

Investigating the effect of disc cutter wear on the performance of the mechanized tunnel boring machine (case study, lot 2 of the Kani Sib water transfer tunnel)

M. Sabri*, H. Vahidi, M. Rostami, A. Zanobi

Abstract

The wear of the disc cutter results in an increase in contact area with the rock, so when the wearing of the cutter exceeds its maximum limits, it should be replaced. However, this is not done on time because of cost concerns' Thus, this study will investigate the effects of disc cutter wear on tunnel boring machines (TBMs) operational parameters such as thrust force, torque, penetration rate, and specific energy as well as how it impacts advance rate and project time. for this goal, the hard rock TBM parameters of the Kani Sib water conveyance tunnel have been studied after the replacement of worn disc cutters. The results show that the average thrust force decreases by 11%, while the torque increases by 2%. Furthermore, an average increase of 25% in penetration rate can also be observed. The reduction of specific energy is also significant. This means that by changing worn disc cutters on time, excavation time is reduced, excavation efficiency is improved, and final costs are reduced significantly.

Keywords: Disc Cutter Wear, Thrust Force, Penetration Depth, TBM Performance

*Corresponding author E-mail: m.sabri@modares.ac.ir

بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری مکانیزه تونل (مطالعه موردی، قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه)

منصور صبری^{۱*}، حسن وحیدی^۲، محمد رستمی^۳، علی ذنوبی^۴

^۱ دانشجوی دکتری مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس

^۲ مدیر پروژه تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه

^۳ مدیر عامل هلدینگ تخصصی نیرو، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص)

^۴ مدیر عامل مؤسسه فاطر، هلدینگ تخصصی نیرو

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱)

چکیده

تیغه‌های حفاری به‌عنوان یکی از تأثیرگذارترین اجزاء در فرآیند برش سنگ توسط دستگاه حفاری مکانیزه تونل (TBM) می‌باشد که بر اثر سایش از حالت بهینه خود خارج شده و راندمان عملیات حفاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. لذا در صورت رسیدن مقدار سایش تیغه‌ها به یک حد بحرانی، باید نسبت به تعویض و جایگزینی آن اقدام شود ولی در پروژه‌های اجرایی بعضاً به دلایل مختلفی همچون کاهش زمان خواب دستگاه و کاهش تعداد تیغه‌های مصرفی، این مهم با تأخیر صورت می‌پذیرد. لذا در این مطالعه هدف بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر روی پارامترهای عملیاتی ماشین حفر تونل مانند نیروی پیشران، گشتاور، نرخ نفوذ و انرژی ویژه و همچنین تأثیر بر سرعت پیشروی و زمان نهایی اجرای پروژه می‌باشد. بدین منظور پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری تونل انتقال آب کانی سیب پس ۹۴ مورد تعویض تیغه‌های مستهلک بیش از ۱۰ درصد تیغه‌ها بصورت یکجا و در شرایط زمین‌شناسی یکسان مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد پس از تعویض تیغه‌های سایش یافته، میانگین نیروی رانش ۱۱ درصد کاهش می‌یابد این در حالی است که گشتاور ۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. علاوه بر این، افزایش متوسط ۲۵ درصدی در نرخ نفوذ نیز قابل‌مشاهده است. این بدان معناست که با تعویض به موقع تیغه‌های مستهلک، زمان کل عملیات حفاری با فرض ضریب بهره‌وری ۳۰ درصدی عملیات، حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و تعلق در تعویض تیغه‌های مستهلک هزینه‌های قابل‌توجهی را به پروژه تحمیل می‌نماید که قابل‌مقایسه با مقدار ناچیز هزینه‌های تأمین تیغه‌های صرفه‌جویی شده نمی‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سایش تیغه، تغییرات نیروی پیشران، گشتاور محرک، راندمان حفاری

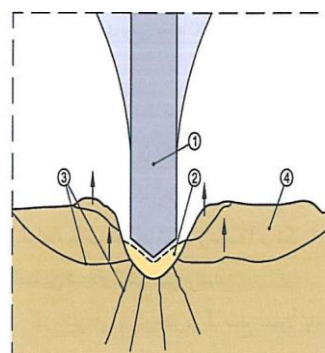
۱. مقدمه

تشکیل تراشه^۲ می‌باشد که هرکدام نتیجه یکی از خاصیت فیزیکی سنگ می‌باشد. مطابق شکل (۱) در ابتدای کار با اعمال فشار به جبهه کار، ناحیه‌ای از سنگ‌های خرد شده توسط تیغه‌های گلطان ایجاد می‌شود [۱].

