# بررسی تأثیر عوامل زمین‌شناسی و خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ بر انتخاب ماشین حفاری تمام مقطع در تونل انتقال آب سبزکوه

مرتضی کرمی، لهراسب فرامرزی*، راحب باقرپور؛
دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکدهٔ مهندسی معدن
داراب رئیسی گهرویی؛ شرکت مهندسین مشاور آبدان فراز

**تاریخ: دریافت** ۹۱/۶/۱۸ **پذیرش** ۹۲/۴/۱۸

## چکیده

پروژهٔ تونل انتقال آب سبزکوه، به‌طول تقریبی ۱۱ کیلومتر به‌منظور انتقال ۹۰ میلیون مترمکعب آب در سال از حوزهٔ سبزکوه به سد چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری و در حدود ۸۰ کیلومتری جنوب شهرکرد در حال بررسی است. با توجه به‌طول زیاد تونل و لزوم اجرای هرچه سریع‌تر و ایمن این طرح و با عنایت به میزان اندک تونل‌سازی با روش‌های سنتی، استفاده از روش حفاری مکانیزه در اولویت کار قرار گرفته است. به‌علت محدودیت دامنهٔ کاربرد TBMها در شرایط پیچیده و نامطلوب زمین‌شناسی، انتخاب این ماشین‌ها با بررسی‌های دقیق دستگاه و شرایط محیط انجام می‌شود. شرایط زمین‌شناسی و خصوصیات ژئومکانیکی توده-سنگ از جمله مهم‌ترین پارامترهایی است که همواره اجرای تونل‌ها را تحت‌الشعاع قرار داده و می‌تواند در انتخاب نوع TBM مناسب، نقش به‌سزایی داشته باشد. در این تحقیق با تعیین مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ منطقهٔ بررسی شده، و تفسیر نتایج حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی، آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و تدقیق آن‌ها با مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، توده‌سنگی مسیر تونل به‌وسیلهٔ سه سیستم طبقه‌بندی مهندسی RMR، Q و GSI به سه زون ژئوتکنیکی تفکیک شد. سپس عمل‌کرد انواع TBMهای باز، تک‌سپری و دوسپری برای حفاری در سنگ، بر اساس مقاومت ماده‌سنگ، خصوصیات کمی و کیفی درزه‌ها، عرض نواحی برشی و گسله، سطح آب زیرزمینی و نیز شدت مچاله‌شوندگی توده‌های سنگی در هر زون بررسی شد و در نهایت TBM دو سپری به‌عنوان مناسب‌ترین دستگاه برای حفاری تونل سبزکوه پیشنهاد شد.

**واژه‌های کلیدی**: انتخاب TBM، تونل انتقال آب، شرایط زمین شناسی، خواص ژئومکانیکی، سیستم طبقه‌بندی.

* **نویسنده مسئول** lfaramarzi@cc.iut.ac.ir

۱. Tunnel Boring Machine

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

## مقدمه

امروزه بسیاری از حفاری‌های زیرزمینی با وسایل مکانیکی انجام می‌شوند. در این میان رایج‌ترین نوع حفاری مکانیکی در سنگ، استفاده از TBMها است که برای حفر تونل‌هایی با مقاطع دایره‌ای شکل به‌کار می‌روند. TBMها نسبت به تغییر شرایط زمین، انعطاف‌پذیری زیادی ندارند و عمل‌کرد TBM نسبت به تغییر شرایطی مانند نوع سنگ، جریان آب زیرزمینی، وجود گسل و درزه و سایر ویژگی‌های ساختاری بسیار حساس است. بنا بر این انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل باید با احتیاط انجام شود [۱]. گراهام در سال ۱۹۷٦ برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری تک‌محوری بین ۱٤۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال رابطهٔ معکوسی بین میزان نفوذ کله حفار و مقاومت ماده‌سنگ به دست آورد [۲]. هم‌چنین موریمتو و هری در سال ۱۹۸٦ با بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر عمل‌کرد TBM نشان دادند که با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و بهبود شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ، سرعت حفاری TBM افت می‌کند [۳]. بارلا و پلیزا در سال ۲۰۰۰ با بررسی تونل‌سازی با TBM تحت شرایط نامطلوب زمین‌شناسی، مانند ناپایداری دیواره‌ها، زون‌های گسله و نیز زمین مچاله‌شونده نتیجه گرفتند که تأثیر کیفیت توده‌سنگ بر عمل‌کرد TBM به‌تنهایی نیست و به نوع TBM و قطر تونل بستگی دارد [٤]. در سال ۲۰۰۲ ساپیگنی و برتی رابطه‌ای تجربی بین امتیاز توده‌سنگ (RMR) و میزان نفوذ TBM به‌دست آوردند که نشان می‌داد عمل‌کرد TBM در RMR بین ۷۰-٤۰ به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد. این در حالی بود که برای دو حالت سنگ بسیار ضعیف و سنگ بسیار خوب، نفوذ حداقل مشاهده شد [۵]. دالگیچ در سال ۲۰۰۳ با بررسی تونل‌سازی در مناطق گسله در ترکیه نشان داد که گسل‌های موازی با مسیر تونل اهمیت بیش‌تری نسبت به گسل‌های متقاطع دارند و با کاهش RMR در نواحی گسله بلوکی، بِرِشی و رسی، میزان پیش‌روی نیز کاهش می‌یابد [٦]. در سال ۲۰۰٤، بناردوس و همکاران با بررسی‌های خود نشان دادند که مشکل اصلی تونل‌زنی در زمین‌های مچاله‌شونده، تغییرشکل‌های زیاد دیواره تونل است که می‌تواند به انسداد و متوقف شدن TBM منجر شود [۷]. گانگ و همکاران در سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰٦ و گانگ و ژائو در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

برای پیش‌بینی میزان نفوذ TBM مدل‌هایی را بر اساس کیفیت توده‌سنگ پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که با افزایش کیفیت توده‌سنگ، میزان نفوذ TBM کاهش می‌یابد. هرچند که توده‌سنگی با کیفیت بسیار اندک (بسیار ضعیف) نمی‌تواند به افزایش میزان نفوذ کمکی کند [۸]، [۹]، [۱۰]، [۱۱]. یاقیز در سال ۲۰۰۹ با مطالعه خواص سنگ سالم مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و تردی سنگ و هم‌چنین خصوصیات توده‌سنگ مانند جهت‌یابی و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها روابط خوبی را برای پیش‌بینی عمل‌کرد TBMها ارائه کرد [۱۲]. فرخ و رستمی در سال ۲۰۰۹ تأثیر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی بر عمل‌کرد TBM را بررسی کردند و نشان دادند که با افزایش فشار زمین مچاله شونده، فشار بر روی سپر TBM افزایش یافته و میزان نفوذ و گشتاور کله حفار کاهش می‌یابد [۱۳]. رامونی و آناگنوستو در سال ۲۰۱۰ تونل‌سازی با TBM را تحت شرایط مچاله‌شوندگی بررسی کرده و اندرکنش بین سپر، زمین و سیستم نگه‌داری تونل را تحت چنین شرایطی بررسی کردند [۱٤]، [۱۵]. نیروی محوری لازم برای TBM برای غلبه بر اصطکاک ناشی از پدیدهٔ مچاله‌شوندگی با استفاده از نمودارهای بی‌بعد تعیین می‌شود [۱٦].

