

پیش بینی عملکرد ماشین های بازویی حفر تونل (رودهدر) بر اساس انرژی ویژه و زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپیوستگی ها

آرش ابراهیم آبادی

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر، قائمشهر، ایران A.Ebrahimabadi@Qaemshahriau.ac.ir

تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۵/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۴/۹

چکیده

ماشین های بازویی حفر تونل (رودهدرها) از آن دسته از ماشین هایی می باشند که قابلیت و انعطاف پذیری بی نظیری در حفاری مکانیکی تشکیلات سنگی نرم تا مقاومت متوسط را دارا می باشند، از این رو به طور گسترده در معدن کاری زیرزمینی و تونل سازی مورد استفاده قرار می گیرند. ارزیابی و پیش بینی عملکرد رودهدرها عاملی بسیار مهم در کاربرد موفقیت آمیز آنها محسوب می شود. هدف اصلی این تحقیق، ارائه مدلی برای پیش بینی عملکرد ماشین های رودهدر بر اساس انرژی ویژه (کار انجام شده برای حفاری واحد حجم سنگ) و زاویه آلفا (زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپیوستگی ها) می باشد. برای این منظور طی ارزیابی دقیق عملکرد رودهدرها و برداشت های میدانی و عملیاتی مستمر در تونل های اصلی و گالری های دسترسی معدن زغالسنگ پروده طبس، یک بانک اطلاعاتی جامع با قابلیت اعتماد بالا از عملکرد رودهدرها و خصوصیات ژئومکانیکی تشکیلات سنگی مورد حفاری تهیه شد و مورد تحلیل و بررسی دقیق قرار گرفت. نتایج تحلیل ها نهایتاً منجر به ارائه مدل های پیش بینی عملکرد رودهدرها بر اساس انرژی ویژه (SE) و زاویه آلفا (α) گردید. نتایج نشان داد که ارتباط بسیار خوبی بین نرخ حفاری آبی رودهدر (ICR) و (SE) با ضریب تعیین ($R^2=0.91$) وجود دارد. همچنین نتایج تحلیل ها نشان داد که رابطه خوبی نیز بین نرخ حفاری آبی رودهدر (ICR) و زاویه آلفا (α) با ضریب تعیین ($R^2=0.96$) وجود دارد. نتایج حاصله از تحقیق نشان داد که این سری جدید معادلات را می توان به طور موفقیت آمیزی برای پیش بینی عملکرد رودهدرها در معادن زغالسنگ به کار برد.

واژگان کلیدی: عملکرد، انرژی ویژه، زاویه آلفا، معدن زغالسنگ طبس

مقدمه

استفاده از چنین سیستم حفاری می توان به کاهش میزان سیستم نگهداری و نیاز به نیروی انسانی کمتر اشاره نمود. چنین مزایایی به همراه پیشرفت های اخیر در عملکرد دستگاه و قابلیت اعتماد بالاتر ماشین ها موجب شده است تا معدن کارانی که از سیستم های مکانیزه بهره می برند بخش عمده و بیشتری از بازار

هدف اصلی استفاده از سیستم های حفاری مکانیزه در صنایع عمرانی و معدن کاری، جایگزینی این سیستم حفاری سریع و پیوسته به جای سیستم قدیمی و سنتی چالزنی و آتشیاری می باشد تا از این حیث بتوان عملیات حفاری را دقیق تر، سریع تر، با هزینه کمتر و بازدهی تولید بیشتری انجام داد. از مزایای دیگر

تولیدات معدنی را به خود اختصاص دهند. به همین خاطر پیش بینی عملکرد این دستگاه ها اثر مستقیمی بر افزایش میزان تولید و سرعت بخشیدن به آن و نهایتاً سود دهی پروژه ها خواهد داشت که در این راستا مدل هایی برای پیش بینی عملکرد رودهدرها توسط محققین مختلف ارائه شده است [36-40]. از آنجا که در هیچ یک از مدل های پیشین اثر زاویه آلفا (زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپوستگی ها) بر عملکرد ماشین مد نظر قرار نگرفته بود، همچنین به لحاظ اهمیت بالای انرژی ویژه که اصلی ترین و مهمترین عامل در کارایی و اثر بخشی حفاری های مکانیکی می باشد در این مقاله سعی شد مدل هایی برای ارزیابی و پیش بینی عملکرد این نوع ماشین ها بر اساس انرژی ویژه و زاویه آلفا در معدن زغالسنگ طبس ارائه گردد که این مهم با ایجاد یک بانک اطلاعاتی دقیق و با قابلیت اعتماد بالا از برداشت های میدانی و عملیاتی در حین حفر تونل های اصلی و گالری های دسترسی معدن تمام مکانیزه زغالسنگ پروده طبس محقق گردید. شایان ذکر است که معدن زغالسنگ طبس تنها معدن تمام مکانیزه زغالسنگ کشور و بزرگترین تولید کننده زغالسنگ کشور بوده و تنها پروژه معدنی است که در آن از ماشین های رودهدر (۴ دستگاه رودهدر DOSCO MD 1100) استفاده می شود.