فرآیند حفاری توسط ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل شامل نفوذ دادن تیغه حفاری به درون سنگ با اعمال نیروی نسبتاً زیادی در هر مرحله چرخش کله‌حفار می‌باشد. نفوذ در سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تنش ناشی از نیرو عمودی پشت تیغه در محل تماس تیغه با سنگ، از مقدار مقاومت سنگ بیشتر باشد. در این حالت، مقداری از تیغه در سنگ نفوذ کرده و سبب ایجاد یکسری ترک در آن می‌شود. خردایش سنگ توسط تیغه حفاری شامل فرآیندهای مختلفی مانند خرد شدن^۱، تشکیل ترک^۲ و

سایش همگن	سایش متقارن روی لبه تیغه حفاری	
سایش نامتقارن ^۴	سایش یک طرفه تیغه حفاری بر اثر جام کردن بلبرینگ بر اثر گردوخاک	
شکست تیغه ^۵	بر اثر سقوط سنگ و فشار بالا	
لب پریدگی ^۶	بر اثر خستگی سطح بیرونی تیغه حفاری و لب پریدگی تیغه	
قارچ شدگی ^۷	سختی نامناسب تیغه حفاری که سبب تغییر شکل تیغه می شود	
در رفتگی رینگ ^۸	وارد آمدن بار بسیار بالا و آسیب به هاب	
Wipe out	خرابی پی در پی رولبرینگ و خرابی تیغه ها حفاری مشابه جام شدن	
تیز شدگی ^۹	سایش شدید بدنه تیغه نسبت به لبه، نفوذ زیاد سبب افزایش دما و تشدید شرایط می شود	
لبه دو قوسی ^{۱۰}	شکست بیش از حد تیغه حفاری - سمیاده خورده	

عمده خرابی تیغه ها از نوع سایش همگن و متقارن می باشد که بر اثر خاصیت سایندگی توده سنگ ایجاد می شود که در این تحقیق مدنظر می باشد. در ادامه به بررسی تأثیر سایش همگن تیغه ها بر روی پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب پرداخته و تأثیرات عدم تعویض به موقع آن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.



۱. تیغه برشی
۲. سنگ خرد شده
۳. ترک های شعاعی
۴. خرده سنگ جدا شده

شکل (۱). زون های مختلف شکست سنگ توسط تیغه

به دلیل وجود فشار بالا در زیر تیغه برشی، تنش های کششی شکافنده در سنگ ایجاد می شود که منجر به ترک های شعاعی می شود. با گسترش این ترک ها و رسیدن آن ها به سطح آزاد سینه کار و یا ترک های شعاعی حاصل از تیغه حفاری مجاور، خرده سنگ ها تشکیل می شود.

اندازه این خرده سنگ ها با توجه به فاصله بین شیارهای برشی و فاصله بین تیغه حفاری تعیین می شود. چنانچه فاصله بین تیغه حفاری به قدری از هم زیاد باشد که ترک های شعاعی به همدیگر نرسند در این صورت فرآیند خردایش دچار مشکل شده و مقداری از سنگ مابین دو تیغه باقی خواهد ماند.

بر اثر اندرکنش سنگ و تیغه نیروی عمودی^۱ جهت نفوذ تیغه، نیروی غلطشی^۲ جهت غلبه بر نیروی اصطکاکی در برابر غلطش تیغه ها و نیروی جانبی^۳ که بر اثر تشکیل تراشه در یک سمت تیغه حفاری و ایجاد بارگذاری نامتقارن تولید می شود.

در دهه های اخیر تلاش های زیادی در خصوص مطالعه مراحل برش سنگ و نیروهای اعمالی بر روی تیغه های حفاری بصورت نظری، آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته است - [2] [10]. سایش تیغه های حفاری یکی از مهمترین چالش های پیش رو در حفاری مکانیزه است که بشدت بر روی زمان و هزینه های اجرای پروژه ها تونلسازی مکانیزه تأثیرگذار می باشد.

بسته به شرایط زمین، پارامترهای اپراتوری و کیفیت تیغه های حفاری، ممکن است مطابق جدول (۱) یکی از انواع خرابی تیغه ها حادث شود.

جدول (۱). مکانیسم های مختلف خرابی تیغه های حفاری [11]

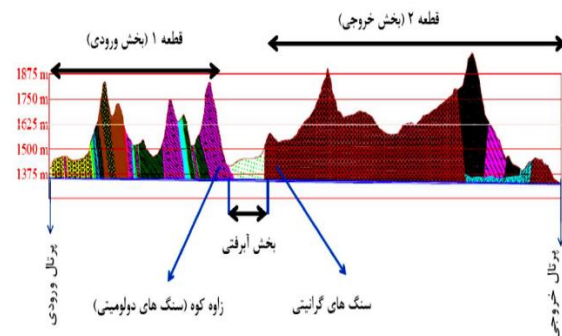
شکل سایش	توصیف	نوع سایش
----------	-------	----------

- 4 Uneven Wear
- 5 Impact Whattering
- 6 Chipping
- 7 Mushrooming
- 8 Ring Slip
- 9 Self-Sharpening
- 10 Double Curved Edge Wear

