

بررسی پدیده سایش دیسک‌های برشی ماشین حفاری تونل در سنگ‌های سخت

جعفر خدایاری^۱، قدرت برزگری^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، khodaiaryjafar71@gmail.com

۲. استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، gbarzegari@tabrizu.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۷ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۲۵)

چکیده

طرح مورد مطالعه در این پژوهش، تونلی است به طول ۳۶ کیلومتر و با قطر حفاری ۶/۳۲ متر که برای انتقال آب از دامنه‌های غربی زاگرس به حوزه دریاچه اورمیه طراحی شده و در شرایط زمین‌شناسی تشکیل شده از سنگ‌های سخت با استفاده از دو دستگاه ماشین حفار تونل (TBM)، در حال اجراست. زمین‌شناسی مسیر تونل از لحاظ سنگ‌شناسی اغلب از سنگ‌های گرانیت، گرانودیوریت، هورنفلس، شایست، آهک، دولومیت، شیل، اسلیت و فیلیت تشکیل شده است. یکی از چالش‌های اصلی تونل مورد مطالعه، سایش دیسک‌های برشی است که علاوه بر هزینه، زمان مورد نیاز حفاری را افزایش داده است و بر اقتصاد پروژه تأثیر جدی گذاشته است. سایش را می‌توان به صورت از دست رفتن و زدوده شدن مداوم مواد از سطح یک جسم جامد، در اثر کنش‌های مکانیکی مانند تماس و حرکت نسبی میان دو جسم تعریف کرد. سایش ساینده و سایش تخریبی جزو مهمترین نوع سایش دیسک‌های برشی‌اند. در این مقاله برای بررسی ساینده‌های سنگ‌ها از داده‌های میدانی حاصل از حفاری ۹/۵ کیلومتر تونل، ویژگی‌های ژئوتکنیکی و اطلاعات آزمایشگاهی استفاده شده است. مطالعات میدانی نشان می‌دهد، سایش غیر نرمال، ۵۱ درصد سهم خرابی دیسک‌های برشی را به خود اختصاص داده و بیشتر از سایش نرمال است. بررسی آهنگ مصرف دیسک‌های برشی در ارتباط با ویژگی‌های زمین‌شناسی و پارامترهای حفاری ماشین حفار تونل نشان می‌دهد که ارتباط بسیار نزدیکی بین شاخص ساینده‌گی سرشار و مقاومت فشاری سنگ با آهنگ مصرف دیسک‌های برشی وجود دارد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با کاهش نیروی پیشران و گشتاور ماشین حفار و افزایش آهنگ نفوذ، میزان مصرف دیسک‌های برشی نیز به طور نسبی کاهش یافته است. طول عمر نسبی دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها بر روی کله حفاری در مقایسه با نمودار پیشنهادی توسط برولند (۱۹۹۸)، مطابقت خوبی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

دیسک برشی، سایش، ماشین حفار تونل، تونلسازی، شاخص ساینده‌گی سرشار، سنگ‌های سخت.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

امروزه بسیاری از محققان به نقش اصلی ساینده‌ی سنگ در هزینه و برنامه زمان‌بندی انجام پروژه‌های حفر تونل در زمینه‌ی سنگی اذعان دارند. سازه‌های زیرزمینی باید در زمینی مطمئن و مقاوم ایجاد شوند ولی شرایط زمین‌شناسی بسیار متغیر است و از طرفی امکان شناسایی و دسترسی به تمام نقاط آن نیز وجود ندارد. در دو دهه اخیر، استفاده از ماشین حفار تونل به ویژه برای حفر تونل‌های بلند گسترش روزافزونی داشته و افزایش بهره‌وری در این روش به شدت نیازمند شناسایی کامل شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر پیش‌روی حفاری است.

برای پیش‌بینی مصرف دیسک‌های برشی در حفاری زمین‌های سنگی به طور عموم روش‌های زیادی وجود ندارد یا آن‌هایی که در دسترس‌اند، محدود به شرایط خاص و یا انواع دیسک برشی با قطرهای مختلف‌اند. راد^۱ در سال ۱۹۷۵ در پژوهش خود یک روشی را برای تعیین سایش و از بین رفتگی برجستگی دیسک‌های برشی پیشنهاد کرده است. در این روش قطر حلقه در طول آزمایش برش به طور مرتب اندازه‌گیری و با قطر اولیه آن مقایسه شد. تفاوت بین مقدار اولیه و بعد از سایش (در حد میلی‌متر) به عنوان کاهش طول برجستگی حلقه فولادی تعریف می‌شود. کاهش طول برجستگی دیسک، اثرات قابل توجهی بر روی وزن تراشه‌های جدا شده، عمق و عرض شیار ایجاد شده، اندازه تراشه، مدول نرمی، ضریب برش و انرژی ویژه دارد. کاهش طول برجستگی دیسک، یکی از عوامل اصلی در کنترل میزان سایش آن محسوب می‌شود [۳]. بمفورد^۲ (۱۹۸۴) یک مدل تجربی برای پیش‌بینی مصرف دیسک‌های برشی ارائه کرده است. این روش تنها بر اساس داده‌های حاصل از دو پروژه پایه‌گذاری شده است. پارامترهای اصلی این مدل شامل سرعت امواج برشی و فشاری و ضریب مقاومت سنگ است. سرعت امواج برشی و فشاری به مقاومت سنگ و درجه خردشدگی سنگ بستگی دارد. این دو پارامتر جزو پارامترهای بسیار مهم برای پیش‌بینی آهنگ نفوذند. آهنگ نفوذ بیشتر در سنگ، باعث می‌شود که طول مسافت چرخش دیسک‌های برشی بر روی سنگ کاهش یافته و در نتیجه مقدار سایش کمتر شود [۴]. وایک^۳ (۱۹۹۲) با فرض این که با افزایش فشار برشی روی سنگ، میزان سایش افزایش و عمر مفید دیسک‌های برشی کاهش می‌یابد. روابط ریاضی برای محاسبه عمر دیسک‌های برشی در دو نوع مختلف از آن‌ها (دیسک‌های گوه‌ای شکل و با سطح مقطع ثابت) به دست آورد [۵]. گرینگ^۴ (۱۹۹۵) از

اطلاعات جمع‌آوری شده از پروژه‌های مختلف برای تعیین میزان سایش دیسک‌های برشی استفاده کرده است. در این مدل میانگین عمر دیسک‌های برشی با استفاده از شاخص ساینده‌ی سرشار به دست می‌آید [۶]. روش CSM^۵ اساساً مبتنی بر شاخص ساینده‌ی سرشار^۶ است که باید برای سنگ‌ها محاسبه شود تا عمر پایه دیسک‌های برشی بر اساس میزان حرکت آن‌ها به دست آید و سپس برای برآورد طول عمر دیسک‌های برشی و هزینه آن‌ها از پارامترهای مکانیکی و عملیاتی ماشین‌ها استفاده می‌شود. این روش فقط برای دیسک‌های برشی تکی^۷ ۱۷ اینچی با سطح مقطع ثابت قابل استفاده است و تنها ساینده‌ی نوع سایشی^۸ را پیش‌بینی می‌کند. ساینده‌ی نوع سایشی بر اساس مکانیزم برخورد و تماس اجسام ساینده و ساینده به دو نوع دو جسمی و سه جسمی^۹ رده‌بندی می‌شود. روش CSM به سایر انواع خرابی دیسک‌ها مانند لب‌پزدگی، سایش یک طرفه و چند طرفه که جزو سایش‌های غیرنرمال اند ارتباطی ندارد [۷]. لیسرود^{۱۰} (۱۹۹۷) نشان داد که در مقیاس میکروسکوپی مولفه‌های اساسی برای سایش دیسک‌های برشی وجود دارد که شامل خستگی سطح^{۱۱}، چسبندگی، سایش نوع سایشی و نظایر آن است [۸]. در روش NTNU از شاخص عمر دیسک^{۱۲} استفاده می‌شود که اساساً مبتنی بر آزمون SJ^{۱۳} و آزمون مقدار سایش فولاد^{۱۴} در سنگ است. در این مدل برای محاسبه عمر دیسک‌ها تصحیحاتی همچون تصحیح قطر ماشین، تصحیح درصد کوارتز، تصحیح چرخش کله حفار ماشین و تصحیح تعداد دیسک‌های برشی در نظر گرفته شده است [۹]. بینیاوکسی^{۱۵} و همکاران (۲۰۰۹) برای برآورد آهنگ مصرف دیسک‌های برشی از پارامترهای RME^{۱۶} و CAI استفاده کرده‌اند. آن‌ها معادلات تجربی برای برآورد عمر دیسک‌های برشی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از تونل گوادر^{۱۷} در اسپانیا ارائه کردند [۱۰]. فرنزل^{۱۸} بر اساس یک پایگاه اطلاعاتی وسیع از برنامه‌های کاربردی در سال ۲۰۱۱، یک روش تجربی برای پیش‌بینی عمر دیسک‌های برشی تکی با قطر ۱۷ اینچی و با سطح مقطع ثابت ارائه کرد که امکان پیش‌بینی میزان مصرف دیسک‌ها را هم برای سایش اولیه و هم

5- Colorado school of mines

6- Cerchar abrasivity index (CAI)

7- Single-disc cutters

8- Abrasive wear

9- Two body and Three body wear

10- Lislrud

11- Surface fatigue

12- Cutter life Index (CLI)

13- Siever's J-value

14- Abrasion value steel (AVS)

