



ارائه رابطه‌ی جدید برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفاری تی بی ام (TBM) سنگ

مهدی حسینی*، سید جلال حسینی

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ شهریور ۱۳۹۳
بازنگری: ۳۰ فروردین ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۰ خرداد ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۸ تیر ۱۳۹۴

کلمات کلیدی:

نفوذ
ماشین حفاری تی بی ام
سنگ، تونل انتقال آب
زاگرس ۱

چکیده: ماشین‌های حفار تمام‌مقطع (TBM) از مهمترین ماشین‌های حفاری در تونل‌ها به‌شمار می‌روند. بدلیل قیمت بالای ماشین، ارزیابی عملکرد در حفاری با استفاده از این ماشین‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد ماشین حفار تونل، پیش‌بینی نرخ نفوذ این دستگاه است. روش‌ها و روابط متنوعی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارند و بر اساس پارامترهای مربوط به توده سنگ و مشخصات ماشین ارائه شده‌اند. روش‌های رگرسیون خطی چند متغیره، شبکه عصبی و سیستم استنتاجی تطبیقی فازی عصبی از روش‌های با کارایی بالا در مدل‌سازی و تشخیص الگو در داده‌ها می‌باشند. در این تحقیق با بکارگیری روش رگرسیون خطی چند متغیره و با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی توده سنگ و ماشین حفار تونل (TBM) رابطه‌ی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در تونل زاگرس ۱ ارائه گردید و بر اساس تحلیل‌های آماری بهترین رابطه انتخاب شد. برای بررسی اعتبارسنجی، نرخ نفوذ در بعضی مقاطع تونل قمرود توسط رابطه پیشنهادی محاسبه شد. نتایج محاسبات در مقایسه با مقادیر واقعی و نتایج سایر مدل‌ها نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی نرخ نفوذ توسط رابطه پیشنهادی از دقت قابل قبولی برخوردار است.

۱- مقدمه

در طول سه دهه‌ی گذشته، مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی عملکرد این ماشین‌ها بر اساس تحقیقات تئوری و تجربی مطرح شده است. تمام این مدل‌ها به منظور تخمین درست نرخ نفوذ ماشین و چگونگی تعامل بین توده سنگ و ویژگی‌های ماشین حفاری بوده است. به طور خلاصه، تمام مدل‌های پیش‌بینی به دو دسته‌ی تئوری و تجربی تقسیم می‌شوند. در یک مدل واقع‌گرایانه باید خصوصیات توده سنگ و مشخصات ماشین برای ارزیابی عملکرد ماشین لحاظ شده باشد. مشخصات ماشین‌های حفار تونل بسیار متنوع می‌باشد، در طبقه‌بندی ماشین‌های حفار تونل، این ماشین‌ها به دو گروه تی بی ام‌های خاک و تی بی ام‌های سنگ تقسیم می‌شوند (شکل ۱). در ادامه انواع تی بی ام‌های سنگ توضیح داده شده است [۱].

۱- دستگاه حفار تونل سپر باز^۱

این نوع ماشین برای حفار تونل در سنگ‌های سخت به کار می‌رود، این ماشین‌ها طراحی متفاوتی دارند ولی دو سیستم دو کفشکه و تک کفشکه، محبوبیت بیشتری در میان سازندگان و استفاده‌کنندگان این نوع ماشین‌ها دارند.

۲- دستگاه‌های حفار تمام مقطع تک سپری^۲

این ماشین‌ها در شرایطی به کار می‌روند که توده سنگ درونگیر تونل به قدری سست باشد که امکان استفاده از کفشک برای تامین

نیروی پیشروی وجود نداشته باشد. نصب قطعات بتنی در داخل سپر از ریزش دیواره‌ها جلوگیری کرده و محیط مناسب برای فعالیت کارگران فراهم می‌نماید. سرعت پیشروی این ماشین‌ها در زمین‌های سست و احیاناً ریزشی، محدود به سرعت نصب قطعات بتنی است. ماشین‌های تک سپری به صورت استوانه دارای پوشش بوده که در قسمت جلوی آن صفحه حفار و در قسمت عقب دستگاه نصب پوشش بتنی و جک‌های پیشران قرار گرفته‌اند.

۳- دستگاه‌های حفار تمام مقطع سپر تلسکوپ

برای اولین بار این نوع ماشین با هدف کار در زمین‌های با شرایط نامناسب و یا هنگامی که سرعت اجرای بالا مورد نیاز است، به عرصه مهندسی تونل معرفی گردید. این ماشین علاوه بر دو سر جلو و عقب، مجهز به جک‌های پیشران (موجود در ماشین تک سپری) و کفشک (موجود در ماشین‌های سپر باز)، هستند [۲].

درسال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای ساخت یک مدل عمومی که تمامی پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ ماشین را در نظر بگیرد، انجام شده است. اما ساخت چنین مدلی، کاری بسیار دشوار و تا حدی غیرممکن بوده است. از این رو تمامی مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین (مدل‌های نظری و تجربی) در عمل با خطاهایی همراه است. از میان همه مدل‌های پیش‌بینی، مدل تجربی نروژی (NTH)^۳، مدل تجربی QTBM و مدل نظری مدرسه

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdi_hosseini@ikiu.ac.ir

ساختار سنگ:

هدف از اجرا و انجام این تحقیق، ارائه روابط مناسب برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین در هنگام حفاری تونل با ماشین حفاری تی بی ام سیر تلسکوپی و مقایسه آن با سایر مدل‌ها می‌باشد.



شکل ۱: انواع ماشین‌های حفر تونل [۲]

Fig.1. Types of tunnel boring machine[2]

معدن کلرادو (CSM^۴) از مقبولیت بیشتری برخوردار هستند. علاوه بر این مدل‌ها، محققان در زمینه‌ی پیش‌بینی نرخ نفوذ تحقیقات گسترده‌ای انجام داده و با استفاده از ویژگی‌ها و خصوصیات سنگ بکر و توده سنگ و همچنین پارامترهای ماشین، روابطی را برای پیش‌بینی عملکرد ماشین ارائه کرده‌اند. در جدول ۱ برخی از روابط ارائه شده برای تخمین نرخ نفوذ ارائه شده است.