- 1 Normal Force
- 2 Rolling Force
- 3 Side Force

۲. روش تحقیق

تونل انتقال آب کانی سیب به دریاچه ارومیه به طول ۳۵,۶۷ کیلومتر می‌باشد که از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران در محدوده کمربند دگرگونی و افیولیتی زون سنندج - سیرجان می‌باشد. مطابق شکل (۲) این تونل با توجه به لیتولوژی مسیر و تناوب سنگ‌ها و واحدهای زمین‌شناسی متفاوت در دو قطعه مجزا به وسیله دو دستگاه حفاری مکانیزه متفاوت طرح‌ریزی و اجرا گردیده است. قطعه ۱ به طول ۱۵,۳۷ کیلومتر به دلیل برخورد با توده سنگ‌های مقاومت پایین و بخش آبرفتی به وسیله یک دستگاه سپر فشار تعادلی زمین^۱ و قطعه ۲ نیز به طول ۲۰,۳۰ کیلومتر به موجب مسیری کاملاً سنگی با پارامترهای مقاومتی بالا بوسیله یک دستگاه حفاری سنگ سخت^۲ حفاری گردیده است.



شکل (۲). مقطع زمین‌شناسی تونل انتقال آب کانی سیب

با توجه به اینکه عمده تیغه‌های مصرفی در این پروژه مربوط به بخش سنگی قطعه ۲ می‌باشد، مطالعه تأثیر سایش بر روی راندمان عملیات حفاری در این قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. حدود ۸۰ درصد از مسیر تونل قطعه دوم در سنگ‌های آذرین شامل گرانیت و گرانودیوریت و مابقی در سنگ‌های رسوبی و دگرگونی قرار گرفته است.

روش تحقیق به منظور بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری در زمان‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته به این ترتیب است که پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری ده کورس قبل و ده کورس بعد از تعویض بیش از ۱۰ درصد کل تیغه‌ها در شرایط یکنواخت و یکسان زمین‌شناسی پایش خواهد شد. علت اینکه تنها دفعاتی که بیش از ده درصد تیغه‌ها تعویض می‌شوند مد نظر است، این است که در تعداد تعویض‌های کمتر، این تأثیر خیلی قابل توجه و اثرگذار نیست. همچنین گام جک‌ها ۱,۵ متر می‌باشد؛ بنابراین تأثیر تعویض تیغه‌ها در یک طول تقریباً ۳۰ متری مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسی مصرف تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی

سیب

همانگونه که گفته شد، بیش از ۸۰ درصد از مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب از توده سنگ‌های گرانیت-گرانودیوریتی با پارامترهای بالای مقاومتی و سایشی تشکیل شده است. همین امر سبب افزایش قابل توجه نرخ مصرف تیغه‌ها در این قطعه گردیده که نمونه‌هایی از آن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳). نمونه‌ای از الگوهای متداول خرابی تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی سیب

با بررسی کل قطعه ۲ تونل کانی سیب، در مجموع ۳۹۴۴ حلقه تیغه به یکی از الگوهای یاد شده مصرف شده است. نمودار دایره‌ای شکل (۴) سهم هر کدام از خرابی‌ها را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، عمده علت تعویض تیغه‌ها، سایش معمولی و متقارن می‌باشد. نکته قابل توجه دیگر در این نمودار، درصد بالای خرابی سیستم باربری و یاتاقان تیغه می‌باشد که ۳۵ درصد از کل خرابی‌ها را تشکیل می‌دهد. این مهم به دلیل بالا بودن پارامترهای مقاومتی توده سنگ و افزایش نیروی پیشران دستگاه می‌باشد.

1 Earth Pressure Balance (EPB)

2 Hard Rock

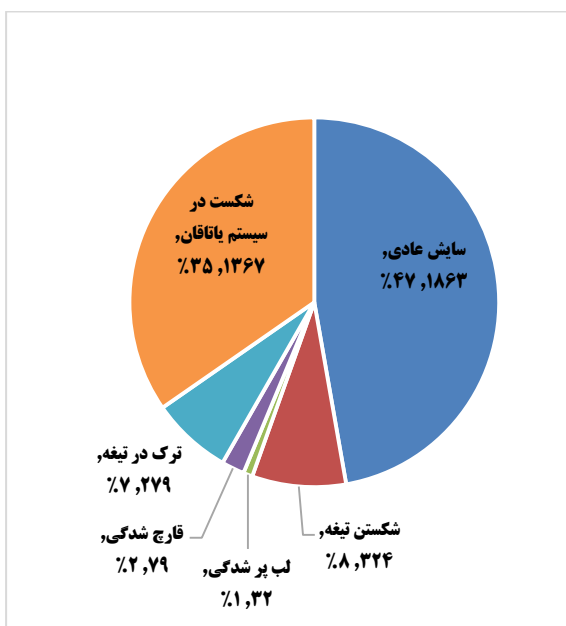
بررسی و مقایسه سهم هر کدام از علل خرابی، می‌توان علت شکست سیستم یاتاقان را غیرعادی و مورد بحث قرار داد.

