

ارائه مدل تجربی پیش‌بینی نرخ مصرف تیغه ماشین‌های حفر تونل تمام‌مقطع (TBM)

مسعود ظهیری^۱؛ کامران گشتاسبی^{۲*}؛ جعفر خادمی^۲؛ کاوه آهنگری^۱

۱- گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۱؛ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱

چکیده

کارایی حفاری مکانیزه در سنگ‌های سخت، ارتباط مستقیمی با کارایی تیغه‌های حفاری دارد. سایش تیغه‌ها عاملی مهم و تاثیرگذار بر قابلیت ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع (TBM) می‌باشد. زمانی که این ماشین‌ها در یک سنگ مقاوم و سخت پیشروی می‌کنند، سایش تیغه‌ها به شدت روند حفاری را تحت تاثیر قرار خواهد داد. جهت ارزیابی کارایی تیغه‌ها، شناخت مکانیزم برش سنگ توسط آن‌ها و شناسایی پارامترهای کلیدی تاثیرگذار بر روند (وضعیت) سایش تیغه‌ها الزامی است. در این مقاله بر اساس نتایج بررسی، پایش و تحلیل جامعه آماری بیش از ۱۰۰۰ قطعه تیغه حفاری که در حفاری مکانیزه تونل انتقال آب کانی سیب مورد استفاده قرار گرفته اند، مدل تجربی جهت تعیین نرخ مصرف تیغه در ۳ نوع سنگ با لیتولوژی متفاوت نظیر گرانیت (مقاومت بالا و سایش متوسط تا بالا)، کوارتزیت (مقاومت متوسط و سایش بسیار بالا) و آهک (مقاومت متوسط و سایش متوسط تا کم) ارائه گردید. در نهایت مدل تجربی ارائه شده با مدل‌های رایج نظیر NTNU مورد مقایسه قرار گرفته که نتایج بیانگر همبستگی بالا بین آن‌ها است.

واژگان کلیدی

تونل، سنگ، حفاری مکانیزه، سایش، تیغه حفاری، ماشین حفر تمام مقطع، TBM

۱- مقدمه

آگاهی و دانش فنی چندان مناسب نخواهد بود. هزینه سرمایه‌ای بالای تامین ماشین‌های حفر تونل تمام مقطع و هزینه و زمان لازم برای تعویض تیغه حفاری، نیاز به تعمیر و نگهداری مستمر، لزوم تأمین قطعات و لوازم مصرفی، لزوم استفاده بهینه با حداکثر بهره‌وری و بالاترین نرخ پیشروی در مواجهه با شرایط متغیر زمین و حفظ قابلیت اطمینان بالا را برای ماشین ضروری می‌سازد. نمونه‌های متعددی از شکست پروژه‌های حفاری مکانیزه در داخل و خارج از کشور وجود دارد که علت بسیاری از آن‌ها، عدم شناخت کافی از شرایط زمین، طراحی نامناسب و عدم سازگاری ماشین با شرایط مسیر و تجربه ناکافی پیمانکار بوده است. در طول تقریباً سه دهه از عمر تکنولوژی حفاری

نگاهی به برنامه‌های توسعه کشور نشان می‌دهد که سهم بخش تونل در پروژه‌های جاری از لحاظ ریالی و زمانی به شکل چشمگیری گسترش یافته است؛ به گونه‌ای که می‌توان از آن به عنوان شریان حیاتی در توسعه نام برد. اهمیت این موضوع با توجه به پیشرفت‌های فن‌آوری در روش‌های حفاری مکانیزه و استقبال روزافزون کارفرمایان و پیمانکاران با توجه به مزایای آن نسبت به روش‌های سنتی حفر تونل بیش از پیش شده است. اما نیاز به توسعه فضاهای زیرزمینی و همچنین احداث سریع و به صرفه آن‌ها چاره‌ای جز استفاده صحیح و آگاهانه از فناوری جدید حفاری مکانیزه ندارد. به عبارت دیگر، استفاده از تکنولوژی حفاری مکانیزه بدون



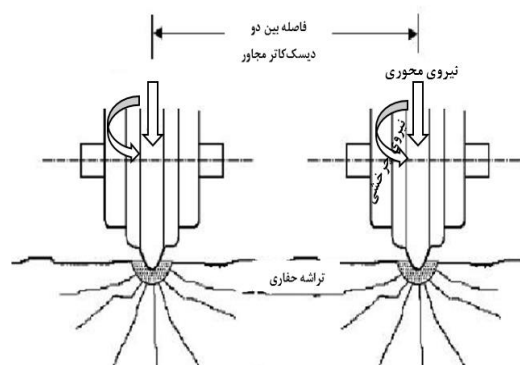
شکل ۱- موقعیت مکانی تونل انتقال آب کانی سیب