در روابط ارائه شده در جدول:

PR: نرخ نفوذ، Ks: ضریب اصلاح کلاس درزه ها، HT: سختی کل، Kd: ضریب اصلاح قطر دیسک، HR: سختی چکش اشمیت، T: نیروی محوری ماشین، HA: سختی سایشی، N: شاخص نفوذ، Fn: نیروی نفوذ هر دیسک، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت کششی برزیلی، مقاومت تک محوری ماده سنگ، ib: نرخ نفوذ پایه، ARA: متوسط نرخ پیشروی، ME: اندیس قابلیت حفاری توده سنگ، مقاومت تک محوری توده سنگ، FPI: اندیس نفوذ میدانی، BRMR: پایه RMR بدون در نظر گرفتن جهت یافتگی ناپیوستگی، زاویه بین محور تونل با صفحات ناپیوستگی و RSR امتیاز

جدول ۱: روابط ارائه شده برای پیش‌بینی نرخ نفوذ تی بی ام توسط شماری از محققین [۳-۲۱]

Table 1. Relations for the prediction of penetration rate proposed by researchers [3-12]

$PR = 3.716 - 0.019H_T$	$H_T = H_R \times (H_A)^{0.5}$	تارکی (۱۹۷۳)
$PR = 624 \frac{F_n}{\sigma_{IB}}$		فارمر و گلسوپ (۱۹۸۰)
$PR = -0.0059RSR + 1.59$		کاسینلی و همکاران (۱۹۸۲)
$PR = ib \times K_s \times K_d$		لیزلرود و همکاران (۱۹۸۳)
$PR = 0.5355 - 8.49 - 0.00344T - 0.000823N + 0.0137\phi$		بامفورد (۱۹۸۴)
$PR = \sigma_c^{-0.437} - 0.047RSR + 3.15$		ایناراتو (۱۹۹۱)
$PR = 5Q_{TBM}^{-0.2}$		بارتن (۲۰۰۰)
$SP = 250 \sigma_{cm}^{-0.66}$	$\sigma_{cm}^{-0.66} = \sigma_c \exp\left(\frac{RMR - 100}{18}\right)$	ریباچی و لمبوفازی (۲۰۰۵)
$ARA = 0.422ME - 11.61$		بیناویسکی و همکاران (۲۰۰۷)
$FPI = 0.222BRMR + 2.755$		حسن پور و همکاران (۲۰۰۹)
$FPI = 9.273e^{0.008GSI}$		حسن پور و همکاران (۲۰۰۹)
$FPI = 11.718Q^{0.098}$		حسن پور و همکاران (۲۰۰۹)
$FPI = 4.161 + 0.091\sigma_c + 0.077RQD + 0.117 + JC + 1.077 \log \alpha$		خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰)
$FPI = 9.401 + 0.397 \log \alpha + 0.011JC^2 + (1.14 \times 10^{-5} RQD^3 + \left(\frac{1}{14} \times 10^{-5}\right) \sigma_c^4)$		خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰)
$FPI = 1.828 \sigma_c^{0.313} \cdot RQD^{0.207} \cdot Jc^{0.044} \cdot \alpha^{0.012}$		خادمی حمیدی و همکاران (۲۰۱۰)

۳-۳- زمین شناسی مسیر حفاری شده

طبق تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی، گستره مورد مطالعه در دو پهنه (ناحیه) ساختاری از کوهزاد زاگرس قرار گرفته است که عبارتند از پهنه زاگرس شمالی و کمربند چین خورده-رانده زاگرس. بیشتر مسیر تونل از کمربند چین‌خورده رانده زاگرس عبور میکند. در این قسمت از مسیر، پهنه‌های گسله بزرگی بر سر راه تونل قرار گرفته‌اند. بخش ناچیزی از مسیر تونل نیز در پهنه زاگرس شمالی واقع است. بلوک هیروی بر روی لایه‌های گسل خورده از جنس نهشته‌های سیلیسی پهنه زاگرس شمالی واقع شده است. بطور کلی واحدهای سنگی کمربند چین خورده رانده زاگرس در منطقه مورد مطالعه شامل تناوبی از واحدهای آهکی، شیلی و آهک رسی می‌باشد که در یک بازه زمانی بزرگ نهشته شده‌اند. براساس مطالعات صورت گرفته، چند واحد لیتولوژی در این پهنه زمین‌شناسی از گستره مورد مطالعه جدا شده است. گسل‌های عمده مشاهده شده در مسیر تونل عبارتند از گسل‌های مرهخیل، مرهمان، هیرتا-باینگان، بله بزبان و سیروان. در شکل ۳ نمای از واحدهای مختلف زمین‌شناسی و گسل‌های موجود در مسیر تونل زاگرس ۱ نشان داده شده است.