بر اساس این نمودار عمده خرابی تیغه‌های مرکزی به دلیل مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاتاقان می‌باشد (بیش از ۷۴٪)؛ به عبارت دیگر تیغه‌های مرکزی به دلیل در معرض بودن نیروی نامتقارن و در عین حال شدید جانبی، عمدتاً از ناحیه یاتاقان و سیستم داخلی دچار شکست و خرابی می‌شود. این مقدار برای تیغه‌های میانی و لبه‌ای به ترتیب ۲۶٪ و ۴۴٪ می‌باشد. درصد نسبتاً بالای ۴۴ برای تیغه‌های لبه‌ای می‌تواند به دلیل زاویه‌داری این تیغه نسبت به امتداد تونل و نیروهای بالایی جانبی ناشی از آن باشد.

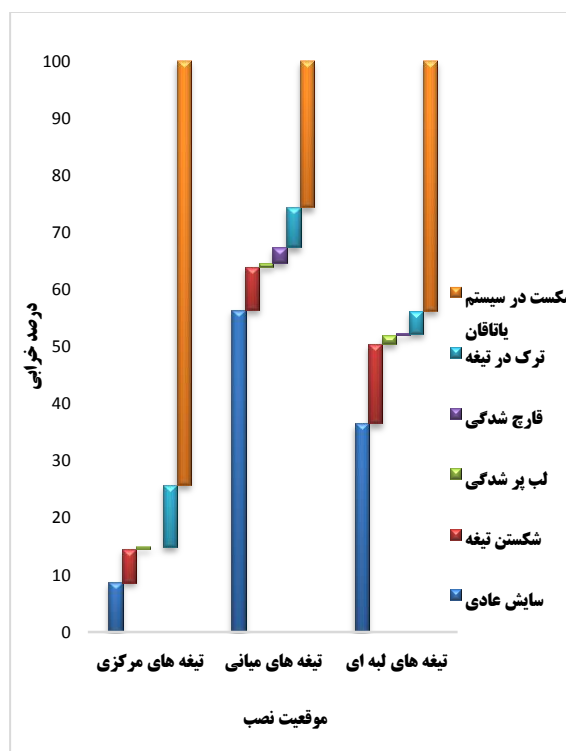
۲-۳. تأثیر سایش تیغه‌ها بر عملکرد دستگاه حفاری

با بررسی تغییرات ایجاد شده در پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری بعد از تعویض تیغه‌های سایش یافته، در واقع بصورت غیرمستقیم تأثیر سایش تیغه‌ها قابل بررسی خواهد بود. با بررسی همه نوبت‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته در طول قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب، ۹۴ نوبت حائز شرایط مد نظر بوده و مورد بررسی قرار گرفته است. از مهمترین پارامترهای مؤثر در سرعت پیشروی ۱ و نرخ آسیب‌ها و صدمات وارده به دستگاه، نرخ نفوذ، نیروی کل پیشران و گشتاور می‌باشد که مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۶) جهت نمایش واضح‌تر اطلاعات، نمودار میله‌ای مربوط به تغییرات نیروی پیشران، گشتاور و نرخ نفوذ تنها ده نوبت از تعویض تیغه‌ها نشان داده شده است چرا که با توجه به اطلاعات گسترده همه ۹۴ نوبت تعویض، امکان نمایش نمودار وجود ندارد.

نتایج حاصل مطابق نمودارهای ارائه شده در شکل (۶) می‌باشد. در این نمودارها، هر جفت ستون مربوط به تغییرات یکی از پارامترهای دستگاه، قبل و بعد از یک نوبت تعویض تیغه‌ها می‌باشد. همانگونه که مشاهده می‌شود نیروی پیشران بدون استثناء در همه موارد، بعد از تعویض تیغه‌های مستهلک کاهش یافته است. این به معنای افزایش نیروی پیشران به دلیل سایش تیغه‌ها به بیش از حد مجاز می‌باشد. این کاهش سبب بهبود شرایط حفاری، افزایش عمر سایر تیغه‌های سالم، سیستم محرکه دستگاه، جک‌ها و ... می‌شود و در مجموع موجب سلامت دستگاه حفاری و کاهش هزینه‌ها و زمان تعمیر و نگهداری خواهد شد. حداکثر مقدار کاهش نیروی پیشران ثبت شده ۴۵٪ و مقدار متوسط در طول کل قطعه ۲ برای همه ۹۴ مورد تعویض بیش از ۱۱٪ می‌باشد.



