

## مدل‌سازی نرخ نفوذ دستگاه تمام مکانیزه حفر تونل به روش سطح پاسخ

مجتبی مختاریان اصل<sup>۱\*</sup> و عارف علی‌پور<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۳۰ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸	یکی از مسائل حیاتی در تخمین هزینه‌های ساخت و زمان اجرای پروژه‌های تونلی، پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل (Tunnel Boring Machine, TBM) است. عملکرد TBM به شدت وابسته به میزان نرخ نفوذ دستگاه است. هدف از پژوهش حاضر، بسط مدلی برای تخمین نرخ نفوذ TBM توسط رویکرد سطح پاسخ است. تونل شماره سه کوینز واقع در نیویورک به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و مدل پیشنهادی با داده‌های آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به داده‌های ثبت شده از مشخصات ژئومکانیکی سنگ‌های در برگیرنده تونل، نرخ نفوذ دستگاه با منظور کردن پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره و شاخص تردی سنگ سالم، زاویه بین صفحات ناپیوستگی-گرای حفاری دستگاه و فاصله‌داری بین صفحات ناپیوستگی‌ها پیش‌بینی شده است. نتایج حاصل از مدل مبتنی بر سطح پاسخ با نتایج روش‌های فرا ابتکاری به کاررفته توسط سایر محققان، نظیر بهینه‌سازی اجتماع ذرات، تکامل دیفرانسیلی، جست‌وجوی هارمونیک ترکیبی و بهینه‌ساز گری ولف بر اساس آزمون‌های آماری، مورد مقایسه قرار گرفت. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) در آزمون تخمین - مقدار واقعی برای رویکرد سطح پاسخ برابر با ۰/۹۳۹ به دست آمد، در حالی که بهترین نتیجه برای روش‌های فرا ابتکاری برابر با ۰/۷۱۳ بود. میانگین درصد قدرمطلق خطا برای روش پیشنهادی در تحقیق حاضر برابر با ۳/۸۴۹ بوده و بهترین مقدار برای سایر روش‌های مورد بررسی برابر با ۸/۷۴۶ است. در بقیه آزمون‌های آماری صورت گرفته نیز مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ مبتنی بر روش سطح پاسخ، در مقایسه با سایر رویکردها بهترین نتیجه را دارد.

واژگان کلیدی:  
حفاری مکانیزه،  
مدل غیرخطی،  
نرخ نفوذ،  
روش سطح پاسخ.

۱- مقدمه  
مقطع با توجه به افزایش طول تونل‌ها و مواجهه با شرایط سخت ژئومکانیکی، روش منتخب اجرا در بیشتر پروژه‌های تونلی داخل و خارج از کشور است. تکامل و گسترش دستگاه‌های حفاری مکانیزه (TBM) سبب شده است که آهنگ پیشروی تونل‌ها در حد قابل توجهی افزایش یابد. یکی از مسائل مهم در تونل‌هایی که با استفاده از TBM حفر می‌شوند، مطالعات مربوط به زمان‌بندی و مدیریت پروژه‌ی تونل است که به تعیین دقیق و صحیح عملکرد

امروزه برای حفاری تونل‌ها با توجه به شرایط ژئوتکنیکی، عمق، طول، نوع کاربری، سطح مقطع مورد انتظار، میزان پیشروی، میزان سرمایه‌مورد نیاز و مدت انجام پروژه، از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. روش‌های حفر تونل را به طور کلی می‌توان در سه دسته: روش سنتی یا آتشیاری، حفر به کمک ماشین‌های بازویی و حفاری مکانیزه تمام مقطع، تقسیم‌بندی کرد. امروزه روش حفاری مکانیزه تمام

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.mokhtarian@uut.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه  
۲. استادیار، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه صنعتی ارومیه

پروژه‌ها و از برآزش داده‌های ثبت شده با نرخ نفوذ برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند. در برخی از این روش‌های تجربی بر اساس پارامترهای ژئومکانیکی و زمین‌شناسی سنگ در برگیرنده تونل و تطبیق آن با مشاهدات مختلف قبلی در قالب سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ، مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه شده است. در برخی از روش‌های پیشرفته این گروه، دستورالعمل‌هایی به منظور انتخاب صحیح و مناسب دستگاه حفار متناسب با شرایط نیز ارائه شده است. مدل‌های تئوری نیز بر مبنای قواعد فیزیکی-ریاضی و با قالبی تحلیلی منجر به ارائه رابطه پیش‌بینی می‌شوند. در این مدل‌ها با توجه به ارتباط تئوری میان پارامترهای ماشین و نفوذ دیسک و همچنین در برخی موارد پارامترهایی از سنگ به پیش‌بینی نرخ نفوذ پرداخته شده است. در روش‌های عددی با استفاده از به‌کارگیری رویکردهایی نظیر المان محدود یا المان مجزا، اندرکنش زمین و ماشین در قالب مدل عددی شبیه‌سازی می‌شود.