موقعیت و ویژگی های عمومی معدن زغالسنگ پروده طبس

ناحیه پروده با وسعتی حدود ۱۲۰۰ کیلومتر مربع در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان طبس در محدوده عرض جغرافیایی ۰۵° تا ۰۳۳°، ۵۰° تا ۰۳۲° شمالی

و طول جغرافیایی ۱۵°، ۵۷° تا ۰۴۵°، ۳۲° شرقی قرار گرفته است. شمال ناحیه را دشت کاملاً هموار و باتلاق های نمک فرا گرفته و به سمت جنوب رسوبات تریاس و ژوراسیک، ارتفاعات نه چندان مرتفع را به وجود آورده است، شرق ناحیه به ارتفاعات شتری و غرب آن به ارتفاعات کمر مهدی محدود می شود. ارتفاع متوسط ناحیه زغالدار پروده از سطح دریا ۸۵۰ + متر می باشد که مرتفع ترین نقطه آن در غرب ۱۰۴۷ + متر (حوالی حفاری ۸۷ در یال جنوبی آنتی کلین پروده I) و پست ترین آن در شرق ۷۳۰ + متر (حوالی حفاری ۱۵) قرار گرفته است [۲]. معدن زغالسنگ طبس دارای ۵ لایه B₁, B₂, C₁, C₂ و D می باشد که در این بین، لایه C₁ لایه اصلی با کمترین تغییرات در ضخامت (ضخامت لایه بین ۱/۸ تا ۲ متر متغیر می باشد) بوده به گونه ای که هدف اصلی طراحی ها نیز استخراج این لایه می باشد. معادن اصلی مکانیزه معدن زغالسنگ طبس، معدن مرکزی و معدن شماره ۱ می باشند. لایه مورد استخراج در این معدن فعلاً فقط لایه C₁ است. مجموعاً ۴۳ کیلومتر تونل و ورودی اصلی و فرعی به منظور آماده سازی ۹ پانل در بلوک اولیه حفر خواهد شد که توسط رودهدر انجام می شود [۳ و ۴].

پیش بینی عملکرد رودهدر

پیش بینی عملکرد، عامل بسیار مهمی در ارزیابی کاربرد موفق رودهدرها می باشد. این امر، به طور کلی با انتخاب نوع ماشین، نرخ تولید و تخمین هزینه های مربوط به مصرف تیغه سر و کار دارد. استفاده صحیح و موفقیت آمیز از تکنولوژی استخراجی رودهدرها در هر عملیات معدنی این موضوع را در اذهان تداعی می کند که می بایست برآورد و ارزیابی های دقیقی از

خلاصه مطالعات انجام شده قبلی

استفاده از ماشین های بازویی حفر تونل (رودهدر) در معدن زغالسنگ پروده طبس، در نتیجه عملیات مکانیزاسیون معدن شماره ۱ بوده که در آن به منظور آماده سازی و حفر تونل ها و گالری های 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 می شود (در این گونه موارد، استفاده از رودهدر به دلیل مصرف زیاد تیغه توجیه اقتصادی ندارد) ولی به طور کلی سیستم حفاری در معدن شماره ۱، حفاری مکانیزه با استفاده از رودهدر می باشد. رودهدر DOSCO MD1100 که در ردیف ماشین های با وزن سبک تا متوسط طبقه بندی می شود، با توجه به سوابق کاربرد در معادن زغالسنگ انگلستان توانسته است خود را دستگاهی ایده آل برای استخراج محیط های لایه ای مختلط معرفی کند. جدول ۱ خصوصیات اصلی این ماشین را نشان می دهد. به منظور ارائه مدل در اولین گام باید نسبت به تاسیس یک بانک اطلاعاتی از خصوصیات ماده سنگ، توده سنگ و ماشین اقدام نمود.

در این راستا، مطالعات و برداشت های میدانی، انجام آزمون های آزمایشگاهی به جهت تعیین خصوصیات سنگی مطابق با روش های پیشنهادی ISRM اندازه گیری زمان های حفاری در سینه کارهای مختلف اندازه گیری میزان حفاری و تولید اندازه گیری میزان مصرف تیغه کله حفر و ... در طول