۲- مروری بر تحقیقات انجام شده

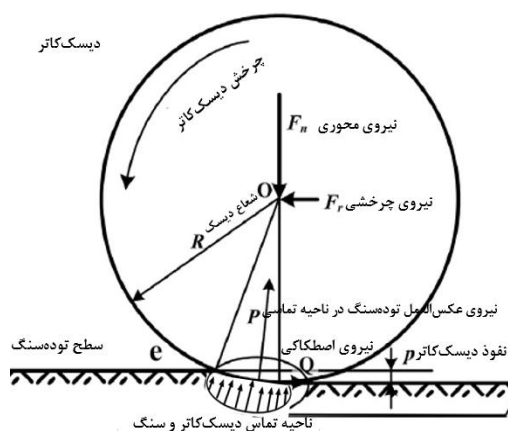
به منظور ارزیابی سایش تیغه حفاری و یا به عبارتی دیگر، عمر تیغه محققین مختلف از روشهای تئوری و تجربی یا تلفیقی از این روشها استفاده نموده‌اند. فلیشر (Fleisher) در سال ۱۹۷۳ بر اساس مصرف انرژی ناشی از اصطکاک، تئوری انرژی سایش را جهت ارزیابی سایش ارائه نمود [۱]. اپارین (Oparin) و تانایو یک روش جدید برای ارزیابی ویژگی‌های ساینده سنگ بر اساس مشخصات مکانیکی، فیزیکی و ساختاری سنگ پیشنهاد نمودند. این روش، بیانگر وابستگی مکانیزم سایش به ویژگی‌های مواد و شرایط تماس (درگیری تیغه و توده سنگ) می‌باشد [۲]. رستمی و همکاران از شاخص سرشار سنگ به عنوان پارامتری جهت ارزیابی عمر تیغه‌ها استفاده نمودند [۳]. مدل برولند (Norwegian University of Science and Technology) از شاخص مقدار ساینده‌گی نروژی (AV) جهت پیش‌بینی عمر تیغه‌ها استفاده نموده است [۴]. گهرینگ (Gehring) بر مبنای شاخص سرشار، معیاری برای ارزیابی عمر تیغه‌های ۱۷ اینچی ارائه نموده است [۵]. آلبر (Alber) علاوه بر شاخص سرشار از تغییرات تراست نیز به عنوان پارامتری تاثیرگذار بر سایش تیغه‌ها استفاده کرده است [۶]. فرنزل (Frenzel) پارامترهای تاثیرگذار بر سایش تیغه‌ها را پتانسیل ساینده‌گی سنگ و پارامترهای اپراتوری دستگاه قلمداد کرده است [۷]. ونگ (Wang) سایش تیغه‌ها را بر اساس اصطکاک آن‌ها با توده سنگ در طول حفاری تونل

مکانیزه در کشور، اگرچه دستاوردهای خوبی در سطح تجربی حاصل شده است، اما کار بنیادی و پایه‌ای در زمینه موضوعاتی همچون ارزیابی ساینده‌گی و قابلیت حفاری توده سنگ، تخمین شاخص عمر تیغه، طراحی و تکنولوژی ساخت تیغه حفاری انجام نشده است. شاخص نفوذ صحرایی (FPI: Field penetration index) یکی از پارامترهای بسیار مهم در حفاری مکانیزه تونل است. چراکه به طور مستقیم بر هزینه‌ها و زمان‌بندی پروژه تأثیر می‌گذارد. گفته می‌شود که در حفر مکانیزه تونل‌ها، هزینه‌های مصرف تیغه تقریباً یک پنجم هزینه کل پروژه و زمان‌های تعویض تیغه تقریباً یک سوم کل زمان پروژه را به خود اختصاص می‌دهد [۸]. اما این میزان بسته به شرایط زمین‌شناسی و اپراتوری ماشین، به‌ویژه در سنگ‌های سخت و ساینده تغییر خواهد کرد. به طوری که در این‌گونه سنگ‌ها به چالش اصلی در روند حفاری منجر خواهد شد. از این‌رو، ارزیابی ساینده‌گی سنگ و همچنین تخمین مصرف تیغه حفاری برای زمان‌بندی و مدیریت ریسک پروژه بسیار حیاتی است. تونل انتقال آب کانی سیب با طول ۳۵/۶ کیلومتر (شکل ۱) به وسیله دو ماشین حفر تونل تمام مقطع از نوع ماشین حفر تونل با سپر تلسکوپی به قطر ۶/۳۲ و ماشین حفر تونل تک‌سپره با قطر ۶/۴۲ در دو قطعه در حال حفاری است و هدف از احداث آن، انتقال آب از بالادست مخزن سد کانی سیب از رودخانه زاب به دشت نقده و حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. واحدهای سنگی در مسیر تونل شامل واحدهای رسوبی کرتاسه (شیل، آهک، کنگلومرا و دولومیت)، واحدهای دگرگونی کرتاسه (اسلیت، فیلیت، مرمر، هورنفلس)، واحدهای آذرین (آندزیت و تراکی آندزیت، گرانیت و گرانودیوریت) و آبرفت است. با توجه به عبور بخش اعظمی از تونل فوق‌الذکر از سنگ‌های با مقاومت و سایش بالا و بنابراین بروز مشکلات متعدد در روند حفاری تونل و سایش تیغه، مطالعات میدانی وسیع جهت بررسی موضوع، رفع مشکل و در نهایت مدیریت تامین تیغه سخت بر و ضد سایش صورت گرفت. از نتایج مهم این مطالعات گسترده می‌توان به افزایش راندمان حفاری و کاهش هزینه تامین تیغه، افزایش عمر تیغه و کاهش مصرف ویژه آن‌ها در متر طول تونل و ... نام برد. در این مقاله بخشی از یافته‌ها در این زمینه مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

چرخش و لغزش دو جسم جامد (تیغه و توده سنگ) بر روی هم ظاهر می‌شود از طرفی همزمان با لغزش جزئی تیغه‌ها بر روی توده سنگ شیارها و خراش‌هایی بر روی سطوح تیغه‌ها ایجاد می‌گردد. تکرار این فرآیند در زمان برش سنگ منجر به سایش تیغه‌ها می‌گردد (شکل ۴) [۱۲].



