

# نقش شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمروود)

وحید جودکی<sup>۱</sup> و رسول اجل‌لونیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، شرکت مهندسی مشاور هراز راه، تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

## چکیده

در مطالعه موردی حاضر به دلیل روباره زیاد تونل قمروود (در برخی نقاط تا حدود ۶۰۰ متر) و همچنین وجود پهنه‌های گسلی و خرد شده فراوان در مسیر طرح، عملیات حفاری با مخاطرات لهیدگی و ریزش توده‌سنگ‌ها روبه‌رو شد. در قطعه‌های ۳ و ۴ این تونل، مجموعه این عوامل، سبب توقف‌های مکرر و طولانی مدت ماشین حفار تمام‌مقطع (حدود ۶۰۰ روز) شد. محدوده عملیاتی این طرح در پهنه زمین‌شناسی سنندج-سیرجان است. سنگ‌های موجود در این پهنه به دلیل تحمل جنبش‌های زمین‌ساختی بسیار، دارای درجه دگرگونی متوسط به بالا هستند که سبب تبلور دوباره و جهت‌یافتگی کانی‌ها شده است. در پژوهش حاضر ضمن تهیه مقاطع نازک سنگ برای انجام مطالعات میکروسکوپی، با تأکید بر ویژگی‌های سنگ‌شناسی سازندها به بررسی نقش شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل در رخداد مخاطرات حفاری پرداخته شده است. از این رو با پیمایش سطحی در راستای محور تونل از رخنمون‌های سطحی و نیز از توده‌سنگ‌های درون تونل چندین نمونه سنگ برای مطالعه انتخاب شد. بیشتر مشکلات در واحدهای متورق سازند ژوراسیک و در مقاطعی رخ داده است که عملکرد گسل‌ها و نیز روباره زیاد تونل (تنش برجای زیاد)، شرایط زمین‌شناسی نامساعدی را ایجاد کرده است. نتایج حاصل بیانگر این حقیقت است که خواص سنگ‌شناسی (بافت، کانی‌شناسی و ...) در توده‌سنگ‌های ضعیف متورق (شیست، اسلیت، گرافیت‌شیست) و تناوب این تشکیلات با واحدهای مستحکم (رگه‌های کوارتزی و کوارتزیتی)، در کنار دیگر عوامل زمین‌شناسی، بر رخداد مخاطرات و توقف‌های بی‌ام مؤثر بوده است. نتایج آزمون اندیس سایش سورشار نیز نشانگر سختی و استحکام بالای رگه‌های کوارتزیتی است که استحکام آنها، نقش آشکاری در ایجاد شرایط سینه کار مختلط و تشدید مخاطرات (در زمین‌های فشارنده و ریزشی) داشته است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشین حفار تمام‌مقطع (تی‌بی‌ام)، سنگ‌شناسی، لهیدگی، ریزش، مقاطع نازک، سورشار، سینه کار مختلط.

\* نویسنده مسئول: وحید جودکی

E-mail: Joudaki\_vahid@yahoo.com

## ۱- پیش‌نوشتار

تاریخچه مطالعاتی طرح قمروود به بستن قراردادی میان وزارت نیرو و شرکت خدمات مهندسی آب کشور در سال ۱۳۵۶ باز می‌گردد (باقریان، ۱۳۸۵). هدف از این طرح، انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه دز (جنوب شهرستان الیگودرز) به شهرهای ایران مرکزی (قم، کاشان، گلپایگان، خوانسار، محلات، خمین، دلیجان، نیمور و سلفچگان) است. مهم‌ترین سازه این طرح، تونلی با طول حدود ۳۶ کیلومتر است که در مرحله اجرا به ۴ قطعه تقریباً مساوی تقسیم شد. بیشتر این تونل به روش مکانیزه و با استفاده از ماشین‌های حفار تمام‌مقطع (Tunnel Boring Machine, TBM) حفاری شد، که عملیات آن در شهریور ۱۳۹۱ پایان یافت.

پیرامون مباحث حفاری مکانیزه با تی‌بی‌ام در تونل قمروود، مطالعات گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است که در مقاله‌ای توسط جودکی و اجل‌لونیان (۱۳۹۲) به معرفی این پژوهش‌ها و شرح روش‌شناسی پژوهش‌های شاخص در این زمینه، پرداخته شده است.

در تونل‌هایی با طول بیشتر از ۲ کیلومتر، دستگاه‌های تی‌بی‌ام با قابلیت عبور از شرایط مختلف زمین‌شناسی و سرعت پیشروی ۴ تا ۱۰ برابر روش‌های سنتی (چالزنی و انفجار)، به عنوان مناسب‌ترین روش حفاری انتخاب می‌شوند (Barla & Pelizza, 2000). سرمایه‌گذاری اولیه برای حفاری با دستگاه‌های تی‌بی‌ام، بالا بوده و در محدوده‌ای معادل ۲ کیلومتر، هزینه روش‌های مکانیزه و سنتی با یکدیگر برابر است. ولی با افزایش طول تونل، روش مکانیزه به مراتب اقتصادی‌تر است (Kolymbas, 2005).

توقف حفاری‌های مکانیزه با تی‌بی‌ام، در ساختارهای پیچیده زمین‌شناسی به‌ویژه در توده‌سنگ‌های ضعیف در بسیاری از پروژه‌ها مانند تونل Evinos-Mornos در یونان (Grandori et al., 1995)، تونل Plave II در اسلوانی (Guetter & Weber, 2001)، تونل Penstock در سوییس (Lovat, 2000)، تونل Frasnadello در ایتالیا

Gotthard در سوییس (Amberg, 2001)، تونل بزرگراه Pinglin در چین (Tseng et al., 2001)، تونل انحراف آب رودخانه زرد در چین (Shang et al., 2004)، تونل مترو آتن (Hoek et al., 1998; Marinos, 1998) و ... گزارش شده است. در برخی از این تونل‌ها توقف‌های دستگاه حفار بسیار طولانی مدت بوده و در برخی موارد مانند پروژه تونل انتقال آب Lesotho Highlands در آفریقای جنوبی (Finnsson, 2001)، با اعمال تدابیر لازم، عملیات حفاری با موفقیت و طبق زمان‌بندی برنامه‌ریزی شده به پایان رسیده است. بیشتر مخاطرات در این تونل‌ها، ناشی از زمین‌های فشارنده و ریزشی بوده است. بنابراین برای عبور از زمین‌های فشارنده، تمهیداتی مانند استفاده از اپراتورهای آموزش دیده و با تجربه، نصب ابزار همگرایی سنج، استفاده از روان‌کننده (مانند بنتونیت)، افزایش نیروی پیشران تی‌بی‌ام، اضافه‌سازی و ... اندیشیده شده است. برای عبور از شرایط ریزشی نیز از روش‌هایی مانند حفاری گمانه پیشاهنگ، تنظیم گشتاور تی‌بی‌ام، عملیات بهسازی و ترزیک در سینه کار، نصب سیستم نگهدارنده پیش‌ساخته، چال‌های زهکش در صورت حضور فشار آب و ... استفاده شده است. در مواردی مانند تونل Gotthard با وجود تمهیدات اندیشیده شده، کارکرد حفاری در برخی مقاطع (در شرایط نامساعد زمین‌شناسی فشارنده و ریزشی) به کمتر از یک متر در روز رسیده است. از این رو در برخی نواحی با کنار گذاشتن روش مکانیزه، از روش سنتی (چالزنی و انفجار) استفاده شده است.

در تونل قمروود نیز در برخی مترها، شرایط زمین‌های فشارنده و ریزشی (و نیز پاره‌ای عوامل اجرایی مانند اپراتور تی‌بی‌ام و ...)، موجب حذف برخی از مزایای حفاری مکانیزه و توقف‌های طولانی مدت تی‌بی‌ام در سینه کار شده است (حدود ۶۰۰ روز کامل متوقف)، به گونه‌ای که در این مترها، حفاری با تی‌بی‌ام، نامناسب‌تر از روش‌های سنتی جلوه کرده است (جودکی و اجل‌لونیان، ۱۳۹۰).

## ۲- زمین‌شناسی منطقه

محدوده این طرح در پهنه سندج- سیرجان است. مشخصه اصلی این پهنه وجود چین‌خوردگی‌های فراوان و گسل‌های بسیار است. سنگ‌های موجود در این پهنه، به دلیل جنبش‌های زمین‌ساختی بسیار، دارای درجه دگرگونی متوسط به بالا هستند. این مسئله سبب ایجاد گسل، پهنه‌های خرد شده، شکستگی‌های بسیار و تورق و تبلور دوباره کانی‌ها در سنگ‌ها شده است. 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 دگرگون‌شده است (SCE, 2005). شکل ۲، مقطع زمین‌شناسی مهندسی تونل و جدول ۱، ویژگی‌های سنگ‌شناسی مسیر تونل را ارائه می‌دهد.

## ۳- مشکلات ناشی از تناوب سنگ‌های نرم و سخت در تونل

یکی از مشکلاتی که معمولاً در طرح‌های تونل‌سازی با ماشین حفار تمام‌مقطع رخ می‌دهد و کمتر به آن پرداخته می‌شود، وجود تناوب سنگ‌های سخت و نرم در سینه‌کار تونل و ایجاد شرایط سینه‌کار مختلط (Mixed Face Condition) است. در این شرایط، تی‌بی‌ام در سینه‌کار ضربات شدیدی را به هنگام چرخش دیسک کاترها (برش‌دهنده‌های صفحه حفار)، در لحظه برخورد با سنگ‌های مقاوم‌تر، وارد می‌کند که سبب خرد شدن آنها می‌شود. از این‌رو اولین مسئله دیده شده هنگام حفاری، افزایش لرزش تی‌بی‌ام و انحرافات لحظه‌ای آن است. این مسئله موجب کاهش نیروی پشت دیسک‌ها و کاهش نرخ نفوذ می‌شود. در حالت بحرانی، ممکن است، تی‌بی‌ام تا حدی از مسیر خود منحرف شود. در تونل قمرود این شرایط هم در موقعیت‌های لهیدگی و هم در موقعیت‌های ریزشی، وجود داشته است و در برخی مقاطع، عامل تعیین‌کننده‌ای در تشدید مخاطرات بوده است. در این تونل با توجه به حضور رگه‌های کوارتزیتی مستحکم در میان واحدهای متورق ژوراسیک (شکل ۳) و همچنین وجود تناوب ماسه‌سنگ‌های به نسبت مستحکم در کنار سنگ‌های ضعیفی چون شیست‌های گرافیتی، چنین شرایطی قابل مشاهده بوده است.

در تونل قمرود شرایط سینه‌کار مختلط نقش مهمی در انحرافات و توقف‌های دستگاه تی‌بی‌ام در پهنه‌های گسلی داشته است. افزون بر این وجود رگه‌های کوارتزیتی در این سازندها، تأثیر زیادی در کاهش بهره‌وری ماشین حفار، استهلاک برش‌دهنده‌های صفحه حفار و سایش آنها دارد. سایش ابزار بیشتر متأثر از ویژگی‌های میکروسکوپی سنگ، مانند درصد کوارتز و درجه قفل‌شدگی کانی‌ها است. بر پایه آزمایش‌های سورشار انجام شده روی رگه‌های کوارتزیتی، سایندهای این سنگ‌ها بسیار زیاد ارزیابی شد. جدول ۲، رده‌بندی‌های سایندهای بر پایه آزمایش سورشار را نشان می‌دهد. جدول ۳، نتایج آزمایش سورشار روی یک نمونه کوارتزیت در مقایسه با نتایج آزمایش روی نمونه‌های شیست و اسلیت را ارائه می‌دهد. اختلاف مقادیر اندیس سایش سورشار نمونه کوارتزیت با دو نمونه دیگر، نشان از میزان استحکام و نقش رگه‌های کوارتزیتی در ایجاد شرایط سینه‌کار مختلط دارد.

