

# بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرد

وحید جودکی<sup>۱</sup>، فرشاد کوهیان‌افضل<sup>۲</sup>، علی‌عالی انوری<sup>۳</sup>، رسول اجل‌لوئیان<sup>۴</sup> و عبدالله سهرابی‌بیدار<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های زیرزمینی، شرکت مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دکتر، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<sup>۴</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

<sup>۵</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۴/۱۳

## چکیده

قطعه ۴ تونل قمرد در پهنه سندج - سیرجان قرار گرفته است. در این محدوده به دلیل وجود گسل‌های فراوان، نواحی خرد شده و همچنین گسترش قابل توجه حوضه آبریز جریان‌های فرعی و اصلی در سطح زمین، تونل با خطر هجوم آب زیرزمینی روبه‌رو بوده است. از سوی دیگر به دلیل برخی محدودیت‌ها مانند روباره زیاد تونل (در برخی نقاط تا حدود ۶۰۰ متر) و نبود امکان حفاری گمانه‌های اکتشافی تا تراز تونل، پیش‌بینی و برآورد جریان آب زیرزمینی در مسیر حفاری تونل به سختی امکان‌پذیر بوده است. با وجود گسل‌های بسیار در مسیر قطعه ۴ تونل قمرد، برخورد دستگاه حفار تمام مقطع تلسکوپی (TBM Double Shield) با جریان‌های پرفشار، می‌توانست ضمن هجوم مقادیر بالایی از آب به درون تونل، سبب تشدید ریزش توده سنگ‌ها در پهنه‌های خرد شده و به دنبال آن توقف و انحراف دستگاه از مسیر صحیح حفاری شود. در این مقاله تلاش شده است تا با توجه به کمبود اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و مطالعات زیرسطحی، میزان توسعه‌یافتگی جریان آب زیرزمینی در مسیر تونل بر پایه شواهد ژئومورفولوژی و عوارض سطحی منطقه، مورد بررسی قرار گیرد. مدل‌سازی‌های تحلیلی و پیمایش‌های صحرایی در منطقه نشان‌دهنده تطابق نسبی ژئومورفولوژی منطقه با حجم جریان آب در مسیر حفاری تونل است. بر این اساس با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده در زمینه آب ورودی به تونل، حدود ۸۰ لیتر بر ثانیه آب به این بخش از تونل وارد شده است که با بررسی‌های ژئومورفولوژیکی انجام شده، همخوانی دارد و نتایج نشان‌دهنده آن است که بررسی مورفولوژی و عوارض سطحی زمین، توانسته است در راستای شناخت دقیق‌تر شرایط هیدروژئولوژی منطقه، اطلاعات مفیدی ارائه دهد.

**کلیدواژه‌ها:** تونل قمرد، TBM، ژئومورفولوژی، جریان آب زیرزمینی، مدل‌سازی تحلیلی.

\*نویسنده مسئول: وحید جودکی

E-mail: Joudaki\_vahid@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

سامانه انتقال آب قمرد با هدف انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه دز (در جنوب شهرستان الیگودرز) به شهرهای ایران مرکزی (قم، کاشان، محلات، خوانسار، گلپایگان، خمین، دلجان، سلفچگان و نیمور) اجرا شده است. مهم‌ترین سازه این طرح تونلی با طول حدود ۳۶ کیلومتر است که در مرحله اجرا به ۴ قطعه تقریباً مساوی تقسیم شد. در آینده نزدیک با رشد جمعیت و گسترش صنعت در شهرهای ایران مرکزی، این تونل به حیاتی‌ترین شریان انتقال آب کشور تبدیل خواهد شد (جودکی و همکاران، ۱۳۹۰). بیشتر این تونل به روش مکانیزه و با استفاده از ماشین‌های حفار تمام‌مقطع (TBM; Tunnel Boring Machine)، حفاری شده است که عملیات آن در شهریور ۱۳۹۱ پایان یافت.

مطالعات گوناگونی توسط پژوهشگران پیرامون مباحث حفاری مکانیزه در تونل قمرد ارائه شده است که در مقالات جودکی و اجل‌لوئیان (۱۳۹۲ و ۱۳۹۴) به شرح مخاطرات زمین‌شناسی تونل و معرفی پژوهش‌های شاخص پژوهشگران دیگر در این زمینه پرداخته شده است.

شرایط زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، ویژگی‌های دستگاه TBM و هماهنگی بخش‌های مختلف دستگاه به هنگام اجرای عملیات به‌طور مستقیم بر پیشروی آن تأثیر می‌گذارد (Barton, 2000). در صورتی که شواهد زمین‌شناسی نشانگر وجود جریان‌های توسعه یافته آب زیرزمینی در مسیر تونل باشد، آن‌گاه باید دستگاه TBM متناسب با این شرایط طراحی شود و قابلیت رویارویی و کنترل جریان‌های شدید را داشته باشد.

برخورد TBM با جریان‌های شدید آب زیرزمینی در بسیاری از پروژه‌های تونل‌سازی گزارش شده است. در برخی از این تونل‌ها با اعمال تدابیر لازم، عملیات حفاری با موفقیت و طبق زمان‌بندی برنامه‌ریزی شده به پایان رسیده است و در برخی نیز به دلیل تناسب نداشتن ساختار دستگاه TBM با شرایط ژئوتکنیکی مسیر تونل و هجوم آب، عملیات حفاری با توقف‌های مکرر و بسیار طولانی مدت همراه بوده است.

از جمله این موارد می‌توان به تونل سوم انتقال آب کوه‌رنگ (Zarei, et al., 2010)؛ تونل سرویس البرز (Movahednejad, 2008) و تونل آسکاک (Wenner and Wannenmacher, 2009) اشاره کرد. در عملیات حفاری تونل بزرگراه پینگ‌لین تایوان (Tseng et al., 2001)، هجوم شدید و ناگهانی آب (جریان آب بیش از ۴۵ متر مکعب در دقیقه و با فشار بیش از ۲ مگاپاسکال) در مناطق گسلی و سنگ‌های خرد شده، سبب مدفون شدن ماشین تونل‌زنی تمام مقطع TBM شده است.

در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرد از دستگاه حفار تمام مقطع تلسکوپی ساخت شرکت ویرث (Wirth) آلمان استفاده شده است. ویژگی آشکار این نوع ماشین‌های حفار، کنترل آسانتر آب ورودی به تونل نسبت به ماشین‌های باز (بدون سپر) است. اما به دلیل وجود پهنه‌های گسلی فراوان، برخورد ماشین حفار با آب زیرزمینی، می‌توانست سبب تشدید ریزش‌های دیواره‌های تونل در نواحی خرد شده و به دنبال آن توقف و انحراف دستگاه TBM از مسیر صحیح حفاری شود.

مطالعات بسیاری از سوی پژوهشگران مختلف در زمینه وضعیت آب زیرزمینی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرد انجام شده است (مهری، ۱۳۸۳؛ عالی‌انوری، ۱۳۸۴؛ حسن‌پور و ارومیه‌ای، ۱۳۸۵؛ کتیبه و عالی‌انوری، ۱۳۸۵؛ عالی‌انوری و همکاران، ۱۳۸۸؛ جودکی، ۱۳۹۱؛ Aalianvari, et al., 2012؛ Katibeh and Aalianvari, 2009). با این حال با وجود اهمیت موضوع، کمبود برخی اطلاعات موجب شده است تا شناخت وضعیت هیدروژئولوژیکی منطقه با محدودیت‌هایی روبه‌رو باشد. در چنین شرایطی، بررسی دقیق مورفولوژی و عوارض سطحی زمین می‌تواند اطلاعات مفیدی برای افزایش دامنه مطالعات ساختگاهی و شناخت دقیق‌تر شرایط هیدروژئولوژی منطقه ارائه دهد.

اولین گام مهم و هدفمند در زمینه مطالعه عوارض ژئومورفولوژی به اواخر قرن نوزدهم میلادی بر می‌گردد؛ زمانی که دانشجویی اهل صربستان (Cvijić, 1893)،

با بررسی اشکال انحلالی نتایج پژوهش‌های پایان‌نامه دکترای خود را در دانشگاه زمین‌شناسی و جغرافیای وین منتشر کرد و آن را پدیده کارست نام‌گذاری کرد. با گذشت زمان این مطالعات توسط پژوهشگران دیگر، ابتدا در اروپا و آمریکای شمالی و سپس در دیگر نقاط جهان گسترش یافت (De Waele et al., 2009). مطالعه پدیده‌های ناشی از انحلال و کارستی شدن سنگ‌ها در سطح، می‌تواند راهی برای بررسی میزان تکامل کارست در یک منطقه باشد (Ford and Williams, 2007). مشاهده اشکال انحلالی در مقیاس کوچک و بزرگ به همراه بررسی هیدرولوژی در یک منطقه، می‌تواند اطلاعاتی در مورد چگونگی گسترش سامانه‌های زیرسطحی کارست و آبخوان‌ها ارائه دهد (Veni, 1999). برای نمونه مشاهده پول‌ها نشانه‌ای از گسترش یافتگی کامل سامانه‌های کارستی در یک منطقه است (Cooper et al., 2011). مطالعه موردی حاضر نیز با نگرش بر تونل قمرود، به دنبال پاسخ به این پرسش است که در مرحله مطالعات هیدروژئولوژیکی پروژه‌های تونل‌سازی، مشاهده و بررسی ژئومورفولوژی ساختگاه تا چه اندازه می‌تواند در شناخت شرایط آب زیرزمینی در هنگام حفاری مؤثر باشد.

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

ساختگاه مورد مطالعه بر پایه تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران با توجه به شکل ۱، در پهنه زمین‌شناسی سندج-سیرجان (آق‌ناباتی، ۱۳۸۳) قرار گرفته است. ویژگی اصلی این پهنه وجود گسل خوردگی‌های فراوان است. سنگ‌های موجود در این پهنه به دلیل تحمل جنبش‌های زمین‌ساختی بسیار، درجه دگرگونی متوسط به بالا دارند. همین امر سبب ایجاد انبوهی از گسل‌ها و پهنه‌های خرد شده و شکستگی‌های بسیار و تورق و تبلور دوباره کانی‌ها در سنگ‌ها شده است (Alavi, 1994; Stocklin, 1968). در قطعه ۴ تونل قمرود، تشکیلات سنگ‌شناسی منطقه به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. تشکیلات کرتاسه شامل آهک‌های توده‌ای و دولومیت و تشکیلات ژوراسیک شامل اسلیت، شیل، شیست، گرافیت‌شیست، کوارتزیت و ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده است. قطعه ۴ تونل قمرود به طول تقریبی ۹ کیلومتر است که در ۶ کیلومتر ابتدایی آن، به دلیل ارتفاعات و شرایط کوهستانی منطقه (و نیز به دلیل محدودیت روش‌های ژئوالکتریک در ژرفای زیاد)، مطالعه ژئوفیزیکی برای بررسی تشکیلات زمین‌شناسی صورت نگرفته است. در این شرایط حفاری گمانه‌های اکتشافی نیز با محدودیت روبه‌رو بوده است.

