهکی متمرکز شده و این بخش خورند بیشتری نسبت به واحد رادیولاریتی دارد. در بین داده‌های ارزیابی‌شده، مقدار خورند سیمان تنها با مقادیر تراوایی رابطه معناداری نشان می‌داد. بر اساس رابطه‌های ارائه شده بین میزان سیمان‌خوری و تراوایی، تخمین مقدار خورند در بخش آهکی (با ضریب همبستگی ۰/۸۷) از دقت بسیار بیشتری نسبت به واحدهای رادیولاریتی (با ضریب همبستگی ۰/۴۳) برخوردار بود. بر اساس نتایج این پژوهش، در ساختگاه‌های با سنگ‌شناسی گوناگون، جداسازی داده‌های حاصل از حفاری در واحدهای سنگی مختلف و انجام محاسبات به‌صورت جداگانه را می‌توان به‌عنوان گامی مهم برای کاهش خطا در تخمین میزان سیمان‌خوری سنگ‌ها درنظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: سد رودبال، سیمان‌خوری، شاخص کیفی سنگ، فرار آب، لوژان.

مقدمه

اجرای پرده تزریق ازجمله روش‌های آب‌بندی محدوده پی و تکیه‌گاه هر سد می‌باشد. هنگام اجرای پرده تزریق سعی بر آن است که با تزریق مخلوطی از آب، سیمان، ماسه، بنتونیت و مواد دیگر به درون توده سنگ یا خاک، از تراوایی آن کاسته و مقاومت آن را افزایش داد (Nonveiller, 1988؛ مظفری، ۱۳۹۸؛ مقیمی و همکاران، ۱۳۹۹). در پروژه‌های سدسازی بخش قابل‌توجهی از هزینه‌ها صرف اجرای پرده تزریق و آب-بندی سد می‌شود، بنابراین داشتن تخمینی از تراوایی توده سنگ قبل از ساخت سد به برآورد هزینه طرح و طراحی پرده تزریق بسیار کمک می‌کند. به‌منظور دستیابی به ویژگی‌های طبیعی سنگ قبل از اجرای پرده تزریق، حفاری گمانه‌های

اکتشافی و انجام مغزه‌گیری، آزمایش نفوذپذیری (لوژان[1]) و تزریق دوغاب سیمان در آن‌ها بسیار رایج است. شایان‌ذکر است که به‌دلیل ناهمگنی موجود در محیط‌های کارستی و تفاوت در ویژگی‌های جریان آب و دوغاب در توده سنگ، نمی‌توان انتظار مشاهده رابطه‌ای کامل بین نتایج آزمایش لوژان و میزان سیمان‌خوری را داشت. برخی پژوهشگرها به بررسی رابطه بین ویژگی‌های مختلف توده سنگ و تزریق‌پذیری آن پرداخته‌اند. Foyo et al. (2005) برای ارزیابی کیفی توده سنگ، شاخص نفوذپذیری ثانویه را تعریف کردند. Gürocak et al. (2012) بر اساس آزمایش لوژان و با کمک روش‌های سنجش نفوذپذیری در سد آتاسو، عمق اجرای پرده تزریق را ارزیابی کردند. Uromeihy and Farrokhi (2012) با مقایسه لوژان و طبقه‌بندی ژئومکانیک توده سنگ، شاخص مقاومت زمین‌شناسی و شاخص کیفیت سنگ، به این نتیجه رسیدند که در ساختگاه سد کمال صالح شاخص کیفی سنگ با لوژان رابطه مستقیم دارد. Azimian and Ajalloeian (2013) بر اساس داده‌های ساختگاه سدهای نرگسی و چشمه عاشق، رابطه بین لوژان و شاخص تراوایی ثانویه را بررسی کردند و بر اساس همبستگی این دو کمیت یک رابطه تجربی را ارائه دادند. Sadeghiyeh et al. (2013) با مقایسه سیمان‌خوری، نفوذپذیری ثانویه و مقادیر لوژان در ساختگاه سد استور میانه به این نتیجه رسیدند که هرچه روند داده‌های انتخابی همگرا باشد، میزان جذب دوغاب هم بیشتر خواهد بود. Qureshi at al. (2014) یک رابطه تجربی بین شاخص کیفی سنگ و نفوذپذیری در ناپیوستگی سنگ‌های رسوبی ارائه دادند که در آن ویژگی‌های ناپیوستگی (مانند طول، بازشدگی و جهت یافتگی) فاکتورهای محدودکننده بودند. Kayabasi et al. (2015) یک مدل برای تعیین تراوایی توده سنگ تهیه کردند که در آن از نتایج آزمایش لوژان، شاخص کیفی سنگ، جدایش و ویژگی سطحی ناپیوستگی‌ها بهره گرفته شد. این پژوهشگرها بیان داشتند که در صورت عدم وجود اندازه‌گیری صحرایی ویژگی‌های توده سنگ، نتایج مدل پیشنهادی قابل‌پذیرش و استفاده است. سهرابی بیدار و همکاران (۱۳۹۹) میزان همبستگی حجم دوغاب را با عدد لوژان، میزان شاخص نفوذپذیری ثانویه[2] و بازشدگی درزه‌ها در ساختگاه سد بختیاری مورد ارزیابی قرار دادند و یک همبستگی کلی را بین میزان جذب دوغاب و ویژگی‌های یادشده پیدا کردند. Farid and Rizwan (2017) همبستگی بین شاخص کیفی سنگ و نفوذپذیری درجای سنگ‌آهک مناطق مختلف ریاض (عربستان) را به‌دست آوردند و نتیجه گرفتند که توده سنگ-های آهکی با کیفیت خوب، میزان تراوایی کمی دارند. Kayabasi and Gokceoglu (2019) همبستگی ویژگی‌های سنگ‌آهک ساختگاه سد موت را با سیمان‌خوری گمانه‌های آزمایشی ارزیابی کردند و با استفاده از شاخص‌هایی نظیر جدایش و بازشدگی درزه‌ها، لوژان و ضریب نفوذپذیری به معادلات رگرسیونی با ضرایب تعیین قابل‌توجه برای ارزیابی میزان جذب دوغاب دست یافتند.