دستگاه و بهره‌وری آن بستگی دارد. عملکرد دستگاه TBM با شاخص‌هایی نظیر نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی سنجیده می‌شود. مهم‌ترین شاخص که زمان اجرای پروژه متأثر از آن است، نرخ نفوذ<sup>۱</sup> (ROP) دستگاه حفاری مکانیزه است. نرخ نفوذ برابر با نرخ پیشروی آنی TBM است و معمولاً برحسب میلی‌متر بر دور تاج حفار یا متر پیشروی بر ساعت بیان می‌شود. پیش‌بینی، برآورد موقعیت‌های ناشناخته است [۱]. از عوامل مؤثر در پیش‌بینی نرخ نفوذ، می‌توان به پارامترهای ژئومکانیکی مربوط به سنگ بکر و توده سنگ، هندسه تونل و مشخصات ماشین اشاره کرد. با توجه به اهمیت پیش‌بینی نرخ نفوذ در عملیات تونل‌سازی، تحقیقات مختلفی در این حوزه صورت گرفته است. این مطالعات در زیرگروه‌های تجربی، تحلیلی و عددی قابل دسته‌بندی هستند. روش‌های تجربی بر مبنای تجربیات کسب شده در پروژه‌های خاتمه‌یافته و داده‌های ثبت شده از پارامترهای زمین و ماشین در این

جدول ۱- برخی از مهم‌ترین مطالعات تجربی و تئوری پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

مرجع	توصیف مدل	نام مدل
[۳]	سختی کلی سنگ با قالبی ساده و ابتدایی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ مدنظر قرار گرفته است.	تارکوی
[۴]	مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ، نیروی نرمال وارد بر هر دیسک کاتر و سرعت چرخش کله حفار برای پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده شده است.	گراهام
[۵]	مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ برای پیش‌بینی نرخ نفوذ مورد توجه قرار گرفته است.	فارمروگلوپ
[۶]	رابطه و اثر مقاومت فشاری تک‌محوره، اندیس بار نقطه‌ای، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی) و سختی سنگ بر نرخ نفوذ بررسی شده است.	نلسون و همکاران
[۷، ۸]	برای ارائه مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ، از طبقه‌بندی توده سنگ RSR استفاده شده است.	کاسینلی و همکاران اینارتو و همکاران
[۹، ۱۰]	طبقه‌بندی توده سنگ RMR تطبیق‌یافته با حفاری مکانیزه موسوم به RME، به‌منظور پیش‌بینی نرخ نفوذ مدنظر قرار گرفته است.	بنیاوسکی و همکاران سایپنگی و همکاران
[۱۱]	طبقه‌بندی جدید QTBM بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده سنگ Q ارائه شده است.	بارتن
[۱۲]	شاخص نفوذپذیری میدانی (Field Penetration Index, FPI) بر اساس برآزش‌های صورت‌گرفته بین شاخص مد نظر و سیستم طبقه‌بندی توده سنگ RMR و Q پیشنهاد شده است.	حسن‌پور و همکاران
[۱۳، ۱۴]	بر مبنای بانک اطلاعاتی حاصل از آزمایش‌های بزرگ مقیاس برش خطی که می‌تواند نیروهای مورد نیاز برای برش سنگ و پارامترهای مربوط به آن را اندازه‌گیری کند، مدلی ارائه شده است. در این مدل، تلفیق اطلاعات مربوط به توده سنگ و ماشین به طور هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته است.	مدرسه معدنی کلرادو
[۱۵، ۱۶]	این مدل بر مبنای اطلاعات مربوط به بیش از ۲۵۰ کیلومتر تونل حفر شده با دستگاه در ۳۵ پروژه مختلف و در قالبی مشابه با روش مدرسه معدنی کلرادو ارائه شده است. در این مدل تلفیق اطلاعات مربوط به توده سنگ و ماشین به طور هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته است.	دانشگاه علم و صنعت نروژ
[۱۷، ۱۸]	بر مبنای قواعد فیزیکی-ریاضی و با قالبی تحلیلی و با بررسی ارتباط تئوری میان پارامترهای ماشین و نفوذ دیسک و همچنین در برخی موارد پارامترهایی از مشخصات سنگ، مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه شده است.	راکسبوروفیلیپس سانو