در این محدوده به دلیل ژرفای تونل، انجام مطالعات زیرسطحی محدود بوده است و گمانه‌های اکتشافی حفر شده در بیشتر مواقع به تراز نی‌رسیده‌اند که تونل در آن قرار گرفته است. به عبارت دیگر دستگاه‌های مغزه‌گیری که در عملیات اکتشافی در این پروژه استفاده شده‌اند، توانایی حفر گمانه‌های ژرف را ندارند. گمانه‌ها تا ژرفای حدود ۳۵۰ متر حفر شده‌اند؛ اما تونل در ژرفای بیشینه ۶۰۰ متری از سطح ارتفاعات قرار گرفته است (Sharifzadeh and Hemmati Shaabani, 2006). شکل ۲، مقطع زمین‌شناسی مهندسی تونل در ۶ کیلومتر ابتدایی را ارائه می‌دهد.

## ۳- پیمایش سطحی و بررسی ژئومورفولوژی در تشکیلات آهکی کرتاسه

۷ عنصر لازم برای تشکیل و گسترش کارست شامل بارش‌های آسمانی، دما، فشار دی‌اکسید کربن، پستی و بلندی، وضعیت چینه‌شناسی و سنگ‌شناسی، سترای لایه‌های کربناته و موقعیت زمین‌ساختی است (White, 1988).

وجود بلندی‌های آهکی، زمین‌ساخت منطقه و همچنین وجود آب کافی حاصل از بارندگی‌ها می‌تواند عواملی تأثیرگذار برای افزایش پتانسیل گسترش شکستگی‌ها و ایجاد کارست در منطقه مورد مطالعه باشد. بنابراین شناسایی و بررسی پدیده‌های یاد شده می‌تواند به شناخت پدیده کارست در منطقه و پیش‌بینی مخاطرات ناشی از جریان‌های آب زیرزمینی در هنگام حفاری با TBM کمک فراوانی کند.

به منظور شناسایی و تعیین میزان کارست‌شدگی در منطقه ضروری است تا به بررسی شواهد مرتبط با گسترش کارست در منطقه پرداخت. بر پایه نتایج به دست

آهک‌های توده‌ای دیده می‌شوند که در سطوح صاف قرار گرفته‌اند (شکل ۳-الف).

### ۱-۱. Rain pit

این اشکال در سطح بیشتر آهک‌های منطقه دیده می‌شوند؛ ولی گسترش و پراکندگی زیادی ندارند و به سوی ارتفاعات بالاتر (آهک‌های توده‌ای) بر تراکم آنها افزوده می‌شود (شکل ۳-الف).

### ۲-۲. Solution Pan

این اشکال در منطقه چندان عمومیت ندارند و به صورت محدود در ارتفاعات بالا و روی آهک‌های توده‌ای دیده می‌شوند که در سطوح صاف قرار گرفته‌اند (شکل ۳-الف).

### ۳-۳. Rillen Karren

این اشکال در سطح بیشتر آهک‌های منطقه دیده می‌شوند؛ ولی گسترش آنها چندان زیاد نیست. با پیشروی به بالای کوه (آهک‌های توده‌ای) بازشدگی درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی در اثر عمل انحلال بیشتر شده و بر تراکم این شکل‌ها افزوده می‌شود، ولی در کل ژرفای این آثار کم است، پیشرفت چندانی ندارند و تراکم آنها نیز چندان زیاد نیست (شکل ۳-ب).

### ۴-۴. Pit and tunnel karren

در مسیر تونل تقریباً تنها نقطه‌ای که در آن آثار Pit and tunnel karren به فراوانی دیده می‌شود، محلی در پال خاوری کوه چال‌هنده و باختر رودخانه دربند (در راستای محور تونل محدوده کیلومتر ۱۵۰۰) است (شکل ۴).

آهک‌های این ناحیه تا حدودی دولومیتی شدند و حالت شیستوزیته ضعیفی از خود نشان می‌دهند و در عین حال نازک‌لایه نیز هستند. به نظر می‌رسد که همین ضعف‌های ساختاری سبب ایجاد این نوع از مورفولوژی کارستی در این آهک‌ها شده است؛ چرا که هر چند به دلیل نازک‌لایه بودن آب نمی‌تواند به صورت متمرکز کانالیزه شود و قدرت خود را در یک نقطه متمرکز کند؛ ولی وجود خطواره‌های بسیار (شکل ۴-ب)، سبب ضعیف شدن بافت سنگ شده و آن را در برابر انحلال نامقاوم ساخته است. این اشکال نیز در منطقه بسیار سطحی هستند و ژرفای چندانی ندارند؛ به طوری که بیشتر آنها دارای ژرفای بیشینه ۰/۵ تا ۱ متر هستند. این آثار اگر چه شاهدهی بر شدت عمل بیشتر کارستی شدن هستند؛ ولی به دلیل کم‌ژرفا بودن تنها برای سطح صدق می‌کنند و نمی‌توانند دلیلی بر کارستی شدن شدیدتر در زیر سطح نیز باشند.

### ۵-۳. غارها

در منطقه تعداد ۷ غار دیده شد که ۲ غار از این غارها در مجاورت یکدیگر در دامنه جنوبی کوه سرسیل یعنی کوه‌های مشرف به روستای گندمینه و ۵ غار دیگر در دامنه خاوری کوه چال‌هنده و باختر رودخانه دربند (در راستای محور تونل محدوده کیلومتر ۱۵۰۰ تا ۱۶۰۰، همان ناحیه‌ای که Pit and tunnel karren‌ها دیده می‌شوند) قرار گرفته‌اند.

غارهای دامنه جنوبی کوه سرسیل دهانه‌ای به نسبت بزرگ دارند؛ ولی ژرفای آنها چندان زیاد نیست و در حد چند متر است. در بازدید از این غارها و بررسی‌های انجام گرفته، دیده شد که این غارها بیشتر غارهای ساختاری هستند و در اثر ریزش قطعات سنگ حاصل از فعالیت‌های ساختاری ایجاد شده‌اند؛ در این میان، عمل انحلال توسط آب تنها وسیله‌ای برای سست کردن اتصال قطعات سنگ و کمک به ریزش آنها بوده و نقش مستقیم در تشکیل غارها نداشته است. در واقع مورفولوژی این غارها هیچ گونه همانندی به غارهای انحلالی ندارد (شکل ۵-الف).

از ۵ غاری که در دامنه خاوری کوه چال‌هنده دیده می‌شوند، غاری که در ارتفاع پایین‌تر قرار دارد، دارای شرایط غارهای کوه سرسیل است و هیچ همانندی به غارهای انحلالی ندارد و ریزش قطعات سنگ از دریچه غار در سرایشی تند کوه، کاملاً مشهود است. ولی در ۴ غار دیگر که در ارتفاعی بالاتر قرار گرفته‌اند، شواهد انحلال بیشتر به چشم می‌خورد. این غارها در راستای لایه‌بندی و به موازات آن شکل گرفته‌اند. در این غارها نیز عمل انحلال در راستای لایه‌بندی و در سطح میان صفحات

از این رو، با وجود محدودیت مطالعات اکتشافی، بر پایه نتایج این پژوهش با توجه به مشاهدات صحرایی و بررسی سیمای کارستی منطقه، دلایل اصلی نبود سامانه‌های کارستی گسترش یافته در مسیر حفاری TBM را می‌توان مورد بحث قرار داد:

در منطقه ساخت تونل عوارض شاخص مانند فروچاله‌های بزرگ، غارهای انحلالی طویل، چشمه‌های بزرگ با دبی بالا، رودخانه‌های ناپدید شونده و ... دیده نمی‌شوند که بتوانند دلیلی قطعی بر گسترش سامانه‌های کارستی در ژرفای زمین و خطر هجوم شدید آب زیرزمینی در مسیر حفاری دستگاه TBM باشند.

عوارض کارستی سطحی دیده شده در منطقه (Rain pit; Solution Pan; Rillen karren; Pit and Tunnel Karren) تراکم و پراکندگی زیادی ندارند؛ به همین دلیل نمی‌توانند شواهدی قطعی برای گسترش کارستی در ژرفا و در تراز حفاری تونل باشند.

سازوکار تشکیل فروچاله و غارهای دیده شده در منطقه، تنها بر اثر عمل انحلال نیست و در حقیقت به دلیل ریزش قطعات سنگ حاصل از فعالیت‌های ساختاری ایجاد شده‌اند و در این میان، عمل انحلال توسط آب تنها وسیله‌ای برای سست کردن اتصال قطعات سنگ و کمک به ریزش آنها بوده و نقش مستقیم در تشکیل این عوارض نداشته است. از سوی دیگر، این احتمال وجود دارد که با توجه به شرایط فعال زمین‌ساختی منطقه، نیروهای لرزه‌ای نیز می‌توانسته‌اند با عمل دینامیکی خود سبب تشدید ناپایداری و فروریختگی‌ها در چنین عوارضی شوند (جودکی، ۱۳۹۱). عمل نیروهای لرزه‌ای بیشتر متمرکز در فراخ کردن فروریختگی‌ها به صورت درون‌ریزی سقف غارها یا قطع و انسداد مجاری کارستی است. برای نمونه (Janjic 1962) در ناحیه ساحلی نزدیک Makarka (دهکده Kozica) یوگسلاوی، سقف برخی غارها فروکش کرده و کف بسیاری از حفره‌های فروکش باز شده است (آغاسی و افراسیایان، ۱۳۷۸). همچنین مطالعات بسیار دیگری نیز در نقاط مختلف دنیا از جمله شمال خاور تهران (Khorsandi and Miyata, 2007)، جنوب باختر ترکیه (Celik and Onsal, 1999)، شمال خاور عربستان (Edgell, 1993)، جاوه مرکزی اندونزی (Kusumayudha et al., 2000) و ... به تأثیر زمین‌ساخت بر گسترش فروچاله‌ها و غارها پرداخته‌اند.

