

علمی - تخصصی

## ارائه مدلی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه رودهدر در معادن مکانیزه زغال سنگ

آرش ابراهیم آبادی<sup>۱\*</sup>، امیر رحیمی قاضی کلایه<sup>۲</sup>، علیرضا افرادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی نفت، معدن و مواد، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی

<sup>۲</sup> مشاور مدیریت راهبردی و تحلیلگر حوزه تصمیم‌گیری

<sup>۳</sup> گروه معدن و زمین‌شناسی، واحد قائم شهر، دانشگاه آزاد اسلامی

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷)

### چکیده

ماشین‌های بازویی حفر تونل (رودهدرها) از آن دسته از ماشین‌هایی می‌باشند که قابلیت و انعطاف‌پذیری بی‌نظیری در حفاری مکانیکی تشکیلات سنگی نرم تا مقاومت متوسط را دارا می‌باشند، از این رو بطور گسترده در معدنکاری زیرزمینی و تونل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد رودهدرها عاملی بسیار مهم در کاربرد موفقیت‌آمیز آن‌ها محسوب می‌شود هدف اصلی این تحقیق، ارائه مدلی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه ماشین‌های رودهدر بر اساس خصوصیات تشکیلات سنگی حفاری شده می‌باشد. برای این منظور، طی ارزیابی دقیق عملکرد رودهدرها و برداشت‌های می‌دانی و عملیاتی مستمر در تونل‌های اصلی و گالری‌های دسترسی معدن زغال سنگ پروده طبس، یک بانک اطلاعاتی جامع با قابلیت اعتماد بالا از میزان مصرف تیغه رودهدرها و خصوصیات ژئومکانیکی تشکیلات سنگی مورد حفاری تهیه شد و مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج تحلیل‌ها نهایتاً منجر به ارائه مدلی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه رودهدرها گردید. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ارتباط بسیار خوبی بین فاکتور مصرف تیغه رودهدر (PCF) و اندیس مصرف تیغه (PCI) با ضریب تعیین ( $R^2=0.94$ ) وجود دارد. نتایج حاصله از تحقیق نشان داد که این سری جدید معادلات را می‌توان بطور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه رودهدرها در معادن زغال سنگ بکار برد.

**کلیدواژه‌ها:** میزان مصرف تیغه، رودهدر، خصوصیات ژئومکانیکی سنگ، معدن زغال سنگ طبس

### ۱. مقدمه

اصلی استفاده از سیستم‌های حفاری مکانیزه در صنایع عمرانی و معدنکاری، جایگزینی این سیستم حفاری سریع و پیوسته به جای سیستم قدیمی و سنتی چالزنی و آتشیاری می‌باشد [۱۲ و ۱۳] تا از این حیث بتوان عملیات حفاری را دقیق‌تر، سریع‌تر، با هزینه کمتر و بازدهی تولید بیشتری انجام داد [۱۴ و ۱۵]. از مزایای دیگر استفاده از چنین سیستم حفاری می‌توان به کاهش میزان سیستم نگهداری و نیاز به پرسنل کاری کمتر اشاره نمود [۱۶ و ۱۷]. چنین مزایایی به همراه پیشرفت‌های اخیر در عملکرد دستگاه و قابلیت اعتماد بالاتر ماشین‌ها موجب شده است [۱۸ و ۱۹] تا معدنکارانی که از سیستم‌های مکانیزه بهره می‌برند بخش عمده و بیشتری از بازار تولیدات معدنی را به خود اختصاص دهند [۲۰ و ۲۱]. بعد از تصمیم‌گیری جهت استفاده از رودهدر ماشین حفار بازویی برای حفاری تونل‌ها یا گالری‌ها ماشین مناسبی باید انتخاب شود [۲۲] و [۲۳] که با خصوصیات ویژه تونل سازگار باشد انتخاب مناسب‌ترین