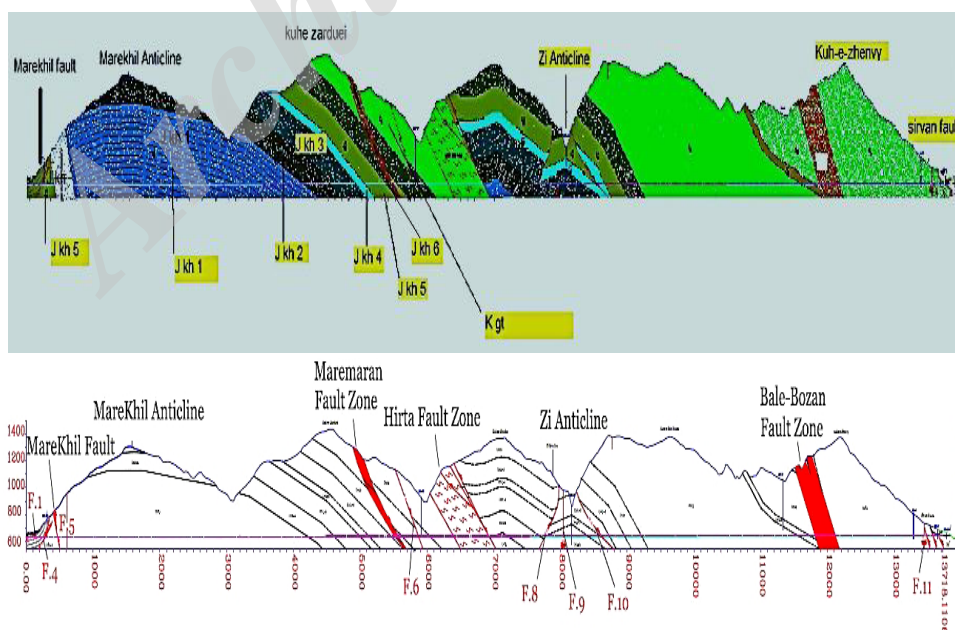
۲- تونل انتقال آب زاگرس ۱

تونل انتقال آب نوسود بخشی از طرح انتقال آب به دشت‌های گرمسیری غرب کشور است که آب منحرف شده از رودخانه سیروان را به پایین دست منتقل کرده و هدف از احداث این تونل، کنترل و تنظیم آب‌های سطحی منطقه وسیعی از غرب کشور و انتقال آن به دشت‌های زراعی منطقه می‌باشد. قطعه یک تونل نوسود (تونل زاگرس ۱) از حوالی روستای هیروی تا ازگله ادامه دارد. قطعه اول این تونل (حد فاصل مره خیل تا هیروی) به طول حدود ۱۴ کیلومتر با عنوان قطعه یک- الف اجرا خواهد شد. مقطع تونل به صورت دایره‌ای و با قطر تمام شده ۴/۵ متر و شیب ۰/۰۰۱۰۸۳/ برای انتقال آب به صورت ثقلی طراحی شده است. اجرای تونل (حفاری و سگمنت‌گذاری) به صورت مکانیزه و با استفاده از دستگاه تی بی ام انجام می‌گیرد. همچنین شروع حفاری تونل به صورت شیب مثبت و از طرف دهانه مره خیل می‌باشد. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به تونل زاگرس ۱ نشان داده شده است.



شکل ۲: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی تونل زاگرس ۱ در استان کرمانشاه [۱۳]

Fig.2. Geographic location and access routes of Zagros 1 tunnel in Kermanshah province [13]



شکل ۳: واحدهای زمین‌شناسی و گسل‌های موجود در مسیر تونل [۱۳]

Fig.3. Geological units and faults on the tunnel route [13]

۴- مشخصات دستگاه حفاری مکانیزه بکار رفته در تونل انتقال آب زاگرس ۱

ماشین مورد استفاده در پروژه نوسود قطعه یک-الف از نوع دبل شیلد سنگ سخت^{۹۱} بوده و بصورت دست دوم از پروژه کاستل پیک^{۹۲} در هنگ کنگ به ایران وارد شده است. این دستگاه با توجه به طراحی اولیه تونل، دارای قطر حفاری کوچک تری بوده و قطر اسمی آن ۵۲۷۵ میلی متر است. ماشین تی بی ام مورد استفاده در کاستل پیک توسط شرکت هرکنشت آلمان طراحی و ساخته شده است و به عنوان یک ماشین نو در سال ۲۰۰۷ برای استفاده در گرانیات کاستل پیک هنگ کنگ، با مقاومت فشاری در حدود ۲۵۰ مگاپاسکال برای طول تونلی برابر ۴۵۰۰ متر با سرباره ۴۰۰ متر ساخته شده است. صفحه حفر از نوع سر تخت سنگ سخت به همراه ۳۷ عدد دیسک دارای قطر ۱۷ اینچی از نوع عقب تعویض شونده^{۹۳} می باشد.

۵- ارائه روابطی برای پیش بینی نرخ نفوذ

با توجه به پیشرفت کلیه علوم در عصر جاری، یکی از گسترده ترین نیازهایی که در علوم مختلف به وفور دیده می شود، مبحث اطلاعات آماری مربوط به هر علم است. در حال حاضر بررسی آماری علوم مختلف با نرم افزارهای مختلفی انجام می شود که یکی از پرکاربردترین این نرم افزارها که در بین متخصصین امر رایج است، نرم افزار SPSS^{۹۴} است. این نرم افزار افزار برای تحلیل های آماری استفاده می شود و در اصل عبارت SPSS مخفف عبارت "بسته آماری برای علوم اجتماعی" می باشد. نرم افزار SPSS کاربرد و ویژگی های خاص خودش را دارد. از جمله نرم افزارهایی است که برای تحلیل آماری در علوم اجتماعی به طور وسیع استفاده می شود. علاوه بر این، از این نرم افزار پژوهشگرانی استفاده می کنند که در علوم مختلف نیاز به بررسی جنبه های آماری اطلاعات دارند. علاوه بر تحلیل های آماری از ویژگی های دیگر نرم افزار می توان به توانایی آن در مدیریت داده ها و همچنین مستند سازی داده ها اشاره کرد [۱۴].

۵-۱- جمع آوری داده ها و ایجاد یک بانک اطلاعاتی مناسب در مسیر تونل پارامترهای مختلف سنگ و دستگاه حفاری می توانستند برای تحلیل در این مطالعه مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به کارهای محققین گذشته هشت مورد از این پارامترها که در دسترس قرار داشته و توسط عملیات میدانی در تونل زاگرس ۱ بدست آمده بود برای انجام فرآیند تحلیل، انتخاب و اطلاعات و داده های مربوط به آن ها جمع آوری گردید. در این مرحله از تحقیق، اطلاعات عملکرد واقعی دستگاه بر اساس گزارش های ثبت شده و مستند در پروژه، شامل بازدید سینه کار تونل، انجام آزمون های صحرائی و آزمایشگاهی مختلف، گزارش های روزانه و داده های ثبت شده توسط پی ال

سی^{۹۳} دستگاه، بررسی نقشه های اجراء، بررسی گزارش های مطالعات مراحل قبل و حین اجرای تونل، جمع آوری، دسته بندی و ثبت گردید. پس از دسترسی به اطلاعات مورد نیاز، گام بعدی مرتب کردن داده ها در بانک اطلاعاتی مناسب می باشد. این بانک اطلاعاتی باید به گونه ای مرتب شود که داده ها هنگام انجام تحلیل ها، به راحتی قابل استفاده باشند. در این تحقیق بعد از جمع آوری اطلاعات مختلف از پروژه مورد بررسی، زمینه لازم برای تجزیه و تحلیل داده ها فراهم گردید. گفتنی است که در این تحقیق، اطلاعات مربوط به حدود دوازده کیلومتر از طول تونل انتقال آب زاگرس ۱ که در ۱۱۰ مقطع از تونل اندازه گیری شده اند، جمع آوری شده و در انجام تحلیل ها از آن ها استفاده شده است. در جدول ۲ اطلاعات مربوط به ۱۱ مقطع آورده شده است. داده های جمع آوری شده به صورت یک بانک اطلاعاتی در نرم افزار اکسل ذخیره شد تا در هنگام انجام تحلیل ها به نرم افزار SPSS انتقال داده شوند. اطلاعات پایه مربوط به جزئیات داده های مذکور شامل خصوصیات پارامترهای سنگ های در برگیرنده تونل و همچنین خصوصیات و پارامترهای مربوط به ماشین حفاری تی بی ام استفاده شده در تونل زاگرس ۱ که تمام تحلیل های رگرسیون بر روی آن ها صورت گرفته در نهایت منجر به ایجاد رابطه ای برای پیش بینی نرخ نفوذ دستگاه شده است.