شکل ۳- مکانیزم برش توده سنگ تحت بارگذاری تیغه‌های مجاور [۱۱]



شکل ۴- نیروهای وارد بر تیغه و عکس‌العمل بین تیغه - توده سنگ در فرآیند برش سنگ [۱۲]

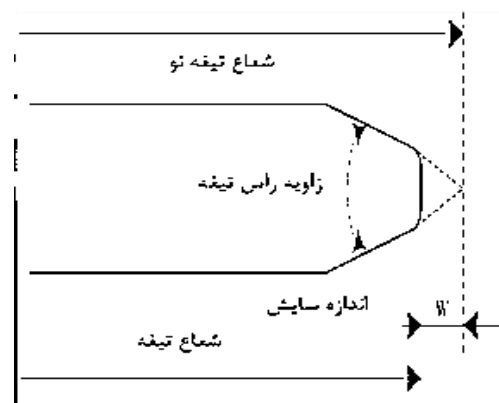
با توجه به مطالب مذکور می‌توان بارگذاری‌های انجام‌شده بر روی تیغه‌ها و خواص توده سنگ (پتانسیل ساینده) را به‌عنوان پارامترهای کلیدی در ارزیابی عمر تیغه‌ها قلمداد کرد.

در این مقاله، برای ارزیابی تاثیر پارامترهای حفاری بر مکانیزم سایش تیغه‌ها پارامتر تراست و نرخ نفوذ به‌عنوان دو

ارزیابی کرده است [۸]. حسن‌پور و همکاران بر اساس تحلیل‌های آماری انجام‌گرفته از داده‌های واقعی دستگاه حفاری و زمین‌شناسی توده سنگ، روابطی تجربی بین عمر سایش تیغه‌ها و پارامترهای زمین‌شناسی ارائه دادند [۹].

۳- مکانیزم برش و سایش تیغه حفاری

در فرآیند برش سنگ توسط تیغه حفاری، می‌توان سایش نرمال تیغه را نتیجه درگیری و عکس‌العمل بین دو جسم سخت نظیر تیغه و توده سنگ، قلمداد کرد. مطابق شکل (۲) سایش به‌صورت اختلاف بین قطر تیغه‌های نو (قبل از نصب بر روی کله حفاری) و تیغه‌های کارکرده (بعد از تعویض) بیان می‌گردد [۱۰].



شکل ۲- تصویری از سایش تیغه، W: میزان سایش [۱۰]

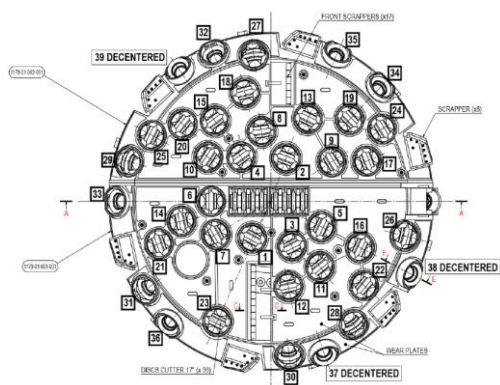
در فرآیند حفاری توده سنگ، مکانیزم عکس‌العمل و درگیری پیچیده بین تیغه و توده سنگ با مقاومت و سختی زیاد، پیش‌بینی سایش تیغه‌ها را مشکل می‌سازد. تیغه‌های مستقر بر روی کله حفار، تحت تاثیر دو نیروی محوری و چرخشی ناشی از اعمال تراست و گشتاور، در توده سنگ نفوذ کرده و با ایجاد ریز ترک‌ها در محل تماس تیغه و توده سنگ و تکرار این فرآیند در اثر بارگذاری‌های متوالی محوری و چرخشی، منجر به گسترش ترک‌ها و تشکیل تراشه‌های حفاری می‌گردند. در شکل (۳) مکانیزم برش توده سنگ تحت بارگذاری تیغه‌های مجاور نشان داده شده است [۱۱].

در فرآیند برش سنگ، تیغه توسط نیروی تراست در سنگ نفوذ کرده و تحت تاثیر گشتاور در جهت چرخشی منجر به شکست و جداشدگی سنگ می‌گردد. درگیری و عکس‌العمل بین تیغه و توده سنگ عمدتاً به دو صورت

قبیل تراست اعمالی بر تیغه‌ها، سرعت چرخش تیغه، نرخ نفوذ، موقعیت نصب تیغه و ... می‌باشند. ولی استفاده از تمامی پارامترها و امکان ارتباط منطقی بین آن‌ها به‌ویژه در مدل‌های تجربی بسیار مشکل و تا حدی غیرممکن می‌باشد. لذا باید از پارامترهایی در تحلیل‌ها استفاده نمود که بتواند نماینده معرف از دیگر پارامترها باشد. به نظر می‌رسد پارامتر شاخص نفوذ صحرایی با توجه به کثرت استفاده در مدل‌های مختلف به ویژه تعیین عملکرد دستگاه حفاری این خصوصیات را دارا باشد.

۴- ارائه مدل تجربی جهت ارزیابی عمر تیغه در تونل کانی سیب

در پروژه تونل انتقال آب کانی‌سیب همان‌طور که اشاره گردید از دو دستگاه حفاری مکانیزه TBM، با قطر ۶/۳۲ متر از نوع TBM Hard Rock Double Shield و ۶/۴۲ متر TBM Dual Mode جهت حفاری توده‌سنگ استفاده می‌شود. تیغه‌های استفاده شده از نوع (CCS: Constant Cross Section Disc Cutter) و با قطر ۱۷ اینچ بوده و تعداد تیغه‌ها بر روی کله حفار ۴۷ عدد می‌باشد. شکل (۵) چیدمان تیغه‌ها را بر روی کله حفار نشان می‌دهد.



