

تعیین موقعیت زون گسله پورکان-وردیج در قطعه دوم تونل انتقال آب کرج با استفاده از پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین حفر تونل

جعفر حسن پور^{۱*}؛ زهره محمدیاری^۲؛ اکبر چشمی^۱

۱- عضو هیئت علمی دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین شناسی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲

دریافت: ۱۳۹۴/۰۳

چکیده

معمولاً پارامترهای اپراتوری و پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین‌های حفر تونل رابطه معناداری با شرایط زمین شناسی مسیر تونل نشان می‌دهند. این رابطه مبنای بسیاری از روابط و مدل‌های تجربی برای پیش بینی عملکرد ماشین می‌باشد. با مشخص بودن شرایط زمین شناسی مسیر تونل با استفاده از این مدل‌ها می‌توان تخمینی از نحوه عملکرد ماشین به دست آورد. بدیهی است به صورت معکوس، با مشخص بودن پارامترهای عملکرد واقعی ماشین در یک تونل حفر شده، نیز می‌توان به صورت غیرمستقیم تا حدودی پی به شرایط زمین شناسی مسیر تونل برد. این موضوع به ویژه در تونل‌هایی که با استفاده از ماشین‌های حفر تونل سپردار حفاری می‌شوند، می‌تواند برای شناخت ویژگی‌های زمین حفر شده بسیار مفید باشد. در این مقاله نیز با توجه به ابهاماتی که به ویژه در مورد موقعیت گسل فعال پورکان-وردیج در مسیر تونل انتقال آب کرج (قطعه‌ی دوم) وجود دارد، سعی شده است با استفاده از برخی شاخص‌ها از جمله پارامترهای اپراتوری و پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین به صورت غیرمستقیم شرایط زمین شناسی مسیر تونل در محدوده‌ی اطراف گسل تفسیر گشته و ضخامت و موقعیت زون گسله تعیین گردد.

کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، پکر، بازه تحت فشار، فشار شکست

۱- مقدمه

یکی از مخاطرات زمین شناسی که معمولاً در پروژه‌های تونلسازی باعث ایجاد مشکلاتی در پایداری تونل به هنگام حفر تونل می‌گردد، حضور زون‌های خردشده گسلی است. علاوه بر این، اگر گسل متقاطع با تونل، در زمره گسل‌های پویا با احتمال جابجایی در طول دوره بهره برداری تشخیص داده شود، لازم است هنگام اجرای تونل، تمهیدات لازم برای کاهش خسارات ناشی از فعالیت مجدد گسل اندیشیده شود. بنابراین لازم است محل دقیق زون گسله مشخص گردد. از سوی دیگر در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های سپردار، برداشت اطلاعات زمین شناسی مسیر تونل بسیار محدود بوده و فقط منحصر به بازدیدهای دوره‌ای از سینه‌ی کار تونل می‌شود که معمولاً بسیار دشوار بوده و در بسیاری موارد به دلایل مختلف از جمله ناپایدار بودن سینه کار، وجود آب و گاز و یا عدم توقف کافی ماشین غیر ممکن می‌گردد. بررسی مصالح کنده شده از سینه کار نیز از جمله دیگر راه‌های کسب اطلاعات زمین شناسی می‌باشد که اطلاعات حاصل از آن منحصر به تغییرات لیتولوژی و ویژگی‌های ماده سنگ بوده و کامل نمی‌باشد. تشخیص زونهای گسله با استفاده از مصالح کنده شده معمولاً بسیار دشوار می‌باشد، اما ممکن است به ندرت بتوان نشانه‌هایی از این زونها را در مصالح کنده شده تشخیص داد (از جمله رگه‌های کوارتزی پرکننده شکستگیها یا سطوح صیقلی و براق مربوط به سطوح گسله). بنابراین لازم است در بخشهای حساس از مسیر تونلها، از جمله در زونهای گسله، از روش‌های غیر مستقیم نیز به بررسی ویژگی‌های زمین شناسی مسیر تونل پرداخت تا نتایج مطلوبتری حاصل گردد. یکی از راهکارها بررسی تغییرات پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین و تفسیر این تغییرات بر اساس شرایط زمین شناسی مسیر تونل می‌باشد. در این زمینه تاکنون مطالعات زیادی صورت نگرفته است. مهم‌ترین مطالعه‌ی مربوط به تحقیقات صورت گرفته توسط فوکویی^۱ و اکوبو^۲ می‌باشد که در این تحقیق محققین برای تشخیص ویژگی‌های زمین شناسی مسیر حفر شده‌ی تونل، روابطی میان مقاومت سنگ و پارامترهای گشتاور (و نیروی رانش) کاترهد و نرخ نفوذ دیسک کاتر در سنگ توسعه داده‌اند [۱،۲].

