Archive of SID

نشریه علمی «مهندسی معدن» دوره ۱۶، شماره ۵۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۷۸ تا ۸۸
Journal of Mining Engineering (JME) Vol 16, No 52, 2021, pp 78-88

مقاله پژوهشی

تحلیل نرخ نفوذ ماشین حفار تمام مقطع در شرایط سنگ‌سایی

سید مهدی پورهاشمی[۱]، کاوه آهنگری[۲*]، جعفر حسن‌پور[۳]، سید مصلح افتخاری[۴]

۱. گروه مهندسی معدن،دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، s_m_pourhashemi@yahoo.com
۲. دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران ahangari@srbiau.ac.ir
۳. دانشیار دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران، hassanpour@ut.ac.ir
۴. استادیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، mosleh.eftekhari@modares.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷)

چکیده

تونل‌سازی مکانیزه در سنگ سخت با چالش‌ها و ریسک‌های متفاوتی همراه است که یکی از آن‌ها مساله نرخ نفوذ ماشین حفار تمام مقطع و وقوع پدیده آسیاب‌کاری و ایجاد تراشه‌های حفاری در شرایط مختلف زمین‌شناسی و ژئومکانیکی است. در شرایطی که مقاومت سنگ زیاد و میزان درزه‌داری آن کم باشد و همچنین مقدار نیروی لازم پیشران تامین نشود، نرخ نفوذ ماشین کاهش یافته و به جای تشکیل تراشه‌های سنگی در جبهه‌کار تونل، سنگ اصطلاحا آسیاب می‌شود. در این شرایط که آسیاب‌کاری نام‌گذاری شده است، تونل‌سازی با سایش و مصرف زیاد ابزار برشی و همچنین کاهش شدید راندمان عملیات حفاری همراه است. در این مقاله، مرز دو فرآیند آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه در دو پروژه‌ای که با این پدیده مواجه بوده‌اند، بررسی می‌شود و معیاری برای تعیین حداقل نیروی نرمال در شرایط مختلف ژئومکانیکی که برای ایجاد تراشه لازم است، ارایه می‌شود. به این منظور، داده‌های مربوط به پروژه‌های تونل انتقال آب کرمان و تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا با مقایسه مقادیر نیروی نرمال وارد بر ابزار برشی و نرخ نفوذ حاصل، آستانه تغییر شرایط از پدیده آسیاب‌کاری به تشکیل تراشه مشخص می‌شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد، مقدار نیروی نرمال لازم که باید از سوی تیغه برشی به توده سنگ دربرگیرنده جبهه‌کار تونل اعمال شود تا حفاری در شرایط ایجاد تراشه رخ دهد برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری متوسط، بالا و خیلی بالا به ترتیب برابر با ۱۳۰، ۲۱۰ و ۲۲۵ کیلونیوتن است. همچنین با بررسی داده‌های خط ۶ مترو، نقش درزه‌داری در فراهم کردن شرایط تشکیل تراشه بررسی شد و نتیجه حاکی از آن بود که مرز بین آسیاب کاری و تشکیل تراشه برای سنگ‌هایی با مقاومت متوسط، می‌تواند در RQD=75 درصد باشد. همچنین مشخص شد که با عبور نرخ نفوذ از آستانه‌ای خاص، افزایش اندکی در نیروی نرمال موجب افزایش قابل ملاحظه نرخ نفوذ می‌شود که این موضوع افزایش راندمان و کاهش هزینه‌های عملیاتی را در پی دارد.

کلمات کلیدی

ماشین حفار تمام مقطع، آسیاب‌کاری، تشکیل تراشه، تونل کرمان، خط ۶ متروی تهران.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

www.SID.ir

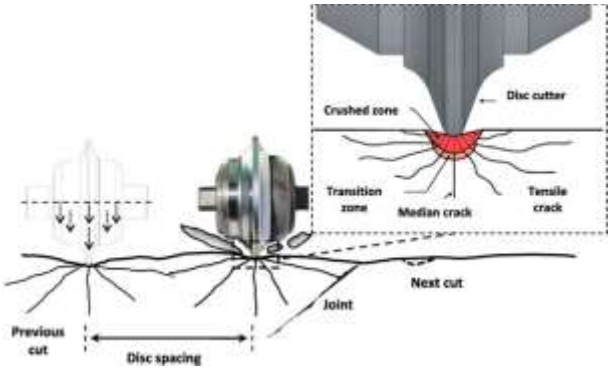
Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در روند احداث و انجام هر پروژه عمرانی با وجود انجام مطالعات اولیه، وقوع شرایط پیش‌بینی‌نشده است که عامل اصلی ایجاد حوادث ناخواسته و تاخیرات گوناگون و گاهی طولانی مدت در روند اجرایی پروژه است. این عامل در پروژه‌های زیرزمینی به دلیل محدودیت‌های موجود آن مشکل‌سازتر است. روش‌های ساخت تونل را می‌توان در دو دسته سنتی و مکانیزه طبقه‌بندی کرد. در دهه‌های اخیر، استفاده از روش‌های مکانیزه و به‌ویژه ماشین‌های حفار تونل تمام مقطع[1] کاربرد گسترده‌ای در احداث تونل‌های طویل پیدا کرده است. این ماشین‌های حفار با وجود مزایای قابل توجهی که دارند، انعطاف‌پذیری کمی نسبت به تغییرات شرایط زمین‌شناسی دارند. طراحی کله حفار و آرایش ابزار برشی TBM، ارتباط مستقیمی با مشخصات زمین پیش روی آن دارد [۱، ۲].

در محیط‌های سنگی، آرایش و فواصل تیغه‌های برنده[2] بر روی کله حفار به نحوی لحاظ می‌شود که طی فرآیند حفاری، قطعات سنگی در محل تماس ابزار و جبهه‌کار از زمین جدا شود. به این فرآیند، تشکیل تراشه یا چیپینگ[3] گفته می‌شود که حالت مطلوب حفاری در محیط سنگی با استفاده از TBM است. برای روشن شدن بیشتر موضوع، در شکل ۱ [۷] مراحل توسعه ترک در اثر اعمال نیروی نرمال از سوی تیغه برشی و شکل گیری تراشه‌ها و خرده حفاری ارایه شده است. چنانچه مقاومت زمین بسیار زیاد باشد، فواصل تیغه‌های برنده به حد کافی نباشد و یا نتوان نیروی پیشران لازم بر روی هر ابزار را تامین کرد، به جای ایجاد قطعات سنگی در جبهه‌کار حفاری، زمین پیش رو آسیاب و عملا پودر سنگ ایجاد می‌شود. این فرآیند که نامطلوب است و موجب آسیب قابل توجه به ابزار برشی و همچنین کاهش راندمان حفاری می‌شود، آسیاب‌کاری یا گریندینگ[4] نامیده می‌شود [۳، ۴، ۵، ۶].

در این مقاله به بررسی شرایط ایجاد آسیاب‌کاری طی حفاری با ماشین حفار تمام مقطع پرداخته می‌شود. به این منظور از داده‌های پروژه‌های تونل انتقال آب کرمان و تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران استفاده می‌شود. در این راستا، با بررسی میزان نرخ نفوذ در دامنه‌های مختلف مقاومتی سنگ دربرگیرنده جبهه‌کار تونل، وقوع فرآیندهای تشکیل تراشه و آسیاب‌کاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بنابراین نتایج این پژوهش بر اساس داده‌های تجربی پروژه‌های درگیر با پدیده آسیاب‌کاری توسعه خواهد یافت.



شکل ۱- اصول تشکیل تراشه در زیر یک تیغه برشی [۷].