نوع سنگ‌آهک در گسترش کارستی اهمیت زیادی دارد و باید دانست که سنگ مورد نظر از جنس Pure Calcite یا Dolomite و High-Mg Calcite است. میزان درصد کلسیم و منیزیم در دو سنگ دولومیت و آهک متفاوت و میزان اشباع آب از این دو کانی تقریباً یکسان است (حدود ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر)؛ ولی زمان انحلال و به اشباع رسیدن یا به عبارتی سرعت انحلال و اشباع شدن آنها متفاوت است. پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان داده است که سرعت انحلال در کانی‌های کربنات کلسیم و منیزیم به صورت زیر است:

Aragonite > Low-Mg Calcite > Calcite > Dolomite

با توجه به مطالب گفته شده و این نکته که بخشی از آهک‌های منطقه ساخت تونل دولومیتی هستند، گسترش نیافتن کارستی در این آهک‌ها تا حدودی از این دیدگاه قابل انتظار است.

کارستی گسترش یافته بیشتر در سنگ‌آهک‌های توده‌ای تشکیل می‌شوند که سبب‌های زیادی دارند (Maurice et al., 2010). در منطقه مورد مطالعه از آنجا که آهک‌های سترلابه و توده‌ای در بالاترین بخش ستون چینه‌شناسی قرار دارند؛ انتظار می‌رود که گسترش کارستی در ارتفاعات بالا، بیشتر باشد. همچنین وجود لایه‌های نازک سبب پخش شدن آب در مسیرهای گوناگون می‌شود و از کانالیزه شدن آب جلوگیری می‌کند و بنابراین گسترش کارستی کمتر خواهد شد؛ که این شرایط در تراز حفاری تونل (لایه‌های پایینی ستون چینه‌شناسی که دارای لایه‌بندی مناسب هستند) وجود دارد. از سوی دیگر معمولاً هر چه لایه‌های آهکی نازک‌تر باشند، مقدار ناخالصی آنها افزایش و در نتیجه گسترش کارستی کاهش می‌یابد.

وجود کانی‌های رسی سبب محدود شدن گسترش کارستی می‌شود. تجربه نشان داده است که با وجود ۲۰ تا ۳۰ درصد رس در سنگ‌آهک، کارستی گسترش پیدا

لایه‌بندی و همچنین سطوح درزه‌ها سبب شده که بلوک‌های آهکی در جای خود سست شوند، ریزش کنند و غارها شکل بگیرند (شکل ۵-ب). بنابراین با وجود دیده شدن این غارها باز هم نمی‌توان گفت که سازندهای آهکی منطقه سامانه کارستی گسترش یافته‌ای دارند.

### ۳-۶. فروچاله

تنها فروچاله موجود در آهک‌های منطقه در انتهای باختری کوه ویلوی در مجاورت کوه کمر بسته در ارتفاعات کوه سرسیل دیده شد که فروچاله‌ای به قطر تقریبی ۲۵۰ متر است (شکل ۶). این فروچاله در محل تقاطع دو گسل ایجاد شده است و حوضه آبریز به نسبت کوچکی دارد که منحصر به سطح خود فروچاله و بخش کمی از ارتفاعات مجاور در بخش جنوب باختری است. با توجه به این نکته و همچنین جنس سنگ‌هایی که این فروچاله در آنها تشکیل شده است - که از آهک‌های ماری هستند - و از سوی دیگر نبود چشمه‌های بزرگ و پر آب در پیرامون آن، می‌توان نتیجه گرفت که گسترش یافتگی کارستی چندان شدید نیست و با توجه به دلایل بالا و وجود دو گسل در امتداد آن و شکستگی‌های زیاد و قطعات و بلوک‌های سنگی فراوان در محل فروچاله، می‌توان فروچاله موجود را از نوع Subsidence doline دانست که به دلیل وجود درز و شکاف‌های فراوان در آن، عمل انحلال توسط آب سبب سست شدن اتصالات میان بلوک‌های سنگی شده است و این بلوک‌ها در جای خود و بر اثر وزن لایه‌های بالایی به سوی پایین حرکت کرده‌اند.

### ۳-۷. چشمه‌ها

در بررسی‌های صحرایی، چشمه‌های کارستی بزرگی از دید آبدهی در منطقه دیده نشد. مظهر چشمه‌های منطقه در فصل مشترک سنگ‌آهک در رسوبات شیلی و ماسه‌سنگی ژوراسیک و یا در محل تقاطع گسل‌ها جای گرفته است. بنابراین نقش گسل‌های منطقه در هدایت جریان آب زیرزمینی و نقش فصل مشترک رسوبات شیلی و ماسه‌سنگی (به عنوان سد زیر زمینی: Barrier) با سنگ‌آهک به عنوان محل خروج آب زیرزمینی قابل توجه است. شکل ۷، نمای یکی از چشمه‌های عمده در مسیر تونل را نشان می‌دهد.

## ۴- شواهد نبود جریان شدید آب زیرزمینی در تشکیلات آهکی

به دلیل انجام نشدن مطالعات ژئوفیزیکی و نیز حفاری نشدن گمانه‌های اکتشافی با تعداد و ژرفای کافی در آهک‌های منطقه، اطلاعات کافی از وضعیت گسترش سامانه‌های کارستی در ژرفا در دست نبوده است. این در حالی است که Mikulec and Trumic (1976) بر این باورند که در بررسی‌های کارستی حتی اگر مطالعات اکتشافی فراوان با بودجه کافی و فرصت لازم انجام شود، باز هم احتمال بروز مخاطرات وجود دارد.

در تشکیلات آهکی تنها دو گمانه (TGH-23 و BH6 در شکل ۲) حفر شده است. که تنها در گمانه TGH-23، ۱۱ آزمون لوژن انجام شده است. همان‌گونه که در اطلاعات جدول شماره ۱ دیده می‌شود، توده‌سنگ‌ها نفوذپذیری کمی داشته‌اند و در ۷۵ متر بالایی گمانه، میزان لوژن کمتر از ۱ بوده است. تنها در یک مقطع و در ژرفای ۹۰ تا ۹۵ میزان لوژن بیشتر از ۱۰۰ به دست آمده است. مقدار شاخص کیفی سنگ (RQD)، در بیشتر طول گمانه بیش از ۷۰ درصد بوده است. اما در این مقطع از گمانه (ژرفای ۹۰ تا ۹۵) نیز با وجود رقم بالای لوژن، شاخص کیفی سنگ، حدود ۹۰ درصد بوده است. بنابراین شواهد نشان می‌دهد که آبدگدزی زیاد گمانه، ناشی از خردشدگی توده‌سنگ نیست و می‌توان آن را با وجود یک مجرای کارستی مرتبط دانست.

البته به دلیل نبود راه دسترسی و توپوگرافی منطقه، این گمانه در محور تونل حفاری نشده و حدود ۹۰۰ متر دورتر از محور تونل، در نزدیکی یکی از چشمه‌های منطقه و به ژرفای تنها ۱۰۰ متر حفر شده است. اگر چه اطلاعات حاصل از این گمانه می‌توانست تا حدی راهنمای شرایط عمومی توده‌سنگ‌ها در منطقه باشد، اما با توجه به فاصله زیاد آن نسبت به محور تونل، به نظر می‌رسد تعمیم اطلاعات این گمانه به محور تونل، برای پیش‌بینی مخاطرات آب زیرزمینی در مسیر حفاری، کار دشواری است.

ماسه‌سنگی، اسلیتی و شیستی در محل این دره رخنمون دارند که با ترکیب سنگی دیده شده درون تونل انطباق دارد. وجود آثار لغزش در برخی رخنمون‌های سطحی و تفاوت رنگ مصالح در امتداد خط اثر گسل و آب‌دار بودن دره از جمله مهم‌ترین این شواهد است. از سوی دیگر به نظر می‌رسد وجود یک چشمه آب جاری که در دره (شکل ۱۰-ب) دیده می‌شود، منشأ آب جریان یافته در محدوده حفاری متراژ ۵۲۶۰ است. آب این چشمه می‌تواند در امتداد شکستگی‌ها و سطح برشی پهنه گسلی، به تراز حفاری تونل انتقال یافته باشد.

در متراژ ۵۲۶۰ با خزش توده‌سنگ‌ها، سپر TBM در اثر پدیده لهیدگی توسط دیواره‌های تونل دربر گرفته شد و نیز با ریزش توده‌سنگ‌ها روی کله‌حفار TBM عملیات حفاری متوقف شد که عملیات آزادسازی دستگاه و شروع دوباره عملیات حفاری، بازه زمانی طولانی مدت ۳۱ روزه داشت.

حضور آب در این متراژ از تونل و در دیگر پهنه‌های گسلی در مسیر سازند ژوراسیک (به صورت قطره‌ای تا جریانی)، با دگرسانی توده‌سنگ‌ها و کاهش مقاومت ماده‌سنگ و مواد پرکننده درزه‌ها، نقش مهمی در رخداد ریزش‌ها و ناپایداری دیواره‌ها در محدوده عملیات حفاری TBM داشته است. نفوذ آب در متراژ ۵۲۶۰ بیشتر به وجود گسل و ساختار خرد شده سنگ‌ها و همچنین ترکیب سنگی ماسه‌سنگی توده‌سنگ در برگیرنده، بر می‌گردد.

#### ۶- پیش‌بینی مخاطرات آب زیرزمینی و مقایسه با شرایط رخ داده

سطح آب زیرزمینی در ساختگاه طرح، در محدوده ۲۵۰ متر (در تشکیلات ژوراسیک) تا ۳۰۰ متر (در تشکیلات کرتاسه) بالاتر از تراز حفاری تونل قرار داشته است. از این رو یکی از نگرانی‌های اصلی پیش از اجرای این بخش از تونل، احتمال هجوم آب زیرزمینی به تونل و ایجاد خطرات جانی، مالی و نیز اختلال در عملیات حفاری بود. به این منظور در این بخش تلاش شده است که با استفاده از معادلات تحلیلی، مقدار آب ورودی به تونل برآورد شود و سپس با اطلاعات اندازه‌گیری شده آب ورودی به تونل و شرایط ژئومورفولوژی منطقه مقایسه شوند.

#### ۶-۱. برآورد آب ورودی به تونل با استفاده از معادلات تحلیلی

روش‌های تحلیلی با تکیه بر معادلات حاکم بر جریان آب به سوی تونل‌ها با در نظر گرفتن متغیرهایی مانند نفوذپذیری توده‌سنگ، ارتفاع سطح ایستایی، شعاع تونل و ... به برآورد میزان نفوذ آب به تونل‌ها می‌پردازند (جدول ۲).