15- Bieniawski

16- Rock mass excavatability

17- Guadrama

18- Frenzel

1- Rad

2- Bamford

3- Wijk

4- Gehring

آن، عمدتاً سه نوع سایش را شامل می‌شود که شامل ساییدگی نوع سایشی^۹ (در زمین‌های سیمانی شده و لسی)، سایش ضربه‌ای^{۱۰} (در جبهه‌کار مختلط) و سایش چسبیده^{۱۱} (در ماسه‌های متراکم غنی کوارتز) است [۱۸]. بر اساس مطالعه لین^{۱۲} و همکاران (۲۰۱۷) ویژگی‌های سایشی حلقه دیسک به وسیله سختی و چقرمگی آن تعیین می‌شود. از آنجایی که نوع سنگ‌هایی که دیسک‌های برشی در مسیر حفاری تونل با آن‌ها برخورد می‌کنند مشخص است، بنابراین برای بهبود مقاومت سایشی حلقه دیسک‌ها با انتخاب خواص مطلوب برای حلقه‌ها بر اساس نوع سنگ مسیر تونل، می‌توان سایش دیسک‌ها را کاهش داد [۱۹]. لیو^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۸) مدلی برای پیش‌بینی عمر دیسک‌های برشی ۲۰ اینچی در گرانیب ارایه کردند. داده‌های مورد استفاده در این مدل مربوط به اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده از اجرای تونل انتقال آب در چین است که یک مدل تجربی است و شاخص ساینده‌ی سرشار و مقاومت فشاری تک محوری سنگ به عنوان متغیرهای ورودی مدل و عمر دیسک‌های برشی به عنوان متغیر مستقل مدل در نظر گرفته شده است [۲۰]. لین و همکاران برای بهبود مقاومت سایشی دیسک‌های برشی ماشین حفار تونل، تاثیرات ویژگی‌های سنگ‌ها و حلقه دیسک بر روی رفتار سایشی دیسک برشی را مورد بررسی قرار دادند. آزمون‌های سایشی انجام گرفته بر روی سنگ‌ها و دیسک‌های برشی نشان داد که ویژگی‌های حلقه و نوع سنگ‌ها تاثیرات قابل توجهی در سایش دارد [۲۱]. یانگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۸) بر اساس تئوری ساییدگی نوع سایشی و استخراج بارهای نرمال دیسک برشی، مدل خطی برای آهنگ سایش دیسک‌های برشی ارایه دادند. مدل پیش‌بینی خطی آهنگ سایش دیسک‌های برشی نشان می‌دهد که آهنگ سایش متناسب با فاصله دیسک‌ها، مقاومت سنگ و شعاع نصب شده دیسک و به طور معکوس متناسب با عرض حلقه، قطر دیسک و قدرت عملکرد حلقه دیسک است [۲۲]. حسن‌پور در سال ۲۰۱۸، از داده‌های جمع‌آوری شده از پروژه قمرود برای توسعه روابط تجربی و تخمین سایش دیسک‌های برشی در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی درجه کم تا متوسط استفاده کرد [۲۳].

سایندگی خاصیتی است که از برهم کنش اجسام در تماس با یکدیگر ناشی می‌شود. این که یک سنگ ساینده باشد یا نه، به خواص ابزار برنده یا بخش در معرض سایش (جسم یکپارچه) و سنگ یا بخش ایجادکننده سایش (جسم مقابل) تحت شرایط

برای سایش ثانویه (قفل‌شدگی دیسک برشی، لب پرشدگی، شکستن حلقه دیسک و نظایر آن) فراهم می‌کند [۱۱]. کاردو و جیرودی^۱ (۲۰۱۲) نشان دادند که سایش دیسک برشی با اختلاف سختی بین سنگ و حلقه دیسک ارتباط دارد و یک میکرو سختی مناسب در دیسک‌های برشی باعث مقاومت دیسک‌های برشی در برابر سایش می‌شود [۱۲]. فرخ و همکاران^۲ (۲۰۱۲) مجموعه‌ای از نمودارها را برای برآورد سایش دیسک‌های برشی از لحاظ حجم حفاری در هر دور چرخش بر اساس نوع سنگ، قدرت سنگ، خواص توده‌ی سنگ و ساییدگی ارایه کرده‌اند [۱۳]. وانگ^۳ و همکاران (۲۰۱۲) روشی جدید بر مبنای انرژی ویژه^۴ و مکانیزم سایش ارایه کردند. انرژی ویژه به عنوان انرژی مورد نیاز برای حفر واحد حجم سنگ به وسیله دیسک برشی تعریف می‌شود و از پارامترهای اولیه برای تعیین عملکرد ماشین حفار تونل محسوب می‌شود. در این روش متوسط میزان سایش دیسک‌های برشی روی کله حفاری ماشین حفار در سخت سنگ را می‌توان با استفاده از معادلات انرژی ویژه محاسبه کرد [۱۴]. بر اساس نظر ژائو^۵ و همکاران (۲۰۱۴)، سختی^۶ و چقرمگی^۷ جزو خواص مکانیکی مهم حلقه دیسک و از پارامترهای تعیین‌کننده در سایش دیسک برشی به شمار می‌رود. از آنجایی که تنش تماسی و ارتعاشی وارد بر دیسک‌های برشی به طور گسترده‌ای در شرایط مختلف زمین‌شناسی تغییر می‌کند در صورتی که خواص حلقه دیسک (سختی و چقرمگی) با شرایط خاص زمین‌شناسی و نوع سنگ‌ها مطابقت نداشته باشد، میزان سایش به شدت افزایش می‌یابد [۱۵]. حسن‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۴ مدلی برای سایش دیسک‌های برشی در سنگ‌های پیروکلاستیک و آذرین مافیک ارایه کردند. مدل ارایه شده شامل دو پارامتر مستقل شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی (مقاومت فشاری تک محوری و سختی ویکرز^۸) و پارامتر وابسته (آهنگ مصرف دیسک برشی) است [۱۶]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مطالعه خود، با تجزیه و تحلیل فرآیند اصطکاک بین حلقه دیسک‌ها و سنگ سخت، رابطه بین نیروی غلطشی و نیروی محوری حلقه‌ها را تعیین کردند و با بررسی شرایط مرزی (تغییر مقدار ضریب اصطکاک)، معادله انرژی را برای کله‌حفار توسعه دادند [۱۷]. بر اساس مطالعه برزگری و همکاران در سال ۲۰۱۵، اجزای ساییده شده در قطعات ماشین حفار تونل بسته به شرایط زمین و سختی

1- Cardu and Giraudi

2- Farrokht et al

3- Wang

4- Specific energy (SE)

5- Zhao

6- Hardness

7- Toughness

8- Vickers hardness number rock (VHNR)

9- Abrasive wear

10- Impact wear

11- Adhesive wear

12- Lin

13 - Liu

14- Yang

دما و فشار حاکم بستگی دارد. ساینده‌گی خاصیتی رفتاری است و می‌توان آن را به صورت ظرفیت سایشی تعریف کرد که ناشی از ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مکانیک سنگی است [۲۴].

سایش دیسک‌های برشی نه تنها عاملی موثر در راندمان حفاری و عملکرد ماشین حفار به شمار می‌آید بلکه شاخص مهمی برای ارزیابی حفرپذیری زمین در پروژه‌های تونلسازی محسوب می‌شود. اگرچه در حفاری مکانیزه، توان حفاری ماشین‌های حفر تونل با فاکتورهایی همچون عملکرد، آهنگ نفوذ یا سرعت حفاری تعریف می‌شود ولی در این میان معمولاً سایش به عنوان یک پارامتر مهم در فرآیند خوردگی و زوال مواد مطرح است [۲۵].

در این مقاله، بر اساس اطلاعات میدانی و پارامترهای عملکردی به دست آمده از حفاری مکانیزه ۹٫۵ کیلومتر از تونل در شرایط زمین‌شناسی از نوع سنگ‌های رسوبی و آذرین، انواع و علل سایش دیسک‌های برشی بر حسب نوع سنگ‌شناسی مسیر تونل به تفکیک مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط آهنگ مصرف ابزار با ویژگی‌های توده سنگ (مقاومت فشاری تک محوری، شکنندگی، شاخص ساینده‌گی سرشار)، طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ (GSI) و شاخص کیفی سنگ) و پارامترهای عملکردی ماشین حفار تونل (گشتاور کله حفار^۱ و نیروی پیشران^۲) مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- طرح مورد مطالعه

طرح مورد مطالعه، تونلی به طول ۳۶ کیلومتر و قطر حفاری ۶٫۳۲ متر است که برای انتقال آب از دامنه‌های غربی زاگرس به حوزه دریاچه ارومیه در حال اجراست. آقاناتی (۱۳۸۳) منطقه مورد مطالعه را از لحاظ تقسیمات واحدهای ساختمانی- رسوبی

۳- واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

برای تفکیک واحدهای سنگی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی علاوه بر ویژگی‌های سنگ‌شناسی، تغییرات ساختاری از قبیل ضخامت لایه‌ها، میزان خردشدگی، فراوانی ناپیوستگی‌ها، میزان هوازده‌گی و نظایر آن لحاظ می‌شود. با توجه به برداشتهای انجام شده در مطالعات صحرایی، بخش خروجی تونل را می‌توان به ۹ واحد از نظر زمین‌شناسی مهندسی تقسیم‌بندی کرد. ویژگی کلی این واحدها در جدول ۱ به طور خلاصه ارائه شده است. در شکل ۱ نیمرخ زمین‌شناسی مهندسی تونل مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱- توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی موجود در مسیر تونل مورد مطالعه.

واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد زمین‌شناسی	توصیف صحرایی ویژگی‌های زمین‌شناسی
WMg	Wgr1	کمی ضعیف، بلوکی تا نامنظم، هوازده، خرد شده و ناپایدار
Mg	Wgr2	نیمه مقاوم تا مقاوم، بلوکی تا توده‌ای، غیرهوازده تا کمی هوازده و پایدار
Pgnschmb	K ^{Ga}	نیمه مقاوم، بلوکی تا صفحه‌ای، کمی هوازده و پایدار
Ddsh	K ^{D, sh}	نیمه مقاوم، بلوکی تا کمی هوازده، پایدار
Dshph	K ^{sh, sl, ph}	نیمه مقاوم، بلوکی تا صفحه‌ای، کمی هوازده و پایدار
MI	K ^{ml}	نیمه مقاوم، بلوکی، کمی هوازده و پایدار
PvbDgtu	Db3	نیمه مقاوم، بلوکی تا نامنظم، کمی هوازده و پایدار
Md	K ^{D, Ds}	نیمه مقاوم، بلوکی، کمی هوازده و پایدار
MDg	Wgr3	مقاوم، توده‌ای تا بلوکی، غیرهوازده و پایدار

1- Torque

2- Thrust force

مناسبی دارند، عمدتاً به صورت نرمال سایش می‌یابند. برعکس، دیسک‌های برشی که کیفیت فولاد مورد استفاده در حلقه آن‌ها نامناسب و یا عملیات حرارتی انجام شده بر روی آن‌ها (که برای افزایش سختی آن‌ها انجام می‌گیرد) ناقص باشد، دچار آسیب‌دیدگی از نوع سایش غیرنرمال می‌شوند.

سایش ابزار برش و سایر قطعات ماشین حفاری تونل به دو دسته سایش اولیه^۳ و سایش ثانویه^۴ تقسیم‌بندی می‌شود. سایشی که به دلیل تماس دیسک‌های برشی با سنگ و مصالح خرده‌سنگی ایجاد می‌شود را سایش اولیه می‌نامند که عمدتاً مربوط به حلقه دیسک‌های برشی است. سایش سایر اجزای ماشین حفار از جمله صفحه کله حفار، تجهیزات انتقال مواد و نظایر آن که مستقیماً به علت برش سنگ نیست، سایش ثانویه نامیده می‌شود [۲۷].

نشود و دیسک به صورت متوالی حرکت کرده و قفل شود [۲۶]. این نوع سایش عمدتاً به علت از کار افتادن یاتاقان‌ها و یا در زمین‌های نرم که اصطکاک کافی برای غلبه بر گشتاور مورد نیاز برای چرخش دیسک وجود نداشته باشد، اتفاق می‌افتد. ترک خوردگی حلقه دیسک^۱ اشاره به ترک‌هایی دارد که در امتداد شعاعی حلقه دیسک ظاهر می‌شوند. خارج شدن حلقه دیسک^۲ از محل خود، به شکستگی و خارج شدن حلقه از روی بدنه دیسک به علل مختلف از جمله کیفیت پایین جوشکاری رخ می‌دهد. لب‌پر شدن حلقه دیسک به جدا شدن بخشی از حلقه دیسک به علت ترک‌های ایجاد شده در اثر خستگی گفته می‌شود. خطاهای عملیات حرارتی حلقه دیسک و شوک‌های ضربه‌ای وارد به آن‌ها در اثر بارگذاری‌های متغیر (به ویژه در زمین‌های مختلف)، باعث لهیدگی بخشی از حلقه دیسک و یا لب‌پر شدن آن می‌شود [۱۱]. دیسک‌های برشی که کیفیت فولاد



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)



(ج)



(ح)



(ز)

شکل ۳- انواع خرابی دیسک‌های برشی (الف) سایش نرمال؛ (ب) لهیدگی یا قارچی شدن؛ (پ) سایش یک‌طرفه حلقه؛ (ت) شکستن حلقه؛ (ث) لب‌پر شدگی؛ (ج) خرابی یاتاقان‌ها و آب‌بندها [۲۲]؛ (چ) ترک خوردگی حلقه و (ح) خارج شدن حلقه.

3- Primary wear
4- Secondary wear

1- Cracking of the cutter ring
2- Dropping out of the split ring

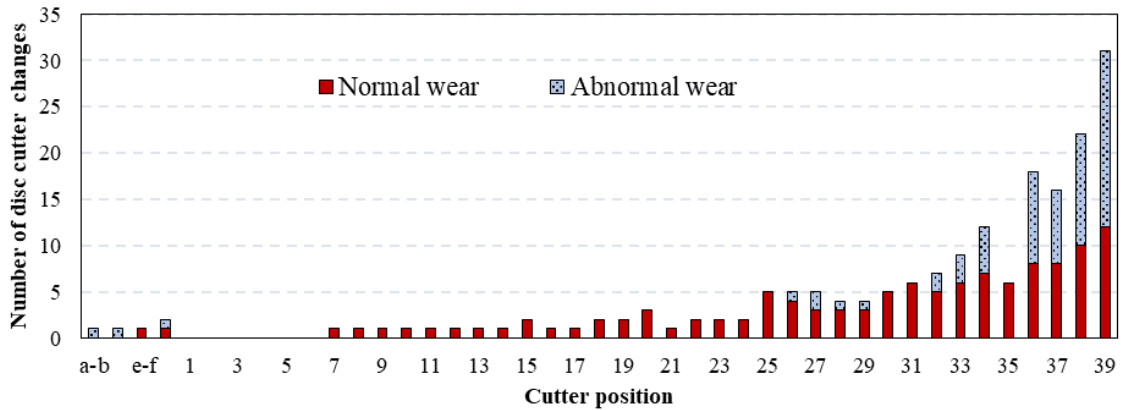
۶- آهنگ مصرف دیسک‌های برشی

۶-۱- نوع سایش

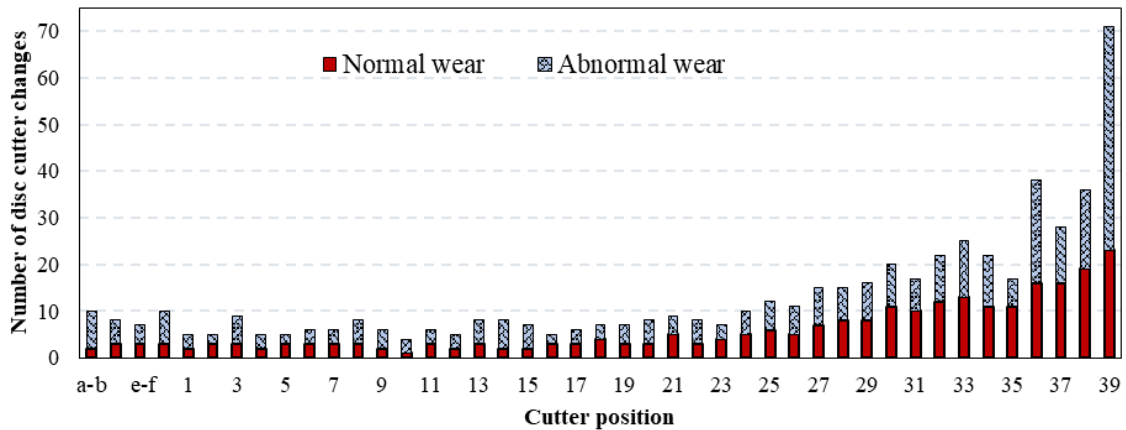
با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت که با افزایش فاصله دیسک‌های برشی از یکدیگر تعداد مصرف آن‌ها افزایش می‌یابد.

دیسک برشی واقع در موقعیت شماره ۳۵، تعداد تعویض کمتری نسبت به دیسک‌های اطراف دارد که این موضوع ممکن است ناشی از درگیری کمتر آن‌ها با زمین یا تعویض دیسک‌های برشی مجاور با دلایلی غیر از سایش نرمال (مانند شکستن حلقه، نشستی روغن و نظایر آن) باشد.

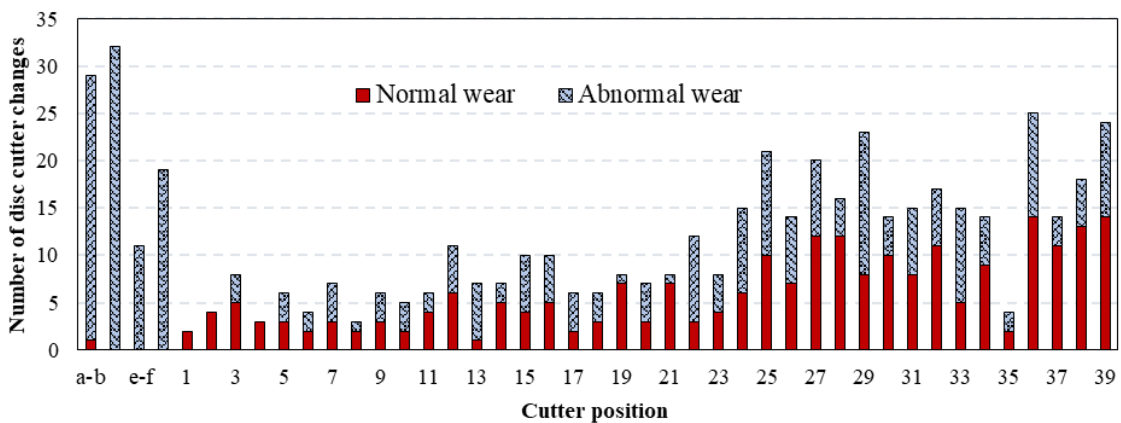
در این مطالعه سنگ‌شناسی غالب بخش حفاری شده مسیر تونل به سه بخش عمده (بخش گرانیت اولیه، بخش آهکی- دگرگونی و بخش گرانیت ثانویه) تقسیم‌بندی شده است. تعداد تعویض و نوع سایش دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها بر روی کله حفار در هر بخش در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۴- نوع سایش و تعداد تعویض دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت قرارگیری آن‌ها در بخش گرانیت اولیه.



شکل ۵- نوع سایش و تعداد تعویض دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت قرارگیری آن‌ها در بخش آهکی- دگرگونی.



شکل ۶- نوع سایش و تعداد تعویض دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت قرارگیری آن‌ها در بخش گرانیت ثانویه.