با توجه به اینکه حفاری تونل در سنگ سخت با استفاده از ماشین حفار TBM از اوایل دهه ۱۹۵۰ توسعه قابل ملاحظه‌ای یافته است، از این زمان فرآیند تشکیل تراشه و آسیاب‌کاری مورد توجه قرار گرفته است. در این رابطه، تلاش برای توسعه روابط پیش‌بینی نرخ نفوذ با استفاده از نیروی پیشران خالص ابزار برشی برای سنگ بکر و توده سنگ‌های درزه‌دار، ارزش روش‌های تحلیلی پیش‌بینی نرخ نفوذ برای طراحی و تعیین عملکرد را نشان می‌دهد. میدل[5] و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از نمایش نرخ نفوذ در برابر نیروی پیشران بر اساس مطالعه رابینز[6] (۱۹۷۰) نشان دادند که سنگ‌های ضعیف‌تر، میزان نیروی پیشران کمتری نسبت به سنگ‌های قوی‌تر برای رسیدن به نرخ نفوذ یکسان نیاز دارند [۸، ۹]. در سال‌های اخیر مدل‌های پیش‌بینی قابل توجهی برای تعیین روابط بین عملکرد TBM و مشخصات سنگ پیشنهاد شده است؛ اما در توسعه این مدل‌ها، توجه لازم به فرآیندهای تشکیل تراشه و آسیاب‌کاری و همچنین مرز میان آن‌ها نشده است [۱۰، ۱۱]. در این پژوهش با بررسی داده‌های تجربی پروژه‌های درگیر با پدیده آسیاب‌کاری، آستانه ورود به شرایط تشکیل تراشه مورد تحلیل قرار می‌گیرد. همانطور که اشاره شد، مطالعات قبلی تقریبا به طور ویژه بر نفوذهای بزرگتر از ۴ میلی‌متر در دور متمرکز بوده‌اند، یعنی جایی که که مکانیزم تشکیل تراشه غالب است، در حالی که این مطالعه بر حفاری تحت شرایط آسیاب‌کاری تاکید دارد. مدل‌های تجربی قبلی برای پیش‌بینی عملکرد TBM به حالت تشکیل تراشه محدود بودند. علاوه بر این، از آنجا که کاوش در حالت آسیاب‌کاری ممکن است عملکرد TBM را تحت تاثیر قرار دهد، نیاز به تحلیل عملکرد TBMهایی که در شرایط آسیاب‌کاری کار کرده ند مشهود و ضروری است. بنابراین، در این مطالعه تلاش شد تا عملکرد ماشین در دو پروژه تونل انتقال آب کرمان و خط۶ متروی تهران مورد ارزیابی قرار گیرد و تجربیات حاصل از آن به صورت نمودار برای

1-Tunnel Boring Machine (TBM)
2-Disc cutter
3-Chipping
4-Grinding
5-Maidl
6-Robbins

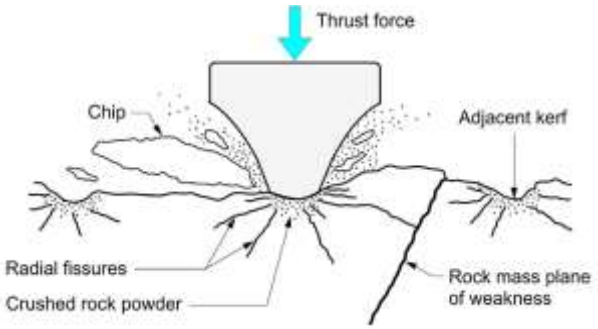
www.SID.ir

Archive of SID

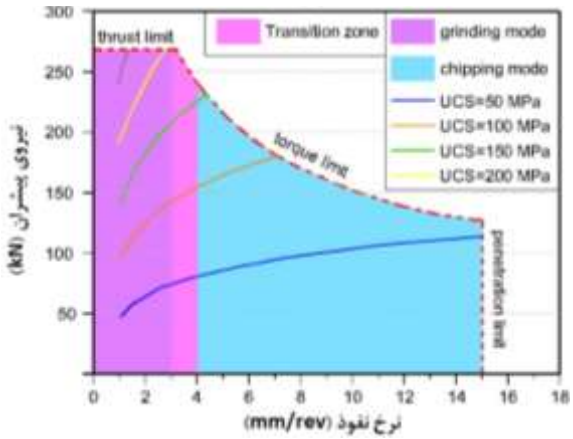
استفاده در پروژه‌های دیگر با شرایط مشابه در این مقاله انتشار یابد.

۲- تئوری و پیش زمینه

یکی از شرایط دشوار زمین در حفاری با TBM در سنگ سخت، مقاومت زیاد سنگ به همراه عدم درزه‌داری آن است. در TBM سنگ سخت، کله حفار و جانمایی ابزار برشی (تیغه برشی) بر روی آن به گونه‌ای طراحی می‌شوند که پس از حرکت ابزار بر روی سنگ، شیارهایی در جبهه‌کار تونل ایجاد شود و با اتصال این شیارها به یکدیگر و به سطوح ضعف سنگ، قطعات سنگی از جبهه‌کار جدا شود (شکل ۲) و پیشروی حفاری انجام گیرد [۸، ۱۲]. به این فرآیند که با تشکیل قطعات سنگی در حین حفاری همراه است، تشکیل تراشه گفته می‌شود. چنانچه سطوح ضعف و ناپیوستگی‌های توده سنگ ناچیز باشد و همچنین توده سنگ مقاومت بالایی داشته باشد و از طرف دیگر نیروی پیشران کافی تامین نشود، حرکت ابزار برشی بر روی جبهه‌کار تونل منجر به تشکیل قطعات سنگی نمی‌شود و صرفا سنگ آسیاب می‌شود که این فرآیند را آسیاب‌کاری می‌نامند.



(الف)



(ب)

شکل ۲- الف- اصول فرآیند تشکیل تراشه با استفاده از تیغه برشی؛ ب- مرز بین پدیده گریندینگ و چیپینگ و محدودیت‌های عملکرد TBM در مقاومت‌های مختلف سنگ [۱۸].

در شکل ۲-الف نمایی شماتیک از تماس ابزار برشی با سنگ و تشکیل قطعات سنگی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ابزار مجاور نقش بسزایی در تشکیل قطعات سنگی در حدفاصل خود دارند. همانطور که در شکل ۲-ب مشاهده می‌شود، با افزایش مقاومت تک محوره سنگ، مقدار نیروی پیشران بیشتری برای رسیدن به نرخ نفوذ بیشتر نیاز است ولی ماشین‌های حفار به علت محدودیت‌هایی که در گشتاور وجود دارد، نمی توانند نیروی پیشران را بیش از حد افزایش دهند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود بر اساس تحقیقات محققان مختلف از جمله فرنزل و همکارانش در سال ۲۰۰۸، در شرایطی که مقدار نرخ نفوذ ماشین، کمتر از ۳ یا ۴ میلی‌متر بر دور باشد، آن گاه پدیده گریندینگ رخ خواهد داد که موضوع این مقاله است.