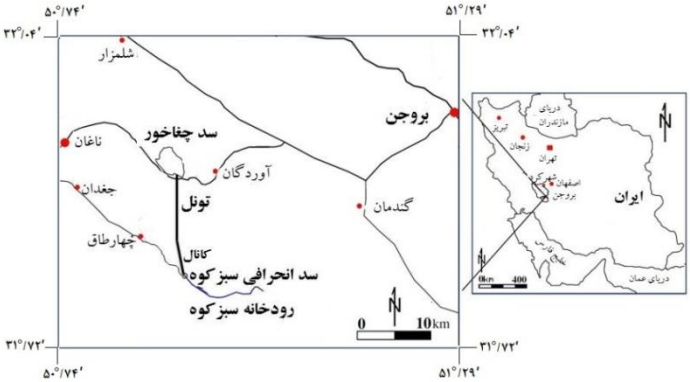
در تحقیقات انجام‌شده فوق، تنها عمل‌کرد TBMها در شرایط ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مختلف و بدون در نظر گرفتن نوع آن بررسی شده است، در صورتی که اندرکنش بین دستگاه TBM و شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی متأثر از نوع دستگاه است که باید بر اساس این شرایط و با هدف کمینه شدن شرایط نامطلوب حفاری و نگه‌داری انتخاب شود. در این تحقیق توده‌های سنگی مسیر تونل انتقال آب با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی، خصوصیات زمین‌شناسی و نیز سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی RMR، Q و GSI به سه زون ژئوتکنیکی I، II و III تقسیم‌بندی شده است. سپس با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی موثر بر عمل‌کرد TBMها از قبیل مقاومت فشاری سنگ بکر، شاخص کیفی توده‌سنگ، وضعیت ناپیوستگی‌ها، ناپایداری سینه‌کار و دیواره‌های حفاری، شرایط آب‌زیرزمینی، زون‌های گسله و پدیدهٔ مچاله‌شوندگی مناسب‌ترین نوع TBM برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه در هر زون ژئوتکنیکی پیشنهاد شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

## موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب سبزکوه

برای جبران کمبود آب شرب و کشاورزی در شهرستان بروجن، طرح افزایش ارتفاع سد چغاخور به‌میزان ۵ متر و هم‌چنین احداث سامانه سبزکوه (شامل بند انحرافی، کانال و تونل انتقال آب) برای انتقال آب رودخانه سبزکوه به مخزن این سد مورد توجه قرار گرفته است. تونل انتقال آب سبزکوه با راستای شمالی- جنوبی به‌طول تقریبی ۱۱ کیلومتر و قطر حفاری ٤/۵ متر برای انتقال ۹۰ میلیون مترمکعب آب در سال از حوضهٔ سبزکوه به سد چغاخور در استان چهارمحال و بختیاری و در حدود ۸۰ کیلومتری جنوب شهرکرد قرار دارد. موقعیت جغرافیایی این تونل به‌همراه سایر اجزای سامانه انتقال آب در شکل ۱ نشان داده شده است. ورودی این تونل در رقوم ارتفاعی ۲۳۰۰ متر از سطح دریا و خروجی آن نیز در حاشیهٔ جنوبی دریاچه سد چغاخور قرار دارد [۱۷].




**شکل ۱. موقعیت جغرافیایی سامانهٔ انتقال آب سبزکوه به سد چغاخور**

## زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقهٔ پژوهش

منطقهٔ سبزکوه در حاشیه شمالی رشته کوه‌های زاگرس و در محدوده جغرافیایی ۵۰° ۵۸َ تا ۵۰° ۵۱َ طول شرقی و ۳۱° ۵۸َ تا ۳۱° ٤۵َ عرض شمالی قرار دارد. ترکیب سنگ‌شناسی مسیر تونل شامل سنگ‌های رسوبی دوران کامبرین تا کرتاسه است که بیش‌تر به‌صورت چین‌خوردگی‌ها، مناطق گسله، زون‌های برشی و توده‌های سنگی خرد شده و هوازده است (شکل ۲) [۱۷]. ناودیس سبزکوه از مهم‌ترین چین‌های منطقه است که محوری تقریباً منطبق بر

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

مسیر رودخانه سبزکوه دارد و در امتداد شمال غرب- جنوب شرق کشیده شده است. مسیر تونل انتقال سبزکوه از یال شمالی این ناودیس می‌گذرد و محدودهٔ ورودی تونل (سازند گورپی) در مرکز این ناودیس قرار گرفته است (شکل ۳) [۱۷]. از آن‌جا که سازندهای خانه-کت و دالان در بخش خروجی تونل سبزکوه تحت تأثیر فعالیت‌های شدید تکتونیکی، گسله و برشی شده‌اند، علاوه بر ایجاد مشکلاتی در سیستم حفاری و نگه‌داری تونل، می‌توانند موجب جریان شدید آب به داخل تونل نیز شوند.

**زمین‌شناسی مسیر تونل**

بر اساس پژوهش*های* زمین‌ریخت‌شناسی و بررسی‌های صحرایی، گسل‌های تراستی، امتدادلغز و معکوس با روند شمال غرب- جنوب شرق در مسیر تونل سبزکوه شناسایی شده، که موجب خردشدگی شدید و برشی شدن لایه‌ها در محدوده خروجی تونل شده‌اند. از گسل‌های اصلی این منطقه می‌توان به گسل‌های چهارطاق، آوردگان و سولقان اشاره کرد که طولی بالغ بر ۱۰ کیلومتر دارند [۱۷]. این گسل‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند. در جدول ۱ سازندها و لایه‌های سنگی در برگیرنده مسیر تونل سبزکوه آورده شده است. بر اساس داده‌های جدول۱، سازندهای خروجی تونل (خانه‌کت و دالان) به‌علت ساختار خرد شده و ضعیف، ممکن است باعث گیر افتادن کله حفار TBM و انحراف آن از مسیر تونل، ناپایداری سینه کار، افزایش تغییرشکل‌های حاصل از مچاله‌شوندگی و یا تورم و افزایش جریان آب زیرزمینی به داخل تونل شوند. در این دو سازند، عرض گسل و ضخامت زون خرد شده، از جمله عوامل مهم و تأثیرگذار در عملیات حفاری مکانیزه با TBM است.

## طبقه‌بندی و زون‌بندی ژئوتکنیکی مسیر تونل

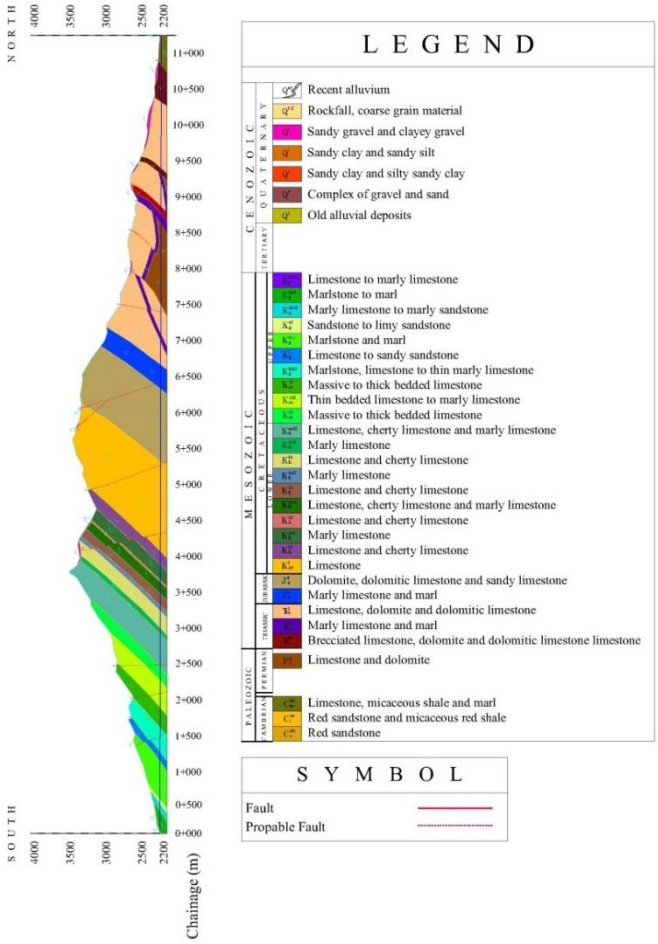
طبقه‌بندی توده‌سنگ به‌منظور ارزیابی کمی ویژگی‌های توده‌سنگ به‌کار می‌رود. به‌طورکلی می‌توان گفت که طبقه‌بندی مهندسی اساس روش طراحی تجربی است و به‌طور وسیع در مکانیک‌سنگ و زمین‌شناسی مهندسی به‌کار می‌رود. با تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش‌های