حداکثر نرخ تولید به همراه تخمین دقیق هزینه های مصرف تیغه انجام شود. علاوه بر این، از دیگر عوامل مهم، بهینه سازی طراحی و ساخت کله حفر برای شرایط سنگ های مختلفی است که در حین عملیات استخراج ممکن است با آنها مواجه شد. در واقع عملکرد رودهدر محاسبه یا اندازه گیری نرخ حفاری (Cutting Rate) یا تولید این دستگاه در واحد زمان می باشد. به عبارت دیگر، خارج قسمت حجم حفاری شده بر زمان حفاری که بر حسب واحدهای (m^3/hr) یا (ft^3/hr) بیان می شود. نرخ حفاری را معمولاً به دو صورت تعریف می کنند: نرخ حفاری آنی (ICR : Instantaneous Cutting Rate) و نرخ حفاری عملیاتی (OCR : Operational Cutting Rate). اگر در هنگام محاسبه نرخ حفاری زمان های توقف محاسبه نگردد آن را به صورت نرخ حفاری آنی تعریف می کنند. در حالی که در محاسبه نرخ حفاری عملیاتی همه زمان های تأخیر و افت کار نیز در نظر گرفته می شود. نکته مهم دیگری نیز که در ارزیابی عملکرد رودهدرها حائز اهمیت است، میزان مصرف ابزار برنده (تیغه) می باشد که نقشی اساسی در اقتصادی بودن پروژه ها را ایفاء می نماید. عوامل مؤثر بر عملکرد رودهدرها را به طور کلی می توان به چهار گروه اصلی تقسیم بندی کرد که این چهار گروه عبارتند از: مشخصات ماده سنگ، مشخصات توده سنگ، خصوصیات ماشین و ویژگی های عملیاتی. ترکیبی از این مشخصات ظرفیت تولید یک ماشین خاص را در یک تشکیلات سنگی و شرایط زمین شناسی به خصوص تعیین می کند [32 و 35].

مدت تحقیقات با دقت و قابلیت اعتماد بالا انجام شد که این مهم با حضور در محل سایت و دنبال نمودن و کنترل عملیات حفاری رودهدرها برای ۶۲ مورد حفاری در تونل های معدن شماره ۱ صورت پذیرفت. جدول ۲ خلاصه نتایج ۱۰ مورد از این برداشت ها

و اندازه گیری ها را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در مطالعات حاضر فاکتور مصرف تیغه به صورت معکوس مقادیر مصرف تیغه در نظر گرفته شده است [۱۴-۱۶].

جدول ۱- خصوصیات اصلی رودهدر DOSCO MD1100 [13]

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

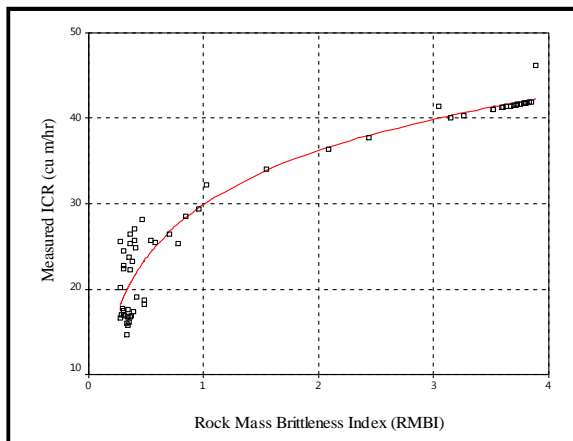
جدول ۲- خلاصه ۱۰ مورد از خصوصیات سنگی و عملکرد رودهدرها در حفاری های انجام شده [۱۴-۱۶]

مورد حفاری	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	RQD(%)	زمان حفاری (Min)	میزان حفاری (m ³)	نرخ حفاری آبی (m ³ /hr)	فاکتور مصرف تیغه (m ³ /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

نهایتاً مدل پیش بینی عملکرد رودهدر به صورت رابطه (۲) بدست آمد:

$$ICR = 9.07 \ln(RMBI) + 29.93 \quad (2)$$

که در رابطه فوق ICR نرخ حفاری آنی (m^3/hr) و $RMBI$ اندیس شکنندگی توده سنگ می باشند.



شکل ۱- ارتباط بین نرخ حفاری اندازه گیری شده (ICR) و اندیس شکنندگی توده سنگ ($RMBI$) ($R^2 = 0.92$)

متدولوژی مشابهی نیز برای بررسی اندرکنش بین شرایط حفاری و فاکتور مصرف تیغه (PCF : Pick Consumption Factor) با در نظر گرفتن اندیس شکنندگی توده سنگ به کار رفت. بدین منظور، ارتباط بین اندیس شکنندگی سنگ ($RMBI$) و نرخ مصرف تیغه مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می شود گرچه ارتباط بین این دو پارامتر از همبستگی خوبی ($R^2 = 0.92$) برخوردار است ولی به جهت بهبود درجه همبستگی تحلیل ها و اصلاحات بعدی انجام شد. پس از مدلسازی در ارتباط با مقاومت فشاری تک محوری سنگ و توان کله حفار که منجر به معرفی اندیس مصرف تیغه (PCI : Pick Consumption Index) شد بهبودی در ارتباط بین این دو متغیر حادث شد ($R^2 = 0.94$) که در شکل ۳ نشان داده شده است.

