

تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی توده‌های سنگی در ارزیابی پایداری تونل کلات

محمد غفوری و صادق طریق ازلی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد

mghafoori@science1.um.ac.ir

sazali@science1.um.ac.ir

(دریافت: ۸۳/۵/۲۲؛ پذیرش: ۸۳/۱۱/۱۹)

چکیده

تونل کلات در انتهای راه آسفالتی مشهد به کلات در قسمت شمال شرقی ناودیس کلات به طول ۷۲۵ متر در سال ۱۳۶۷ بطور ناقص احداث شده است. در طی حفاری تونل به علت شرایط ساختاری بخشهایی از آن ریزش کرده است. مسیر تونل عمدتاً از میان سنگ های ماسه سنگی، آهکی و مارنی کرتاسه فوقانی عبور می کند. هدف از این مقاله، بررسی تاثیر خصوصیات ژئومکانیکی و ویژگیهای ساختاری توده های سنگی مسیر تونل کلات در ارزیابی پایداری آن جهت تعریض می باشد. برآورد خصوصیات کمی و کیفی توده سنگ در برگیرنده تونل و رده بندی مهندسی آن با استفاده از سیستم های طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) و شاخص کیفی تونل سازی در سنگ (Q) انجام شده است. به منظور تخمین پارامترهای مقاومتی توده سنگی (مانند مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته توده سنگ و ثابت های هوک - بران) از معیار تجربی هوک - بران استفاده گردید. همچنین با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی برای ارزیابی پایداری تونل جهت تعریض آن، روش عددی اجزا محدود بکار گرفته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاطع یک و سه بترتیب دارای بهترین و بدترین شرایط از نظر پایداری می باشند. برای انتخاب سیستم نگهدارنده مقاطع مختلف تونل در هنگام تعریض از شاخص های (RMR) و (Q) نیز استفاده شده است.

واژه های کلیدی: تونل کلات، شاخص مقاومت زمین شناسی، تحلیل عددی، خصوصیات مقاومتی توده سنگ.

۱- مقدمه

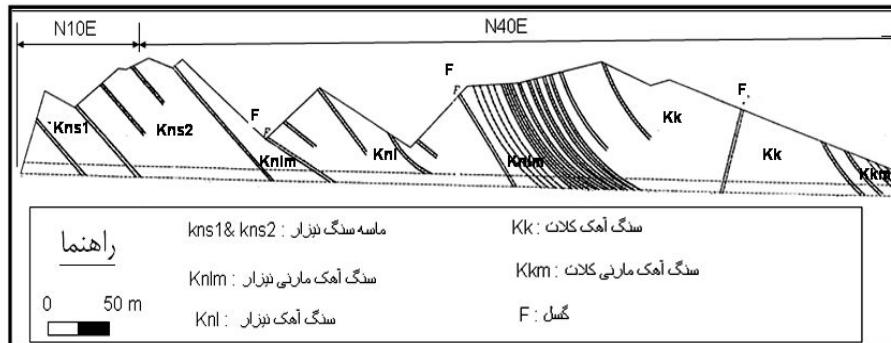
راه آسفالته مشهد به کلات نادر به طول حدود ۱۴۵ کیلومتر از مناطق کوهستانی رشته کوههای کپه داغ می‌گذرد. قسمت انتهایی این راه از دامنه شمال شرقی کوه کلات از تونلی به نام تونل کلات عبور می‌نماید. این تونل ۷۲۵ متر طول دارد که ۱۲۵ متر ابتدایی آن، قوس دار بوده و بقیه ۶۰۰ متر آن به طرف شهر کلات امتدادی مستقیم دارد. حدود ۱۰۰ متر ابتدایی تونل از دهانه ورودی کاربری دو خطه داشته و دارای مقطع نسبتاً کامل با عرض حدود ۱۰.۴ متر و ارتفاع نهایی ۶ متر نسبت به کف تونل است. از ۱۰۰ متر به بعد به طرف شهر کلات عرض تونل کاهش یافته و به حدود ۶ متر می‌رسد که دارای کاربری یک خطه بوده و تا انتهای آن ادامه دارد. شیب طولی متوسط کف تونل حدود ۲/۵ درصد به طرف خروجی تونل یا شهرکلات است. یکی از اهداف اصلی یک طرح مهندسی از جمله تونل، تعیین مناسبترین و اقتصادی‌ترین سیستم نگهدارنده به همراه بهترین روش حفاری می‌باشد. در این میان ویژگیهای مهندسی توده‌های سنگی مانند ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته توده سنگی، نقش مهم و اساسی جهت تخمین ظرفیت باربری سیستم نگهدارنده و تحلیل پایداری توده‌های سنگی در برگیرنده تونل‌ها ایفا می‌نمایند. در بسیاری موارد، حتی یک خطای کوچک در تعیین ویژگیهای مقاومتی توده سنگی می‌تواند منجر به صرف هزینه و زمان اضافی در مرحله اجرای پروژه گردد. بدلیل وجود جاذبه‌های توریستی و سیاحتی شهر کلات و نزدیکی آن به کشور ترکمنستان رفت و آمد وسایل نقلیه در آینده افزایش خواهد یافت. بنابراین بخش یک خطه آن بایستی تعریض گردد. ارزیابی ویژگیهای ساختاری و تحلیل پایداری توده سنگهای در برگیرنده تونل، مهمترین مرحله از مطالعات اولیه جهت تعریض آن می‌باشد. لذا در این مقاله، ویژگیهای ساختاری و مقاومتی توده سنگی در مسیر تونل کلات مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته و جهت تحلیل پایداری آن در زمان تعریض نرم افزار (Phases)، که از روش اجزای محدود استفاده می‌کند، بکار گرفته شده است.

۲- زمین شناسی مسیر تونل

منطقه کلات از نظر زمین شناسی در حوضه رسوبی کپه داغ قرار گرفته است. تونل کلات در ناودیس کلات و در میان سازندهای نیزار و کلات با سن کرتاسه بالایی حفاری شده است (شکل ۱). سازند نیزار شامل سه واحد می‌باشد. واحد پایینی که ضخامت زیادی دارد و از ماسه سنگهای خاکستری متمایل به سبز همراه با میان لابه‌های نازک ماری و شیلی تشکیل شده و از متر ۰+۰۰۰ تا ۰+۰۹۵ قابل مشاهده است. واحد میانی از ماسه سنگهایی با ضخامت کمتر

تأثیر خصوصیات ژئومکانیکی توده‌های سنگی در ارزیابی پایداری تونل کلات ... ۲۸۵

تشکیل شده و از متر ۹۵+۰ تا ۱۹۷+۰ مشاهده می‌شود. واحد بالایی از آهکهای سفید رنگ به همراه میان لایه‌های مارنی تشکیل شده و از متر ۱۹۷+۰ تا ۴۷۷+۰ مسیر تونل را تشکیل می‌دهد. سازند کلات از متر ۴۷۷+۰ تا ۷۲۵+۰ در مسیر تونل گسترش داشته که از آهکهای با لایه‌بندی نامنظم به همراه با واحد مارنی تشکیل شده است.