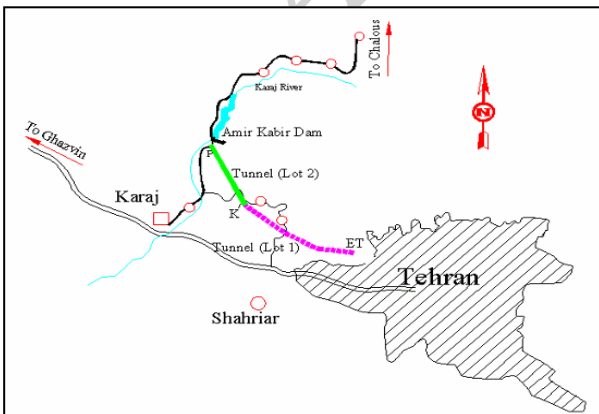
در پروژه‌ی تونل انتقال آب کرج (قطعه‌ی ۲) بعد از اتمام حفاری تونل، کارفرمای طرح بررسی دقیق‌تر گسل فعال

پورکان-وردیج را که بر اساس مطالعات زمین شناسی قبل از اجرا، در حدود کیلومتر ۶۵۰۰ مسیر تونل را قطع می‌نماید، به منظور پیش بینی راهکارهای لازم جهت کاهش خسارات ناشی از فعالیت این گسل در طول دوره بهره برداری، الزام نمود. با توجه به هزینه‌ی بالای راهکارهای اجرایی لازم بود که محل زون تحت تأثیر این گسل تا حد امکان به طور دقیق تعیین گردد. لازم به توضیح است که در مطالعات قبل از اجرا موقعیت گسله بر اساس تفسیر برداشت‌های سطحی بر روی برشهای زمین شناسی ترسیم شده است که به دلیل عمق زیاد تونل و تغییرات ساختاری در عمق، موقعیت محل تقاطع گسل با تونل و همچنین ضخامت زون خردشده آن دقیق نیست.

در این تحقیق به منظور شناخت موقعیت و ضخامت زون گسلی مورد نظر سعی شده است با تفسیر تغییرات پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین از دیدگاه زمین شناسی و با در نظر گرفتن شاخص‌های مختلف، ویژگی‌های زمین در مسیر حفر شده‌ی تونل مشخص گردد. در این راستا طولی حدود ۱۰۰۰ متر از تونل که گسل فعال پورکان - وردیج را دربرمی‌گیرد، از این نظر مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- معرفی پروژه

سامانه انتقال آب غرب تهران به منظور انتقال آب شرب شهر تهران از سد امیر کبیر طراحی و اجرا می‌شود. مهم‌ترین بخش این پروژه احداث تونلی طویل با طول تقریبی ۳۰ کیلومتر می‌باشد که در دو قطعه‌ی مجزا اجرا شده است. قطعه‌ی دوم این تونل به طول ۱۴ کیلومتر در ادامه قطعه‌ی اول از نقطه‌ای به نام 'k' در دره‌ی کندر شروع و تا نقطه‌ای به نام BR در نزدیکی بندتنظیمی سد کرج واقع در خوزنکلا ادامه می‌یابد [۳] (شکل ۱).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی پروژه‌ی تونل انتقال آب کرج

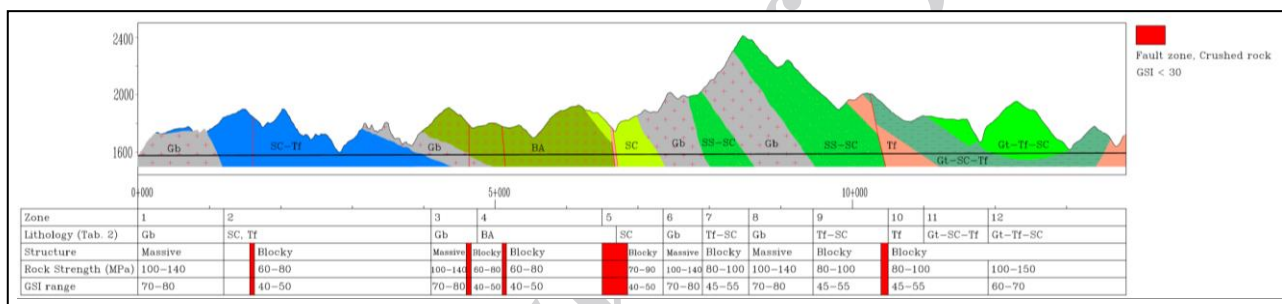


شکل ۲: ماشین حفر تونل در پروژه کرج

ماشین مورد استفاده در این پروژه از نوع سپردار با سپر دابل (تلسکوپي)، با قطر ۴٫۶۵ متر و ساخت شرکت هرکنشت^۳ آلمان می‌باشد. این دستگاه با کله‌ی حفاری مسطح شامل ۳۱ دیسک کاتر با قطر ۴۳۲ میلیمتر (۱۷ اینچ) می‌باشد (شکل ۲). توان کله‌ی حفر در این ماشین ۱۲۵۰ کیلوواتن طراحی شده و توانایی اعمال گشتاور حدود ۱۰۲۹ کیلوواتن متر را در سرعت دورانی ۱۱ دور بر در دقیقه دارد.