<sup>۱</sup>.Rate of Penetration

جدول ۲- برخی از مهم‌ترین روش‌های عددی پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM

مرجع	توصیف مدل	مطالعه موردی	نوع
[۲۱-۱۹]	مدل‌سازی عددی المان مجزا با استفاده از نرم‌افزار UDEC، با بررسی اثر پارامترهایی نظیر فاصله و جهت‌داری درزه‌ها، فاصله دیسک‌های حفاری و تردی بر نرخ نفوذ دستگاه مورد استفاده قرار گرفته است.	المان مجزا	روش‌های عددی کلاسیک
[۲۲]	اثر فاصله‌داری و شیب دسته درزه بر عملکرد TBM با مدل المان مجزای سه‌بعدی بررسی شده، به طوری که نتایج حاصل از آن به‌منظور تخمین نرخ نفوذ، قابل کاربرد است.	المان مجزا	
[۲۳]	در یک مطالعه موردی، اثر پارامترهای هندسی درزه‌های مجزا بر نرخ نفوذ TBM با استفاده از روش المان مجزا در یک تونل بلند مورد توجه قرار گرفته و اثر درزه‌داری توده سنگ بر نرخ نفوذ تحلیل شده است.	المان مجزا	
[۲۴]	به طور کلی فرایند برش با تمرکز بر ابزار برش با دستگاه توسط مدل عددی مبتنی بر المان محدود- مجزا شبیه‌سازی شده است. نتایج به‌منظور ارائه تخمین نرخ نفوذ، قابل استناد است.	تلفیق المان محدود و مجزا	
[۲۶، ۲۵]	در مدل‌های شبکه عصبی، پارامترهای مهم توده سنگ و ماشین به‌عنوان ورودی مدل و با رویکردی مشابه با یک نگاشت چندبعدی پس از آموزش شبکه، به‌عنوان ابزار پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده می‌شوند.	شبکه عصبی مصنوعی	روش‌های عددی هوشمند
[۲۷]	با رویکردی مشابه شبکه عصبی و بر مبنای پارامترهای مهم توده سنگ و ماشین، این مدل‌ها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده می‌شوند.	سیستم استنتاج عصبی- فازی	
[۲۹، ۲۸]	با رویکردی مشابه شبکه عصبی و بر مبنای پارامترهای مهم توده سنگ و ماشین، این مدل‌ها به‌عنوان ابزار پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده می‌شوند.	ماشین بردار پشتیبان	
[۳۱، ۳۰]	این مدل‌ها به‌عنوان ابزار طبقه‌بندی و در تلفیق با روش‌های تجربی طبقه‌بندی توده‌سنگ تطبیق یافته با قابلیت حفاری مکانیزه به کار گرفته می‌شوند.	سیستم استنتاج فازی	
[۳۴-۳۲]	این روش‌ها به‌عنوان روش بهینه‌سازی وزن ورودی، میانی و خروجی برخی روش‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی به کار می‌رود. به‌عنوان یک کاربرد دیگر، به‌عنوان یک ابزار برای تخمین ضرایب مدل‌های پیچیده و غیرخطی پیش‌بینی نرخ نفوذ، کارایی دارند.	روش‌های فرا ابتکاری	

است. با توجه به موضوع این تحقیق، تمرکز، بر نرخ نفوذ دستگاه و روش‌های پیش‌بینی آن است. مهم‌ترین تحقیقات کاربردی اخیر این موضوع اختصاص به کارگیری مدل‌های غیرخطی پیچیده‌ای دارد که بر مبنای متغیرهای مستقل مربوط به مشخصات دستگاه حفاری و خصوصیات توده سنگ قادر به مدل‌سازی متغیر وابسته نرخ نفوذ دستگاه هستند. در پژوهش حاضر از داده‌های ثبت‌شده مربوط به حفاری تونل کوئینز برای مدل‌سازی نرخ نفوذ TBM با استفاده از روابط چندمتغیره غیرخطی مبتنی بر روش سطح پاسخ و معادلات مربوط به آن استفاده و تحلیل‌های مرتبط، ارائه شده است.