سد رودبال از نوع خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی مایل با حجم مخزن ۸۲ میلیون مترمکعب است که در ۲۰ کیلومتری شمال غربی شهر داراب در استان فارس، ساخته شده است (شکل ۱). در شکل ۲ تصویری از این سد ارائه شده است. دیواره سمت راست دره ساختگاه سد از سنگ‌آهک سازند سروک تشکیل شده است و واحدهای رادیولاریتی در دیواره سمت چپ برونزد دارد. با توجه به تفاوت سنگ‌شناسی دو جناح، ارزیابی ارتباط سیمان‌خوری با شاخص کیفی سنگ و مقادیر تراوایی حاصل از حفاری آزمایشی در سنگ‌آهک و واحدهای رادیولاریتی ساختگاه سد رودبال به‌عنوان هدف پژوهش این مقاله است.

مواد و روش‌ها

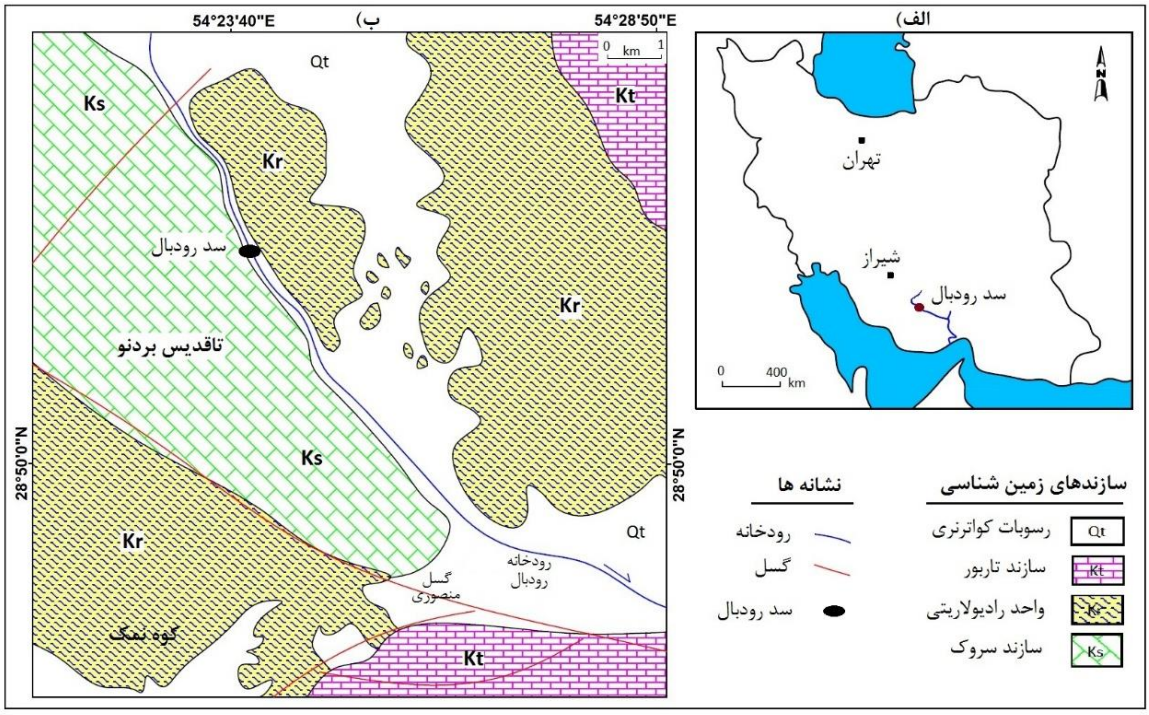
منطقه مورد پژوهش

بدنه و مخزن سد رودبال بر روی یال شرقی تاقدیس بردنو (شکل ۱ ب) واقع در پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده قرار دارد. تاقدیس بردنو با ۱۶ کیلومتر طول دارای روند شمال غربی-جنوب‌شرقی می‌باشد و ارتفاع بلندترین نقطه آن ۲۳۲۵ متر است. ازنظر چینه‌شناسی، واحدهای موجود در محدوده سد شامل سازند سروک به سن آلبین سنومانین، رادیولاریت-های سنومانین و رسوبات کواترنری می‌باشند. سازنده اصلی و کهن‌ترین واحدی که در تاقدیس پودنو برونزد دارد، سازند