شکل ۱- مقطع زمین شناسی تونل کلات

۳- ویژگیهای ساختاری توده سنگ در برگیرنده تونل

ناپیوستگی‌های توده سنگ در برگیرنده تونل شامل لایه بندی، درزه ها و گسلها می‌باشند. برای شناخت دقیقتر ویژگیهای ساختاری توده سنگ در برگیرنده تونل، هر یک از آنها در زیر مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- لایه‌بندی

بطور کلی جهت شیب لایه‌بندی به سمت شمال شرقی بوده و مقدار آن از ۳۰ تا ۴۵ درجه متغیر است. بجز ۱۰۰ متر نخست. در بقیه قسمتهای تونل، امتداد لایه‌بندی بر امتداد تونل تقریباً عمود است.

۳-۲- گسلها

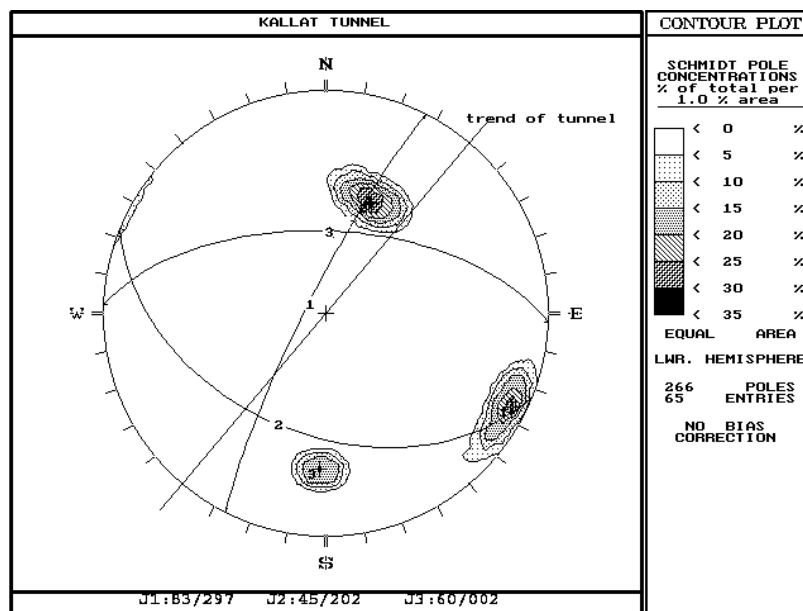
در طول مسیر تونل جابجایی‌های بین لایه‌ای زیادی قابل مشاهده می‌باشد. ولی در سه محل (متر ۲۵۰+، ۳۸۰+ و ۵۸۰+) توده‌های سنگی تحت تأثیر گسلهایی با شیب بیش از ۶۰ درجه قرار گرفته‌اند. گسلهای موجود در متر ۲۵۰ و ۳۸۰ دارای جهت شیب شمال شرقی و گسل واقع در متر ۵۸۰ دارای جهت شیب جنوب شرقی می‌باشد. در طی حفاریهای اولیه در زمان اجرای تونل، در محل گسلها ریزشهایی بوقوع پیوسته است. به علت تشکیل

فضایی بزرگتر از ابعاد اصلی تونل در حال حاضر از این فضاها به عنوان پارکینگ جهت توقف موقتی برای عبور ماشینهای مقابل به علت کم عرض بودن تونل استفاده می‌شود.

۳-۳- درزه‌ها

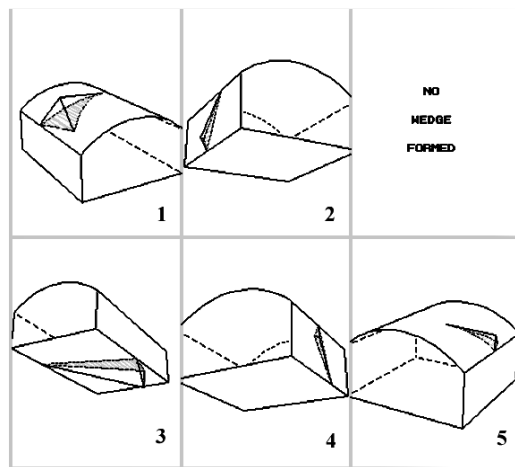
بررسی ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل جهت تعیین ویژگیهای مهندسی توده سنگی انجام شد. این بررسیها، بر اساس استاندارد ((ISRM (1981) و شامل شیب و جهت شیب، فاصله داری، بازشدگی، پرشدگی، زبری، گستردگی و شرایط آب زیر زمینی می‌باشند. با توجه به شرایط ذکر شده بطور کلی خصوصیات تعداد زیادی درزه در طول مسیر تونل برداشت گردید. با حذف درزه هایی که دارای شرایط مشابه بودند، تعداد ۲۶۶ درزه مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. تجزیه و تحلیل آماری این اطلاعات به کمک نرم افزار (DIPS 2) انجام شده است. سه دسته درزه غالب در طول مسیر تونل تشخیص داده شد، که مشخصات آنها در شکل ۲ نشان داده شده است. دسته‌های ناپیوستگی غالب در طول مسیر تونل عبارتند از:

(جهت شیب /شیب): (J1:83/29 ; J2:45/202 ; J3:60/002). این سه دسته درزه کم و بیش در سراسر مسیر تونل مشاهده می‌شوند. تنها اختلاف موجود بین درزه‌های هر دسته، مربوط به فاصله بین آنها می‌باشد.



شکل ۲- تصویر استریوگرافی ناپیوستگی‌ها در مسیر تونل.

همچنین با توجه به اینکه تونل موردنظر در توده سنگهای درزه‌دار و در عمق کم قرار دارد، لذا متداولترین نوع گسیختگی، سقوط گوه‌ها از سقف و یا لغزش بلوکهای منفرد از دیواره‌ها می‌باشد. این گوه‌ها در جاهایی که ناپیوستگی‌ها یکدیگر را قطع کرده‌اند، تشکیل می‌شوند. بنابراین یکی از مشکلات پایداری در زمان تعریض تونل، وجود لغزش یا ریزش گوه‌ها می‌باشد. لذا در این مقاله جهت بررسی هندسی سه بعدی گوه‌های محتمل از نرم افزار (UNWEDGE2.21) استفاده شده است. جهت یافتگی ناپیوستگی‌های غالب مهمترین داده ورودی در این برنامه می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده از نرم افزار (UNWEDGE) در زمان تعریض تونل، پنج گوه دارای پتانسیل تشکیل در توده سنگ‌های دربرگیرنده تونل می‌باشند. از بین آنها، همانطور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است، دو گوه در دیواره‌ها و دو گوه در سقف تونل دارای پتانسیل لغزش هستند.



شکل ۳- تشکیل گوه‌های محتمل در توده سنگهای دربرگیرنده تونل.

ویژگیهای تشکیل این گوه‌ها (مانند: عامل ایمنی، مکانیسم گسیختگی و وضعیت پایداری) در جدول ۱ ارائه شده است. شاخصی که بیش از همه در جدول ۱ دارای اهمیت است، ضریب اطمینان (S.F.) بوده که آن را می‌توان نسبت تمام نیروهایی که در برابر لغزش مقاومت می‌کنند به مجموع نیروهایی که باعث لغزش می‌شوند، دانست. بررسی تونل‌ها نشان داده است که جهت پایداری گوه‌ها، ضریب اطمینان در تونل حداقل باید برابر ۱.۵ باشد. بنابراین باتوجه به جدول ۱، به جز گوه شماره ۳ که در کف تونل تشکیل می‌شود، بقیه گوه‌ها (۱، ۲، ۴ و ۵) ضریب اطمینانی پایینتر از ۱ داشته و ناپایدار هستند.