شکل (۴). نمودار دایره‌ای الگوهای خرابی تیغه‌ها در قطعه ۲ تونل کانی سیب



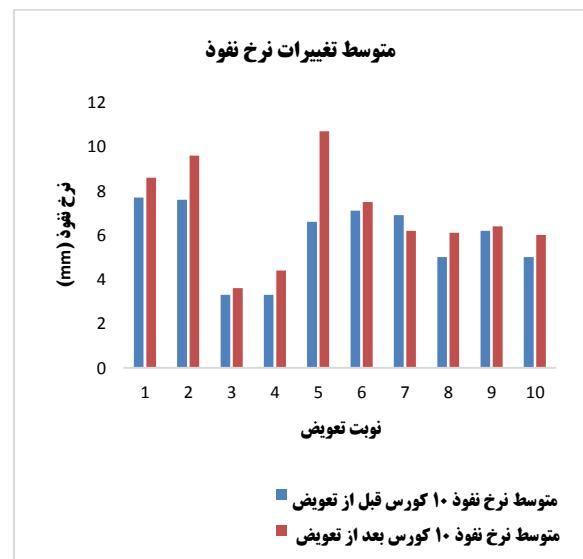
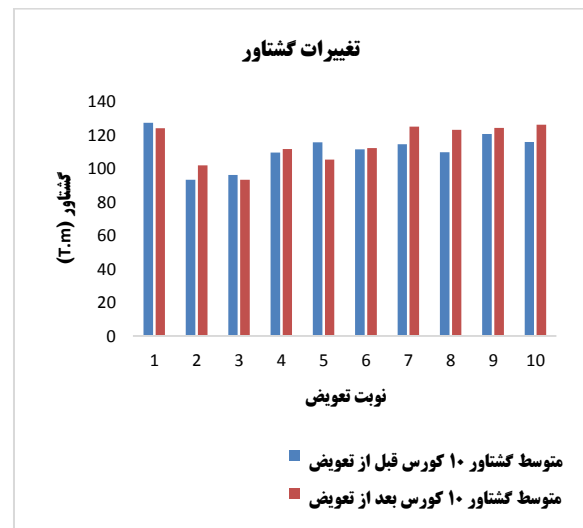
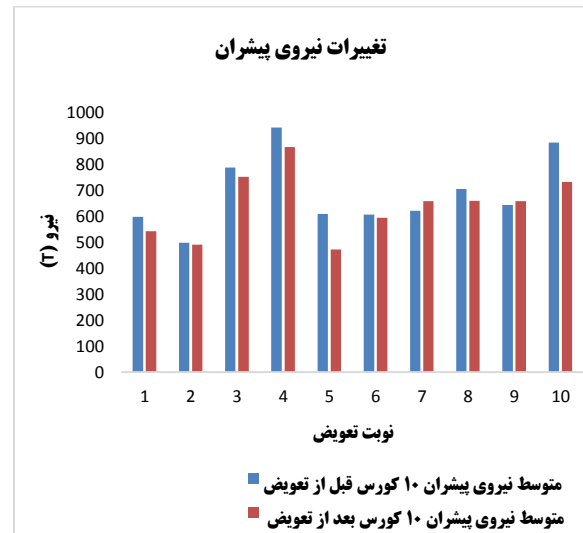
شکل (۵). درصد خرابی تیغه‌ها برحسب موقعیت نصب بر روی کله حفاری

همچنین نمودار شکل (۵) به بیان دیگر، سهم انواع خرابی برحسب موقعیت نصب بر روی کله حفاری را نشان می‌دهد. با

در مقابل تغییرات گشتاور کله حفار روند متناوبی داشته و در برخی موارد افزایشی و در برخی نیز کاهششی است اما در مجموع یک روند ضعیف افزایشی به مقدار متوسط ۲٪ از خود نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند به واسطه افزایش نرخ نفوذ دستگاه و در نتیجه رشد نیروهای اصطکاکی مقاوم بین مصالح و کله حفار باشد که منتج به افزایش گشتاور مقاوم زمین می‌شود؛ اما مطابق شکل (۶) تغییرات نرخ نفوذ دستگاه بر اثر تعویض تیغه‌های مستهلک بسیار قابل محسوس و مثبت می‌باشد به طوری که در همه ۹۴ مورد بدون استثناء پس از تعویض تیغه‌ها، نرخ نفوذ افزایش یافته است. در این مورد نیز مقدار متوسط افزایش نرخ نفوذ ۲۵٪ درصد می‌باشد که عدد بسیار قابل توجهی است و با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ماشین (بطور متوسط ۳۰ درصد) و سایر زمان‌ها، می‌تواند تا ۲۰٪ زمان اجرای پروژه را کاهش دهد (محاسبات با فرض متوسط نرخ نفوذ ۶ میلی‌متر در هر دور، سرعت دوران حفاری ۵ دور بر دقیقه و طول کورس حفاری ۱٫۵ متر انجام شده است).

این مقدار کاهش در زمان اجرا با توجه به هزینه‌های ثابت و پنهان سرسام‌آور حفاری مکانیزه، می‌تواند صرفه‌جویی مالی قابل توجهی را به دنبال داشته و در مقابل عدم توجه به آن هزینه‌های مضاعف بالایی را به طرح تحمیل کند؛ بنابراین به‌عنوان یک نتیجه کاربردی و کلی، عدم تعویض به موقع تیغه‌ها توسط متصدیان اجرایی با فرض کاهش هزینه‌های ناشی از تأمین تعداد کمتری تیغه به واسطه افزایش خرابی مجموعه دستگاه و همچنین تطویل زمان اجرا به مقدار متوسط ۲۰٪، نه تنها هیچ کاهش هزینه‌ای بدنبال نداشته، بلکه خود بار مالی و هزینه‌ای قابل توجهی را تحمیل می‌کند.