در این معادلات  $H_0$ ، فاصله مرکز تونل تا سطح ایستایی (متر)؛  $z$ ، ستبرای روباره (متر)؛  $z_0$  شعاع تونل (متر)؛  $K$ ، ضریب نفوذپذیری معادل محیط سنگ در امتداد جریان نشت (متر بر ثانیه) و  $Q_1$ ، میزان نفوذ آب (متر مکعب بر ثانیه) در واحد طول تونل است. در روش‌های تحلیلی با در نظر گرفتن متغیرهایی همچون نفوذپذیری متوسط توده‌سنگ، ارتفاع سطح ایستایی و شعاع تونل، میزان نفوذ آب به تونل برآورد می‌شود. به کارگیری معادلات ارائه شده، نیازمند در نظر گرفتن شرایط و فرضیات زیر است:

(۱) جریان به صورت دوطرفه در نظر گرفته شده و مقطع تونل به صورت دایره‌ای است.

(۲) محیط نشت ایزوتروپ و هموژن است.

(۳) مقطع تونل زیر سطح ایستایی (در ناحیه اشباع) قرار گرفته است.

(El Tani (2003) با بررسی هر کدام از روابط یاد شده در جدول ۲ و نتایج حاصل از آنها و مقایسه با میزان واقعی نفوذ آب به تونل، میزان دقت این روابط را با توجه به ژرفای ساختگاه تونل، ارزیابی کرده است. بر پایه این پژوهش، برای تونل‌هایی که نسبت  $r/h$  (نسبت شعاع تونل به ژرفای قرارگیری تونل زیر سطح ایستایی) کمتر از ۰/۴ باشد، همه معادلات جدول ۲ با دقت بالایی مقدار آب ورودی به تونل را به دست خواهند آورد. بنابراین، با توجه به این مسئله در این مقاله با استفاده از معادله El Tani (2003) مقدار آب ورودی به تونل برآورد شد که بر این اساس، به صورت تجمعی در حدود ۵۶ لیتر بر ثانیه، آب وارد تونل می‌شود.

نمی‌کند. برای نمونه به تازگی تجربه حفاری مکانیزه و عبور از سازندهای مختلف در تونل انتقال آب بازی‌دراز (جنوب باختری استان کرمانشاه) نشان می‌دهد که سازندهای پابده و گورپی با وجود ۵۰ تا ۶۰ درصد آهک، کارست گسترش یافته‌ای ندارد. رس به این علت گسترش کارست را مختل می‌کند که پس از کمی انحلال آهک‌ها، رس‌ها باقی می‌مانند. در این شرایط رس با پر کردن شکاف‌ها و درزه‌ها (و نیز به دلیل نفوذپذیری کمی که دارد) مجاری حرکت آب را مسدود می‌کند.

در پیمایش‌های سطحی صورت گرفته در منطقه ساخت تونل، این پدیده در محل چشمه کمرسته دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که در محل گسل موجود (سطح گسل) افقی از مارن دیده می‌شود که در واقع ناشی از انحلال آهک‌های مارنی در پهنه‌های خرد شده است که آهک آن حل شده ولی مارن برجای مانده است. شکل ۸، نمایی از آهک‌های رانده شده روی شیل و ماسه‌سنگ ژوراسیک و مقطع زمین‌شناسی نمادین این چشمه را نشان می‌دهد.

در این پژوهش برای افزایش دامنه مطالعات، دو نمونه آهک (یک نمونه مربوط به تراز حفاری تونل و دیگری از رخنمون‌های سطحی) برای تهیه مقطع نازک سنگ انتخاب شد که بررسی میکروسکوپی بافت و کانی‌شناسی در این مقاطع، وجود ناخالصی رسی در این آهک‌ها و محدودیت انحلال در تشکیلات کرتاسه را تأیید می‌کند (شکل‌های ۹-الف و ب).

در شکل ۹-الف، ساختار یک استیلولیت در بافت سنگ آهکی دیده می‌شود که منشأ ایجاد آن نیروهای زمین‌ساختی در منطقه است. همان‌گونه که در تصویر میکروسکوپی دیده می‌شود، فضای خالی در درزه استیلولیتی توسط رس‌ها پر شده است که این عامل، پتانسیل استیلولیت در افزایش نفوذپذیری (به عنوان رابط فضاهای خالی سنگ) را خنثی می‌کند. افزون بر این، بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها، نشان‌دهنده عملکرد پدیده دگرگونی و تبلور دوباره کانی کلسیت است. در دگرگونی، نوعی جهت‌یابی انتخابی در کانی‌ها (شکل ۹-الف) و در نتیجه سطوح ضعف در سنگ ایجاد می‌شود. اما در برابر آن، تبلور دوباره (شکل ۹-ب) سبب افزایش مقاومت سنگ می‌شود. از این رو با توجه به محدودیت گسترش جریان آب زیرزمینی (وجود ناخالصی رسی) و استحکام توده‌سنگ‌های آهکی، حفاری مکانیزه در تشکیلات سازند کرتاسه چندان دشوار نبوده است (شکل ۹-پ).

#### ۵- پیمایش سطحی و بررسی ژئومورفولوژی در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک

در تشکیلات ناتراوا نیز با بررسی ژئومورفولوژی منطقه، امکان دست‌یابی به اطلاعاتی از شرایط هیدرولوژیکی در ژرفا وجود دارد. از این رو بررسی عوارض سطحی زمین در تشکیلات غیر آهکی نیز می‌تواند نقش مهمی در مطالعات هیدروژئولوژیکی طرح‌های سدسازی و تونل‌سازی داشته باشد.

در مطالعه موردی حاضر با توجه به شرایط سنگ‌شناسی در سازند ژوراسیک، جریان‌های گسترش یافته آب زیرزمینی در این تشکیلات پیش‌بینی نمی‌شد. با این حال تشکیلات ژوراسیک در مسیر شکستگی‌ها و سطوح برشی، امکان هدایت آب زیرزمینی را به داخل تونل در حال ساخت فراهم می‌کرد.

بررسی عوارض سطحی و ژئومورفولوژی منطقه در تشکیلات غیر آهکی این تونل، نیز می‌توانسته در مواردی برای شناخت شرایط آب زیرزمینی در تراز حفاری تونل مفید باشد. برای نمونه اگر در پیمایش سطحی در راستای محور تونل، شواهدی از گسل‌خوردگی دیده شود، بسته به شرایط آب‌های سطحی و حوضه آبریز در محدوده گسل، احتمال نفوذ آب در مسیر شکستگی‌ها به اعماق در محدوده حفاری تونل وجود دارد.

برای نمونه شرایط هیدرولوژیکی در هنگام حفاری در متراژ ۵۲۶۰ با برخورد TBM به یک پهنه گسلی به صورت جریان آب بروز کرده است. با پیمایش سطحی در راستای محور تونل و بررسی ژئومورفولوژی دیده شد که در این موقعیت (متراژ ۵۲۶۰)، دره‌ای شکل گرفته است که با توجه به وجود چندین شاهد سطحی می‌توان به وجود پهنه گسلی در آن پی برد (شکل ۱۰-الف). لایه‌های



## ۶-۲. مشاهدات و اندازه گیری‌های آب ورودی به تونل

وضعیت آب زیرزمینی در مسیر حفاری از مرطوب تا قطره‌ای و نیز جریان متغیر بوده است. در مقطع زمین‌شناسی مهندسی تونل (شکل ۲) محدوده‌های جریان آب و توقف‌های TBM در سازند ژوراسیک مشخص شده است. حضور آب بیشتر به دلیل وجود گسل و ساختار خرد شده سنگ‌ها بوده است که البته در برخی مقاطع وجود ترکیب سنگی ماسه‌سنگی عاملی مؤثر در گسترش جریان آب در این تشکیلات بوده است. اگر چه آب ورودی به محدوده حفاری در پهنه‌های گسلی (کمتر از ۱ تا ۶ لیتر بر ثانیه)، حجم قابل ملاحظه‌ای نداشته است تا از گمانه زهکشی یا تزریق استفاده شود؛ ولی در افزایش شدت ریزش توده‌سنگ‌ها روی کله‌حفار و توقف TBM نقش مؤثری داشته است. در چنین شرایطی جریان آب زیرزمینی همچنین می‌تواند دشواری‌های عملیات آزادسازی TBM و پایدارسازی سقف و دیواره‌های تونل در مناطق ریزشی را افزایش دهد. هر چند وجود پهنه‌های گسلی و خرد شده در مسیر تونل، مخاطره اصلی و از دلایل اصلی توقفات دستگاه حفار بوده است؛ اما می‌توان حضور آب زیرزمینی را نیز به عنوان یکی از مخاطرات زمین‌شناسی در تشکیلات سازند ژوراسیک معرفی کرد.

## ۷- نتیجه‌گیری

بررسی ژئومورفولوژی و سیمای کارستی در این پژوهش، با توجه به ناکافی بودن تعداد و ژرفای گمانه‌ها (به ویژه در تشکیلات آهکی)، اطلاعات مفیدی را در راستای برآورد میزان گسترش‌یافتگی جریان‌های آب زیرزمینی در مسیر حفاری تونل ارائه می‌کند. بر پایه اطلاعات حاصل از مطالعات صحرایی در منطقه، سازندهای مسیر تونل پتانسیل بالایی برای گسترش آب زیرزمینی نداشته‌اند. همچنین با استفاده از معادلات تحلیلی نیز مقدار آب ورودی به این تونل در حدود ۵۶ لیتر بر ثانیه برآورد می‌شود که این نتایج با پدیده‌های مورفولوژی منطقه و شرایط پیش آمده هنگام حفاری (جریان حفاری، استحکام ژئومکانیکی آهک‌های کرتاسه موجب شد تا جریان آب بر روند پیشروی TBM تأثیر گذار نباشد. اما در تشکیلات متورق و ضعیف ژوراسیک با وجود حجم پایین آب ورودی (کمتر از ۱ تا ۶ لیتر بر ثانیه)، شرایط به گونه دیگری بوده است. در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک در برخی مناطق از پهنه‌های گسلی، حضور آب زیرزمینی به صورت جریانی بود و این مسئله سبب تشدید پدیده ریزش در تونل و گیر کردن دستگاه TBM می‌شد. نتایج حاصل از این پژوهش، نشانگر اهمیت بررسی عوارض سطحی زمین در مرحله مطالعات هیدروژئولوژیکی طرح‌های تونل‌سازی است، چرا که شرایط توده‌سنگ‌ها و آب زیرزمینی در اعماق زمین را نمی‌توان تنها با تکیه بر روش‌های ژئوفیزیکی، اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و رده‌بندی‌های مکانیک سنگ پیش‌بینی کرد.