جدول ۱- خصوصیات گوه های محتمل در توده سنگهای در بر گیرنده تونل.

| شماره گوه | موقعیت | ضریب اطمینان F.S. | مکانیسم گسیختگی | وضعیت پایداری |
|-----------|-------------|----------------------|-----------------|---------------|
| ۱ | سقف | ۰.۰۷ | لغزش بر روی J1 | ناپایدار |
| ۲ | دیواره چپ | ۰.۳۳ | لغزش بر روی J3 | ناپایدار |
| ۳ | کف | +INF | - | پایدار |
| ۴ | دیواره راست | ۰.۵۸ | لغزش بر روی J2 | ناپایدار |
| ۵ | سقف | ۰.۰۰ | ریزش | ناپایدار |

۴- طبقه بندی مهندسی توده سنگهای در بر گیرنده تونل

کیفیت توده سنگهای در بر گیرنده تونل کلات، با استفاده از سیستمهای طبقه بندی (RMR، GSI و Q) (شاخص مقاومت زمین شناسی) مورد ارزیابی قرار گرفته است. اولین گام در طبقه بندی مهندسی توده سنگ تقسیم بندی منطقه به نواحی مشابه دارای خصوصیات تقریباً یکسان می باشد. بر این اساس برای بررسی دقیقتر مسیر تونل با توجه به نوع لیتولوژی و ویژگیهای ساختاری به هفده قسمت تقسیم گردید.

۴-۱- طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)

برای تعیین (RMR) توده سنگهای مسیر تونل از طبقه بندی ارائه شده توسط بنیائوسکی در سال ۱۹۸۹ استفاده شده است (Bieniawski, 1989). مقدار (RMR) برای هر مقطع با توجه به خصوصیات توده سنگی تعیین شده است (جدول ۲). مقدار (RMR) بدست آمده در این مطالعه از ۳۰ (سنگهای خیلی ضعیف) تا ۶۰ (سنگهای نسبتاً خوب) تغییر می کند. بجز ۱۸۶ متر ابتدای مسیر تونل را که ماسه سنگهای نیزار با کیفیت نسبتاً خوب تشکیل می دهند، بقیه مسیر تونل در سنگهای با کیفیت ضعیف (۴۱ تا ۵۰) قرار می گیرد.

۴-۲- شاخص کیفی تونل بری (Q)

این شاخص توسط بارتون و همکاران بر مبنای ارزیابی حفریات زیرزمینی ارائه شده است (Barton et al., 1980). در این مطالعه مقدار Q در امتداد مسیر تونل (در هفده مقطع تعیین شده) مورد ارزیابی قرار گرفته، که نتایج بدست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می شود، مقدار Q (شاخص کیفی تونل بری) در کل مسیر تونل از ۰.۲۷ (سنگهای خیلی ضعیف) تا ۱۰ (سنگهای نسبتاً مناسب) تغییر می کند. مقاطع A_1 ، A_2 ، A_3 ، A_5 و A_{12} که ۳۲ درصد مسیر را تشکیل می دهند در رده سنگهای نسبتاً مناسب و مقاطع

دیگر که ۶۸ درصد مسیر تونل را تشکیل می‌دهند، در رده سنگ‌های ضعیف تا خیلی ضعیف قرار می‌گیرند.

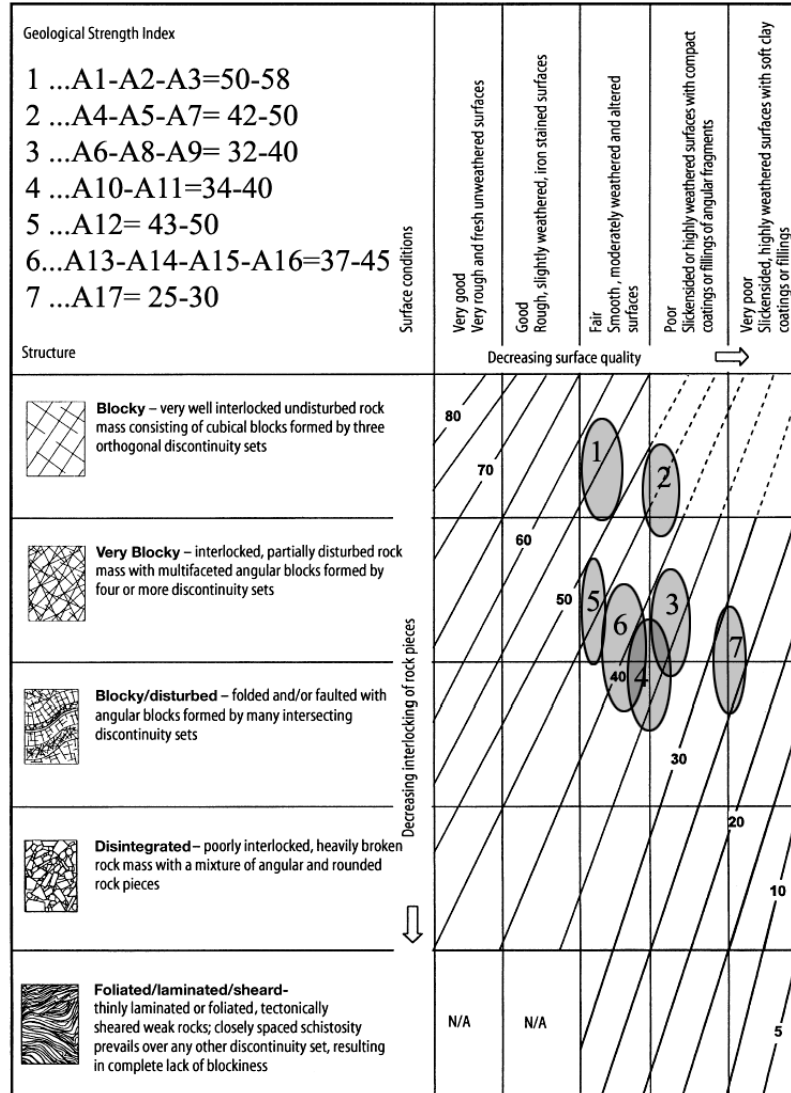
جدول ۲- خلاصه ای از نتایج طبقه بندی توده سنگ در مسیر تونل.