اندیس سایش سورشار (Cerchar Abrasiveness Index) می‌تواند با دقت مناسب و به‌طور عمومی در برآورد عمر دیسک‌های برشی استفاده شود (Lien, 1961) که به‌طور خودکار اثر ترکیبی عواملی چون سختی و تماس کانی‌های ساینده، اندازه و شکل دانه‌ها، ویژگی‌های مواد چسبنده میان کانی‌ها و مقاومت فشاری سنگ را با آنچه که در واقعیت حفاری وجود دارد، اندازه‌گیری می‌کند.

از عوامل دیگر تأثیرگذار در نرخ مصرف دیسک برشی و ساینده شدن آن، موقعیت و محل نصب هر دیسک برشی بر روی کاترهد (صفحه حفار) است. با دور شدن از مرکز کاترهد، نرخ مصرف دیسک برشی افزایش یافته که مقدار بیشینه آن در حاشیه

در عملیات حفاری قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود، از دستگاه حفار تمام‌مقطع تلسکوپی (Double Shield TBM) ساخت شرکت ویرث (Wirth) آلمان استفاده شده است. با توجه به وجود پهنه‌های گسلی و خرد شده در مسیر طرح، استفاده از ماشین حفاری سپر دوپل می‌توانست در شرایط ریزشی زمین‌های سست از تونل حفاظت و بنابراین امکان عبور تی‌بی‌ام از این پهنه‌های نامناسب را فراهم کند. ولی استفاده از سپرها در زمین‌های فشارنده می‌تواند تا حدی مشکل و خطرناک باشد. در قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود، همگرایی بیش از حد در توده‌سنگ‌های پیرامون تونل و فشار زمین به سپر تی‌بی‌ام، موجب ایجاد اصطکاک میان دیواره‌های تونل و سپر دستگاه می‌شد. با گسترش همگرایی، سپر به کلی توسط سنگ‌ها، محبوس و موجب باز ماندن حرکت دستگاه برای دفعات بسیار و طولانی‌مدتی می‌شد. در چنین شرایطی برای آزادسازی دستگاه باید در اطراف سپر و جلوی صفحه حفار، حفاری صورت می‌گرفت و سنگ‌ها توسط کارگران به‌صورت دستی تراشیده می‌شد.

از سویی با توجه به ساختار کله حفار تی‌بی‌ام قمرود، در دفعات بسیار به هنگام عبور از پهنه‌های خرد شده، با سقوط سنگ‌ها روی کله حفار، حجم بزرگی از ریزش در دیواره‌ها رخ می‌داد؛ به گونه‌ای که ضمن جلوگیری از چرخش صفحه حفار، حفاراتی در سقف و جلوی دستگاه ایجاد می‌شد. در این شرایط نیز تخلیه مصالح، بهسازی زمین و آزادسازی تی‌بی‌ام توقف‌های طولانی‌مدتی را شامل می‌شد.

در مبحث تونل‌سازی، توده‌سنگ‌ها را می‌توان به ۴ رده کلی (شکل ۱) تقسیم‌بندی کرد که به ترتیب آسانی در حفاری، شامل موارد زیر هستند:

- ۱) سنگ‌های متخلخل درزه‌دار: حفاری آنها آسان است، تا حدودی نگهدارنده مورد نیاز است.

- ۲) سنگ‌های توده‌ای سخت: حفاری آنها مشکل است، بیشتر نیاز به تعویض برنده‌های دیسکی دارند ولی نیازی به نگهداری ندارند.

- ۳) سنگ‌های فشارنده و تحت تنش زیاد (لهیدگی): استفاده از ماشین در این سنگ‌ها مشکلاتی به همراه دارد و نیاز به اضافه‌های حفاری دارند (برای اینکه پس از همگرایی تونل، ماشین گیر نکند). همچنین نگهداری قابل توجهی مورد نیاز است.

- ۴) سنگ‌های خرد شده و گسلی: حفاری در این سنگ‌ها با ریزش دیواره‌ها و اضافه‌های ناخواسته همراه است. سایش ناخن‌های دستگاه زیاد بوده و انجام زهکشی نیازمند توقف‌های زیادی است. همچنین تزیق و بهسازی زمین و نگهداری موقت فولادی نیاز است و پشت قاب‌های فولادی نیز باید به گونه‌ای پر شوند.

در مسیر حفاری تونل قمرود تقریباً هر ۴ رده وجود داشته‌اند؛ ولی مخاطرات اصلی در این تونل، به دلیل برخورد دستگاه حفار با توده‌سنگ‌های فشارنده و خرد شده (رده‌های ۳ و ۴) بوده که به‌صورت نمادین در شکل ۱ دیده می‌شوند.

شرایط سنگ‌شناسی سازندهای مسیر طرح در کنار دیگر عوامل زمین‌شناسی، بر رخداد پدیده‌های لهیدگی و ریزش در تونل قمرود مؤثر بوده است. در چنین پروژه‌هایی مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ می‌تواند در شناخت دقیق‌تر رفتار مهندسی توده‌سنگ‌ها مفید واقع شود. تاریخچه مقاطع میکروسکوپی سنگ‌ها به مطالعات دانشمندی انگلیسی (Sorby, 1880) باز می‌گردد. دستاورد سوری از آن زمان تاکنون، در جنبه‌های مختلف علوم زمین با کاربردهای روزافزون همراه بوده است. یکی از جنبه‌های کاربردی مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ که به‌ویژه در ایران چندان مورد توجه قرار نگرفته است، در زمینه تونل‌سازی و شناخت مخاطرات عملیات حفاری است (جودکی، ۱۳۹۱).

در این پژوهش مخاطرات زمین‌شناسی و دلایل توقف‌های مکرر عملیات حفاری تونل قمرود با تأکید بر ویژگی‌های سنگ‌شناسی سازندها و ضرورت مطالعات میکروسکوپی سنگ‌شناسی در پروژه‌های تونل‌سازی، مورد بررسی قرار گرفته است.

ترکیب کانی‌شناسی و دیگر ویژگی‌های سنگ مانند بافت و ... به ارزیابی دقیق تر رفتار سنگ بپردازد تا پیش‌بینی‌های واقع‌بینانه‌تری نسبت به زمین پیش رو، در عملیات حفاری صورت گیرد (جودکی، ۱۳۹۱).

در این پژوهش ضمن پیمایش سطحی در راستای محور تونل، از رخنمون‌های سطحی و نیز از توده‌سنگ‌های درون تونل (۶ کیلومتر ابتدایی و در محدوده توقف‌های تی‌بی‌ام) چندین نمونه سنگ انتخاب شد و ضمن تهیه مقاطع نازک از آنها، بافت و کانی‌شناسی نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ مطالعه شد.

توده‌سنگ‌های مسیر تونل در مناطق گیرافتادگی دستگاه در شرایط لهدیگی، بیشتر شامل شیست، اسلیت، رگه‌های کوارتز و مقداری گرافیت شیست میان‌لایه‌ای بوده‌اند. مجموعه‌ای از ویژگی‌های سنگ‌شناسی توده سنگ‌ها مانند درصد بالای کانی‌های میکایی، افزایش میزان گرافیت سنگ، آشفتنگی عناصر ساختمانی و چینه‌ای (چرخش و تغییر جهت زیاد شیستوزیته گرافیت‌شیست‌ها در محدوده‌های کوچک، ریز چین‌ها و لایه‌بندی‌های نامرتب)، تناوب لایه‌های مقاوم و نامقاوم (حضور رگه‌های کانی‌های ثانویه کوارتز و کوارتزیت با بازشدگی زیاد در میان تشکیلات نامقاوم متورق) و همچنین سرباره زیاد تونل (تنش برجای زیاد)، سبب همگرایی زیاد در تونل و گیر کردن سپر دستگاه می‌شد. در برخی مقاطع تونل با سطوح شیستوزیته تشکیلات متورق، موجب افزایش وسعت محدوده تغییر شکل‌ها در توده‌سنگ‌ها می‌شد. در جدول ۴، شرایط زمین‌شناسی و موقعیت‌های توقف تی‌بی‌ام در زمین‌های فشارنده ارائه شده است.

به‌طور کلی آنچه که در مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک تهیه شده از توده‌سنگ‌های مسیر تونل آشکار است، عملکرد پدیده دگرگونی و وجود جهت‌یافتگی در کانی‌هاست. بیشتر کانی‌های شناسایی شده در زیر میکروسکوپ شامل کانی‌های میکایی و ورقه‌ای (مسکوویت، بیوتیت و کلریت) و فلدسپار (که از دید ترکیبی بیشتر از آلپیت و پلاژیو کلازهای سدیک تا حد واسط هستند) است. رگه‌های ثانویه کوارتز نیز در این مقاطع میکروسکوپی دیده می‌شود. گاه کانی‌های کربناتی و کانی‌های کدر (آپاک) نیز در این مقاطع دیده می‌شوند. درصد فراوانی این کانی‌ها از نمونه‌ای به نمونه دیگر متفاوت است، ولی به‌طور متوسط از ترکیب یادشده پیروی می‌کند. پدیده سریستی شدن و کلریتی شدن نیز در این سنگ‌ها در اثر تجزیه پلاژیو کلازها، در برخی دیده می‌شود. به‌طور کلی بر پایه مطالعات انجام شده می‌توان رخساره دگرگونی در این سنگ‌ها را شیست سبز (Green Schist) فرض کرد. لازم است که لهدیگی، درصد قابل توجهی از ذرات میکروسکوپی و ریزمیکروسکوپی کانی‌های میکایی یا کانی‌های رسی با ظرفیت تورم پایین است؛ از این رو می‌توان گفت نتایج مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ نیز، وجود شرایط لازم (به نظر کانی‌شناسی)، برای رخداد لهدیگی در تشکیلات متورق سازند ژوراسیک را تأیید می‌کند (شکل‌های ۴ تا ۶).

در شکل ۴، مقطع میکروسکوپی ۳ نمونه شیست مربوط به محدوده کیلومترهای ۲۱۵۵ و ۲۵۳۶ و ۵۶۳۵ ارائه شده است که در این ۳ مقطع کانی‌های کوارتز، مسکوویت، بیوتیت، فلدسپار، گارنت و کلریت دیده می‌شود. در نمونه کیلومترهای ۲۵۳۶ (بخش C و D در شکل ۴)، چین‌خوردگی میکاها و تأثیر نیروهای زمین‌ساختی منطقه بر بافت سنگ آشکار است. در نمونه کیلومترهای ۵۶۳۵ (بخش E و F در شکل ۴)، بخش‌هایی از فلدسپارها کائولینیته شده و گارنت‌ها به کلریت تجزیه شده‌اند. همچنین دور زدن کانی‌های صفحه‌ای (مانند مسکوویت، بیوتیت و کلریت) به دور کوارتزها، فلدسپارها و گارنت‌ها دیده می‌شوند. ادخال‌های موجود در کوارتزها نیز که بیشتر گرافیت هستند زاویه ۹۰ درجه با شیستوزیته سنگ ساخته‌اند.