## ۲- معرفی مورد مطالعاتی- تونل کوئینز

تونل انتقال آب شماره ۳ کوئینز نیویورک، پروژه‌ای با قدمتی نزدیک به نیم قرن است که طول کلی آن معادل ۹۳ کیلومتر است. بخش دوم این تونل با استفاده از دستگاه TBM و در دو قطعه مجزا حفر می‌شود. قطعه بروکلین این

در تحقیقات اخیر نیز روش‌های هوشمند عددی نظیر شبکه‌های عصبی و روش‌های فرا ابتکاری به‌عنوان ابزار پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده می‌شود که یک فرایند سعی و خطا برای کسب بهترین نتیجه است [۲]. در جدول ۱ برخی از مهم‌ترین مطالعات تجربی و تئوری مربوط به این حوزه به همراه توضیحات مختصری ارائه شده است. برخی از مهم‌ترین روش‌های عددی پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM نیز در جدول ۲ ارائه شده است.

فارغ از قدرت تخمین روش‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ، باید به این نکته توجه کرد که هر کدام از روش‌های رایج این حوزه، با هدفی خاص توسعه یافته‌اند و گاهی در کنار هدف اصلی، یک هدف فرعی را هم مورد توجه قرار داده‌اند. در کنار پیش‌بینی نرخ نفوذ، مواردی نظیر پیش‌بینی نرخ پیشروی، دستورالعمل انتخاب دستگاه، مواجهه با مخاطرات و مباحث مدیریت ریسک، بازطراحی دستگاه و... در برخی از روش‌های جمع‌بندی شده در این تحقیق، مورد توجه بوده

$$ROP_{PSO} = 2.8270 - 0.0041UCS + 0.0292BI - 0.4016DPW^{0.5840} - 1.6756\alpha^{-0.2170} \quad (5)$$

در ادامه تحقیق، با به کارگیری روش سطح پاسخ، اقدام به مدل سازی پاسخ نرخ نفوذ دستگاه TBM نسبت به عامل های ژئومکانیکی سنگ در برگیرنده تونل صورت گرفته است. جزئیات مربوط به برتری روش به کار گرفته شده نسبت به مدل های پیشنهادی یاگیز و کاراهان (۲۰۱۱) و (۲۰۱۵) در بخش های بعدی و با استفاده از شاخص های آماری نشان داده شده است.

### ۳- استفاده از روش سطح پاسخ در ارزیابی پاسخ نرخ نفوذ دستگاه TBM

روش سطح پاسخ<sup>۵</sup> (RSM) مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضی است که برای تعیین رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل استفاده می شود. واژه سطح پاسخ برای این متدولوژی برگرفته از شمای گرافیکی آن است [۳۷]. RSM در مسائلی کاربرد دارد که پاسخ مدنظر توسط چندین متغیر تحت تأثیر قرار می گیرد یا مکانیسم های دخیل در پاسخ به خوبی مشخص نشده اند و اطلاعات موجود در مورد سیستم بسیار کم است یا میان متغیرها برهمکنش وجود داشته و پاسخ غیرخطی است [۳۸]. رابطه کلی بین پاسخ و متغیرهای مستقل طبق رابطه (۶) قابل بیان است [۳۹].

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (6)$$

که در این رابطه،  $\eta$  پاسخ مدنظر،  $f$  تابع ناشناخته پاسخ،  $x_1, x_2, \dots, x_n$  متغیرهای مستقل،  $n$  تعداد متغیرهای مستقل و  $\varepsilon$  خطای آماری است.

به طور معمول در مطالعات صورت گرفته با روش سطح پاسخ از مدل درجه دوم برای پیش بینی پاسخ استفاده می شود که در این حالت رابطه (۶) به صورت زیر قابل بیان است:

$$y = (b_0 + \varepsilon) + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

که در رابطه (۷)،  $b_0$  عرض از مبدأ مدل،  $\varepsilon$  خطای استاندارد،  $b_i$  ضرایب مدل پاسخ،  $x_i$  عبارات خطی برای هر متغیر،  $x_i^2$  عبارات مرتبه دوم هر متغیر و  $x_i x_j$  عبارات مرتبه اول

تونل با طولی به طول ۷ کیلومتر و قطر ۷ متر که در طول سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۰ و در زون های پیچیده زمین شناسی حفاری شده، به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. جزئیات بیشتر در خصوص مشخصات ژئومکانیکی سنگ های در برگیرنده تونل و خصوصیات دستگاه TBM مورد استفاده در تحقیقات انجام یافته توسط یاگیز (۲۰۰۸) قابل دستیابی است [۳۵].