۳- زمین شناسی مسیر تونل

گستره‌ی قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج، از دیدگاه چینه شناسی در برگیرنده‌ی مجموعه‌های رسوبی- آتشفشانی مختلفی از سازند کرج است. این مجموعه‌ها وابسته به بالاترین بخش توف میانی و بخش‌های زیرین تا میانی شیل آسارا از سازند کرج هستند که در قلمرو سنی ائوسن پسین تا میانی قرار می‌گیرند.



شکل ۱: برش زمین شناسی در راستای محور تونل وموقعیت گسل‌های شناسایی شده در مطالعات قبل از اجرا (مهندسین مشاور ساحل)

همراه باشد که این گسیختگی در مسیر تونل نیز ایجاد خواهد شد. گسل پورکان-وردیج با ساز و کار راندگی و راستای عمومی شمال غربی - جنوب شرقی و شیب به سمت شمال شرقی، با اندکی فاصله از پهنه‌ی گسلی شمال تهران شروع و پس از گذر از روستای وردیج، از شمال پورکان در جاده‌ی چالوس مجدداً به کوهستان منتهی می‌شود [۴]. (شکل ۴).



شکل ۲: نمایی از گسل پورکان - وردیج در مسیر تونل

سنگ شناسی آن‌ها به طور کلی شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه سنگ، کنگلومراهای ریزدانه، لای سنگ و گدازه و حتی آگلومرا می‌باشد که به طور جانبی تغییرات چشمگیری دارند. از دیگر ویژگی‌های زمین شناختی گستره می‌توان به وجود توده‌های عظیم از سنگ‌های نفوذی، دایک‌های آذرین و حتی دایک‌های سیلیسی اشاره کرد که در میان واحدهای رسوبی و یا در راستای برخی از گسل‌ها بیرون زده‌اند. برش زمین شناسی که در راستای این تونل ترسیم شده است، در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که در این برش زمین شناسی نیز مشاهده می‌شود، چند گسل مسیر تونل را قطع می‌نمایند که از میان آن‌ها مهمترین گسل، راندگی پورکان-وردیج است [۴].

۴- گسل پورکان-وردیج

گسل پورکان- وردیج به دلیل اینکه شاخه‌ای از گسل فعال شمال تهران می‌باشد، گسلی فعال به حساب می‌آید. جنبش‌های زمین لرزه‌ای این گسل می‌تواند با گسیختگی

سنگ دست یابد. از این رو، معمولاً پارامترهای اپراتوری و عملکرد ماشین دارای ارتباط تنگاتنگی با شرایط زمین شناسی می‌باشند. بنابراین یکی از راهکارهای اصلی در این تحقیق، به منظور شناسایی زون گسله‌ی پورکان-وردیج، بررسی تغییرات پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین در محدوده‌ی زون عملکرد این گسل می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ نوسانات پارامترهای مختلف اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین در محدوده اطراف این گسل نشان داده شده است.

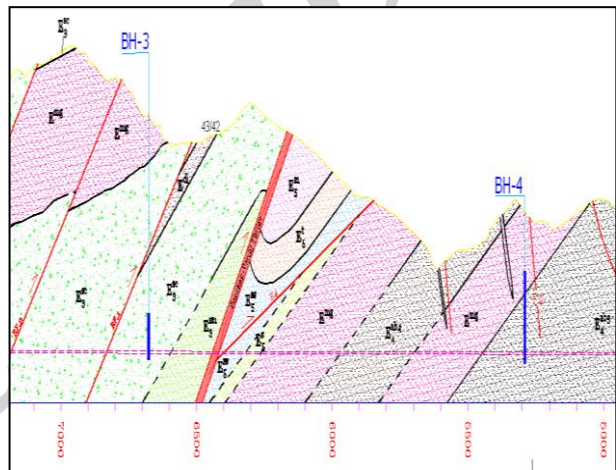
یکی از پارامترهای عملکرد ماشین که دارای ارتباط مستقیم با شرایط زمین است، نرخ نفوذ دیسک کاتر در سنگ است. با ثابت فرض نمودن سایر پارامترها مانند نیروی رانش کاتر، نوسانات نرخ نفوذ می‌تواند تا حدودی نشان دهنده‌ی تغییرات شرایط زمین شناسی (تغییر در مقاومت ماده‌ی سنگ و میزان خردشدگی توده‌ی سنگ) باشد. بنابراین بررسی تغییرات این پارامتر می‌تواند نشانه‌ی خوبی برای شناخت زون‌های خردشده در مسیر تونل نیز باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، یک تغییر محسوس در نرخ نفوذ ماشین یا $P(m/h)$ در مترای بین ۶۱۰۰ تا ۶۴۰۰ قابل مشاهده می‌باشد و با وجود کاهش دور ماشین در همین مقطع، نرخ نفوذ افزایش یافته است. این می‌تواند بدین معنی باشد که اپراتور به دلیل برخورد با زمین خردشده‌تر، اگرچه قابلیت نفوذ بیشتری وجود داشته است، تلاش نموده است با کاهش دور دستگاه ضمن جلوگیری از ناپایداری‌های احتمالی در سینه‌ی کار و جداره‌ی تونل، با در نظر گرفتن ظرفیت نوار نقاله، از بالا رفتن حجم مواد کنده شده اجتناب نماید.

