

بررسی مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم با استفاده از آنالیز هیدروژئولوژیکی

مرتضی مظفری*

۱- استادیار زمین‌شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۲۱

چکیده

به دلیل هیدروژئولوژی پیچیده مناطق کارستی، ساخت سد و مخازن در این نواحی با سختی و مشکلاتی همراه است که فرار آب از مخزن از جمله آن می‌باشد. سد شاه قاسم از نوع سد خاکی با هسته رسی است که با ارتفاع ۴۷ متر از پی و حجم مخزن ۹ میلیون مترمکعب در فاصله ۱۵ کیلومتری جنوب شهر یاسوج قرار دارد. این سد در یال شمالی تقادیس شاه قاسم، بر روی سازند آسماری ساخته شده است و آب مخزن آن با آهک‌های کارستی سازند آسماری-جهرم، مارن‌های سازند پابده-گورپی و لایه‌های مارنی و آهکی واحد انتقالی در تماس است. با شروع آبیگری سد در سال ۱۳۷۵، مشکل فرار آب از مخزن آن گزارش شد و تا به امروز نیز ادامه دارد. در این پژوهش، ضمن ترسیم نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، نیمرخ‌های زمین‌شناسی مناسب در راستای عمود بر روند عمومی ساختارهای زمین‌شناسی تهیه شده است. در ادامه تاریخچه آبیگری مخزن و تزریق تکمیلی انجام شده ارائه گردیده و تأثیر این عملیات بر روی کاهش مقدار فرار آب مورد ارزیابی قرار گرفته است. سپس با بررسی نتایج آزمایش‌های لوژان و مقدار سیمان خوری گمانه‌های تزریق، میزان نفوذپذیری سازندهای مختلف و در نتیجه توان آبیگری آن‌ها تعیین شده است. همچنین با مقایسه تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، چگونگی ارتباط هیدرولیکی بین آن‌ها مطالعه شده است. در پایان، پنجره ورود آب و مسیر محتمل فرار آب از مخزن مشخص گردیده و راهکارهایی برای حل مشکل فرار آب ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: سد شاه قاسم، سازند آسماری، کارست، فرار آب، پرده تزریق.

مقدمه

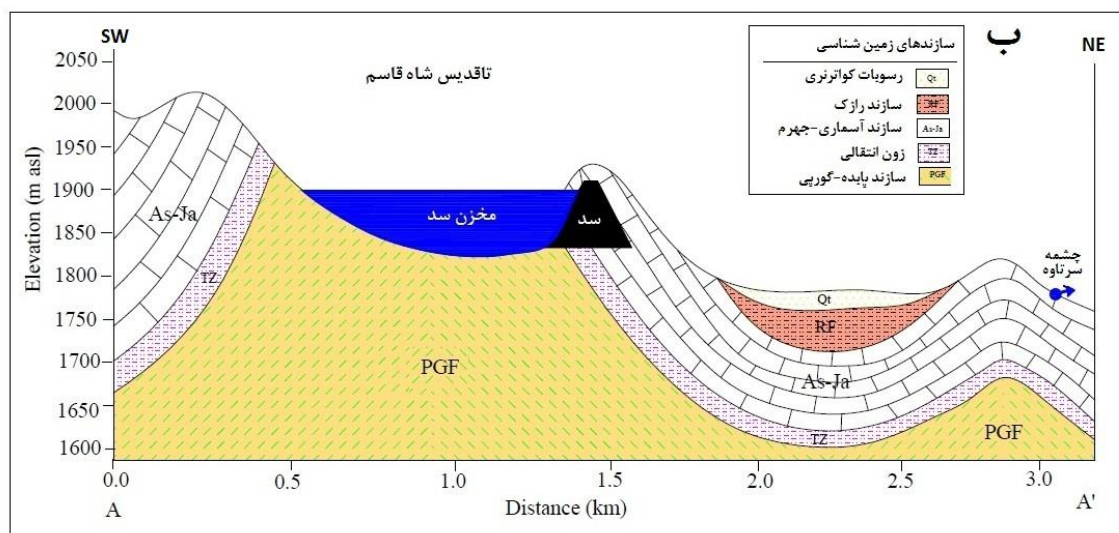
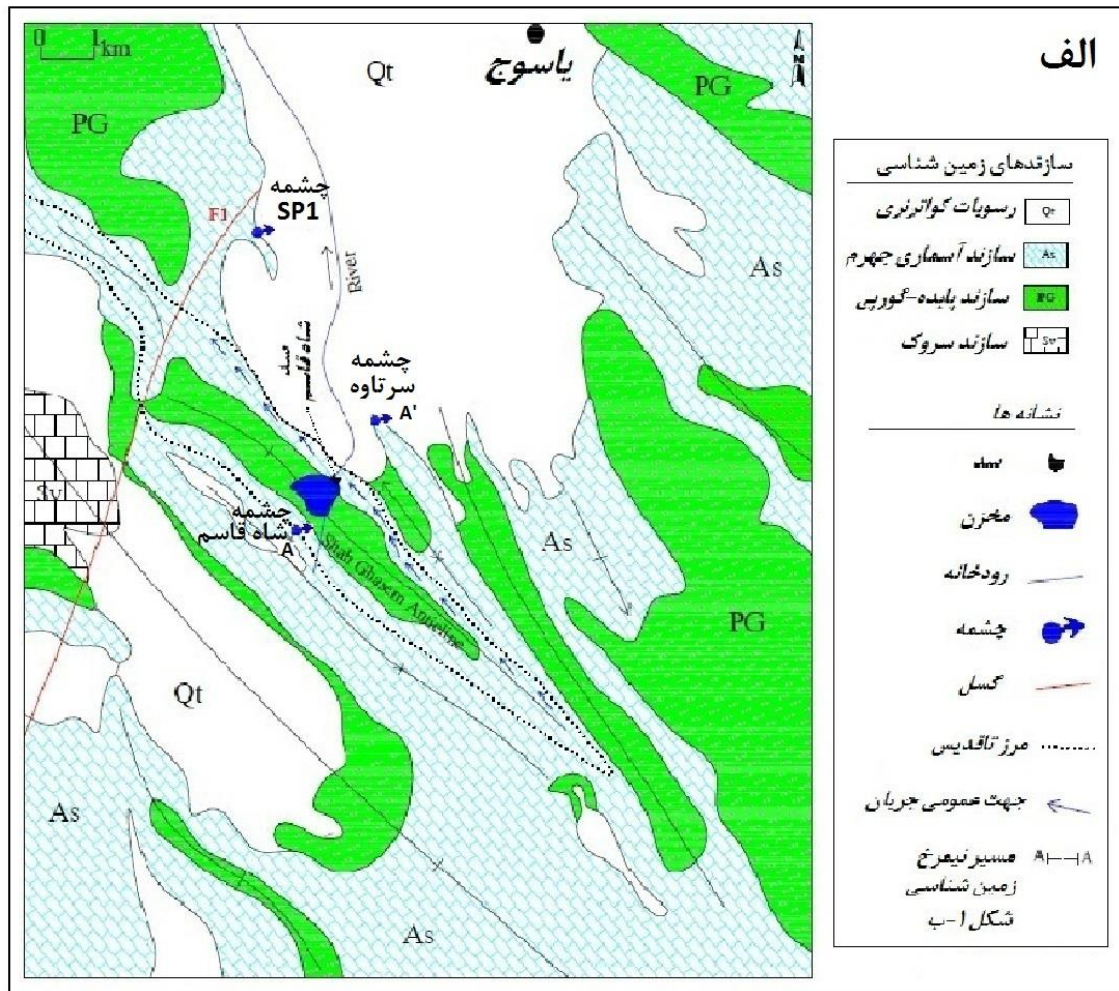
آب‌بندی سدهای ساخته شده در این نواحی معمولاً سخت‌تر، طولانی‌تر و گران‌تر از دیگر جایگاه‌های زمین‌شناسی بوده و احتمال فرار آب از آن‌ها بیشتر است (Bunyamin et al., 2007). تجربه‌های سدسازی در مناطق کارستی امریکا در نیمه اول قرن بیستم منجر به پیشرفت روش‌های طراحی و اجرای دیواره آب‌بند و پرده تزریق شد. مشکل فرار آب از سدهای واقع در مناطق کارستی برای اولین بار در سال ۱۹۱۳ میلادی و در سد