استفاده روز افزون از ماشین‌های حفاری مکانیزه در اجرای فضا‌های زیرزمینی اعم از تونل‌های ترافیکی، حفاریات زیرزمینی وابسته به سد و تونل‌های انتقال آب، ضرورت تحقیق و مطالعه در مورد نحوه عملکرد و عوامل مؤثر بر راندمان کارکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه را بیش از پیش آشکار می‌نماید [۱ و ۲]. عملیات حفاری یکی از پر هزینه‌ترین عملیات اجرای در حفاریات زیرزمینی می‌باشد [۳ و ۴]. از طرفی در انتخاب دستگاه حفاری انعطاف‌پذیری وجود ندارد [۵]. عملکرد ماشین‌آلات حفاری نقش مهمی در برنامه زمان‌بندی و هزینه اجرایی عملیات حفاری دارد [۶ و ۷]. یکی از روش‌های حفاری معمول در معدن کاری و حفر فضا‌های زیرزمینی به خصوص استخراج زغال سنگ، استفاده از حفارهای مکانیکی ملند رودهدر است [۸ و ۹] زیرا دقیق‌تر، ایمن‌تر و منعطف‌تر از روش‌های دیگر بوده و معمولاً بهره‌وری بیشتری به همراه دارد [۱۰ و ۱۱] هدف

استفاده صحیح و موفقیت آمیز از تکنولوژی استخراجی رودهدرها در هر عملیات معدنی این موضوع را در اذهان تداعی می‌کند که می‌بایست برآورد و ارزیابی‌های دقیقی از حداکثر نرخ تولید به همراه تخمین دقیق هزینه‌های مصرف تیغه انجام شود. علاوه بر این، از دیگر عوامل مهم، بهینه‌سازی طراحی و ساخت کله حفار برای شرایط سنگ‌های مختلفی است که در حین عملیات استخراج ممکن است با آن‌ها مواجه شد. در واقع عملکرد رودهدر محاسبه یا اندازه‌گیری نرخ حفاری (Cutting Rate) یا تولید این دستگاه در واحد زمان می‌باشد به عبارت دیگر، خارج قسمت حجم حفاری شده بر زمان حفاری که بر حسب واحدهای  $(m^3/hr)$  یا  $(ft^3/hr)$  بیان می‌شود نرخ حفاری را معمولاً به دو صورت تعریف می‌کنند: نرخ حفاری آنی (Instantaneous Cutting Rate) یا (ICR) و نرخ حفاری عملیاتی (Operational Cutting Rate) یا (OCR). اگر در هنگام محاسبه نرخ حفاری، زمان‌های توقف محاسبه نگردد آن را بصورت نرخ حفاری آنی تعریف می‌کنند. در حالی که در محاسبه نرخ حفاری عملیاتی همه زمان‌های تأخیر و افت کار نیز در نظر گرفته می‌شود. نکته مهم دیگری نیز که در ارزیابی عملکرد رودهدرها حائز اهمیت است، میزان مصرف ابزار برنده (تیغه) می‌باشد که نقشی اساسی در اقتصادی بودن پروژه‌ها را ایفاء می‌نماید. عوامل مؤثر بر عملکرد رودهدرها را بطور کلی می‌توان به چهار گروه اصلی تقسیم‌بندی کرد که این چهار گروه عبارتند از: پارامترهای ماده سنگ، پارامترهای توده سنگ، خصوصیات ماشین و پارامترهای عملیاتی. ترکیبی از این پارامترها ظرفیت تولید یک ماشین خاص را در یک تشکیلات سنگی و شرایط زمین‌شناسی بخصوص تعیین می‌کند [۳۵ و ۳۶].

#### ۴. خلاصه مطالعات و بررسی‌های می‌دانی انجام شده در معدن زغال‌سنگ پروده طبس

استفاده از ماشین‌های بازویی حفر تونل (رودهدر) در معدن زغال‌سنگ پروده طبس، در نتیجه عملیات مکانیزاسیون معدن شماره ۱ بوده که در آن به منظور آماده‌سازی و حفر تونل‌ها و گالری‌های دسترسی از ۴ دستگاه رودهدر DOSCO MD1100 ساخت کشور انگلستان استفاده شده است. شایان ذکر است که در معدن شماره ۱ در موارد معدود مواجه با تشکیلات سنگی سخت (ماسه سنگ) از سیستم حفاری چالزنی و انفجار استفاده می‌شود - در این گونه موارد، استفاده از رودهدر بدلیل مصرف زیاد تیغه توجیه اقتصادی ندارد - ولی بطور کلی سیستم حفاری در معدن شماره ۱، حفاری مکانیزه با استفاده از رودهدر می‌باشد. رودهدر DOSCO MD1100 که در ردیف ماشین‌های با وزن سبک تا متوسط طبقه‌بندی می‌شود، با توجه به سوابق کاربرد در معادن زغال‌سنگ انگلستان توانسته است خود را دستگاهی ایده‌آل برای استخراج محیط‌های لایه‌ای مختلط معرفی کند شایان ذکر است که معدن زغال‌سنگ طبس تنها معدن