شکل ۵- چیدمان تیغه‌ها بر روی کله حفار

با توجه به اینکه مدل‌های تجربی بر اساس پردازش و تجزیه و تحلیل آماری داده‌های صحرایی صورت می‌گیرد، لذا صحت اطلاعات ورودی، تعداد رکوردها و دقت در ثبت آن‌ها تاثیر بسزایی در خروجی این‌گونه مدل‌ها دارد. جهت حفظ این روند در تعیین نرخ مصرف یا عمر مفید تیغه‌ها در تونل

پارامتر کلیدی منظور گردیدند. همان‌طور که ذکر شد؛ مکانیزم سایش تیغه‌ها در اثر نیروی اصطکاک لغزشی بین توده‌سنگ و تیغه در محل تماس آن‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین نیروی اصطکاک تابع نیروی محوری وارد شده بر تیغه بوده که بارگذاری‌های منفرد بر روی تیغه‌ها نیز ناشی از تراست اعمالی بر روی کله حفار است و توسط اپراتور حفاری کنترل می‌شود. از طرفی علاوه بر بار محوری اعمال شده بر سطح تیغه‌ها، ویژگی‌های سطح تماس بین تیغه-توده‌سنگ شامل هندسه گسترش زون لغزش و چسبندگی بوده که این ویژگی نیز متاثر از نرخ نفوذ تیغه در یک دور چرخش کله حفار می‌باشد. خواص کانی‌های سنگ در محل تماس تیغه-توده‌سنگ مانند سختی، مقاومت، شکل و سایز دانه‌ها، تیغه‌ها را تحت تاثیر قرار خواهند داد. این ویژگی در واقع ضریب اصطکاک در ناحیه تماس را تحت تاثیر قرار خواهند داد. بنابراین از بین پارامترهای توده‌سنگ و اپراتوری دستگاه بایستی پارامترهایی را به‌عنوان معیار انتخاب نمود که معرف رفتار توده‌سنگ و تیغه در محل تماس آن‌ها باشد.

پارامتر شاخص نفوذ صحرایی (FPI) به‌عنوان یک پارامتر ترکیبی از شرایط اپراتوری و توده‌سنگ به‌خوبی می‌تواند رفتار سایشی تیغه را در محل تماس تیغه و توده‌سنگ توصیف نماید. در این مطالعه از پارامتر FPI به دلیل کاربرد گسترده آن جهت ارزیابی نرخ سایش تیغه‌ها (عمر تیغه‌ها) استفاده شده است. مطابق رابطه‌های (۱) و (۲) می‌توان پارامتر FPI را از سه پارامتر حفاری تراست پیشروی، تعداد تیغه بر روی کله حفار و نرخ نفوذ تیغه محاسبه نمود [۱۳].

$$FPI = \frac{F_n}{p} \quad (1)$$

$$F_n = \frac{Th}{N} \quad (2)$$

F_n : نیروی محوری (kN یا ton)

Th : تراست پیشروی (kN یا ton)

N : تعداد تیغه‌های واقع بر روی کله حفار

P : نرخ نفوذ (mm/rev)

بدیهی است که مکانیزم خرابی تیغه‌ها و عمر تیغه‌ها تابع عوامل زیادی از قبیل هندسه، متالورژی، تکنولوژی ساخت تیغه‌ها، خواص و ویژگی‌های توده‌سنگ مانند سختی، مقاومت، پتانسیل سایندگی سنگ و پارامترهای حفاری از

حجم سنگ حفاری‌شده توسط هر یک از تیغه‌ها، با فرض اینکه هر تیغه منفرد به‌طور مساوی نیمی از فواصل خود با تیغه‌های مجاور را تحت برش قرار می‌دهد، به عنوان پارامتر ورودی مدل ارائه شد.

با توجه به اینکه پارامترهای حفاری از قبیل تراست، گشتاور کله حفار، نرخ نفوذ، سرعت چرخشی کله حفار و ... به‌صورت اتوماتیک توسط سیستم PLC ماشین حفار در بازه‌های زمانی ۱ دقیقه ثبت می‌گردد، برای هر مورد تیغه با توجه به بازه نصب و تعویض آن‌ها، کلیه پارامترهای عملکردی دستگاه در این بازه مورد بررسی قرار گرفته و یک مقدار میانگین از این پارامترها به عنوان پارامترهای اپراتوری و ماشین موثر بر سایش آن تیغه در نظر گرفته شدند. هر چند که ممکن است؛ یک تیغه مشخص در طول بازه عملکرد خودش تحت تاثیر شرایط مختلف زمین‌شناسی و بارگذاری‌ها قرار گیرد؛ در هر صورت می‌توان با یک فرض قابل قبولی برآیند تمامی شرایط تحمیلی بر تیغه را به‌صورت میانگین این پارامترها منظور کرد. در شکل (۸) نمونه‌ای از داده‌های مورد استفاده برای تحلیل و ارائه مدل کاربردی، شامل پارامترهای عملکردی دستگاه نشان داده شده است.

با تحلیل داده‌های آماری به دست آمده از عملکرد دستگاه حفار و سایش نرمال تیغه‌ها می‌توان به یک ارتباط منطقی بین پارامتر شاخص نفوذ صحرایی و عمر تیغه با همبستگی بالا در زون‌های مختلف سنگی دست یافت. روابط ذیل و شکل‌های (۹ الی ۱۱) به ترتیب رابطه بین نرخ مصرف تیغه و شاخص نفوذ صحرایی را در سنگ‌های کوارتزیت، گرانیت و آهک در مسیر تونل کانی سیب را نشان می‌دهد.

$$CL_q = -1.5 \ln(FPI) + 3.8 \quad (3)$$

$$CL_{gr} = -2.6 \ln(FPI) + 7.6 \quad (4)$$

$$CL_s = -13.6 \ln(FPI) + 27.4 \quad (5)$$

CL_q : عمر تیغه در سنگ کوارتزیت ($m^3/cutter$)