در ادامه و با توجه به تغییرات قابل توجه ایجاد شده در پارامترهای مؤثر اپراتوری دستگاه حفاری بر اثر تعویض تیغه‌های سایش یافته، به‌منظور بررسی پارامتریک بیشتر و دقیق‌تر موضوع، یکی از نوبت‌های تعویض تیغه‌های سایش یافته (یک زوج نمودار ستونی ارائه شده در شکل (۶) به‌عنوان نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد. محدوده مورد نظر حد فاصل کیلومتری از Km: 23+351 تا Km: 23+380 به طول ۲۹ متر می‌باشد که در اواسط آن در یک نوبت و بصورت یکجا ۱۷ حلقه تیغه‌ی مستهلک (بیش از ۳۴٪ کل تیغه‌ها) با تیغه‌های نو و کارنکرده تعویض شده است. پس از شروع عملیات حفاری به تعداد ده گام و حفاری نزدیک به ۱۵ متر، مطابق جدول (۱)، پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری از سیستم ثبت ماشین استخراج و با مقادیر قبل از تعویض مقایسه شده است. با توجه به این مسئله که خروجی دستگاه بصورت نیروی پیشران و گشتاور کل کله حفاری



شکل (۶). تغییرات نیروی پیشران، گشتاور کل و نرخ نفوذ بر اثر تعویض تیغه‌های سایش یافته در قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سبب

کیلو نیوتن و به مقدار ۳۴٪ کاهش یافته است. این در حالی است که متوسط مقدار نیروی غلطشی، افزایشی و به مقدار ۱۶٪ می باشد که می تواند ناشی از افزایش نیروهای مقاوم اصطکاکی بر اثر رشد نرخ نفوذ و به دنبال آن مصالح مابین سینه کار و کله حفار باشد. تغییرات نرخ نفوذ نیز بصورت صعودی از مقدار ۴,۱ میلی متر در هر دور به ۴,۸ میلی متر در هر دور با درصد رشد ۱۷ می باشد. همچنین در سطر آخر جدول مقادیر نیروهای نرمال و غلطشی با استفاده از روابط ۳-۵ و ۳-۶ پیش بینی شده است. فاصله داری و پهنای لبه تیغه ها بر اساس اطلاعات موجود پروژه به ترتیب ۷۵ میلی متر و ۲۲ میلی متر در روابط لحاظ شده است. همان طوری که مشاهده می گردد مقادیر نیروهای عمودی و غلطشی برای وضعیت جدید تیغه ها به ترتیب ۱۷۲,۵۵ کیلو نیوتن و ۱۵,۱۸ کیلو نیوتن برآورد می شود.

مطابق فرمول (۳) و (۴)، انرژی ویژه^۲ (SE) و ضریب برش^۳ (CC) از شاخص های بسیار مهم تعیین بهره وری و راندمان ماشین حفاری مکانیزه تونل می باشد که در ادامه برای کیلومتر تراژ مورد نظر بررسی شده است. طبق تعریف انرژی ویژه، مقدار انرژی مورد نیاز جهت حفاری واحد حجم سنگ می باشد. هرچه انرژی ویژه کاهش یابد به معنای افزایش راندمان عملیات می باشد. ضریب کاتر نیز نسبت نیروی غلطشی به نیروی عمودی است. افزایش ضریب کاتر به معنای کاهش مقدار نیروی عمودی و در نتیجه بهبود شرایط حفاری می باشد.

$$SE = \frac{F_r l}{V} \quad (3)$$

$$CC = \frac{F_r}{F_n} \quad (4)$$

در این رابطه F_n و F_r به ترتیب نیروهای عمودی و غلطشی برش (N)، l طول مسافت طی شده در چرخش تیغه (m) و V حجم سنگ حفاری شده (m³)، SE و CC به ترتیب انرژی ویژه حفاری (J/m³) و ضریب برش می باشد.

شکل (۷-الف) روند تغییرات انرژی ویژه حفاری را نشان می دهد. مطابق این شکل انرژی ویژه حفاری در بازه زمانی قبل از تعویض بالا و در بازه ۷۰ الی ۱۲۰ مگاژول بر مترمکعب می باشد. این به معنای عدم وجود شرایط بهینه حفاری با مصرف بالای انرژی می باشد؛ اما پس از جایگزینی تیغه های مستهلک شاهد بهبود شرایط و کاهش انرژی ویژه حفاری و در نتیجه افزایش بهره وری عملیات می باشیم. در این لحظات، مقادیر انرژی ویژه به زیر ۶۰ مگاژول بر مترمکعب کاهش یافته و حتی در برخی

می باشد، به منظور تبدیل آن ها به نیروی عمودی و غلطشی برش یک عدد تیغه، از فرمول (۱) و (۲) استفاده شده است.