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

**جدول ۱. سنگ‌ها و لایه‌های در بر گیرنده مسیر تونل انتقال آب سبزکوه**

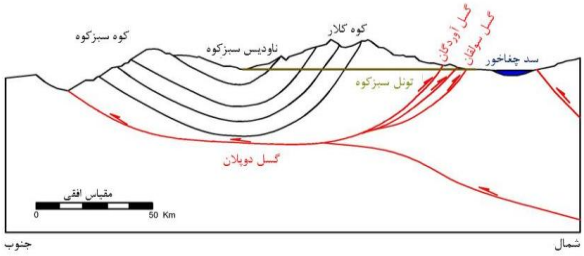
| سازند | لایه | جنس لایه | سازند | لایه | جنس لایه |
|---|---|---|---|---|---|
| گورپی | Kgm | مارن، آهک مارنی | کژدمی | Kkl | آهک چرت دار |
| | Kgml | شیل آهکی | داریان- فهلیان | Kdf | آهک |
| | Kgsl | آهک، آهک مارنی | سرمه | Jsd | دولومیت، آهک دولومیتی |
| | Kgl | آهک | نیریز | Jnd | دولومیت، آهک مارنی و مارن |
| سروک – ایلام | Ksil | آهک توده‌ای | خانه‌کت | TRkl | آهک و دولومیت |
| | Ksiml | آهک توده‌ای و مارنی | خانه‌کت | TRkml | آهک، آهک مارنی |
| کژدمی | Kklm | آهک، آهک مارنی | خانه‌کت برشی | TRkbl | آهک برشی |
| | Kkm | مارن، آهک مارنی | دالان | Pdd | دولومیت توده‌ای |




شکل ۲. مقطع زمین شناسی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه [۱۷]

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]




**شکل ۳. مقطع ناودیس سبزکوه از سد چغاخور تا محدوده گسل دوپلان [۱۷]**

آزمایشگاهی و صحرایی و نیز انجام مشاهدات صحرایی، توده‌های سنگی در برگیرنده تونل انتقال آب سبزکوه طبقه‌بندی شده است. از آن‌جا که استفاده از یک سیستم طبقه‌بندی برای ارزیابی تمامی پارامترهای توده‌سنگ پیشنهاد نمی‌شود، هم‌زمان از سیستم‌های طبقه‌بندی RMR، Q و GSI برای طبقه‌بندی واحدهای سنگی در طول مسیر تونل انتقال آب سبزکوه استفاده شده است.

### ۱. طبقه‌بندی بر اساس RMR

طبقه‌بندی ژئومکانیکی یا سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ (RMR) را اولین بار بنیاوسکی (۱۹۷۳) در انجمن تحقیقات علمی و صنعتی آفریقای جنوبی معرفی کرد [۱۸]. بر اساس تحلیل‌های انجام شده مقدار RMR برای پروژهٔ تونل سبزکوه در بازه ٥٦–٨ قرار دارد که مجموعه‌ای از سنگ‌های خیلی ضعیف تا نسبتاً خوب را شامل می‌شود. در جدول ۲ نتایج این طبقه‌بندی برای هر کدام از لایه‌های سنگی مسیر تونل سبزکوه ارائه شده است.

### ۲. سیستم طبقه‌بندی Q

بارتن و همکاران (۱۹۷٤) بر اساس بررسی ۲۰۰ مورد پروژهٔ تونل و مغار، سیستم Q را برای طبقه‌بندی توده‌سنگ ارائه کردند. آن‌ها کیفیت توده‌سنگ (Q) را به‌صورت رابطه (۱) تعریف کرده‌اند [۱۹]:

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_n}\right]\left[\frac{J_r}{J_a}\right]\left[\frac{J_w}{SRF}\right] \quad (۱)$$

بر اساس تحلیل‌های انجام شده مقدار Q برای پروژهٔ تونل سبزکوه در بازه ٤– ۰/۰۱ ارزیابی شده است که مجموعه‌ای از سنگ‌های بسیار ضعیف تا ضعیف را در بر می‌گیرد. در جدول ۲ نتایج این طبقه‌بندی برای هر کدام از لایه‌های مسیر تونل سبزکوه ارائه شده است.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

### ۳. شاخص مقاومتی زمین‌شناسی (GSI)

شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) سیستمی برای تخمین کاهش مقاومت توده‌سنگ در شرایط مختلف زمین‌شناسی است که با تعیین کیفیت توده‌سنگ و وضعیت ناپیوستگی‌ها مشخص می‌شود [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]. این شاخص برای توده‌های سنگی در برگیرندهٔ تونل سبزکوه به‌جز در قسمت میانی مسیر تونل که به‌علت داشتن توپوگرافی خشن و روبارهٔ زیاد قابل دسترسی نبوده است، با دقت تعیین شده که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس مشاهدات صحرایی و برداشت‌های سطحی، بخش میانی مسیر تونل به‌دلیل تأثیر کم‌تر گسل‌ها و نیز لایه‌بندی‌های ضخیم و توده‌ای آهک و دولومیت، در ردهٔ مناسب تا خوب قرار دارد. نهایتاً توده‌های سنگی مسیر تونل سبزکوه به سه زون ژئوتکنیکی I، II و III تقسیم‌بندی شده‌اند. توده‌های سنگی هر زون شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی کم و بیش مشابهی دارند ( شکل ٤).

## TBMهای مورد استفاده در سنگ سخت[۱]

بر اساس تعریف انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ[۲] (ISRM) مقاومت سنگ سخت بین ۵۰MPa تا ۱۰۰ است. از آن‌جاکه مقاومت اکثر توده‌های سنگی در سه زون ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه در چنین بازه‌ای قرار دارد (جدول ۳)، بنا بر این TBM پیشنهادی باید یکی از انواع TBMهای استفاده شده در سنگ سخت باشد که شامل TBMهای باز[۳]، تک‌سپری[٤] و دو سپری (تلسکوپی)[۵] است. هر کدام از این سه نوع TBM با در نظر گرفتن مزایا و معایبی که در برخورد با شرایط زمین‌شناسی و پارامترهای ژئومکانیکی منطقه از خود نشان می‌دهند و نیز قابلیت انعطاف‌پذیری‌شان برای رویارویی با شرایط غیر قابل پیش‌بینی و مشکل‌آفرین انتخاب می‌شوند.

---

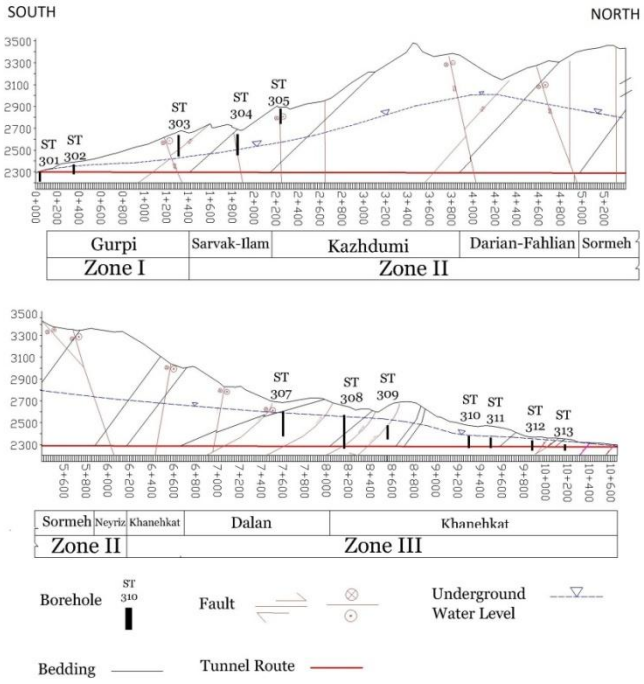
۱. Hard rock TBM’s ۲. International Society of Rock Mechanics
۳. Open TBM’s ۴. Single Shield TBM’s
۵. Double Shield (Telescopic) TBM’s