[1] Lugeon

[2] Second Permeability Index

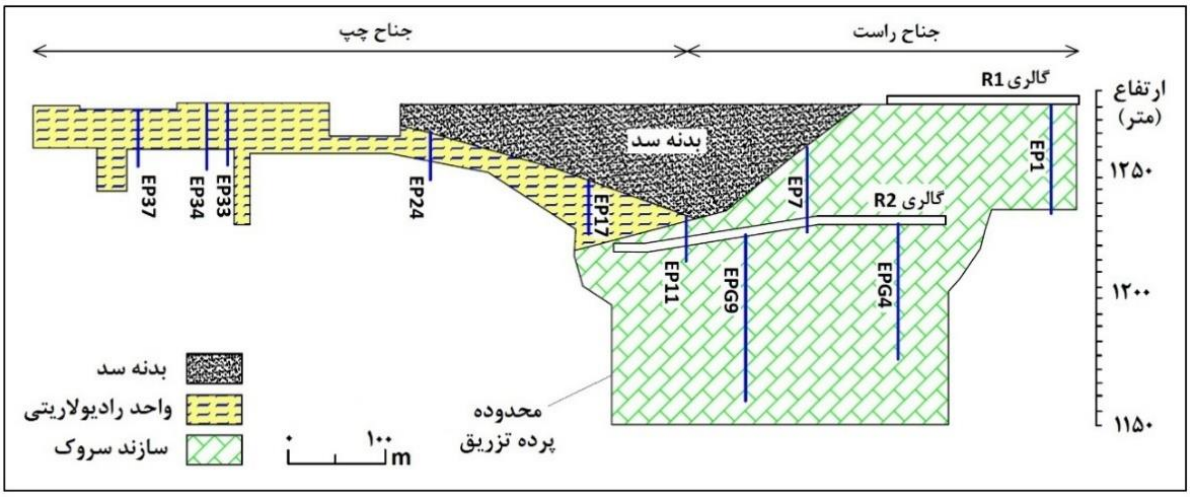
سروک است که با حدود ۵۰۰ متر ستبرا از سنگ‌آهک دانه‌ریز و بیشتر کریستالیزه خاکستری تا کرم‌رنگ با میان‌لایه‌های نازک مارنی تشکیل شده است. این سازند دیواره سمت راست دره رودبال را می‌سازد و دارای شیب لایه‌بندی ۲۵ تا ۳۰ درجه به‌سوی دریاچه سد می‌باشد. واحد رادیولاریتی با حدود ۴۰۰ متر ستبرا در دامنه چپ دره و بر روی سازند سروک قرار گرفته است و شامل سنگ‌های مختلفی مانند شیل و مارن قرمز تیره، ماسه‌سنگ سیلیسی روشن و کرم‌رنگ، کنگلومرا و برش با سیمان آهکی، سنگ آهک‌های آواری و چرت‌دار می‌باشد. بنابر سنگ‌شناسی بسیار فرسایش پذیر، واحد رادیولاریتی ارتفاعی کمتر از سازند سروک دارد. دره رودبال در پای یال شرقی تاقدیس بردنو و در امتداد همبری سازند سروک و واحد رادیولاریتی به‌وجود آمده است و رودخانه رودبال با دبی متوسط ۳ مترمکعب بر ثانیه در آن جریان دارد. رسوبات کواترنری با ستبرایی در حدود ۱۵ متر، به‌صورت آبرفت رودخانه‌ای در دشت سیلابی رودخانه (با پهنای کلی ۱۴۰ متر) قرار دارد (مهندسان مشاور آب نیرو، ۱۳۹۳).



شکل ۱- الف) نقشه موقعیت سد رودبال و ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه موردمطالعه (برگرفته از سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۵).

شکل ۲- نمایی از مخزن و بدنه سد رودبال (نگاه به سمت جنوب غرب).

در سد رودبال پرده تزریق به طول کل ۱۰۸۱ متر و در سه ردیف اجرا شده است (شکل ۳). گمانه‌های ردیف اول در سرتاسر محدوده پی و هر دو تکیه‌گاه حفاری و تزریق شده‌اند اما ردیف‌های دوم و سوم تنها در بخش‌هایی از جناح راست سد اجرا شده است. وجود سنگ‌آهک سروک در دامنه راست و رادیولاریت در جناح چپ و تفاوت در خصوصیات ژئومکانیکی آن‌ها باعث تفاوت در نحوه حفاری، آرایش گمانه‌ها و چگونگی تزریق و انجام آزمایش‌های لوژان در دو جناح شده است. به‌منظور شناخت هرچه بهتر مقاومت و تراوایی سنگ، عملیات تزریق و آب‌بندی در هر ردیف ابتدا گمانه‌های اولیه یا اکتشافی با فواصل ۳۲ متری در جناح راست و ۲۴ متری در جناح چپ حفاری و مغزه‌گیری شده‌اند. سپس آزمایش لوژان در آن‌ها انجام گردیده و در نهایت توسط دوغاب سیمانی تزریق شده‌اند. پس از تزریق گمانه‌های اکتشافی، گمانه‌های سری دوم، سوم، چهارم و نهایی پرده تزریق با الگوی نصف کردن فاصله حفاری و تزریق شده است.



شکل ۳- موقعیت گمانه‌های اکتشافی انتخابی در ردیف اول پرده تزریق (با تغییر، برگرفته از مهندسان مشاور آب نیرو، ۱۳۹۳).

داده‌ها و روش پژوهش

در این پژوهش از اطلاعات ژئوتکنیکی ۱۰ حلقه گمانه اکتشافی (۵ حلقه در سازند سروک و ۵ حلقه در واحد رادیولاریتی) ردیف اول پرده آب‌بند در دو جناح چپ و راست استفاده شده است. دلیل عدم استفاده از داده‌های گمانه‌های سری دوم به بعد، بررسی شرایط طبیعی واحدهای سنگی بوده است. در همه این گمانه‌ها پارامترهای ژئوتکنیکی و هیدرومکانیکی مانند شاخص کیفی سنگ، عدد لوژان و میزان جذب دوغاب سیمان اندازه‌گیری شده است. جانمایی این گمانه‌های اکتشافی در پرده تزریق در شکل ۳ و برخی از ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

شاخص کیفی سنگ به‌عنوان مقیاسی برای کیفیت مغزه‌های حفاری توسط آقای دییر[۳] در سال ۱۹۶۴ بیان شد. این شاخص به‌صورت نسبت مجموع طول قطعات سنگی مغزه با اندازه برابر یا بزرگتر از ۱۰ سانتی‌متر بر طول کل حفاری بیان می‌شود و بر اساس آن کیفیت سنگ‌ها به ۵ رده بسیار ضعیف، ضعیف، نسبتاً خوب، خوب و بسیار خوب تقسیم می‌شود (Deere, 1989).