۵-۲- آنالیز رگرسیون ساده

آنالیز رگرسیون ساده، متشکل از روابط خطی و غیر خطی (درجه دوم، نمایی، لگاریتمی و غیره) بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته به طور جداگانه است. برای این کار پس از تکمیل و انجام مراحل اشاره شده و ورود مرحله به مرحله پارامترها، به گونه ای که ابتدا پارامترهای مربوط به خواص سنگ وارد نرم افزار شده سپس در مرحله بعد پارامترهای مربوط به خواص و پارامترهای ماشین، مورد تحلیل قرار گرفته و ارتباط هر کدام از پارامترها با نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفت. برای متغیرهای مستقل پنج مدل رگرسیون ساده براساس توابع خطی بدست آمد. ارتباط بین هر کدام از خواص سنگ با نرخ نفوذ همراه با معادلات حاصل شده در جدول ۳ نشان داده شده است. اگرچه اکثر این روابط به طور آماری معنی دار هستند، اما ضریب همبستگی بین پارامترها و نرخ نفوذ به نسبت پایین می باشد (بجز مقاومت فشاری تک محوری). این نتایج نشان می دهد که بدست آوردن یک رابطه ای قابل قبول برای تخمین نرخ نفوذ با استفاده از تنها یک متغیر به عنوان متغیر مستقل، نمی تواند معادله کاملی باشد. به همین دلیل، برای فراهم آوردن یک تخمین واقعی برای نرخ نفوذ، استفاده از چند متغیر به عنوان متغیرهای مستقل بطور همزمان یا همان استفاده از رگرسیون چند متغیره ضروری می باشد.

۵-۳- آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای ارائه روابط پیش بینی نرخ نفوذ تی بی ام در این مرحله برای تحلیل آماری رگرسیون خطی چندمتغیره، هشت

یعنی پنجره وابسته انتقال داده و سایر پارامترها که متغیرهای مستقل هستند باید به پنجره متغیر مستقل انتقال داده شوند که متغیرهای مستقل را به صورت مرحله به مرحله به این پنجره وارد نموده، به گونه‌ای که در هر مرحله یک متغیر اضافه می‌شود، مثلاً در ابتدا متغیر مقاومت فشاری تک‌محوری وارد شده و مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته و خروجی آن به‌عنوان یک مدل که در آن ضرایب مربوط به میزان تاثیر هر پارامتر در تغییرات نرخ نفوذ و همچنین میزان ضریب همبستگی و سایر پارامترهای خروجی تعیین شده، در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد مقاومت کششی نیز اضافه شده و آنالیز با دو متغیر انجام شده و یک مدل جدید مشخص می‌شود. به همین ترتیب سایر پارامترها نیز هر کدام در هر مرحله جدید اضافه شده و یک مدل جدید ایجاد می‌شود. در نهایت هشت مدل آنالیز رگرسیون خطی ایجاد خواهد شد که در آن‌ها ضرایب مربوط به هر پارامتر و نیز ضریب همبستگی و سایر موارد در جداولی که در خروجی عملیات ایجاد شده، به همراه نمودار هیستوگرام و نمودار نرمال شده مشاهده می‌شود. در جدول ۴ ضرایب به‌دست آمده از آنالیز رگرسیون برای هر کدام از پارامترها که به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده اند، نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود جدول ۴ اطلاعاتی را در مورد متغیرهای پیش بین ارائه می‌دهد. این جدول اطلاعات ضروری برای پیش‌بینی متغیر وابسته را نشان می‌دهد. مقادیر ضرایب رگرسیونی در ستونی با عنوان B

پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، مقاومت کششی، میانگین فاصله سطوح ناپوستگی، زاویه آلفا، نیروی پیشران ماشین حفاری، توان ماشین، گشتاور و سرعت چرخش صفحه حفار^{۲۴} در دقیقه، به عنوان متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده، به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. چهار مورد اول مربوط به خصوصیات سنگ‌های دربرگیرنده تونل و چهار مورد دوم در مورد خصوصیات ماشین حفاری می‌باشند متغیرهای مستقل طی هشت مرحله به ترتیب وارد رگرسیون شده و هشت مدل مختلف را به وجود می‌آوردند. برای انجام تحلیل رگرسیون خطی چند متغیره برای تعیین درصد تاثیر هر یک از متغیرهای مستقل در افزایش یا کاهش نرخ نفوذ و برقراری رابطه‌ای معنی دار بین آن‌ها، متغیرهای مستقل که در اینجا پارامترهای مربوط به ماشین و خصوصیات سنگ‌های در برگیرنده تونل می‌باشند، به ترتیب و به‌صورت گام‌به‌گام به نرم‌افزار وارد شده و هر کدام از متغیرها برای ایجاد یک مدل جدید به ترتیب به محیط آنالیز رگرسیون اضافه می‌شوند. در ابتدا پس از اینکه کل داده‌ها به پنجره اصلی محیط نرم‌افزار وارد شد، از نوار ابزار بالای صفحه، گزینه‌ی مربوط به آنالیز و از آنجا رگرسیون و سپس گزینه‌ی خطی را انتخاب کرده تا پنجره مربوط به رگرسیون خطی ظاهر شود. در این پنجره مشاهده می‌شود همه متغیرها در ستون سمت چپ ظاهر شده‌اند که برای انجام عملیات باید آن‌ها را در ردیف‌هایی که در ستون سمت چپ این پنجره مشاهده می‌شود، دسته‌بندی کرد. در این مرحله نرخ نفوذ را که به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد، به جایگاه مربوط به خود،

جدول (۲): اطلاعات و داده‌های پایه خصوصیات سنگ و ماشین حفاری تونل زاگرس ۱ [۱۳]

Table 2. The information and basic data of rock characteristics and tunnel boring machine in Zagros 1 tunnel [13]