در شکل ۸ نوع و درصد سایش دیسک‌های برشی برای بخش گرانیته اولیه نشان داده شده است. ۵۲ درصد از تعویض‌ها به علت سایش نرمال، ۳۲ درصد به علت شکستگی حلقه و ۸ درصد به علت قفل‌شدگی یاتاقان است. با توجه به این که سایش غیرنرمال عمدتاً به دلیل شکستگی حلقه است، بنابراین می‌توان دلیل آن را کیفیت نامناسب فولاد مورد استفاده برای حلقه دیسک و آسیب‌دیدگی آن بر اثر نوسانات دمایی عنوان کرد.

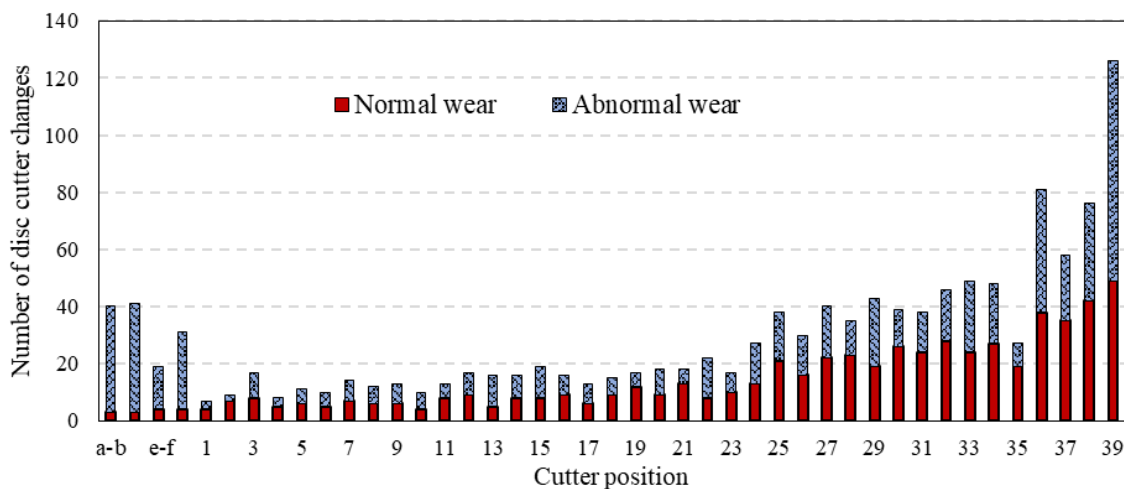
در شکل ۹ نوع و درصد سایش و خرابی دیسک‌های برشی در بخش آهکی دگرگونی نشان داده شده است. در این واحد، سایش نرمال بیشتر از سایش غیرنرمال روی داده است. از بین خرابی‌های غیرنرمال نیز لب‌پر شدن حلقه با ۱۵ درصد، بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده و قفل‌شدگی یاتاقان و شکستگی حلقه به ترتیب با ۱۲ و ۱۰ درصد بیشترین مقدار خرابی را تشکیل می‌دهند.

در شکل ۱۰ نوع و درصد سایش دیسک‌های برشی برای بخش گرانیته ثانویه نشان داده شده است. برخلاف دو بخش قبلی، در این بخش مقدار سایش غیرنرمال (۵۴ درصد) بیشتر از سایش نرمال (۴۶ درصد) است. در این بخش، گریپاژ یاتاقان با ۱۸ درصد بیشترین مقدار سایش و خرابی غیرنرمال را به خود اختصاص داده و شکستگی حلقه با ۱۰ درصد در رده بعدی قرار دارد. علت بالا بودن خرابی دیسک‌های برشی (قفل‌شدگی یاتاقان) در این بخش را می‌توان به استفاده از نیروی پیشران بالا در برخی مقاطع نسبت داد که در اطلاعات ثبت شده مشاهده شد.

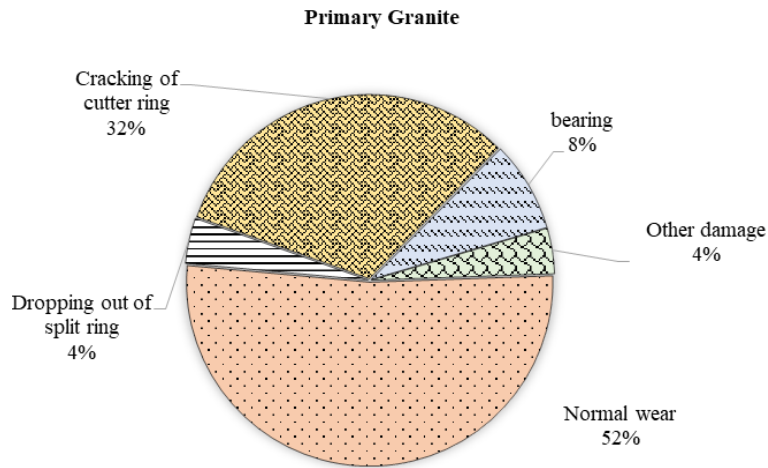
شکل ۵ نیز نشان می‌دهد با افزایش فاصله دیسک از مرکز، تعداد تعویض‌ها نیز افزایش می‌یابد. همچنین، عدم کارایی دیسک برشی شماره ۳۵ باعث سایش بیشتر دیسک‌های کناری شده است ولی در حالت کلی از روند عمومی تبعیت می‌کند. در بخش گرانیته ثانویه تعداد تعویض از نوع غیرنرمال در بخش مرکزی خیلی زیاد بوده است که ممکن است در اثر لرزش شدید کله حفاری و اعمال بار جانبی زیاد باشد. در این بخش از کله حفاری، به علت شعاع چرخش کمتر، ترکیبی از چرخش خارج از محور و پدیده سرخوردن در آن‌ها انجام گیرد. این پدیده در ماشین‌های با قطر زیاد که سرعت چرخش دیسک‌های برشی کمتر است، اهمیت بیشتری دارد. علاوه بر این، علت تعویض دیسک‌های برشی مرکزی در این واحد (بیش از ۹۹ درصد) سایش غیرنرمال است که دلیلی بر مطالب یاد شده است. دیسک‌های برشی شماره ۲۴ تا ۲۹ به دلیل اینکه که بیشترین بار را تحمل می‌کنند، تعداد تعویض‌های بیشتری دارند.

بنابراین در زمان طراحی می‌توان با اضافه کردن دیسک‌های برشی در این بخش از کله حفاری، متوسط بار در این بخش را کاهش داد. تعداد تعویض‌های انجام گرفته در طول کل مسیر مورد مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است.

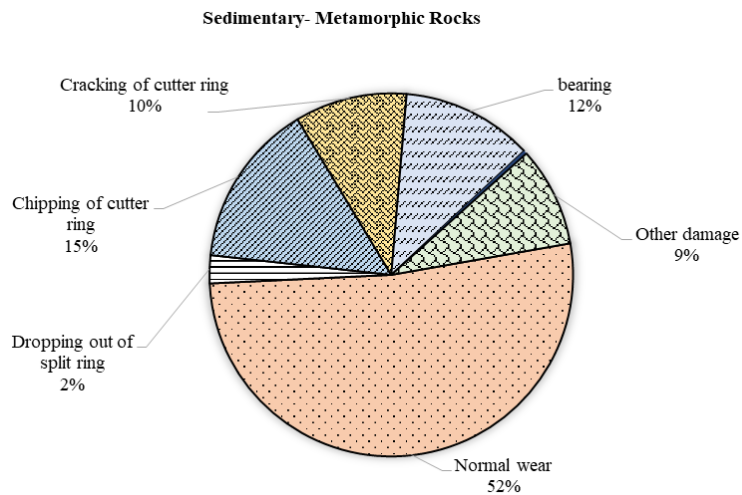
همان‌طور که مشاهده می‌شود، مصرف دیسک‌های برشی نسبت به فاصله از مرکز کله حفار را (به غیر از بخش مرکزی) روند عادی سایش طی کرده‌اند و در کل دیسک‌های برشی موقعیت شماره ۲۳، ۲۶ و ۳۵ نسبت به دیسک‌های مجاور کمتر دچار سایش شده‌اند.



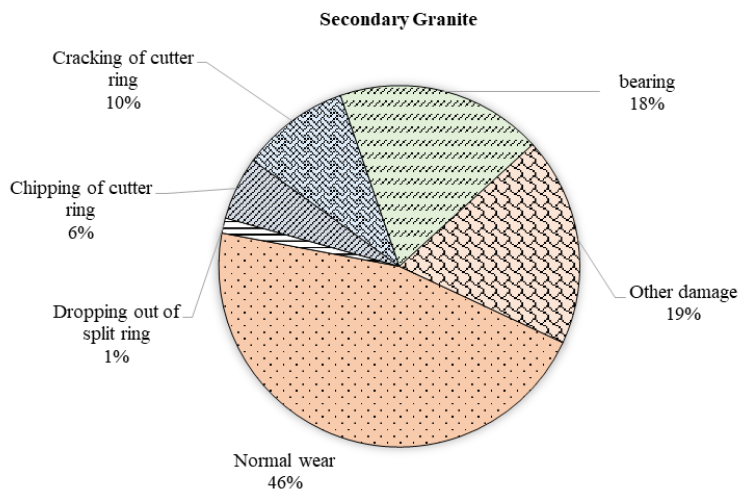
شکل ۷- نوع سایش و تعداد تعویض دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت قرارگیری آن‌ها در طول کل تونل.



شکل ۸- نوع و درصد سایش و خرابی دیسک‌های برشی در بخش گرانیت اولیه.



شکل ۹- نوع و درصد سایش و خرابی دیسک‌های برشی در بخش آهکی دگرگونی.



شکل ۱۰- نوع و درصد عوامل تخریبی دیسک‌های برشی در بخش گرانیت ثانویه.