طراحی و اجرای برخی از سازه‌های آبی نظیر سد نیازمند صرف هزینه و وقت فراوان است. در مدیریت منابع آب حجم مخزن هر سد به گونه‌ای طراحی می‌شود که پاسخگوی نیازهای آبی طرح، متناسب با تخصیص آب آن باشد. عدم آبیگری کامل مخزن در اثر پدیده فرار آب سبب عدم دستیابی به اهداف طرح می‌گردد و هدر رفت بخشی از سرمایه را به دنبال دارد (مظفری و جامعی، ۱۳۹۷). به دلیل هیدروژئولوژی پیچیده کارست،

هیلز بار^{۲۳} در امریکا گزارش شده است. به دلیل حجم زیاد فرار آب و عدم موفقیت عملیات آب‌بندی این سد، سد جدیدی در ۱۰ کیلومتر پایین دست احداث گردید (Bruce et al., 2005; Donnelly et al., 2009). با افزایش تجربه و پیشرفت تکنولوژی، دانش آب‌بندی توسعه یافت و سدهای زیادی در نواحی کارستی کشورهای نظیر آمریکا، چین، کرواسی، یونان، ایران، اسلونی، اسپانیا، ترکیه و یوگوسلاوی ساخته شده است که در برخی مناطق هنوز نیز ادامه دارد. تعداد زیادی از این طرح‌ها عملکرد خوبی داشته اما عدم موفقیت در برخی پروژه‌ها کارست را به عنوان محیطی خطرناک برای سدسازی معرفی کرده است (Milanovic, 2004; Mozafari and Raeisi, 2018). پس از مشاهده فرار آب از مخزن یک سد و در صورتی که مقدار فرار آب قابل توجه باشد، عملیات آب‌بندی تکمیلی طراحی و اجرای می‌شود که در آن با تزریق دوغاب سیمان و سایر مواد آب‌بند در پی و تکیه‌گاه‌ها، در مسیر فرار آب مانع ایجاد می‌گردد. طبیعت مناطق کارستی به گونه‌ای است که نتیجه عملیات تزریق تکمیلی را نمی‌توان از قبل پیش‌بینی کرد و گاهی به گرفتن تصمیمات صحرائی (تصمیماتی که در مرحله طراحی دیده نشده است و در محل کار توسط کارشناس ناظر گرفته می‌شود) نیاز می‌شود. انجام عملیات تزریق تکمیلی نیازمند طراحی مناسب، تخصص، زمان و سرمایه کافی است. پایه و اساس طراحی عملیات آب‌بندی، داشتن اطلاعات زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی مناسب است به گونه‌ای که وجود اطلاعات کافی امکان آب‌بندی موفق را فراهم ساخته و نیاز به تصمیمات صحرائی را کاهش می‌دهد (Nonveiller, 1988). تزریق تکمیلی مناسب و صحیح سبب کاهش قابل توجه فرار آب از برخی از

سدها شده است. برای مثال، انجام تزریق تکمیلی سبب کاهش مقدار فرار آب از ۲۶ به ۱۰ مترمکعب بر ثانیه در مخزن سد کبان^{۲۴} در ترکیه، از ۱۱/۲ به ۲/۶ مترمکعب بر ثانیه در مخزن سد کاماراسا^{۲۵} در اسپانیا و از ۹/۵ به ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه در مخزن سد گریتفالز^{۲۶} در امریکا گردیده است. در برخی موارد به دلیل ناشناخته بودن مسیر جریان و پیچیده بودن مشکل فرار آب، تزریق تکمیلی در کاهش فرار آب از سد تأثیری نداشته است. به عنوان مثال، با وجود انجام تزریق تکمیلی گسترده در سدهای لار در ایران، ورتکا^{۲۷} در یوگوسلاوی، فودا^{۲۸} در مراکش، ایلکی^{۲۹} در یونان و انکور^{۳۰} در امریکا، فرار آب از مخزن آنها کاهش چندانی نداشته است (Milanovic, 2004). سد شاه قاسم از نوع سد خاکی با هسته رسی است که با حجم مخزن ۹ میلیون مترمکعب، ارتفاع ۴۷ متر از پی و طول تاج ۲۲۰ متر در فاصله ۱۵ کیلومتری جنوب شهر یاسوج (شکل ۱ الف) و با هدف ذخیره آب چشمه فصلی شاه قاسم و کنترل سیلاب رودخانه فصلی پریکدان ساخته شده است. تراز رودخانه در محل ساختگاه، تراز نرمال آب مخزن و تراز تاج سد به ترتیب برابر با ۱۸۶۰، ۱۸۹۴ و ۱۸۹۷ متر از سطح دریا است. از زمان شروع بهره‌برداری از این سد در سال ۱۳۷۵، مخزن آن با مشکل فرار آب مواجه شده است (پوراب فارس، ۱۳۹۳). در این پژوهش کوشیده شده است تا با ارزیابی و مطالعه داده‌های موجود، مشکل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم بررسی شود و ضمن تعیین محتمل‌ترین مسیر فرار آب، راهکارهایی برای حل این مشکل ارائه گردد.