ایستگاه تونل	متر از تجمعی	متر از روزانه	(کیلووات)توان	(کیلو نیوتن) حفار پیروی پشت صفحه حفار	گشتاور (کیلو نیوتن متر)	صفحه حفار (دور بر دقیقه)	سرعت چرخش (دور بر دقیقه)	مقدار ناپوستگیها با زاویه	فاصله بین ناپوستگیها (متر)	سرعت پیشروری (سانتی متر بر ساعت)	وزن (درصد)	ضریب بهره (متر بر ساعت)	مقاومت کششی توده سنگ (مگا پاسکال)	مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ (مگا پاسکال)
۱	۲۶/۵	۳/۵	۴۷۲/۵	۴۵۰۰	۴۰۰	۴	۲۵	۰/۸	۱۵/۶	۱۰/۴	۱/۵۰	۹/۳	۱۹۹/۷	
۲	۱۲۸/۵۳	۲/۹۴	۴۸۰	۵۲۲۰	۹۱۲/۵	۶/۲۵	۲۱	۱/۶	۱۵/۴	۱۱/۸	۱/۳۰	۹/۳	۱۹۹/۳	
۳	۲۲۶/۰۴	۱/۵۹	۱۱۳۷/۵	۷۰۰۰	۹۰۰	۷	۲۰	۰/۴	۸/۷	۲/۹	۳	۹/۱	۱۹۹	
۴	۷۴۸/۴۴	۳/۱۵	۵۳۲	۵۲۰۱	۴۰۰	۷/۱۵	۴۵	۰/۸	۱۳/۱	۷/۳	۱/۸	۱۰/۳	۱۷۶	
۵	۸۴۲/۹۵	۱۲	۴۷۶	۴۸۹۸	۴۳۰	۷/۴	۴۲	۰/۲	۶۶/۷	۲۰/۸	۳/۲۰	۹	۱۸۹/۷	
۶	۹۴۸/۰۹	۱۲	۳۳۶	۴۱۶۶	۴۰۰	۵/۰۵	۴۰	۰/۲	۶۴/۸	۱۹/۸	۳/۲۷	۹	۱۸۹	
۷	۱۰۴۵/۶۷	۱۵	۳۹۲	۴۸۷۳	۵۰۰	۵/۱۵	۴۱	۰/۴	۶۹/۹	۲۹/۵	۲/۳۶	۹/۸	۱۶۸/۳	
۸	۱۱۴۲/۲۱	۱۸/۰۴	۶۲۱	۵۹۰۷	۶۵۰	۷/۶	۳۵	۰/۲	۸۵/۹	۲۷/۸	۳/۱۰	۹/۹	۱۷۴/۱	
۹	۱۲۵۴/۳۱	۱۵/۰۱	۶۴۰	۶۱۴۲	۶۷۵	۷/۲۵	۶۱	۰/۴	۷۲/۸	۲۲/۲	۳/۲۷	۱۰/۱	۱۷۷/۹	
۱۰	۱۳۵۴/۳	۱۰/۲۲	۵۴۳	۴۹۵۶	۶۰۰	۵/۴	۵۵	۰/۴	۵۰	۱۸/۸	۲/۶۶	۱۰/۱	۱۸۰/۷	
۱۱	۱۴۵۹/۹۳	۱۵/۰۵	۵۴۲	۵۱۶۶	۵۵۰	۵/۱	۴۹	۰/۴	۷۵/۲	۲۵	۳/۰۱	۱۰/۲	۱۸۴/۱	

جدول ۳: خلاصه روابط بین متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ

Table 3. Summary of relationships between independent variables and penetration rates

متغیر مستقل	رابطه تجربی با PR	ضریب همبستگی
UCS	$PR = -0.012 UCS + 5/4$	۰/۳۸
BTS	$PR = -0/2 BTS + 5/4$	۰/۲
Alpha angle	$PR = -0.004 \alpha + 3/66$	۰/۱۱
DPW	$PR = 0/1 DPW + 3/4$	۰/۱۹
RPM	$PR = -0/01 RPM + 3/5$	۰/۰۲
Torque	$PR = -0/005 thrust + 3/8$	۰/۲۲
thrust	$PR = -0/005 thrust + 3/8$	۰/۰۸۲
Power	$PR = 0/11 Power + 3/11$	۰/۱۱

نشان دهنده این است که بخش کوچکی از پراکندگی یک متغیر مستقل توسط سایر متغیرهای مستقل توجیه می‌شود. ستون بعدی نیز، معکوس تلورانس یعنی عامل تورمی آن (VIF^{25}) است که شدت هم‌خطی چندگانه را در رگرسیون ارزیابی می‌کند. یک شاخص است که بیان می‌کند که چه مقدار از تغییرات مربوط به ضرایب برآورد شده بابت هم‌خطی افزایش یافته است. شدت هم‌خطی چندگانه را با بزرگی مقدار (VIF) می‌توان ارزیابی کرد. به عنوان یک قاعده کلی تجربی اگر مقدار (VIF) بزرگتر از ۵ باشد، شدت هم‌خطی بالاست. برای ایجاد معادله و برقراری ارتباط بین متغیرهای مستقل و متغیر وابسته، از ضرایب ستون B استفاده می‌شود که شامل مقدار ثابت نیز می‌باشد. با استفاده از ضرایبی که برای هر یک از پارامترها در خروجی فرآیند آنالیز رگرسیون خطی تعیین شده است، می‌توان یک رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ در هر مرحله و برای هر مدل تولید شده، تعریف کرد. به این ترتیب هشت رابطه برای پیش‌بینی نرخ نفوذ حاصل خواهد شد که در جدول ۵ روابط مربوط به هر مدل به همراه ضریب همبستگی آن‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت با بررسی روابط تعریف شده برای مدل‌های مختلف، رابطه‌ای را که دارای بالاترین ضریب همبستگی باشد، به عنوان رابطه پیش‌بینی نرخ نفوذ تی بی ام انتخاب می‌شود. خلاصه روابط و اطلاعات مربوط به آنالیز رگرسیون چند متغیره در جدول ۵ نشان داده شده است.

ظاهر شده‌اند، این ضرایب بهترین تخمین از ضرایب رگرسیونی در جامعه آماری هستند. ستون Beta نشان دهنده مقدار ضریب رگرسیونی استاندارد شده است که نشانگر میزان تاثیر متغیر مستقل بر متغیر وابسته است. کاربرد ضریب Beta هنگامی است که بیش از یک متغیر مستقل در تحلیل وجود داشته باشد. این ضریب این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان سهم نسبی هر متغیر مستقل را در پیش‌بینی متغیر وابسته با هم مقایسه کرد و در واقع بتوان تعیین کرد که کدام متغیرها بیشترین تاثیر را بر متغیر وابسته دارند. همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود اثر فاصله ناپیوستگی‌ها بیشتر از مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ است به همین دلیل در طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها مانند طبقه‌بندی RMR نیز برای فاصله ناپیوستگی‌ها امتیاز بیشتری در مقایسه با مقاومت فشاری تک‌محوری لحاظ شده است و اثر بیشتری در امتیاز ساختاری سنگ دارد، بنابراین نقش آن در کاهش امتیاز سنگ و در نتیجه افزایش نرخ نفوذ بیشتر از مقاومت فشاری تک‌محوری است. ناپیوستگی‌ها هر چقدر فاصله‌شان کمتر باشد تعداد آن‌ها در سینه کار بیشتر است و در اثر ورود آب به داخل ناپیوستگی‌ها توده سنگ‌ها سست می‌شوند و حفاری آن‌ها راحت‌تر است. ستون Sig نشان دهنده‌ی سطح معنی داری آماری مدل و ضرایب حاصل شده برای متغیرهای مستقل است. هرچه میزان این پارامتر کمتر باشد، نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ از دقت بالاتری برخوردار است. ستون بعدی نشان دهنده‌ی شاخص تلورانس می‌باشد، که در واقع نشان دهنده‌ی توان رابطه خطی بین متغیرهای مستقل است. در واقع تلورانس برای هر متغیر، نسبتی از پراکندگی نسبی آن متغیر است که توسط روابط خطی آن متغیر با سایر متغیرهای موجود در مدل توجیه نمی‌شود. با توجه به اینکه تلورانس، یک نسبت است، مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند. هرچه مقدار تلورانس به یک نزدیکتر باشد،