پارامترهای آمار توصیفی داده های ثبت شده از تونل کوئینز شامل آزمایش های سنگ بکر (مقاومت فشاری تک محوره UCS و شاخص تردی BI)، برداشت های صحرایی (زاویه بین صفحات ناپیوستگی با جهت و گرای حفاری دستگاه  $\alpha$  و فاصله داری بین صفحات ناپیوستگی DPW) و نرخ پیشروی ROP در جدول ۳ ارائه شده است. این پارامترها مربوط به ۳۰ سری داده ارائه شده توسط یاگیز و کاراهان (۲۰۱۵) است [۳۶].

جدول ۳- پارامترهای آمار توصیفی داده های ثبت شده از تونل کوئینز

ارزش آماری	UCS (MPa)	BI (kN/mm)	DPW(m)	$\alpha$ (deg)	ROP (m/h)
بیشینه	۱۹۴/۵	۵۸/۰	۲/۰۰	۸۳/۰	۳/۰۷
متوسط	۱۴۹/۱۹	۳۵/۰۶	۱/۱۴	۴۶/۶۶	۲/۰۴
کمینه	۱۱۹/۷	۲۵	۰/۱	۱۰	۱/۲۷
واریانس	۴۵۶/۴	۹۴/۳۴	۰/۳۷	۴۵۶/۹۹	۰/۱۵

در بررسی های صورت گرفته توسط یاگیز و کاراهان (۲۰۱۵) و (۲۰۱۱) مدل کلی به صورت رابطه (۱) برای پیش بینی نرخ نفوذ پیشنهاد و ضرایب آن توسط روش های فرا ابتکاری بهینه سازی اجتماع ذرات<sup>۱</sup> (PSO)، تکامل دیفرانسیلی<sup>۲</sup> (DE)، جستجوی هارمونیک ترکیبی<sup>۳</sup> (HS-BFGS)، بهینه سازی گری ولف<sup>۴</sup> (GWO) تعیین گردیده که نتایج آن در روابط (۲) تا (۵) ارائه شده است [۳۳-۳۶].

$$ROP_{\gamma} = k_0 + k_1 UCS + k_2 BI + k_3 DPW^{k_4} + k_5 \alpha^{k_6} \quad (1)$$

$$ROP_{HS-BFGS} = 2.6285 - 0.0028UCS + 0.0248BI - 0.4016DPW^{0.5011} - 1.69996\alpha^{-0.2778} \quad (2)$$

$$ROP_{DE} = 2.6307 - 0.0028UCS + 0.0248BI - 0.3963DPW^{0.5077} - 1.7014\alpha^{-0.2740} \quad (3)$$

$$ROP_{GWO} = 2.6285 - 0.0028UCS + 0.0248BI - 0.4016DPW^{0.5011} - 1.69996\alpha^{-0.2778} \quad (4)$$

<sup>4</sup>.Grey Wolf Optimizer

<sup>5</sup>.Response Surface Method

<sup>1</sup>.Particle Swarm Optimization

<sup>2</sup>.Differential Evolution

<sup>3</sup>.Hybrid Harmony Search-Broyden Fletcher Goldfarb Shanno

کفایت مدل، تکنیک‌های مختلفی وجود دارند. تعدادی از این تکنیک‌ها شامل مجموع مربع‌های خطای پیش‌بینی، آزمون ضعف برازش<sup>۱</sup> و ضریب تعیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ ) هستند [۳۹]. در تحقیق حاضر مقاومت فشاری تک‌محوره ( $UCS : A$ )، شاخص تردی ( $BI : B$ )، فاصله‌داری بین صفحات ناپیوستگی ( $DPW : C$ ) و زاویه بین صفحات ناپیوستگی با جهت و گرای حفاری دستگاه ( $\alpha : D$ ) به‌عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شده‌اند و متغیر وابسته یا به عبارت دیگر، پاسخ مدل، نرخ نفوذ ( $ROP : Y$ ) است. برای پیش‌بینی پاسخ از مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم استفاده شده که با توجه به آنالیز و تحلیل‌های صورت گرفته توسط نرم‌افزار Design-Expert 10.0.4، مدل درجه سوم به‌منظور مدل‌سازی نرخ نفوذ انتخاب گردیده است.