به منظور یافتن بهترین ارتباط بین پارامترهای بانک اطلاعاتی، مدلسازی های زیادی انجام شد و ارتباط تک تک 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 تک محوری سنگ بکر مقاومت کششی سنگ بکر، شاخص کیفی سنگ، تعداد درزه ها در واحد حجم سنگ، حجم بلوک ها اندیس های شکنندگی سنگ، مقاومت فشاری توده سنگ، مقاومت کششی توده سنگ، وزن ماشین، میزان مصرف تیغه و توان کله حفار) مورد تحلیل قرار گرفت و مدل های متعددی ساخته شد. پس از تحلیل ها و مدلسازی های گسترده، نهایتاً با ارجاع به بانک اطلاعاتی تاسیس شده اندیس شکنندگی توده سنگ ($RMBI$: Rock Mass Brittleness Index) برای ارائه مدل پیش بینی عملکرد پیشنهاد شد. این اندیس برای دستیابی به بهترین و سازگارترین ارتباط بین عملکرد ماشین و خصوصیات سنگ تعریف شد که به صورت زیر می باشد [۱ و ۱۴-۱۶]:

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

که در رابطه فوق $RMBI$ اندیس شکنندگی توده سنگ t_c مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa) t_r مقاومت کششی سنگ بکر (MPa) و RQD شاخص کیفی توده سنگ می باشند. در ادامه مطالعات و تحلیل ها، اندیس شکنندگی توده سنگ ($RMBI$) در بانک اطلاعاتی دخالت داده شد و ارتباط آن با نرخ حفاری آنی مورد بررسی قرار گرفت. نتیجتاً ضریب همبستگی به طور قابل ملاحظه ای بهبود یافت ($R^2 = 0.92$) که در شکل ۱ نشان داده شده است.

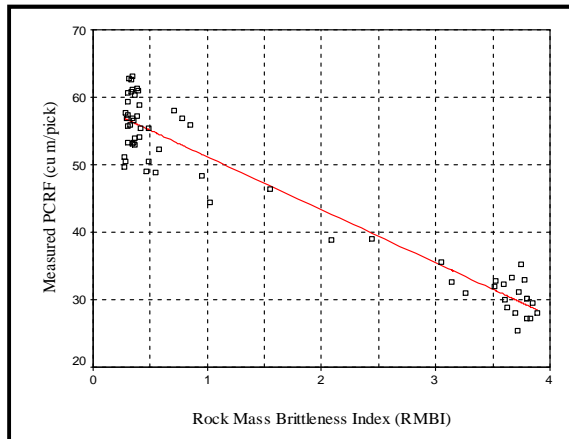
MD1100 که در رابطه بالا می توان به جای P همان عدد $82kW$ را به کار برد).

مدلی برای پیش بینی عملکرد رودهدرها بر اساس انرژی ویژه

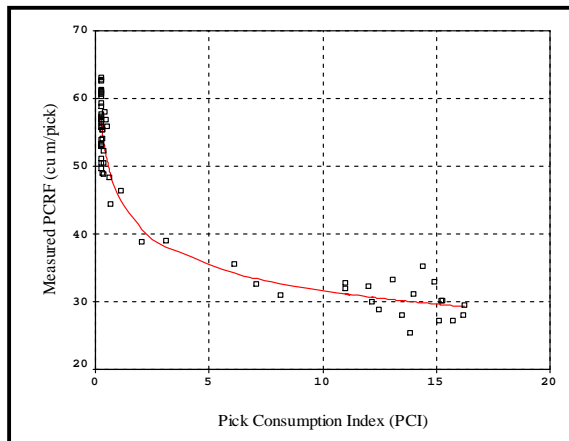
انرژی ویژه یکی از مهمترین عوامل در تعیین کارایی و بازدهی سیستم های حفاری می باشد که به صورت کار انجام شده برای حفاری (استخراج واحد حجم سنگ) تعریف می شود. به همین منظور مقادیر انرژی ویژه برای هر مورد حفاری با استفاده از رابطه (۵) محاسبه شد که نتایج ۱۰ مورد از آن در جدول ۳ آورده شده است. جدول ۴ نیز آمار توصیفی این پارامتر را نشان می دهد. رابطه مورد استفاده جهت تعیین انرژی ویژه به قرار زیر می باشد [22]:

$$SE = -4.38 + 0.14(0.0377UCS + 0.254)^2 + 3.30UCS^{1/3} + 0.000018(0.44UCS - 8.37)^3 + 0.0057CC^3 \quad (5)$$

داده های ورودی این رابطه مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و همچنین ضریب سیمان شدگی (CC) یا (Cementation Coefficient) می باشند. لازم به ذکر است که مقدار عددی CC بر پایه تشریح سنگ شناسی تعیین می گردد بدین صورت که با توجه به نوع مواد سیمان شدگی تشکیلات سنگی عددی به CC اختصاص می یابد که با توجه به شرایط کلسیتی بودن سیمان شدگی شرایط تشکیلات سنگی مورد حفاری در معدن طبس، مقدار آن ۵ در نظر گرفته شده است [23].