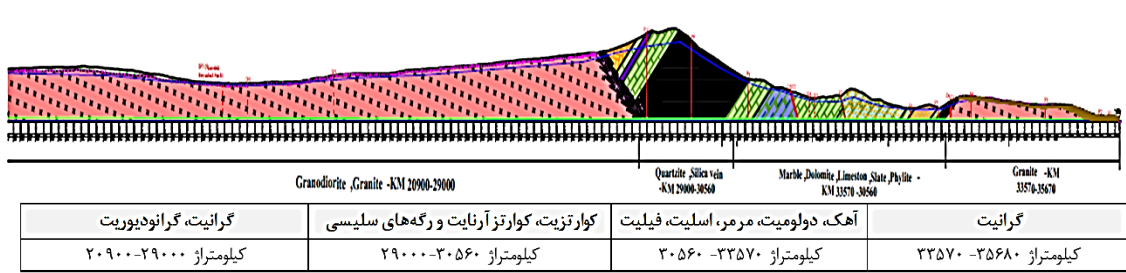
CL_{gr} : عمر تیغه در سنگ گرانیت ($m^3/cutter$)

CL_s : عمر تیغه در سنگ آهک ($m^3/cutter$)

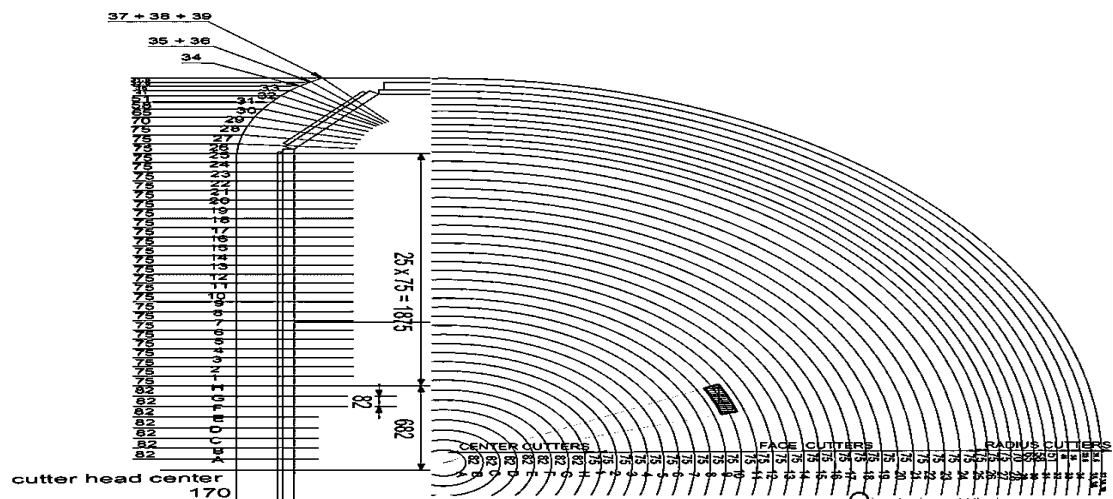
کانی سیب مراحل ذیل به صورت سیستماتیک انجام شد:

- ۱- ثبت مشخصات فنی تیغه نظیر قطر، نوع، مشخصات سازنده و متعلقات تیغه
- ۲- ثبت زمان نصب تیغه و موقعیت نصب بر روی کله حفار
- ۳- بازدید از تیغه‌ها به صورت منظم در هر شیفت کاری و زمان‌های توقف ماشین حفار (در سنگ‌های مقاومت بالا و سایشی تعداد بازدیدها در هر کورس پیشروی انجام می‌شود)
- ۴- بازدید از سینه کار تونل و ثبت مشخصات سنگ سینه‌کار
- ۵- برداشت نمونه‌های تراشه حفاری و انجام آزمایشات فیزیکی و مقاومتی
- ۶- تعویض تیغه در صورت مشاهده هرگونه سایش و ثبت زمان تعویض، موقعیت تیغه تعویضی و نوع سایش (به ویژه سایش نرمال)

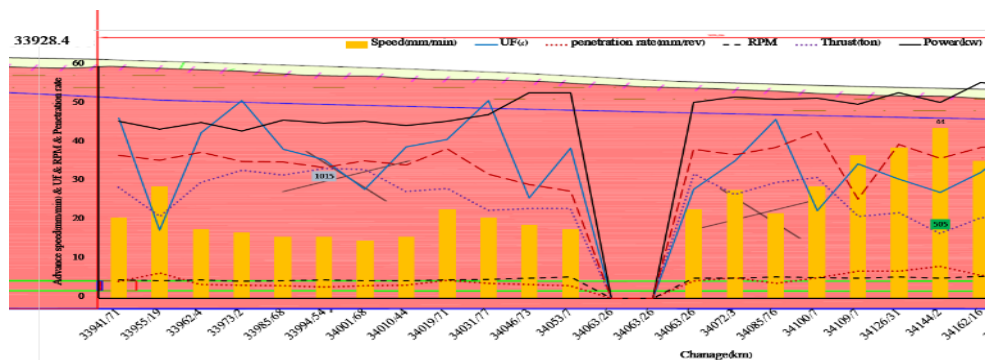
جهت ارزیابی سایش تیغه‌ها، توده‌سنگ مسیر حفاری‌شده در تونل انتقال آب کانی‌سیب مطابق شکل (۶)، به بخش‌هایی با وضعیت مشابه از نظر لیتولوژی تقسیم‌بندی شد. در گام بعدی تیغه‌هایی که در این زون‌ها و در اثر مکانیزم سایش نرمال تعویض شده بودند؛ نیز مشخص گردیدند. همچنین با توجه به موقعیت جانمایی تیغه‌ها بر روی کله حفار (شکل ۵)، فاصله نسبی تیغه‌ها از مرکز کله حفار مطابق شکل (۷) مشخص گردید. همان‌طور که از شکل (۷) نتیجه می‌شود با توجه به چیدمان تیغه‌ها بر روی کله حفار در هر دور کله حفار مسافت طی شده توسط تیغه‌ها متفاوت می‌باشد. این مهم نشان می‌دهد که محاسبه نرخ مصرف تیغه‌ها بر اساس متر تونل حفاری شده (همان‌طور که در مدل‌های مختلف مرسوم است) به‌عنوان یک معیار سنجش دارای اشکال بوده زیرا ممکن است بر اساس محل قرارگیری تیغه‌ها برای یک متر از ثابت حفاری، مسافت طی شده یا میزان درگیری تیغه‌ها با سنگ متفاوت باشد. لذا اگر دو تیغه در یک زمان نصب و تعویض گردند، لزوماً دارای یک نرخ سایش نمی‌باشند. جهت رفع مشکل فوق نرخ مصرف بر اساس حجم مواد حفاری شده توسط هر تیغه ($m^3/Cutter$) به‌عنوان معیار کارکرد هر تیغه تعیین گردید. با این وصف