آزمایش لوژان رایج‌ترین روش تقریب تراوایی توده سنگ است. این آزمایش معمولاً در پنج پله انجام می‌شود و فشارهای آزمایش به‌صورت پله‌ای تا فشار بیشینه افزایش و سپس تا فشار اولیه کاهش می‌یابد. مقدار لوژان در هر پله از فشار با استفاده از رابطه شماره ۱ محاسبه می‌شود (Nonveiller, 1988).

$$Lu = ۱۰Q/P_eL \quad (۱)$$

[۳] Deere

در این رابطه، Q میزان جریان برحسب لیتر در دقیقه، L طول قطعه مورد آزمایش و P_e فشار مؤثر در مقطع آزمایش برحسب اتمسفر است. یک لوژان برابر است با حجم آبی که در فشار ۱۰ اتمسفر در طول یک متر از گمانه و در واحد زمان به درون سنگ تزریق می‌شود. مقدار تراوایی سنگ با مقدار لوژان محاسبه‌شده رابطه مستقیم دارد.

سیمان‌خوری در طول تزریق به‌صورت وزن دوغاب سیمانی تزریق‌شده بر طول تزریق محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج سیمان‌خوری پرده تزریق در ۷۴ ساختگاه کارستی، Milanovic (2004) مقادیر سیمان‌خوری کمتر از ۵۰، بین ۵۰ تا ۱۰۰، بین ۱۰۰ تا ۴۰۰، بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰، بین ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ و بیشتر از ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر طول را به ترتیب در رده سنگ‌های با سیمان‌خوری خیلی کم، کم، معمولی، زیاد، خیلی زیاد و بیش‌ازحد زیاد تقسیم‌بندی نموده است.

در این پژوهش ابتدا هر یک از ویژگی‌های شاخص کیفی توده سنگ، میزان لوژان و میزان جذب دوغاب سیمان اندازه‌گیری شده برای هر قطعه ۵ متری از گمانه‌های اکتشافی گردآوری و برای پردازش‌های بعدی آماده گردید. سپس مقدار و میزان تغییرات هر یک از این ویژگی‌ها در واحدهای آهکی و رادیولاریتی به‌صورت جداگانه موردبررسی قرار گرفت. در ادامه، رابطه بین سیمان‌خوری و شاخص کیفی سنگ، سیمان‌خوری و مقدار لوژان و همچنین مقدار شاخص کیفی سنگ و لوژان مشخص گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های ۱۰ گمانه اکتشافی مورداستفاده در این پژوهش (برگرفته از مهندسان مشاور آب نیرو، ۱۳۹۳)

موقعیت، واحد سنگی	نام گمانه	عمق گمانه (متر)	تعداد آزمایش لوژان	شاخص کیفی سنگ (RQD) %		عدد لوژان		سیمان‌خوری در تمام طول گمانه (کیلوگرم)
				بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	
جناح چپ، رادیولاریت	EP17	۳۰	۶	نبود داده	نبود داده	۲۰	۱	۶۸۲/۵
	EP24	۳۰	۶	نبود داده	نبود داده	۱۲	۱	۱۲۳/۲
	EP33	۴۰	۷	۵۸	۰	۱۶	۱	۶۴۱/۵
	EP34	۳۵	۶	۳۶	۰	۳۲	۲	۳۲۳۷/۱
	EP37	۳۸	۴	۲۱	۰	۱۷	۱	۴۱۳/۴
جناح راست، سنگ‌آهک	EP-1	۷۵	۱۵	۷۷	۱۷	۷	۱	۵۳۹/۱
	EP7	۶۳	۱۲	۱۰۰	۲۰	۱۰۰	۱	۱۴۹۲۲/۱
	EP11	۲۴	۵	۸۵	۵۰	۱۸	۱	۴۱۶/۸
	EPG4	۱۰۰	۲۰	۹۸	۲۵	۱۳	۱	۷۲۱/۶
	EPG9	۱۲۰	۲۴	۱۰۰	۱۸	۱۰۰	۱	۱۵۹۰۹۸

نتایج و بحث

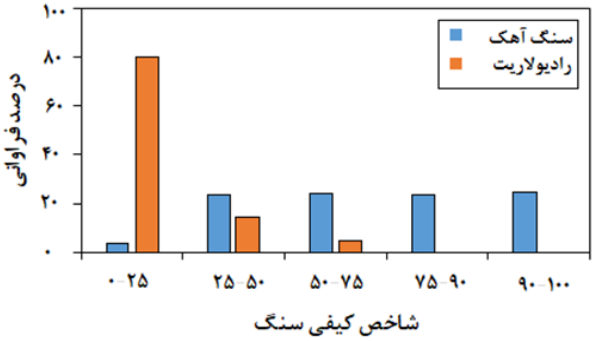
بررسی آماری توزیع داده‌ها

مقادیر شاخص کیفی سنگ اندازه‌گیری شده در واحدهای آهکی و رادیولاریتی بر اساس معیار ارائه‌شده توسط Deere (1989) به پنج دسته تقسیم‌شده و نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در واحدهای رادیولاریتی، حدود ۸۰ درصد موارد دارای کیفیت بسیار ضعیف بوده، سهم کیفیت‌های ضعیف و نسبتاً خوب نیز ۱۹/۵ درصد است. در هیچ‌یک از مقاطع، واحدهای رادیولاریتی کیفیت خوب و یا بسیار خوب نداشته‌اند. دلیل این پدیده می‌تواند فراوانی زیاد درزه‌ها و هوازدگی سنگ باشد که سبب کاهش میزان مغزه بازیافتی در طول حفاری و درنتیجه پایین بودن شاخص کیفی آن شده است. در واحدهای آهکی جناح راست به ترتیب ۲۵، ۲۳/۵، ۲۴، ۲۳/۵ و ۴ درصد مغزه‌ها دارای کیفیت بسیار خوب، خوب، نسبتاً خوب، ضعیف و بسیار ضعیف بوده‌اند. در مجموع می‌توان گفت که سنگ‌آهک جناح راست دارای کیفیت مناسب‌تر و میزان درزه کمتری است و فقط درصد کمی از آن کیفیت نامناسبی دارند. مغزه‌های سنگ آهکی که دارای کیفیت پایین هستند بیشتر در سطح زمین و محدوده اپی‌کارست و یا در نزدیکی بخش گسلی قرار داشته‌اند.