$$F_n = \frac{(TH - f_{sh})}{N} \quad (1)$$

$$F_r = \frac{Tor}{\sum_1^N r_i} \quad (2)$$

در این روابط F_n و F_r به ترتیب نیروی عمودی و غلطشی وارده بر یک تیغه ((TH , KN) نیروی پیشران دستگاه ((KN)، f_{sh} نیروی اصطکاک سپر دستگاه با زمین (KN)، N تعداد کل تیغه ها، Tor گشتاور کل کله حفار و r_i شعاع نصب تیغه i ام می باشد. مقدار نیروی اصطکاک بین سپر و زمین مطابق بررسی های صورت گرفته توسط گونگ^۱ در سال ۲۰۰۷ برابر با مقدار نیروی پیشران ثبت شده دستگاه به هنگام عقب کشیدن مجموعه سپر و کله حفاری به هنگام بازسازی و تعمیر می باشد [12]. این مقدار با بررسی اطلاعات ثبت شده برای دستگاه حفاری قطعه ۲ کانی سیب، در حدود ۵۶۰ کیلو نیوتن می باشد.

جدول (۱)، تغییرات پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری برای یک تیغه- حد فاصل کیلومتر تراژ Km: 23+351 تا Km: 23+380

پارامترهای اپراتوری قبل از تعویض			
P (mm/rev)	F_n (kN)	F_r (kN)	کیلومتر تراژ
5	190.21	10.91	23380
3	267.87	11.27	23379
5	281.7	12.46	23378
4	272.13	8.9	23376
3	264.68	9.49	23375
3	254.04	13.05	23373
4	275.32	13.05	23371
4	243.4	10.08	23369
5	254.04	9.91	23367
5	264.68	10.68	23364
4.1	256.81	10.98	مقدار متوسط
پارامترهای اپراتوری بعد از تعویض			
P (mm/rev)	F_n (kN)	F_r (kN)	کیلومتر تراژ
3	252.98	13.35	23364
3	258.3	12.63	23362
3	254.04	15.54	23361
4	158.3	13.05	23359
4	168.94	14.24	23358
6	126.38	11.86	23357
8	88.09	11.86	23355
5	126.38	11.27	23354
5	147.66	11.51	23352
7	126.38	11.51	23351
4.8	170.7	12.7	مقدار متوسط

مطابق جدول (۱) پس از تعویض تیغه ها، متوسط نیروی عمودی وارده بر هر تیغه از مقدار ۲۵۶,۸۱ کیلو نیوتن به ۱۷۰,۷۰

² Specific Energy

³ Cutting Coefficient

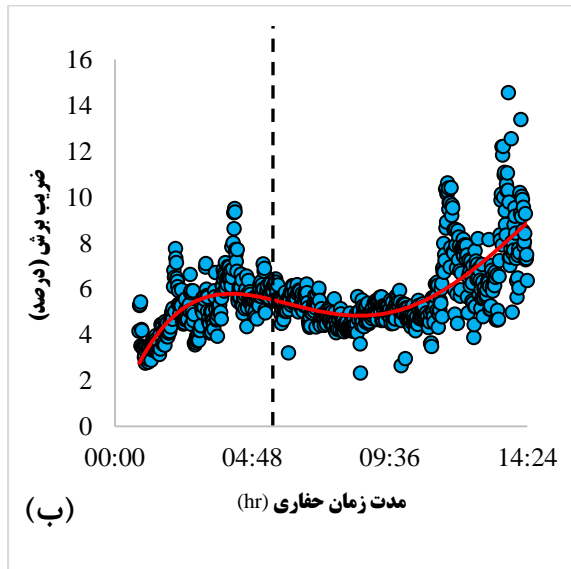
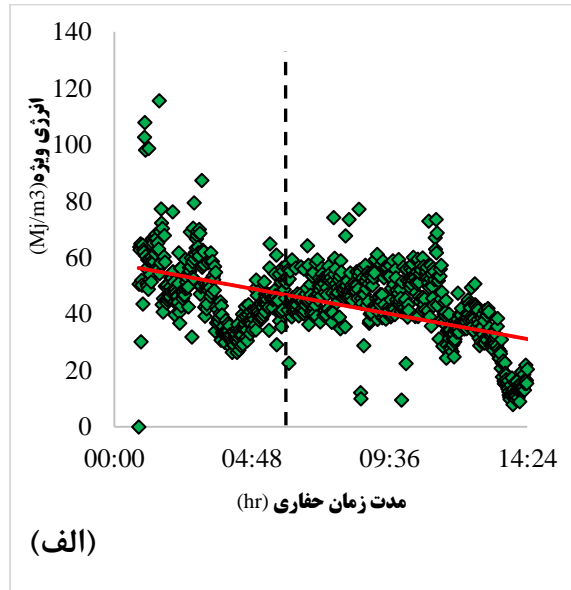
¹ Gong