شکل ۶- زون بندی سنگ‌های مسیر تونل کانی سیب



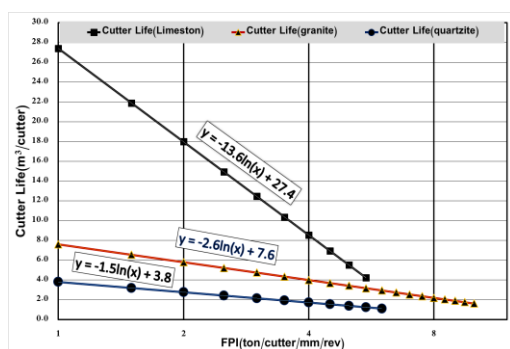
شکل ۷- فاصله تیغه‌ها جهت تعیین حجم سنگ حفاری شده یا مسافت طی شده توسط هر تیغه به ازای هر دور کله حفار



Thrust(ton)	861	636	898	995	955	1005	999	828	853	683	697
Torque(kn.m)	1110	1072	1130	1063	1056	1015	1064	1033	1160	964	881
Advance speed(mm/min)	21	29	18	17	16	16	15	16	23	21	19
Penetration rate(mm/rev)	4.4	6.6	3.6	3.5	3.3	3	3.3	3.4	4.7	4	3.6
Power(kw)	1374	1310	1362	1295	1380	1357	1372	1341	1374	1425	1593
Cutterhead speed(rpm)	4.8	4.6	4.8	4.5	4.7	4.8	4.7	4.6	4.8	4.9	5.3
UFL(%)	46.5	17.7	42.7	51.1	38.5	35.8	28.1	39.2	41	51	26
Chamage(km)	33941/71	33955/19	33962/4	33973/2	33985/68	33994/54	34001/68	34010/44	34019/71	34031/77	34046/73
Intact rock strength(Mpa)	100-120	90-110	100-120	100-120	100-120	100-120	100-120	90-110	90-110	90-110	90-110
Cutter Situation & CL(m)	10,11,39,39	12,13,15,22,29,33,34	23,27,36,39	18,38	14,15,20,25,30,3	26,27,28,32,38,39	16,34,35,36	37,38,39	17,31	25,26,27,30,32,34,38	1457,1457,13,21

شکل ۸- ثبت داده‌های حفاری در مقاطع زمین‌شناسی مختلف

یک از تیغه‌ها بیانگر ارتباط خوبی بین حجم حفاری شده و پارامتر ترکیبی شاخص نفوذ صحرایی می‌باشد. عموماً افزایش شاخص نفوذ صحرایی نشانگر افزایش مقاومت توده سنگ و سخت شدن عملیات حفاری بوده و به تبع با افزایش شاخص نفوذ صحرایی عمر تیغه نیز باید کاهش یابد. شیب منفی منحنی‌های عمر تیغه در سنگ‌های مختلف و شاخص نفوذ صحرایی موید این نکته می‌باشد (شکل ۱۲).

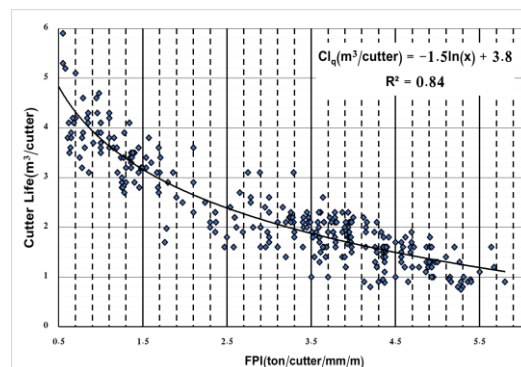


شکل ۱۲- رابطه بین عمر تیغه با FPI مطابق با مدل ارائه شده در منحنی نیمه لگاریتمی

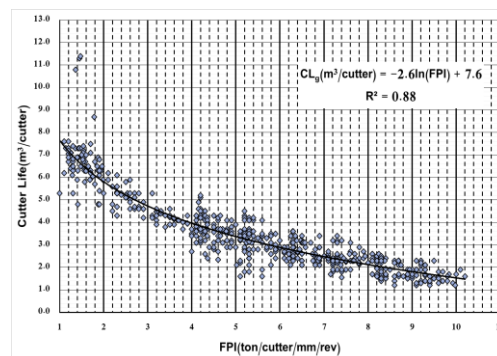
مطابق با نمودارهای نشان داده شده در شکل (۱۲) در یک شاخص نفوذ صحرایی یکسان عمر تیغه در سنگ‌های آهک بیشتر از گرانیت و کوارتزیت می‌باشد که می‌توان به تاثیر جنس سنگ در کنار پارامتر شاخص نفوذ صحرایی اشاره نمود. شیب کم نمودار برای سنگ‌های گرانیت و کوارتزیت نسبت به سنگ آهک نیز می‌تواند تاثیرپذیری این سنگ‌ها را از دیگر پارامترها (نظیر ساینده‌گی و ...) را نشان دهد.