²⁷ Vrtca²⁸ Fodda²⁹ Iliki³⁰ Anchor²³ Hales Bar²⁴ Keban²⁵ Camarassa²⁶ Great Falls



شکل ۱-الف) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه؛ و ب) نیمرخ زمین شناسی تهیه شده در راستای عمود بر محور تقادیس شاه قاسم که در آن موقعیت سد و مخزن به صورت شماتیک نشان داده شده است.

محدوده مورد مطالعه

بر اساس تقسیمات زمین‌شناسی ساختاری ایران، ساختگاه سد شاه قاسم در پهنه زاگرس چین خورده قرار دارد. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. تاکدیس شاه قاسم با حدود ۱۳ کیلومتر طول، ۱/۲ کیلومتر عرض و روندی به موازات روند عمومی کوه‌های زاگرس مهمترین ساختار زمین‌شناسی منطقه می‌باشد. این تاکدیس از سازندهای پابده-گورپی، آسماری-چهرم و رازک تشکیل شده است. سازند پابده - گورپی توالی از مارن‌های خاکستری و مارن‌های آهکی نازک لایه سبز رنگ با میان لایه‌های نازک آهک مارنی را در برمی‌گیرد و در هسته تاکدیس رخنمون دارد. مرز این سازند با سازند آسماری-چهرم در محدوده مورد مطالعه به‌صورت یک واحد انتقالی^{۳۱} است که از لایه‌های متناوب مارن، آهک مارنی و آهک نازک لایه تشکیل شده است. سازند آسماری-چهرم در حدود ۶۰۰ متر سنگ آهک و سنگ آهک دولومیتی ضخیم لایه توده‌ای خاکستری رنگ را شامل می‌شود و در هر دو یال تاکدیس رخنمون دارد. وجود درز و شکاف، حفرات انحلالی، انواع کارن^{۳۲} و گریک^{۳۳} فراوان گواه بر بالغ بودن کارست در این سازند بوده، مهمترین آبخوان منطقه را تشکیل می‌دهد. بر روی سازند آسماری در حدود ۱۰۰۰ متر انیدریت، مارن و شیل‌های سازند رازک قرار دارد که در پای تاکدیس رخنمون یافته و در دشت مجاور توسط رسوبات عهد حاضر پوشیده می‌شود (شکل ۱).

در نواحی میانی تاکدیس شاه قاسم، دره‌ای به طول حدود ۲/۴ کیلومتر و با روندی تقریباً عمود بر راستای محور تاکدیس قرار دارد. سازند آسماری بخش‌های مرتفع دیواره این دره در هر دو

یال تاکدیس را می‌سازد. آب چشمه شاه قاسم از درون این دره، از یال جنوب غربی تاکدیس به سوی یال شمالی جریان یافته و سپس وارد دشت یاسوج می‌شود (شکل ۱). سد شاه قاسم در دره یاد شده، بر روی یال شمالی تاکدیس و بر روی سازند آسماری-چهرم ساخته شده است و مخزن آن در محدوده هسته تاکدیس و بر روی سازند پابده - گورپی، واحد انتقالی و تا حد کمی سازند آسماری-چهرم گسترش دارد (شکل ۲). در محل محور سد، لایه‌بندی در تکیه‌گاه راست با شیب ۱۷ و امتداد ۱۲۳ درجه و در تکیه‌گاه چپ با شیب ۴۸ و امتداد ۱۲۹ درجه قرار گرفته‌اند. این امکان وجود دارد که وجود گسلی در محدوده دره سبب این تغییر شیب و امتداد شده باشد. مهمترین چشمه‌های محدوده مورد مطالعه عبارت‌اند از چشمه شاه قاسم، چشمه SP1 و چشمه سرتاوه (شکل ۱). چشمه شاه قاسم در یال جنوب غربی تاکدیس شاه قاسم و از سازند آسماری خارج می‌شود و آب آن با عبور از دره ساختگاه سد به سمت دشت جاری می‌گردد. دبی این چشمه در فصل تر به ۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. چشمه SP1 در فاصله حدود ۸ کیلومتری شمال غرب سد، از سازند آسماری-چهرم واقع در یال شرقی تاکدیس شاه قاسم خارج می‌شود و دبی آن در فصل تر در حدود ۲ مترمکعب بر ثانیه برآورد می‌شود. چشمه سرتاوه، با دبی در حدود ۲ مترمکعب بر ثانیه، در فاصله حدود ۲ کیلومتری شرق بدنه سد، از سازند آسماری-چهرم واقع در یال شرقی تاکدیس مجاور تاکدیس شاه قاسم خارج می‌شود. در دامنه شرقی تاکدیس شاه قاسم قنات وجود ندارد، اما تعدادی چاه پمپاژ (حداقل ۴ عدد) مشاهده شده است که آب خروجی از آن جهت مصرف شرب به شهر یاسوج منتقل می‌شود.

³³ Grike³¹ Transient unit³² Karren



شکل ۲- نمایی از تکیه‌گاه راست مخزن سد شاه قاسم که در آن موقعیت مخزن و رخنمون سازندها قابل مشاهده است (جهت نگاه به جنوب شرق).