۶-۲- ارتباط سایش دیسک‌های برشی با پارامترهای زمین‌شناسی و حفاری

در این مطالعه، از داده‌های مربوط به ساخت ۹٫۵ کیلومتر از تونل انتقال آب مورد مطالعه استفاده شده است. برای حفاری تونل در بخش مورد مطالعه از دیسک‌های برشی تولیدی تعداد ۸ شرکت (ویرت، پالمیری، ایبرک، ان اف ام، بارتز، تونل‌ساز ماشین، الماسه‌ساز و شکل‌دهی فلزات) استفاده شده است. دیسک‌های برشی مشخصات و نیمرخ هندسی یکسانی دارد و سختی فولاد حلقه آن‌ها بین ۵۴ تا ۵۷ راکول تغییر می‌کند.

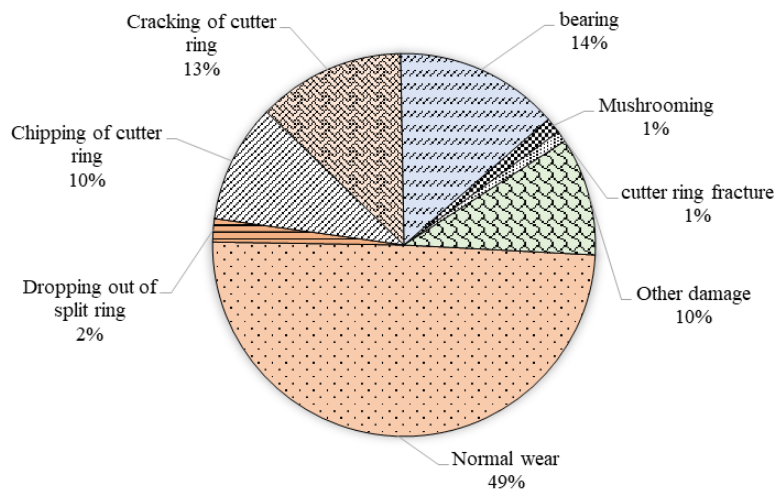
در این پروژه تعداد کل دیسک‌های برشی تعویض شده ۱۲۷۵ عدد است که ۶۳۰ عدد (۴۹ درصد) از آن‌ها به علت سایش نرمال و ۶۴۵ عدد (۵۱ درصد) از آن‌ها به علت سایش غیرنرمال است. در شکل ۱۱ نوع و درصد سایش دیسک‌های برشی برای کل مسیر مورد مطالعه (۹٫۵ کیلومتر) ارایه شده است. با توجه به شکل، ۱۴ درصد از خرابی‌های غیرنرمال مربوط به قفل‌شدگی یا ناقان، ۱۳ درصد مربوط به شکستگی حلقه، ۱۰ درصد مربوط به لب‌پر شدگی و سایر را شامل می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در دو بخش اول (گرانیت اولیه و آهکی دگرگونی) سایش نرمال بیشتر از سایش غیرنرمال است ولی در بخش گرانیت ثانویه سایش غیرنرمال بیشتر از سایش نرمال است. در کل نیز سایش غیرنرمال بیشتر از سایش نرمال است.

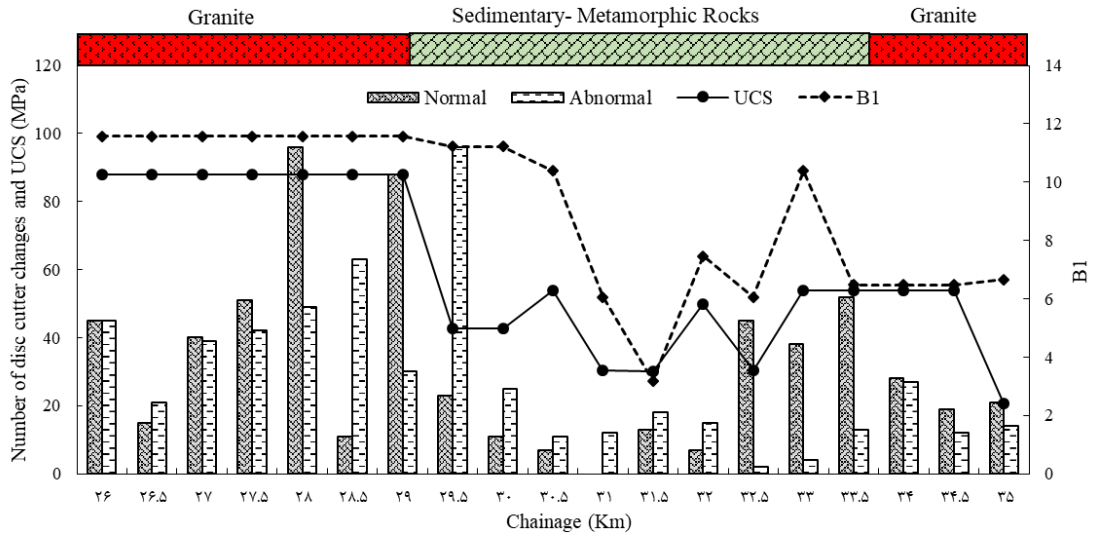
برای بررسی ارتباط بین آهنگ مصرف ابزار با ویژگی‌های زمین‌شناسی مسیر تونل، تغییرات مصرف ابزار بر حسب کیلومتر تونل در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه بازرسی و تعویض ابزارها به صورت روزانه (در حد ۱ تا ۳ ابزار)

انجام گرفته است، بنابراین برای بررسی ارتباط بین ویژگی‌های ژئومکانیکی با آهنگ مصرف ابزار، از مجموع دیسک‌های برشی تعویض شده در هر ۵۰۰ متر استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان گفت که با افزایش مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و شاخص شکنندگی (نسبت مقاومت فشاری بر مقاومت کششی آزمون برزیلین) در واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، مصرف ابزار نیز افزایش یافته است. همچنین شکل ۱۳ نشان می‌دهد که بین آهنگ مصرف ابزار به ویژه برای حالت سایش نرمال و شاخص سایش سرشار (CAI) ارتباط نسبتاً خوبی وجود دارد ولی در ارتباط با مقاومت کششی برزیلین (BTS) مغایرت‌هایی مشاهده می‌شود. در کیلومتر بین ۲۶ تا ۲۹ (گرانیت ثانویه) ویژگی‌های توده‌سنگ ثابت نیست بلکه به دلیل محدودیت تعداد آزمایش و اطلاعات موجود از نتایج یکسری آزمایش در طول این بخش استفاده شده است.

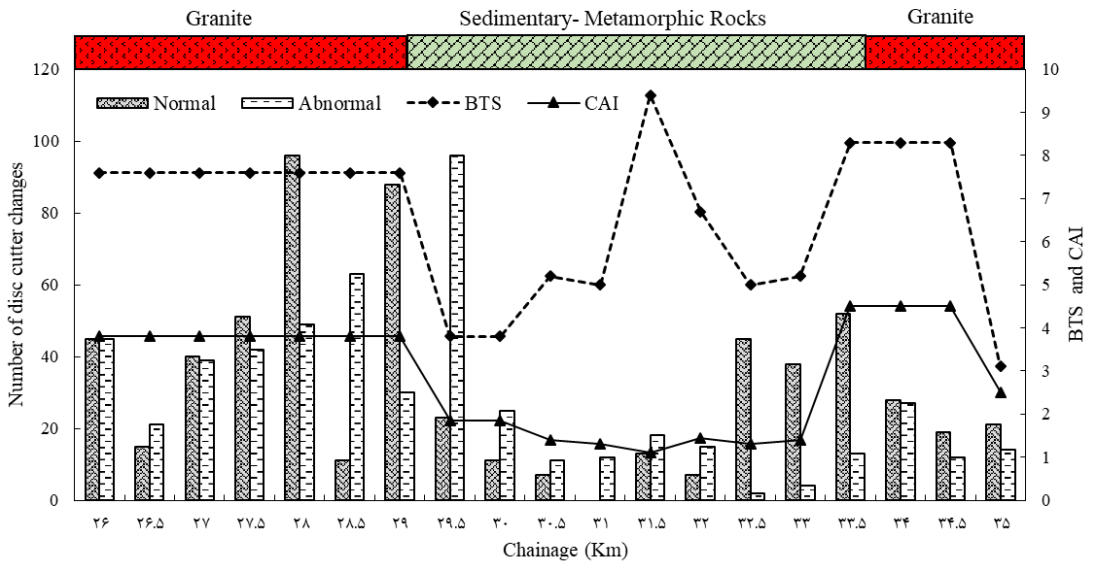
بررسی ارتباط بین آهنگ مصرف ابزار با تغییرات شاخص کیفی سنگ (RQD) و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) نشان می‌دهد که همبستگی خوبی بین این پارامترها و آهنگ مصرف ابزار وجود ندارد (شکل ۱۴). پارامترهای مربوط به طبقه‌بندی توده‌سنگ از رخنمون‌های سطحی برداشته می‌شوند که طبیعتاً با شرایط موجود در عمق تونل و جبهه حفاری متفاوت است. بررسی دقیق ارتباط بین وضعیت ناپیوستگی‌ها و خردشدگی سنگ با آهنگ مصرف ابزار نیازمند برداشت این پارامترها در جبهه حفاری تونل به طور همزمان با تعویض ابزار است. با این حال چون قبل از حفاری تونل امکان دسترسی به جبهه حفاری وجود ندارد، بنابراین از نتیجه برداشت‌های سطحی نمی‌توان برای پیش‌بینی آهنگ مصرف ابزار حفاری استفاده کرد.