به منظور کاهش هزینه‌های تأمین ابزارهای برش، تعویض تیغه‌ها با تأخیر انجام می‌شود با این امید که با استفاده بیشتر از تیغه‌ها، هزینه‌ها کاهش یابد؛ بنابراین در این مطالعه به بررسی این موضوع و میزان صحت آن پرداخته شده است. لذا این مطالعه به عنوان یک بررسی موردی، به بررسی تأثیر سایش تیغه‌ها در فرآیند حفاری مکانیزه تونل و پارامترهای اپراتوری دستگاه حفاری قطعه ۲ تونل انتقال آب کانی سیب پس از تعویض تیغه‌های مستهلک پرداخته است. با بررسی ۹۴ مورد تعویض تیغه با تعداد بیش از ۵ حلقه در یک نوبت، نتایج نشان می‌دهد نرخ نفوذ دستگاه بطور متوسط ۲۵٪ افزایش یافته است. این افزایش با در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری ۳۰ درصدی ماشین حفاری، می‌تواند تا ۲۰٪ زمان اجرای پروژه را کاهش دهد. این کاهش با توجه به هزینه‌های قابل توجه بالاسری و ثابت پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل، عدد بسیار قابل توجهی می‌باشد. همچنین نیروی عمودی برش که عامل صدمه به مجموعه دستگاه حفاری می‌باشد، بطور متوسط ۱۱٪ کاهش نشان می‌دهد. این کاهش می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر روی افزایش راندمان و سلامت دستگاه حفاری، به‌ویژه جک‌های پیشران و سگمنت‌ها داشته و هزینه‌های تعمیر و نگهداری را بصورت محسوسی کاهش دهد؛ بنابراین عدم تعویض بموقع تیغه‌ها با فرض کاهش هزینه‌های خرید، توجیه فنی (به دلیل افزایش نیروی پیشران) و اقتصادی (افزایش ۲۰ درصدی زمان پروژه) ندارد. همچنین با بررسی سهم خرابی تیغه‌ها برحسب موقعیت نصب، بیش از ۷۴٪ از علت خرابی تیغه‌های مرکزی، مشکلات داخلی و شکست در سیستم باربری و یاتاقان می‌باشد که می‌تواند ناشی از نیروهای جانبی بالا و نامتقارن وارده به تیغه‌هایی با شعاع نصب پایین باشد.

۵. مراجع

- [1] W. Wittke, C. Erichsen, and J. Gattermann, "Stability analysis and design for mechanized tunnelling," *Geotech. Eng. Res. Pract.*, vol. 581, 2007.
- [2] H. Copur, "Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 104–120, 2010.
- [3] I. C. Engin, F. Bayram, and N. E. Yasitli, "Experimental and statistical evaluation of cutting methods in relation to specific energy and rock properties," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 46, no. 4, pp. 755–766, 2013.
- [4] X. Huang *et al.*, "Cutting force measurement and analyses of shell cutters on a mixshield tunnelling machine," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 82, pp. 325–345, 2018.
- [5] Y. Pan, Q. Liu, J. Liu, X. Peng, and X. Kong, "Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting forces by TBM disc cutter," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 6, pp. 1697–1713, 2018.
- [6] Y. Pan, Q. Liu, X. Peng, X. Kong, J. Liu, and X. Zhang, "Full-scale rotary cutting test to study the influence of disc cutter installment radius on rock cutting forces," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 7, pp. 2223–2236, 2018.

حظرات مقدار آن حتی کمتر از ۱۰ مگاژول بر مترمکعب نیز می‌باشد.



شکل (۷). الف) تغییرات انرژی ویژه حفاری و ب) تغییرات ضریب کاتر در کیلومتر از Km: 23+351 to Km: 23+380

در مقابل اما مطابق شکل (۷-ب) روند تغییرات CC کاملاً برعکس بوده و مقدار آن قبل از تعویض تیغه‌ها از زیر ۵٪ تا ۱۵٪ بعد از تعویض افزایش نشان می‌دهد که به معنای کاهش نیروی عمودی برش و رشد نیروی غلطشی می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

تیغه‌های حفاری به‌عنوان اصلی‌ترین اجزاء دستگاه‌های تمام مقطع حفر مکانیزه تونل، در حین اجرا دچار سایش شده و باید تعویض گردند. در این بین در پروژه‌های اجرایی، گاهی اوقات

- [7] G. Qi, W. Zhengying, and M. Hao, "An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 52, pp. 182–191, 2016.
- [8] G. Qi, W. Zhengying, M. Hao, and C. Qiao, "Numerical and experimental research on the rock-breaking process of tunnel boring machine normal disc cutters," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 1733–1745, 2016.
- [9] M. Stavropoulou and G. Exadaktylos, "Characterization of rock masses based on geostatistical joint mapping and rock boring operations," in *Rock Mechanics and Engineering*, CRC Press, 2017, pp. 139–179.
- [10] D. Tumac and C. Balci, "Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 45, pp. 84–98, 2015.
- [11] E. Farrokh and D. Y. Kim, "A discussion on hard rock TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 81, pp. 336–357, 2018.
- [12] Q. M. Gong, J. Zhao, and Y. S. Jiang, "In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels," *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 303–316, 2007.