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود از میان پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین، شاخص نفوذ یا (FPI) ، کاهش محسوس‌تری را در همین محدوده مترای ۶۱۰۰ تا ۶۴۰۰ نشان می‌دهد، به طوریکه مقادیر کوچکتر از ۴ نیز در این محدوده به فراوانی ثبت شده است. پارامتر FPI یک پارامتر ترکیبی است که براساس نرخ نفوذ ماشین و دو پارامتر مربوط به ماشین یعنی نیروی پیشران و دور دستگاه از طریق رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود.

$$FPI = \frac{60 F_n RPM}{1000 ROP} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بالا ROP نرخ نفوذ دستگاه (m/h) ، RPM دور دستگاه و F_n نیروی رانش کاترهد $(kN/cutter)$ است [۶].

گسل پورکان سبب رانده شدن عضوهای قدیمی‌تر سازند کرج روی عضوهای جوان‌تر شده است و در مقایسه با گسل‌های اطراف مثل گسل نمرک که تنها در یک زیرعضو از سازند کرج عمل کرده است، جابه‌جایی بیشتری را دارد. بنابراین پهنه گسل پورکان-وردیج عریض‌تر است و خود متشکل از ریزگسل‌هایی است که سبب توزیع غیر یکنواخت دگرریختی در پهنه شده است و ترکیبات سنگ شناسی متفاوتی را از اعضاها و زیر عضوهای سازند کرج در آن جای داده است. در برش زمین شناسی مسیر تونل (مطالعات مرحله‌ی دوم، قبل از اجرای تونل)، موقعیت برخورد گسل پورکان-وردیج با تونل حدود مترای ۶۴۵۰ تعیین شده است (شکل ۵). همچنین گسل $F4$ در مترای ۶۴۰۰ از تونل تعیین محل شده است [۵].



شکل ۳: برش زمین شناسی مسیر تونل در مقطع نزدیک به گسل پورکان-وردیج (مهندسین مشاور ساحل)

۵- شناخت ویژگی‌های زمین شناسی مسیر تونل با

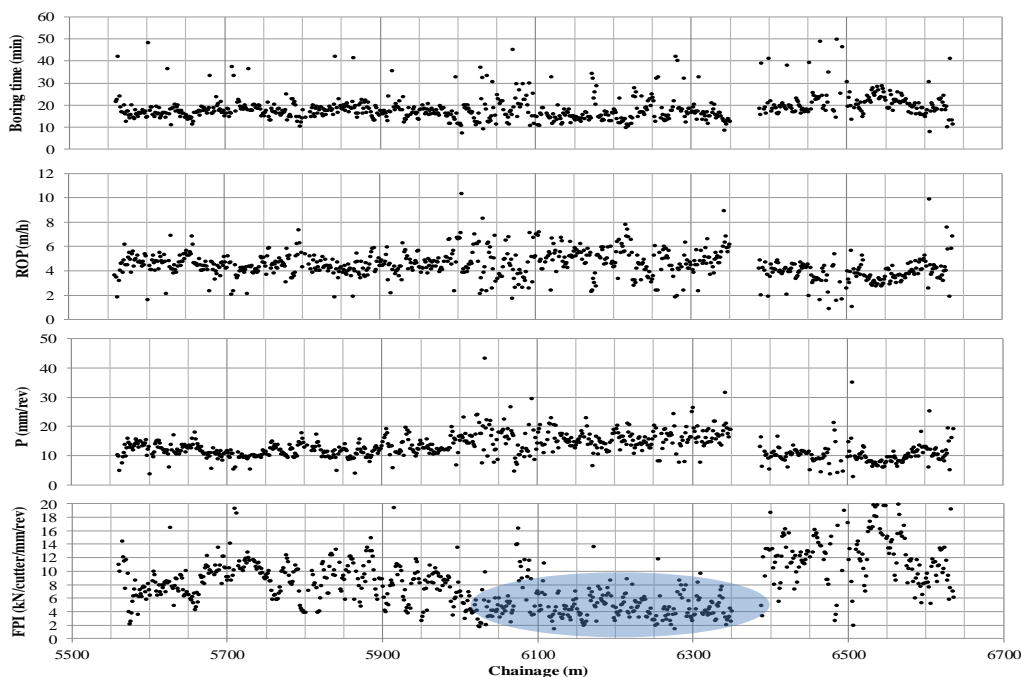
استفاده از داده‌های حین اجرا

همانطور که اشاره شد در این تحقیق به منظور شناسایی دقیقتر زون گسله پورکان-وردیج، بخشی از مسیر تونل به طول تقریبی ۱۱۰۰ متر در اطراف گسل مورد بررسی قرار گرفته و ویژگی‌های زمین شناسی آن با استفاده از پارامترهای ماشین و سایر برداشت‌های ثبت شده در حین اجرا مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نتایج این بررسی‌ها ارائه می‌گردد.