برای کاهش عبارات مدل پاسخ، در تعیین مدل نهایی عبارات کم‌اهمیت از رابطه درجه سوم حذف شده‌اند. نتایج آنالیز واریانس<sup>۳</sup> (ANOVA) برای پاسخ مدنظر (نرخ نفوذ) در جدول ۴ خلاصه شده است. با توجه به نتایج آنالیز واریانس ANOVA، مقدار F-value مدل برابر با ۱۸/۹۴ بوده که این مؤید معنی‌داری مدل است و تنها ۰/۰۱ درصد شانس وجود دارد که مقدار F ناشی از نویز<sup>۴</sup> باشد. در مدل ارائه شده، عباراتی که p-value کوچک‌تر از ۰/۰۵ دارند، در تعیین پاسخ اهمیت دارند؛ بنابراین، عبارات C، D،  $A^2B$ ،  $B^3$  و  $D^3$  پراهمیت‌اند. مدل پاسخ حاصل از رگرسیون بر اساس پارامترهای کدبندی شده و حقیقی (خام)، به‌ترتیب طبق معادله‌های (۹) و (۱۰) بیان می‌شوند که در آن‌ها نرخ نفوذ به‌عنوان تابعی از متغیرهای مستقل است.

برای بررسی کفایت مدل پاسخ، از تعدادی مشخصه آماری استفاده می‌شود که برخی از آن‌ها برای مدل نهایی پاسخ در جدول ۵ ارائه شده است.

$$ROP = +2.24 - 0.034A - 0.33B - 0.28C - 0.28D + 0.29AB - 0.19BC - 0.28A^2 - 0.12B^2 - 0.028D^2 + 0.99A^2B - 0.62A^3 + 0.73B^3 + 0.80D^3 \quad (9)$$

$$ROP = -10.8055 - 0.2725UCS + 1.8564BI + 0.2072DPW + 0.1009\alpha - 0.0131UCS \times BI - 0.0120BI \times DPW + 3.5964 \times 10^{-3}UCS^2 - 0.02061BI^2 - 2.3124 \times 10^{-3}\alpha^2 + 4.3098 \times 10^{-5}UCS^2 \times BI - 1.1853 \times 10^{-5}UCS^3 + 1.6208 \times 10^{-4}BI^3 + 1.6424 \times 10^{-5}\alpha^3 \quad (10)$$

اندرکنش هر جفت از متغیرها هستند. به‌طور کلی فرایند بهینه‌سازی توسط RSM به سه مرحله قابل تقسیم است. این مراحل شامل موارد زیر است [۴۰]:  
۱. تعیین متغیرهای مستقل و بازه تغییرات آن‌ها؛  
۲. توسعه و اعتبارسنجی مدل ریاضی؛  
۳. رسم نمودارهای دو یا سه بعدی سطح پاسخ به‌صورت تابعی از پارامترهای مستقل و تعیین نقاط بهینه. روش سطح پاسخ علاوه بر اینکه در طراحی آزمایش‌ها کاربرد وسیعی دارد، می‌توان از آن برای تعیین مدل ریاضی برای داده‌های تاریخی ثبت شده از چندین متغیر مستقل و وابسته استفاده کرد که در این تحقیق، از کاربرد اخیر روش سطح پاسخ برای مدل‌سازی و پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه TBM استفاده شده است.

با توجه به اینکه پارامترهای دخیل در مدل‌سازی ریاضی از لحاظ ابعادی و دامنه تغییرات، متفاوت هستند، آنالیز رگرسیونی روی داده‌های اولیه به‌صورت خام قابل انجام نیست. بنابراین، پیش از انجام آنالیز باید پارامترهای دخیل کدبندی شوند. با انجام کدبندی هر پارامتر در بازه ۱ تا -۱ نگاشته شده، بدون بعد می‌شود. به‌طور معمول برای کدبندی پارامترها از رابطه ۸ استفاده می‌شود:

$$x_{coded} = \frac{x_i - (x_{max} + x_{min}) / 2}{(x_{max} - x_{min}) / 2} \quad (8)$$

در رابطه بالا  $x_{coded}$  مقدار کدبندی شده،  $x_i$  مقدار اولیه،  $x_{min}$  حداقل مقدار و  $x_{max}$  حداکثر مقدار پارامتر مدنظر هستند.