شکل ۲- نمودار تغییرات بین فاکتور مصرف تیغه اندازه گیری شده (PCF) و اندیس شکنندگی توده سنگ (RMBI) ($R^2 = 0.92$)



شکل ۳- ارتباط بین فاکتور مصرف تیغه اندازه گیری شده (PCF) و اندیس مصرف تیغه (PCI) ($R^2 = 0.94$) روابط حاصله به صورت زیر می باشند [۱ و ۱۴-۱۶]:

$$PCI = e^{RMBI} \times \left(\frac{UCS}{P} \right) \quad (3)$$

$$PCF = 45.67 PCI^{-0.16} \quad (4)$$

که در رابطه فوق PCF فاکتور مصرف تیغه ($m^3/pick$) PCI اندیس مصرف تیغه، $RMBI$ اندیس شکنندگی توده سنگ، UCS مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa) و P توان کله حفار (kW) که در اینجا $82kW$ می باشد (توان کله حفار رودهدر DOSCO

جدول ۳- خلاصه ۱۰ مورد از نرخ حفاری آبی اندازه گیری شده رودهدرها، انرژی ویژه محاسبه شده در حفاری های انجام شده و مقادیر زاویه (α) در مسیرهای حفاری

مورد حفاری	زمان حفاری (Min)	میزان حفاری (m^3)	نرخ حفاری آبی (m^3/hr)	انرژی ویژه (MJ/m^3)	اندیس شکنندگی توده سنگ (RMBI)	زاویه آلفا (α) Deg.
۱	۶۰	۲۲/۲	۲۲/۲	۴/۵۳	۰/۳۶	۴۶
۱۷	۴۲	۲۲/۶	۳۲/۲	۵/۴۵	۱/۰۲	۵۳
۲۵	۸۲	۲۲/۰	۱۶/۱	۴/۵۸	۰/۳۵	۴۱
۳۱	۸۳	۲۴/۵	۱۷/۷	۴/۴۶	۰/۲۹	۴۲
۳۸	۵۰	۲۳/۷	۲۸/۵	۴/۹۷	۰/۸۵	۵۰
۴۴	۳۴	۲۲/۹	۴۰/۴	۶/۲۶	۳/۲۶	۵۳
۴۸	۳۴	۲۳/۶	۴۱/۶	۶/۵۵	۳/۷۳	۵۲
۵۱	۳۶	۲۴/۰	۴۰/۰	۶/۱۹	۳/۱۴	۴۹
۵۹	۳۸	۲۶/۵	۴۱/۸	۶/۵۹	۳/۸۰	۴۴
۶۲	۳۷	۲۵/۹	۴۱/۹	۶/۶۲	۳/۸۵	۵۳

جدول ۴- آمار توصیفی انرژی ویژه محاسبه شده

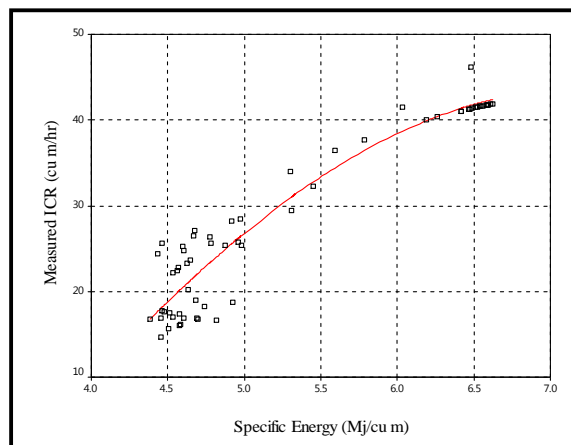
متغیر	تعداد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
(SE)	۶۲	۶/۶۲	۴/۳۸	۵/۳۰	۰/۸۶

نهایتاً، ارتباط بین نرخ حفاری آبی و انرژی ویژه (با ضریب همبستگی $(R^2 = 0.91)$) به صورت زیر بدست آمد:

$$ICR = -0.18SE^3 + 28.57SE - 92.82 \quad (6)$$

که در رابطه فوق ICR نرخ حفاری آبی (m^3/hr) و SE انرژی ویژه (MJ/m^3) می باشند. جدول ۵ ارتباط و همبستگی پارامترهای مدل فوق را نشان می دهد. برای این مدل، مقایسه ای بین مقادیر نرخ حفاری آبی اندازه گیری شده و پیش بینی شده (با توجه به مقادیر انرژی ویژه) صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

در ادامه تحقیق، این فاکتور مهم (انرژی ویژه) مورد بررسی و ارتباط آن با نرخ حفاری آبی مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۴).



شکل ۴- ارتباط بین نرخ حفاری آبی اندازه گیری شده (ICR) و مقادیر انرژی ویژه (SE) ($R^2 = 0.91$)

جدول ۵- آمار ارتباط و همبستگی بین نرخ حفاری آنی اندازه گیری شده و انرژی ویژه

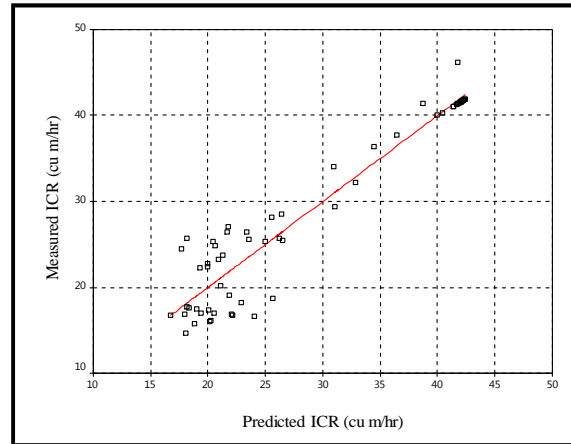
خطای استاندارد تخمین	R^2	نوع مدل
۳/۱۲	۰/۹۱	درجه ۳