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

**جدول ۲. تقسیم‌بندی توده‌های‌سنگی مسیر تونل با سیستم‌های طبقه‌بندی مهندسی**

| GSI | Q | RMR | لایه | GSI | Q | RMR | لایه |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۵-۵۵ | ۱<Q<٤ | ٥١ | Kkl | ۳۰ -٤٥ | ۰/۲٦ | ۳٤ | Kgm |
| ۳۵-۵۵ | ۱<Q<٤ | ٥١ | Kdf1 | ۳۰-٤٥ | ۰/۱٤ | ۳۱ | Kgml |
| ۳۵-۵۵ | ۱<Q<٤ | ٥٤ | Jsd | ۳۰-٤٥ | ۰/۲۹ | ۳٤ | Kgsi |
| ۳۵-۵۵ | ۱<Q<٤ | ٥١ | Jnd | ۳۰-٤٥ | ۰/۳٥ | ۳۷ | Kgl |
| ۲۰-٤۰ | ۰/۱۰۳ | ۳٥ | TRkl | ۳۰-٤٥ | ۰/۱٤ | ۳٥ | Ksil |
| ۲۰-٤۰ | ۰/۰۹۲ | ۲۷ | TRkml | ۳۰-٤٥ | ۰/۲۷ | ٤۰ | Ksiml |
| ۲۰-٤۰ | ۰/۰۸٤ | ۳٥ | Pdd | ۳٥-٥٥ | ۱<Q<٤ | ٥٦ | Kkml |
| ۲۰-٤۰ | ۰/۰۱ | ۸ | TRkbl | ۳٥-٥٥ | ۱<Q<٤ | ٤۸ | Kkm |




**شکل ٤. زون‌بندی ژئوتکنیکی توده‌سنگی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه**

بر اساس تحقیقات صورت گرفته می‌توان گفت که TBMهای باز بیش‌تر برای محیط‌های سنگی سالم و پایدار و TBMهای سپری برای حفاری در شرایط سنگی خرد شده و ناپایدار به‌کار می‌روند [۲٤]. در صورت بررسی نشدن ساختارها و شرایط دقیق زمین‌شناسی و

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

ژئومکانیکی مسیر تونل، انتخاب نادرست دستگاه TBM ممکن است که مشکلات زیادی برای عملیات تونل‌سازی به‌وجود آید، برای نمونه می‌توان به مشکلات پیش آمده در تونل انتقال آب گاوشان در ۳۸ کیلومتری سنندج اشاره کرد که ناشی از انتخاب نادرست دستگاه TBM بوده است [۲۵].

## تجزیه و تحلیل پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی مؤثر در انتخاب TBM

انجمن تونل‌سازی در کشورهای مختلف، پارامترهای زمین‌شناسی و ژئومکانیکی مختلفی برای انتخاب TBM مناسب پیشنهاد کرده است. انجمن بین‌المللی تونل‌سازی (ITA)، انجمن تونل‌سازی فرانسه (AFTES) و انجمن فضاهای زیرزمینی آلمان (DAUB) پارامترهایی مانند مقاومت فشاری سنگ، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، شرایط هیدروژئولوژی، فاصله‌داری صفحات لایه‌بندی، ناپایداری دیواره‌ها و سینه کار تونل، شرایط زون گسلی و پتانسیل مچاله‌شوندگی را در انتخاب TBM مناسب برای حفاری در سنگ مدنظر قرار داده‌اند [۲۶]، [۲۷]، [۲۸].

### ۱. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ

مقاومت فشاری تک‌محوری، یکی از اساسی‌ترین پارامترهای مقاومتی سنگ است که معمولاً برای بررسی قابلیت حفاری توده‌سنگ و فروروی ابزار برش در سطح آن و نیز ارزیابی مقاومت سنگ در مقابل فشار گریپرهای TBM به‌کار می‌رود [۱۳]. هر چند سنگی با مقاومت کم‌تر برای عملیات حفاری مکانیزه ایده‌آل محسوب می‌شود ولی باید اذعان داشت که مقاومت کم می‌تواند ظرفیت دیوارگیری گریپرهای TBM را تحت تأثیر خود قرار دهد، به‌طوری‌که افزایش تنش جانبی گریپرها نسبت به مقاومت تک‌محوری، پیامدهایی مانند خزش، خردشدگی و ورقه شدن سنگ را در پی داشته و در نهایت تنش جانبی کم شده و پیش‌روی و عمل‌کرد TBM با مشکل مواجه خواهد شد. بنا بر این توده‌سنگی با مقاومت کم‌تر از ٤٠ مگاپاسکال ممکن است نتواند در برابر بار فشاری ناشی از گریپرهای TBM مقاومت کند و موجب فرو رفتن گریپرها شود و در نتیجه کاربرد TBM باز را محدود سازد. از طرف دیگر به‌دلیل این‌که

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

نیروی محوری لازم برای پیش‌روی TBMهای سپری از طریق اعمال فشار به سگمنت‌های پیش‌ساخته نصب شده در انتهای سپر تأمین می‌شود، مقاومت فشاری سنگ نمی‌تواند محدودیتی جدی برای این نوع TBMها تلقی شود. هر چند که به‌کارگیری TBMهای تک سپری برای مقاومت‌های ۵۰-۵ مگاپاسکال پیشنهاد شده است [۲۷]. در جدول ۳ دامنه مقاومت فشاری برای سه زون ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه و TBM پیشنهادی در چنین شرایطی ارائه شده است.

**جدول ۲. پیشنهاد نوع TBM بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری برای هر زون ژئوتکنیکی در تونل سبزکوه**

| زون | $\sigma_{ci}$ (MPa) | TBM مناسب |
|---|---|---|
| I | ۹۰-۱۰ | باز / سپری |
| II | ۱۲۰-۳۰ | باز / سپری |
| III | ۶۰ > | سپری |

## ۲. شاخص کیفی توده سنگ[۱] (RQD)

این شاخص بر مبنای نسبت مجموع طول مغزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۱۰سانتی‌متر به طول کل مغزه گرفته شده به‌صورت درصدی از طول کل مغزه اخذ شده بیان می‌شود. کاهش این شاخص می‌تواند تبعاتی مانند ریزش و گسیختگی توده‌های سنگی را در حین حفاری در پی داشته باشد. به‌کارگیری TBMهای باز تنها در شرایطی که این شاخص بیش‌تر از ٤٥ درصد باشد، پیشنهاد می‌شود. زیرا در این صورت توده‌سنگ درون‌گیر تونل از مقاومت کافی برای تحمل فشار گریپرهای TBM باز برخوردار بوده است و حالت ریزشی نخواهد داشت [٤]، [۱۳]، [۲۹]. در جدول ٤ مقدار شاخص کیفی توده‌سنگ برای سه زون ژئوتکنیکی در مسیر تونل انتقال آب سبزکوه و TBM پیشنهادی بر اساس این پارامتر ارائه شده است. بر اساس این جدول زون بحرانی برای تصمیم‌گیری, زون خرد شده و ضعیف III است. این زون با در بر داشتن حدود ٤١ درصد از کل مسیر تونل، TBMهای سپری را به پروژه تحمیل می‌کند.

۱. Rock Quality Designation

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

**جدول ۳. پیشنهاد TBM مناسب بر اساس RQD برای هر زون ژئوتکنیکی**

| زون | طول (m) | RQD(%) | TBM پیشنهادی |
|---|---|---|---|
| I | ۱٤۰۰ | ۵۰ – ۷۰ | باز |
| II | ۵۱۰۰ | ۵۰ < | باز |
| III | ٤۵۰۰ | < ۵۰ | سپری |

## ۳. فاصله‌داری[1] ناپیوستگی‌ها

برای انتخاب یک TBM مناسب باید شرایط ناپیوستگی‌ها در منطقه بررسی شود. زیرا عمل‌کرد TBM و سیستم نگه‌داری آن به این پارامتر بستگی زیادی دارد. وقتی که متوسط فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کم‌تر از ۰/٦ متر باشد، به‌علت احتمال وقوع ناپایداری و تشکیل حفره‌های بزرگ در سقف تونل و عدم تأمین نیروی پیش‌ران TBM از طریق اعمال بار گریپرها به دیواره، استفاده از TBMهای باز منتفی است. در چنین شرایطی TBMهای سپری با داشتن سپر فولادی، سطح مقطع بزرگ‌تر برای کفشک‌ها و تأمین نیروی پیش‌روی به‌کمک جک‌های سپر عقبی و سگمنت‌های نصب شده در انتهای سپر می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای حفاری تونل باشند [۵]، [۳۰]. در جدول ۵ فاصله‌داری دسته درزه‌های غالب در هر زون ژئوتکنیکی و TBM پیشنهادی ارائه شده است.