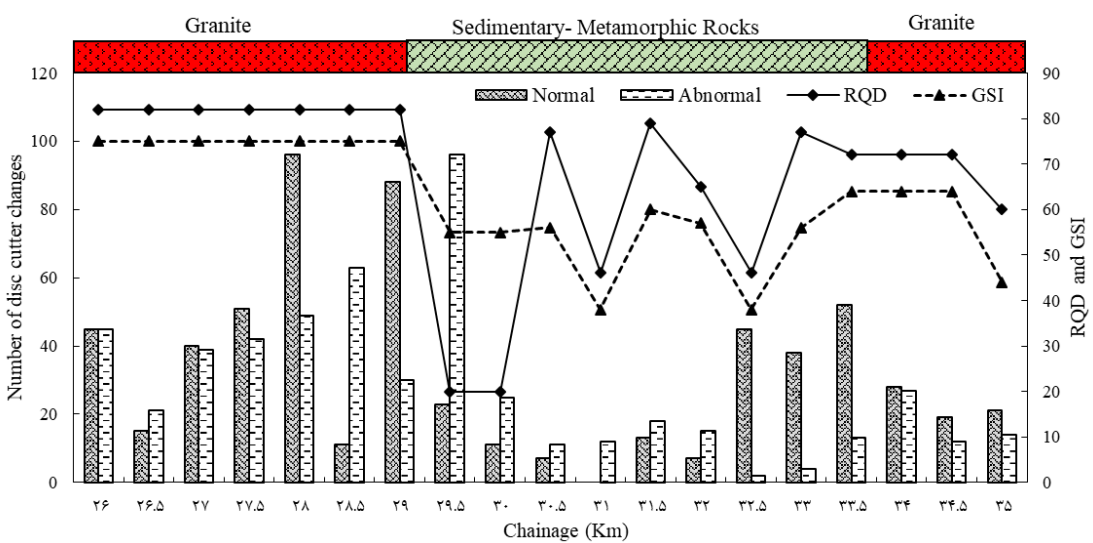
شکل ۱۱- نوع و درصد سایش و خرابی دیسک‌های برشی در کل تونل (۹٫۵ کیلومتر).



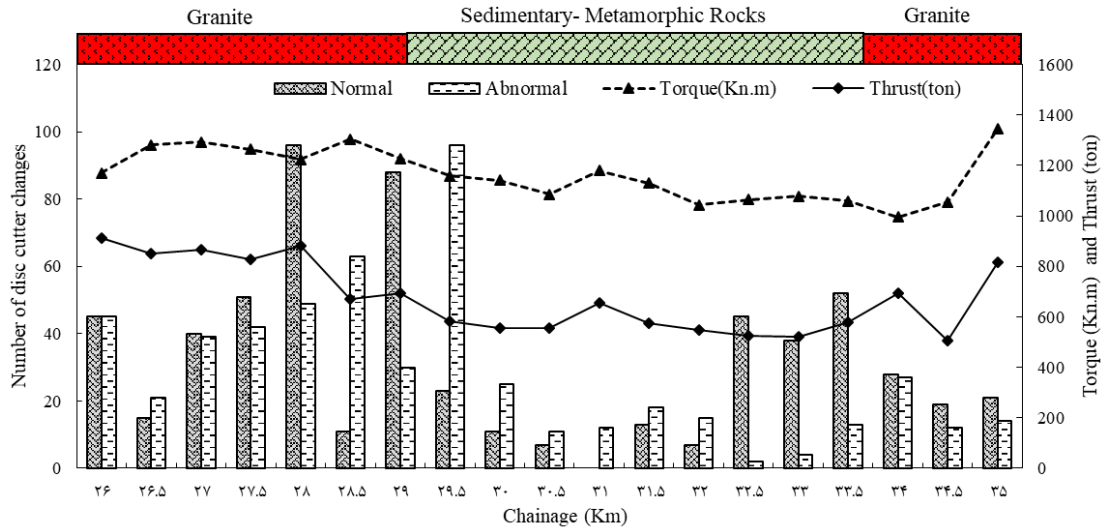
شکل ۱۲- تعداد دیسک‌های برشی مصرفی در ارتباط با تغییرات مقاومت تک‌محوری و شکنندگی سنگ‌ها.



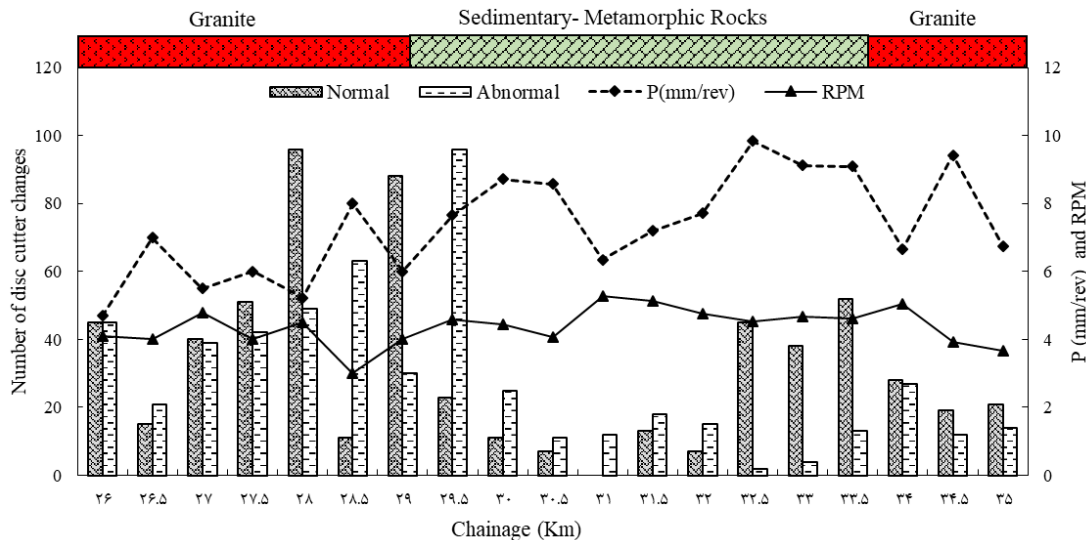
شکل ۱۳- تعداد دیسک‌های برشی مصرفی در ارتباط با تغییرات BTS و CAI.



شکل ۱۴- تعداد دیسک‌های برشی مصرفی در ارتباط با تغییرات RQD و GSI.



شکل ۱۵- تعداد دیسک‌های برشی مصرفی در ارتباط با تغییرات گشتاور و نیروی پیشران ماشین حفار.



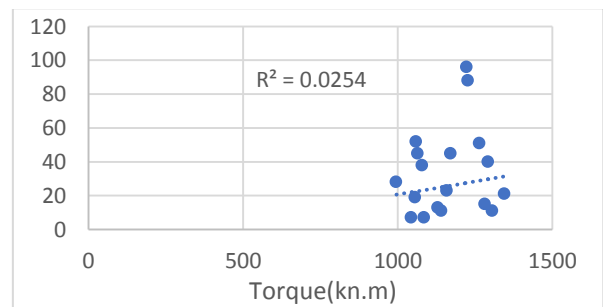
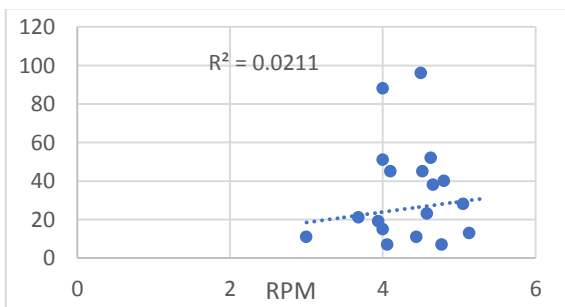
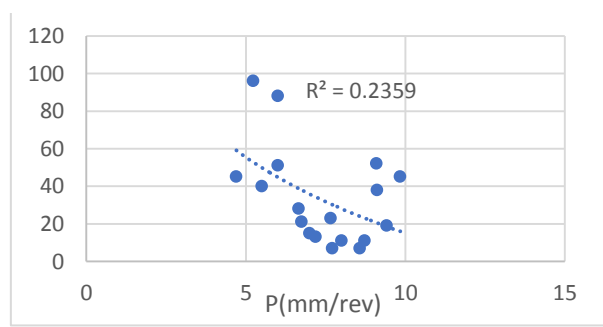
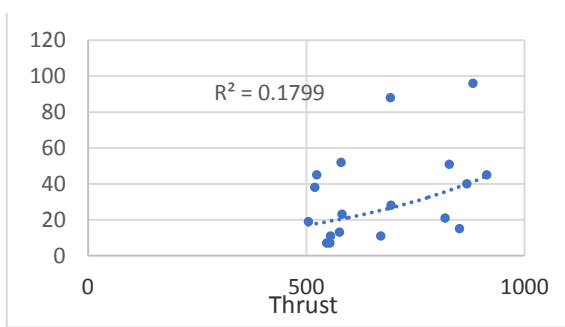
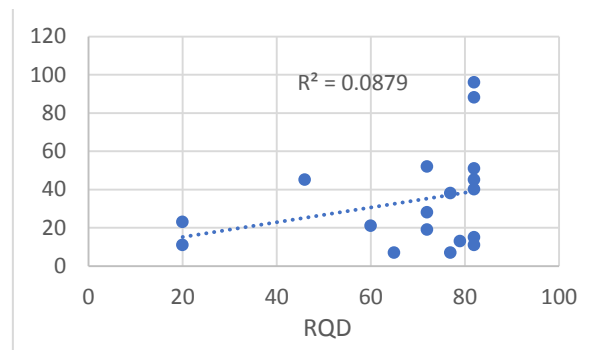
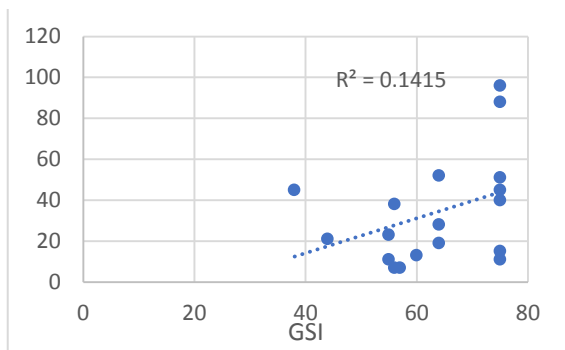
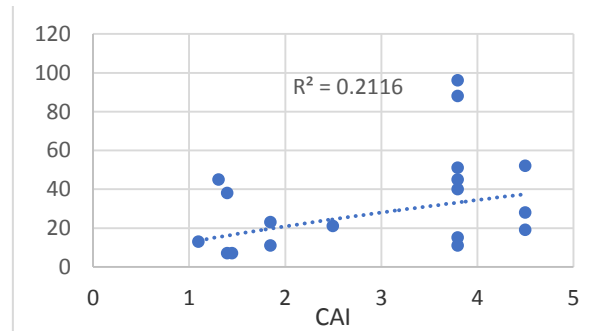
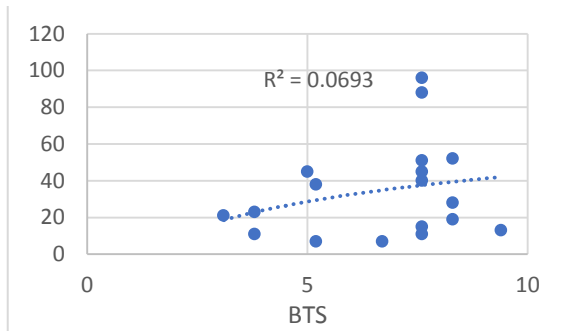
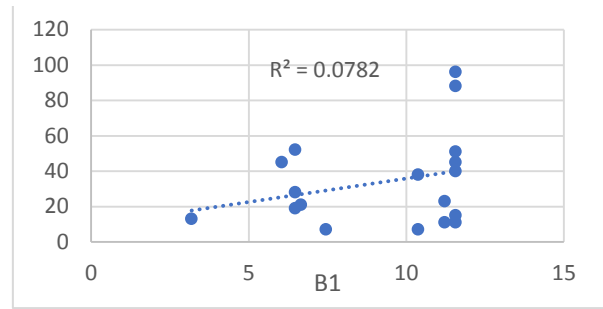
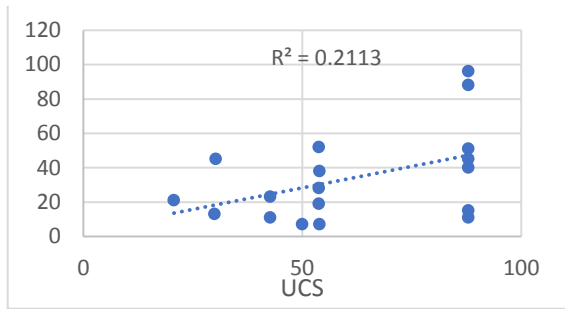
شکل ۱۶- تعداد دیسک‌های برشی مصرفی در ارتباط با تغییرات آهنگ نفوذ و دور ماشین.