جدول ۴: ضرایب و خروجی‌های حاصل از آنالیز رگرسیون چند متغیره برای نرخ نفوذ در مدل ۷

Table 7. The coefficients and outputs obtained from the multivariate regression analysis for the penetration rate in model 7

Model	Unstandardized Coefficients		standardized Coefficients	t	.Sig	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
(constant)	۵/۴۲۷	۰/۶۲۲		۸/۷۲۸	.		
(UCS(MPa	-۰/۱۳	۰/۰۰۳	-۰/۳۹۷	-۴/۷۰۲	.	۰/۸۴۷	۱/۱۸۱
(DPW(m	-۰/۵۶۶	۰/۱۰۱	-۰/۴۶۴	-۵/۶۱۵	.	۰/۸۸۳	۱/۱۳۳
Alpha	-۰/۰۳	۰/۰۰۳	-۰/۰۷۱	-۰/۸۹۸	۰/۳۷۱	۰/۹۷۲	۱/۰۲۹
rpm	۰/۰۶۶	۰/۰۴۳	۰/۱۳۱	۱/۵۱۵	۰/۱۳۳	۰/۸۰۲	۱/۲۴۷
(torque(kN.m	۰/۰۰۱	.	۰/۲۲۰	۲/۲۴۱	۰/۰۲۷	۰/۶۲۷	۱/۵۹۴
(thrust(kN	-۰/۰۰۰۰۸۲۴	.	-۰/۱۲۸	-۱/۳۲۹	۰/۱۸۷	۰/۶۴۹	۱/۵۴۱
(Power(kW	.	.	۰/۰۳۱	۰/۲۹۲	۰/۱۷۱	۰/۵۴۵	۱/۸۳۵

جدول ۵: خلاصه روابط بین متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ در آنالیز رگرسیون چند متغیره

Table 5. Summary of Relations between independent variables and the penetration rate in multi-variable Regression

مدل	متغیرها	PR رابطه با	همبستگی
۱	UCS	$PR = -0.012UCS + 5.4$	-۰/۳۸
۲	UCS, BTS	$PR = -0.1BTS - 0.011UCS + 6.2$	-۰/۳۹۴
۳	UCS, BTS, DPW	$PR = 0.063DPW - 0.1BTS - 0.011UCS + 6.15$	-۰/۴
۴	UCS, BTS, DPW, Alpha	$PR = -0.003\alpha + 0.056DPW - 0.084BTS - 0.011UCS + 6.17$	-۰/۴۱
۵	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM	$PR = 0.006RPM - 0.003\alpha + 0.056DPW - 0.086BTS - 0.011UCS + 6.152$	-۰/۴۲
۶	UCS, BTS, DPW, Alpha, RPM, torque	$PR = 0.0001torque + 0.006RPM - 0.003\alpha + 0.056DPW - 0.086BTS - 0.011UCS + 6.152$	-۰/۴۱۹
۷	UCS, DPW Alpha, RPM, torque, thrust	$PR = -0.00008thrust + 0.001torque + 0.066RPM - 0.003\alpha - 0.56DPW - 0.013UCS + 5.42$	-۰/۶۲۰
۸	UCS, BTS, DPW Alpha, RPM, torque, thrust, power	$PR = 0.043RPM - 0.003\alpha + 0.046DPW - 0.094BTS - 0.010UCS + 6.21$	-۰/۴۶۵

محققین گذشته سعی شده بیشترین پارامترهای موثر در نظر گرفته شوند به طوری که مهمترین پارامتر ماشین حفاری تی بی ام که شامل نیروی پیشران صفحه حفار، گشتاور و سرعت چرخش صفحه حفار است در نظر گرفته شده و پارامترهای مهم سنگ که شامل مقاومت فشاری تک محوری (این پارامتر در لایه‌های مختلف متفاوت است)، فاصله ناپیوستگی‌ها و زاویه محور تونل با ناپیوستگی هستند (یکی از ناپیوستگی‌ها گسل‌ها هستند) در رابطه ۱ لحاظ شده است.

۶- مقایسه نتایج حاصل از معادله ارائه شده و سایر مدل‌ها در تونل انتقال آب قمرود

برای بررسی اعتبار رابطه بدست آمده برای پیش بینی نرخ نفوذ و چگونگی ارزیابی عملکرد ماشین حفاری تی بی ام، یک پروژه مشابه تونل انتقال آب زاگرس که در آن‌ها نیز از تی بی ام سپر تلسکوپی برای حفاری استفاده شده است، مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از رابطه ۱، نرخ نفوذ در این پروژه محاسبه شد. سپس به مقایسه نتایج حاصل از این رابطه و سایر مدل‌ها و آنچه که در واقعیت رخ داده، پرداخته می‌شود. جدول ۶ داده‌های مربوط به ۱۰ واحد زمین‌شناسی از مسیر تونل انتقال آب قمرود را نشان می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها، نرخ نفوذ محاسبه شد. در جدول ۷ نتایج حاصل از روابط جدید و روش‌های NTH و CSM ارائه شده است [۱۵].