| RMR | | Q | | طول مقطع | سازند | لیتولوژی | متراز | مقطع |
|---------|--------|-----------|--------|----------|-------|----------|----------------|-----------------|
| رده | امتیاز | توصیف | امتیاز | | | | | |
| III | ۶۰ | fair | ۵ | ۲۲ | نیزار | ماسه سنگ | ۰+۲۲ تا ۰+۰۰ | A ₁ |
| III | ۶۰ | fair | ۱۰ | ۷۳ | نیزار | ماسه سنگ | ۰+۹۵ تا ۰+۲۲ | A ₂ |
| III | ۶۰ | fair | ۶ | ۹۱ | نیزار | ماسه سنگ | ۰+۱۸۶ تا ۰+۹۵ | A ₃ |
| III | ۶۰ | poor | ۲.۳ | ۳۴ | نیزار | ماسه سنگ | ۰+۲۲۰ تا ۰+۱۸۶ | A ₄ |
| III | ۵۵ | fair | ۵.۶ | ۲۳ | نیزار | مارن | ۰+۲۴۳ تا ۰+۲۲۰ | A ₅ |
| III | ۴۴ | poor | ۱.۸ | ۳۰ | نیزار | مارن | ۰+۲۷۳ تا ۰+۲۴۳ | A ₆ |
| III | ۵۰ | poor | ۱.۸ | ۲۵ | نیزار | سنگ آهک | ۰+۲۹۸ تا ۰+۲۷۳ | A ₇ |
| III- IV | ۴۱ | very poor | ۰.۸ | ۶۳ | نیزار | سنگ آهک | ۰+۳۶۱ تا ۰+۲۹۸ | A ₈ |
| III- IV | ۴۱ | very poor | ۰.۸ | ۵۶ | نیزار | سنگ آهک | ۰+۴۵۱ تا ۰+۳۶۱ | A ₉ |
| III | ۴۵ | poor | ۲.۱ | ۳۴ | نیزار | مارن | ۰+۴۵۱ تا ۰+۴۱۷ | A ₁₀ |
| III | ۴۵ | poor | ۲.۱ | ۲۶ | نیزار | مارن | ۰+۴۷۷ تا ۰+۴۵۱ | A ₁₁ |
| III | ۵۵ | fair | ۶.۶ | ۲۲ | کلات | سنگ آهک | ۰+۴۹۹ تا ۰+۴۷۷ | A ₁₂ |
| III | ۴۷ | poor | ۲.۶ | ۶۱ | کلات | سنگ آهک | ۰+۵۶۰ تا ۰+۴۹۹ | A ₁₃ |
| III | ۴۵ | poor | ۱.۳ | ۸ | کلات | سنگ آهک | ۰+۵۶۸ تا ۰+۵۶۰ | A ₁₄ |
| III | ۴۷ | poor | ۲.۶ | ۴۳ | کلات | سنگ آهک | ۰+۶۱۱ تا ۰+۵۶۸ | A ₁₅ |
| III | ۴۷ | poor | ۱.۳ | ۵۸ | کلات | سنگ آهک | ۰+۶۶۹ تا ۰+۶۱۱ | A ₁₆ |
| IV | ۳۰ | very poor | ۰.۳ | ۵۶ | کلات | مارن | ۰+۷۲۵ تا ۰+۶۶۹ | A ₁₇ |

۴-۳- شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI)

در این مقاله، خصوصیات توده‌های سنگی در مسیر تونل بر اساس شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) نیز طبقه‌بندی شده است. این روش برای برآورد کاهش مقاومت در شرایط مختلف زمین‌شناسی بوده که مقدار آن با مشاهدات صحرایی تعیین می‌گردد (Hoek et al., 1998). سیستم

(GSI) که بر اساس عامل ساختار توده سنگ و شرایط سطح درزه در برداشت صحرایی مشخص می‌گردد، شامل گروههایی است که در شکل ۴ نشان داده شده است. بر اساس بررسیهای بعمل آمده، توده‌های سنگی مسیر تونل بر اساس سیستم (GSI) در رده سنگهای بلوکی تا بسیار بلوکی قرار می‌گیرند و مقادیر (GSI) بدست آمده برای مقاطع مختلف تونل در (شکل ۴) ارائه شده است.



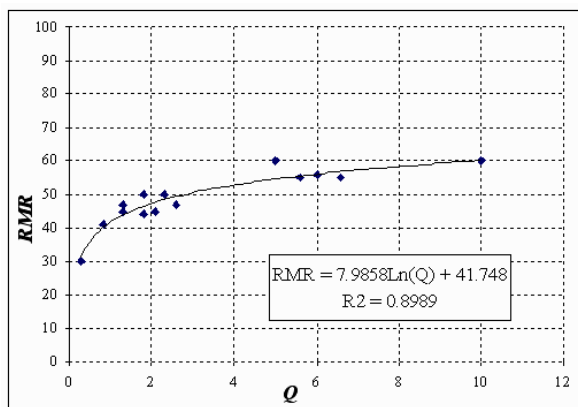
شکل ۴- طبقه‌بندی توده سنگ در مسیر تونل کلات بر اساس سیستم GSI (Hoek et al., 1998)

۴-۴- رابطه (Q) و (RMR)

در سالهای اخیر، مطالعات زیادی توسط محققین مختلف بر روی رابطه بین (Q) و (RMR) انجام شده، و در نتیجه، روابط بسیار متفاوتی نیز بدست آمده است. گول و همکارانش (Geol et al., 1995) این روابط را جمع آوری کرده و آنها را بر اساس ضریب رابطه (Correlation Coefficient) منظم نمودند. برخی از روابط مهم و متداول، و همچنین رابطه بدست آمده در این مطالعه در (جدول ۳) ارائه شده است. در شکل ۵ نیز نمودار بدست آمده در این مطالعه نشان داده شده است. داده‌های ورودی برای بدست آوردن این رابطه مقادیر (Q) و (RMR) بوده که در امتداد مسیر تونل (هفده مقطع) برآورد شده‌اند. همانطور که در (جدول ۳) مشاهده می‌شود، رابطه بدست آمده در این مطالعه به رابطه بنیاوسکی (Bieniawski, 1989) نزدیکتر می‌باشد. لازم به ذکر است که رابطه بدست آمده در این مقاله فقط در این منطقه و مناطق مشابه از نظر زمین‌شناسی قابل قبول است.

جدول ۳- روابط بین RMR و Q از محققین مختلف

| معادلات | محققین | ضریب رابطه (R ²) |
|--------------------|-----------------------------|------------------------------|
| RMR=7.9 lnQ + 41.7 | غفوری و ازلی (در این مقاله) | 0.89 |
| RMR=5.9 lnQ + 43 | Rutledge and Preston (1978) | 0.81 |
| RMR=9 lnQ + 44 | (Bieniawski, 1989) | 0.77 |
| RMR= 5 lnQ + 60.8 | Abad et al., (1984) | 0.66 |