**جدول ٤. پیشنهاد TBM مناسب، بر اساس فاصله‌داری درزه‌ها برای هر زون**

| زون | دامنهٔ فاصله‌داری درزه‌های غالب (m) | نوع پرشدگی | TBM پیشنهادی |
|---|---|---|---|
| I | ۰/۲ –۲ | کلسیتی و رسی | سپری |
| II | ۰/۲ –٦ و بیش‌تر از ٦ | کلسیتی و بعضاً فاقد پرشدگی | باز / سپری |
| III | ۰/۲ - ۰/٦ | کلسیتی، رسی و بعضاً فاقد پرشدگی | سپری |

## ٤. ناپایداری سینه‌کار و دیواره‌های حفاری

موقعیت و تراکم دسته درزه‌ها، نقش بسیار مهمی در پایداری سازه‌هایی دارند که در داخل سنگ و یا بر روی سنگ طراحی و نصب می‌شوند. زیرا تشکیل گوه‌ها در اثر تقاطع درزه‌ها و

۱. Spacing

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

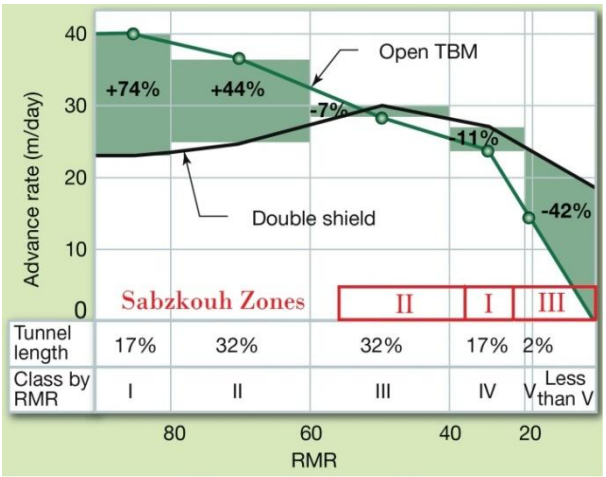
تأثیر صفحات لایه‌بندی یا فولیاسیون و سقوط این گوه‌ها در طی حفر تونل، می‌تواند پایداری حفاری را به‌خطر بیندازد [۱۳]. ناپایداری‌هایی که می‌توانند حفاری با TBM را تحت تأثیر قرار دهند، شامل ناپایداری سینه‌کار و دیواره‌های تونل هستند. ناپایداری در سینه‌کار بیش‌تر با ریزش بلوک‌های سنگی و سنگ‌های خرد شده همراه است که در موارد حاد، می‌تواند عملیات حفاری را متوقف کرده و میزان پیش‌روی و عمل‌کرد TBM را مختل سازد. علاوه بر این ممکن است که به سیستم انتقال تراشه‌های حفاری و دیسک‌های برشی نصب شده بر روی کله حفار نیز آسیب رساند، به‌طوری که نیاز به تعمیر و یا تعویض قطعات آسیب دیده باشد. ناپایداری در دیواره‌های تونل نیز می‌تواند نصب سیستم نگه‌داری و عمل‌کرد کفشک‌های TBM باز را دچار مشکل کند.

به‌طورکلی با کاهش کیفیت توده‌سنگ و افزایش ناپایداری‌ها که ناشی از شرایط تکتونیکی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه است، تمایل به استفاده از TBMهای سپری نسبت به TBMهای باز بیش‌تر می‌شود؛ زیرا پوشش بتنی پیش ساخته و سپر فولادی، نگه‌داری موقت و مطمئنی را برای TBMهای سپری ایجاد می‌کند [٤]. در این نوع TBMها نیروی پیش‌روی با اتکا به سگمنت‌های نصب شده در پشت سپر تأمین می‌شود و تحت تأثیر ناپایداری‌های موضعی و کلی سینه کار و دیواره‌ها نیست. هم‌چنین در RMRهای کم‌تر از ۵۰، میزان پیش‌روی روزانه TBM سپری بیش‌تر از TBM باز گزارش شده است (شکل ۵) [۳۱]. در شکل ۵ دامنه RMR برای زون‌های ژئوتکنیکی تونل سبزکوه نمایش داده شده و برتری TBM سپری به TBM باز کاملاً واضح است.

طبق نتایج جدول ٦ در زون‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل سبزکوه، به‌علت وجود تعداد زیاد دسته درزه‌های غالب با شیب تند (۸۵–۵۰ درجه)، جابه‌جایی بلوک‌های سنگی آسان‌تر خواهد شد. بنا بر این برای بهبود عمل‌کرد و افزایش میزان پیش‌روی حفاری مکانیزه تمام مقطع در توده‌های سنگی ضعیف و خیلی ضعیف و هم‌چنین درزه‌دار مسیر تونل سبزکوه، استفاده از TBMهای سپری با قابلیت نصب پوشش بتنی پیش ساخته ارجحیت دارد.

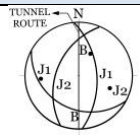
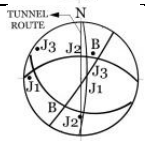
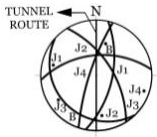
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]




**شکل ۲. مقایسه میزان پیش‌روی روزانه TBM باز و دوسپری در RMRهای مختلف [۳۳]**

**جدول ۵. مشخصات درزه‌های غالب در طول مسیر تونل انتقال آب سبزکوه**

| زون | تعداد دسته درزه | شیب (درجه) | بازشدگی (mm) | تصویر استریونت | TBM پیشنهادی |
|---|---|---|---|---|---|
| I | ۲ | ۸۵ – ٤۰ | ۱۰– ۲/۵ |  | TBM باز |
| II | ۳ | ۹۰ – ٤۰ | ۲/۵– ۰/۲۵ |  | TBM سپری |
| III | ٤ | ۸۵ – ۵۰ | ۱۰– ۲/۵ |  | TBM سپری |

## ۵. شرایط آب زیرزمینی

آب زیرزمینی علاوه بر هوازدگی، شستشو، کاهش زبری سطح و تضعیف سنگ‌های حساس به آب، با افزایش فشار منفذی و کاهش تنش موثر، باعث کاهش مقاومت سنگ می‌شود [٤]. حفر تونل در سنگ‌های کارستی و در زیر سطح ایستابی علاوه بر مشکلات پایداری می‌تواند توجیه اقتصادی و زمانی اجرای طرح را نیز تهدید کند. پوشش بتنی این تونل‌ها با درنظر گرفتن فشار

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

هیدرواستاتیکی اعمالی، طراحی شده و TBM مناسب با توجه به فشار هیدرواستاتیکی و نیز نفوذپذیری سنگ انتخاب می‌شود. TBMهای باز قادر به تحمل حداکثر ۱/۵ مگاپاسکال فشار آب هستند، به‌طوری‌که شدت جریان آب از سینه کار تونل بیش‌تر از ۱۷ لیتر بر ثانیه برای هر متر قطر تونل نباشد، از طرفی حداکثر مقدار فشار آب برای TBMهای سپری بیش‌تر از انواع باز است و تقریباً ۳/۵ مگاپاسکال است [۳۲]، [۳٤]. وجود آب می‌تواند آسیب‌های جدی به سیستم‌های الکتریکی و مکانیکی TBM و سیستم پشتیبانی آن وارد سازد و موجب توقف عملیات حفاری، کاهش راندمان حفاری و فرسودگی TBM شود. از طرف دیگر غرقاب شدن تونل، توقف عملیات حفاری، افزایش زمان و هزینه‌های ساخت، خشک شدن چشمه‌ها در منطقه و مشکلات زیست محیطی، از پیامدهای برخورد با زون‌های کارستی و هجوم آب به داخل تونل است [۳٤]، [۳۵]. گسترش سنگ‌های کربناته دوران کرتاسه و حضور گسل‌های معکوس و شکستگی‌های زیاد در مسیر تونل سبزکوه و هم‌چنین نزولات جوّی فراوان در این منطقه می‌تواند دلیلی بر وجود کارست در مسیر تونل باشد. زون‌های خرد شده و حفرات کارستی، کارکرد سیستم گریپری TBM باز را مختل می‌کنند. بنا بر این استفاده از یک TBM سپری که هم‌زمان با حفاری، نگه‌داری پیوسته و آب‌بند تونل را نیز فراهم سازد، ضروری است. هم‌چنین TBM سپری باید قابلیت اجرای پیش تزریق[۱] مؤثر در طول مسیر تونل را داشته باشد. نتایج به‌دست آمده از پژوهش‌های هیدروژئولوژی و بررسی وضعیت آب زیرزمینی در گمانه‌های اکتشافی حفاری شده در مسیر تونل، حاکی از نفوذپذیری کم تا متوسط توده‌های سنگی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه است. شکل ٦ الف نحوه تغییر فشار هیدرواستاتیک وارد بر پوشش بتنی با تغییر میزان نفوذپذیری توده سنگ مسیر تونل سبزکوه را برای سه زون I، II و III نشان می‌دهد. اشلایس این تغییر فشار را بر اساس روابط ارائه شده ترسیم کرده است [۳٦]، [۳۷]. هم‌چنین در شکل ٦ ب بافت اسفنجی در بخش آهکی سازند خانه‌کت که بیان‌گر مراحل توسعه کارست است، نشان داده شده است.