هنگامی که بار تیغه برشی به هر دلیلی برای نفوذ در سنگ کافی نباشد، عملا پدیده تشکیل تراشه‌ها کامل نخواهد بود و پدیده غالب آسیاب‌کاری خواهد بود که با سایش و مصرف زیاد ابزار برشی و همچنین کاهش شدید راندمان عملیات حفاری همراه است. در عمل، وقتی سنگ بسیار مقاوم باشد یا طراحی کاترهد برای نفوذ کافی در سنگ مناسب نباشد ممکن است این اتفاق در طول زیادی از مسیر تونل رخ دهد. مدل‌های معمول تحلیل عملکرد TBM با فرض کامل بودن فرآیند تشکیل تراشه توسعه یافته‌اند. علاوه بر مشکلاتی مانند عدم هم‌خوانی و کامل نبودن بانک داده‌های مورد استفاده، بهره‌گیری از نتایج آزمون‌های غیرمعمول و عدم در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موثر بر عملکرد ماشین، از جمله نواقص مدل‌های تحلیل عملکرد TBM است که موجب شده است در اغلب این مدل‌ها توجهی به فرآیند واقعی برش در ناحیه تماس تیغه با سنگ نشود. این در حالی است که در بسیاری از پروژه‌های تونل‌سازی با ماشین حفر تونل ممکن است، شرایطی پیش آید که فرآیند برش در زیر تیغه برشی کامل نباشد. در این شرایط استفاده از این مدل‌ها امکان‌پذیر نیست و یا خطای قابل توجهی در پی دارد [۱۳، ۱۴، ۱۵]. آسیاب‌کاری نسبت به فرآیند تشکیل تراشه، فقط ذرات ریزدانه تولید می‌کند و بنابراین نرخ نفوذ ماشین به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. تشکیل تراشه، یک فرآیند حفاری کارآمدتر است؛ زیرا تولید تراشه‌ها از طریق شکستگی‌های کششی نسبت به ایجاد ذرات ریزدانه در ناحیه خرد شده بسیار کاراتر است. بنابراین تشکیل تراشه‌های سنگی با فرآیند تشکیل تراشه برای دست‌یابی به نرخ‌های نفوذ بالاتر بسیار مهم است. بنابراین عوامل اصلی موثر بر پدیده آسیاب‌کاری طی عملیات حفاری با

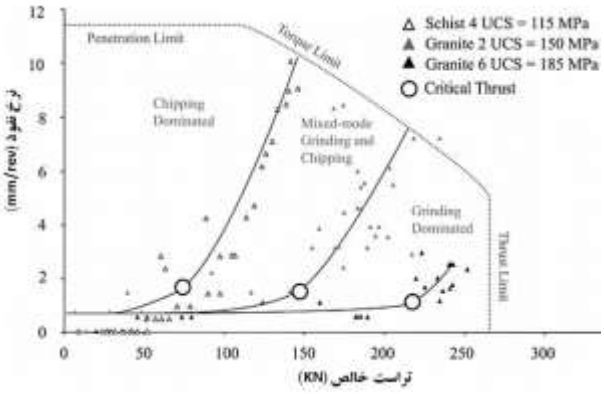
www.SID.ir

Archive of SID

TBM را می‌توان موارد زیر دانست [۱۶، ۱۷]:

- مقاومت بسیار زیاد سنگ بکر واقع در جبهه‌کار تونل.
- عدم درزه‌داری قابل‌ملاحظه توده سنگ جبهه‌کار تونل.
- عدم تامین نیروی پیشران کافی برای نفوذ تیغه‌های برشی در سنگ.
- تعداد ناکافی تیغه‌های برشی ماشین در مقایسه با مقاومت و درزه‌داری سنگ.

یکی از تحقیقات مهمی که در سال‌های اخیر بر روی این پدیده انجام شده مربوط به پژوهشی است که ویلینیو (۲۰۰۸ و ۲۰۱۷) [۳ و ۴] با انجام تعدادی آزمایش نفوذ در پروژه‌های مختلف انجام داده است، در این تحقیق رابطه‌ای بین نفوذ و نیروی برش بدست آمده است که در شکل ۳ ارایه شده است. مطابق نتایج این تحقیق که در این شکل نیز مشخص است، حداقل نیروی نرمال برای شروع برش و نفوذ در سنگ لازم است. در ابتدای امر که هنوز نیروی پیشران ماشین کم است، مقدار زیادی از مواد ریزدانه در زیر دیسک‌کاترها تولید می‌شود. برای عبور از مرحله آسیاب‌کاری به مرحله ایجاد تراشه، لازم است که نیروی محوری ابزارها افزایش یابد که به آن نیروی پیشران بحرانی می گویند. به عبارت دیگر در برخی از پروژه‌ها به علت محدودیت در نیروی نرمال، پدیده آسیاب کاری رخ داده است که در ادامه تشریح خواهد شد.



شکل ۳- منحنی‌های نفوذ برای سنگ‌های مختلف که نشان‌دهنده موقعیت نیروی پیشران بحرانی است [۳ و ۴]

۳- معرفی پروژه‌های مورد بررسی

اکثر مدل‌های تحلیل عملکرد TBM بر پایه داده‌ها و تجارب حاصل از پروژه‌های تونل مکانیزه اجرا شده در نقاط مختلف دنیا استوار است. در این پژوهش و برای مطالعه در خصوص فرآیند آسیاب‌کاری، از داده‌های پروژه‌های تونل انتقال آب کرمان [۱۹] و تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران [۲۰] که طی عملیات حفاری با پدیده آسیاب‌کاری مواجه شده‌اند، استفاده خواهد شد.

۳-۱- تونل انتقال آب کرمان

تونل انتقال آب کرمان بخشی از یک سیستم انتقال آب عظیم در ایران است و طول کلی آن در حدود ۳۸ کیلومتر است. این تونل برای انتقال حدود ۲۳ مترمکعب در ثانیه آب شرب از سد صفا به شهر کرمان و در نزدیکی شهر رابر طراحی شده است. حداکثر سرباره این تونل نیز در حدود ۹۴۰ متر در قسمت‌های مرکزی مسیر تونل است. این تونل انتقال آب به دو بخش شمالی و جنوبی با طول تقریبا مساوی تقسیم شده که با استفاده از دو دستگاه TBM در دست ساخت است. شایان ذکر است که تنها داده‌های مربوط به ۵۲۰۰ متر ابتدایی بخش جنوبی که در دسترس بوده در تجزیه و تحلیل‌های این پژوهش استفاده می‌شود. در این محدوده، پدیده آسیاب‌کاری در مقاطع متعددی رخ داده و عملیات حفاری آن طی ۱۷ ماه با سرعت متوسط حدود ۳۰۰ متر در ماه به پایان رسیده است.

۳-۱-۱- ویژگی‌های زمین‌شناسی تونل کرمان

سایت پروژه تونل کرمان در کمربند ماگمایی سهند-بازمان واقع شده است که به عنوان منطقه ارومیه- دختر نیز شناخته می‌شود. این منطقه از سنگ‌های آتشفشانی به طول ۲۰۰۰ کیلومتر و عرض ۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر تشکیل شده و از شمال‌غرب به جنوب‌شرقی ایران گسترش یافته است. در مسیر تونل بخش جنوبی، انواع سنگ‌شناسی از جمله ماسه‌سنگ، کنگلومرا، آندزیت، توف، ریولیت، گرانودیوریت و بازالت با مقاومت تک‌محوری در بازه ۷۰ تا ۳۰۰ مگاپاسکال قرار دارد. برای ارایه جزییات بیشتر، نیمرخ طولی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب کرمان در شکل ۴ نشان داده شده است.