در شکل ۵، مقطع میکروسکوپی ۲ نمونه اسلیت ارائه شده است که در آنها رگه‌های ریزبلوری از کوارتز دیده می‌شود. در نمونه کیلومترهای ۵۲۳۵ (بخش A و B در شکل ۵)، شیستوزیته سنگ به روشنی مشخص است و کانی‌های صفحه‌ای مانند

کاترهد است. وجود شرایط سینه‌کار مختلط و به دنبال آن استهلاک دیسک‌های برشی حاشیه کاترهد، در سنگ‌های فشارنده مشکل‌ساز می‌شود. در تونل قمرود برای جلوگیری از گیر کردن سپر دستگاه حفار تی‌بی‌ام در سنگ‌های فشارنده، نیاز به مقداری اضافه حفاری و افزایش قطر تونل وجود داشت. تأثیر رگه‌های کوارتزیته و استهلاک برش‌دهنده‌های محیطی کاترهد سبب کاهش میزان اضافه حفاری و در نتیجه گیر کردن سپر در سنگ‌های فشارنده می‌شود. از سویی تأخیر ناشی از تعویض دیسک کاترها می‌تواند تأثیر منفی بر موقعیت مکانی داشته باشد و سبب تشدید شرایط لهدیگی در سنگ‌های فشارنده شود.

#### ۴- لهدیگی در سنگ‌های فشارنده

لهدیگی سنگ عبارت است از تغییر شکل‌های بزرگی که وابسته به زمان است و در پیرامون تونل‌ها و دیگر فضاهای زیرزمینی رخ می‌دهد. پدیده لهدیگی (Squeezing) به دلیل ایجاد خزش در سنگ‌ها و افزایش مقدار تنش‌ها نسبت به مقاومت برشی سنگ به وجود می‌آید. تغییر شکل‌ها ممکن است در طول ساخت تونل پایان یابند و یا بیش از یک دوره زمانی طولانی ادامه پیدا کند (Barla, 1995). سنگ لهدیده به کندی و بدون افزایش حجم محسوسی به درون تونل پیشروی می‌کند. مقدار همگرایی تونل، سرعت تغییر شکل و گستردگی منطقه انعطاف‌پذیر اطراف تونل به عواملی مانند شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی، ارتباط میان تنش‌ها و مقاومت توده سنگ، شرایط آب زیرزمینی، فشار آب منفذی و ویژگی‌های توده‌سنگ‌ها (سنگ‌شناسی) در محل، بستگی دارد (Shrestha, 2005). رفتار لهدیگی با قابلیت تغییر شکل پذیرگی و ویژگی‌های مقاومت توده سنگ ضعیف آمیخته شده است و در تونل‌هایی با روبراه زیاد مانند تونل قمرود، با افزایش تنش‌های پیرامون تونل روی می‌دهد. گنایس، میکاشیست، کالک‌شیست (نمونه‌های مجاور مناطق برشی و گسل‌ها)، رس‌سنگ‌ها، شیل‌های رسی و رس‌های ماری، شماری از مجموعه‌های سنگی هستند که در صورت اعمال تنش دارای این شرایط هستند و موجب تشدید تغییر شکل‌ها می‌شوند. از این رو سنگ‌شناسی توده سنگ‌ها و ویژگی‌هایی مانند سطوح لایه‌بندی و شیستوزیته، نقش مهمی در رفتار لهدیگی دارند. جهت ناپوستگی‌ها (لایه‌بندی، شیستوزیته، عاملی مهم در شروع و گسترش جابه‌جایی‌های زیاد در پیرامون تونل است. در این شرایط، اگر ناپوستگی‌های اصلی به‌طور موازی با محور تونل برخورد کنند، تغییر شکل‌ها به‌طور برجسته‌ای افزایش خواهند یافت. سطوح لایه‌بندی، پدیده‌هایی زمین‌شناسی هستند که ویژگی‌های آنها به شرایط رسوب‌گذاری منطقه بستگی کامل دارد. سطوح تورق و شیستوزیته نیز بیانگر ویژگی‌های ذاتی سنگ و عملکرد پدیده متامورفیزم در منطقه هستند.

در این شرایط، اولین و مهم‌ترین گام در ارتباط با فضاهای زیرزمینی، تعیین ساختار و وضعیت زمین در محل عبور تونل، از دید لهدیگی و یا عدم لهدیگی است، که در پایان می‌توان روش حفاری و نوع سیستم نگهدارنده را مشخص کرد (اجل لویان و محمدی، ۱۳۸۲).

اگر چه خواص کانی‌شناسی توده سنگ‌ها از اصلی‌ترین عوامل در پیدایش پدیده لهدیگی است، ولی این در حالی است که مطالعات اولیه و طراحی تونل‌ها، معمولاً بدون توجه به شرایط پیچیده سنگ‌شناسی توده‌سنگ‌ها از دید کانی‌شناسی، بافت و ... صورت می‌گیرد. بافت میکروسکوپی سنگ گاه می‌تواند به عنوان بهترین راهنما برای شناخت ویژگی‌های سنگ‌ها و در جهت افزایش دامنه مطالعات، در کنار آزمایش‌های مکانیک سنگ مورد استفاده قرار گیرد.

در ایران نیز در پروژه‌های تونل‌سازی، به ضرورت تهیه مقاطع نازک سنگ برای مطالعه میکروسکوپی سنگ‌ها توجه چندانی نمی‌شود و به شناخت نمونه‌های دستی و انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ روی مغزه‌های به‌دست آمده از گمانه‌های اکتشافی بسنده می‌شود. در حالی که یک سنگ‌شناس با تجربه می‌تواند با بررسی

## ۵- فرو ریزش در سنگ‌های گسلی و خرد شده

یکی از اساسی‌ترین مشکلات در حفاری تونل قمرود، با توجه به ویژگی‌های سنگ‌شناسی سازندهای مسیر طرح، تمرکز گسل‌ها با شرایط زمین‌شناسی فوق‌العاده ضعیف مانند سنگ‌های ضعیف و خرد شده به همراه مواد تشکیل شده در پهنه‌های گسلی بوده است. شرایط سطح درزه‌ها، نقش خیلی مهمی در پایداری تونل دارد. در طول حفاری، درزه‌های متقاطع با سطوح ضعیف، سبب ریزش قطعات گوه‌ای شکل سنگ از دیواره و ریزش زمین شده است. این فرایند معمولاً در توده سنگ‌های به شدت درزه‌دار یا پهنه‌های خرد شده و گسلی رخ می‌دهد. بر پایه بررسی‌های زمین‌شناسی برای تونل قمرود، این مسئله قابل پیش‌بینی بود که مسیر تونل توسط چندین گسل و پهنه خرد شده، قطع شده باشد. در مسیر حفاری، چندین مورد ریزش گزارش شده است. بدیهی است که به هنگام توقف تی‌بی‌ام در پهنه‌های گسلی، عملیات آزادسازی دستگاه و پایدارسازی دیواره‌ها، کار بسیار طاقت‌فرسا و خطرناکی بوده که تنها توسط کارگران ماهر و با صرف زمان زیاد صورت گرفته است. بیشتر مشکلات حفاری در واحدهای متورق سازند ژوراسیک و در مقاطعی رخ داده است که عملکرد گسل‌ها موجب خردشدگی توده‌سنگ‌ها و پیدایش مخاطرات شده است. سازوکار فشاری گسل‌ها سبب می‌شود ضخامت پهنه‌های خرد شده در نقاط بحرانی با توجه به سنگ‌شناسی سازندهای منطقه (اسلیتی، شیستی، ماسه‌سنگی)، بیشینه باشد و حفاری با مشکل روبرو شود. پهنه‌های گسلی شناسایی شده در مسیر حفاری دارای پهنای متفاوت، از حدود ۱۰ تا ۵۰ متر بوده‌اند.

بیشتر ریزش‌ها و توقف‌های تی‌بی‌ام در رویارویی با شرایط زمین‌شناسی دارای اسلیت، گرافیت‌شیست، ماسه‌سنگ، رگه‌های کوارتز، میلونیت، میان‌لایه‌های سنگی با درصد بالای گرافیت و تراوش آب، رخ داده است. وجود رگه‌های کوارتز در توده سنگ در این شرایط مشخص می‌کند که توده سنگ به شدت شکسته شده و این شکستگی‌ها، بعدها توسط مواد سیلیسی پر شده‌اند. حضور آب در پهنه‌های گسلی (قطره‌ای تا جریانی)، با نفوذ در میان‌لایه‌های سنگی، سبب شسته شدن و از میان رفتن میان‌لایه‌های نامقاوم گرافیت‌شیست و کاهش مقاومت چسبندگی شده و زمینه ناپایداری توده‌های سنگی را فراهم ساخته است. در حقیقت می‌توان گفت حضور آب نقش مهمی در کاهش اصطکاک میان لایه‌های سنگی، تشدید لغزندگی سطوح شکستگی (به دلیل عملکرد مواد پرکننده و صابونی بودن میان لایه‌های گرافیت‌شیست) و ریزش توده سنگ‌ها روی کله حفار داشته است. در بیشتر موقعیت‌ها، سوی شب شکستگی‌ها و درزه‌ها در خلاف جهت پیشروی تونل است و حفاری سبب ریزش بلوک‌های سنگی و در نتیجه گیر کردن کله حفار شده است. در این شرایط، وجود میان‌لایه‌ها و سطوح صاف خاص در این درزه‌های شیب‌دار (با شیب متوسط ۶۰ تا ۸۰ درجه) و فاصله به نسبت کم میان آنها (حدود ۲۰ سانتی متر) سبب جابه‌جایی آسان بلوک‌های سنگی می‌شود. در جدول ۶، شرایط زمین‌شناسی و موقعیت‌های توقف تی‌بی‌ام در زمین‌های ریزشی ارائه شده است.

بررسی‌ها در ۷ کیلومتر ابتدایی تونل، نشان داد که میزان کوارتز موجود در مواد حفاری شده توسط تی‌بی‌ام در پهنه‌های ریزشی (Collapse Zones)، بیشتر از دیگر بخش‌های تونل است (شکل ۷). روند افزایش میزان کوارتز را می‌توان تقریباً در همه پهنه‌های ریزشی دید. این پدیده مربوط به کوارتزهای ثانویه‌ای است که در درز و شکاف‌های پهنه‌های گسلی تبلور دوباره یافته‌اند. منبع این چنین سیلیس‌ها و دیگر کانی‌های ثانویه، فعالیت‌های نفوذی در منطقه است (Zolfaghari et al., 2011).

محتوای کوارتز موجود در مواد حفاری شده از پهنه‌های ریزشی افزون بر رگه‌های کوارتز، مربوط به رگه‌های کوارتزیتی نیز هست که از رگه‌های قدیمی کوارتز به وجود آمده‌اند.

در شکل ۸، نتایج مطالعه روی مقاطع نازک ۲ نمونه از کوارتزیت‌های استخراج شده در محدوده کیلومترهای ۳۲۱۷ و ۵۲۰۵، ارائه شده است که نکته مهم در

مسکوویت و بیوتیت، بلورهای کوارتز و گرافیت دیده می‌شود. در نمونه کیلومترهای ۵۳۸۴ (بخش C و D در شکل ۵) تشکیل دهنده‌های اصلی کوارتز، کلریت و گرافیت است و فلدسپار به میزان کمتری دیده می‌شود.