ماشین رودهدر برای حفاری در تونل‌ها برای جلوگیری از بروز برخی مشکلات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بسیار مهم می‌باشد [۲۴ و ۲۵]. به همین خاطر پیش‌بینی عملکرد این دستگاه‌ها اثر مستقیمی بر افزایش میزان تولید و سرعت بخشیدن به آن و نهایتاً سوددهی پروژه‌ها خواهد داشت [۲۶ و ۲۷] که در این راستا مدل‌هایی برای پیش‌بینی عملکرد رودهدرها توسط محققین مختلف ارائه شده است [۲۸ و ۲۹ و ۳۰ و ۳۱]. که در هیچ یک از مدل‌های پیشین اثر زاویه آلفا (زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپیوستگی‌ها) بر عملکرد ماشین مد نظر قرار نگرفته بود. در واقع هدف از این مقاله ارائه مدل‌هایی برای ارزیابی و پیش‌بینی عملکرد این نوع ماشین‌ها بر اساس انرژی ویژه و زاویه آلفا در معدن زغال‌سنگ طبس است که این مهم با ایجاد یک بانک اطلاعاتی دقیق و با قابلیت اعتماد بالا از برداشت‌های می‌دانی و عملیاتی در حین حفر تونل‌های اصلی و گالری‌های دسترسی معدن تمام مکانیزه زغال‌سنگ پروده طبس محقق گردید.

#### ۲. کلیاتی در مورد معادن مکانیزه زغال‌سنگ پروده طبس

ناحیه پروده با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس در محدوده عرض جغرافیایی ۵' و ۳۳' تا ۵۰' و ۳۲' و طول جغرافیایی ۱۵' و ۵۷' تا ۴۵' و ۳۲' قرار گرفته است. شمال ناحیه را دشت کاملاً هموار و باتلاق‌های نمک فراگرفته و به سمت جنوب رسوبات تریاس و ژوراسیک ارتفاعات نه چندان مرتفع را بوجود آورده است، شرق ناحیه به ارتفاعات شتری و غرب آن به ارتفاعات کمر مهدی محدود می‌شود. ارتفاع متوسط ناحیه زغالدار پروده از سطح دریا ۸۵۰ + متر می‌باشد که مرتفع‌ترین نقطه آن در غرب ۱۰۴۷ + متر (حوالی حفاری ۸۷ در یال جنوبی آنتی کلین پروده I) و پست‌ترین آن در شرق ۷۳۰ + متر (حوالی حفاری ۱۵) قرار گرفته است [۳۲]. معدن زغال‌سنگ طبس دارای ۵ لایه B1, B2, C1, C2 و D می‌باشد که در این بین، لایه C1 لایه اصلی با کمترین تغییرات در ضخامت - ضخامت لایه بین ۱/۸ تا ۲ متر متغیر می‌باشد - بوده بگونه‌ای که هدف اصلی طراحی‌ها نیز استخراج این لایه می‌باشد. معادن اصلی مکانیزه معدن زغال‌سنگ طبس، معدن مرکزی و معدن شماره ۱ می‌باشند. لایه مورد استخراج در این معدن فعلاً فقط لایه C1 است. مجموعاً ۴۳ کیلومتر تونل و ورودی اصلی و فرعی به منظور آماده‌سازی ۹ پاتل در بلوک اولیه حفر خواهد شد که توسط رودهدر انجام می‌شود [۳۳ و ۳۴].

#### ۳. پیش‌بینی عملکرد رودهدر

پیش‌بینی عملکرد، فاکتور بسیار مهمی در ارزیابی کاربرد موفق رودهدرها می‌باشد. این امر، بطور کلی با انتخاب نوع ماشین، نرخ تولید و تخمین هزینه‌های مربوط به مصرف تیغه سر و کار دارد

تمام مکانیزه زغال‌سنگ کشور و بزرگترین تولیدکننده زغال‌سنگ کشور بوده و تنها پروژه معدنی است که در آن از ماشین‌های رودهدر - ۴ دستگاه رودهدر DOSCO MD 1100 - استفاده می‌شود. جدول ۱ خصوصیات اصلی این ماشین را نشان می‌دهد.