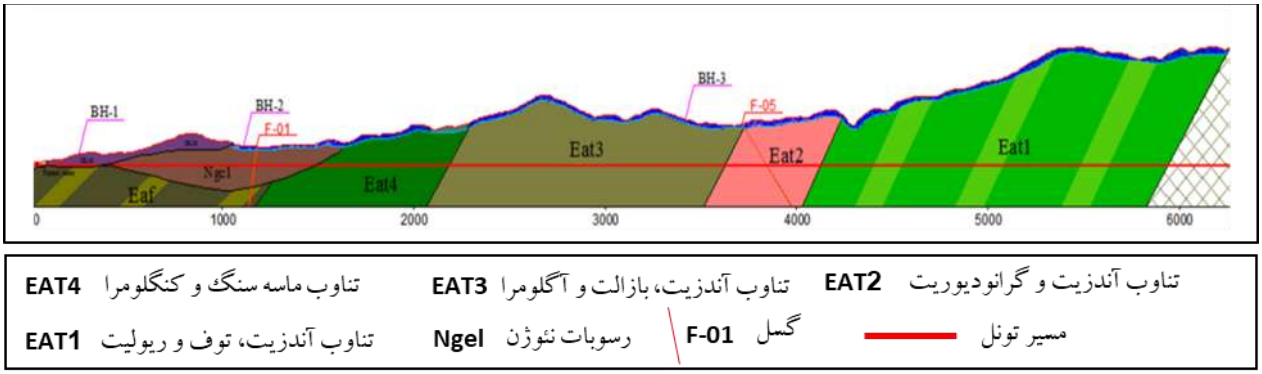
وجود سنگ‌های آذرین بسیار مقاوم با درزه‌داری ناچیز باعث وقوع پدیده آسیاب‌کاری طی حفاری تونل جنوبی شده است. رخنمون‌هایی از این توده سنگ در شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۳-۱-۲- مشخصات ماشین حفار تونل کرمان

ماشین حفار بخش جنوبی تونل کرمان، یک TBM دست دوم نوسازی‌شده با سپر دوتایی به قطر ۵٫۲۷۵ متر ساخته شرکت هرنکنشت بوده که برای کار در شرایط سنگ سخت طراحی شده است. کله حفار این ماشین دارای ۳۷ تیغه برشی (۲۹ تیغه تک و ۴ تیغه دوتایی) با فاصله‌داری متوسط ۷۲ میلی‌متر و قطر هر تیغه برشی ۴۳۲ میلی‌متر (۱۷ اینچ) است. نیروی پیشران حداکثر کله‌حفار این ماشین نیز در حدود ۲۰۰۰۰ کیلونیوتن است.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۴- نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب کرمان [۱۹].

(الف) (ب)

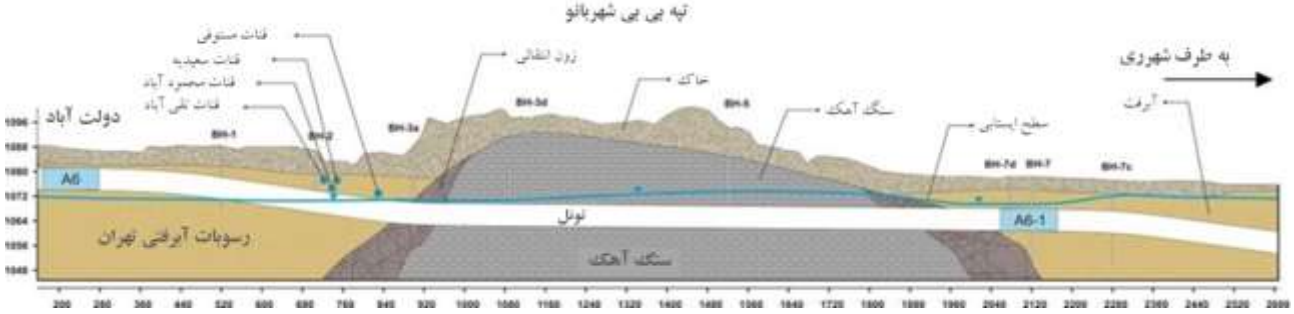
شکل ۵- رخنمونی از توده سنگ آذرین EAT2 (آندزیت) دربرگیرنده تونل کرمان: الف- سطح زمین؛ ب- جبهه‌کار تونل در کیلومتر ۳+۵۵۰ [۱۹].

۳-۲- تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران

خط ۶ متروی تهران با طول ۳۱٫۲ کیلومتر از جنوب شرق تهران در محدوده دولت‌آباد شروع می‌شود و با عبور از مرکز شهر به سمت شمال‌غرب در محدوده سولقان خاتمه می‌یابد. در حدود ۱۰٫۷ کیلومتر ابتدایی این مسیر با دستگاه حفار تمام مقطع (EPB-TBM) و حدود ۲۰٫۵ کیلومتر مابقی به روش سنتی (NATM) ساخته شده است. همچنین این خط دارای یک بخش توسعه جنوبی به طول تقریبی ۶ کیلومتر است که محدوده دولت‌آباد را به محدوده حرم حضرت عبدالعظیم حسنی(ع) متصل می‌کند و حفاری آن با استفاده از یک ماشین EPB-TBM در حال انجام است.

۳-۲-۱- ویژگی‌های زمین‌شناسی تونل خط ۶

مسیر قطعه توسعه جنوبی خط ۶ مترو از دو سازند زمین‌شناسی مختلف شامل آبرفت‌های کواترنر تهران و سنگ‌های آهکی کرتاسه عبور کرده که به ترتیب از خاک ریزدانه و توده سنگ آهکی مقاوم تشکیل شده است. در حدود ۱۲۰۰ متر از این مسیر در محیط سنگی واقع شده است. نیمرخ طولی زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل توسعه جنوبی خط ۶ در شکل ۶ ارایه شده است.



شکل ۶- نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران [۲۰].

www.SID.ir

Archive of SID

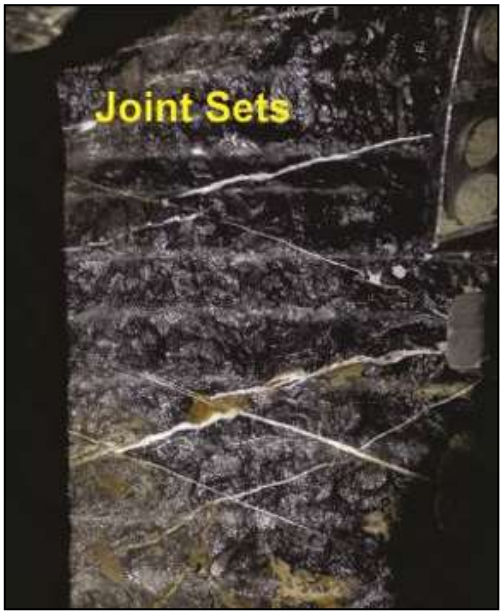
بر اساس مطالعات انجام شده و نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی ارایه شده در شکل ۶ توده سنگ‌های موجود در مسیر پروژه را می‌توان در دو واحد زمین‌شناسی مهندسی طبقه‌بندی کرد. توده سنگ اصلی تشکیل‌دهنده مسیر پروژه، متشکل از سنگ‌های آهکی مستحکم و متوسط تا ضخیم لایه‌ای است که در طول مسیر تغییر چندانی در ویژگی‌های آن (به جز در نواحی هوازده) مشاهده نمی‌شود. درجه استحکام این سنگ‌ها نسبتا بالا بوده و مقاومت تک‌محوری آن‌ها در حدود ۷۰ تا ۱۳۰ مگاپاسکال است. ضخامت لایه‌بندی در این واحد بین ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به ندرت تا حدود ۱۵۰ سانتی‌متر نوسان دارد. علاوه بر سطوح لایه‌بندی، دو دسته درزه سیستماتیک و درزه‌های تصادفی نیز در این توده سنگ وجود دارد. بنابراین می‌توان آن را در رده خردشدگی متوسط قرار داد. شرایط ناپیوستگی‌ها عموما خوب و سطوح درزه‌ها به ویژه در عمق، با هوازدگی کم، بازشدگی و مواد پرکننده اندک و کمی زبر است. تراز آب زیرزمینی در بخش سنگی مسیر عمدتا در تراز مقطع تونل و بالاتر از آن بوده که چالش‌های قابل توجهی را طی کنترل آب در جبهه‌کار تونل به همراه داشته است. رخنمون‌هایی از این توده سنگ آهکی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی در این محدوده و شرایط ماشین حفار، پدیده آسیاب‌کاری در محدوده‌هایی از مسیر رخ داده است.