در شکل ۶، مقطع میکروسکوپی دو نمونه گرافیت‌شیست مربوط به محدوده کیلومترهای ۴۶۷۲ و ۴۷۱۴، ارائه شده است که کانی‌های آنها شامل مسکوویت، کوارتز، گرافیت، فلدسپار و کانی‌های کدر است. در این میان، فلدسپارها دچار تجزیه کاتولینیتی شده‌اند. همچنین مسکوویت‌ها چین‌خوردگی یا کرلینیشن نشان می‌دهند و در محور چین، گرافیت و اکسید آهن تجمع یافته است. در این مقاطع، حاشیه مضرس و خاموشی موجی کوارتزها، بیانگر تأثیر فشارهای جهت‌دار یا تنش بر بافت سنگ است. ولی برخی از رگه‌های کوارتز بدون حاشیه مضرس بوده و چین‌خوردگی‌ها یا شیستوزیته سنگ را قطع کرده‌اند؛ این نکته نشانگر این مطلب است که این رگه‌ها پس از تنش وارد بافت سنگ شده‌اند. بافت این ۲ نمونه گرانوبلاستیک و لیدوبلاستیک است.

پیش از عملیات اجرایی تونل بر پایه روش‌های متداول برای برآورد پتانسیل لهدگی (روش‌های تجربی، تحلیلی، عددی و...)، پیش‌بینی‌هایی در مورد میزان همگرایی در سنگ‌شناسی‌های گوناگون در مسیر طرح انجام گرفت. نتایج اندازه‌گیری‌های همگرایی در هنگام اجرا نشان داد که در برخی مقاطع از تونل، تفاوت‌هایی میان میزان همگرایی واقعی و پیش‌بینی شده وجود دارد.

برای نمونه بر پایه پیش‌بینی‌ها (فرخ، ۱۳۸۲؛ Farrokhi et al., 2006)، تنها ۵ درصد از سنگ‌شناسی‌های مسیر تونل در محدوده رفتار فشارندگی شدید قرار می‌گیرند؛ ولی نتایج همگرایی سنجی در تونل نشان داد که ۱۰ درصد از مسیر تونل در محدوده رفتار فشارندگی شدید قرار گرفته است (Farrokhi & Rostami, 2009). جدول ۵، رده‌بندی رفتار فشارندگی در سنگ‌شناسی‌های مختلف مسیر حفاری را بر پایه اندازه‌گیری‌های همگرایی در تونل ارائه می‌کند.

وجود پیچیدگی‌های زیاد در ویژگی‌های سنگ‌شناسی توده‌سنگ‌های مسیر تونل از جمله عوامل مؤثر بر اختلاف میان همگرایی واقعی و پیش‌بینی شده است. پیش‌بینی‌های لهدگی در چنین طرح‌هایی تنها زمانی قطعیت خواهند داشت که توده سنگ‌های مسیر تونل ویژگی‌های سنگ‌شناسی همگونی داشته باشند؛ ولی تجربه نشان داده طبیعت کمتر چنین شرایط زمین‌شناسی ایده‌آلی را فراهم می‌سازد. بنابراین مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ می‌تواند ابزاری برای شناخت دقیق‌تر شرایط پیچیده و ناهمگن در تشکیلات زمین‌شناسی باشد.

اگر چه توقف‌های تی‌بی‌ام قمرود در شرایط لهدگی متأثر از شرایط نامساعد زمین‌شناسی منطقه بوده است ولی در ادامه حفاری و با گذشت زمان، برخی عوامل اجرایی مانند افزایش تجربه اپراتورهای تی‌بی‌ام، توانست برای جلوگیری از توقف‌ها و عبور دستگاه از زمین‌های فشارنده نقش کلیدی داشته باشد. برای نمونه در بحث هدایت دستگاه، با ورود به زمین‌های فشارنده و درگیر شدن سپر دستگاه با دیواره تونل، میزان پارامترهای نرخ نفوذ (Rate of penetration) و گشتاور کله حفار (Torque) کاهش می‌یافت و در مقابل آن، میزان نیروی پیشران (Thrust) و فشار دیوارگیری (Regripping) دستگاه افزایش نشان می‌داد. بنابراین توجه به روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه در اتاق کنترل تی‌بی‌ام، می‌توانست اپراتور را نسبت به ورود به زمین‌های فشارنده و اندیشیدن تمهیدات لازم (تنظیم گشتاور و نیروی پیشران برای جلوگیری از توقف دستگاه) آگاه کند. در صورتی که تی‌بی‌ام مجهز به سامانه ثبت داده (Data logger system) برای ذخیره‌سازی اطلاعات دستگاه به‌صورت خودکار باشد، این امکان وجود دارد که بتوان روند تغییرات پارامترهای دستگاه را در شرایط مختلف زمین‌شناسی به‌طور دقیق تجزیه و تحلیل کرد. در پروژه قمرود نیز پس از چند مورد توقف دستگاه در شرایط نامساعد زمین‌شناسی، سیستم ثبت داده‌ها روی دستگاه نصب شد.

اپراتورها از این دید است که در پهنه‌های گسلی ممکن است فردی کم تجربه با هدایت نادرست دستگاه (برای نمونه یک توقف کوچک و اعمال گشتاور بالا)، توده سنگ‌ها را برای ریزش روی کله حفار تحریک کند، بنابراین در زمین‌های خرد شده باید با کنترل گشتاور دستگاه از لرزش صفحه حفار و اعمال بارهای غیر معمول بر سینه کار تونل جلوگیری کرد.

## ۶- نتیجه گیری

سنگ‌شناسی سازندهای مسیر تونل قمرود در کنار دیگر عوامل زمین‌شناسی، عامل تأثیرگذاری در پیدایش پدیده‌های لهیدگی و ریزش توده سنگ‌ها و به دنبال آن توقف‌های دستگاه تی‌بی‌ام بوده است. نتایج مطالعات میکروسکوپی سنگ‌ها در این پژوهش نشان می‌دهد که با توجه به درصد قابل توجهی از ذرات ریز میکروسکوپی کانی‌های میکایی و نیز کانی‌های رسی در تشکیلات متورق سازند ژوراسیک، توده سنگ‌ها از پتانسیل بالایی برای رخداد پدیده لهیدگی برخوردار بوده‌اند. پیش از آغاز عملیات اجرایی، در رابطه با مخاطرات زمین‌شناسی در مسیر حفاری، پیش‌بینی‌هایی صورت گرفت. در برخی مقاطع از تونل، مقادیر ثبت شده از همگرایی سنج‌ها در هنگام حفاری، با میزان پیش‌بینی‌ها اختلاف نشان می‌دهد. یکی از دلایل اصلی این اختلاف، شرایط پیچیده سنگ‌شناسی سازند ژوراسیک و تناوب سنگ‌های سخت و نرم در مسیر تونل است. قفل شدگی بالای کانی‌ها در تصاویر میکروسکوپی کوارتزیت‌ها و نیز رقم بالای شاخص سایش در آزمون سورشار، نشانگر نقش رگه‌های کوارتزیتی در ایجاد شرایط سینه کار مختلط و تشدید مخاطرات (به ویژه در پهنه‌های گسلی) است. مطالعه مقاطع نازک سنگ در حفاری‌های مکانیزه می‌تواند برای شناسایی دقیق‌تر شرایط زمین‌شناسی، بررسی قابلیت انحلال سنگ‌ها، ارزیابی مقاومت توده سنگ‌ها، تهیه دقیق‌تر مشخصات فنی پیشانی حفار تی‌بی‌ام، پیش‌بینی مواردی مانند میزان استهلاک و نرخ مصرف دیسک کاترها در سنگ‌شناسی‌های گوناگون، طراحی و انتخاب انواع دیسک کاترها متناسب با شرایط زمین‌شناسی، استفاده شوند. در بیشتر پروژه‌های تونل‌سازی، مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ چندان جدی گرفته نمی‌شود و به شناخت نمونه‌های دستی و انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ روی مغزه‌های به‌دست آمده از گمانه‌های اکتشافی اکتفا می‌شود. در حالی که در مرحله مطالعات ساختگاهی طرح، یک سنگ‌شناس با تجربه می‌تواند با بررسی ترکیب کانی‌شناسی و دیگر ویژگی‌های سنگ (بافت و ساخت و...) به ارزیابی رفتار سنگ بپردازد تا در پایان همراه با نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ پیش‌بینی‌های دقیق‌تری نسبت به زمین پیش رو، در عملیات حفاری صورت گیرد. همچنین یک مهندس زمین‌شناس مطلع از مسائل سنگ‌شناسی، می‌تواند با حضور در ترکیب تیم فنی حفاری، هنگام عملیات اجرا در مسیر پیشروی تی‌بی‌ام، با روش‌های مختلف (بازدید سینه کار، به کمک گمانه پیشانگ، روش‌های نوین ژئوفیزیکی در هنگام عملیات حفاری مانند TSP، کنترل روند تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار و...)، شرایط توده سنگ‌هایی که به زودی حفاری خواهد شد را با دقت هر چه بیشتر پیش‌بینی کند. در این صورت اعضای تیم فنی می‌تواند با دریافت نظرات و اطلاعات سنگ‌شناسی زمین‌شناس، ضمن کنترل وضعیت، برای تغییرات ناگهانی و مخاطره‌آمیز شرایط توده سنگ‌ها (ناشی از عدم تطابق پیش‌بینی‌های پیش از اجرا با واقعیت زمین‌شناسی هنگام اجرا)، تمهیدات لازم را چاره‌اندیشی کنند و در این فاصله زمانی، برای مقابله با مخاطرات، مناسب‌ترین راهکارها را اتخاذ کنند.

## سپاسگزاری

در پایان نویسنده‌گان بر خود لازم می‌دانند از خانم دکتر فرشته بیات به دلیل راهنمایی‌های ایشان در مطالعه مقاطع نازک سپاسگزاری کنند. همچنین از پرسنل محترم مؤسسه مهندسی مشاور ساحل برای استفاده از گزارش‌های این شرکت سپاسگزاری می‌شود.

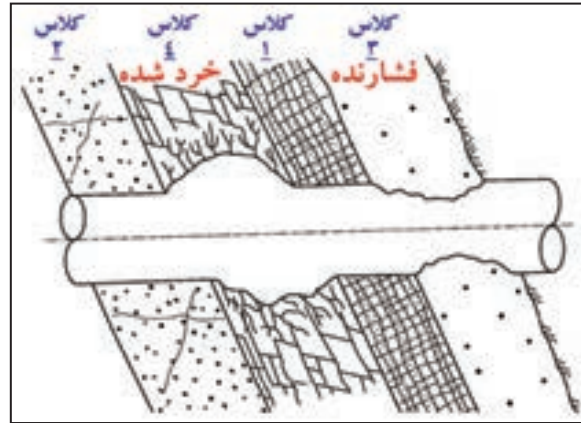
تصاویر میکروسکوپی درجه قفل‌شدگی بالای کانی‌ها و تبلور دوباره آنهاست. این ویژگی‌ها نشانگر سختی و استحکام بالای رگه‌های کوارتزیتی است که تأثیرات آن، نقش عمده‌ای در لرزش کله حفار، انحرافات لحظه‌ای و توقف‌های دستگاه تی‌بی‌ام در پهنه‌های گسلی داشته است.