جدول (۱). خصوصیات اصلی رودهدر DOSCO MD1100 [۳۷].

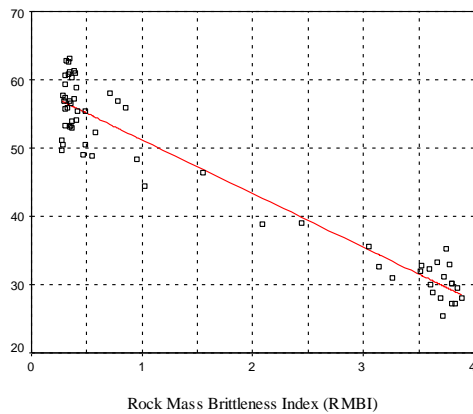
۳۴	وزن ماشین (ton)
۱۹۴	توان کلی ماشین (kW)
۸۲ برای نوع محوری، ۱۱۲ برای نوع عرضی	توان کله حفار (kW)
۸۰۶۰	طول ماشین (mm)
۳۰۰۰	عرض ماشین (mm)
۱۷۰۰	ارتفاع ماشین (mm)
۶۱۶۰	حداکثر عرض برش (mm)
۴۷۰۰	حداکثر ارتفاع برش (mm)

بالا انجام شد که این مهم با حضور در محل سایت و دنبال نمودن و کنترل عملیات حفاری رودهدرها برای ۶۲ مورد حفاری در تونل‌های معدن شماره ۱ صورت پذیرفت. جدول ۲ خلاصه نتایج ۱۰ مورد از این برداشت‌ها و اندازه‌گیری‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در مطالعات حاضر، فاکتور مصرف تیغه بصورت معکوس مقادیر مصرف تیغه در نظر گرفته شده است [۳۸ و ۳۹-۴۱]

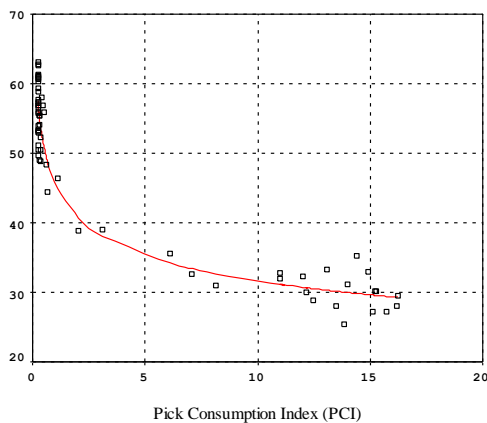
به منظور ارائه مدل در اولین گام باید نسبت به تأسیس یک بانک اطلاعاتی از خصوصیات ماده سنگ، توده سنگ و ماشین اقدام نمود. در این راستا، مطالعات و برداشت‌های می‌دانی، انجام آزمون‌های آزمایشگاهی به جهت تعیین خصوصیات سنگی مطابق با روش‌های پیشنهادی ISRM، اندازه‌گیری زمان‌های حفاری در سینه کارهای مختلف، اندازه‌گیری میزان حفاری و تولید، اندازه‌گیری میزان مصرف تیغه کله حفار و ... در طول مدت تحقیقات با دقت و قابلیت اعتماد

جدول (۲). خلاصه ۱۰ مورد از خصوصیات سنگی و عملکرد رودهدرها در حفاری‌های انجام شده [۳۸ و ۳۹-۴۱]