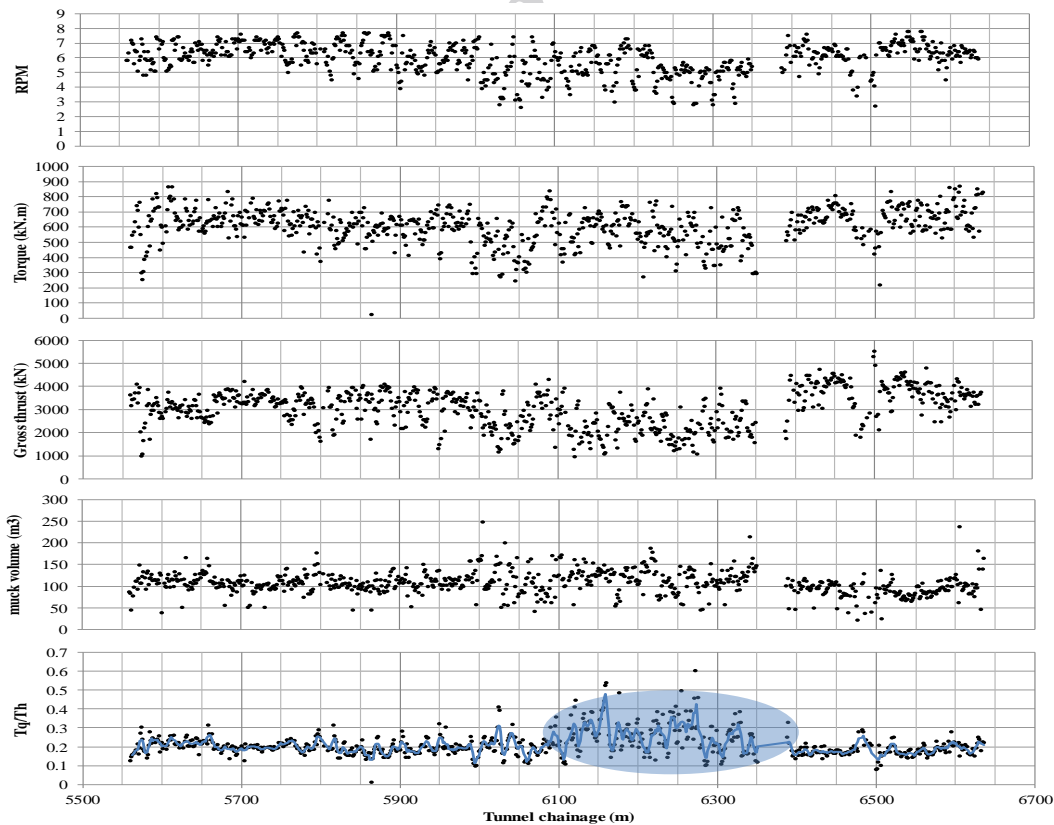
۵-۱- پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین

یک اپراتور مجرب، با تغییر شرایط زمین شناسی، تلاش می‌نماید با کنترل پارامترهایی مانند فشار جک‌های پیشران، دور دستگاه و گشتاور ماشین، با رعایت ایمنی و سلامت ماشین، به بهترین عملکرد و بیشترین نرخ نفوذ ماشین در

بنابراین با توجه به اینکه در رابطه FPI علاوه بر نرخ نفوذ، اثر پارامترهای اپراتوری مهم مانند دور دستگاه و نیروی رانش نیز وجود دارد، می‌توان انتظار داشت که این پارامتر تغییرات شرایط زمین شناسی را بهتر نشان دهد [۷].



شکل ۴: تغییرات پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین در طول تونل



شکل ۵: تغییرات پارامترهای اپراتوری در طول تونل

همانطور که مشاهده می‌شود، در این رده بندی، توده سنگ‌ها بر اساس ویژگی‌های آن‌ها (استحکام ماده‌ی سنگ و ساختار توده سنگ) به شش گروه مختلف از نظر ویژگی‌های حفر پذیری تقسیم شده‌اند. در جدول ۱، از بالا به پایین، شرایط حفر پذیری توده سنگ مطلوبتر و برعکس شرایط پایداری توده سنگ جداری تونل، نامطلوبتر می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود در این روش جهت طبقه بندی حفرپذیری زمین از رابطه‌ی میان پارامتر FPI و ویژگی‌های زمین شناسی توده سنگ‌ها استفاده شده است.

بر اساس طبقه بندی حفرپذیری زمین می‌توان این بخش از مسیر تونل (یعنی ۱۱۰۰ متر مورد بررسی) را در سه کلاس B-III، B-IV و B-V طبقه بندی نمود. شکل ۹ موقعیت تقریبی این کلاس‌ها را در مسیر تونل نشان می‌دهد. چنانکه در این شکل ملاحظه می‌شود، از متر ۶۰۰۰ تا ۶۴۰۰ از مسیر تونل مقادیر FPI پایین بوده و در کلاس B-V از طبقه بندی فوق قرار می‌گیرد. بر اساس جدول ۱ و شکل ۱ کلاس B-V معادل توده‌ی سنگ‌های خرد شده و زون‌های گسله در نظر گرفته می‌شود.