شکل ۵- نمودار رابطه بدست آمده بین RMR و Q

۵- برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ

پارامترهای مقاومتی توده سنگ از قبیل، ثابتهای هوک- بران، مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک محوره توده سنگ از جمله مهمترین داده‌های ورودی در تحلیل پایداری تونلها می‌باشند. به این دلیل مطالعات بر روی تخمین پارامترهای مقاومتی توده سنگ در طی دهه گذشته افزایش یافته است. در همین راستا هوک و بران (Hoek and Brown, 1980) اولین بار معیار گسیختگی خود را در سال ۱۹۸۰، جهت برآورد داده‌های ورودی برای تحلیل و طراحی حفاریهای زیرزمینی در سنگ، ارائه نمودند. این معیار از نتایج تحقیقات بر روی گسیختگی سنگ بکر (توسط هوک) و مطالعات بر روی رفتار توده‌سنگهای درزه‌دار (توسط بران)، استنتاج شده است. در این مقاله جهت برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ‌های در برگیرنده تونل کلات از معیار هوک- بران (Hoek *et al.*, 2002) استفاده شده است. همچنین برای تخمین پارامترهای مقاومتی توده سنگ از (UCS)، مدول الاستیسیته سنگ بکر و دانسیته، بعنوان داده‌های ورودی در روابط هوک - بران استفاده شده، که مقادیر آنها برای سنگهای مختلف در (جدول ۴) ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمونهای آزمایشگاهی بر روی نمونه سنگ بکر

| لیتولوژی | چگالی (t/m^3) | UCS (MPa) | مدول الاستیسیته (GPa) | ثابت هوک- بران m_i |
|---------------------|----------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|
| ماسه سنگ | ۲/۵ | ۴۵-۷۰ | ۲۰ | ۱۹ |
| سنگ آهک نیزار | ۲/۷ | ۴۰-۵۰ | ۲۲ | ۱۴ |
| سنگ آهک مارنی نیزار | ۲/۶۵ | ۳۵ | ۱۴ | ۱۲ |
| سنگ آهک مارنی نیزار | ۲/۷ | ۴۰ | ۲۳ | ۱۴ |
| سنگ آهک مارنی کلات | ۲/۵ | ۳۰ | ۱۲ | ۹ |

۵-۱- برآورد فاکتور بهم ریختگی (D)

در طی سالهای گذشته یکی از موانع اصلی در تحلیلها و مدلسازی‌های عددی، مسئله برآورد خصوصیات مقاومتی توده‌های سنگی و نزدیک بودن آنها به شرایط واقعی بوده است. زیرا این پارامترها تأثیر مستقیمی بر روی نتایج حاصل از مدلسازی‌های عددی دارند. در طی یک دهه گذشته متداولترین رابطه برای برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ، معیار گسیختگی هوک - بران بوده که در بسیاری از

پروژه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی نیز ارائه گردیده است. ولی در طی این مدت گزارش‌هایی نیز درباره عدم موفقیت این معیار در بعضی از پروژه‌ها ارائه شده است. هوک و همکارانش در طی این سالها مطالعات زیادی جهت تعمیم این معیار با شرایط واقعی انجام داده‌اند و از سال ۱۹۸۰ تا کنون بارها آن را اصلاح کرده و تعمیم داده‌اند. ولی در آخرین تصحیح (Hoek et al., 2002) ضریبی به نام (D) را در روابط خود بکار بردند. ضریب (D) با توجه به شکلهای ارائه شده فاکتور بهم ریختگی توده‌های سنگی است که در معرض انفجار و یارهایی تنش قرار گرفته‌اند. از مقایسه توده سنگ‌های در برگزیده تونل با تونل‌های ارائه شده توسط هوک و همکاران، عدد (D) تخمین زده می‌شود. بنابراین با توجه به مطالب فوق، مطالعاتی بر روی توده سنگ‌های در برگزیده تونل کلات انجام شد. در طی این مطالعات مشخص گردید که انفجارهای حاصل از مرحله اول، بر روی توده سنگ‌های در برگزیده تونل کلات تأثیر منفی داشته و مقاومت آن را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش داده است. با بررسیهای صحرایی مشخص شد که عمق نفوذ و تأثیر انفجار در اطراف تونل بین ۱ تا ۱/۵ متر تغییر می‌کند. در ادامه جهت برآورد مقدار (D) بررسیهای صحرایی در طول مقطع حفاری شده تونل انجام شد. بر اساس این بررسیها، مقدار (D) برای توده سنگ‌های در برگزیده تونل تا شعاع ۱ متری از فضای حفاری شده برابر با ۰/۸ و برای توده سنگ‌هایی که در شعاع بیش از ۱ متر قرار دارند (در معرض زینهای حاصل از انفجار نیز قرار نگرفته‌اند) برابر با صفر برآورد شده است. بنابراین ویژگیهای مقاومتی توده سنگ برای مقاطع (A₃، A₁₃ و A₁₇) که در تحلیل عددی به عنوان داده‌های ورودی استفاده شده‌اند، بطور جداگانه محاسبه شده و به ترتیب در جداول (۵ و ۶) ارائه شده است.

جدول ۵- پارامترهای مقاومتی توده سنگ برای قسمتهایی که تحت تأثیر انفجار قرار نگرفته‌اند (D=0)

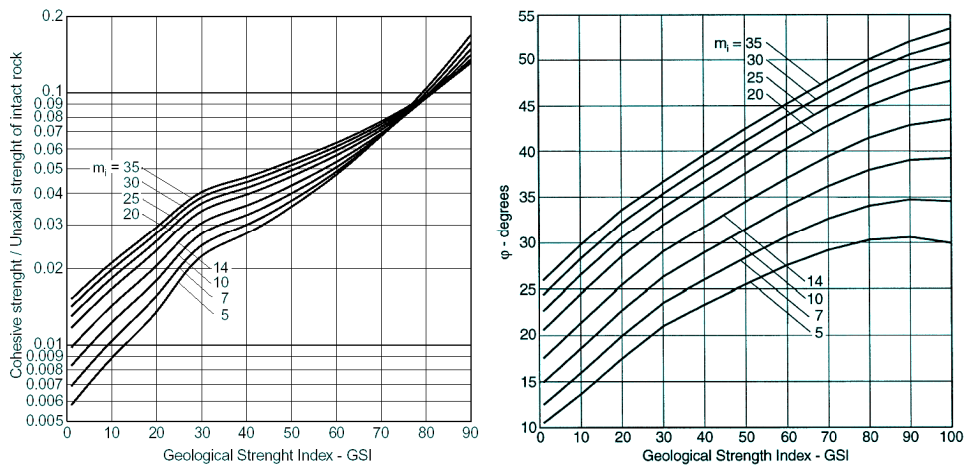
| مقاطع | σ_t (MPa) | σ_c (MPa) | E_m (GPa) | a | s | m_b |
|-----------------|------------------|------------------|-------------|-------|--------|-------|
| A ₃ | ۰/۰۵۰۹ | ۲/۸۷ | ۷/۱ | ۰/۵۰۵ | ۰/۰۰۴۳ | ۳/۳ |
| A ₁₃ | ۰/۰۳۶ | ۱/۵ | ۴ | ۰/۵۱۰ | ۰/۰۰۱۶ | ۱/۷۶ |
| A ₁₇ | ۰/۰۱۲ | ۰/۳۶ | ۱/۳ | ۰/۵۳۱ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۶۲ |

جدول ۶- پارامترهای مقاومتی توده سنگ برای قسمتهایی که تحت تأثیر انفجار قرار گرفته‌اند (D=0.8)

| مقاطع | σ_t (MPa) | σ_c (MPa) | E_m (GPa) | a | s | m_b |
|-----------------|------------------|------------------|-------------|-------|--------|-------|
| A ₃ | ۰/۰۲۶ | ۱/۱ | ۴/۳ | ۰/۵۰۵ | ۰/۰۰۰۶ | ۱/۰۳ |
| A ₁₃ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۴۵ | ۲/۴ | ۰/۵۱۰ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۴۴ |
| A ₁₇ | ۰/۰۰۳ | ۰/۰۷ | ۰/۸ | ۰/۵۳۱ | ۰/۰۰۰ | ۰/۱ |

۲-۵- برآورد زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و مقاومت چسبندگی (c) توده سنگ

در این مقاله جهت برآورد زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و مقاومت چسبندگی (c) که از جمله پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ می‌باشند از (شکل ۶) که توسط هوک و همکارانش که در سال ۱۹۹۸ ارائه گردیده (Hoek *et al.*, 1998)، استفاده شده است. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با وارد نمودن مقادیر (GSI) (شاخص مقاومت زمین‌شناسی)، (m_i) (ثابت ماده سنگ) و (σ_{ci}) (مقاومت فشاری ماده سنگ)، می‌توان مقدار (c) و (ϕ) را برآورد نمود. مقادیر بدست آمده (c و ϕ) برای توده سنگهای در برگیرنده تونل (در مقاطع مختلف) در (جدول ۷) ارائه شده است.