در شکل ۸، کانی اصلی کوارتز است که با حاشیه مضرس و خاموشی موجی دیده می‌شود. مسکوویت به‌صورت رگه، فلدسپار با تجزیه کاتولینیتی و گارنت (با فراوانی کم) حضور دارند، بنابراین در این مقاطع میکروسکوپی آشکار است که کوارتزیت‌ها منشأ آذرین دارند چرا که افزون بر کوارتز، کانی‌های موجود در یک گرانتیت مانند فلدسپار (ارتوکلاز)، مسکوویت و گارنت نیز دیده می‌شود. در نمونه کیلومتر ۵۲۰۵ (بخش D در شکل ۸) به نظر می‌رسد این رگه ثانویه نبوده، بلکه حاصل از ذوب کوارتزها و تبلور دوباره آنهاست؛ یعنی احتمالاً سنگ در بخش‌هایی ذوب شده است که این تبلور دوباره، موجب افزایش ویژگی‌های مقاومتی چنین رگه‌هایی می‌شود. بافت این ۲ نمونه کوارتزیت، میرمیکت و لپیدوبلاستیک است. در نمونه کیلومتر ۳۲۱۷ (بخش A در شکل ۸) وجود ادخال‌های کوارتز در ارتوکلاز مشخص است که بافت میرمیکت را به وجود می‌آورد.

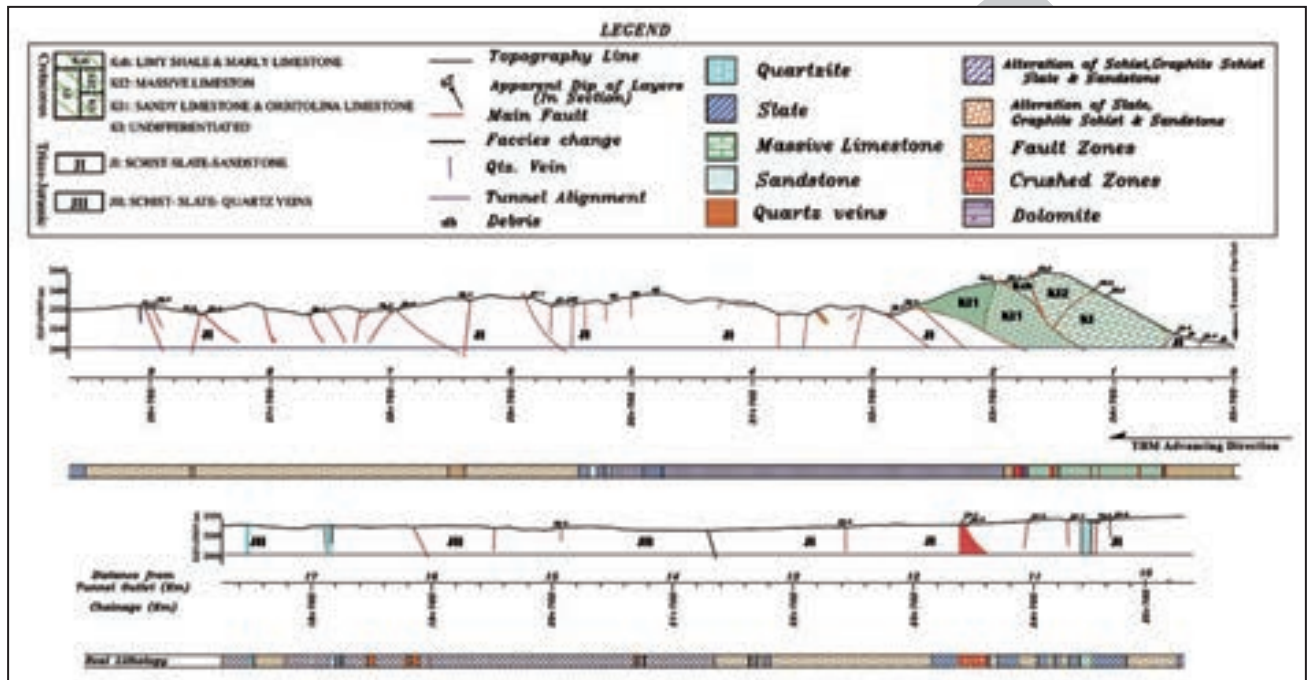
در برخی مقاطع از پهنه‌های گسلی در میان تشکیلات متورق سازند ژوراسیک افزون بر رگه‌های کوارتزیتی، رگه‌هایی از کلسیت ثانویه نیز دیده شده است. در شکل ۹، نتیجه مطالعه میکروسکوپی یک نمونه کلسیت مربوط به محدوده کیلومتر ۵۲۶۰ ارائه شده است. لازم به توضیح است که در این کیلومتر، سبزه‌های دستگاه تی‌بی‌ام به دلیل پدیده لهیدگی و کله حفار نیز به دلیل پدیده ریزش در ناحیه گسلی، هر دو درگیر بوده‌اند. نمونه کلسیت برداشت شده از این محدوده، در تصویر میکروسکوپی دارای بلورهای درشت و بی‌شکل با آرایش موزاییکی است. در این مرمر درشت‌بلور، شماری از دانه‌های کلسیت دارای ماکل مکرر با رنگ رنگین‌کمانی است که در بخش A شکل ۹، قابل تشخیص هستند. مطالعه میکروسکوپی روی این مقطع نازک نشان می‌دهد که این رگه‌های کلسیت تقریباً خالص و تک‌بلور هستند (شکل ۹).

در چنین شرایطی در هنگام عملیات حفاری، بررسی وجود رگه‌های کانی‌های ثانویه (کوارتز و کلسیت) در سینه کار و کنترل اندازه قطعات این کانی‌ها در مواد استخراج شده (شکل ۱۰)، می‌تواند در شناسایی دقیق‌تر شرایط زمین‌شناسی برای اندیشیدن تمهیدات لازم برای مواجهه با مخاطرات و پیش‌بینی موقعیت پهنه‌های گسلی مفید باشد.

اگر چه در شرایط ریزشی نیز توقف‌های تی‌بی‌ام قمرود متأثر از شرایط نامساعد زمین‌شناسی منطقه بوده است ولی برخی عوامل اجرایی مانند طراحی کله حفار تی‌بی‌ام، می‌توانست در عبور دستگاه از پهنه‌های خرد شده مسئله‌ساز باشد. در طراحی تی‌بی‌ام قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود (شکل ۱۱)، استفاده از سپر تلسکوپی مناسب‌ترین انتخاب بوده چرا که این نوع سپر بهترین گزینه برای حفاری در مسیرهای با گوناگونی زیاد از دید بافت و نوع سنگ‌هاست. سپر تلسکوپی با امکان حفاری در حالت‌های تک‌سپری و دوسپری می‌تواند در زمین‌های گسلی از دیواره‌های تونل حفاظت و امکان پیشروی تی‌بی‌ام را فراهم کند. اما ویژگی‌های فنی پیشانی حفار مانند هندسه کاترهد، نوع و اندازه دیسک‌های برشی، درجه‌های بارگیری و ... در این تی‌بی‌ام، بیشتر با سنگ‌های سخت و توده‌های هماهنگی داشته است. بنابراین در برخورد با سنگ‌های ضعیف در محدوده‌های گسلی، پایداری دیواره‌های تونل را تهدید می‌کرد. از این رو پس از توقف‌های مکرر دستگاه در کیلومترهای ابتدایی، ساختار صفحه حفار در بخش درجه‌های بارگیری (Mucking gate of cutter head) تا حدی که برای پرسنل فنی در شرایط سینه کار تونل امکان‌پذیر بود، مورد اصلاح قرار گرفت. پس از توقف‌های مکرر و عبور از ۶ کیلومتر ابتدایی تونل، روند پیشروی تغییر کرد. در این میان افزون بر اصلاح صفحه حفار، افزایش تجربه و عملکرد اپراتورهای دستگاه نیز نقش بسزایی در بهبود روند حفاری داشته است. اهمیت تجربه

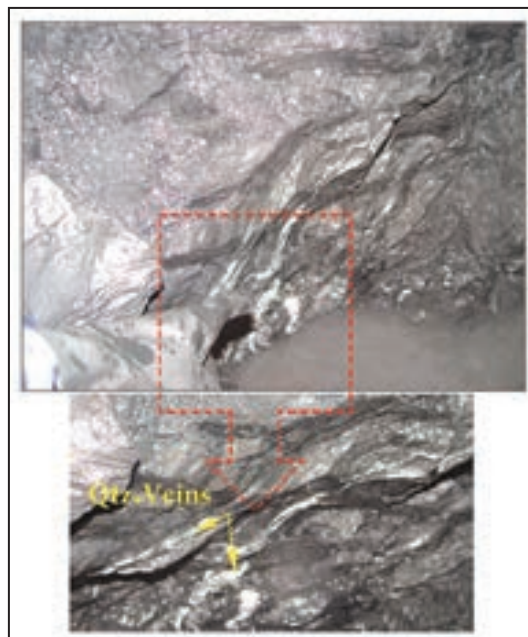


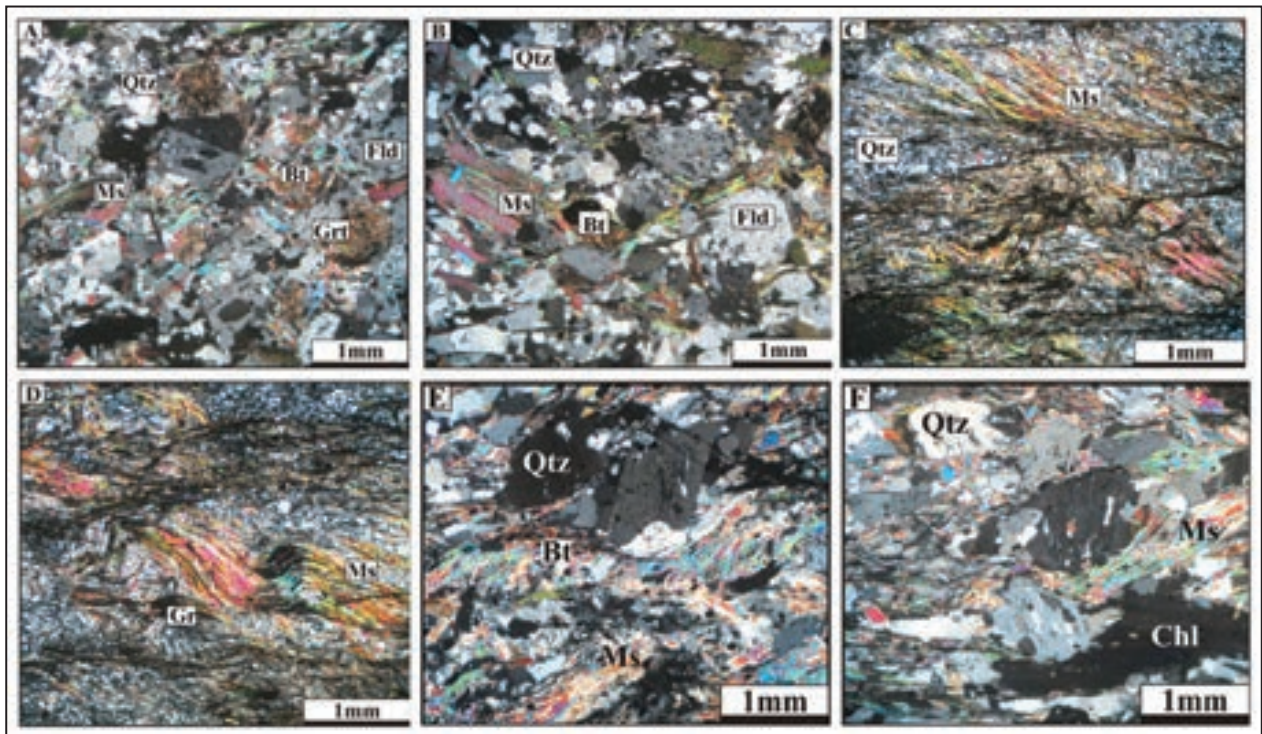
شکل ۱- طرحی نمادین از ۴ رده اصلی توده‌سنگ‌ها در بحث تونل‌سازی (Kolymbas, 2005).