مورد حفاری	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	%RQD	زمان حفاری (Min)	میزان حفاری (m <sup>3</sup> )	نرخ حفاری آبی (m <sup>3</sup> /hr)	فاکتور مصرف تیغه (m <sup>3</sup> /pick)
۱	۱۴/۸	۳/۸	۱۹	۶۰	۲۲/۲	۲۲/۲	۶۰/۴
۱۷	۲۰/۱	۴/۵	۲۳	۴۲	۲۲/۶	۳۲/۲	۴۴/۵
۲۵	۱۵/۱	۳/۹	۱۹	۸۲	۲۲/۰	۱۶/۱	۵۷/۰
۳۱	۱۴/۵	۳/۷	۱۸	۸۳	۲۴/۵	۱۷/۷	۵۶/۹
۳۸	۱۷/۲	۳/۹	۲۲	۵۰	۲۳/۷	۲۸/۵	۵۵/۹
۴۴	۲۵/۶	۴/۲	۱۹	۳۴	۲۲/۹	۴۰/۴	۳۱/۰
۴۸	۲۷/۶	۴/۴	۱۹	۳۴	۲۳/۶	۴۱/۶	۳۱/۱
۵۱	۲۵/۱	۴/۱	۱۹	۳۶	۲۴/۰	۴۰/۰	۳۲/۶
۵۹	۲۸/۰	۴/۴	۱۹	۳۸	۲۶/۵	۴۱/۸	۳۰/۱
۶۲	۲۸/۲	۴/۴	۱۹	۳۷	۲۵/۹	۴۱/۹	۲۹/۵



شکل (۱). نمودار تغییرات بین فاکتور مصرف تیغه اندازه‌گیری شده (PCF) و اندیس شکنندگی توده سنگ ( $R^2 = 0.92$ ) (RMBI)



شکل (۲). ارتباط بین فاکتور مصرف تیغه اندازه‌گیری شده (PCF) و اندیس مصرف تیغه ( $R^2 = 0.94$ ) (PCI)

روابط حاصله بصورت زیر می‌باشند [۳۸-۴۱]:

$$PCI = e^{RMBI} \times \left( \frac{UCS}{P} \right) \quad (2)$$

$$PCF = 45.67 PCI^{-0.16} \quad (3)$$

که در رابطه فوق  $PCF$  فاکتور مصرف تیغه ( $m^3/pick$ )،  $PCI$  اندیس مصرف تیغه،  $RMBI$  اندیس شکنندگی توده سنگ،  $UCS$  مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر ( $MPa$ ) و  $P$  توان کله حفار ( $kW$ ) که در اینجا  $82kW$  می‌باشد (توان کله حفار رودهدر DOSCO MD1100 که در رابطه بالا می‌توان به جای  $P$  همان عدد  $82kW$  را بکار برد).

جدول (۳). آمار توصیفی فاکتور مصرف تیغه اندازه‌گیری شده

متغیر	تعداد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
PCF	۶۲	۶۳/۲۰	۲۵/۴۰	۴۶/۹۶	۱۲/۳۹

به منظور یافتن بهترین ارتباط بین پارامترهای بانک اطلاعاتی، مدل‌سازی‌های زیادی انجام شد و ارتباط تک‌تک پارامترها و یا ترکیبی از آن‌ها با یکدیگر مورد تحلیل قرار گرفت تا بهترین ارتباط با بیشترین ضریب تعیین حاصل شود. در این خصوص، ارتباط بین عملکرد ماشین با خصوصیات ماده سنگ، توده سنگ و ماشین (مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر، مقاومت کششی سنگ بکر، شاخص کیفی سنگ، تعداد درزه‌ها در واحد حجم سنگ، حجم بلوک‌ها، اندیس‌های شکنندگی سنگ، مقاومت فشاری توده سنگ، مقاومت کششی توده سنگ، وزن ماشین، میزان مصرف تیغه و توان کله حفار) مورد تحلیل قرار گرفت و مدل‌های متعددی ساخته شد. پس از تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌های گسترده، نهایتاً با ارجاع به بانک اطلاعاتی تأسیس شده اندیس شکنندگی توده سنگ (RMBI or Rock Mass Brittleness Index) برای ارائه مدل پیش‌بینی عملکرد پیشنهاد شد. این اندیس برای دستیابی به بهترین و سازگارترین ارتباط بین عملکرد ماشین و خصوصیات سنگ تعریف شد که بصورت زیر می‌باشد [۳۸ و ۳۹-۴۱]:

$$RMBI = e^{\left( \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right)} \times \left( \frac{RQD}{100} \right)^3 \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $RMBI$  اندیس شکنندگی توده سنگ،  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر ( $MPa$ )،  $\sigma_t$  مقاومت کششی سنگ بکر ( $MPa$ ) و  $RQD$  شاخص کیفی توده سنگ می‌باشند.