شکل ۶- رابطه بین زاویه اصطکاک (ϕ) و مقاومت چسبندگی (c) با شاخص مقاومت زمین‌شناسی (Hoek *et al.*, 1998 (GSI))

جدول ۷- مقادیر c و ϕ توده سنگ برای مقاطع مختلف

| A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 | A_9 | A_{10} | A_{11} | A_{12} | A_{13} | A_{14} | A_{15} | A_{16} | A_{17} | پارامتر |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
| ۳۸ | ۳۸ | ۳۷ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۱ | ۳۱ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۴ | ۳۳ | ۳۲ | ۳۳ | ۳۳ | ۲۴ | Φ |
| ۲۵ | ۲۵ | ۲۰ | ۱۳ | ۱۵ | ۱۵ | ۱۶ | ۱۴ | ۱۴ | ۱۲ | ۱۲ | ۱۷ | ۱۵ | ۱۴ | ۱۵ | ۱۵ | ۷ | $C \cdot 10^{-1}$ (MPa) |

۶- تحلیل عددی

در این مقاله به منظور ارزیابی پایداری توده سنگ در برگیرنده تونل کلات در زمان تعریض آن از برنامه کامپیوتری (Phases) نسخه ۲/۳۲ استفاده گردیده است. نرم افزار (Phases) از روشهای اجزای محدود (Finite element)، المان مرزی و هیبرید استفاده می‌کند و مسائل را بصورت دو بعدی حل می‌نماید. لازم به ذکر است که روش دو بعدی برای تونلهایی که قطر آنها نسبت به طولشان خیلی کوچک باشد، مناسب است. لذا در تونل مورد نظر این شرایط برقرار می‌باشد. همچنین سه مقطع در کل امتداد تونل مورد تحلیل پایداری قرار گرفتند. این سه مقطع به ترتیب در مقاطع (A_3 ، A_{13} و A_{17}) و در سنگهای مختلف انتخاب شده‌اند. برای تحلیل پایداری توده سنگ‌های در برگیرنده این مقاطع از ویژگیهای مقاومتی مندرج در جداول ۵ و ۶ به عنوان داده‌های ورودی استفاده شده است.

تنش برجا در مهندسی سازه‌های زیرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است و شامل تنش های قائم و افقی می‌باشد. میزان تنش قائم (σ_v) در توده سنگی مسیر تونل توسط وزن مواد و مصالح روباره با توجه به ارتفاع روباره و دانسیته مواد روباره تخمین زده شد. همچنین در این مقاله برای برآورد تنش افقی در مقاطع مختلف از رابطه ارائه شده توسط شئوری و همکارانش (Sheorey et al., 2001)، استفاده شده است.

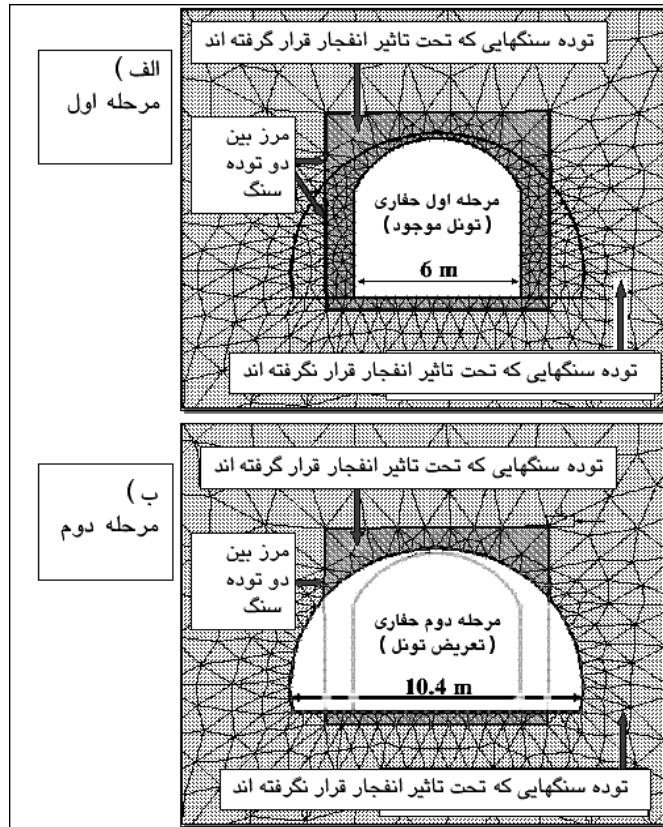
به منظور تأثیر تنش القایی در زمان تعریض تونل، که در اثر حفاری اولیه تونل کلات (به عرض ۶ متر) بوجود آمده، مدلسازی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول، حفاری فعلی انجام شد (شکل ۷-الف)، تا توزیع جدید تنش (تنش القایی) حاصل شود، و سپس در مرحله دوم، حفاری نهایی جهت تعریض تا عرض ۱۰/۴ متر (شکل ۷-ب) انجام شد. بدین ترتیب تأثیر مرحله اول حفاری (تونل فعلی) بر روی توزیع و جهت تنشهای اصلی (تنش القایی) در مدلسازی مرحله دوم (تعریض تونل کلات) لحاظ گردید.

۶-۱- مدلسازی توده سنگهای در برگیرنده تونل

همانطور که در قسمتهای پیشین ذکر شد، مسئله داده‌های ورودی یکی از موانع اصلی در تحلیلها و مدلسازیهای عددی می‌باشد. بنابراین، برای ساختن مدلی که به شرایط واقعی نزدیک باشد، باید تمام شرایطی را که، کیفیت توده‌های سنگی را تحت تأثیر قرار داده، شناسایی و در مدلسازی لحاظ گردند.

بنابراین با توجه به مندرجات قسمت (۵-۱) توده سنگهای در برگیرنده تونل کلات از نظر کیفیت به دو بخش تقسیم می‌گردند. همانطور که ذکر گردید توده سنگی تا شعاع ۱ متری اطراف بازشدگی بعلت تأثیر انفجار، دارای مقاومت و کیفیت پایینتر بوده، ولی در شعاع بیش از

۱ متر (بعلت عدم تاثیر انفجار) دارای مقاومت و کیفیت بهتری می‌باشند. در نتیجه برای ساختن مدلی که به شرایط واقعی نزدیکتر باشد، توده سنگهای اطراف تونل به دو قسمت تقسیم گردید. (شکل ۷) مرز این دو قسمت را بخوبی نشان می‌دهد. داده‌های ورودی برای این دو توده سنگی از جداول ۵ و ۶ استنتاج شده است.