با افزایش مقاومت و ساینده‌گی توده‌سنگ سینه‌کار و کاهش عوارض ساختاری توده‌سنگ (درزه‌داری، ناپیوستگی، زون خردشده و گسله و ...) میزان تعویض تیغه‌ها افزایش می‌یابد بنابراین پراکندگی نقاط (عمر تیغه‌ها) کاهش یافته است. در این بخش، منحنی دارای همبستگی بالاتری بوده و مدل تجربی ارائه‌شده کارایی مناسبی خواهد داشت.

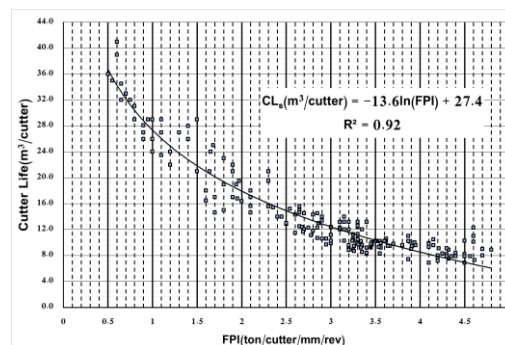
جهت اعتبارسنجی و مقایسه مدل تجربی ارائه شده در این مقاله از مدل برولند (NTNU) به دلیل کاربرد زیاد در



شکل ۹- همبستگی بین عمر تیغه و شاخص نفوذ صحرایی در سنگ کوارتزیت (۲۹۳ قطعه)



شکل ۱۰- همبستگی بین عمر تیغه و شاخص نفوذ صحرایی در سنگ گرانیت (۶۱۸ قطعه)

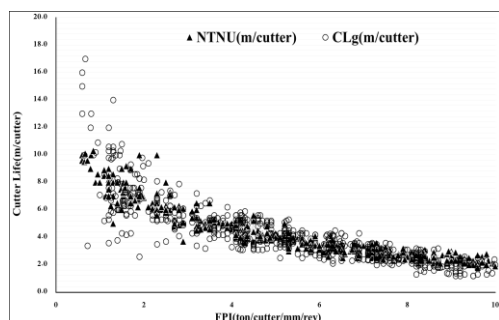


شکل ۱۱- همبستگی بین عمر تیغه و شاخص نفوذ صحرایی در سنگ آهک (۱۹۲ قطعه)

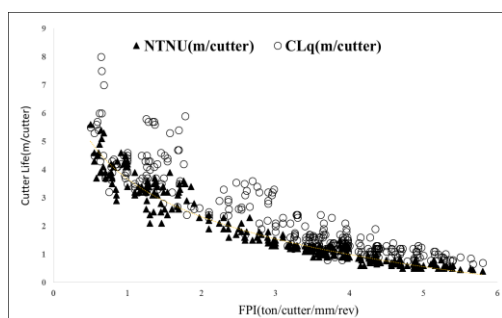
۵- تفسیر و صحت‌سنجی مدل ارائه شده

محاسبه عمر تیغه‌ها بر حسب حجم حفاری شده توسط هر

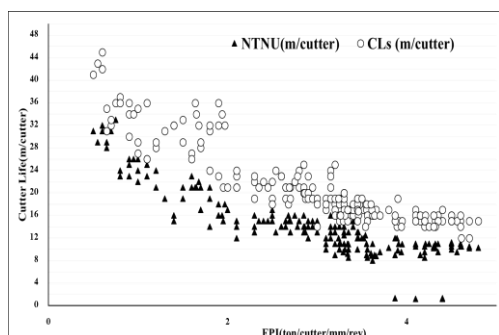
خردایش و برش توده سنگ از سیستم ناپیوستگی‌ها پیروی کرده و احتمالاً توزیع عمر تیغه‌ها بر حسب حجم حفاری نیز دارای پراکندگی زیاد باشد.



شکل ۱۳- همبستگی بین نتایج عمر تیغه از مدل (NTNU) و مدل ارائه شده بر حسب شاخص نفوذ صحرایی در سنگ گرانیت



شکل ۱۴- همبستگی بین نتایج عمر تیغه از مدل (NTNU) و مدل ارائه شده بر حسب شاخص نفوذ صحرایی در سنگ کوارتزیت



شکل ۱۵- همبستگی بین نتایج عمر تیغه از مدل (NTNU) و مدل ارائه شده بر حسب شاخص نفوذ صحرایی در سنگ آهک