### ۵. ارزیابی و پیش‌بینی میزان مصرف تیغه رودهدر

در این راستا متدولوژی مشابهی برای بررسی اندرکنش بین شرایط حفاری و فاکتور مصرف تیغه (PCF or Pick Consumption Factor) با در نظر گرفتن اندیس شکنندگی توده سنگ بکار رفت بدین منظور، ارتباط بین اندیس شکنندگی سنگ (RMBI) و نرخ مصرف تیغه مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، گرچه ارتباط بین این دو پارامتر از همبستگی خوبی ( $R^2 = 0.92$ ) برخوردار است ولی به جهت بهبود درجه همبستگی تحلیل‌ها و اصلاحات بعدی انجام شد. پس از مدلسازی در ارتباط با مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و توان کله حفار که منجر به معرفی اندیس مصرف تیغه (PCI or Pick Consumption Index) شد، بهبودی در ارتباط بین این دو متغیر حادث شد ( $R^2 = 0.94$ ) که در شکل ۲ نشان داده شده است. جدول ۳ و ۴ به ترتیب آمار توصیفی فاکتور مصرف تیغه و ارتباط و همبستگی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهند.

[6] E. Kahraman, S. Kahraman, "The performance prediction of roadheaders from easy testing methods", *Bull Eng Geol Environ*, vol. 75, pp. 585–1596, 2016.

[7] S. Kahraman, AS. Aloglu, B. Aydın, E. Saygın " The needle penetration index to estimate the performance of an axial type roadheader used in a coal mine" *Geomech Geophys Geo-energ Geo-Resour*, vol. 5, pp. 37–45, 2019.

[8] H. J. R. Deketh, M. Alvarez Grima, I. M. Hergarden, M. Giezen, P. N. W. Verhoef, "Toward the Prediction of Rock Excavation Machine Performance", *Bull. Eng. Geol. Env.* , Vol. 57, pp. 3-15., 1998.

[9] S. Kahraman, AS. Aloglu, B. Aydın, E. Saygın " The needle penetration test for predicting coal strength" *J South Afr Inst Min Metall* ,vol. 117, pp. 587–591, 2017.

[10] S. E. Seker, I. Ocak, "Performance prediction of roadheaders using ensemble machine learning techniques" *Neural Comput & Applic*, vol. 31, pp. 1103–1116, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3141-2>

[11] R. J. Fowell, "The Mechanics of Rock Cutting", J. A. Hudson, Editor, *Comprehensive rock engineering*, vol. 4, pp. 155–175, 1993.

[12] R. J. Fowell, G. Richardson, M. J. Gollick, "Prediction of Boom Tunnelling Machine Excavation Rates", P. P. Nelson and S. Laubach, Editors, *Proceedings of the Symposium on Rock Mechanics Models and Measurements Challenges from Industry*, pp. 243–251, 1994.

[13] K. H. Gehring, "A Cutting Comparison", *Tunnels and Tunneling* vol. 21, pp. 27-30, 1989.

[14] H. L. Hartman, "SME Mining Engineering Handbook. Chapter 22.1: Rapid Excavation. 2nd Edition, Littleton. Colorado, pp. 1871–1907, 1992.

[15] I. McFeat-Smith "Rock Property Testing for the Assessment of Tunneling Machine Performance", *Tunnels and Tunneling*, pp. 29-33, 1977.

[16] I. McFeat-Smith "Effective and Economic Excavation by Roadheaders", *Tunnels and Tunneling*, vol. 10, pp. 43-44, 1978.

[17] I. McFeat-Smith, R. J. Fowell, "Selection and Application on Roadheader for Rock Tunneling", *RETC Proceedings*, vol. 1, pp. 261–279, 1979.

[18] D. Neil, L. Ozdemir, "Considerations for Development of Hard Rock Roadheaders", *1st Mine Mechanization and Automation Symposium*, Golden, Colorado, p. 7, 1991.

[19] D. Neil, J. Rostami, L. Ozdemir, R. Gertsch, , (1994), "Production Estimating Techniques for Underground Mining Using Roadheaders", *Annual Meeting of the society of Mining, Metallurgy and Exploration Engineers*, Albuquerque, New Mexico, 1994.