دارند، نتایج به دست آمده قابل انتظار است. ارتباطی منطقی بین دور چرخش کله‌حفاری و آهنگ سایش ابزار وجود ندارد. البته برای بررسی دقیق تاثیر هر یک از پارامترها بر آهنگ مصرف ابزار لازم است سایر پارامترها به طور ثابت باقی بماند ولی در مطالعات میدانی رعایت این مساله امکان‌پذیر نیست.

برای بررسی بهتر همبستگی بین پارامترهای مختلف با آهنگ مصرف ابزار حفاری (سایش نرمال) که در شکل‌های ۱۲ تا ۱۶ نشان داده شده‌اند، منحنی برازش آن‌ها در شکل ۱۷ ارائه شده است. بر اساس این منحنی‌ها، از بین پارامترهای فوق، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص ساینده‌گی سرشار همبستگی نسبی بیشتری را نسبت به سایر پارامترها نشان می‌دهند.

در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ تغییرات مهمترین پارامترهای ماشین حفاری شامل نیروی پیشران، گشتاور کله‌حفار^۱، آهنگ نفوذ^۲ (P) و دور چرخش کله‌حفاری^۳ بر حسب دور در دقیقه (RPM) با آهنگ مصرف ابزار در کیلومترهای مختلف تونل نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود با کاهش نیروی پیشران و گشتاور ماشین حفار، میزان مصرف ابزار نیز به طور نسبی کاهش یافته است. با افزایش آهنگ نفوذ، میزان مصرف ابزار کاهش نسبی نشان می‌دهد که با توجه به اینکه تمامی این پارامترها ارتباط مستقیمی با مقاومت فشاری سنگ

- 1- Torque
- 2- Penetration
- 3- Cutterhead revolution



شکل ۱۷- منحنی برازش همبستگی بین پارامترهای مختلف با آهنگ مصرف ابزار حفاری (مؤلفه قائم آهنگ سایش نرمال است).

۶-۲- ارتباط سایش دیسک‌های برشی با موقعیت نصب آن‌ها

دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت نصب آن‌ها بر روی کله حفاری، به سه گروه مرکزی، میانی و محیطی تقسیم می‌شوند (شکل ۲). بدیهی است در هر دور چرخش کله حفاری، دیسک‌های برشی محیطی مسافت زیادتری را روی جبهه کار تونل طی می‌کنند و بنابراین اولین دیسک‌هایی‌اند که دچار سایش می‌شوند و عموماً بیشترین تعداد مصرف را دارد. از بین دیسک‌های برشی میانی نیز آن‌هایی که در قوس بیرونی قرار گرفته‌اند (دیسک‌های برشی حدواسط)، مسافت بیشتری را در هر دور چرخش کله حفاری طی می‌کنند به همین دلیل بیش از سایر دیسک‌های برشی میانی ساییده شده و تعویض می‌شوند [۲]. طول عمر نسبی دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها بر روی کله حفاری، بر اساس روابط ۱ و ۲ برای بخش‌های مختلف تونل محاسبه شده است [۹]. با توجه به این که سایش غیرنرمال دیسک‌های برشی عموماً تابع پارامترهای زمین‌شناسی و ساینده‌گی سنگ نیست، بنابراین طول عمر نسبی آن‌ها برای سایش نرمال محاسبه شده است. در شکل ۱۸ طول عمر نسبی دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها، برای بخش‌های مختلف تونل نشان داده شده است. با توجه به شکل یاد شده، بیشترین همبستگی بین طول عمر نسبی دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها بر روی کله حفاری مربوط به بخش گرانیت اولیه ($R^2 = 0,573$) است.

$$r_{ni} = \frac{N_i}{N_{TBM}} \quad (1)$$

$$H_{ni} = \frac{\sum H_{ni}}{N_{TBM} \cdot H_{ni}} \quad (2)$$

که در آن:

r_{ni} موقعیت نسبی دیسک در موقعیت i

N_i شماره موقعیت دیسک

N_{TBM} تعداد دیسک‌های برشی نصب شده بر روی کله حفاری

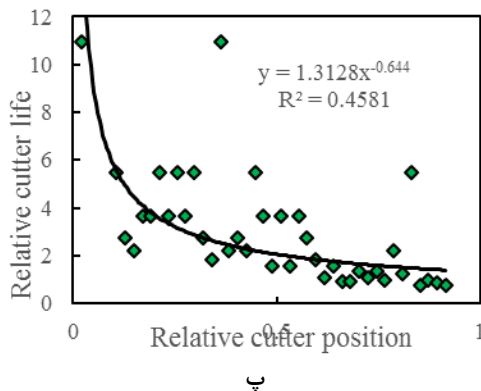
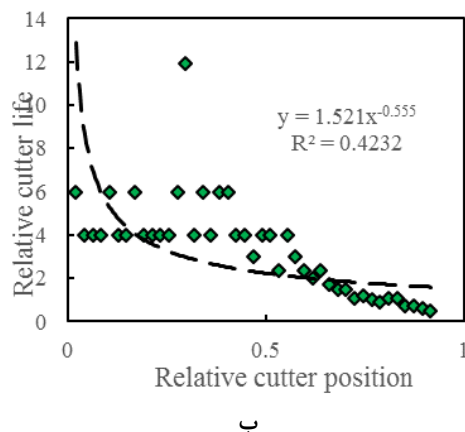
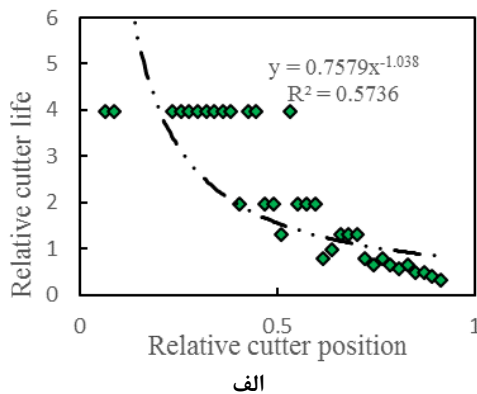
H_{ni} عمر نسبی حلقه دیسک در موقعیت i

H_{ni} تعداد دیسک‌های برشی تعریف شده در موقعیت i

روشن است که مقدار N_i و در نتیجه r_{ni} از دیسک‌های مرکزی به سمت دیسک‌های محیطی افزایش می‌یابد. در شکل ۱۹ طول عمر نسبی دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها برای کل تونل نشان داده شده است. مقایسه نتیجه به دست آمده با نمودار ارائه شده توسط برولند^۱، حاکی از ارتباط نزدیک