رابطه ایجاد شده مربوط به مدل ۷ که دارای بیشترین ضریب همبستگی می‌باشد، به عنوان رابطه پیشنهادی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفاری تی بی ام معرفی می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از مدل‌های هشتمانه در جدول ۵، مشاهده می‌شود که در مدل ۷، ضریب همبستگی نسبت به مدل ۸ که متغیر توان در تحلیل وارد شده است، بالاتر است. همبستگی‌های حاصله بین متغیرها در حقیقت به صورت توابع خطی هستند. به عبارت دیگر، این برنامه بهترین رگرسیون را بین پارامترها در یک ترکیب خطی با یک سطح اطمینان ۹۵ درصد ارائه می‌دهد. مدل ۷ به عنوان مدل پیشنهادی تجربی پیش‌بینی نرخ نفوذ انتخاب می‌شود، رابطه ۱ معادله ایجاد شده بین متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ را نشان می‌دهد.

$$PR = -0.00008 \text{thrust} + 0.001 \text{torque} + 0.066 \text{RPM} - 0.003\alpha - 0.56 \text{DPW} - 0.13 \text{UCS} + 5.42 \quad (1)$$

PR: نرخ نفوذ (RPM)، m/hr : سرعت چرخش صفحه حفار (دور بر دقیقه) نیروی پیشران پشت صفحه حفار (کیلو نیوتن)، α : زاویه امتداد ناپیوستگی‌ها با محور تونل (درجه)، DPW: میانگین فاصله بین ناپیوستگی‌ها (متر) UCS: مقاومت فشاری تک محوری سنگ (MPa) این معادله برای تی بی ام سپر تلسکوپی ارائه شده است. با توجه به کارهای

جدول ۶: اطلاعات مربوط به تونل قمرود [۱۵]

Table 6. Data of the Ghomroud tunnel [15]

UCS (MPa)	BTS (MPa)	DPW (m)	α (درجه)	RPM	Thrust (KN)	Power (Kw)	مترایز	واحد زمین شناسی تونل
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۶	۶-۵	۵۵۰۰	۵۵۰-۵۰۰	۰-۳۵۰	An
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۶	۶-۵	۵۱۰۰	۵۰۰-۴۰۰	۳۵۰-۸۰۰	GSch1
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۵۵	۶/۵-۵/۵	۶۰۰۰	۶۰۰-۵۰۰	۸۰۰-۹۱۹	GSch2
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۹	۶/۵-۵/۵	۷۰۰۰	۹۰۰-۷۰۰	۹۱۹-۱۹۰۰	All
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۱	۵	۴۹۰۰	۹۰۰	۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۶۱	۴/۵	۵۱۰۰	۱۲۰۰-۹۰۰	۲۳۰۰-۳۱۰۰	All
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۳۷	۷	۶۳۰۰	۸۰۰-۶۵۰	۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۱۸	۶/۵	۶۷۵۰	۸۰۰-۶۵۰	۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۶۴	۶/۵-۶/۵	۷۲۵۰	۹۵۰-۶۵۰	۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4
۲۰۰-۵۰	۱۵-۹	۱/۸-۰/۴	۴۷	۷/۵-۶/۵	۷۰۵۰	۱۱۰۰-۹۰۰	۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ

جدول ۷: متوسط نرخ نفوذ واقعی و پیش‌بینی شده همچنین خطای پیش‌بینی نرخ نفوذ در روشهای مختلف در مسیر تونل قمرود

Table 7. The average real and predicted penetration rate, also the prediction error of the penetration rate in different methods in Ghomroud tunnel route

رابطه ارائه شده	CSM		NTH		نرخ نفوذ واقعی (m/hr)	متر از	واحدزمین شناسی تونل	
	نرخ نفوذ (درصد) خطای CSM	نرخ نفوذ (m/hr)	نرخ نفوذ (درصد) خطای NTH	نرخ نفوذ (m/hr)				
۸/۷۴	۲/۸۶	۲۷/۷۵	۱/۹	۷/۹۸	۲/۴۲	۲/۶۳	۰-۳۵۰	An
۳۲/۵۸	۲/۹۷	۲۸/۱۲	۱/۶۱	۱۶/۹۶	۲/۶۲	۲/۲۴	۳۵۰-۸۰۰	GSch1
۶/۸۷	۲/۷۱	۵۳/۹۵	۱/۳۴	۷/۲۱	۲/۷	۲/۹۱	۸۰۰-۹۱۹	GSch2
۱۵/۷۱	۲/۴۳	۵۹/۵۲	۰/۸۵	۵۹/۵۲	۰/۸۵	۲/۱۰	۹۱۹-۱۹۰۰	All
۷/۴	۲/۷۵	۳۱/۶۵	۲/۰۳	۱۱/۱۱	۲/۶۴	۲/۹۷	۱۹۰۰-۲۳۰۰	GSch3
۱۰/۹۵	۲/۳۳	۵۴/۷۶	۰/۹۵	۵۲/۳۸	۱	۲/۱۰	۲۳۰۰-۳۱۰۰	All
۱۱/۹	۳/۲۹	۳۴/۰۱	۱/۹۴	۱۰/۸۸	۲/۶۲	۲/۹۴	۳۱۰۰-۳۲۵۰	GSch4
۷/۴	۳/۱۹	۳۴	۱/۹۶	۱۱/۱۱	۲/۶۴	۲/۹۷	۳۲۵۰-۳۵۰۰	GSch5
۲۹/۲۵	۲/۰۸	۳۴/۰۱	۱/۹۴	۱۰/۸۸	۲/۶۲	۲/۹۴	۳۵۰۰-۳۶۵۰	GSch4
۱۶/۲۹	۲/۲۶	۳۱/۸۵	۱/۸۴	۸/۱۴	۲/۴۸	۲/۷	۳۶۵۰-۴۶۵۰	MQ

باشد اما بررسی نتایج سایر پارامترها که به تنهایی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در نظر گرفته شدند، نشان دهنده همبستگی ضعیف میان این پارامترها با نرخ نفوذ می‌باشد. بنابراین برای اینکه درصد بیشتری از شرایط تاثیرگذار سنگ‌های دربرگیرنده تونل و ماشین حفاری در نحوه عملکرد ماشین و بررسی آن دخیل شوند، آنالیز رگرسیون چند متغیره مرحله به مرحله با در نظر گرفتن تعداد بیشتری از پارامترهای موثر برای ایجاد یک رابطه برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری تی بی ام به کار گرفته شد. در بین مدل‌های مختلف و از میان روابط مختلفی که با دخیل کردن این پارامترها ایجاد شد، رابطه ۱ مربوط به مدل ۷ که دارای بیشترین میزان همبستگی می‌باشد، به عنوان رابطه جدید پیش‌بینی نرخ نفوذ تی بی ام انتخاب گردید. در معادله پیشنهادی، موثرترین پارامترها شامل زاویه آلفا، مقاومت کششی، میانگین فاصله ناپیوستگی‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوری از خصوصیات سنگ و نیروی پیشران صفحه حفار، گشتاور و سرعت چرخش صفحه حفار مربوط به خصوصیات ماشین حفاری تی بی ام می‌شود. سپس برای بررسی اعتبار رابطه بدست آمده این رابطه در یک پروژه مشابه دیگر نیز مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از اطلاعات و داده‌های بدست آمده از تونل انتقال آب قمرود، به پیش‌بینی نرخ نفوذ در این پروژه با استفاده از رابطه ایجاد شده با آنالیز رگرسیون و مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از پیش‌بینی این نرخ توسط روش‌های دیگر و همچنین با میزان واقعی آن‌ها پرداخته شد. نتایج حاصل شده در تونل قمرود نشان داد که پیش‌بینی عملکرد تی بی ام توسط این رابطه با آنچه که توسط سایر روش‌های پیش‌بینی که دارای مقبولیت جهانی هستند، تقریباً به هم نزدیک است و می‌توان گفت که پیش‌بینی عملکرد تی بی ام توسط روابط ایجاد شده دارای دقت قابل قبولی است. با وجود آنکه این