[20] K. E. Ranman, "A Model Describing Rock Cutting with Conical Picks", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 18, pp. 131-140, 1985

[21] B. Dibavar, S. Kahraman, , M. Rostami, M. Fener. " A New Rock Mass Cuttability Classification for Roadheaders Used in Coal Mining" , *Mining, Metallurgy & Exploration* , 2023.

[22] J. Rostami, L. Ozdemir, D. Neil, "Performance Prediction: a Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining", *Mining Engineering*, pp. 1264-1267, 1994.

[23] J. Rostami, L. Ozdemir, D. Neil, "Roadheader Performance Optimization For Mining and Civil Construction", *Proceedings of 13th Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, Las Vegas, , pp. 1-17, 1994.

[24] J. Rostami, L. Ozdemir ,B. Asbury, "Mini-Disc Equipped Roadheader Technology for Hard Rock Mining", *Proceedings of the 3rd International Symposium on Mine Mechanization and Automation*, Golden, Colorado, 1995.

جدول (۴). ارتباط و همبستگی بین فاکتور مصرف تیغه اندازه‌گیری شده و اندیس مصرف تیغه

خطای استاندارد تخمین	R <sup>2</sup>	نوع مدل
۰/۰۷	۰/۹۴	توانی

## ۶. نتیجه‌گیری

از مهم‌ترین نتایج این تحقیق، تأسیس بانک اطلاعاتی با دقت و قابلیت اعتماد بالا از عملکرد و میزان مصرف تیغه رودهدرهای مشغول بکار در تونل‌های اصلی معدن تمام مکانیزه زغال‌سنگ پروده طبس و پارامترهای ژئومکانیکی تشکیلات سنگی مورد حفاری توسط این رودهدرها در گالری‌های اصلی معدن زغال‌سنگ طبس می‌باشد که این مهم تحت شرایط کنترلی بسیار دقیق در حین شرایط عملیاتی ۴ دستگاه رودهدر DOSCO MD1100 در حال کار در تونل‌های معدن مزبور اندازه‌گیری، ثبت و برداشت گردید. با ارزیابی و تحلیل بانک اطلاعاتی تأسیس شده، نهایتاً مدلی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه ماشین‌های بازویی حفر تونل (رودهدر) حاصل شد که با استفاده از این سری جدید معادلات می‌توان نرخ مصرف تیغه (PCR) را برای دستگاه‌های رودهدر پیش‌بینی نمود. در خلال تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده، اندیس شکنندگی توده سنگ (RMBI) بصورت اندیسی که بیانگر ارتباط خصوصیات ماده و توده سنگ – بویژه خصوصیت شکنندگی توده سنگ – با عملکرد ماشین می‌باشد، پیشنهاد شد و نتایج تحلیل‌ها نشان داد که ارتباط خوبی بین PCF (فاکتور مصرف تیغه) و RMBI وجود دارد. هم‌چنین نتایج تحلیل‌ها و مدل‌سازی‌ها نشان داد که ارتباط بسیار خوبی بین فاکتور مصرف تیغه (PCF) و اندیس مصرف تیغه (PCI) با ضریب تعیین ( $R^2=0.94$ ) وجود دارد. بنابراین سری جدید معادلات را می‌توان بطور موفقیت‌آمیزی برای پیش‌بینی میزان مصرف تیغه رودهدرها – با وزن متوسط – بکار برد.

## ۷. مراجع

[1] D. Zhang, S. Liu, J. Jia, " Influence of Motion Parameters on Cutting Performance of Boom-Type Roadheader During the Swing Cutting" , *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, pp. 4387–4397, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04977-7>

[2] J. Tian, S. Wang, M. Wu, "Kinematic models and simulations for trajectory planning in the cutting of spatially-arbitrary crosssections by a robotic roadheader" , *Tunn. Undergr. Space Technol.* , vol 78, pp. 115–123 , 2018.

[3] C. Li, D. Zhao, , C. Cao, F. Lyu, M. Zhang, M. Wu , " The coupling relationship analysis and control of the roadheader's cutting and supporting structures" , *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 44, pp. 437, 2022.

[4] S. Elyasi, "Developing an Evaluation Model for Economic Feasibility Analysis of Using Mechanical Boring Machines (TBM vs Roadheader) in one of the Largest Coal Reserves in Iran" *Mining Metallurgy & Exploration*, vol. 38, pp. 1081–1094 , 2021.