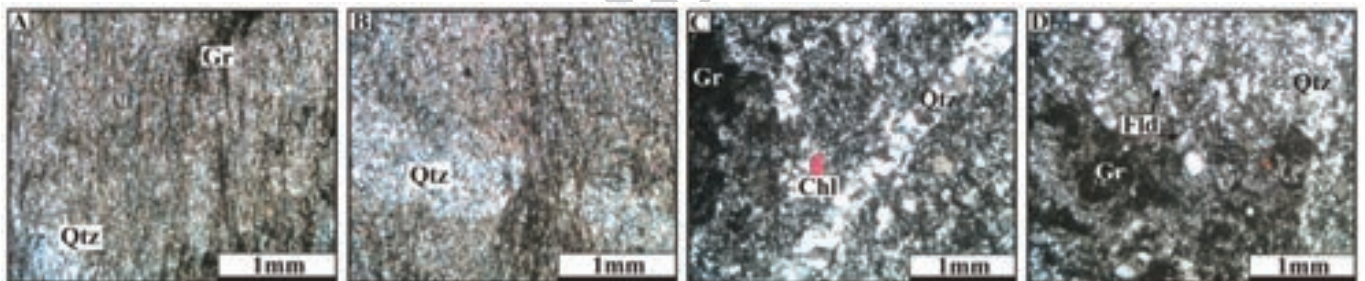
شکل ۲- مقطع زمین‌شناسی مهندسی قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود (SCE, 2005).

شکل ۳- سینه‌کار مختلط: نمایی از رگه‌های ضخیم کوارتزیتی در میان تشکیلات اسلیت و گرافیت شیست (موقعیت لهدگی متر از ۵۳۸۴).

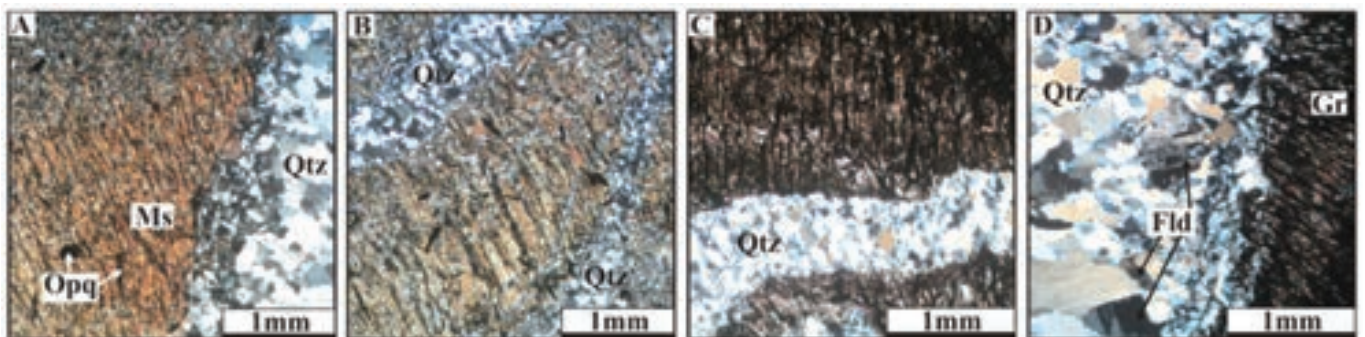




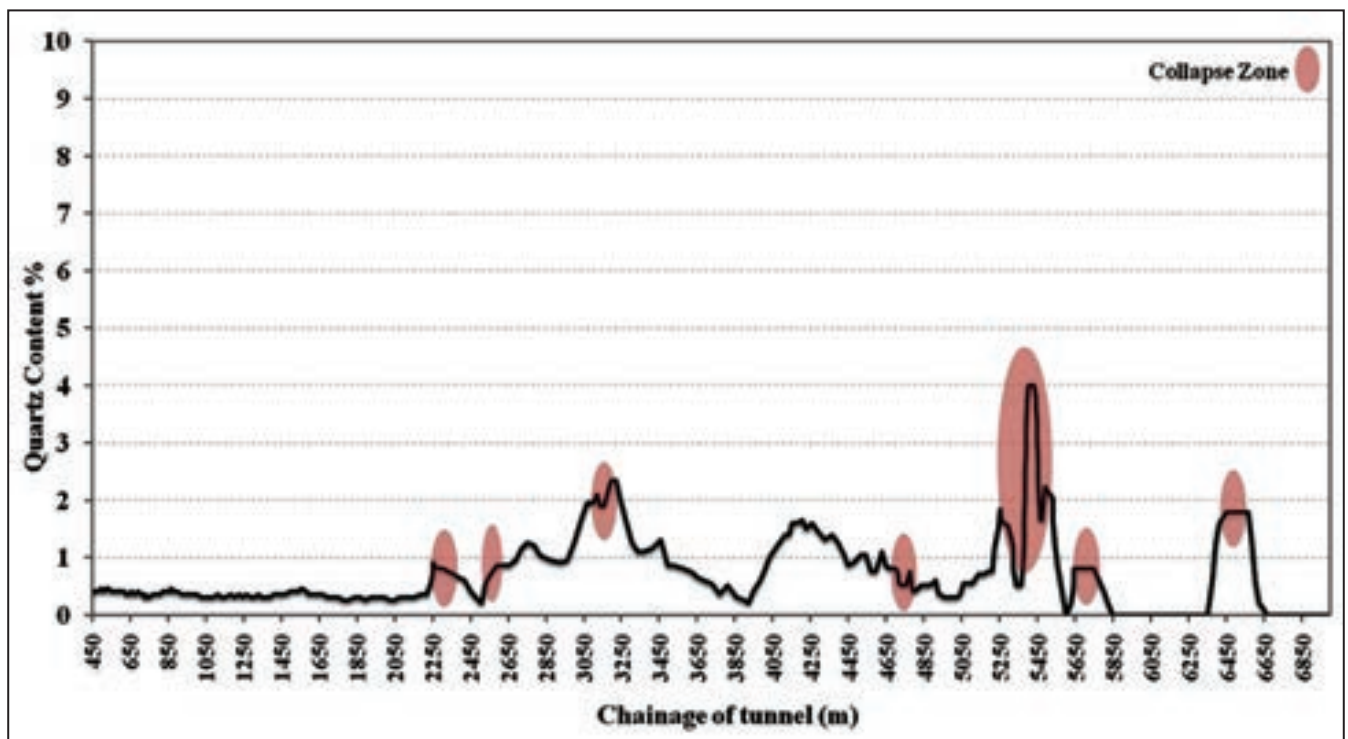
شکل ۴- مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از ۳ نمونه شیست مربوط به محدوده کیلومترهای ۲۲۵۵ و ۲۵۳۶ و ۵۶۳۵، مستعد برای پدیده لهیدگی از دید کانی شناسی.



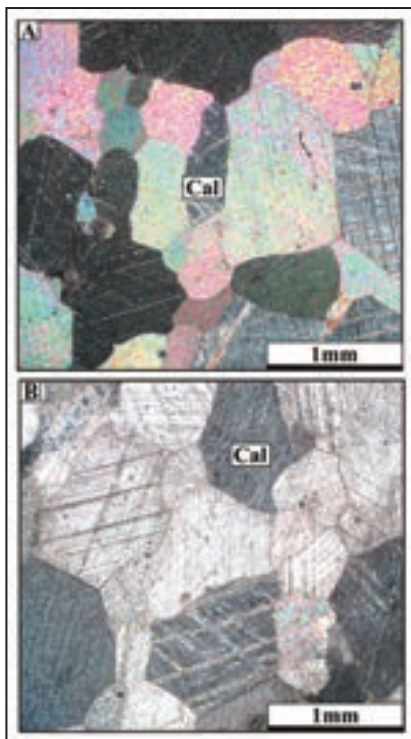
شکل ۵- مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از ۲ نمونه اسلیت مربوط به محدوده کیلومترهای ۵۲۳۵ و ۵۲۸۴، مستعد برای پدیده لهیدگی از دید کانی شناسی.



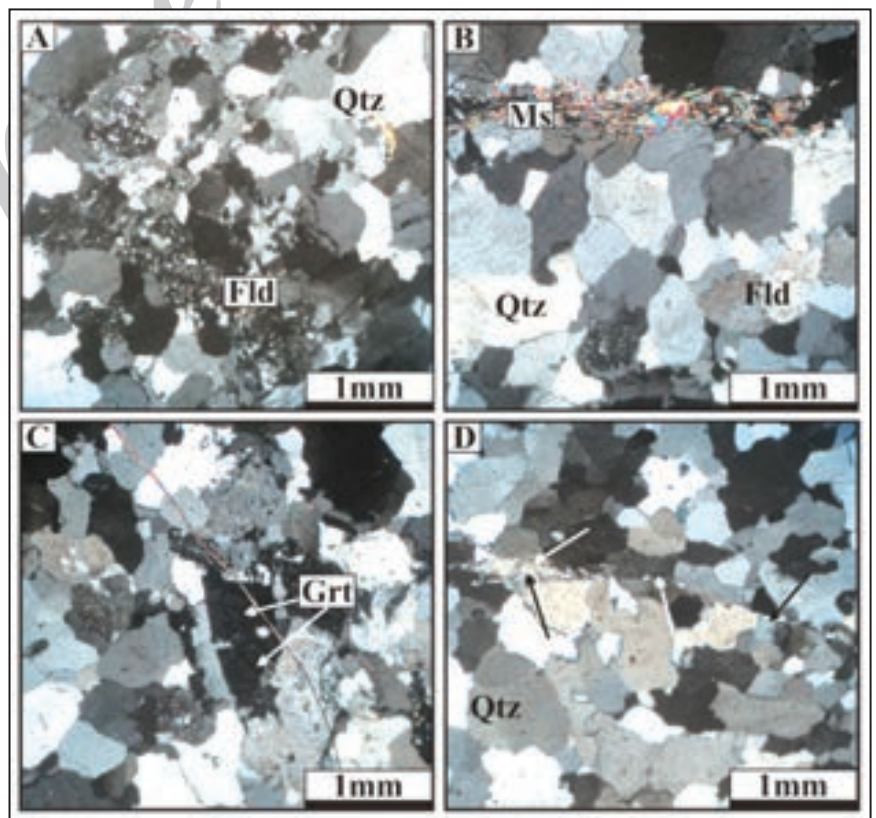
شکل ۶- مقاطع میکروسکوپی تهیه شده از ۲ نمونه گرافیت شیست مربوط به محدوده کیلومترهای ۴۶۷۲ و ۴۷۱۴، مستعد برای پدیده لهیدگی از دید کانی شناسی.



شکل ۷- درصد میزان کوارتز موجود در مواد استخراج شده در مسیر حفاری تونل (Zolfaghari et al., 2011).