مواد و روش‌ها

نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بر اساس نقشه زمین‌شناسی یاسوج (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران (۱۳۵۴) ترسیم گردیده است. طی بازدید زمین‌شناسی، ضمن برداشت‌های زمین‌شناسی، شرایط مخزن سد و میزان توسعه کارست سازند آسماری-چهرم نیز ارزیابی شده است. نیمرخ‌های زمین‌شناسی در راستای عمود بر روند ساختارهای زمین‌شناسی و متناسب با اهداف پژوهش تهیه گردیده است. تاریخچه آبگیری مخزن، مشکل فرار آب، تزریق تکمیلی انجام شده و تأثیر آن بر روی میزان فرار آب بررسی و ارائه شده است. قابل بیان است که به دلیل عدم مشاهده زه‌آب و یا چشمه در پائین دست سد، اندازه‌گیری دقیق مقدار فرار آب امکان‌پذیر نبوده، بنابراین مقدار فرار آب با استفاده از محاسبه بیلان در دوره زمانی مهرماه ۸۹ تا اسفندماه ۹۳، انجام شده توسط شرکت مهندسین مشاور پوراب فارس (۱۳۹۳) تخمین زده شده است. قبل از ساخت سد چهار گمانه و پس از ساخت آن نیز تعداد بیشتری گمانه در ساختگاه سد حفاری گردید و

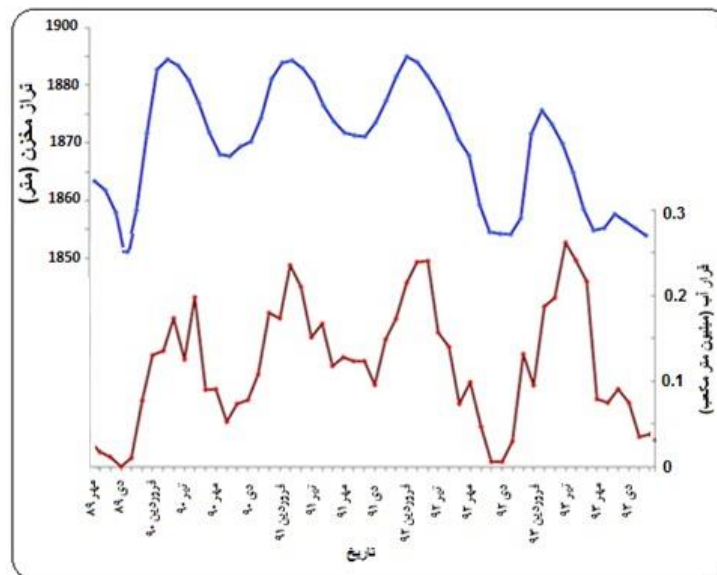
آزمایش لوژان در آن انجام شد. با بررسی نتایج این آزمایش‌ها، میزان نفوذپذیری سازندهای مختلف و در نتیجه توان آبگذری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ساختگاه سد، ۶ چاه مشاهده‌ای در تکیه‌گاه‌ها و ۳۷ حلقه چاه مشاهده‌ای بر روی بدنه سد حفر شده که از آن میان تعدادی تنها در بدنه قرار دارند و برخی به درون سنگ بستر نیز نفوذ کرده‌اند. تغییرات تراز آب برخی از این چاه‌های مشاهده‌ای همزمان با نوسانات تراز آب مخزن اندازه‌گیری و ثبت شده است. با بررسی سری زمانی این تغییرات، چگونگی ارتباط هیدرولیکی مخزن و نواحی پایین دست آن ارزیابی شده است. در پایان، با توجه به جایگاه زمین‌شناسی و سایر شواهد موجود، مسیر محتمل فرار آب (شامل پنجره ورود، مسیر جریان و محل خروج) تعیین گردیده است.

بحث و نتایج

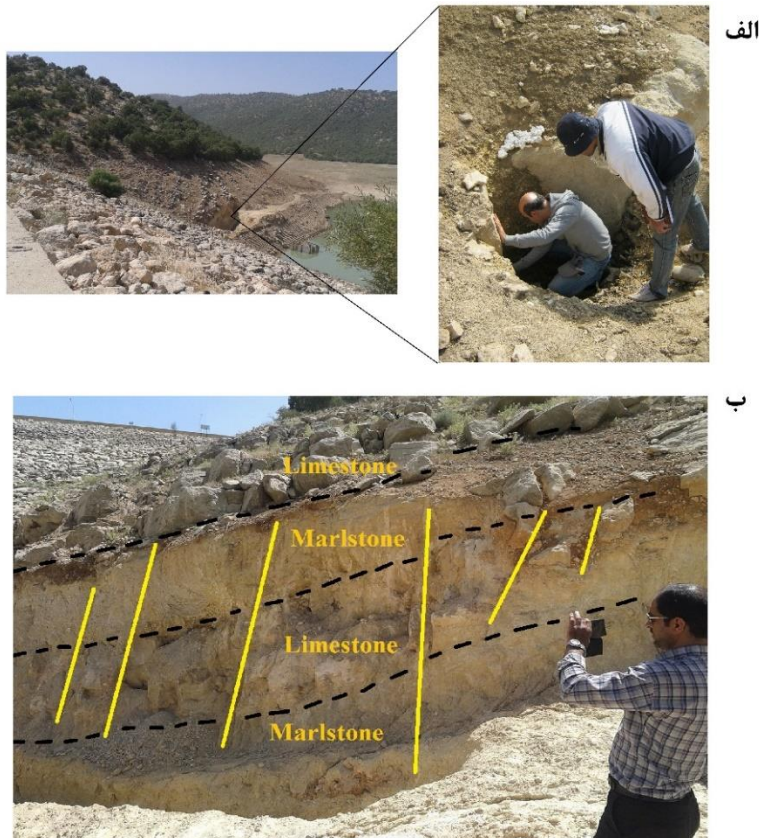
تاریخچه آبگیری مخزن، فرار آب و عملیات تزریق تکمیلی مطالعات مرحله اول سد شاه قاسم از اوایل سال ۱۳۷۳ شروع شد. از سیستم آب‌بندی اجرا شده در مرحله ساخت سد شاه