$$r = \arcsin(\sin r_f \cdot \sin(r_t - r_s)) \quad (7)$$

که در رابطه فوق r_f و r_s به ترتیب شیب و امتداد صفحات ناپیوستگی در توده سنگ مورد حفاری (درجه) و r_t امتداد تونل (درجه) می باشند. با ارجاع به بانک اطلاعاتی تهیه شده (جدول ۳) و انجام تحلیل های آماری و مدلسازی های مختلف نهایتاً رابطه پیش بینی کننده نرخ حفاری آنی با در نظر گرفتن زاویه (α) به صورت زیر بدست آمد:

$$ICR = 5.56RMBI + 0.60r - 8.17 \quad (8)$$

در رابطه فوق ICR نرخ حفاری آنی (m^3/hr)، $RMBI$ اندیس شکنندگی توده سنگ و α زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپیوستگی ها (درجه) می باشند. جداول ۶ و ۷ آمار توصیفی زاویه (α) و ارتباط و همبستگی پارامترهای مدل فوق را نشان می دهند. برای این مدل نیز، مقایسه ای بین مقادیر نرخ حفاری آنی اندازه گیری شده و پیش بینی شده (با توجه به مقادیر زاویه آلفا) صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵- ارتباط بین نرخ حفاری آنی (ICR) اندازه گیری شده و پیش بینی شده (با توجه به انرژی ویژه) ($R^2 = 0.91$)

مدلی برای پیش بینی عملکرد رودهدرها بر اساس زاویه آلفا

از آنجا که ناپیوستگی های موجود در سنگ های مورد حفاری، اهمیت به سزایی در رفتار توده سنگ و نتیجتاً مقدار پیشروی ماشین دارند به همین جهت برای تعیین تاثیر خصوصیات ناپیوستگی ها بر عملکرد رودهدر، زاویه (α) که زاویه بین امتداد تونل و صفحات ناپیوستگی ها می باشد نیز مورد تحلیل قرار گرفت و مدلی نیز با در نظر گرفتن این زاویه برای پیش بینی عملکرد رودهدر ارائه شد. به منظور محاسبه زاویه (α) ، شیب و امتداد ناپیوستگی ها و جهت حفاری رودهدر در مقاطع مورد حفاری اندازه گیری شد. در مدل های پیش بینی عملکرد دستگاه های حفار تمام مقطع (TBM) به منظور تعیین زاویه (α) از رابطه زیر استفاده می شود که این مقدار برای تمام موارد حفاری محاسبه شد (جدول ۳) [41]:

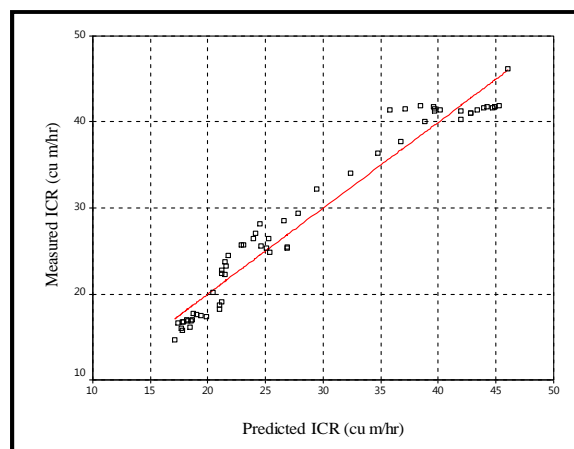
جدول ۶- آمار توصیفی مقادیر زاویه (α)

متغیر	تعداد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار
(α)	۶۲	۵۴	۳۹	۴۷/۱۳	۴/۸۳

جدول ۷- آمار ارتباط و همبستگی بین نرخ حفاری آنی اندازه گیری شده، اندیس شکنندگی توده سنگ و زاویه (α)

نوع مدل	R^2	خطای استاندارد تخمین
خطی	۰/۹۶	۲/۲۲

مکانیکی تشکیلات سنگی مورد حفاری توسط این رودهدرها در تونل های اصلی معدن زغالسنگ طبس می باشد که این مهم تحت شرایط کنترلی بسیار دقیق در حین شرایط عملیاتی ۴ دستگاه رودهدر DOSCO MD1100 در حال کار در تونل های معدن مزبور اندازه گیری، ثبت و برداشت گردید. با ارزیابی و تحلیل بانک اطلاعاتی تاسیس شده، نهایتاً مدلی شامل چند رابطه برای پیش بینی عملکرد ماشین های بازویی حفر تونل (رودهدر) حاصل شد که با استفاده از این سری جدید معادلات می توان نرخ حفاری آنی (ICR) و نرخ مصرف تیغه (PCR) را برای دستگاه های رودهدر پیش بینی نمود. در خلال تحلیل اطلاعات جمع آوری شده، اندیس شکنندگی توده سنگ (RMBI) بصورت اندیسی که بیانگر ارتباط خصوصیات ماده و توده سنگ (به ویژه خصوصیت شکنندگی توده سنگ) با عملکرد ماشین می باشد پیشنهاد شد و نتایج تحلیل ها نشان داد که ارتباط خوبی بین ICR و RMBI با ضریب همبستگی ($R^2=0.92$) وجود دارد. نتایج تحلیل ها و مدلسازی ها نهایتاً منجر به ارائه مدل های پیش بینی عملکرد رودهدرها بر اساس انرژی ویژه (SE) و زاویه آلفا (α) گردید. نتایج نشان داد که ارتباط بسیار خوبی بین