## سپاسگزاری

در پایان نگارنده اول لازم می‌داند از همیاری و حمایت استاد بزرگوار جناب آقای مهندس شمس و همکاران محترم خود در گروه سازه‌های زیرزمینی شرکت مهندسین مشاور ساحل سپاسگزاری کند. همچنین از محبت‌های دوستان عزیز آقایان مهندس آسترکی، ظریفی و جلالی به دلیل مشارکت ایشان در بازدیدهای صحرایی برای گردآوری اطلاعات و تهیه تصاویر سپاسگزاری می‌شود.

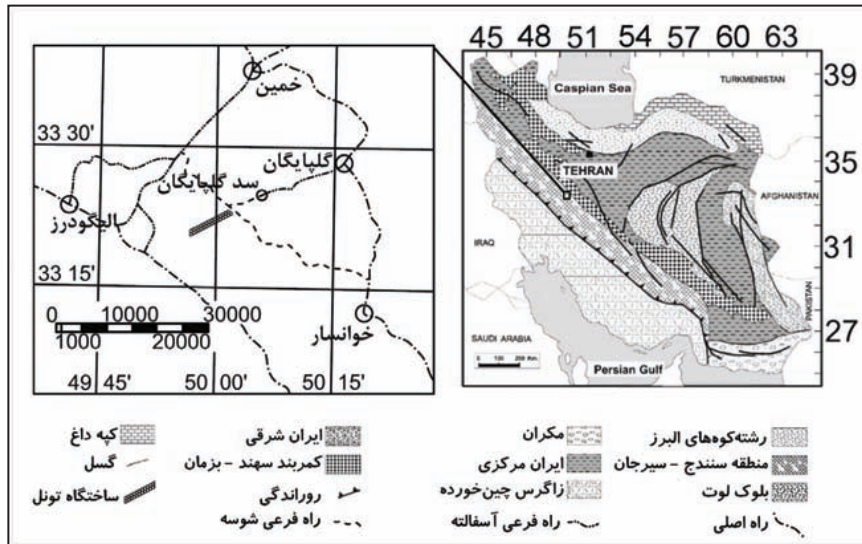
در زمان پیشروی TBM در تشکیلات آهکی کرتاسه، میزان جریان آب از حدود ۳۰ تا ۴۰ لیتر بر ثانیه متغیر بوده است. البته در برخی مقاطع نیز هجوم آب به میزان ۶۰ تا ۸۰ لیتر بر ثانیه نیز رسیده است. شواهد و نتایج بررسی‌های صحرایی در این پژوهش نشان از آن دارد که افزایش میزان آب در این مقاطع ناشی از مجاری کارستی گسترش یافته‌تر (نسبت به دیگر مقاطع تونل) نبوده؛ بلکه بیشتر متأثر از شرایط فصلی در مقطع زمانی عملیات حفاری بوده است. بارندگی‌های شدید و ذوب شدن برف ارتفاعات و نفوذ آب حاصل در سنگ‌های سطحی، می‌توانسته عامل اصلی افزایش دبی آب ورودی تا ۸۰ لیتر بر ثانیه بوده باشد. بررسی شرایط آب ورودی به تونل، پس از پایان حفاری تشکیلات آهکی و ورود تی‌بی‌ام به تشکیلات سازند غیر آهکی ژوراسیک، این نکته را تأیید می‌کند.

بعد از پایان حفاری تشکیلات آهکی در نیمه نخست سال ۱۳۸۳، TBM در حال پیشروی در تشکیلات غیر آهکی ژوراسیک بوده است. با این حال جریان آب ورودی به تونل در بخش آهکی همچنان ادامه داشته است. بررسی اندازه‌گیری‌های دبی آب ورودی نشان می‌دهد که میزان دبی در فصل بدون بارش و در فصل بارندگی با یکدیگر اختلاف دارند. به طوری که بلافاصله پس از بارندگی‌های شدید روزهای ۲۲ و ۲۳ اسفندماه ۱۳۸۳، میزان دبی آب ورودی در تاریخ ۲۴ اسفندماه به میزان ۸۰ لیتر بر ثانیه افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

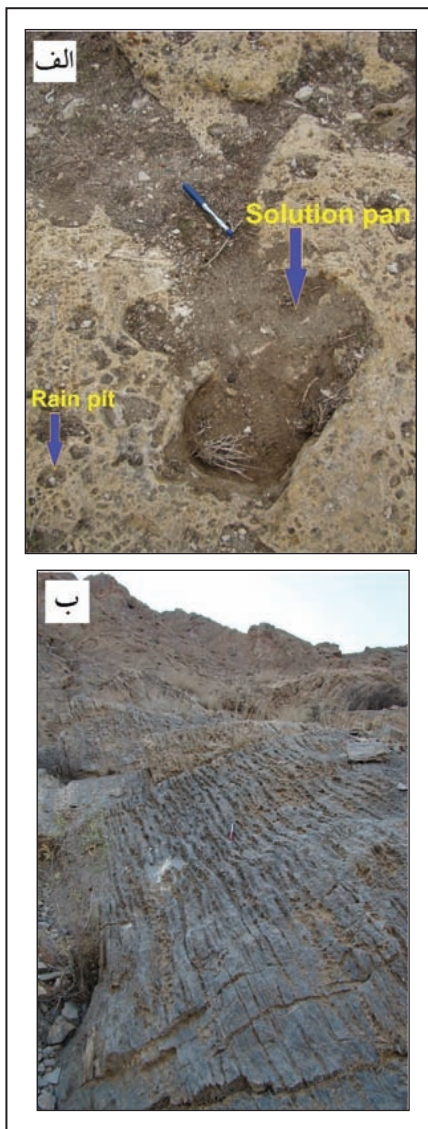
مقایسه نتایج حاصل از برآورد نشت توسط معادلات تحلیلی و مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده دقت قابل قبول محاسبات است. اگر چه در تشکیلات آهکی نفوذ آب از مسیر مجاری کارستی در تراز حفاری تونل صورت گرفته است؛ اما با توجه به حجم به نسبت کم آب، می‌توان گفت این مجاری از گسترش‌یافتگی برخوردار نبوده‌اند که البته شرایط مورفولوژی منطقه و پراکندگی اشکال انحلالی سطحی نیز این مسئله را تأیید می‌کند که آهک‌های منطقه قابلیت گسترش آب زیرزمینی را ندارند. در حقیقت عامل اصلی ایجاد مجاری کارستی در تراز تونل، بازشدگی درز و شکاف‌های توده‌سنگ‌ها در نواحی خرد شده بوده است. نفوذ آب (به ویژه ناشی از بارش‌های شدید) به ژرفا و خاصیت انحلالی آن، موجب فراخ‌تر شدن شکاف‌ها شده و امکان هدایت آب به محدوده عمیات حفاری تا میزان بیشینه ۸۰ لیتر بر ثانیه را فراهم کرده است.

البته با توجه استحکام ژئومکانیکی آهک‌های کرتاسه (نسبت به تشکیلات ضعیف و متورق سازند ژوراسیک) و نیز میزان قطر مقطع حفاری (۴/۵ متر)، جریان آب به مقدار ۸۰ لیتر بر ثانیه در چنین تونلی نمی‌توانسته است سبب مشکلات و مخاطرات مهمی شود. از این رو عملیات حفاری در توده‌سنگ‌های آهکی سازند کرتاسه روند پیشروی مناسبی داشته است.

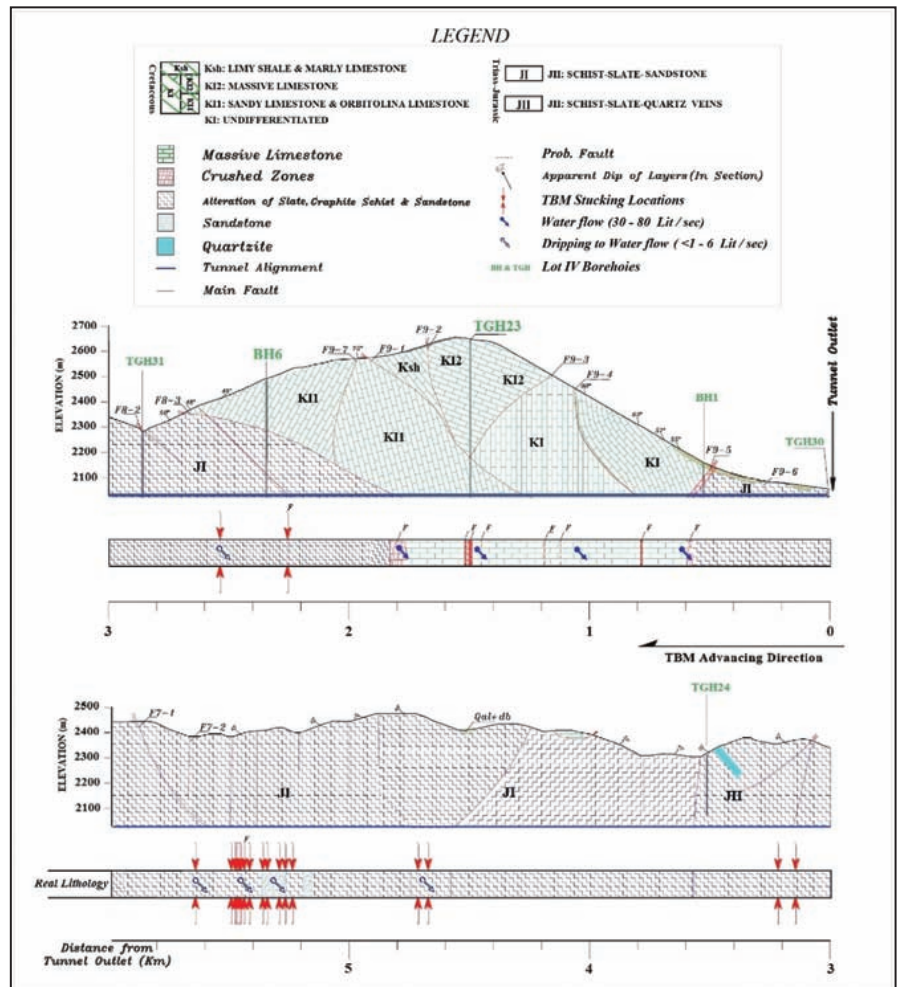
اما در تشکیلات غیر آهکی سازند ژوراسیک، عملیات حفاری به دلیل ریزش توده‌سنگ‌ها در پهنه‌های گسلی روی کله‌حفار TBM، بارها متوقف شده است. در چنین شرایطی تخلیه مصالح، بهسازی زمین و آزادسازی دستگاه TBM، عملیات بسیار خطرناک، زمان‌بر و پرهزینه‌ای بوده است که تنها توسط کارگران باتجربه و ماهر و به صورت دستی صورت می‌گرفت. در این تشکیلات از جمله عوامل تشدیدکننده پدیده ریزش، وجود آب‌های زیرزمینی در میان درزه و شکاف‌های نواحی خرد شده بود. بررسی‌ها در تشکیلات سازند ژوراسیک نشان داد که



شکل ۱- موقعیت زمین شناسی (بر گرفته از مراجع (Hezarkhani, 2006; Stocklin, 1977) و جغرافیایی قطعه ۴ تونل قمرود.