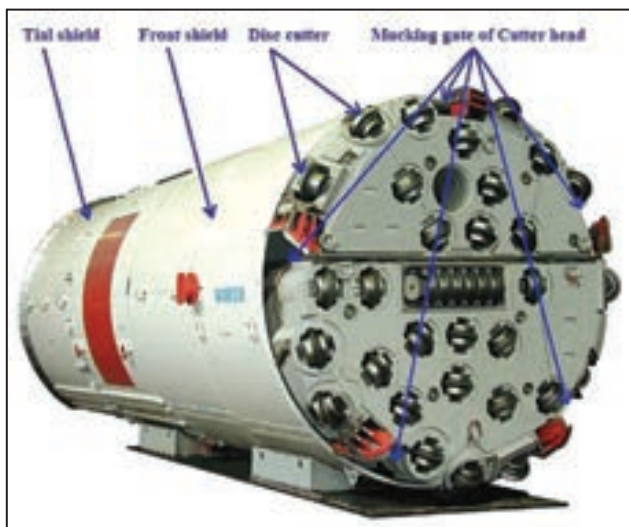


شکل ۹- مقطع میکروسکوپی یک نمونه کلسیت متبلور در مواد حفاری شده مربوط به محدوده کیلومتر ۵۲۶۰.



شکل ۸- مقاطع میکروسکوپی ۲ نمونه کوارتزیت در مواد حفاری شده مربوط به محدوده کیلومترهای ۳۲۱۷ و ۵۲۰۵، با درجه بالای قفل‌شدگی کانی‌ها.





شکل ۱۱- تی بی ام تلسکوپی قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود (قطر حفاری: ۴/۵۳ متر).



شکل ۱۰- اندازه قطعات کوارتز و کلسیت در مواد استخراج شده.

جدول ۱- توصیف سنگ‌شناسی مسیر قطعه‌های ۳ و ۴ تونل قمرود (SCE, 2005).

سن سازند	بیشینه روباره (متر)	ویژگی‌ها	سنگ‌شناسی	گونه زمین‌شناسی مهندسی	گونه سنگ‌شناسی
کرتاسه	۶۰۰	توده‌ای	آهک‌های مقاوم میکربیتی که در بخش‌هایی دولومیتی شده‌اند	a	KI
	۶۰۰	متورق یا نیمه‌متورق		b	
	۶۰۰	نازک تا متوسط لایه	آهک‌های رسی - ماسه‌ای و آهک‌های اریتولین دار	KII	
	۶۰۰	پهنه خرد شده با پهنای ۳۰ تا ۵۰ متر	واحدهای آهکی	KIII	
ژوراسیک	۳۵۰	مقاوم با دانه‌های کوارتز	ماسه سنگ	a	JI
	۳۵۰	دارای شیبستوزیته	شیل و اسلیت	b	
	۲۰۰	شیبستوزیته توسعه یافته	گرافیت شیبست	a	JII
	۲۰۰	دارای شیبستوزیته	کوارتز شیبست	b	
	۲۰۰	به صورت رگه‌هایی با ضخامت متغیر	کوارتزیت	c	
	۴۵۰	پهنه خرد شده با پهنای کمتر از ۲۵ متر	واحدهای دگرگون و نیمه‌دگرگون	JIII	

جدول ۲- رده‌بندی‌های ساینده‌گی بر پایه آزمایش سورشار.

رده	اندیس سایش سورشار CAI	توصیف ساینده‌گی (معماریان و همکاران، ۱۳۸۲)	توصیف ساینده‌گی (Cerchar, 1973)	توصیف ساینده‌گی (Michalakopoulos et al., 2006)	توصیف ساینده‌گی (Mathier & Gisiger, 2003)
۱	> ۶	بسیار ساینده	کوارتز	-	کوارتز
۲	۴ - ۶	خیلی ساینده	فوق‌العاده ساینده	فوق‌العاده ساینده	بی‌نهایت ساینده
۳	۲ - ۴	ساینده	بسیار ساینده	بسیار ساینده	خیلی ساینده
۴	۱ - ۲	نیمه ساینده	سایش متوسط تا ساینده	سایش متوسط	ساینده
۵	۰/۵ - ۱	کم ساینده	کمی ساینده	کمی ساینده	ساینده‌گی متوسط
۶	۰/۳ - ۰/۵	غیر ساینده	نه چندان ساینده	سایش بسیار کم	کمی ساینده
۷	< ۰/۳	-	-	-	غیر ساینده

جدول ۳- نتایج آزمایش سورشار روی نمونه‌های کوارتزیت، شیست و اسلیت.

مقدار CAI	میانگین قطرها	پین ۵		پین ۴		پین ۳		پین ۲		پین ۱		سنگ شناسی					
		نوع	قطر ۲	قطر ۱	نوع	قطر ۲	قطر ۱	نوع	قطر ۲	قطر ۱	نوع		قطر ۲	قطر ۱			
۷/۲۸۴	۱۲۵/۶	مسطح- گرد	۱۲۲	۱۲۱	مسطح- گرد	۱۲۸	۱۳۵	مسطح- بیضوی	۱۴۲	۱۲۷	مسطح- گرد	۱۲۲	۱۴۳	مسطح- گرد	۱۰۶	۱۱۰	کوارتزیت
۲/۶۲۱	۴۵/۲	مسطح- گرد	۲۱	۲۰	مسطح- گرد	۲۷	۲۵	مسطح- گرد	۴۵	۵۵	مسطح- بیضوی	۵۷	۸۰	مسطح- بیضوی	۷۰	۵۲	شیست
۲/۷۲۶	۴۷	مسطح- نامنظم	۲۵	۱۴	مسطح- بیضوی	۵۱	۸۲	نامنظم- بیضوی	۴۰	۳۰	مسطح- گرد	۳۸	۳۶	مسطح- گرد	۷۹	۷۵	اسلیت

\* بر اساس خط کش مندرج میکروسکوپ، هر واحد قطر مساوی است با: ۰/۰۰۵۸ میلی‌متر. شاخص سورشار برابر است با: میانگین قطرها ضرب در عدد ۰/۰۰۵۸ ضرب در عدد ۱۰.

جدول ۴- شرایط زمین‌شناسی و موقعیت‌های توقف تی‌بی‌ام قمرود در اثر پدیده لهیدگی (SCE, 2006).

ردیف	متراز	سنگ‌شناسی	مقاومت فشاری (Mpa)	ارتفاع روباره (m)	مقدار همگرایی (cm)	وضعیت کله حفار	وضعیت سبر	شرایط آب زیرزمینی	مدت توقف (روز)
۱	۲۲۵۵	شیست-اسلیت	۱۵-۵۰	۵۰۰	۱۱-۱۵	آزاد	درگیر	خشک	۱۳
۲	۲۵۳۶	شیست- ماسه‌سنگ	۳۰-۶۰	۳۹۰	۶-۱۰	آزاد	درگیر	خیس	۵
۳	۴۶۷۲	گرافیت‌شیست، اسلیت، رگه‌های کوارتزی	۲۵-۳۰	۴۳۰	۱۰-۱۵	آزاد	درگیر	خشک	۱۲
۴	۴۷۱۴	گرافیت‌شیست، رگه‌های کوارتزی	۲۵-۳۰	۴۵۰	۱۰-۱۵	آزاد	درگیر	خشک تا نمناک	۵
۵	۵۲۳۵	اسلیت، گرافیت‌شیست، رگه‌های کوارتزی	۴۰-۵۵	۳۷۵	۱۱	درگیر	درگیر	خیس تا قطره‌ای	۲۸
۶	۵۲۶۰	ماسه‌سنگ، میان‌لایه‌های بسیار نازک گرافیت، اسلیت، رگه‌های کوارتز و رگه‌های کلسیت	۵۰-۶۰	۳۸۵	۱۱	درگیر	درگیر	قطره‌ای تا جریانی	۳۶
۷	۵۳۱۰	ماسه‌سنگ، میان‌لایه‌های بسیار نازک گرافیت، اسلیت	۴۰-۷۰	۳۹۰	۱۰-۱۵	آزاد	درگیر	قطره‌ای	۲۰
۸	۵۳۸۴	اسلیت و لایه‌های گرافیت‌شیست و ماسه‌سنگ و رگه‌های ضخیم کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	درگیر	قطره‌ای تا جریانی	۱۸
۹	۵۴۶۶/۲۹۵	اسلیت و تناوب ماسه‌سنگ شیست و رگه‌های نازک کوارتز همراه میلویت	۴۵-۶۰	۳۸۷	۱۲	آزاد	درگیر	قطره‌ای	۷
۱۰	۵۶۳۵/۴۶۲	ماسه‌سنگ، اسلیت، شیست و رگه‌های کوارتز همراه با لمس صابونی	۴۵-۶۰	۳۶۵	۱۲-۱۰	آزاد- در انتهای روز دهم درگیر	درگیر	نمناک تا قطره‌ای	۱۴

جدول ۵- رده‌بندی رفتار فشارندگی در سنگ‌شناسی‌های مختلف بر پایه همگرایی‌سنجی‌های انجام شده در مسیر پیشروی تی‌بی‌ام (Farrokh &amp; Rostami, 2009).

سنگ‌شناسی در امتداد تونل	واحدهای کربناتی (آهک و دولومیت)	پهنه‌های برشی در واحدهای کربناتی	واحدهای غیر کربناتی (شیست، اسلیت، شیل، ماسه‌سنگ، گرافیت‌شیست، کوارتز و کوارتزیت)	پهنه‌های برشی در واحدهای غیر کربناتی	جمع
متراژ بخش (درصد)	۱۱۲۵ (۶/۴)	۱۳۵ (۰/۸)	۱۵۸۷۵ (۹۰/۳)	۴۴۵ (۲/۵)	۱۷۵۸۰ (۱۰۰)
متراژ بخش با رفتار غیر فشارنده (درصد)	۱۰۷۹ (۶/۱۵)	۱۳۰ (۰/۷۵)	۸۹۷۰ (۵۱)	۲۳۷ (۱/۳۵)	۱۰۴۱۶ (۵۹/۲۵)
متراژ بخش با رفتار فشارندگی کم (درصد)	۲۸/۵ (۰/۱۶)	۳ (۰/۰۲)	۵۲۸۵/۵ (۳۰)	۱۷۳ (۱)	۵۴۹۰ (۳۱/۲۳)
متراژ بخش با رفتار فشارندگی شدید (درصد)	۱۷/۵ (۰/۱)	۲ (۰/۰۱)	۱۶۱۷/۵ (۹/۲)	۳۵ (۰/۲)	۱۶۷۲ (۹/۵۱)

جدول ۶- شرایط زمین‌شناسی و موقعیت‌های توقف تی‌بی‌ام قمرود در اثر پدیده ریزش (SCE, 2006).