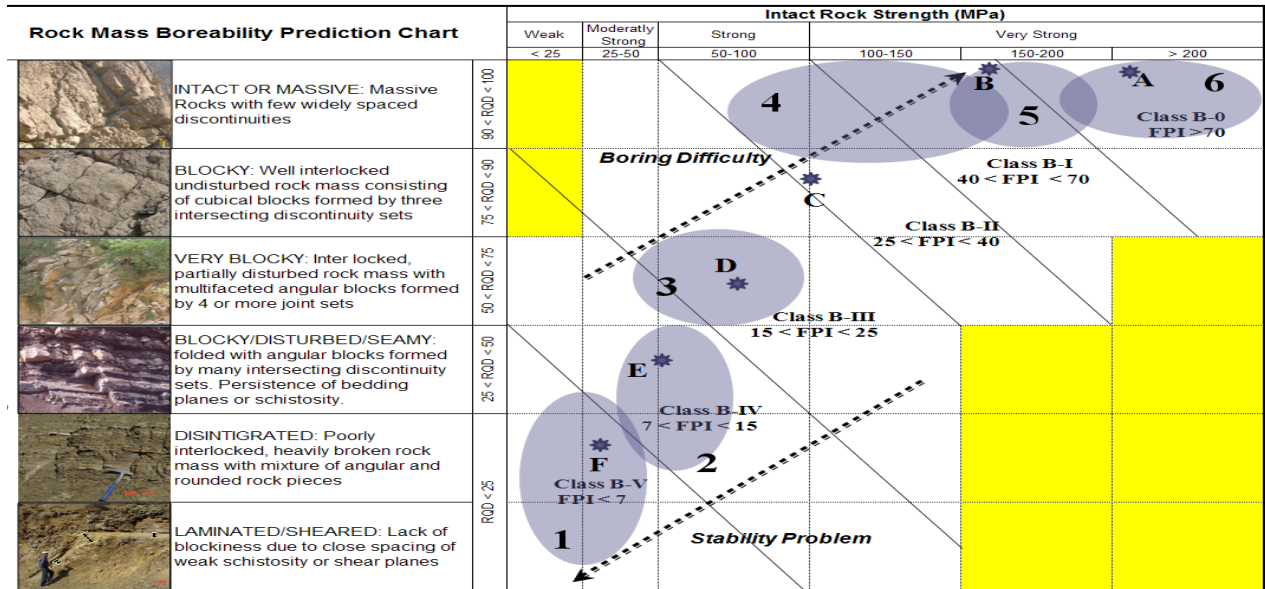
از میان پارامترهای اپراتوری نیز، همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نسبت گشتاور دستگاه به نیروی رانش (Tq/Th)، تمایز محسوسی را در متر ۶۱۰۰ تا ۶۴۰۰ نشان می‌دهد، به طوری که فقط در این فاصله، این نسبت به مقادیر فراتر از ۰٫۳ رسیده است. معمولاً در زمین‌های خرد شده‌تر نیاز به نیروی رانش کمتری برای خردایش سنگ می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل نفوذ بیشتر دیسک‌ها و بعضاً ناپایدار بودن سینه‌ی کار و افزایش حجم مواد کنده شده در جلوی کاترهد، گشتاور مورد نیاز دستگاه افزایش می‌یابد. اپراتور در چنین مواقعی برای کنترل گشتاور دستگاه، دور کاترهد را کاهش می‌دهد.

۲-۵- حفرپذیری توده سنگ‌ها

حفرپذیری توده سنگ‌ها با ویژگی‌های رفتاری و مقاومتی توده سنگ‌ها در ارتباط مستقیم است و می‌تواند شاخصی برای زونهای خرد شده نیز باشد. یکی از رده بندی‌هایی که اخیراً در زمینه‌ی حفرپذیری توده سنگ‌ها ارائه شده است، رده بندی تجربی است که بر اساس اطلاعات چند پروژه‌ی داخلی (از جمله قطعه‌ی اول تونل انتقال آب کرج) و خارجی توسط حسن پور و همکاران [۷] ارائه شده است. اصول این رده بندی در جدول ۱ و شکل ۸ ارائه شده است.

جدول ۱: رده بندی حفرپذیری توده‌ی سنگ‌ها [۳]

رده‌ی حفرپذیری توده‌ی سنگ	شاخص نفوذ صحرایی (FPI) (kN/mm/rev)	توصیف حفرپذیری	شرایط پایداری	صعوبت نسبی برای کاربرد TBM	مثال
B-0	> ۷۰	دشوار	کاملاً پایدار	دشوار	توده‌ی سنگ‌های بسیار بسیار مستحکم و توده‌ای و بدون درزه مانند کوارتزیت‌ها
B-I	۴۰-۷۰	کمی دشوار	پایدار	متوسط	سنگ‌های آذرین و دگرگونی بسیار مستحکم و با درزه داری اندک (گنیس، گابرو، دیوریت و ...)
B-II	۲۵-۴۰	نسبتاً خوب	ناپایداری‌های جزئی	خوب	سنگ‌های آواری و آذرآواری مستحکم و درزه دار (توف، توفیت، آگلومرا، آهک و دولومیت‌های متوسط تا ضخیم لایه)
B-III	۱۵-۲۵	خوب	ناپایداری‌های موضعی	بسیار خوب	توده‌ی سنگ‌های نیمه مستحکم تا مستحکم و شدیداً درزه دار (لایه‌های نازک تا متوسط از آهک‌های شیلی و ماسه سنگ)
B-IV	۷-۱۵	بسیار خوب	ناپایداری‌های عمده	خوب	توده‌ی سنگ‌های ضعیف درزه دار و خرد شده یا توده‌ی سنگ‌های متورق مانند تناوب‌های نازک شیل و ماسه سنگ
B-V	< ۷	عالی	ریزش کلی، لهیدگی زمین	همراه با مشکل	سنگ‌های بسیار ضعیف و شدیداً خرد شده و توده‌ی سنگ‌های کاملاً متورق (شیل، اسلیت، گرافیت شست و ...)