زون‌های گسلی و خرد شده در مسیر تونل باعث گیر افتادن کله حفار TBM و انحراف آن از مسیر تونل، ناپایداری و ریزش سینه کار تونل، افزایش بیش شکستگی و تغییرشکل‌های حاصل از مچاله‌شوندگی و یا تورم سنگ‌ها، ناپایداری مراحل احداث و افزایش جریان آب

۱. Pre-grouting

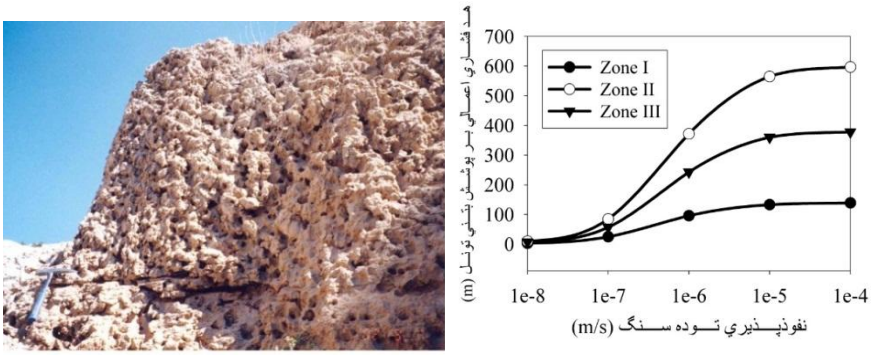
[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

زیرزمینی به داخل تونل می‌شوند [٤]. TBMهای سپری و خصوصاً انواع دوسپری آن به خاطر ایمنی و سرعت بیش‌تر و نیز انجام عملیات به‌سازی در ناحیهٔ گسلی از داخل سپر برای عبور از نواحی گسله و خرد شده تونل، مناسب‌تر از TBMهای باز هستند [۱۳].

عرض زون‌های گسلی نیز می‌تواند در انتخاب نوع TBM مؤثر باشد. TBM باز قادر به عبور از یک زون گسلی به عرض کم‌تر از ۰/۹ متراست و به سختی می‌تواند از زون گسلی با عرض بین ۰/۹ تا ۹ متر عبور کند. هم‌چنین عبور این نوع ماشین از زون گسلی با عرض بیش از ۹ متر غیر ممکن است [۲۹].

چنان‌که در شکل ۲ مشاهده شد توده‌های سنگی مسیر تونل سبزکوه به‌علت شرایط خاص تکتونیکی منطقه زاگرس، گسله است و بخش خروجی تونل، دارای گسل‌خوردگی و خردشدگی شدیدتر است به‌طوری‌که دو محدودهٔ بِرِشی و خرد شده در سازند خانه‌کت در زون III مشاهده شده که متراژ این دو محدوده در شکل ۷ نشان داده شده است. بنا بر این شرایط زمین‌شناسی و تکتونیکی خاص حاکم بر مسیر تونل سبزکوه به انتخاب TBMهای سپری منجر می‌شود.



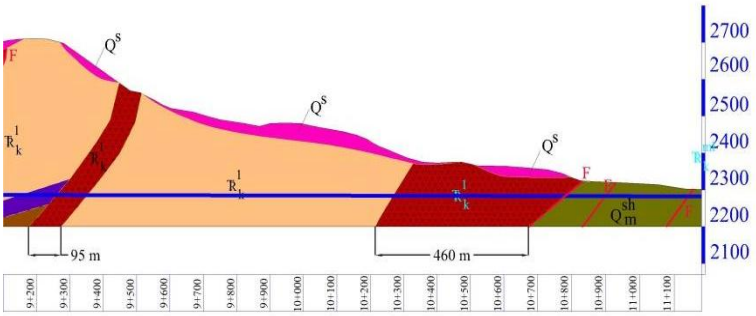

ب الف

**شکل ۳. الف) تغییرات فشار آب زیرزمینی اعمالی بر پوشش تونل، ب) بافت اسفنجی سازند خانه‌کت در زون III**

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

## ٦. زون‌های گسلی




**شکل ٤. محدودهٔ نواحی گسلی و خرد شده در زون III (سازند خانه‌کت)**

## ۷. مچاله‌شوندگی

مچاله‌شوندگی در اثر ترکیب خاصی از تنش‌های القایی و خصوصیات سنگ رخ می‌دهد و موجب هم‌گرایی وابسته به زمان تونل می‌شود. این پدیده بیش‌تر در سنگ‌هایی مانند مارن، شیست‌های آرژیلیتی و فیلیتی، و سنگ‌های دارای ترکیبات رس یا میکا مانند شیل‌های که در نواحی گسله و تحت روباره سنگین قرار دارند، رخ می‌دهد [۳۸]. این پدیدهٔ مخرب، مشکلات عدیده‌ای مانند ناپایداری سینه‌کار، عدم تأمین نیروی عکس‌العمل کافی برای پیش‌روی TBMهای باز به‌وسیلهٔ کفشک‌ها و انحراف TBM از مسیر واقعی تونل، کاهش سرعت پیش‌روی TBM و در شرایط بحرانی توقف کامل ماشین، گیر افتادن کله‌حفار، سپر و سیستم پشتیبانی، جابه‌جایی بیش از حد مجاز برای پروفیل تونل و آسیب دیدن سیستم نگه‌داری می‌شود. این پدیده را پیش‌تر ترزاقی (۱۹٤٦) [۳۹]، اینشتین (۱۹۸۹) [٤۰]، سینگ و همکاران (۱۹۹۲) [٤۱]، داب (۱۹۹۳) [٤۲]، آیدان و همکاران (۱۹۹۳) [٤۳]، شوبرت (۱۹۹۳) [٤٤]، بارتن و گریمستد (۱۹۹٤) [٤٥]، گوئل و همکاران (۱۹۹٥) [٤٦]، بارلا (۱۹۹٥) [٤۷] جتوا (۱۹۸٤) [٤۸] و هوک (۲۰۰۰) [٤۹] بررسی کرده‌اند. دالگیچ در سال ۲۰۰۲ با بررسی این پدیده در تونل‌های ترکیه، به‌کارگیری سیستم‌های نگه‌داری سنگین و سخت را برای جلوگیری از افزایش جابه‌جایی‌ها و گسیختگی در سنگ ضروری دانست [٥۰]. فرخ و همکاران نیز در سال ۲۰۰٦ نواحی بحرانی از لحاظ گیر افتادن سپر TBM را بر اساس روش هم‌گرایی-

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

هم‌جواری، برای مسیر تونل انتقال آب قمرود پیش‌بینی کردند [۵۱]. اگر شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی مسیر تونل، اجازه به‌کارگیری TBM باز را به‌دلیل زمین خرد شده و یا جریانی ندهد، از همین رو، استفاده از یک TBM سپری در چنین شرایطی ضروری است که باید با بازبینی دقیق مسیر و ارزیابی پتانسیل مچاله‌شوندگی انتخاب شود. در غیر این‌صورت مشکلات عمده‌ای برای حفاری تونل به‌وجود خواهد آمد که ناشی از گیر افتادن کله حفار، جمع‌شدن سپر و افزایش بار بر روی سگمنت‌های بتنی است [٤]، [۵۲]. کرمی و همکاران با بررسی توده‌های سنگی ضعیف، برشی و گسلی مسیر انتقال آب سبزکوه که تحت روباره زیادی قرار دارند، شدت مچاله‌شوندگی را در هر کدام از سه زون ژئوتکنیکی I، II و III مشخص کردند. [۵۳]. در جدول ۷ بر حسب شدت مچاله‌شوندگی، TBM مناسب برای هر زون پیشنهاد شده است.