ردیف	متراز	سنگ‌شناسی	مقاومت فشاری (Mpa)	ارتفاع روباره (m)	مقدار همگرایی (cm)	وضعیت کله حفار	وضعیت سپر	شرایط آب زیرزمینی	مدت توقف (روز)
۱	۳۱۴۴	شیست	۱۵-۵۰	۳۵۰	۶-۸	درگیر	نیمه آزاد	خشک	۲۱
۲	۳۲۱۷	گرافیت‌شیست، رگه‌های کوارتزی	۲۰-۳۵	۳۳۰	۶-۸	درگیر	آزاد	خشک	۵۳
۳	۵۲۰۵	گرافیت‌شیست، اسلیت، رگه‌های کوارتزی	۲۵-۴۰	۳۷۵	۵-۸	درگیر	آزاد	نمناک تا قطره‌ای	۲۰
۴	۵۳۱۴	ماسه‌سنگ، میان لایه‌های بسیار نازک گرافیت، اسلیت	۴۰-۷۰	۳۹۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۴۴
۵	۵۳۲۲	ماسه‌سنگ، میان لایه‌های بسیار نازک گرافیت، اسلیت	۴۰-۷۰	۳۹۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای تا جریانی	۴۶
۶	۵۳۲۲/۹	اسلیت و میان لایه‌های نازک گرافیت‌شیست، رگه‌های کوارتزی	۴۰-۷۰	۳۹۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای تا جریانی	۴
۷	۵۳۲۴/۱	اسلیت و میان لایه‌های نازک گرافیت‌شیست، رگه‌های کوارتزی	۴۰-۷۰	۳۹۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای تا جریان	۱۱
۸	۵۳۲۸/۹	اسلیت و لایه‌های گرافیت‌شیست، ماسه‌سنگ، رگه‌های کوارتزی	۴۰-۷۰	۳۸۵	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای تا جریانی	۷
۹	۵۳۸۵/۵	اسلیت و لایه‌های گرافیت‌شیست، ماسه‌سنگ، رگه‌های ضخیم کوارتزی	۴۵-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای تا جریانی	۲
۱۰	۵۳۸۷/۲	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۲
۱۱	۵۳۸۹/۸	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۷
۱۲	۵۳۹۵/۲۵	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۳
۱۳	۵۴۰۰/۱	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۰
۱۴	۵۴۰۵/۶۸۷	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۳
۱۵	۵۴۰۷/۷۰۴	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۴
۱۶	۵۴۰۸/۷۰۴	اسلیت و رگه‌های کوارتز	۴۰-۷۰	۳۸۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۱
۱۷	۵۴۱۱/۰۷۱	اسلیت و رگه‌های کوارتز						قطره‌ای	۳
۱۸	۵۴۱۳/۸۷۲	اسلیت و رگه‌های کوارتز						قطره‌ای	۶
۱۹	۵۴۲۲/۸۵۶	اسلیت و رگه‌های کوارتز						قطره‌ای	۳۳
۲۰	۵۴۲۷/۹۴۱	اسلیت و رگه‌های کوارتز						قطره‌ای	۶
۲۱	۵۴۴۲/۳۴۱	اسلیت و رگه‌های کوارتز						قطره‌ای	۱۳۱
۲۲	۵۴۵۱/۶۲۷	اسلیت و تناوب ماسه‌سنگ، شیست و رگه‌های نازک کوارتز همراه میلونیت	۴۰-۵۰	۳۷۹	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۷
۲۳	۵۴۵۵/۴۳۸	اسلیت و تناوب ماسه‌سنگ، شیست و رگه‌های نازک کوارتز همراه میلونیت	۴۰-۵۰	۳۷۹	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۲
۲۴	۵۴۸۹/۹۱۳	اسلیت و تناوب ماسه‌سنگ، شیست و رگه‌های نازک کوارتز همراه میلونیت	۴۰-۵۰	۳۷۵	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۲
۲۵	۶۳۳۸/۹۵۰	اسلیت-ماسه‌سنگ	۴۵-۶۰	۳۶۰	-	درگیر	آزاد	قطره‌ای	۸

### کتابنگاری

- اجل لوییان، ر. و محمدی، س. د.، ۱۳۸۲- رده‌بندی توده‌سنگ روشی کاربردی در مهندسی عمران، ترجمه کتاب: Rock Mass Classification: "A Practical Approach in Civil Engineering" نوشته Singh, B. & Goel, R. K., 1999، انتشارات فن آوران همدان، چاپ اول، ۳۴۹ ص.
- باقریان، س.، ۱۳۸۵- بازنگری در مدیریت توزیع انتقال آب طرح قمرود جهت رفع نیازهای شهرستان الیگودرز، نخستین همایش منطقه‌ای آب، دانشگاه آزاد بهبهان.
- جودکی، و. و اجل لوییان، ر.، ۱۳۹۰- چالش‌های اصلی احداث تونل انتقال آب قمرود، دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، زنجان.
- جودکی، و. و اجل لوییان، ر.، ۱۳۹۲- تأثیر پایان‌نامه‌های دانشجویی در جهت رشد صنعت تونل‌سازی (مطالعه موردی: تونل بلند قمرود)، فصلنامه صنعت و دانشگاه، سال ششم، شماره ۱۹ و ۲۰، صص ۵۹ تا ۸۰.
- جودکی، و.، ۱۳۹۱- بازنگری ژئوتکنیکی قطعه ۳ و ۴ مسیر تونل انتقال آب قمرود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان.
- فرخ، ا.، ۱۳۸۲- ارزیابی همگرایی تونل انتقال آب قمرود و تأثیر آن بر عملکرد ماشین حفاری TBM با روش تحلیل عددی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گرایش مهندسی استخراج معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.
- معماریان، ح.، معماری اتر آبادی، ح. و نجفی، ع.، ۱۳۸۲- انتخاب سرهمه‌های ماسه مغزه گیر برای حفاری‌های ژئوتکنیکی ایران، ششمین کنفرانس ملی تونل، دانشگاه علم و صنعت ایران.

## References

- Amberg, F., 2001- Gotthard base tunnel, TBM heading equipment, Progress in Tunneling After 2000, AITESITA, World Tunnel Congress, Milano, June 10-13, 2001.
- ASTM G75-01, 2001- ASTM G75-01 Standard Test Method for determination of slurry abrasivity (Miller number) and slurry abrasion response of materials (SAR number), Sep 2001.
- Barla, G. & Pelizza, S., 2000- TBM tunnelling in difficult ground conditions, In: Proceedings of GeoEng 2000 – Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, November 19–24, 2000. Technomic Publishing Company, Lancaster: 329–354.
- Barla, G., 1995- Squeezing rocks in tunnels, ISRM News Journal, Vol. 2 (3&4):44-49.
- Barla, G., 2000- Lessons Learnt from the excavation of a large diameter TBM tunnel in complex hydrogeological conditions, International Conference on Geotechnical & Geological Engineering Melbourne, Australia, 19-24 November 2000.
- Cerchar, 1973- Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks, Centre Study Research, French Coal Industry, Document 59-73: 1-10.
- Farrokh, E. & Rostami, J., 2009- Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24 (4): 436–446.
- Farrokh, E., Mortazavi, A. & Shamsi, G., 2006- Evaluation of ground convergence and squeezing potential in the TBM driven Ghomroud tunnel project, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21 (5): 504–510.
- Finnsson, S., 2001- Two tunnel boring machines for Lesotho: A design and case study, Progress in Tunneling After 2000, AITES-ITA, World Tunnel Congress. Tunnelling and Underground Space Technology Volume 15, Issue 1, January-March 2000: 49-54.
- Grandori, R., Gager, M., Antonini, F. & Vigne, A., 1995- Evinos-Mornos tunnel – Greece, In: Proceedings of the Rapid Excavation & Tunnelling Conference, Chapter 47: 747–767.
- Guetter, W. & Weber, W., 2001- Two tunnels in totally different geological formations, In: Proceedings of the Rapid Excavation & Tunnelling Conference, Chapter 21: 241–260.
- Hoek, E., Marinos, P. & Benissi, M., 1998- Applicability of the Geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation, Bulletin of Engineering Geology and Environment, Vol. 57 (2):151-160.
- Kolymbas, D., 2005- Tunnelling And Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunneling, Springer-Verlag, 263 pp.
- Lien, R., 1961- An indirect test method for estimating the drillability of rocks, Dr. thesis, NTH Dept. of Geology, 90 p.
- Lovat, R. P., 2000- Cleuson Dixence Penstock Tunnel, AITES – ITA World Tunnel Congress, Durban, South African, Vol. 24: 611–614.
- Marinos, P. G., 1998- TBM excavation in weak rock heterogeneous rock masses for the Athens Metro, Journal of Bulletin of Engineering Geology and Environment, Springer Berlin / Heidelberg, Vol.57: 151-160.
- Mathier, J. F. & Gisiger, J. P., 2003- Abrasivity of Icelandic basalts, ISRM Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, 809-811.
- Michalakopoulos, T., Anagnostou, V., Bassanou, M. & Panagiotou, G., 2006- The influence of steel styli hardness on the Cerchar abrasiveness index value, in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43 (2): 321-327.
- SCE (Sahel Consultant Engineers), 2005- Geological and Engineering Geological Review of Ghomroud Water Conveyance Tunnel (Parts III & IV).
- SCE (Sahel Consultant Engineers), 2006- Summary Report on Adverse Geology Situations in Tunnel Driven Path, Ghomroud Water Conveyance Tunnel (Parts III & IV), SHL 2019 UNGR MTUN RM RP 003 DO.
- Shang, Y., Xue, J., Wang, S., Yang, Z. & Yang, J., 2004- A case history of tunnel boring machine jamming in an interlayer shear zone at the yellow river diversion project in China, Engineering Geology, Vol. 71 (3-4): 199-211.
- Shrestha, G. L., 2005- Stress induced problems in Himalayan tunnels with special reference to squeezing, Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Sorby, H. C., 1880- On the structure and origin of non-calcareous stratified rock, Proc. Geol. Soc. London, V. 36, p. 62-64.
- Tseng, D., Tsai, B. & 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.
- Young, B. B. & Millmann, A. P., 1964- Microhardness and deformation characteristics of ore minerals, Trans. Inst. Min. Metal, Vol. 73: 437-466.
- Zolfaghari, M., Mokhtari, E. & Morsali, M., 2011- Geological evidences of collapse zones in TBM tunneling: a case study of Ghomroud water conveyance tunnel, IRAN, Proc. First Asian and 9th Iranian tunneling Symposium, Tehran, Iran, ATS11-02113.

## The Role of Geological Conditions and Petrology of Formations on Excavation Hazards (Case Study of Ghomroud Tunnel)

V. Joudaki <sup>1\*</sup> & R. Ajalloeian <sup>2</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Department of Geotechnics, Haraz Rah Consultant Engineers Co., Tehran, Iran

<sup>2</sup>Professor, Department of Engineering Geology, Isfahan University, Isfahan, Iran

Received: 2013 January 27

Accepted: 2015 March 01

### Abstract

In the present case study, a thick overburden above the Ghomroud tunnel locally reaching about 600 meters plus the existence of many fault/crushed zones along the tunnel led the full-face Tunnel Boring Machine (TBM) to encounter squeezing and collapsing of materials. In parts 3 and 4 of the tunnel, a combination of these problems caused long-term and frequent pausing in digging processes (about 600 days). The plan is situated in the Sanandaj-Sirjan geological zone. Because of intense tectonic deformations through time, this zone consists of series of rock units, which have experienced moderate to high metamorphisms that caused schistosity and recrystallization of minerals. In the present paper, in addition to preparing thin sections of rocks for microscopic studies, the role of geological conditions with an emphasis on formation petrology is investigated to explore excavation hazards along the tunnel. Hence, by traversing along the axis of the tunnel, several samples were taken from the rocks exposed on surface and from those in the tunnel. Most problems occur in the foliated Jurassic rock units and in sections where faults and relatively thick tunnel overburden (high in-situ stress) have made the geological condition unfavorable. Results show that the petrological properties (texture, mineralogy, etc.) of the extensively foliated rock masses (schist, slate, graphite schist) and their interbedding with strong units (Quartz and quartzite veins) along with other geological factors have been effective on the occurrence of hazards and TBM pausing. Results of Cerchar abrasiveness index test also indicate high hardness and strength of quartzite veins, which played an important role in creating mixed face conditions and amplifying the hazards in easily squeezing and collapsing materials.

**Keywords:** Tunnel Boring Machine (TBM), Petrology, Squeezing, Collapsing, Thin Sections, Cerchar, Mixed Face Condition  
For Persian Version see pages 151 to 162

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

Archive of SQU