شکل ۷- مراحل مدلسازی و مرز بین توده های سنگی

۶-۲- نتایج تحلیل عددی

نتایج اصلی حاصل از نرم افزار (Phases) شامل محدوده شکست (Yield zone)، فاکتور ایمنی (Safety factor) در توده سنگهای دربرگیرنده تونل و جابجایی‌های (Displacement) بوجود آمده در اطراف فضای حفاری شده، می‌باشد. محدوده شکست در مناطقی از توده سنگ رخ

می‌دهد که فاکتور مقاومت در آن نقطه کمتر از ۱ باشد. فاکتور مقاومت از نسبت بین مقاومت توده سنگ به تنش القایی محاسبه می‌شود. شکل‌های (۸ و ۹) به ترتیب گسترش گسیختگی و جابجایی‌های موجود آمده در توده سنگهای دربرگیرنده تونل را در زمان تعریض آن برای مقاطع ذکر شده، نشان می‌دهند. همچنین لازم به ذکر است که گسیختگی برشی با علامت ضربدر و گسیختگی کششی با علامت دایره مشخص شده‌اند.

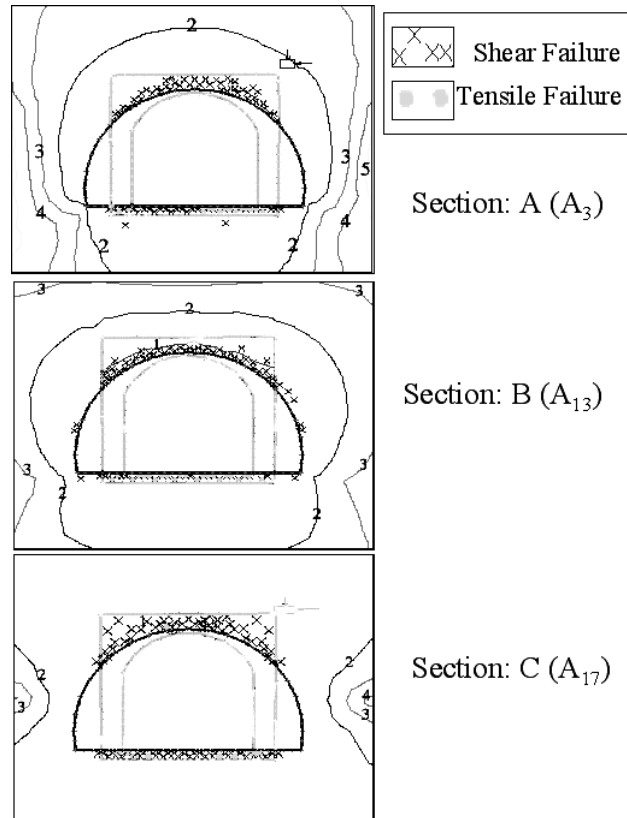
همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، محدوده گسیختگی در مقطع C (مقطع ۱۷- آهک مارنی) از بقیه مقاطع گسترش بیشتری دارد. مقطع B بعد از مقطع C دارای بیشترین گسترش گسیختگی می‌باشد ولی در مقابل، مقطع A (مقطع ۳- ماسه سنگ) کمترین گسترش گسیختگی را نسبت به بقیه مقاطع نشان می‌دهد. نکته جالب توجه دیگر تمرکز اجزای گسیخته شده در سقف تونل (در تمام مقاطع) می‌باشد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود جابجایی در اطراف تونل بصورت بردارهایی که جهت آنها به طرف فضای حفر شده می‌باشد، نشان داده شده است. حداکثر جابجایی در مقطع A) به میزان ۰/۵۷ میلیمتر و کمترین جابجایی در مقطع C) و به میزان ۰/۱۳ میلیمتر محاسبه شده است (جدول ۸). بر اساس نتایج بدست آمده در مقاطع A) و B)، حداکثر جابجایی در سقف تونل و در مقطع C) حداکثر جابجایی در دیواره‌های تونل رخ خواهد داد.

۷- پیشنهاد سیستم نگهدارنده بر اساس روش (RMR) و (Q)

در این مقاله برای طراحی سیستم نگهدارنده در هنگام تعریض تونل از طبقه‌بندی (RMR و Q) برای مقاطع مختلف نیز استفاده شده است.

۷-۱- طراحی سیستم نگهدارنده بر اساس روش (RMR)

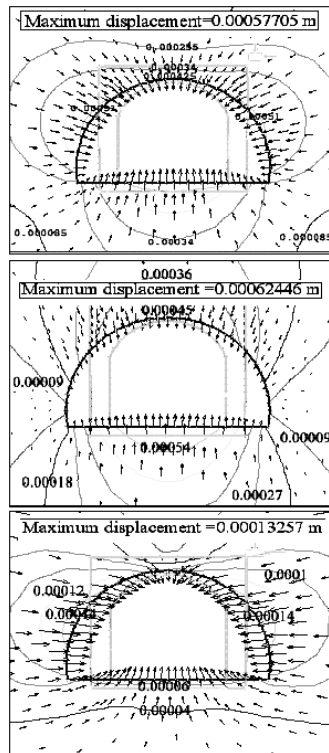
در سال ۱۹۸۹ میلادی، بنیاوسکی تمهیداتی را برای انتخاب سیستم نگهداری تونلها بر اساس شاخص (RMR) منتشر ساخت (Bieniawski, 1989). این تمهیدات برای مقاطع مختلف تونل در (جدول ۹) ارائه شده است. لازم به ذکر است که توده سنگهای مقاطع (A₈ و A₉) با امتیاز ۴۱ در مرز دو رده سنگهای نسبتاً خوب (Fair Rock) و ضعیف (Poor Rock) قرار دارد. لذا توصیه می‌شود که چون مدت زمان استفاده از تونل طولانی می‌باشد، در مراحل اولیه حفاری، تمهیدات سیستم نگهدارنده بر اساس رده سنگ ضعیف انتخاب شود و پس از پیشروی مقداری از تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب بود و هیچگونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیامد، به تدریج می‌توان سیستم نگهداری را مطابق سنگ نسبتاً خوب تعدیل نمود.