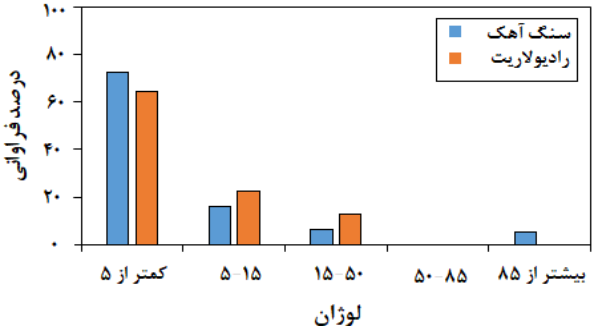
در گمانه‌های اکتشافی پرده تزریق، آزمایش لوژان در بازه‌های پنج متری و در پنج پله انجام شده است. مقادیر لوژان

اندازه‌گیری شده در واحدهای آهکی و رادیولاریتی به پنج دسته تقسیم گردیده و نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در واحد رادیولاریتی، به ترتیب ۶۴/۵، ۲۲/۵ و ۱۳ درصد مقاطع دارای تراوایی بسیارکم، کم و متوسط می‌باشند. در سنگ‌آهک، به ترتیب ۷۲، ۱۶، ۶/۵ و ۵/۵ درصد مقاطع دارای تراوایی بسیارکم، کم، متوسط و بسیار زیاد بوده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی در هر دو جناح به رده لوژان بسیار کم تعلق دارد. به عبارتی توده سنگ در بیشتر نقاط دارای درزه‌های با تعداد اندک و با بازشدگی کم می‌باشد. لوژان بیشتر از ۱۰۰ که در دسته‌بندی لوژان بسیار زیاد قرار می‌گیرد تنها در قطعات اول تعدادی از گمانه‌های نیمه راست گالری R1 و همچنین در گمانه‌های EPG9 و EPG11 (در راستای تقریبی گمانه EP11) در گالری R2 (شکل ۳) مشاهده شده است. مقادیر لوژان خیلی زیاد در قطعات اولیه و در عمق کم می‌تواند حاصل از فرسایش توسعه اپی‌کارست باشد. وجود تراوایی در اعماق زیاد احتمالاً ناشی از وجود درز و شکاف و توسعه مجاری کارستی است. در واحد رادیولاریتی مقاطع با تراوایی متوسط در مقاطع نزدیک به سطح زمین و یا در مرز این واحدها با آبرفت دیده شده است. در بازدید میدانی و ترانشه‌های ایجادشده هیچ‌گونه حفره و مجرایی در واحدهای رادیولاریتی دیده نشد؛ بنابراین هوازدگی زیاد و نشت آب به‌دلیل شستشوی مغزه می‌تواند عامل مشاهده تراوایی متوسط و در مواردی زیاد در نزدیکی سطح زمین باشد.

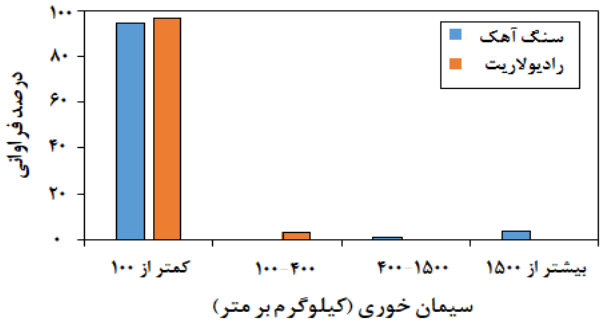
بر اساس معیار ارائه‌شده توسط Milanovic (2004)، مقدار سیمان‌خوری گمانه‌های اکتشافی دسته‌بندی و نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به ترتیب ۹۵ و ۹۷ درصد مقاطع حفرشده در سنگ‌آهک و رادیولاریت دارای سیمان‌خوری کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم بر متر بوده‌اند. در سنگ‌آهک یک درصد مقاطع دارای سیمان‌خوری بین ۴۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر و چهار درصد مقاطع دارای سیمان‌خوری بیش از ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر بوده‌اند. در واحدهای رادیولاریتی سه درصد مقاطع دارای سیمان‌خوری بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم بر متر بوده است. وجود مقاطع با سیمان‌خوری زیاد در سنگ‌آهک متأثر از توسعه کارست در این واحد کربناته است. در واحد رادیولاریتی، همه مقاطع دارای سیمان‌خوری متوسط در نزدیکی سطح زمین مشاهده شده است که می‌تواند ناشی از هوازدگی، وجود درز و شکاف و یا شستشوی مغزه‌ها باشد.