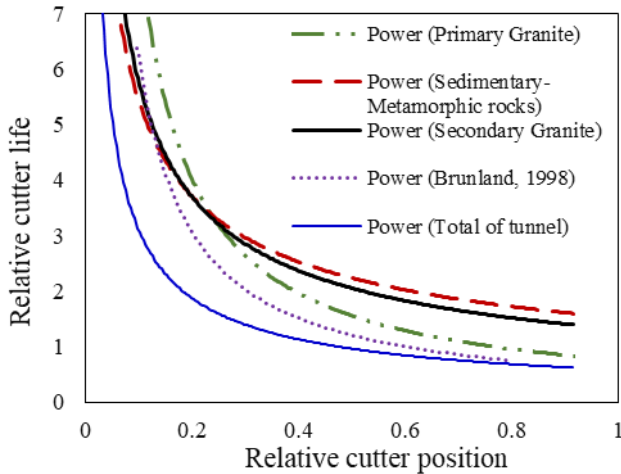
بین نتایج است. چنانچه در این شکل ملاحظه می‌شود، تغییرات طول عمر نسبی دیسک‌های برشی نسبت به موقعیت آن‌ها بر روی کله حفاری در تونل مورد مطالعه، انطباق نسبتاً خوبی با نمودار پیشنهادی برولند (۱۹۹۸) وجود دارد. در این مطالعه، رابطه بین طول عمر نسبی دیسک‌های برشی و موقعیت نسبی آن‌ها، یک رابطه توانی (رابطه ۳) است که با ضریب همبستگی نسبتاً خوب ($R^2 = 0,701$) به دست آمده است.

$$H_{ni} = 0.5791r_{ni}^{-0.73} \quad (3)$$

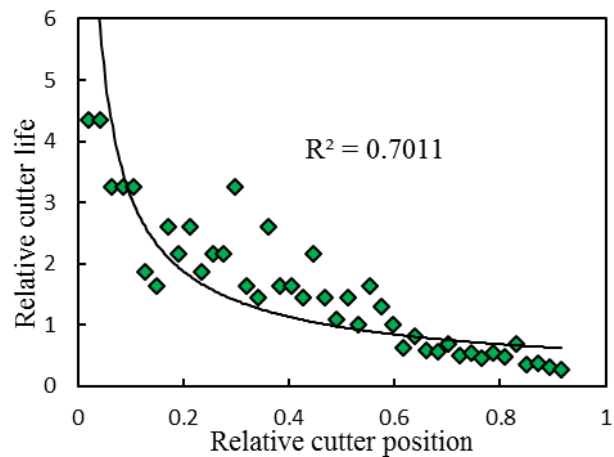


شکل ۱۸- ارتباط بین عمر نسبی دیسک‌های برشی (سایش نرمال) با موقعیت نسبی آن‌ها؛ الف) گرانیت اولیه؛ ب) آهکی - دگرگونی و پ) گرانیت ثانویه.

1- Bruland



ب



الف

شکل ۱۹- ارتباط بین عمر نسبی دیسک‌های برشی با موقعیت نسبی آن‌ها؛ الف) سایش نرمال و ب) مقایسه با رابطه پیشنهادی برولند (۱۹۹۸) [۸].

برشی مرکزی بیشتر از حد معمول بوده که ممکن است ناشی از لرزش شدید کله حفاری، اعمال بار جانبی زیاد و سایش بیشتر آن‌ها شود. همچنین در این بخش از کله حفار، به علت شعاع چرخش کوچکتر پدیده سرخوردن به جای چرخش در راستای محور دیسک‌های برشی می‌تواند رخ دهد. در طول کل تونل نیز مصرف دیسک‌های برشی با فاصله از مرکز کله حفار روند عمومی خود را (به غیر از بخش مرکزی) طی کرده‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده از بررسی آهنگ سایش نرمال دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت آن‌ها بر روی کله حفار با نمودار پیشنهادی برولند روند مشابهی را نشان داد.

تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم پروژه و تمامی کارشناسان پروژه مورد مطالعه که ما را در جمع‌آوری اطلاعات میدانی و انجام مطالعه حاضر یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. آقاباتی، ع؛ ۱۳۸۳؛ «زمین‌شناسی ایران»، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۰۰ صفحه.
۲. حسن‌پور، ج؛ جمال، ر؛ ۱۳۸۹؛ «عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت»، نشر فن آریا، ۵۵۰ صفحه.
3. Rad, P. F; 1975; "Bluntness and wear of rolling disk cutters", in Proceedings International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 12, Elsevier, p. 93-99.

۷- نتیجه‌گیری

بررسی نوع و درصد سایش دیسک‌های برشی نشان می‌دهد که از بین سایش‌های غیرنرمال، شکستگی حلقه با ۳۲ درصد در بخش گرانیت اولیه، لب‌پرشدگی حلقه با ۱۵ درصد در بخش آهکی- دگرگونی و قفل‌شدگی یا تاقان با ۱۸ درصد در بخش گرانیت ثانویه بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده‌اند. در کل تونل، ۵۱ درصد از سایش دیسک‌های برشی مربوط به سایش غیرنرمال و ۴۹ درصد از آن‌ها نیز مربوط به سایش نرمال است.

بررسی آهنگ مصرف ابزار در ارتباط با ویژگی‌های زمین‌شناسی مسیر تونل نشان می‌دهد که از بین تمامی پارامترها، مقاومت فشاری تک محوری و شاخص ساینده‌گی سرشار بیشترین ارتباط را با آهنگ مصرف دیسک‌های برشی دارند. از بین پارامترهای ماشین با کاهش نیروی پیشران و گشتاور ماشین حفار، میزان مصرف ابزار نیز بطور نسبی کاهش یافته است. با افزایش آهنگ نفوذ، میزان مصرف ابزار کاهش نسبی نشان می‌دهد. ارتباط منطقی بین دور چرخش کله حفاری با آهنگ سایش دیسک مشاهده نشد.

بررسی میزان مصرف دیسک‌های برشی بر حسب موقعیت نصب آن‌ها بر روی کله حفاری نشان می‌دهد که در دو بخش گرانیت اولیه و بخش آهکی- دگرگونی مصرف دیسک‌های برشی از روند عمومی خود پیروی می‌کنند به گونه‌ای که با فاصله از مرکز کله حفاری، آهنگ مصرف دیسک‌های برشی نیز افزایش می‌یابد. در بخش گرانیت ثانویه مصرف دیسک‌های

- Underground Space Technology, v. 28, p. 183-191.
15. Zhao, H; Shu, B; Xia, Y; and Zheng, W; 2014; "Study of wear prediction for TBM cutter based on abrasive wear model", Journal of Railway science and Engineering, v. 11, no. 8, p. 152-158.
 16. Hassanpour, J; Rostami, J; Azali, S. T; and Zhao, J; 2014; "Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 43, p. 222-231.
 17. Wang, L; Kang, Y; Zhao, X; and Zhang, Q; 2015; "Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 50, p. 324-333.
 18. Barzegari, G; Uromeihy, A; and Zhao, J; 2015; "Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 48, p. 43-57.
 19. Lin, L; Mao, Q; Xia, Y; Zhu, Z; Yang, D; Guo, B; and Lan, H; 2017; "Experimental study of specific matching characteristics of tunnel boring machine cutter ring properties and rock", Wear, v. 378, p. 1-10.
 20. Liu, Q; Liu, J; Pan, Y; Zhang, X; Peng, X; Gong, Q; and Du, L; 2018; "A wear rule and cutter life prediction model of a 20-in. TBM cutter for granite: a case study of a water conveyance tunnel in China", Rock Mechanics and Rock Engineering, v. 50, no. 5, p. 1303-1320.
 21. Lin, L; Xia, Y; Mao, Q; and Zhang, X; 2018; "Experimental study on wear behaviors of TBM disc cutter ring in hard rock conditions", Tribology Transactions, p. 1-10.
 22. Yang, Y; Hong, K; Sun, Z; Chen, K; Li, F; Zhou, J; and Zhang, B; 2018; "The Derivation and Validation of TBM Disc Cutter Wear Prediction Model", Geotechnical and Geological Engineering, v. 36, no. 6, p. 3391-3398.
 23. Hassanpour, J; 2018; "Development of an empirical model to estimate disc cutter wear
 4. Bamford, W; 1984; "Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance", in Proceedings Fifth Australian Tunnelling Conference: State of the Art in Underground Development and Construction, Preprints of Papers, Institution of Engineers, Australia, p. 218.
 5. Wijk, G; 1992; "A model of tunnel boring machine performance", Geotechnical & Geological Engineering, v. 10, no. 1, p. 19-40.
 6. Gehring, K; 1995; "Prognosis of advance rates and wear for underground mechanized excavations", Felsbau, v. 13, no. 6, p. 439-448.
 7. Rostami, J; 1997; "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure", Colorado School of Mines Golden.
 8. Lislrud, A; 1997; "Principles of mechanical excavation", Posiva Oy.
 9. Bruland, A; 1998; "Hard rock tunnel boring", Project report 13A-98, NTNU Trondheim, v. 21.
 10. Bieniawski, Z; Celada, B; Galera, J; and Tardáguila, I; 2009; "Prediction of cutter wear using RME", Universidad Politecnica de Madrid, Spain.
 11. Frenzel, C; 2011; "Disc cutter wear phenomenology and their implications on disc cutter consumption for TBM", in Proceedings 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
 12. Cardu, M; and Giraudi, A; 2012; "Metal-rock pair characterization in excavation engineering", Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, v. 112, no. 5, p. 379-386.
 13. Farrokh, E; Rostami, J; and Laughton, C; 2012; "Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs", Tunnelling and Underground Space Technology, v. 30, p. 110-123.
 14. Wang, L; Kang, Y; Cai, Z; Zhang, Q; Zhao, Y; Zhao, H; and Su, P; 2012; "The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs", Tunnelling and

- no. 2, p. 179-188.
26. Zhao, J; Gong, Q; and Eisensten, Z; 2007; “*Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore*”, Tunnelling and Underground Space Technology, v. 22, no. 4, p. 388-400.
27. Wittke, W; Erichsen, C; and Gattermann, J; 2007; “*Stability Analysis and Design for Mechanized Tunnelling*”, WBI, Felsbau GmbH, Aachen.
- for sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks*”, Tunnelling and Underground Space Technology, v. 75, p. 90-99.
24. Verhoef, P. N; 1992; “*Wear of rock cutting tools*”, Implications for the site investigation of.
25. Thuro, K; and Käsling, H; 2009; “*Classification of the abrasiveness of soil and rock*”, Geomechanics and Tunnelling, v. 2,