مشکل اساسی برای پیش‌روی TBMهای باز در چنین شرایطی ناشی از محدودیت در نصب سیستم نگه‌داری مانند قاب‌های فولادی، مش سیمی و شاتکریت و هم‌چنین ناتوانی این سیستم‌ها در متوقف ساختن سریع هم‌گرایی زمین است.

**جدول ٦. پیشنهاد TBM مناسب بر اساس شدت مچاله‌شوندگی در هر زون**

| زون | شدت مچاله‌شوندگی | TBM پیشنهادی |
|---|---|---|
| I | کم تا شدید | تک سپری / دو سپری |
| II | شدید تا خیلی شدید | دو سپری |
| III | خیلی شدید تا بی نهایت | دو سپری |

با انتخاب یک TBM سپری خصوصاً نوع دوسپری به‌دلیل سرعت بیش‌تر برای حفاری تونل انتقال آب سبزکوه و در نظر گرفتن طراحی‌های خاص برای انجام اضافه‌حفاری[۱] و امکان کاهش قطر سپر و کله‌حفار، جلوگیری از توقف‌های بی‌مورد ماشین و استفاده از لغزنده‌هایی مانند بنتونیت و گریس بر روی سپر موجب عبور سریع و ایمن TBM دوسپری از چنین شرایطی خواهد شد. کرمی و همکاران اضافه حفاری بهینه را برای TBM دوسپری در شرایط مختلف حاکم بر منطقهٔ سبزکوه تحلیل کرده و نیروهای وارد بر سگمنت‌های پیش ساخته نصب شده در تونل را بررسی کردند [۵۳].

۱. Overcut

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

## بحث و تفسیر نتایج

به‌علت فعالیت‌های تکتونیکی که در ناحیه زاگرس وجود دارد، سنگ‌های رسوبی در برگیرنده تونل انتقال آب سبزکوه بیش‌تر به‌صورت چین خورده، گسله و زون‌های برشی هستند. سنگ‌ها در ورودی تونل بیش‌تر شامل مارن، شیل و آهک است که به‌تدریج در میانهٔ مسیر به آهک توده‌ای، آهک چرت دار و دولومیت تغییر می‌یابند. خروجی تونل شامل سنگ‌های دولـویت و آهک بـرشی است که شدیداً خرد شده و ضعیف هستند. بنا بر این برای انتخاب یک ماشین حفار تمام مقطع باید شرایط زمین‌شناسی و ژئومکانیکی حاکم در منطقه به‌خوبی شناسایی و بررسی شود. با تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و صحرایی و نیز انجام مشاهدات صحرایی، توده‌سنگی مسیر تونل، با استفاده از سه سیستم رایج طبقه‌بندی مهندسی (RMR، Q و GSI) رده‌بندی شد. نتیجه حاصل از طبقه‌بندی مهندسی، باعث تفکیک مسیر تونل به سه زون ژئوتکنیکی شد. TBM مناسب باید با در نظر گرفتن تأثیر شرایط نامطلوب زمین‌شناسی و ژئومکانیکی در این زون‌ها، انتخاب شود. در هر کدام از این سه زون، پارامترهایی چون مقاومت فشاری سنگ، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، شرایط هیدروژئولوژی، فاصله‌داری صفحات لایه‌بندی، ناپایداری دیواره‌ها و سینه کار تونل، شرایط زون گسله و پتانسیل مچاله‌شوندگی به‌طور مجزا بررسی و برای هر زون یکی از انواع TBM استفاده شده در سنگ (نوع باز، تک‌سپری و دوسپری) پیشنهاد شد (جدول ۸).

**جدول ۷. تأثیر پارامترها و عوامل مختلف زمین‌شناسی و ژئومکانیکی بر انتخاب TBM مناسب برای حفر تونل سبزکوه**

| پارامتر | TBM پیشنهادی |
|---|---|
| مقاومت فشاری ماده‌سنگ | S - D |
| RQD | D -O – S |
| فاصله‌داری درزه‌ها | O – S - D |
| ناپایداری سینه کار و دیواره تونل | O – S - D |
| آب زیرزمینی | S - D |
| گسل | S - D |
| مچاله‌شوندگی | D |
| کل مسیر | D |
| O: Open TBM, S: Single Shield TBM, D: Double Shield TBM | |

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

به‌نظر می‌رسد که ناپایداری‌های حاصل از درزه‌ها و گسل‌ها و نیز هم‌گرایی‌های ناشی از مچاله‌شوندگی به‌علت بالا بردن ریسک هزینه و زمان، تأثیر بیش‌تری در انتخاب نوع TBM داشته باشند. بنا بر این می‌توان گفت که به‌کارگیری یک TBM دوسپری به‌علت ساختار ایمن نسبت به TBM باز و سرعت بیش‌تر آن نسبت به TBM تک‌سپری برای حفاری مکانیزه تونل سبزکوه مناسب‌تر است. برای غلبه بر برخی مشکلات زمین‌شناسی در حین حفاری، این نوع TBM باید با یک سری امکانات و قابلیت‌های جانبی دیگر مانند قابلیت چال‌زنی و پیش تزریق در جلوی سینه‌کار، تعبیه پمپ‌های تزریق بنتونیت در پشت سپر برای روانکاری پیش‌روی آن نیز تجهیز شود تا حفاری تونل سبزکوه با مشکلات کم‌تری مواجه شود.

## نتیجه‌گیری

بر اساس تحقیقات صورت گرفته و با در نظر گرفتن نتایج مربوط به این مرحله از پژوهش‌های ژئوتکنیکی و بررسی‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های صحرایی، این موارد قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

با تعیین خواص ژئومکانیکی و شرایط زمین‌شناسی توده‌سنگ منطقهٔ پژوهش، و تفسیر نتایج حاصل از گمانه‌های ژئوتکنیکی، بررسی‌های آزمایشگاهی و تدقیق آن‌ها با مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، توده‌سنگی مسیر تونل با سه سیستم طبقه‌بندی مهندسی RMR، Q و GSI به سه زون ژئوتکنیکی تفکیک شد. سپس عمل‌کرد انواع TBMهای باز، تک‌سپری و دوسپری برای حفاری در سنگ در هر سه زون بررسی شد.

بر اساس تجزیه و تحلیل و تفسیر پارامترهای زمین‌شناسی، طبقه‌بندی مهندسی سنگ و تعیین مهم‌ترین خواص ژئومکانیکی سنگ‌بکر و توده‌سنگی مسیر تونل شامل: مقاومت سنگ-بکر، خصوصیات کمی و کیفی درزه‌ها، عرض نواحی برشی و گسله، سطح آب زیرزمینی و نیز شدت مچاله‌شوندگی، TBM دو سپری به‌عنوان مناسب‌ترین دستگاه برای حفاری تونل سبزکوه پیشنهاد شد.

با توجه به ضخامت زیاد روباره سنگی در مسیر تونل، انجام آزمایش‌های برجا برای تعیین تنش و تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگی، برای ارزیابی مقاومت سنگ تحت شرایط واقعی تنش به‌منظور جلوگیری از پدیده انفجار سنگ و مچاله‌شدگی پیشنهاد می‌شود.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

## منابع

۱. مدنی ح.، *تونل‌سازی، طراحی و اجرای سیستم نگه‌داری*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، (۱۳۷۷).

2. Graham P. C., "Rock Exploration for Machine Manufacturers", Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, vol. 1, Johannesburg, Balkema (1976) 173-80.

3. Morimoto T., Hori M., "Performance Characteristics of A Tunnel Boring Machine from the Geomechanical Viewpoint", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol. 23, No. 1 (1986) 55-66.

4. Barla G., Pelizza S., "TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions", GeoEng2000-International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 1, Melbourne (2000) 1471-1489.

5. Sapigni M., Berti M., "TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classifications", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, No. 6 (2002) 771-788.

6. DalgIç S., "Tunneling In Fault Zones, Tuzla Tunnel, Turkey", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, No. 5 (2003) 453-465.