شکل ۴- شاخص کیفی سنگ در گمانه‌های جناح‌های چپ و راست



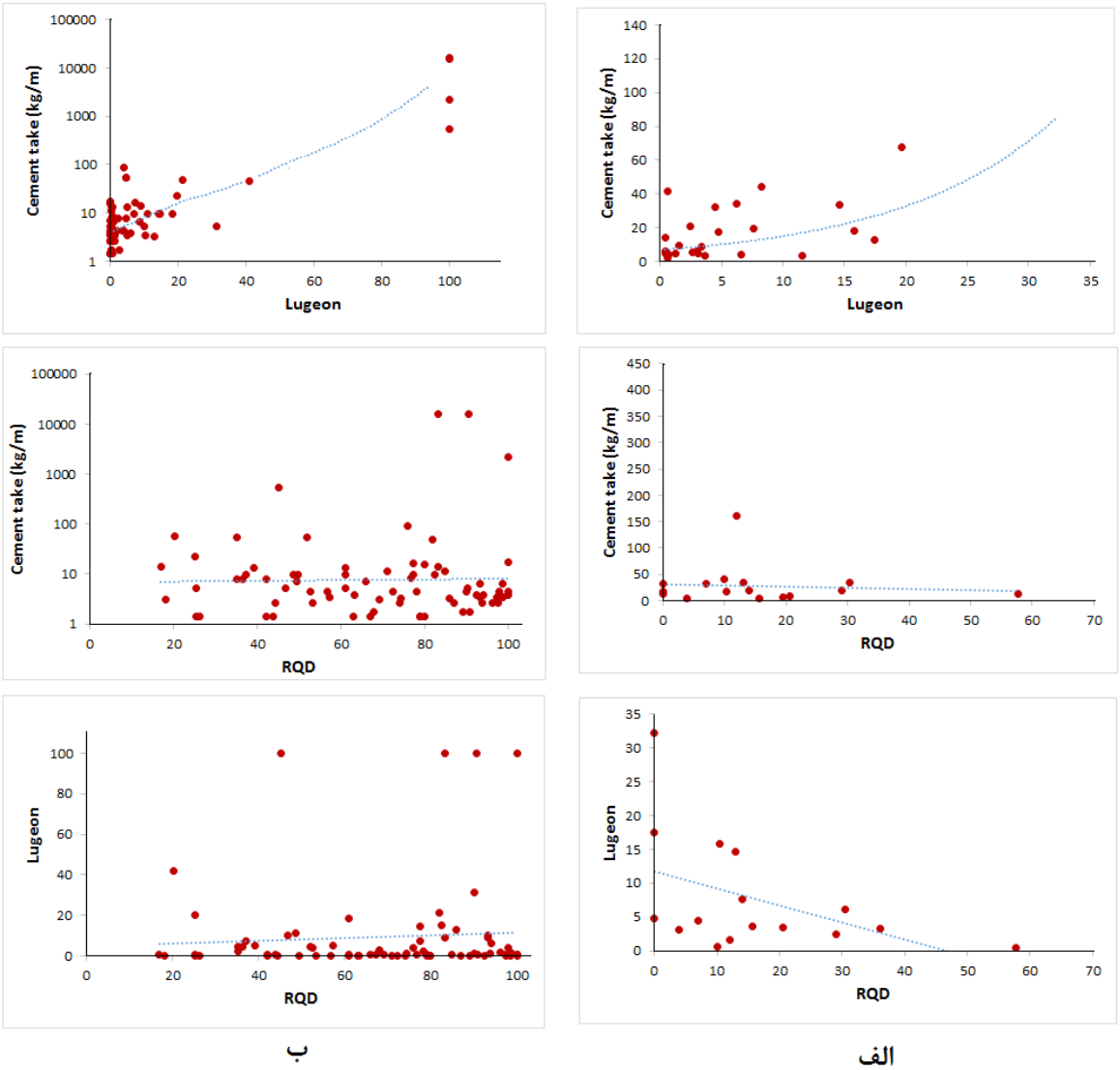
شکل ۵- فراوانی رده‌های لوژان در گمانه‌های انتخابی جناح‌های راست و چپ



شکل ۶- فراوانی سیمان‌خوری در گمانه‌های جناح‌های راست و چپ

بررسی همبستگی داده‌ها

برای به‌دست آوردن میزان همبستگی بین جفت داده‌های شاخص کیفی سنگ-لوژان، سیمان‌خوری-شاخص کیفی سنگ و سیمان‌خوری-مقدار لوژان، ابتدا نمودار پراکندگی آن‌ها ترسیم گردیده (شکل ۷) و در ادامه ضمن برازش رابطه مناسب در این داده‌ها، ضریب تعیین مربوطه مشخص و در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۷- پراکندگی داده‌ها در گمانه‌های جناح‌های راست و چپ

جدول ۲- مقادیر ضریب همبستگی و ضریب تعیین جفت داده‌های اندازه‌گیری شده در واحد رادیولاریتی و آهکی

جفت داده‌ها	ضریب همبستگی		رابطه برازش شده و ضریب تعیین	
	سنگ‌آهک	رادیولاریت	سنگ‌آهک	رادیولاریت
تراوایی - شاخص کیفی	۰/۰۷	-۰/۴۵	-	-
سیمان‌خوری- تراوایی	۰/۸۷	۰/۴۳	$Ct = ۳/۹۸ e^{۰/۰۶۹Lu}$ $R^۲ = ۰/۷۵$	$Ct = ۶/۹۲ e^{۰/۰۷۸Lu}$ $R^۲ = ۰/۱۹$
سیمان‌خوری- شاخص کیفی	۰/۱۴	-۰/۰۹	-	-