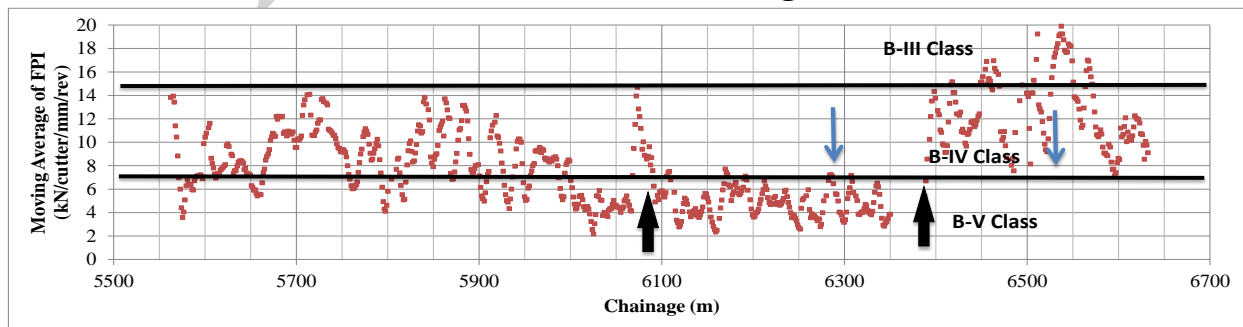
- Note:
- 1) Very Foliated shales, slates and schistose graphite schists of Ghomrood project;
 - 2) Alternation of shale and sandstone layers in Ghomrood project;
 - 3) Tuffs, tuffites and sandstone layers of Karaj project;
 - 4) Carbonate rocks in Zagross and Ghomrood projects;
 - 5) Thick quartzite veins in Ghomrood project;
 - 6) Massive igneous and metamorphic rocks in Manapouri

شکل ۸: مدل تجربی برای پیش بینی عملکرد ماشین و طبقه بندی حفری توده‌ی سنگ [۳، ۶]

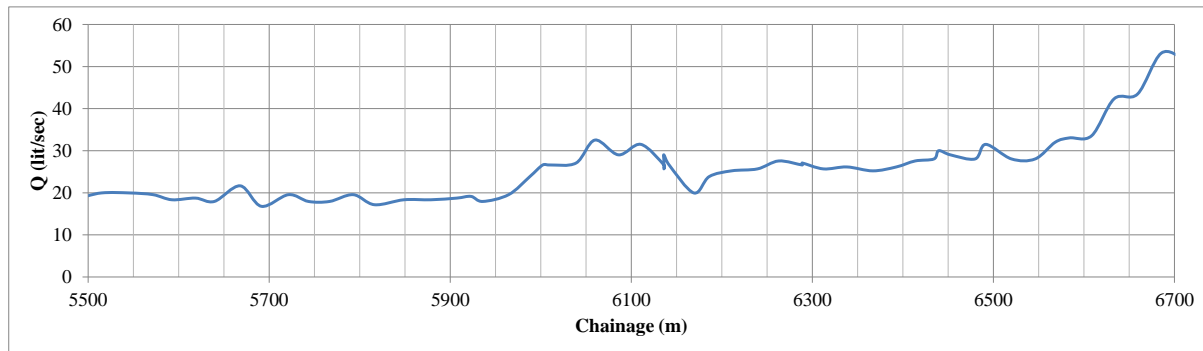
تراوایی توده‌ی سنگ نیز بستگی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با توجه به ثابت بودن هد آب، از مترای ۶۰۰۰ به بعد میزان تراوایی توده‌ی سنگ افزایش یافته است که نشان دهنده خردشدگی بیشتر توده‌سنگ در این محدوده‌هاست. از سوی دیگر مطالعه‌ی پوشش بتنی تونل نیز نشان می‌دهد در محدوده‌ی ۶۲۲۹ تا ۶۳۷۲ سگمنت‌های نصب شده در اثر تنش‌های روباره دچار شکستگی شده‌اند. بنابراین در این محدوده فشار اعمال شده بیشتر از نقاط دیگر است که این می‌تواند دلیلی دیگر بر وجود زون گسله و مقادیر بیشتر بار سنگ در این بخش باشد.