پروژه‌های مختلف، استفاده گردید. برای هر یک از تیغه‌های تعویض شده در یک بازه مشخص مدل (NTNU) تحلیل شده و بر اساس نتایج این مدل، کارکرد خطی تیغه‌ها محاسبه گردید. سپس جهت مقایسه بهتر، نمودار نتایج به دست آمده از عمر تیغه در مدل (NTNU) و مدل ارائه شده بر اساس شاخص نفوذ صحرایی ارائه گردید (شکل‌های ۱۳ تا ۱۵). در واقع مدل (NTNU) به صورت یک رابطه لگاریتمی و بر حسب FPI ارائه گردید. البته این نکته قابل ذکر است که جهت یکسان‌سازی واحدها با توجه به اینکه واحد عمر تیغه محاسبه شده در مدل (NTNU) بر حسب متر طول تونل می‌باشد، لذا واحد عمر تیغه در مدل ارائه شده نیز بر حسب متر طول تونل (علی‌رغم کاستی‌های اشاره شده) ارائه گردید. با بررسی شکل‌های (۱۳ تا ۱۵) همبستگی مناسبی بین مدل (NTNU) و مدل ارائه شده وجود دارد. روند تغییرات مدل ارائه شده بر اساس داده‌های واقعی دستگاه و مدل (NTNU) بیانگر آنست که با افزایش FPI و به عبارتی افزایش مقاومت توده سنگ، نتایج هر دو رابطه همگرا می‌گردند. اختلاف اندک بین نتایج حاصل از هر دو مدل بیانگر آنست که برای شرایط حفاری با FPI بالاتر از ۳ هر دو مدل نتایج تقریباً یکسانی دارند. برای شرایط حفاری با FPI پایین‌تر از ۳ نیز مدل ارائه شده در این مقاله حد بالای عمر تیغه‌ها را نشان می‌دهد. بالا بودن ضرایب همبستگی بین هر سه مدل استخراج شده از داده‌های واقعی با پارامتر ترکیبی FPI از یک طرف بیانگر قابلیت و جامعیت بالای این پارامتر (FPI) در توصیف شرایط موثر بر نرخ مصرف تیغه‌ها بوده و از طرفی کاربردی بودن این مدل و قابلیت اطمینان آن را تصدیق می‌نماید.

برای توده سنگ‌های با پارامتر FPI پایین (توده سنگ خرد شده و ضعیف، درزه دار و بلوکی و ...) معمولاً مکانیزم‌های خرابی غیر نرمال مانند شکستگی و لب‌پریدگی تیغه‌ها، مکانیزم‌های خرابی غالب خواهند بود. در چنین وضعیتی سایش نرمال دیسک‌کاترها عمدتاً از خصوصیات سایندگی توده سنگ خرد شده ناشی می‌گردد. در هر صورت مدل تجربی ارائه شده در این مطالعه نرخ سایش در توده سنگ‌های ضعیف را نیز بر حسب پارامتر ترکیبی FPI ارائه خواهد داد. همچنین در توده سنگ‌های ضعیف به دلیل گسترش سیستم درزه‌داری و ناپیوستگی‌ها، مکانیزم

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر سایش تیغه‌های حفاری تشریح شده و بر اساس داده‌های واقعی ثبت‌شده از عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه در پروژه تونل انتقال آب کانی‌سیب، نتایج کارکرد تیغه‌ها و در سنگ‌های مختلف بررسی و مدل‌های تجربی جهت برآورد سایش، عمر و نرخ مصرف تیغه ارائه گردید.

روابط ارائه‌شده، ساده و عملی بوده و قابلیت کاربردی مهندسی در یک پروژه مشابه را خواهند داشت. در هر صورت به دلیل اینکه دقت و اعتبار این روابط بستگی به

۷- منابع

قابلیت و تناسب پارامترهای انتخابی جهت تحلیل دارند؛ ممکن است یک سری محدودیت‌ها جهت کاربرد این روابط وجود داشته باشد. جهت اعتبارسنجی و بررسی قابلیت کاربردی بودن روابط ارائه‌شده در این مقاله در پروژه‌های با وضعیت مشابه، از نتایج مدل برولند (NTNU)، به‌عنوان یک مدل پذیرفته‌شده و کاربردی در زمینه حفاری مکانیزه و تونل‌زنی، استفاده گردید. نتایج بیانگر همبستگی و نزدیکی قابل توجه روابط ارائه‌شده و مدل برولند (NTNU) به خصوص در سنگ‌های مقاوم، سخت و ساینده می‌باشد.

- [1] Wen, S.Z., &Huang, P.,(2012). Principles of Tribology. Tinghua University Press (In Chinese).
- [2] Oparin, V.N., Tanaino, A.S., (2015). A new method to test rock abrasiveness based on physico-mechanical and structural properties of rocks. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 7, 250–255.
- [3] 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. (Doctorate Thesis) Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- [4] Bruland, A.,(2000). Hard rock tunnel boring. Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi.
- [5] Gehring, K., (1995). Prognosis of advance rates and wear for underground mechanized excavations. Felsbau 13, 439–448 (In German).
- [6] Alber, M., (2008). Stress dependency of the Cerchar abrasivity index (CAI) and its effects on wear of selected rock cutting tools. Tunn. Undergr. Space Technol. 23, 351–359.
- [7] Frenzel, C., Käsling, H., Thuro, K., (2008). Factors influencing disc cutter wear. Geomechanik und Tunnelbau 1 (Heft 1), 55–60.
- [8] Wang, L.H., Kang, Y.L., Zhao, X.J., et al., (2015). Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 50, 324–333.
- [9] Hassanpour, J., Rostami, J., Tarigh, Azali S., et al., (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. Tunnell. Undergr. Sp. Technol. 43, 222–231.
- [10] Su, P.C., Wang, W.S., Huo, J.H., et al., (2010). Optimal layout design of cutters on tunnel boring machine. Journal of Northeastern University (Natural Science) 31(6), 877–881 (in Chinese).
- [11] Ozdemir L., et al.; (1977). Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Boreability”, Ph.D Thesis, Colorado School of Mines.
- [12] Lihui Wang,a, Haipeng Lic, Xiangjun Zhaoa, Qian Zhangb, (2017). Development of a prediction model for the wear evolution of disc cutters on rock TBM cutterhead Tunnelling and Underground Space and Underground Space Technology 67.147–157.
- [13] Hassanpour J., Rostami, J., (2009). Predicting TBM performance in second lot of Karaj Water Conveyance Tunnel, Eurock 09, Dubrovnik, Croatia, Pp. 707-713. Rotterdam:Balkema