شکل ۶- ارتباط بین نرخ حفاری آنی (ICR) اندازه گیری شده و پیش بینی شده (با توجه به مقادیر زاویه آلفا) ($R^2 = 0.96$)

تشکر و قدردانی

این تحقیق با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر به انجام رسیده است که بدینوسیله از حمایت های معاونت پژوهشی آن دانشگاه محترم قدردانی می گردد.

نتیجه گیری

از مهمترین نتایج این تحقیق، تاسیس بانک اطلاعاتی با دقت و قابلیت اعتماد بالا از عملکرد دستگاه های رودهدر مشغول بکار در تونل های اصلی معدن تمام مکانیزه زغالسنگ پروده طبس و پارامترهای ژئو-

Geotechnical Factors Affecting the Performance of a Roadheader in an Inclined Tunnel”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 19, Elsevier, pp. 629-636.

9- Bilgin, N., Balci, C., (2005), *Performance Prediction of Mechanical Excavators in Tunnels*, Training Course of Tunnel Engineering, Istanbul Technical University, Turkey.

[10] Copur, H., Rostami, J., Ozdemir, L., Bilgin, N., (1997), “Studies on Performance Prediction of Roadheaders Based on Field Data in Mining and Tunnelling Projects”, Gurgenci H, Hood M, editors, *Proceedings of the fourth international symposium on mine mechanization and automation*, Brisbane, Queensland, pp. A4-1/ A4-7.

11- Copur, H., Ozdemir, L., Rostami, J., (1998), “Roadheader Applications in Mining and Tunneling Industries”, *The Mining Engineering*, pp. 38-42.

12- Deketh, H., J., R., Alvarez Grima, M., Hergarden, I., M., Giezen, M., Verhoef, P., N., W., (1998), “Toward the Prediction of Rock Excavation Machine Performance”, *Bull. Eng. Geol. Env.*, Vol 57, Springer-Verlag, pp. 3-15.

13- Dosco Overseas Engineering Ltd, (2008), Newark Nottinghamshire, England, www.dosco.co.uk.

14- Ebrahimabadi, A.; Goshtasbi, K.; Shahriar, K.; and Cherghi Seifabad, M., (2011), “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.

15- Ebrahimabadi, A.; Goshtasbi, K.; Shahriar, K.; and Cherghi Seifabad, M., (2011), “Predictive Models for Roadheaders’ Cutting Performance in Coal Measure Rocks”, *YERBILIMLARI Journal*, Vol. 32, No. 2, pp 89-104.

16- Ebrahimabadi, A., (2012), “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, 8p.

17- Fowell, R., J., McFeat-Smith, I., (1976), “Factors Influencing the Cutting Performance of a Selective Tunneling Machine”, Jones MJ, editor, *Proceedings of the tunnelling symposium, Tunnelling ’76*, IMM, London, pp. 301-309.

18-Fowell, R., J., Pycroft, A., S., (1980), “Rock Machinability Studies for the Assessment of

نرخ حفاری آنی رودهدر (ICR) و (SE) با ضریب تعیین ($R^2=0.91$) وجود دارد. همچنین نتایج تحلیل‌ها نشان داد که رابطه مناسبی نیز بین نرخ حفاری آنی رودهدر (ICR) و زاویه آلفا (α) با ضریب همبستگی ($R^2=0.96$) وجود دارد. بنابراین سری جدید معادلات را می‌توان به طور موفقیت آمیزی برای پیش‌بینی عملکرد رودهدرها (با وزن متوسط) در معادن زغالسنگ به کار برد.

منابع

۱- ابراهیم آبادی، آرش؛ (۱۳۸۹)، "ارائه مدلی برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های بازویی حفر تونل (رودهدر)", رساله دکتری مهندسی استخراج معدن؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۲۲۰ ص.

۲- شرکت ایریتک، گزارش فنی اکتشاف مناطق زغالخیز ناحیه پروده طبس، (۱۳۷۴)، دفتر فنی - مهندسی طرح تجهیز و راه‌اندازی معادن زغالسنگ پروده طبس، ۱۵۰ ص.

۳- شرکت ایریتک گزارش مجتمع معادن زغالسنگ پروده طبس (۱۳۸۷)، دفتر فنی - مهندسی معدن زغال سنگ طبس، ۱۹۰ ص.