۵-۳- سایر شاخص‌ها

علاوه بر پارامترهای ماشین، می‌توان از برخی شاخص‌های دیگر نظیر میزان آب ورودی به تونل و شکستگی قطعات بتنی نصب شده در جداره تونل و یا میزان خوردند گراول پشت پوشش بتنی تونل نیز برای شناسایی ویژگی‌های مهندسی توده سنگها استفاده نمود. در شکل ۱۰ تغییرات آب ورودی به تونل (به صورت تجمعی) با پیشروی ماشین نشان داده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، با رسیدن تونل به مترای ۶۰۰۰ یک افزایش مشخص در آب ورودی به تونل مشاهده می‌شود که البته از مترای ۶۵۰۰ میزان آب ورودی به تونل افزایش بیشتری را نشان می‌دهد. افزایش آب ورودی علاوه بر هد استاتیکی آب به میزان



شکل ۶: تغییرات متوسط شاخص نفوذ و تفکیک کلاس‌های مختلف حفری در طول تونل



شکل ۱۰: تغییرات آب ورودی به تونل بر حسب طول حفر شده تونل (تجمعی، اندازه گیری شده در دهانه‌ی تونل) [۵]

۶- نتیجه گیری

که زون خردشده ناشی از عملکرد گسل پورکان-وردیج دارای ضخامتی حدود ۴۰۰ متر از متر ۶۰۵۰ تا ۶۴۵۰ می‌باشد. در این مطالعه و با استفاده از شاخص‌های به کار گرفته شده، هسته مرکزی گسل قابل تشخیص نمی‌باشد. نتیجه‌ای که از بررسی ویژگی‌های مهندسی واحدهای سنگی در دو سوی زون گسله پورکان-وردیج به دست می‌آید، تفاوت نسبی در این ویژگی‌ها می‌باشد. به نظر می‌رسد در سنگ‌های کم‌پایین گسل (که بیشتر از توده‌های نفوذی مقاوم تشکیل شده‌اند)، به دلیل شکنندگی بیشتر این سنگ‌ها، در مقایسه با سنگ‌های کمر بالای گسل (که بیشتر از جنس توف‌های ریزدانه همراه با شیل و سیلتستون هستند) خردشدگی بیشتری اتفاق افتاده است. در هر حال این زون گسله به دلیل ماهیت متفاوت سنگ‌های دو سوی گسل متقارن نبوده و هسته مرکزی گسل متمایل به بخش انتهایی زون گسله در حدود کیلومتر ۶۴۰۰ تا ۶۴۵۰ می‌باشد.

گسل پورکان-وردیج از جمله گسل‌های اصلی منطقه است و بر اساس بررسی رخنمون‌های سطحی، فرض بر این بوده است که محدوده‌ی وسیعی را تحت تأثیر قرار داده است. وجود خردشدگی‌های تکتونیک در رخنمون‌های سطحی این گسل چنین شواهدی را نشان می‌دهد. در مطالعات قبل از اجرای تونل، با در نظر گرفتن گسل F4 که در نزدیکی آن تشخیص داده شده است (و همچنین برخی گسل‌های شناخته نشده)، پهنه‌ای به ضخامت ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر به عنوان زون مؤثر این گسل در نظر گرفته شد. بعد از اجرای تونل برای تدقیق محل و ضخامت زون خردشده، علاوه بر شاخص‌های زمین شناسی از برخی پارامترهایی که به طور غیر مستقیم نشان دهنده‌ی شرایط زمین شناسی تونل هستند (از جمله پارامترهای اپراتوری و پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین) نیز استفاده گردید. نتایج این مطالعات، با در نظر گرفتن کلیه‌ی شاخص‌های مستقیم و غیر مستقیم، با اطمینان بالا نشان داد

۷- مراجع

- [۵] مهندسین مشاور ساحل (۱۳۹۰). گزارشات کارگاهی تونل انتقال آب کرج (قطعه‌ی دوم). چاپ نشده.
- [6] Hassanpour, J., Rostami, J., & Zhao, J. (2011). A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunneling and Underground Space Technology*, 26, 595–603.
- [7] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., & Tavakoli, H. (2010). TBM performance analysis in pyroclastic rocks, a case history of Karaj Water Conveyance Tunnel (KWCT), *Journal of Rock mechanics and Rock Engineering*, Vol. 43(4), 427-4 (Vol. 43).

- [1] Fukui, K., & Okubo, S. (2006). Some attempts for estimating rock strength and rock mass classification from cutting force and investigation of optimum operation of tunnel boring machines. *Journal of Rock mechanics and Rock Engineering*, 39(1), 25–44. doi:10.1007/s00603-005-0071-6
- [2] Fukui, K., & Okubo, S. (1999). Rock properties estimation by TBM cutting force. 9th Int. Congress on Rock Mechanics.

[۳] حسن پور، ج. و رستمی، ج. (۱۳۸۹). عملکرد ماشین‌های تونل بوری در سنگ سخت. نشر فن آریا.

[۴] مهندسین مشاور ساحل (۱۳۸۸). گزارشات زمین شناسی مهندسی تونل انتقال آب کرج (قطعه‌ی دوم). چاپ نشده.

1 Fukui
2 Okubo
3 Herrenknecht
4 Field Penetration Index