واحد انتقالی و در ساحل راست مخزن قرار داشت (شکل ۴). به منظور کاهش فرار آب از مخزن، طی مهرماه ۱۳۸۹ تا مهرماه ۱۳۹۰، تعداد ۱۰ حلقه گمانه، هریک به عمق ۱۰۰ متر، به صورت عمودی بر روی تاج سد (به ویژه در بخش مرکزی آن) حفاری و تزریق گردید. از جزئیات این عملیات اطلاع دقیقی در دسترس نیست اما بنا بر برخی یادداشت‌ها مقدار سیمان خوری در ۱۰۰ متر طول گمانه‌ها بین ۶۰۰ تا ۴۴۲۰۰ کیلوگرم متغیر بوده است (پوراب فارس، ۱۳۹۳). از آنجا که بخش بالایی این گمانه‌ها (حدود ۴۰ متر) در بدنه سد حفاری شده است، می‌توان نتیجه گرفت که بخش عمده خوردن سیمان متعلق به قسمت انتهایی آن‌ها که در سنگ بستر حفاری شده است (حدود ۶۰ متر) می‌باشد. به نظر می‌رسد که حفاری و تزریق گمانه‌های مذکور در کاهش و یا توقف فرار آب از مخزن سد بی‌تأثیر بوده است چرا که پس از انجام این عملیات و با وجود عدم استفاده از آب مخزن، کاهش غیرطبیعی تراز آب همچنان ادامه داشته است (شکل ۳).

قاسم داده‌ای موجود نیست اما به احتمال فراوان این سد فاقد پرده تزریق در تکیه‌گاه‌ها است چرا که علاوه بر نداشتن تونل دسترسی در تکیه‌گاه‌ها و یا بدنه، هیچ نشانه‌ای از حفاری و تزریق در سطح زمین نیز مشاهده نشده است. با پایان یافتن ساخت سد در اواخر سال ۱۳۷۵ آبیگری آن آغاز شد و تا سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۳۷۸ به دلیل آورد مناسب و عدم استفاده از آب مخزن، تراز آب آن در رقوم بالا قرار داشت. در اواسط تیر ماه ۱۳۷۹ و در پی آغاز استفاده از آب مخزن جهت کشاورزی، تراز آب به رقم ۱۸۶۷ متر رسید و از آن پس باقیمانده آب مخزن طی مدت کوتاهی به طور غیر طبیعی تخلیه شد. تخمین مقدار فرار آب با استفاده از محاسبه بیلان (شکل ۳) نشان می‌داد که مقدار فرار آب در تراز نرمال مخزن (۱۸۹۴ متر) در حدود ۲۴۰ لیتر بر ثانیه و مجموع فرار آب در سال ۱۳۹۳ برابر با ۱/۱۶۵ میلیون مترمکعب (تقریباً برابر با ۱۳ درصد حجم مخزن) بوده شده است (پوراب فارس، ۱۳۹۳). در زمان پایین افتادن تراز آب، در برخی نقاط مخزن گرداب‌هایی پدید آمد و با خشک شدن آب حفاراتی در بستر مخزن مشاهده شد که مهمترین آن (با ابعادی کمتر از ۱ متر) در میان لایه‌ی آهکی L3 متعلق به



شکل ۳- مقدار فرار آب و نوسانات تراز آب مخزن (شرکت مهندسی مشاور پوراب فارس، ۱۳۹۳).

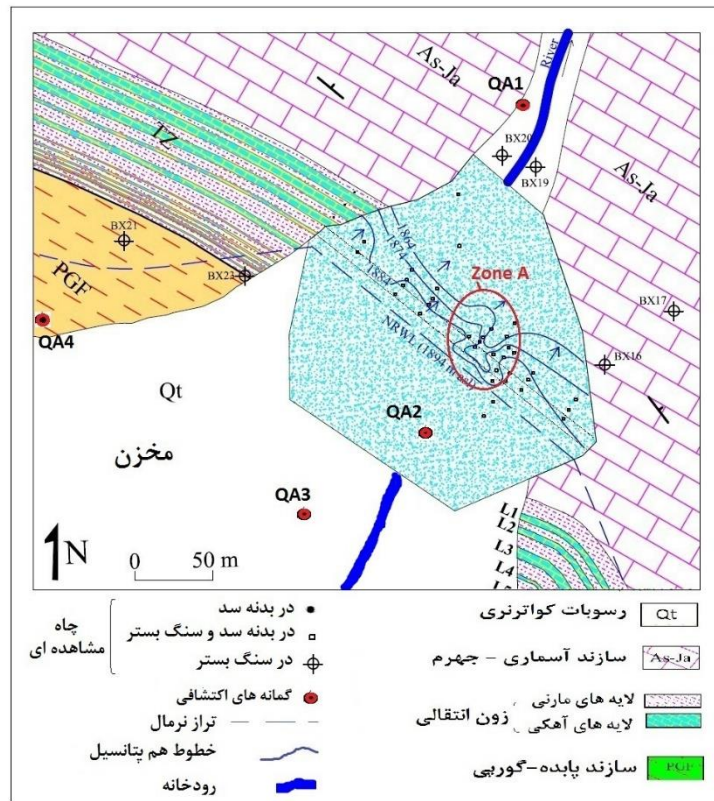


شکل ۴- حفره مشاهده شده در لایه‌های آهکی واحد انتقالی در تکیه‌گاه راست پس از کاهش تراز آب مخزن، (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات خاک‌برداری.