در واحدهای رادیولاریتی، ضریب همبستگی بین جفت مقادیر تراوایی - شاخص کیفی سنگ، سیمان‌خوری – شاخص کیفی سنگ و سیمان‌خوری-تراوایی به ترتیب برابر با ۰/۴۵-، ۰/۰۹- و ۰/۴۳ محاسبه گردید. به عبارتی بین تراوایی - شاخص کیفی سنگ و سیمان‌خوری-شاخص کیفی سنگ رابطه‌ای غیرمستقیم و بین سیمان‌خوری –تراوایی رابطه‌ای مستقیم وجود دارد. هرچند مقادیر این همبستگی‌ها کم است، اما می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در واحد رادیولاریتی، با افزایش شاخص کیفی سنگ مقدار تراوایی و سیمان‌خوری کم شده و با افزایش تراوایی مقدار سیمان‌خوری افزایش می‌یابد. با توجه به ضرایب همبستگی محاسبه‌شده، برآورد میزان سیمان‌خوری در واحد رادیولاریتی بر اساس شاخص کیفی سنگ گمراه‌کننده خواهد بود. مقدار سیمان‌خوری در این واحد را می‌توان تا حدی بر اساس مقدار تراوایی و با استفاده از رابطه شماره ۲ تخمین زد که در آن Ct نشان سیمان‌خوری و Lu نشان لوژان است. ضریب تعیین این رابطه ۰/۱۹ است، بنابراین تنها ۱۹ درصد از کل تغییرات سیمان‌خوری را می‌توان با استفاده از آن تخمین زد و ۸۱ درصد کل تغییرات توصیف نشده باقی خواهد ماند.

$$Ct = ۶/۹۲ e^{۰/۰۷۸ Lu} \quad (۲)$$

در سازند آهکی، ضریب همبستگی بین جفت مقادیر تراوایی-شاخص کیفی سنگ، سیمان‌خوری-شاخص کیفی سنگ و سیمان‌خوری-تراوایی به ترتیب برابر با ۰/۱۴، ۰/۰۷ و ۰/۸۷ محاسبه گردیده است که نشانگر وجود رابطه مستقیم بین این داده‌ها است. مقادیر همبستگی بین تراوایی - شاخص کیفی سنگ و سیمان‌خوری-شاخص کیفی سنگ کم است، اما بین سیمان‌خوری- تراوایی یک همبستگی خوب وجود دارد به‌طوری‌که با افزایش تراوایی بر مقدار سیمان‌خوری افزوده می‌گردد. با توجه به ضرایب همبستگی محاسبه‌شده، در واحد آهکی نیز همانند واحد رادیولاریتی برآورد میزان سیمان‌خوری بر اساس شاخص کیفی سنگ گمراه‌کننده خواهد بود. مقدار سیمان‌خوری واحد آهکی را می‌توان بر اساس مقدار تراوایی آن و با استفاده از رابطه شماره ۳ برآورد نمود که در آن Ct نشان سیمان‌خوری و Lu نشان لوژان است.

$$Ct = ۳/۹۸ e^{۰/۰۶۹ Lu} \quad (۳)$$

ضریب تعیین این رابطه ۰/۷۵ است، به‌عبارتی ۷۵ درصد از کل تغییرات در سیمان‌خوری با استفاده از رابطه شماره ۳ قابل تخمین است و تنها ۲۵ درصد کل تغییرات آن توصیف نشده باقی خواهد ماند.

در بررسی‌های صورت گرفته توسط پژوهشگرهای مختلف، نتایج گوناگونی در مورد رابطه بین ویژگی ژئومکانیکی سنگ‌ها (به‌ویژه سنگ‌آهک) گزارش شده است. در ارتباط با تراوایی و شاخص کیفی سنگ، برخی گزارش‌ها رابطه معناداری بین این دو ویژگی ارائه نداده‌اند، ولی برخی نیز از وجود رابطه خطی غیرمستقیم (با ضریب همبستگی منفی) بین آنها حکایت دارند (Foyo et al. 2004؛ Farid and Rizwan, 2017؛ بخشنده و مسعودی، ۱۳۹۵). نتایج این پژوهش نیز نشانگر وجود رابطه غیرمستقیم و ضعیف بین تراوایی و شاخص کیفی سنگ (در سنگ‌های آهکی و به‌ویژه رادیولاریتی) در ساختگاه سد رودبال بود. در مورد رابطه بین سیمان‌خوری و شاخص کیفی سنگ، بیشتر پژوهش‌های انجام شده وجود رابطه خطی و یا نمایی غیرمستقیم را بین این دو ویژگی نشان می‌داد (بخشنده و مسعودی، ۱۳۹۵؛ سهرابی بیدار و همکاران، ۱۳۹۹؛ Rastegarnia et al., 2019)، حال‌آنکه در این پژوهش رابطه‌ای ضعیف بین این دو ویژگی به‌دست آمد. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده بر روی رابطه بین سیمان‌خوری و تراوایی در واحدهای آهکی، وجود رابطه مستقیم خطی (Yang, 2004؛ Fan et al. 2016؛ بخشنده و مسعودی، ۱۳۹۵) و یا نمایی

(سهرابی بیدار و همکاران، ۲۰۱۶ و ۱۳۹۹) با همبستگی متوسط تا زیاد را نشان می‌داد. در این پژوهش نیز بین سیمان‌خوری و تراوایی، یک رابطه نمایی با ضریب همبستگی ضعیف (در سنگ‌های رادیولاریتی) و قوی (در سنگ‌های آهکی) مشاهده گردید.