7. Benardos A. G., Kaliampakos D. C., "A Methodology for Assessing Geotechnical Hazards for TBM Tunneling Illustrated by the Athens Metro, Greece", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 6 (2004) 987-999.

8. Gong Q. M., Zhao J., Jiao Y. Y., "Numerical Modeling of the Effects of Joint Orientation on Rock Fragmentation by TBM Cutters", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20, No. 2 (2005) 183-191.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

9. Gong Q. M., Jiao Y. Y., Zhao J., "Numerical Modeling of the Effects of Joint Spacing on Rock Fragmentation by TBM Cutters", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No.1 (2006) 46-55.

10. Gong Q. M., Zhao J., "Influence of Rock Brittleness on TBM Penetration Rate in Singapore Granite", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 22, No. 3 (2007) 317-324.

11. Gong Q. M., Zhao J., "Development of a Rock Mass Characteristics Model for TBM Penetration Rate Prediction", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46, No. 1 (2009) 8-18.

12. Yağız S., "Geotechnical Considerations on TBM Tunneling in Rock Mass", Proceeding of the 2nd International Conference on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (2009) 504-511.

13. Farrokh E., Rostami J., "Effect of Adverse Geological Condition on TBM Operation in Ghomroud Tunnel Conveyance Project", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 24, No. 4 (2009) 436-446.

14. Ramoni M., Anagnostou G., "Tunnel Boring Machines under Squeezing Conditions", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25 (2010) 139-157.

15. Ramoni M., Anagnostou G., "The Interaction Between Shield, Ground and Tunnel Support in TBM Tunnelling Through Squeezing Ground", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 44 (2010) 37-61.

16. Ramoni M., Anagnostou G., "Thrust Force Requirements for TBMs in Squeezing Ground", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 25 (2010) 433-455.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

۱۷. شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، *گزارش زمین شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه، مطالعات مرحله دوم* (۱۳۸٦).

18. Bieniawski Z. T., "Engineering Classification of Jointed Rock Masses" Trans. South African Institute Civil Engineering, 15 (1973).

19. Barton N., Lien R., Lunde J., "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", Rock Mech, Vol. 6, No. 4, (1974) 189-236.

20. Singh B., Goel R. K., "Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering", Elsevier (1999).

21. Hoek E. "Strength of Rock and Rock Masses", News Journal of ISRM, Vol. 2, No.2 (1994) 4 -16.

22. Hoek E., Kaiser P. K., Bawden W. F. "Support of Underground Excavations in Hard Rock", A. A. Balkema, Rotterdam (1995).

23. Hoek E., Brown E. T., "Practical Estimates of Rock Mass Strength", hit. Jr. Rock Mech. and Min. Sci., Pergamon, Vol. 34, No. 8 (1997) 1165-1186.

24. Maidl B., Schmid L., Ritz W., Herrenknecht M., "Hard Rock Tunnel Boring Machines", John Wiley, Berlin (2008).

۲۵. شرقی ع.، *استفاده از TBM باز در مصالح ریزشی و چگونگی مهار آن در تونل گاوشان*، ششمین کنفرانس تونل (۱۳۸۲).

26. ITA Working Group No. 14, "Guidelines for the Selection of TBM's" (2000) www.ita-aites.org.

27. AFTES, "New Recommendations on Choosing Mechanized Tunneling Techniques" (2000) www.ita-aites.org.

28. DAUB "Recommendations of Selecting and Evaluating Tunnel Boring Machines" (2000) www.ita-aites.org.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

29. Leonard J. W., "Problems of TBMs Encountering Soft or Fracture Rock and Attempts to Quantify the Limitations of Rock TBM Relationship", Journal of Advances in Tunneling Technology and Subsurface Use, Vol. 4, No. 4 (1984) 285-287.

30. Barton N., "TBM tunneling in Jointed and faulted rock", Balkema, Brookfield (2000) 173.

31. Grandori R., Jäger M., Antonini F., Vigl L.; "Evinos-Mormos Tunnel – Greece", RETC, San Francisco (1995) 747.

32. Bickel J. O., Kuesel T. R., "Tunnel Engineering Handbook", 2nd Edition (1996).

33. Palmstrom A., "RMi- a Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purposes", PHD thesis, Oslo University, Norway (1995).

34. Laughton C., "Geotechnical Problems Encountered by Tunnel Boring Machines Mining in Sedimentary Rocks", AITES- ITA World Tunnel Congress, Istanbul, Turkey, (2005) 857-862.

35. Zarei H. R., Uromeihy A., Sharifzadeh M., "Identifying Geological Hazards Related to Tunneling in Carbonate Karstic Rocks - Zagros, Iran", Arabian Journal of Geosciences, , Volume 5, Issue 3 (2012) 457-464.

36. Schleiss A. J., "Design of Concrete Linings of Pressure Tunnels and Shafts for External Water Pressure", Tunneling Asia, New Delhi, India (1997) 291-300.

37. Schleiss A. J., "Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts", The International Journal on Hydropower and Dams, Issue 3, Vol. 4 (1997).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

38. Shalabi F. I., "FE Analysis of Time-Dependent Behavior of Tunneling in Squeezing Ground Using Two Different Creep Models", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 20 (2005) 271-279.

39. Terzaghi K., "Rock defects and loads on tunnel supports", In: Proctor, R.V., White, T.L. (Eds.), Rock Tunneling with Steel Supports, Commercial Shearing and Stamping, Youngstown, OH, Vol. 1, (1946) 15- 99.

40. Einstein H. H., "Design and analysis of underground structures in swelling and squeezing rocks", Underground Structures Design and Instrumentation Developments in Geotechnical Engineering (1989) 202-262.

41. Singh B., Jethwa J. L., Dube A. R., Singh B. "Correlation between Observed Support Pressure and Rock Mass Quality", Tunneling Underground Space Technology, Vol. 7, No. 1 (1992) 59-74.

42. Dube A. K., "Squeezing Under High Stress Conditions", In: Pasamehmetoğlu, A.K. et al., (Eds.), Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Balkema, Rotterdam (1993) 751-757.

43. Aydan Ö., Takagi T., Kawamoto T., "The Squeezing Potential of Rocks Around Tunnels; Theory and Prediction", Rock Mech. Rock Eng., Vol. 26, No. 2, (1993) 137-163.

44. Schubert W., Schubert P., "Tunnels in Squeezing Rock: Failure Phenomena and Counteractions", Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering. ISRM Int. Symp., Turkey (1993) 479-484.

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]

45. Barton N., Grimstad E., "The Q-System Following Twenty Years of Application in NMT Support Selection", Felsbau, Vol. 12, No. 6 (1994) 428-436.

46. Goel R. K., Jethwa J. L., Paithankar A. G., "Indian Experiences with Q and RMR System" Tunneling Underground Space Technol. Vol. 10, No. 1 (1995) 97-109.

47. Barla G., "Squeezing Rocks In Tunnels", Int. Soc. Rock Mech., News J. Vol. 2, No. 3- 4 (1995) 44-49.

48. Jethwa J. L., Singh B., Singh B., "Estimation of Ultimate Rock Pressure for Tunnel Linings under Squeezing Rock Conditions-A New Approach", Design and Performance of Underground Excavations, ISRM Symposium, Cambridge, (1984) 231-238.

49. Hoek E., Marinos P., "Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses", Tunnel and Tunnelling International (2000) part one: 45-51, part two: 33-36.

50. Dalgıç S., "Tunneling in Squeezing Rock, The Bolu Tunnel", Anatolian Motorway, Turkey, Engineering Geology, Vol. 67 (2002) 73-96.

51. Farrokh E., Mortazavi A., Shamsi Gh., "Evaluation of Ground Convergence And Squeezing Potential in the TBM Driven Ghomroud Tunnel Project", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21 (2006) 504-510.

52. Dowden B. P., Cass T. D., "Shielded TBM's Matching the Machine to the Job", Proc. Rapid Excavations and Tunneling Conference, Seattle, WA (1991) 787-805.

۵۳. کرمی م.، فرامرزی ل.، رئیسی د.، *ارزیابی پتانسیل مچاله‌شوندگی و تعیین اضافه‌حفاری بهینه برای TBM دوسپری در تونل انتقال آب سبزکوه*، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران (۱۳۹۰).

[ Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-30 ]

[ DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.2.6.4 ]