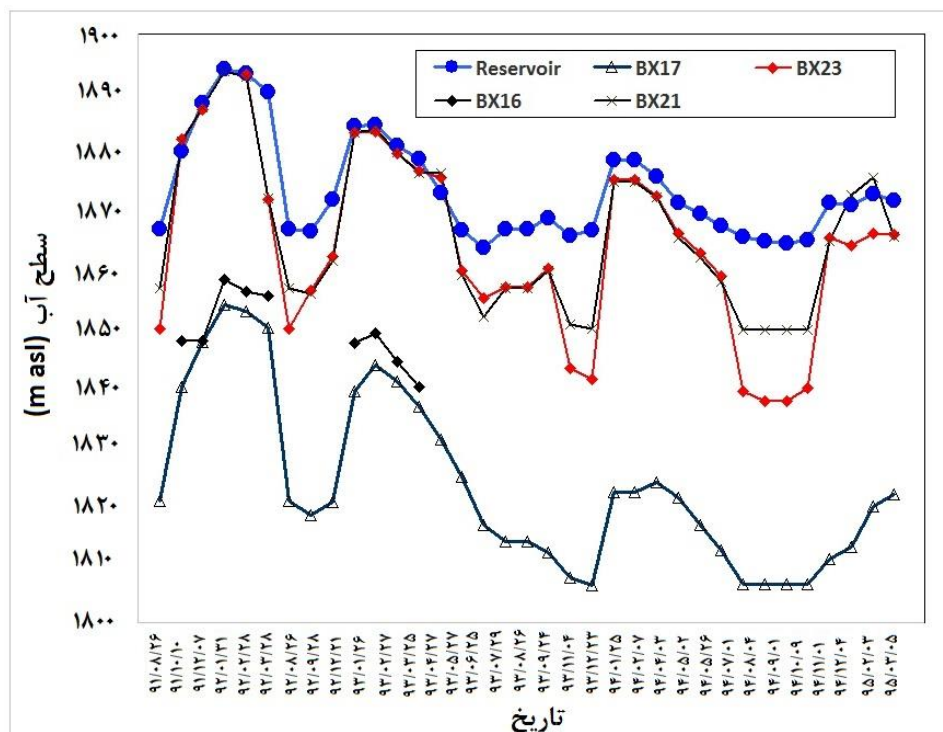
نوسانات سطح آب در چاه‌های مشاهده‌ای

از میان چاه‌های مشاهده‌ای حفر شده بر روی بدنه سد، تعدادی فقط در محیط بدنه حفر شده‌اند. بر اساس سطح آب این چاه‌های مشاهده‌ای در زمان تراز نرمال آب مخزن (فروردین‌ماه ۹۲) نقشه هم‌تراز سطح آب در بدنه سد تهیه گردیده است (شکل ۵). اگرچه بدنه سد محیطی ناهمگن می‌باشد، اما این نقشه نشانگر وجود جریان آب زیرزمینی در بدنه سد از ناحیه مخزن به سمت پایین دست است. به نظر می‌رسد که در نواحی مرکزی بدنه (Zone A در شکل ۵) مؤلفه عمودی جریان از شدت بیشتری برخوردار است. با توجه به عدم مشاهده نشستی و همچنین نشست در بدنه سد پس از گذشت حدود ۲۰ سال از ساخت آن، به نظر می‌رسد که سرعت و حجم جریان آب عبوری

در بدنه در حد مجاز می‌باشد. در بین گمانه‌های حفر شده بر روی بدنه، ۹ حلقه در قسمت‌های انتهایی به درون لایه‌های متناوب مارنی و آهکی سنگ بستر نفوذ کرده‌اند. بررسی تغییرات تراز آب در این گمانه‌ها نشان می‌دهد که آن دسته از گمانه‌هایی که با لایه‌های آهکی بیشتری برخورد داشته‌اند نوسانات سطح آب هماهنگ‌تری با نوسانات تراز آب مخزن دارند. گمانه‌های BX16 و BX17 در تکیه‌گاه راست و در سازند آسماری و گمانه‌های BX21 و BX23 در تکیه‌گاه چپ و در واحد انتقالی حفر شده‌اند. تغییرات سطح آب این گمانه‌ها با نوسانات تراز آب مخزن هماهنگی خوبی را نشان می‌دهد (شکل ۶) و به نظر می‌رسد که ارتباط هیدرولیکی شدیدی بین مخزن و محدوده این گمانه‌ها برقرار است.



شکل ۵- موقعیت گمانه های ساختگاه سد و همچنین خطوط ایزوپتانسیل و جهت جریان در بدنه سد.



شکل ۶- سری زمانی تغییرات تراز آب مخزن و سطح آب گمانه های BX16, BX17, BX21, و BX23

نفوذپذیری واحدهای سنگی

قبل از ساخت سد، چهار حلقه گمانه QA1، QA2، QA3 و QA4 در ساختگاه سد حفاری گردید و آزمایش لوژان در آنها انجام شد. محل این گمانه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در گمانه QA1 که با عمق ۴۰ متر در سازند آسماری-جهرم در تکیه‌گاه چپ حفر گردید، میزان نفوذپذیری تا عمق ۲۰ متری بین ۸۶ تا ۱۰۰ لوژان و در اعماق پایین‌تر زیر ۱۰ لوژان اندازه‌گیری شده است. در گمانه‌های QA2 و QA3 که هریک با عمق ۴۰ متر در واحد انتقالی قرار دارند، مقدار نفوذپذیری در واحدهای مارنی کمتر از ۱۰ لوژان و در لایه‌های آهکی بین ۳۹ تا ۱۰۰ لوژان گزارش شده است. در گمانه QA4 که در ساحل چپ مخزن و در سازند پابده-گورپی حفاری گشته، میزان نفوذپذیری در عمق ۷-۱۰ متری ۲۶ لوژان و در عمق ۱۵-۲۰ متری ۴ لوژان گزارش شده است (پوراب فارس، ۱۳۹۳). آزمایش لوژان در اکثر گمانه‌های حفر شده پس از ساخت سد نیز انجام شده است. نکته جالب توجه مشاهده مقادیر نفوذپذیری بالا در بیشتر بخش‌های آهکی واقع در این گمانه‌ها است. به عنوان مثال در گمانه BX11 که در قسمت‌های میانی بدنه سد قرار دارد و ۲۵ متر انتهایی آن در سنگ بستر حفر شده، نفوذپذیری در لایه‌های مارنی بین ۲۴ تا ۴۳ لوژان و در لایه‌های آهکی بین ۳۵ تا ۱۰۰ لوژان متغیر بود. در ارتباط با گمانه BX17 (واقع در تکیه‌گاه راست و در فاصله حدود ۶۰ متری از بدنه سد)، تا عمق ۶۰ متری ابتدای آن از مقدار نفوذپذیری داده‌ای در دسترس نیست، اما در ۳۰ متری انتهایی آن مغزه حفاری از سنگ آهک با نفوذپذیری بین ۲۴ تا ۴۰ لوژان تشکیل شده است.