علاوه بر این واحد زمین‌شناسی مهندسی اصلی، فصل مشترک سنگ و خاک به دلیل عملکرد پدیده‌های مخرب مانند هوازدگی در طولانی مدت دچار تخریب شده و پارامترهای ژئومکانیکی آن از جمله مقاومت سنگ و ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها کاهش یافته است.

۳-۲-۲- مشخصات ماشین حفار تونل خط ۶

ماشین حفار مورد استفاده در این تونل یک TBM دست دوم نوسازی‌شده به قطر ۹٫۱۹۰ متر از نوع فشار تعادلی زمین (EPB) ساخته شرکت هرنکنشت است. طراحی اولیه این ماشین برای حفاری در زمین نرم بوده است و بر این اساس، تعداد ۱۷ تیغه برشی دوتایی با قطر ۱۷ اینچ در کله‌حفار آن تعبیه شده و سایر ابزار برشی آن شامل ناخن و شیارزن بوده است. یک تیغه برشی دوتایی از دو رینگ تشکیل شده است اما فقط یک یاتاقان دارد. با توجه به معیارهای طراحی برای تیغه برشی با قطر ۱۷ اینچ، هر یاتاقان می‌تواند تا ۲۷۰ کیلونیوتن نیرو را تحمل کند. بنابراین در حین حفاری، اپراتور دستگاه نمی‌تواند بیش از ۱۳۵ کیلونیوتن روی هر رینگ اعمال کند. با توجه به شرایط زمین‌شناسی و سنگ مقاوم واقع در مسیر تونل خط ۶ مترو، طی عملیات نوسازی کله‌حفار، برخی تیغه‌های برشی آن از حالت دوتایی به تکی تغییر یافت تا شرایط مساعدتری برای مواجه‌شدن با محیط سنگی داشته باشد. نیروی پیشران حداکثر کله‌حفار این ماشین نیز در حدود ۷۰۰۰۰ کیلونیوتن بوده که با توجه به ابزار برشی مورد استفاده، به طور متوسط نیرویی در حدود ۲۵۰۰۰ کیلونیوتن طی عملیات حفاری این تونل اعمال شده است.

(الف)



(ب)

شکل ۷- رخنمونی از توده سنگ آهکی دربرگیرنده تونل خط ۶: الف- سطح زمین؛ ب- جبهه‌کار تونل.

www.SID.ir

Archive of SID

۴- نتایج و بحث

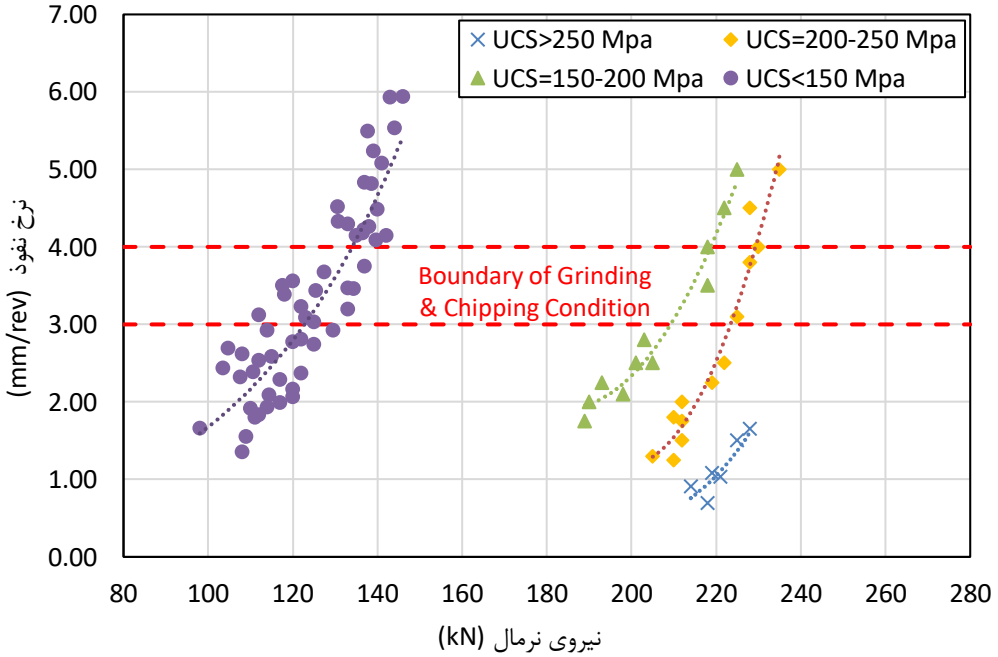
طی فرآیند تونل‌سازی با TBM در سنگ سخت، عوامل مختلفی بر میزان نفوذ و پیشروی ماشین در زمین تاثیر دارند. در این خصوص، دو عامل مقاومت تک‌محوری فشاری سنگ و شرایط درزه‌داری، از اهمیت ویژه‌ای دارند. به طور کلی هرچقدر میزان مقاومت سنگ کمتر و تعداد درزه‌های آن بیشتر باشد، نفوذ ابزار برشی کله‌حفار با سهولت بیشتری در توده سنگ انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر، در این شرایط میزان بار نرمال کمتری برای نفوذ تیغه برشی به داخل سنگ لازم است.

با توجه به شرایط زمین‌شناسی دو تونل مورد بررسی، در مقاطعی از مسیر شرایط آسیاب‌کاری رخ داده است. توده سنگ دربرگیرنده تونل کرمان عمدتا یکپارچه بوده و درزه‌های قابل ملاحظه‌ای نداشته است. اما توده سنگ آهکی واقع در مسیر خط ۶ دارای درزه‌های مختلفی بوده که منجر به شاخص RQD در بازه ۶۵ تا ۱۰۰ شده است.

۴-۱- بررسی ارتباط نیروی رانش نرمال و نرخ نفوذ

در شرایط آسیاب‌کاری، افزایش نیروی رانش تیغه برشی موجب افزایش قابل ملاحظه‌ای در میزان نرخ نفوذ تیغه‌ها در سنگ نمی‌شود. افزایش نیروی نرمال ابزار تا حدی که فرآیند حفاری سنگ از حالت آسیاب‌کاری به تشکیل تراشه تغییر می‌کند، منجر به روند صعودی قابل توجه در نرخ نفوذ ابزار می‌شود. ارتباط میان نیروی نرمال و نرخ نفوذ تیغه برشی در پروژه‌های تحت بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است. برای تهیه بانک داده‌ای که نتیجه آن در این شکل ارایه شده است، داده‌های متوسط هر رینگ حفاری ثبت شده است. برای این منظور، در حین حفاری کلیه پارامترهای عملکرد دستگاه مستقیما از سیستم اکتساب ماشین استخراج و بر روی رایانه متصل به سیستم کنترل از طریق اتصال محلی که امکان محاسبه پارامترهای عملکردی و عملکرد TBM را دارد، ضبط شده‌اند. در نتیجه استفاده از داده‌های ثبت شده، پارامترهایی مانند نرخ نفوذ، رانش ناخالص کل، دور بر دقیقه و گشتاور محاسبه شد.

ضمنا در شکل ۸، طبقه‌بندی داده‌های ارایه شده در نمودار بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (UCS) است.



شکل ۸- ارتباط میان نیروی نرمال و نرخ نفوذ بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (UCS).