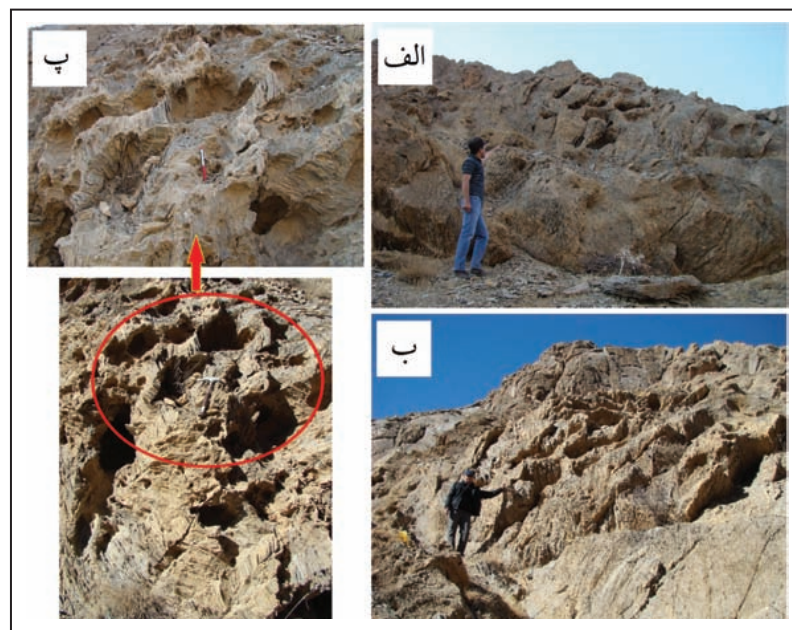


شکل ۳- الف) نمایی از آثار Solution pan و Rain pit در منطقه؛ ب) نمایی از آثار Rillen karren در منطقه.



شکل ۲- مقطع زمین شناسی مهندسی مربوط به شش کیلومتر ابتدایی در قطعه ۴ تونل قمرود (SCE, 2005).

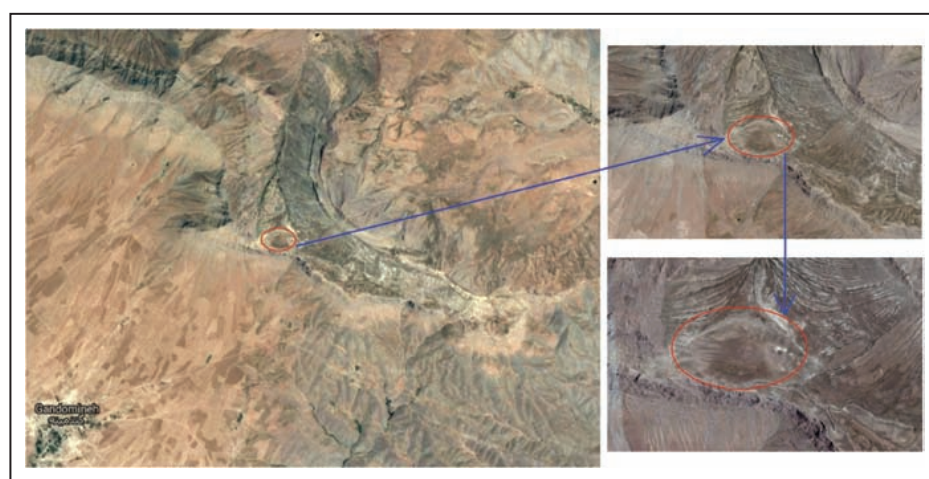




شکل ۴- الف و ب) نمایی از آثار Pit and tunnel karren در منطقه؛  
پ) خطواره‌ها و ضعف‌های ساختاری در آهک‌های دولومیتی و آثار  
Pit and tunnel karren.



شکل ۵- الف) نمایی از غارهای دامنه جنوبی کوه سرسیل؛  
ب) نمایی از غارهای دامنه خاوری کوه چال‌هنده.

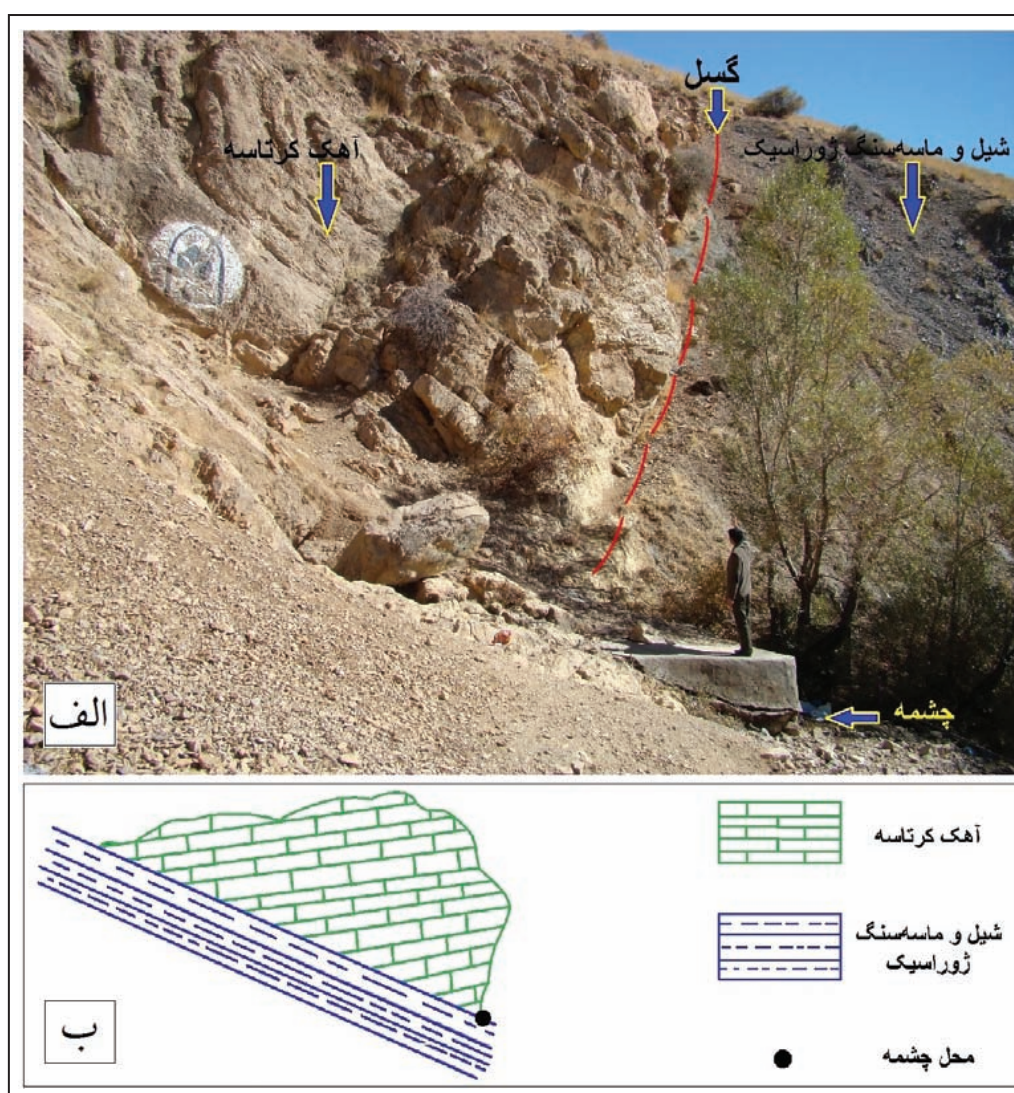


شکل ۶- نمایی از موقعیت فروچاله در ارتفاعات کوه  
سرسیل مشرف به روستای گندمبیه.



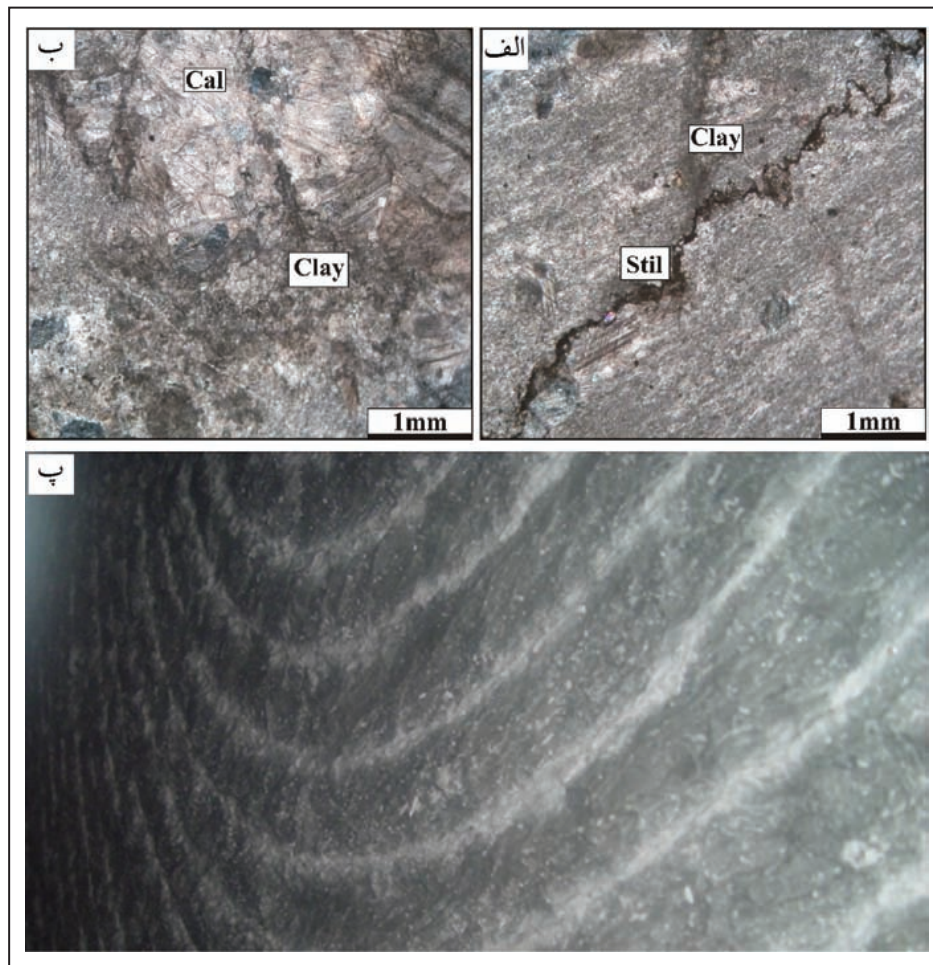


شکل ۷- نمایی از چشمه سراب هنده.