نتیجه‌گیری

برخی از پژوهش‌ها نتایج آزمایش لوژان را به‌عنوان معیاری مناسب برای تخمین مقدار سیمان‌خوری در سنگ‌های کربناته دانسته‌اند. به‌دلیل وجود واحدهای سنگی مختلف در ساختگاه سد رودبال، مقدار همبستگی و رابطه‌های متفاوتی بین مقدار سیمان‌خوری، تراوایی و شاخص کیفی سنگ در گمانه‌های اکتشافی پرده تزریق سد مشاهده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در سنگ‌های آهکی این ساختگاه، ارتباط معناداری بین سیمان‌خوری و تراوایی وجود دارد، به‌گونه‌ای که هرچقدر تراوایی سنگ بیشتر باشد، مقدار سیمان‌خوری آن نیز بیشتر است. از سوی دیگر، برآورد میزان سیمان‌خوری سنگ‌آهک بر اساس شاخص کیفی آن تا حد زیادی گمراه‌کننده بوده که دلیل آن می‌تواند وجود میان لایه‌های مارنی و عدم دریافت آن‌ها در هنگام مغزه‌گیری باشد. در واحدهای رادیولاریتی، تخمین مقدار سیمان‌خوری بسیار دشوارتر بوده و برآورد آن بر اساس داده‌های شاخص کیفی سنگ گمراه‌کننده است. همچنین تخمین مقدار خورند در این سنگ‌ها بر اساس نتایج آزمایش لوژان نیز چندان قابل‌اعتماد نبوده و با خطای زیادی همراه است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در ساختگاه‌های با سنگ‌شناسی گوناگون، تخمین سیمان‌خوری بر اساس نتایج آزمایش لوژان و شاخص کیفی سنگ دقت و توجه بیشتری را می‌خواهد. جداسازی داده‌های حاصل از حفاری در واحدهای سنگی مختلف و انجام محاسبه‌ها به‌صورت جداگانه را می‌توان به‌عنوان اولین گام در کاهش خطای برآورد میزان خورند سیمان در نظر گرفت.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت مهندسین مشاور آب نیرو و شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس به‌دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های موردنیاز این مطالعه و همچنین از دانشگاه تهران به جهت همکاری در راستای راهبرد این پژوهش کمال قدردانی و تشکر را دارد.

منابع

بخشنده امنیه، ح.، مسعودی، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی و تحلیل ارتباط نتایج آزمون فشار آب و خورند دوغاب سیمانی در عملیات تزریق سد سیمره. مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، ۹ (۲): ۶۹-۸۴.

سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۸۵. نقشه زمین‌شناسی نمردان با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. برگه شماره ۶۸۴۷

سهرابی بیدار، ع.، مظفری، م.، ذوالفقاری، ع.، رستگارنیا، ا.، ۱۳۹۹. بررسی تزریق‌پذیری و تخمین خوردن سیمان در ساختگاه سد خرسان ۲. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۶(۲): ۱-۱۲.

شرکت مهندسان مشاور آب نیرو، ۱۳۹۳. گزارش عملیات آب-بندی، ژئوتکنیک، حفاری و تزریق سد مخزنی رودبال داراب. شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس. ۹۳ ص.

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.، کشاورز بخشایش، م.، ۱۳۹۹. بررسی قابلیت آزمون فشار آب در محاسبه میزان نشت از پرده آب‌بند سد سیمره در استان ایلام. نشریه هیدروژئولوژی، ۵(۱): ۱-۱۵.

Azimian, A., Ajalloeian, R., 2013. Comparison between Lugeon with secondary permeability index obtained of water pressure test in rock masses. Electron. J. Geotec. Eng, 18: 1603–1612.

Deere, D.U., 1989. Rock quality designation (RQD) after twenty years. U.S. Army Corps of Engineers Contract Report GL-89e1. Vicksburg, USA: Waterways Experiment Station.

Farid, T.A., Rizwan, M., 2017. Prediction of in situ permeability for limestone rock using rock quality designation index. World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Geotech. Geol. Eng, 11:896-899.

Fan, G., Zhong, D., Wang, J., Ren, B., 2016. Cement Take Evaluation and Prediction based on Empirical Relationships and Support Vector

Regression. In 2016 5th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2016) (pp. 699-704). Atlantis Press.

Foyo, A., Sánchez, A.M., Tomillo, C. A., 2005. proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure tests in dam foundations. Eng. Geol., 77: 69–82.

Gürocak, Z., Alemdag˘, S., 2012. Assessment of permeability and injection depth at the Atasu Dam site (Turkey) based on experimental and numerical analyses. Bull. Eng. Geol. Environ., 71: 221-229.

Kayabasi, A., Yesiloglu-Gultekin, N., Gokceoglu, C., 2015. Use of nonlinear prediction tools to assess rock mass permeability using various discontinuity parameters. Eng. Geol., 185: 1-9.

Kayabasi a., and Gokceoglu, C. 2019. An Assessment on Permeability and Grout Take of Limestone: A Case Study at Mut Dam, Karaman, Turkey. Water, 11, 2649.

Milanović, P.T., 2004. Water resources engineering in karst. CRC Press, Boca Raton, Florida, 312 p.

Nonveiller, E. 1988. Grouting theory and practice. Developing in geotechnical engineering. Elsevier, ISBN, 964-91095-8-7. 250 p.

Qureshi, U.M., Khan, M.K., Bessaih, N., Al-Mawwali, K., Al-Sadrani, K., 2014. An empirical relationship between in-situ permeability and RQD of discontinuous sedimentary rocks. Electron. J. Geotec. Eng., 19: 4781-4790.

Rastegarnia, A., Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., Farrokhzad, S.S., 2019. Assessment of the engineering geological characteristics of the Bazoft dam site, SW Iran. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 52(3): 360-374.

Sadeghiyeh, S.M., Hashemi, M., Ajalloeian, R., 2013. Comparison of permeability and groutability of ostur dam site rock mass for grout curtain design. Rock Mech. Rock Eng. 46, 341–357.

Sohrabi-bidar, A. 2016. Estimation of the grout take using empirical relationships (case study: Bakhtiari dam site), Bull. Eng. Geol. Environ, 75(2): 425-438

Uromeihy, A., Farrokhi, R., 2012. Evaluation groutability at Kamal-Saleh dam based on Lugeon test results. Bull. Eng. Geol. Environ., 71: 215-219.

Yang, C.P., 2004. Estimating cement take and grout efficiency on foundation improvement for Li-Yu-Tan dam. Engineering geology, 75(1): 1-14.