4- Ahangaran, D. K., Afzal, P., Yasrebi, A. B., Wetherelt, A., Foster, P. J., Darestani, R. A., (2011), “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*, 47 A (1), pp.1- 16.

5- Bilgin, N., Seyrek, T., Shahriar, K., (1988), “Roadheader Performance in Istanbul, Golden Horn Clean-up Contributes Valuable Data”, *Tunnels and Tunneling*, pp. 41-44.

6- Bilgin, N., Yazici, S., Eskikaya, S., (1996), “A Model to Predict the Performance of Roadheaders and Impact Hammers in Tunnel Drivages”, *EUROCK '96*, , Torino, pp. 710-721.

7- Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H., (2002), “The Performance Prediction of Impact Hammers from Schmidt Hammer Rebound Values in Istanbul Metro Tunnel Drivages”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 17, Elsevier, pp. 237-247.

8- Bilgin, N., Dincer, T., Copur, H., Erdogan, M., (2004), “Some Geological and

- Selective Tunneling Machine Performance”, 21st National Rock Mech. Symp., USA, Miss., pp. 149-158.
- 19- Fowell, R., J., (1993), “The Mechanics of Rock Cutting”, J.A. Hudson, Editor, Comprehensive rock engineering, vol. 4, pp. 155–175.
- 20- Fowell, R., J., Richardson, G., Gollick, M., J., (1994), “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.
- 21- Gehring, K., H., (1989), “A Cutting Comparison”, Tunnels and Tunneling, Vol. 21, pp. 27-30.
- 22- Hartman, H.L.; (1992), SME Mining Engineering Handbook. Chapter 22.1: Rapid Excavation. 2nd Edition, Littleton. Colorado, pp. 1871–1907.
- 23- McFeat-Smith, I., (1977), “Rock Property Testing for the Assessment of Tunneling Machine Performance”, Tunnels and Tunneling, pp. 29-33.
- 24- McFeat-Smith, I., (1978), “Effective and Economic Excavation by Roadheaders”, Tunnels and Tunneling, Vol. 10, pp. 43-44.
- 25- McFeat-Smith, I., Fowell, R., J., (1979), “Selection and Application on Roadheader for Rock Tunneling”, RETC Proceedings, Vol. 1, pp. 261–279.
- 26- Neil, D., Ozdemir, L., (1991), “Considerations for Development of Hard Rock Roadheaders”, 1st Mine Mechanization and Automation Symposium, Golden, Colorado, p. 7.
- 27- Neil, D. M., Rostami, J., Ozdemir, L., Gertsch, R., (1994), “Production Estimating Techniques for Underground Mining Using Roadheaders”, Annual Meeting of the society of Mining, Metallurgy and Exploration Engineers, Albuquerque, New Mexico.
- 28- Ranman, K., E., (1985), “A Model Describing Rock Cutting with Conical Picks”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 18, pp. 131-140.
- 29- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D. M., (1994), “Application of Heavy Duty Roadheaders for Underground Development of the Yucca Mountain Exploratory Study Facility”, IRWMC, 15p.
- 30- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D., (1994), “Performance Prediction: a Key Issue in Mechanical Hard Rock Mining”, Mining Engineering, pp. 1264-1267.
- 31- Rostami, J., Ozdemir, L., Neil, D., M., (1994), “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.
- 32- Rostami, J.; Ozdemir, L.; and Neil, D. M.; (1994), “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.
- 33-Rostami, J., Ozdemir, L. Asbury, B., (1995), “Mini-Disc Equipped Roadheader Technology for Hard Rock Mining”, Proceedings of the 3rd International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Golden, Colorado.
- 34- Roxborough, F., F., King, P., Pedroncelli, E., J., (1981), “Tests on the Cutting Performance of a Continuous Miner”, J S Afr Inst Min Metall, Vol. 81, pp. 9–26.
- 35- Roxborough, F. F.; (1987), “The Role of Some Basic Rock Properties in Assessing Cuttability”, Seminar on Tunnels – Wholly Engineered Structures, Canberra, Australia, pp. 1-21.
- 36- Tiryaki, B., Ayhan, M., Hekimoglu, O., Z., (2001), “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.
- 37- Thuro, K., Plinninger, R.J., (1999), “Roadheader Excavation Performance – Geological and Geotechnical Influences”, 9th ISRM Congress Paris, Theme 3: Rock Dynamics and Tectonophysics/Rock Cutting and Drilling, pp.25-28.

38- Thuro, K., Plinninger, R., J., (1999), "Predicting Roadheader Advance Rates", *Tunnels Tunnell*, Vol. 31, pp. 36-39.

39- Thuro, K., Plinninger, R., J., Spaun, G., (2002), "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.

40- Thuro, K., (2003), "Predicting Roadheader Advance Rates: Geological Challenges and Geotechnical Answers", *50th Years Symposium of the Faculty of Mines/ Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey*, p.7.

41-Yagiz, S.; (2008), "Utilizing Rock Mass Properties for Predicting TBM Performance in Hard Rock Condition", *Tunneling and Underground Space Technology*. 23,pp. 326–339.