سفره کارستی

در تاکدیس شاه قاسم سازند آسماری-جهرم بین سازندهای ناتراوای رازک و پابده-گورپی قرار گرفته و سفره کارستی را ایجاد نموده است. مشاهده پدیده‌های کارستی فراوان و همچنین مقادیر نفوذپذیری و سیمان خوری زیاد گمانه‌های حفر شده در سازند آسماری نشانگر توسعه قابل توجه کارست

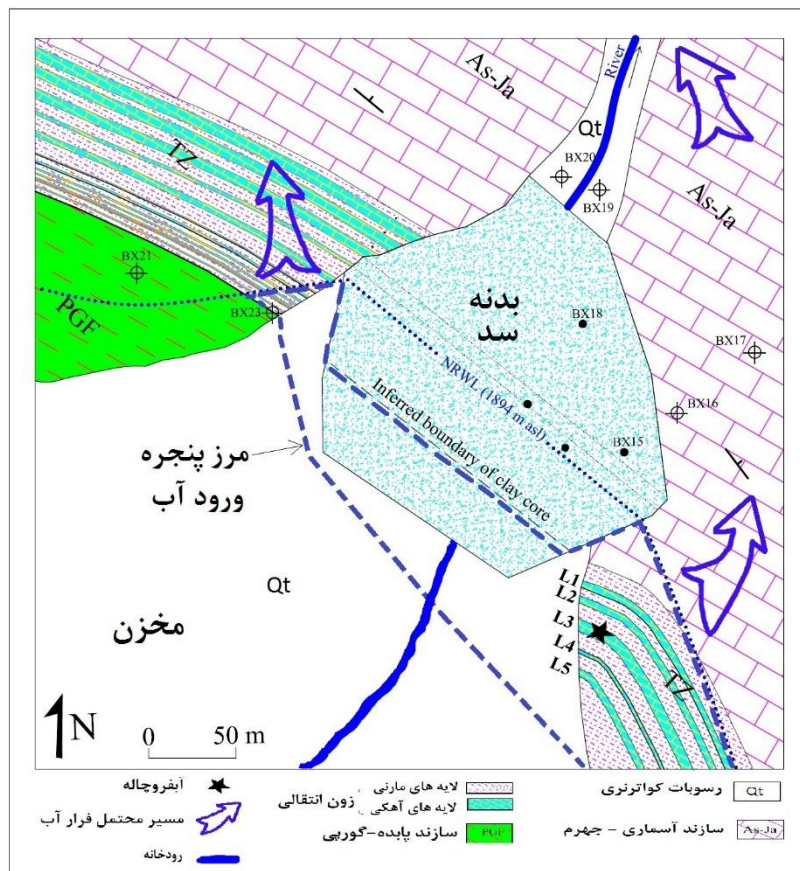
در این سازند است. به دلیل رخنمون سازند ناتراوای پابده-گورپی در هسته تاکدیس، ارتباط هیدرولیکی بین دو یال آن قطع شده و سازند کارستی در هر یال سفره جداگانه‌ای را ایجاد نموده است (شکل ۱ ب). در تاکدیس‌های زاگرس، آب سفره‌های کارستی در پای تاکدیس و به موازات محور چین جریانی می‌یابد و در محل مناسب از طریق چشمه، قنات و یا چاه خارج می‌شود و یا به درون آبرفت دشت مجاور تخلیه می‌گردد (Ashjari and Raeisi, 2007). در سفره کارستی یال شمالی تاکدیس شاه قاسم، شیب سنگ بستر (سازند پابده-گورپی) از جنوب شرقی به سمت شمال غرب است و جهت عمومی جریان آب زیرزمینی نیز می‌تواند از این شیب سنگ بستر پیروی کند (شکل ۱) و در نتیجه چاه‌های پمپاژ آب شرب واقع در یال شمالی تاکدیس و همچنین چشمه SP1 می‌تواند آب سفره کارستی یاد شده را تخلیه نماید. هرچند به دلیل قرار گرفتن سازند کارستی در اعماق و در زیر سازند ناتراوای رازک، توسعه کارست در محل ناودیس بین تاکدیس شاه قاسم و تاکدیس‌های مجاور از امکان کمی برخوردار است، اما امکان انتقال بخشی از آب سفره کارستی یال شمالی تاکدیس شاه قاسم به چشمه سرتاوه نیز وجود دارد.

مسیر محتمل فرار آب

مسیر محتمل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم در شکل ۷ نشان داده شده است. این مسیر شامل پنجره ورود، مسیر جریان و محل خروج آب است. پنجره ورود آب، تشکیلات نفوذپذیر در تماس مستقیم با آب مخزن (از تراز بستر تا تراز نرمال آن) را شامل می‌شود که در محدوده آن آب توانایی نفوذ و پیوستن به سفره آب زیرزمینی را دارد. با توجه به سطح تماس آب با سازندهای تراوا، طول پنجره ورود آب در تکیه‌گاه راست، بستر مخزن و تکیه‌گاه چپ به ترتیب در حدود ۱۲۰، ۲۲۰ و ۵۰ متر تخمین زده می‌شود. پتانسیل نفوذ آب در تکیه‌گاه راست بیشتر از ناحیه مخزن و تکیه‌گاه چپ می‌باشد چرا که در این تکیه‌گاه، سطح تماس آب با سازند آسماری-جهرم و واحد انتقالی بیشتر

میان لایه‌های آهکی و یا آهک مارنی واقع در زیر رسوب‌های بستر است. بر اساس زمین‌شناسی ساختگاه سد و با توجه به تغییر شیب و امتداد لایه‌های سنگی (به دلیل عملکرد گسل احتمالی موجود در بستر دره)، با حرکت از تکیه‌گاه راست به سوی تکیه‌گاه چپ، از وسعت واحد انتقالی در ناحیه مخزن کاسته می‌شود (شکل ۷). در تکیه‌گاه چپ مخزن آب بیشتر در تماس با سازند پایده گورپی است و تنها در طول حدود ۵۰ متر آب در تماس با واحد انتقالی است و می‌تواند به درون آن نفوذ کند.

است. وجود درز و شکاف‌های نزدیک به قائم و با راستای تقریباً عمود بر راستای لایه‌بندی، حفرات انحلالی و آب‌فروچاله، فرآیند نفوذ آب را شدت می‌بخشد. عملیات خاک‌برداری انجام شده در محل حفره‌ای واقع در واحد انتقالی در تکیه‌گاه راست، وجود لایه‌های متناوب مارن و سنگ آهک با ضخامتی در حدود ۱ تا ۲ متر که توسط سیستم درزه‌ای با شیب نزدیک به قائم و امتدادی تقریباً عمود بر امتداد لایه‌بندی قطع شده بود را نشان می‌داد (شکل ۴ ب) که نشانگر پتانسیل بالای نفوذ آب است. در هنگام کاهش تراز آب مخزن، گرداب‌های کوچکی در سطح آب و در ناحیه بستر مخزن مشاهده شد که نشانگر نفوذ آب به درون



شکل ۷- مسیر محتمل فرار آب از مخزن سد شاه قاسم.