شکل ۸- گسترش گسیختگی در توده سنگهای دربرگیرنده تونل کلات

جدول ۸- مقادیر جابجایی بدست آمده از تحلیل عددی در مقاطع مختلف تونل

| مقاطع | A (A_3) | B (A_{13}) | C (A_{17}) |
|-------------|-------------|----------------|----------------|
| سقف | ۰/۴۲ | ۰/۴۵ | ۰/۱ |
| دیواره راست | ۰/۵۷ | ۰/۲۷ | ۰/۱۳ |
| دیواره چپ | ۰/۵۷ | ۰/۲۷ | ۰/۱۳ |
| حداکثر | ۰/۵۷ | ۰/۶۲ | ۰/۱۳ |



Section: A (A₃)

Section: B (A₁₃)

Section: C (A₁₇)

شکل ۹- رفتار جابجایی توده سنگهای دربرگیرنده تونل

جدول ۹- تمهیدات سیستم نگهداری برای مقاطع مختلف تونل کلات، بر اساس سیستم RMR (Bieniawski, 1989)

| مقاطع | پیچ سنگ به قطر 20mm و کاملاً تزریق شده | شاتکرت | قابهای فلزی |
|---|--|---|---|
| A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16 | پیچ سنگهایی به طول ۴ متر و فاصله ۲ تا ۱/۵ متر در تاج و دیواره‌ها، با سیم توری در تاج | به ضخامت ۵۰ تا ۱۰۰ میلیمتر در تاج و ۳۰ میلیمتر در دیواره‌ها | احتیاجی نیست |
| A8, A9, A17 | پیچ سنگهایی به طول ۴-۵ متر و فاصله ۱/۵ تا ۱ متر در تاج و دیواره‌ها، با سیم توری در تاج | به ضخامت ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلیمتر در تاج و ۳۰ میلیمتر در دیواره | قابهای فلزی سبک تا متوسط در فاصله ۱/۵ متر، در صورت لزوم |

۲-۷- پیشنهاد سیستم نگهدارنده بر اساس روش (Q)

در این مطالعه جهت برآورد تمهیدات سیستم نگهدارنده برای مقاطع مختلف تونل بر اساس سیستم (Q)، از نمودار پیشنهادی گریمستاد و بارتون (Grimstad and Barton, 1993)، استفاده شده است، که نتایج بدست آمده در (جدول ۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰- سیستم نگهدارنده برای مقاطع مختلف تونل کلات بر اساس سیستم Q (Grimstad and Barton, 1993)

| پیچ سنگ - متر | ضخامت شاکرت (mm) | | مقاطع |
|---------------|------------------|--------|--|
| | غیر مسلح | مسلح | |
| فاصله | | | |
| ۲ | ۴۰-۱۰۰ | - | A1, A3, A5, A12 |
| ۲.۳ | - | - | A2 |
| ۲ | - | ۵۰-۹۰ | A4, A6, A7, A10, A11, A13, A14, A15, A16 |
| ۱/۷ | - | ۹۰-۱۲۰ | A8, A9, A17 |

۸- نتیجه گیری و پیشنهادات

تونل کلات در میان توده سنگهای نسبتاً ضخیم لایه ولی درزه دار حفاری شده است. با توجه به بررسی درز و شکافها، سه دسته درزه غالب در طول مسیر تونل تشخیص داده شد. در صورت تعریض تونل، استعداد تشکیل و لغزش گوه‌های سنگی در سقف و دیواره‌های تونل وجود دارد. کیفیت توده سنگ‌های در برگیرنده تونل کلات، با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی (RMR)، (Q) و (GSI) (شاخص مقاومت زمین‌شناسی) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار (RMR) بدست آمده در این مطالعه از ۳۰ (سنگهای خیلی ضعیف) تا ۶۰ (سنگهای نسبتاً خوب) تغییر می‌کند. در صورتیکه در رده‌بندی (Q) توده سنگ تغییر بیشتری نسبت به (RMR) نشان می‌دهد. بر اساس بررسیهای بعمل آمده، توده‌های سنگی مسیر تونل در سیستم (GSI)، در محدوده سنگهای بلوکی تا بسیار بلوکی قرار می‌گیرند. همچنین، مقاطع ابتدایی و انتهایی تونل، به ترتیب، بیشترین و کمترین پارامترهای مقاومتی را دارا هستند.

به منظور ارزیابی پایداری توده سنگ در برگیرنده تونل کلات در زمان تعریض آن از برنامه کامپیوتری (Phases) استفاده گردیده است. نتایج اصلی حاصل از نرم افزار (Phases) شامل محدوده شکست، فاکتور ایمنی در توده سنگهای دربرگیرنده تونل و جابجایی‌های بوجود آمده در اطراف فضای حفاری شده، می‌باشد. محدوده گسیختگی در مقطع C (مقطع ۱۷- آهک مارنی) از بقیه مقاطع گسترش بیشتری دارد. مقطع B بعد از مقطع C دارای بیشترین گسترش

گسیختگی می باشد ولی در مقابل، مقطع A (مقطع ۳- ماسه سنگ) کمترین گسترش گسیختگی را نسبت به بقیه مقاطع نشان می‌دهد. حداکثر جابجایی در مقطع A به میزان ۰/۵۷ میلیمتر و کمترین جابجایی در مقطع C و به میزان ۰/۱۳ میلیمتر بدست آمده است. بر اساس نتایج بدست آمده در مقاطع A و B، حداکثر جابجایی در سقف تونل و در مقطع C حداکثر جابجایی در دیواره‌های تونل رخ خواهد داد.

با توجه به اینکه مقطع حفر شده تونل متغیر و ناقص بوده و بخش عمده‌ای از آن اکنون بصورت یک خطه مورد استفاده است، تعریض آن به علت تأثیر منفی انفجار بر روی توده سنگهای دربرگیرنده تونل، هوازگی سنگها درطی پس از حفاری و همچنین تغییر توزیع و تمرکز تنش به علت حفاری مرحله اول (تونل فعلی)، مشکل و احتمالاً پر هزینه خواهد بود. لذا توصیه می‌شود که چون مدت زمان استفاده از تونل طولانی می‌باشد، در مراحل اولیه حفاری جهت تعریض، تمهیدات سیستم نگهدارنده بر اساس رده سنگ ضعیف انتخاب شود. پس از تعریض مقداری از تونل، در صورتی که سیستم نگهداری انتخابی مناسب باشد و هیچگونه مشکلی از نظر نگهداری پیش نیاید، به تدریج سیستم نگهداری مطابق سنگ نسبتاً خوب تعدیل گردد.

تشکر و قدردانی

در پایان نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از همکاری صمیمانه مهندسین مشاور شرکت اساس‌راه تشکر و قدردانی نمایند.

References

- Barton, N., Loset, F., Lien, R., Lunde, J. (1980) *Application of the Q-system in design decisions*. In *Subsurface space*, (ed. M. Bergman) 2, 553–561. New York: Pergman.
- Bieniawski, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*. Wiley, New York. 251p.
- Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithankar, A.G. (1995) Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunn. Undergr. Space Technol.* **10**(1), 97–109.
- Grimstad, E., Barton, N. (1993) *Updating the Q-System for NMT*. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete - modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes, (eds Kompen, Opsahl and Berg). Oslo: Norwegian Concrete Assn.
- Hoek, E., Brown, E.T. (1980) *Underground Excavations in Rock*, London, Instn Min. Metall.
- Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam, 215p.

- Hoek, E., Brown, E.T. (1997) *Practical estimates of rock mass strength*. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. **34(8)**, 1165–1186.
- 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*. Bull. Engg. Geol. Env. **57(2)**, 151–160.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B. (2002) *Hoek-Brown failure criterion*. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto in July (2002).
- ISRM (1981) *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. Rock Characterization, Testing and Monitoring, London. Pergamon, Oxford, 221p.
- Sheorey, P.R., Murali, M.G., Sinha, A. (2001) *Influence of elastic constants on the horizontal in situ stress*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. **38(1)**, 1211–1216.

غفوری، م. و نیازی، ی.، (۱۳۷۹)، ویژگیهای زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی تونل کلات، چهارمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. صفحات ۴۹۳-۴۹۰.