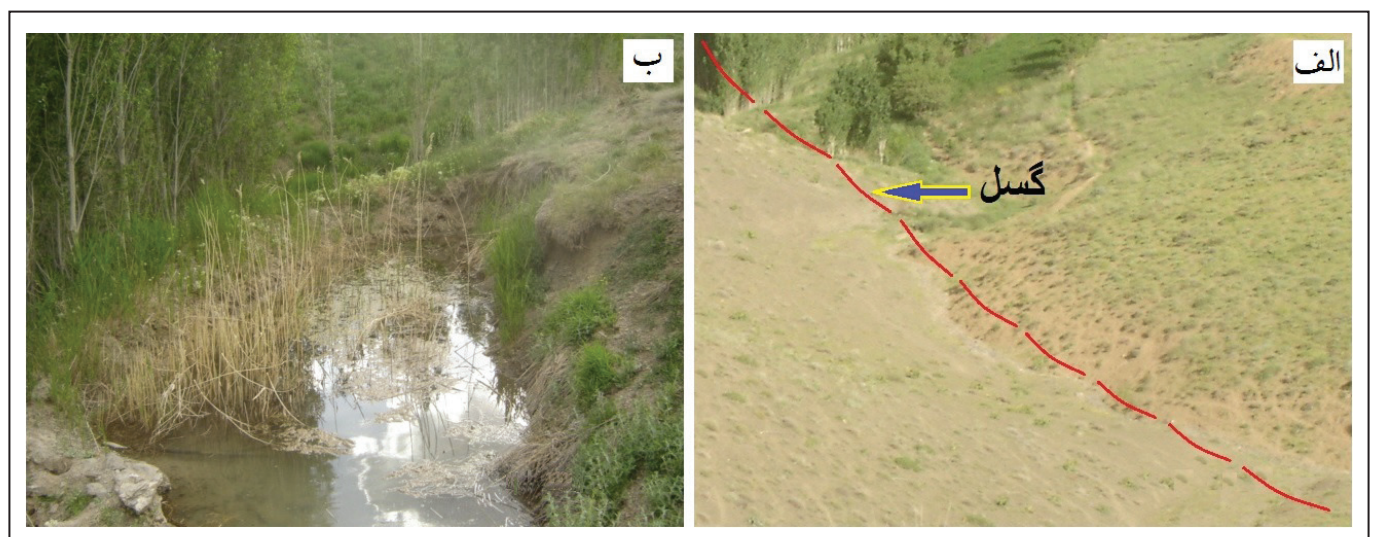


شکل ۸- الف) آهک‌های رانده شده روی شیل و ماسه سنگ ژوراسیک در محل چشمه کمرسته؛ ب) مقطع زمین‌شناسی نمادین چشمه.

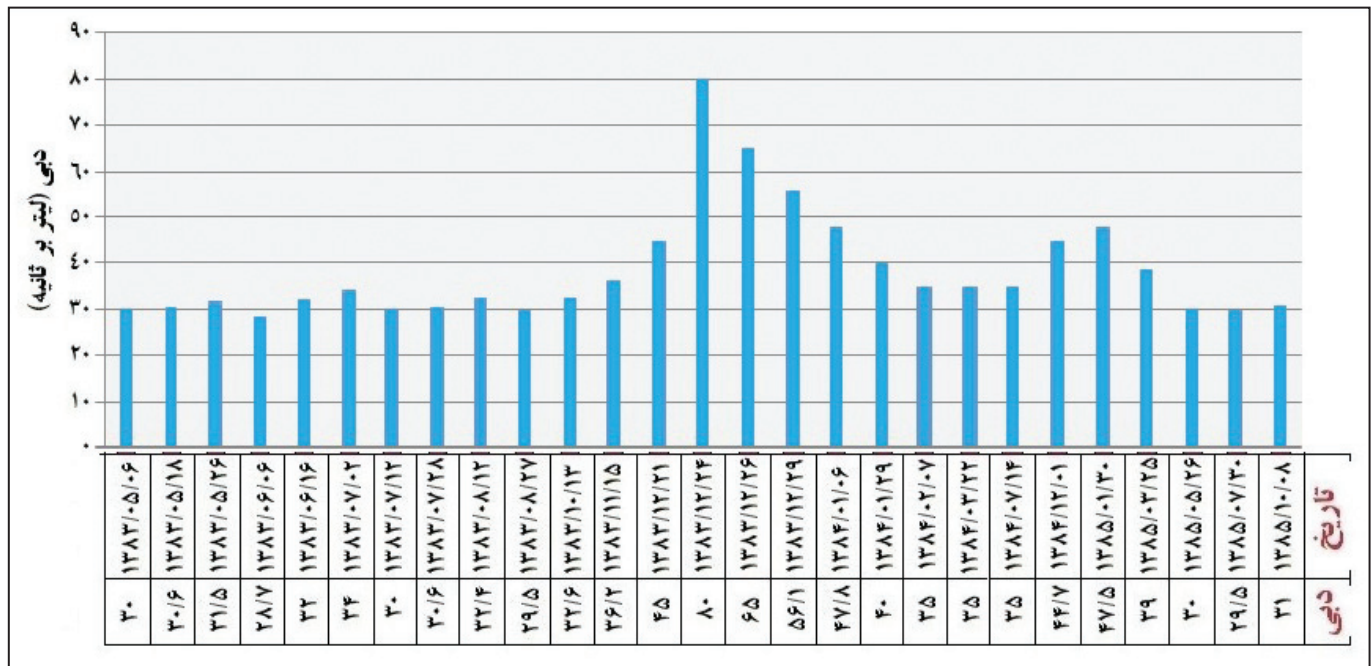




شکل ۹- الف) مقطع میکروسکوپی یک نمونه آهک از رخنمون‌های سطحی کیلومتر ۲۴۰۰ تونل؛ ب) مقطع میکروسکوپی یک نمونه آهک از تراز حفاری کیلومتر ۱۶۵۰ تونل؛ پ) نمایی از وضعیت ژئومکانیکی و استحکام توده سنگ آهکی در سینه کار تونل. خط اثر سایش ابزارهای برشی دستگاه حفار را می‌توان بر سطح سنگ دید.



شکل ۱۰- الف) نمایی از دره گسلی؛ ب) نمایی از چشمه آب در دره.



شکل ۱۱- تغییرات میزان دبی آب ورودی به بخش آهکی تونل در فصول مختلف.

جدول ۱- نتایج آزمایشات لوژن در تشکیلات آهکی کرناسه (SCE, 2005).

ژرفای آب (متر)	لوژن	ژرفا (متر)		گمانه
		انتها	ابتدا	
۲/۵	۱ >	۲۵	۲۰	TGH-23
۴/۵	۱ >	۵۰	۴۵	
۴/۵	۱ >	۶۰	۵۵	
۴/۵	۱ >	۶۵	۶۰	
۴/۵	۱ >	۷۰	۶۵	
۱/۵	۱ >	۷۵	۷۰	
۴/۵	۱ >	۸۰	۷۵	
۲/۵	۲/۱۲	۸۵	۸۰	
۲/۸	۱ >	۹۰	۸۵	
۲/۸	۱۰۰ <	۹۵	۹۰	
۲/۶	۳/۷۵	۱۰۰	۹۵	



جدول ۲- معادلات تحلیلی حاکم بر جریان آب ورودی به تونل.

توضیحات	رابطه	Rferences
این معادله دارای سه پیش فرض اساسی و اولیه زیر است؛ جریان شعاعی، نبود تغییرات قابل توجه لایه بندی و اعمال نفوذپذیری معادل محیط	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)}$	(۱) Goodman et al. (1965)
این پژوهشگران با جایگزینی H <sub>0</sub> به جای z در رابطه ۱، آن را تصحیح کردند.	$Q = \frac{2\pi KH_0}{\ln\left(\frac{2H_0}{r}\right)}$	(۲) Freeze & Cherry (1979)
ضریب کاهش هیوور (مقدار یک هشتم) و تغییراتی در مخرج به منظور تصحیح رابطه ۲ اعمال شده است.	$Q_L = \frac{2\pi KH_0}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)} \times \frac{1}{8}$	(۳) Heuer (1995)
ترکیبی از رابطه ۳ و ۱ به منظور کاهش خطا در مورد تونل های ژرف و کم ژرفا بر پایه مشاهدات میدانی تدوین شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$	(۴) Raymer (2003)
در این رابطه روش Goodman et al. (1965) با اعمال دقیق تر شرایط واقعی تصحیح شده است.	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$	(۵) Lei (1999)
El Tani (2003) بر بررسی میزان دقت معادلات یاد شده، رابطه ۶ را به عنوان یک رابطه بهینه معرفی کرده است.	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda} \quad \& \quad \lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}$	(۶) El Tani (2003)