برای مقایسه بهتر نتایج حاصل از روش‌های مختلف پیش‌بینی نرخ نفوذ با مقادیر واقعی حاصل شده در تونل انتقال آب قمرود، خطای نتایج حاصل از روش رگرسیون با خطای نتایج حاصل از دو روش CSM و NTH محاسبه شده و در جدول ۹ آورده شده است. به طور کلی و با توجه به جدول ۹ می‌توان گفت، خطای نتایج حاصل شده توسط روش رگرسیون نسبت به مقدار واقعی، کمتر از خطای نتایج حاصل شده در روش NTH و روش CSM و در برخی موارد بیشتر از روش NTH و کمتر از روش CSM می‌باشد و در واقع روش رگرسیون بین این دو روش قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که رابطه پیشنهادی در این پروژه با تقریب خوبی نسبت به واقعیت، نرخ نفوذ را پیش‌بینی می‌کند.

۷- نتیجه گیری

نتایج آنالیز رگرسیون ساده نشان داد که ارتباط معنی‌داری میان پارامترهای زمین‌شناسی و پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین حفاری وجود دارد و هرکدام از این پارامترها به تنهایی نیز رابطه آماری خطی معنی‌داری با نرخ نفوذ حاصل شده دارند. اما همبستگی میان مقاومت فشاری تک‌محوری با نرخ نفوذ، بالاتر از سایر پارامترها بوده و این پارامتر تطابق بهتری را با پارامترهای عملکرد ماشین حفاری تی بی ام ایجاد می‌کند، در نتیجه برای توسعه مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی عملکرد تی بی ام می‌توان از این پارامتر به عنوان یک شاخص مهم استفاده کرد. اما با توجه به گستردگی عوامل تاثیرگذار بر عملکرد تی بی ام، به نظر می‌رسد که اکتفا به یک پارامتر برای بررسی عملکرد ماشین حفاری تی بی ام جامعیت لازم را نداشته و به دلیل تاثیر دیگر پارامترها ممکن است با خطای زیادی همراه

- [8] Barton, N. (1999). "TBM PREDICTIONS-TBM performance In rock using QTBM-The author, Technical adviser, NGI, has developed a new method for predicting penetration rate and advance rate for TBM tunnelling. The method." *Tunnels and Tunnelling* 31(9): 30-35.
- [9] Ribacchi, R. and A. L. Fazio (2005). "Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation (Varzo Tunnel)." *Rock mechanics and rock engineering* 38(2): 105-127.
- [10] Bieniawski Z. T., C. B., Galera J. M., Bieniawski Z. T., Celada B., Galera J. M., (2007). "Predicting TBM excavability-part I". *Tunnels Tunnell Int.*: 32-35.
- [11] Hassanpour, J., et al. (2010). "TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel." *Rock mechanics and rock engineering* 43(4): 427-445.
- [12] Hamidi, J. K., et al. (2010). "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system." *Tunnelling and Underground Space Technology* 25(4): 333-345.
- [13] Moshaver Sahel Engineering Institute, G. S. K. A. P. (2011). "Workshop Report for Boring and Engineering Services of Nowsud Water Transfer Project, Area 1-A-Zagros 1 tunnel", (in Persian).
- [14] Curlinger Phedazar, (2009). "Multivariate Regression in Behavioral Research" (Vol. 2), Translated by Dr. Hasan Pasha Sharifi, *Avaya Noor Publication*, (in Persian).
- [15] Shariat Alavi, H., and Kakaei, R., (2010). ""Calculation of Utilization Factor and Rate of Advance of Hard Rock TBM, Case study: Ghomroud Water Transfer Project, Area 1"." *Iranian Journal of Mining Engineering* 5(9), (in Persian).

مطالعه با جزئیات کامل انجام شده است و نتایج آن برای ارزیابی و پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفاری تی بی ام سپر تلسکوپی تا حدودی مطمئن است، ولی معادله ارائه شده بر مبنای اطلاعات و داده‌های پروژه تونل زاگرس ۱ حاصل آمده، برای جامع‌تر شدن و به روز کردن رابطه پیشنهادی ارائه شده، مطالعات تکمیلی و تحقیقات بیشتر مورد نیاز خواهد بود.

مراجع

- [1] Foroughi, M., (2005). The Effect of Geotechnical Parameters of Tunnel Route on TBM Performance, master's thesis in mining engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, (in Persian).
- [2] Salehi B. (2007). "Tunneling with TBM", Sanei Publication, (in Persian).
- [3] Tarkoy P.J (1973). "Prediction TBM penetration rate in selected Rock types". Ninth Canadian Rock Mechanic.
- [4] Farmer, I. and N. Glossop (1980). "Mechanics of disc cutter penetration" *Tunnels and Tunnelling* 12(6): 22-25.
- [5] Cassinelli, F., et al. (1983). Power consumption and metal wear in tunnel-boring machines: analysis of tunnel-boring operation in hard rock: In: Tunneling 82, Proceedings of the 3rd International Symposium, Brighton, 7-11 June 1982, P73-81. Publ London: IMM, 1982. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Pergamon.
- [6] Lislerud, A. (1988). "Hard rock tunnel boring: prognosis and costs." *Tunnelling and Underground Space Technology* 3(1): 9-17.
- [7] Innaurato, N., et al. (1991). "Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy". *7th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics*.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Hosseini, S. J. Hosseini, "Introducing New Equation for Predicting Penetration Rate of Tunnel Boring Machine". *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(2) (2017) 213-225.

DOI:10.22060/ceej.2015.398