این مسیر اولیه باشد. به نظر می‌رسد که مسیر جریان آب زیرزمینی در سفره کارستی از تکیه‌گاه راست به سمت تکیه‌گاه چپ و مطابق با جهت عمومی جریان آب در سفره کارستی (به موازات روند چین‌خوردگی و از جنوب شرق به سمت شمال

پس از ورود به سازند کارستی، آب می‌تواند در امتداد شیب لایه‌بندی به سمت سفره آب زیرزمینی سفره کارستی حرکت کند و به آن بپیوندد. نوسانات بسیار هماهنگ تراز آب مخزن و سطح آب گمانه‌های واقع در هر دو تکیه‌گاه می‌تواند تائید کننده

می‌گشاید و به سفره کارستی می‌پیوندد. بر اساس شواهد موجود آب مخزن سد نقشی پنهان اما مفید در تغذیه سفره کارستی واقع در یال شمالی تاقدیس و تأمین آب چاه‌های شرب حفر شده در این سفره را دارد.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از شرکت مهندسی مشاور پورآب فارس و شرکت سهامی آب منطقه‌ای کهگیلویه و بویراحمد به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز این مطالعه و از دانشگاه تهران به جهت همکاری در راستای راهبرد این تحقیق کمال قدردانی و تشکر را دارد.

منابع

شرکت مهندسی مشاور پورآب فارس. ۱۳۹۳. عملیات خدمات مهندسی سیستم رفتارنگاری و پایش سد شاه قاسم، ارائه شده به شرکت سهامی آب منطقه‌ای کهگیلویه و بویراحمد، خرداد ماه ۱۳۹۳. ۲۵۷ صفحه.

شرکت ملی نفت ایران. ۱۳۵۴. نقشه زمین‌شناسی یاسوج، مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰. یک صفحه.

مظفری، م.، جامعی، ج.، ۱۳۹۷. بررسی عملکرد عملیات تزریق تکمیلی پرده آب‌بند بر آب‌گذری سد تنگاب، شرکت سهامی آب منطقه‌ای فارس

Ashjari, J., & Raeisi, E. Z. Z. A. T. (2006). Influences of anticlinal structure on regional flow, Zagros, Iran. *Journal of Cave and Karst studies*, 68(3), 118-129.

Bruce, D. A., Heenan, D. M., & Wilson, D. B. (2005). Quality and Quantification in Rock Drilling and Grouting. In *Innovations in Grouting and Soil Improvement* (pp. 1-10).

Bunyanmin U. Mucahit E. , M.Gurhan Y. (2007). Investigation of leakage at Ataturk dam and hydroelectric power plant by means of hydrometric measurements. *Engineering Geology* 93 (2007) 45-63.

Donnelly, C.R., Hinchberger, S., and Mohammadian, E., 2009. The Design of Foundation Treatment Measures for Dams on

غرب) می‌باشد (شکل ۷). در هنگامی که تراز آب مخزن در حد نرمال بود (اواخر فروردین ماه ۹۲)، تراز آب گمانه‌ها وجود شیب هیدرولیکی ۱/۹ درصد از تکیه‌گاه راست به سمت تکیه‌گاه چپ را نشان می‌داد که تأیید کننده جهت جریان از تکیه‌گاه راست به سوی تکیه‌گاه چپ و منطبق با مسیر محتمل فرار آب ارائه شده می‌باشد. محل خروج آب با احتمال زیاد می‌تواند چاه‌های پمپاژ و چشمه SP1 واقع در یال شمالی تاقدیس و یا چشمه سرتاوه واقع در تاقدیس مجاور باشد. انجام آزمایش ردیابی می‌تواند در تأیید و یا رد این مسیر مؤثر باشد.

نتیجه‌گیری

عملیات اجرایی ساخت سد شاه قاسم در سال ۱۳۷۴ آغاز شد و سد در اواخر سال ۱۳۷۵ به بهره‌برداری رسید. از چگونگی طراحی و اجرای عملیات آب‌بندی مخزن سد اطلاعی در دست نیست اما به نظر می‌رسد با توجه به مدت زمان کوتاه ساخت سد، طرح آب‌بندی خاصی برای آن در نظر گرفته نشده و اجرا نگردیده است و در نتیجه سد با مشکل فرار آب مواجه شده است. پنجره فرار آب از مخزن سد شاه قاسم بسیار گسترده است. با توجه به کم بودن حجم مخزن سد، در صورت تصمیم بر انجام عملیات تزریق تکمیلی، باید ضمن انجام مطالعات کامل زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، آزمایش ردیابی و ژئوتکنیک، ارزیابی جامعی از میزان هزینه و تأثیر آن بر اهداف مورد نظر آب‌بندی صورت گیرد. در صورت تمایل به آب‌بندی کامل و طولانی مدت، عملیات ترمیمی باید در تمام گستره پنجره فرار آب (با حدود ۴۰۰ متر طول و بیش از ۵۰ متر عمق) اجرا شود که بسیار هزینه‌بر است و ممکن است صرفه اقتصادی نداشته باشد. آب‌بندی موضعی با پر کردن فروچاله‌ها و حفرات موجود می‌تواند به صورت موقت مفید واقع شود اما بدیهی است که به دلیل توسعه اپی کارست، مسدود کردن آن‌ها به تنهایی سبب آب‌بندی کامل مخزن در طولانی مدت نخواهد شد. به عبارتی دیگر با گذر زمان آب مسیر خود را در دیگر مجاری (که اکنون توسط خاک پوشیده شده‌اند و در سطح زمین رخنمون ندارند)

- Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 50(4), 444-453.
- Nonveiller, E. 1988. Grouting theory and practice. Developing in geotechnical engineering. Elsevier, ISBN: 964-91095-8-7. 250 p.**
- Karst Foundations. Canadian dam association bulletin**, v. 20, no. 4, p. 20-27.
- Milanović, P.T., 2004. Water resources engineering in karst. CRC Press, Boca Raton, Florida, 312 p.**
- Morteza, M., & Ezzat, R. (2017). Leakage paths at the Lar Dam site, northern Iran. Quarterly**