مطابق شکل ۸، چهار بازه مقاومتی برای واحدهای سنگی لحاظ شده که دسته کمتر از ۱۵۰ مگاپاسکال مربوط به تونل خط ۶ و سه دسته دیگر که بیشتر از ۱۵۰ مگاپاسکال است، مربوط به تونل انتقال آب کرمان است. با توجه به اینکه در مسیر تونل کرمان مقاومت سنگ بکر در رده بسیار بالا است، نیروی نرمال بیشتری برای نفوذ ابزار برشی (تیغه برشی) در سنگ نیاز بوده است. برای بررسی و تفکیک شرایط آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه، منحنی برازش هر یک از دسته داده‌ها ترسیم شده است. مطابق نتایج حاصل، نرخ نفوذ ۳ تا ۴ میلی‌متر در دور را می‌توان به

www.SID.ir

Archive of SID

عنوان مرز این دو فرآیند حفاری عنوان کرد که این موضوع، نمودار ارایه شده در شکل۲ را تایید می‌کند. به عبارت دیگر همانند نمودار فرنزل و همکارانش (شکل۲) در این واحدهای سنگی، نرخ ۳ تا ۴ میلی‌متر بر دور را می‌توان به عنوان مرز بین آسیاب‌کاری و چیپینگ قلمداد کرد. با افزایش نرخ نفوذ ماشین به بیش از ۳ تا ۴ میلی‌متر بر دور، شرایط حفاری از آسیاب‌کاری که با پودر و آسیاب کردن سنگ و راندمان پایین همراه است، به تشکیل تراشه که نیاز به مصرف انرژی کمتری دارد تغییر می‌یابد. بر اساس داده‌های حاصل از این پروژه، می‌توان حد ۳ میلی‌متر بر دور را برای سنگ‌های با مقاومت خیلی بالا (بیشتر از ۱۵۰ مگاپاسکال) و حد ۴ میلی‌متر بر دور را برای سنگ‌هایی با مقاومت متوسط تا بالا (کمتر از ۱۵۰ مگاپاسکال) لحاظ کرد.

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، برای نمونه‌هایی با مقاومت بیش از ۲۵۰ مگاپاسکال با وجود افزایش مقدار نیروی نرمال تا حدود ۲۳۰ کیلونیوتن، تغییر چندانی در نرخ نفوذ رخ نداده و همچنان حفاری تحت شرایط آسیاب‌کاری انجام گرفته است.

ضمنا در شرایطی که جبهه‌کار تونل از سنگ‌هایی با مقاومت بالا (UCS=150-200 MPa) تشکیل شده باشد، مرز بین شرایط آسیاب‌کاری و تولید تراشه در نیروی نرمال ۲۱۰ کیلونیوتن قابل مشاهده است. به عبارت دیگر زمانی که کمتر از ۲۱۰ کیلونیوتن از سوی تیغه برشی به سنگ دربرگیرنده جبهه‌کار اعمال شود، پدیده آسیاب‌کاری رخ خواهد داد ولی مرز بین شرایط آسیاب‌کاری و تولید تراشه برای سنگ‌هایی با مقاومت خیلی بالا (UCS=200-250 MPa) در نیروی نرمال ۲۲۵ کیلونیوتن قابل مشاهده است. به عبارت دیگر زمانی که کمتر از ۲۲۵ کیلونیوتن بر تیغه برشی اعمال شود، پدیده آسیاب‌کاری در این سنگ‌ها رخ خواهد داد. در همین راستا، برای سنگ‌هایی که مقاومت فشاری آن‌ها کمتر از ۱۱۰ مگاپاسکال باشد و در رده مقاومت متوسط طبقه‌بندی می‌شوند، مرز بین این دو پدیده ۱۳۰ کیلونیوتن است. به عبارت دیگر برای سنگ‌هایی با مقاومت متوسط چنانچه بار نرمال وارده به توده سنگ جبهه‌کار تونل بیشتر از ۱۳۰ کیلونیوتن باشد، آنگاه حفاری با نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور انجام خواهد شد. برای روشن شدن بیشتر موضوع، نتایج به دست آمده از این تحلیل به طور خلاصه در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- ارایه معیار حداقل نیروی نرمال برای تعیین مرز آسیاب‌کاری و ایجاد تراشه برای سنگ‌هایی با مقاومت متفاوت.

ردیف	توصیف سنگ جبهه‌کار	محدوده مقاومتی سنگ بکر (مگاپاسکال)	حداقل نیروی نرمال برای تشکیل تراشه (کیلونیوتن)
۱	مقاومت متوسط	۵۰ تا ۱۵۰	۱۳۰
۲	مقاومت بالا	۱۵۰ تا ۲۰۰	۲۱۰
۳	مقاومت خیلی بالا	۲۰۰ تا ۲۵۰	۲۲۵

۲-۴- بررسی تاثیر مقاومت تک محوره سنگ بر نرخ نفوذ

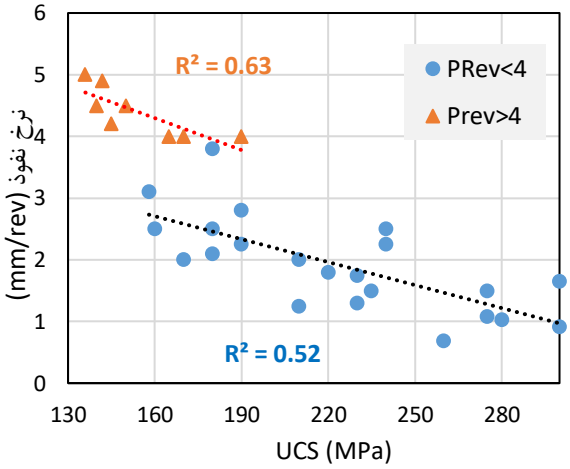
مطابق بررسی‌های به عمل آمده، ارتباط معناداری میان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و شرایط حاکم بر فرآیند حفاری وجود دارد؛ به طور کلی در سنگ‌هایی با مقاومت کمتر، تغییر شرایط از آسیاب‌کاری به تشکیل تراشه با سهولت بیشتری انجام می‌شود. برای بررسی بیشتر این موضوع در شکل ۹ رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و نرخ نفوذ برای داده‌های تونل انتقال آب کرمان (شکل ۹- الف) و تونل توسعه جنوبی خط ۶ (شکل ۹- ب) نشان داده شده است. مطابق هر دو شکل ۹-الف و ۹- ب که شامل داده‌هایی به تفکیک شرایط آسیاب‌کاری (برای نرخ نفوذ کمتر از ۴ میلی‌متر بر دور) و تشکیل تراشه (برای نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور) است، ارتباط تقریبا یکسانی میان مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و نرخ نفوذ در هر دو شرایط با ضریب تعیینی در حدود ۰٫۶۳ و ۰٫۶ به ترتیب برای تونل کرمان و تونل خط۶ وجود دارد.

نکته مهم دیگری که در نمودار ۹- الف (تونل کرمان با سنگ‌هایی با مقاومت بالا و خیلی بالا) قابل مشاهده است، وقوع پدیده آسیاب‌کاری بوده که عمدتا در شرایطی رخ داده که مقاومت تک‌محوری سنگ بکر (UCS) بیشتر از ۱۶۰ مگاپاسکال بوده است و در مقابل، زمانی که مقاومت تک‌محوری کمتر از ۱۶۰ تا ۱۸۰ مگاپاسکال بوده پدیده تشکیل تراشه و نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور رخ داده است. به عبارت دیگر، مقاومت تک‌محوری ۱۶۰ تا ۱۸۰ مگاپاسکال در شرایطی مشابه این پروژه (با نیروی نرمال ۱۹۰ تا ۲۳۰ کیلونیوتن) می‌تواند مرز بین آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه باشد.