[5] K. Zong, S. Fu, M. Wu, "Modeling and response analysis of the attitude angles of roadheader for steep coal seam" , *SN Appl. Sci.* vol 3, pp. 735 , 2021.

- [34] D. K. Ahangaran, P. Afzal, A. B. Yasrebi, A. Wetherelt, P. J. Foster, R. A. Darestani, "An Evaluation of the Quality of Metallurgical Coking Coal Seams within the North Block of Eastern Parvadeh Coal Deposit, Tabas, Central Iran", *Journal of Mining and Metallurgy*, vol. 47, pp. 1 – 16, 2011.
- [35] J. Rostami, L. Ozdemir, D. Neil, "Roadheader Performance Optimization For Mining and Civil Construction", *Proceedings of 13th Annual Technical Meeting of the Institute of Shaft Drilling Technology (ISDT)*, Las Vegas, p. p. 1-17, 1994.
- [36] F. F. Roxborough, "The Role of Some Basic Rock Properties in Assessing Cuttability", *Seminar on Tunnels – Wholly Engineered Structures*, Canberra, Australia, pp. 1-21, 1987.
- [37] Dosco Overseas Engineering Ltd, Newark Nottinghamshire, England, [www.dosco.co.uk](http://www.dosco.co.uk), 2008.
- [38] A. Ebrahimabadi, "A Model to Predict the Performance of Roadheaders," Ph. D. Thesis, Islamic Azad Univ. , Research and Science Branch, 2010. (In Persian)
- [39] A. Ebrahimabadi, K. Goshtasbi, K. Shahriar, M. Cherghi Seifabad, "A Model to Predict the Performance of Roadheaders Based on Rock Mass Brittleness Index", *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*, vol. 111, No. 5, pp. 355-364, 2011.
- [40] A. Ebrahimabadi, K. Goshtasbi, K. Shahriar, M. Cherghi Seifabad, "Predictive Models for Roadheaders' Cutting Performance in Coal Measure Rocks", *YERBILIMLERI Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 89-104, 2011.
- [41] A. Ebrahimabadi, "Stability Analysis and Optimum Support Design of Tunnel No. 1 of Central Mine in Tabas Coal Mine Project", *ITA-AITES World Tunnel Congress and 38th General Assembly (WTC2012)*, Bangkok, Thailand, pp. 8, 2012.
- [25] X. Jin, G. Zhao, L. Zhao, et al. "Computer-aided efficient design and performance optimization of cutting head for roadheader", *Sci Rep* vol. 12, pp. 6788 ,2022.
- [26] B. Tiryaki, M. Ayhan, O. Z. Hekimoglu, "A New Computer Program for Cutting Head Design of Roadheaders and Drum Shearers", Unal E, Unver E, Tercan E, editors, *Proceedings of the 17th international mining congress and exhibition of Turkey*, Ankara, pp. 655–662.
- [27] K. Thuro, R. J. Plinninger "Roadheader Excavation Performance – Geological and Geotechnical Influences", 9th ISRM Congress Paris, Theme 3: Rock Dynamics and Tectonophysics/Rock Cutting and Drilling, pp. 25-28, 1999.
- [28] K. Thuro, R. J. Plinninger, "Predicting Roadheader Advance Rates", *Tunnels Tunnell*, vol. 31, pp. 36-39, 1999.
- [29] K. Thuro, R. J. Plinninger, G. Spaun, G. , "Drilling, Blasting and Cutting – Is It Possible to Quantify Geological Parameters Relating to Excavatability?", *Proceeding of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, Durban, South Africa, 2002.
- [30] K. Thuro, "Predicting Roadheader Advance Rates: Geological Challenges and Geotechnical Answers", 50th Years Symposium of the Faculty of Mines/ Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, pp7, 2003.
- [31] A. Jafarzadeh, A. Saberinasr, A. Hashemnejad, "Performance assessment of Mesh Less method in simulating water inflow into tunnel" *Construction science and technology*, vol. 3, no. 3, pp. 37-47, 2023.
- [32] *Technical Report of Parvadeh Coal Field Exploration*, Techniacal and Engineering Office, 150 p. , 1995. (In Persian)
- [33] *Technical Report of Parvadeh Coal Mine Complex*, Techniacal and Engineering Office, 190 p. , 2008. (In Persian)