### کتابکاری

- آغاسی، ع. و افراسیابیان، ا.، ۱۳۷۸- هیدروژئولوژی کارست، ترجمه کتاب Karst Hydrogeology نوشته Milanovic, P. T., 1981، انتشارات طرح تنظیم استانداردهای مهندسی آب کشور، چاپ اول، ۳۹۶ ص.
- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۵۸۶ ص.
- جودکی، و. و اجل لوتیان، ر.، ۱۳۹۲- تأثیر پایان نامه های دانشجویی در جهت رشد صنعت تونل سازی (مطالعه موردی تونل بلند قمرد)، فصلنامه علمی ترویجی صنعت و دانشگاه، سال ششم، شماره ۱۹ و ۲۰، صص. ۵۹ تا ۸۰
- جودکی، و. و اجل لوتیان، ر.، ۱۳۹۴- نقش شرایط زمین شناسی و سنگ شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمرد)، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال بیست و پنجم، شماره ۹۷، صص. ۱۵۱ تا ۱۶۲.
- جودکی، و.، ۱۳۹۱- بازنگری ژئوتکنیکی قطعه ۳ و ۴ مسیر تونل انتقال آب قمرد، پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش زمین شناسی مهندسی، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان.
- جودکی، و.، اجل لوتیان، ر. و ملارضایی، ف.، ۱۳۹۰- لزوم مقاوم سازی محتاطانه و محافظه کارانه پوشش داخلی تونل قمرد به عنوان حیاتی ترین شریان انتقال آب در کشور، چهارمین کنفرانس ملی مهندسی عمران: مقاوم سازی و حفظ بناهای ماندگار، اراک.
- حسن پور، ج. و ارومیه ای، ع.، ۱۳۸۵- ارزیابی اعتبار روش های مختلف تخمین جریان آب ورودی به تونل های سنگی (مطالعه موردی تونل قمرد)، هفتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف، صص. ۵۷۴ تا ۵۸۱.
- عالی انوری، ع.، ۱۳۸۴- تخمین میزان نفوذ آب به تونل های سنگی با نگرشی خاص به تونل انتقال آب قمرد، پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن- متالوژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- عالی انوری، ع.، کتیبه، ه. و شریف زاده، م. و فرهادیان، ه.، ۱۳۸۸- محاسبه جریان ناگهانی و اولیه آب به درون تونل های سنگی مطالعه موردی تونل انتقال آب قمرد، هفتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه تربیت مدرس، صص. ۱۹۶ تا ۲۰۴.
- کتیبه، ه. و عالی انوری، ع.، ۱۳۸۵- تخمین جریان نشت آب زیرزمینی به تونل انتقال آب قمرد توسط نرم افزار TunSeep، هفتمین کنفرانس ملی تونل ایران، دانشگاه صنعتی شریف، صص. ۳۷۱ تا ۳۷۹.
- مهری، ح.، ۱۳۸۳- ارزیابی آب های هجومی به داخل عملیات معدنی تونل انتقال آب قمرد و ارائه مدل زهکشی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب.

## References

- Aalianvari, A., Katibeh, H. and Sharifzadeh, M., 2012- Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard, *Arabian Journal of Geosciences*, Volume 5, Issue 2, pp. 275-284.
- Alavi, N. M., 1994- Tectonics of the Zagros Orogenic belt of Iran : New data and interpretation. *Tectonophysics*, Vol. 229 (3): 211 – 238.
- Barton, N., 2000- TBM Tunnelling in jointed and faulted rock, Balkema, the Netherlands, pp. 3–104, 147–149.
- Celik, M. and Onsal, N., 1999- Grounwater Circulation In the allochthonous Limestone Unite Between Lake Gridev and Kaxanplnarl Spring, Antallya, South–western Turkey, *Springer Hydrogeology journal*. V.7. n.5. p. 483-489.
- Cooper, A. H., Farrant, A. R. and Price, S. J., 2011- The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain, *Geomorphology*, Vol. 134 (1–2): 118–131.
- Cvijijć, J., 1893- Das Karstphänomen. *Geographische Abhandlungen herausgegeben von A. Penck* 5, 218–329.
- De Waele, J., Plan, L. and Audra, P., 2009- Recent developments in surface and subsurface karst geomorphology: An introduction, *Geomorphology*, Volume 106 (1-2), Pages 1–8.
- Edgell, H., 1993- Karst and Water Resources in the Hyper arid Area of Northeastern Saudi Arabia, *International Symposium on Water Resources in Karsts with Special Emphasis on Arid and Semi Arid zone*. Iran. p. 320.
- El Tani, M., 2003- Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunn Undergr Space Technol* 18:49–55.
- Ford, D. C. and Williams, P. W., 2007- *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley and Sons Ltd., Chichester, United Kingdom. 562 pp.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979- *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, TIC: 217571.
- Goodman, R., Moye D, Schalkwyk, A. and Javendel. I., 1965- Groundwater inflow during tunnel driving. *Eng Geol* 1:150–162.
- Heuer, R. E., 1995- Estimating rock-tunnel water inflow. *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, June, pp 18–21.
- Hezarkhani, A., 2006- Hydrothermal evolution of the Sar-Cheshmeh porphyry Cu–Mo deposit, Iran: evidence from fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28 (4), 409-422.
- Janjic, M., 1962- Prilog poznavanju podzemnih fenomena u karstu (Contribution to knowledge of underground phenomena in karst). *Vesnik Geozavoda Beograd Yugoslavia*.
- Katibeh, H. and Aalianvari, A., 2009- Development of a New Method for Tunnel Site Rating from Groundwater Hazard Point of View, *Journal of Applied Sciences*, Vol 9 pp. 1496-1502.
- Khorsandi, A. and Miyata, T., 2007- Fault determination due to sinkhole array on Lar valley, northeast of tehran (Iran), *ACTA CARSOLOGICA Journal*, Volume 36, Issus 2, pp.,203-208.
- Kusumayudha, B., Ten, M., Notosiswoyo, S. and Sayoga, R., 2000- Fractal Analysis of River, Cave Systems, and Topography of the Gunungsewu Karsts Area, Cen-tral Java, Indonesian, *Springer Hydrogeology journal*. v.8. n.3, p. 271-278.
- Lei, S., 1999- An analytical solution for steady flow into a tunnel. *Ground Water* 37:23–26.
- Maurice, L., Atkinson, T. C., Williams, A. T., Barker, J. A. and Farrant, A. R., 2010- Catchment scale tracer testing from karstic features in a porous limestone, *Journal of Hydrology*, Vol. 389 (1-2): 31-41.
- Mikulec, S. and Trumic, A., 1976- Engineering works in karst regions of Yugoslavia. *Proceeding book Karst Hydrology and Water Resources*, W.R.P., Colorado, USA.
- Movahednejad, A. E., 2008- Deep tunnelling in fault zone case study in Kuhrang 3 water conveyance tunnel, *World Tunnel Congress, Underground Facilities for Better Environment and Safety*, India.
- Raymer, J. H., 2003- Predicting groundwater inflow into hard-rock tunnels: estimating the high-end of the permeability distribution. *RETC*, pp 201–217.
- SCE (Sahel Consultant Engineers), 2005- Engineering report: Engineering Geological Review and Summary Report on Adverse Geology Situations in Tunnel Driven Path, (Parts III and IV of Ghomroud Water Conveyance Tunnel), SHL 2019 UNGR MTUN RM RP 003 DO.
- Sharifzadeh, M. and Hemmati Shaabani, A., 2006- TBM tunneling in adverse rock mass with emphasis on TBM jamming accident in Ghomroud water transfer tunnel, Van Cotthem, Charlier, Thimus and Tshibangu (eds), May 9-12, Liege, Belgium, pp. 643-647.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran : a review. *American Association Petroleum Geologists, Bulletin.*, Vol. 52 (7), 1229 – 1258.
- Stocklin, J., 1977- Structural correlation of the Alpine range between Iran central Asia. *Memoire Hors-Serve No.8 dela Societe Geologique de France*, 8: 333-353.
- Tseng, D., Tsai, B. and Chang, L., 2001- A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan, *International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 16, 175-183.
- Veni, G., 1999- A Geomorphological Strategy for Conducting Environmental Impact Assessments in Karst Areas, *Geomorphology*, Vol. 31 (1): 151-180.
- Wenner, D. and Wannenmacher, H., 2009- Alborz service tunnel in Iran: TBM tunneling in difficult ground conditions and its solution, *proceeding of 8th Iranian Tunneling Conference*, pp. 342-353.
- White, W. B., 1988- *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*, Oxford University Press, New York. 464 pp.
- Zarei, H. R., Uromiyehi A. and Sharifzadeh, M., 2010- Identifying geological hazards related to tunneling in carbonate karstic rock- Zagros, Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, In press, Online available:Pp.1-8, DOI 10.1007/s12517-010-0218-y.



## Study of the surface dissolution forms and development of groundwater in the part 4 of Ghomroud tunnel site

V. Joudaki<sup>1\*</sup>, F. Koohiyani-Afzal<sup>2</sup>, A. Aalianvari<sup>3</sup>, R. Ajalloeian<sup>4</sup> and A. Sohrabi-Bidar<sup>5</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Underground Structures, Sahel Omid Iranian Consultant Engineers Co., Tehran, Iran

<sup>2</sup>Ph.D., Water Research Institute, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assistant Professor, Department of Mining engineering, Kashan University, Kashan, Iran

<sup>4</sup>Professor, Department of Engineering Geology, Isfahan University, Isfahan, Iran

<sup>5</sup>Assistant Professor, Department of Engineering Geology, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 2015 May 04

Accepted: 2016 July 03

### Abstract

Part 4 of Ghomroud tunnel is located in the Sanandaj-Sirjan geological zone. In this area, due to the existence of numerous faults, crushed zones and significant development of major and minor catchments, the tunnel has been encountered with the risk of groundwater influx. On the other hand, due to some limitations such as thick (up to 600 meters in some localities) overburden over the tunnel and the lack of exploratory drilling down to the tunnel level, it has been difficult to forecast and estimate the groundwater flow in the tunnel route. Due to the existence of numerous faults in part 4 of the Ghomroud tunnel, encountering of the drilling machine (Double Shield TBM) with high-pressure water could cause influx of large amounts of water into the tunnel and collapse of rock masses in the crushed zones. It hence could cause deviation of the machine and drilling stop. In this article, the lack of data from boreholes led us to try investigating the development of groundwater flow in the tunnel based on geomorphological evidence. Analytical modeling and geomorphological field survey in the area show a relative consistency between geomorphology and volume of water flowing in the tunnel excavation. Therefore, according to measurements conducted on the water entering the tunnel, about 80 liters per second of water flowed into the tunnel, which is in agreement with geomorphological studies. Results show that the study of morphology and surface features could provide useful information in order to identify more precisely the hydrogeologic conditions of the area.

**Keywords:** Ghomroud Tunnel, TBM, Geomorphology, Groundwater flow, Analytical modeling.

For Persian Version see pages 29 to 40

\*Corresponding author: V. Joudaki; E-mail: Joudaki\_vahid@yahoo.com