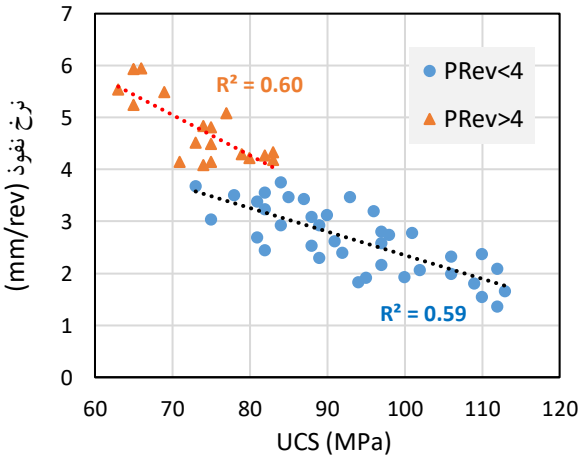
www.SID.ir

Archive of SID

نکته مهمی که در نمودار شکل ۹- ب (تونل خط ۶ مترو با سنگ‌های با مقاومت متوسط) قابل مشاهده است، وقوع پدیده آسیاب‌کاری بوده که عمدتا در شرایطی رخ داده که مقاومت تک‌محوری سنگ بکر (UCS) بیشتر از ۷۵ مگاپاسکال بوده است و در مقابل، زمانی که مقاومت تک‌محوری کمتر از ۸۰ مگاپاسکال بوده است، پدیده تشکیل تراشه و نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور رخ داده است. به عبارت دیگر، مقاومت تک‌محوری ۷۵ تا ۸۰ مگاپاسکال در شرایطی مشابه این پروژه که تنها نیروی نرمال وارده از تیغه‌های برشی به سنگ حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلو نیوتن باشد، می‌تواند مرز بین آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه محسوب شود.



(الف)

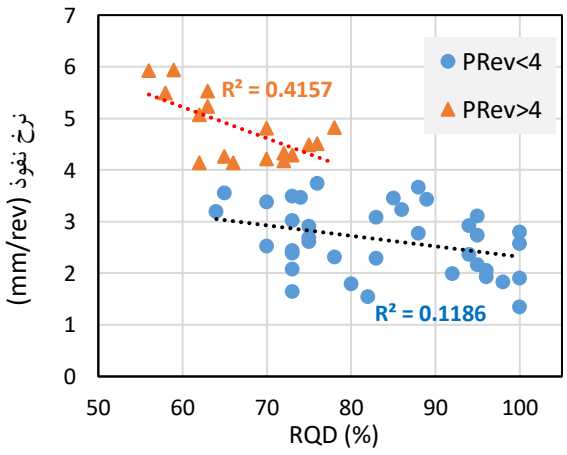


(ب)

شکل ۹- همبستگی بین مقاومت فشاری سنگ بکر و نرخ نفوذ: الف- برای داده‌های تونل انتقال آب کرمان؛ ب- داده‌های تونل توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران.

۳-۴- بررسی تاثیر درزه‌داری بر نرخ نفوذ

همان‌طور که اشاره شد، عامل دیگری که تاثیر بسزایی در نرخ نفوذ ابزار دارد، شرایط درزه‌داری توده سنگ است. در این مطالعه شاخص RQD به عنوان نماینده درزه داری سنگ انتخاب شده است. با توجه به اینکه توده سنگ در برگیرنده تونل کرمان عمدتا دارای RQD بیشتر از ۹۰ درصد بوده ولی در مقابل در پروژه خط ۶ این مقدار بین ۶۵ تا ۱۰۰ متغیر بوده است، بنابراین در این بخش از مقاله، ارتباط میان شاخص RQD و نرخ نفوذ در پروژه خط ۶ بررسی شده است. در همین راستا، در شکل ۱۰ ارتباط میان RQD (که معرف میزان درزه‌داری توده سنگ است) و نرخ نفوذ برای داده‌های خط ۶ مترو ارایه شده است. نمودار ارایه شده در این شکل، شامل داده‌هایی به تفکیک شرایط آسیاب‌کاری (برای نرخ نفوذ کمتر از ۴ میلی‌متر بر دور) و تشکیل تراشه (برای نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور) است. مطابق این نمودار، همبستگی قابل ملاحظه‌ای میان مقدار RQD و نرخ نفوذ در شرایط آسیاب‌کاری (برای نرخ نفوذ کمتر از ۴ میلی‌متر بر دور) وجود ندارد. در این حالت، به علت عدم تشکیل ترک‌های کششی وجود درزه‌ها در سنگ به تنهایی کمکی به تشکیل تراشه نمی‌کند اما همبستگی به مراتب بالاتری در داده‌های مربوط به شرایط تشکیل تراشه (برای نرخ نفوذ حالت کمتر از ۴ میلی‌متر بر دور) مشاهده می‌شود. در این افزایش نرخ نفوذ منجر به ایجاد ترک‌های کششی در سنگ می‌شود که با وجود درزه‌ها، یک شبکه‌ای از ناپیوستگی‌ها در درون سنگ تشکیل می‌شود که این شبکه زمینه ایجاد تشکیل تراشه با مصرف انرژی کمتری را فراهم می‌کند.



شکل ۱۰- همبستگی بین شاخص RQD و نرخ نفوذ برای داده‌های تونل خط ۶ مترو.

www.SID.ir

Archive of SID

۵- نتیجه‌گیری

اگرچه تونل‌های بلند کاربرد گسترده‌ای در رفع نیازهای بشر به ویژه در زمینه حمل و نقل و انتقال آب پیدا کرده‌اند، اما معمولا ساخت آن‌ها با ریسک‌ها و هزینه‌های زیادی همراه بوده است و انتخاب تونل به عنوان گزینه برتر در پروژه‌های مرتبط را با تردیدهایی روبه‌رو می‌کند. بنابراین با توجه به مزایای بهره‌برداری از تونل، همواره تلاش می‌شود، ریسک‌ها و هزینه‌های ساخت تونل کمینه شود. در تونل‌سازی مکانیزه، زمان حفاری و میزان مصرف ابزار برشی از عوامل موثر در هزینه ساخت تونل‌اند. حفاری ماشین TBM در سنگ، بسته به شرایط مختلف زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی جبهه‌کار تونل در دو شرایط آسیاب‌کاری (با نرخ نفوذ کمتر از ۴ میلی‌متر بر دور) و یا تشکیل تراشه (نرخ نفوذ بیشتر از ۴ میلی‌متر بر دور) رخ می‌دهد. در شرایط آسیاب‌کاری، تونل‌سازی با زمان‌بندی و هزینه‌های به مراتب بالاتری اجرا می‌شود؛ بنابراین متخصصان تونل‌سازی همواره سعی دارند که حفاری در شرایط آسیاب‌کاری به حداقل برسد و در مقابل، نرخ نفوذ ماشین در شرایط تشکیل تراشه حفظ شود. نکته حایز اهمیت این است که اکثر مطالعات و مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین در شرایط تشکیل تراشه بوده و کمتر به بررسی و تحلیل عملکرد ماشین در شرایط آسیاب‌کاری پرداخته شده است. این موضوع به این سبب است که به طور کلی در پروژه‌های مختلف، داده‌های کمی در شرایط آسیاب‌کاری موجود بوده است. بنابراین وقوع این پدیده در دو تونل انتقال آب کرمان و خط ۶ مترو تهران یک فرصت برای بررسی و تحلیل آن است. در همین راستا، در این مقاله با استفاده از داده‌های حاصل از حفاری تونل‌های انتقال آب کرمان و توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران به بررسی آستانه شرایط آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه پرداخته شد. نتایج اصلی حاصل از این پژوهش شامل موارد زیر است:

- با افزایش نیروی نرمال وارد بر ابزار برشی، نرخ نفوذ کله‌حفار به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. همچنین به طور کلی با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، نرخ نفوذ کاهش می‌یابد ولی مقدار آن در مقاومت‌های مختلف متفاوت است.
- به دلیل رابطه غیرخطی بین نرخ نفوذ و نیروی نرمال، در شرایطی که نرخ نفوذ کمتر از ۳ تا ۴ میلی‌متر در دور بوده و پدیده آسیاب‌کاری سنگ غالب است، افزایش و اعمال نیروی نرمال از سوی تیغه برشی بر روی توده سنگ جبهه‌کار در مقایسه با شرایط تشکیل تراشه تاثیر کمتری بر افزایش نرخ نفوذ دارد. به عبارت دیگر، در شرایطی که نرخ نفوذ بیشتر از ۳ تا ۴ میلی‌متر بر دور است، به دلیل اینکه حفاری با تشکیل تراشه همراه می‌شود، افزایش اندک نیروی نرمال موجب افزایش قابل توجه نرخ نفوذ می‌شود. این رفتار در اثر گذار از شرایط آسیاب‌کاری به تشکیل تراشه است.
- تحلیل‌ها نشان داد مقدار نیروی نرمال لازم که باید از سوی تیغه برشی به توده سنگ دربرگیرنده جبهه‌کار تونل اعمال شود تا حفاری در شرایط ایجاد تراشه رخ دهد. بسته به مقاومت سنگ متفاوت است. این مقدار برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری متوسط (UCS=50-150 MPa)، بالا (UCS=150-200MPa) و خیلی بالا (UCS=200-250 MPa) به ترتیب برابر با ۱۳۰، ۲۱۰ و ۲۲۵ کیلونیوتن است. به عبارت دیگر، این مقادیر می‌توانند معیاری برای طراحی نیروی پیشران بحرانی و اجزای مکانیکی یک ماشین مناسب در شرایط ژئومکانیکی و زمین‌شناسی متفاوت باشند.
- برای سنگ‌هایی با مقاومت بالا و خیلی بالا (UCS>150MPa) در حالتی که نیروی نرمال تیغه‌های برشی بین ۱۹۰ تا ۲۳۰ کیلونیوتن نیز باشد، آن گاه مرز بین پدیده آسیاب کاری و تشکیل تراشه در شرایطی رخ می‌دهد که مقاومت تک‌محوری سنگ بکر از ۱۶۰ تا ۱۸۰ مگاپاسکال بیشتر باشد ولی چنانچه نیروی نرمال تیغه‌های برشی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلونیوتن کاهش یابد آن گاه حتی در سنگ‌هایی با مقاومت تک‌محوره متوسط (بیشتر از ۷۵ مگاپاسکال) هم پدیده آسیاب‌کاری قابل مشاهده است. به عبارت دیگر در پروژه خط ۶، مقدار نیروی پیشران بحرانی برای عبور شرایط حفاری از آسیاب کاری به تشکیل تراشه فراهم نشد.
- در شرایطی که جبهه‌کار تونل از سنگ‌هایی با مقاومت متوسط تشکیل شده باشد، رابطه معنی‌داری بین مقدار RQD و نرخ نفوذ در شرایط آسیاب‌کاری قابل مشاهده نیست ولی در شرایطی که مقدار نرخ نفوذ به بیش از ۴ میلی‌متر بر دور افزایش یابد، آن گاه میزان درزه‌داری و شاخص RQD تاثیر بسزایی در شرایط حاکم بر فرآیند حفاری دارد و وجود درزه‌ها به ایجاد شرایط تشکیل تراشه کمک می‌کند. همچین بر اساس نتایج به دست آمده از داده‌های خط ۶ متروی تهران، مرز میان فرآیندهای آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه برای شرایطی مشابه تونل خط ۶، می‌تواند در RQD=75 درصد باشد.

یافته‌های این پژوهش که بر اساس داده‌های تجربی توسعه یافته به خوبی نشان می‌دهد که رفتار زمین با همه پیچیدگی‌هایی که دارد، همچنان قابل بررسی و تحلیل است. برای تکمیل و توسعه نتایج حاصل از این پژوهش، پیشنهاد می‌شود داده‌های مربوط به تونل‌های مکانیزه‌ای که دارای توده

www.SID.ir

Archive of SID

سنگ‌هایی با شرایط مقاومتی و درزه‌داری متفاوت‌اند، مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان مرز شرایط آسیاب‌کاری و تشکیل تراشه را با دقت بالاتری تخمین زد. با تعیین این آستانه، می‌توان با ایجاد زیرساخت‌های لازم از جمله طراحی و تامین تیغه‌های برشی با قطر مناسب، امکان حفاری در شرایط تشکیل تراشه و صرف زمان و هزینه کمتر را فراهم کرد.

تشکر و قدردانی

با سپاس از همکاری صمیمانه آقایان دکتر عماد خراسانی و دکتر صادق طریق ازلی که در مرور و ارتقای فنی این مقاله ما را یاری کردند.

منابع

1. Yagiz, S. 2008. Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. Tunn Undergr Sp Technol 23:326–339.
2. Gong, Q.M., Zhao, J., 2009. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 46 (1), 8–18.
3. Villeneuve, MC. 2008. Examination of geological influence on machine excavation of highly stressed tunnels in massive hard rock [PhD thesis]. Kingston, Canada: Queen’s University.
4. Villeneuve, MC. 2017. Hard rock tunnel boring machine penetration test as an indicator of chipping process efficiency. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(4), 611-622.
5. Gehring K. 2009. The influence of TBM design and machine features on performance and tool wear in rock. Geomechanics and Tunnelling, No. 2, 140-155.
6. Thuro K. 2017. TBM performance prediction in hard rock, 12th Iranian and 2nd Regional Tunneling Conference, Tehran, Iran.
7. Heydari, S., Hamidi, J.K., Monjezi, M. and Eftekhari, A., 2019. An investigation of the relationship between muck geometry, TBM performance, and operational parameters: A case study in Golab II water transfer tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 88, pp.73-86.
8. Robbins, R.J. 1970. Economic factors in tunnel boring. South African Tunneling Conference, Johannesburg.
9. Maidl B, Schmid L, Ritz W, Herrenknecht M. 2008. Hardrock tunnel boring machines.Berlin: Ersnt & Sohn Verlag.
10. Delisio, A., Zhao, J., & Einstein, H. 2013. Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötschberg Base Tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 33, 131-142.
11. Macias F.J., 2016. Hard Rock Tunnel Boring: Performance Predictions and Cutter Life Assessments, PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.
12. Zhou J, Yazdani Bejarbaneh BJA, Danial, Tahir MM. 2020. Forecasting of TBM advance rate in hard rock condition based on artificial neural network and genetic programming techniques. Bull Eng Geol Environ 79:2069–2084.
13. Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A., 2009. Development new equations for performance prediction. Geo Mechanics and Geoengineering: An International Journal 4 (4), 287–297.
14. Farrokh E, Rostami J, Laughton C. 2012. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. Tunn Undergr Sp Technol 30:110–123.
15. Brino G, Peila D, Steidl A, Fasching F. 2015. Prediction of performance and cutter wear in rock TBM: application to Koralm tunnel project. Environ Min 37–50.
16. Hassanpour, J. Rostami, J. Zhao, J. & Tarigh Azali, S. 2015. TBM performance and disc cutter wear prediction based on ten years’ experience of TBM tunneling in Iran. Geomechanics and Tunnelling (8): 239–247.
17. 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.
18. Frenzel C., Käsling H., Thuro K. 2008. Factors influencing disc cutter wear. Geomech und Tunnelbau, No1, 55–60.
۱۹. مهندسان مشاور ساحل امید ایرانیان. ۱۳۹۴. گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب کرمان.
۲۰. مهندسان مشاور رهسازطرح. ۱۳۹۵. گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران.

www.SID.ir