بعد از کدبندی پارامترها، تحلیل رگرسیونی انجام می‌شود. برای تعیین ضرایب مدل رگرسیون از روش حداقل مربعات خطا استفاده می‌شود که از تکنیک‌های رگرسیون چندگانه است. با توجه به اینکه رفتار پاسخ مدل ناشناخته است، باید دقت برازش مدل مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی

<sup>3</sup>.Analysis of variance

<sup>4</sup>.noise

<sup>1</sup>.Lack of fit

<sup>2</sup>.Coefficient of determination

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس برای عبارات مدل درجه سوم

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value
Model	۴/۱۰	۱۳	۰/۳۲	۱۸/۹۴	< ۰/۰۰۰۱
A-UCS	۵/۱۳۲E-۰۰۴	۱	۵/۱۳۲E-۰۰۴	۰/۰۳۱	۰/۸۶۲۸
B-BI	۰/۰۵۳	۱	۰/۰۵۳	۳/۱۷	۰/۰۹۴۲
C-DPW	۰/۲۷	۱	۰/۲۷	۱۶/۰۴	۰/۰۰۱۰
D- $\alpha$	۰/۰۹۵	۱	۰/۰۹۵	۵/۶۹	۰/۰۲۹۸
AB	۰/۰۲۰	۱	۰/۰۲۰	۱/۲۱	۰/۲۸۷۰
BC	۰/۰۶۵	۱	۰/۰۶۵	۳/۹۱	۰/۰۶۵۶
A <sup>2</sup>	۰/۰۲۸	۱	۰/۰۲۸	۱/۶۹	۰/۲۱۲۲
B <sup>2</sup>	۸/۴۵۲E-۰۰۳	۱	۸/۴۵۲E-۰۰۳	۰/۵۱	۰/۴۸۶۴
D <sup>2</sup>	۱/۳۳۰E-۰۰۳	۱	۱/۳۳۰E-۰۰۳	۰/۰۸۰	۰/۷۸۱۰
A <sup>2</sup> B	۰/۰۷۷	۱	۰/۰۷۷	۴/۶۰	۰/۰۴۷۷
A <sup>3</sup>	۰/۰۵۶	۱	۰/۰۵۶	۳/۳۸	۰/۰۸۴۷
B <sup>3</sup>	۰/۲۰	۱	۰/۲۰	۱۲/۰۵	۰/۰۰۳۲
D <sup>3</sup>	۰/۴۶	۱	۰/۴۶	۲۷/۳۵	< ۰/۰۰۰۱
Residual	۰/۲۷	۱۶	۰/۰۱۷		
Cor Total	۴/۳۶	۲۹			

بزرگ‌تر از ۴ قابل قبول است. برای مدل بسط‌یافته، نسبت سیگنال به نویز برابر با ۲۰/۵۹۹ است که نشان‌دهنده بالا بودن مقدار سیگنال نسبت به نویز است. در ادامه تحقیق، اثر چهار متغیر مستقل در نظر گرفته شده بر نرخ نفوذ در قالب طرح‌های گرافیکی سطح پاسخ و نمودار کانتور بررسی شده که نتایج آن برای دو اندرکنشی که در معادله (۱۰) اثرگذارند، در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. در هر کدام از این تصاویر، نمودار سطح پاسخ به‌عنوان تابعی از دو پارامتر رسم شده و پارامترهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

#### ۴- ارزیابی دقت مدل‌های مختلف تخمین نرخ نفوذ

مقادیر اندازه‌گیری شده نرخ نفوذ TBM و مقادیر پیش‌بینی شده آن توسط مدل‌های یازگیز و کاراهان (۲۰۱۵) و (۲۰۱۱) و مدل بسط‌یافته در این تحقیق، در جدول ۶ ارائه شده‌اند. در متون فنی برای مقایسه میزان برازندگی تخمین‌های صورت‌گرفته، تعدادی شاخص و آزمون آماری پیشنهاد شده است که آزمون‌های مورد استفاده در این تحقیق، در جدول ۷ جمع‌بندی شده‌اند.

جدول ۵- مشخصات آماری مدل پاسخ

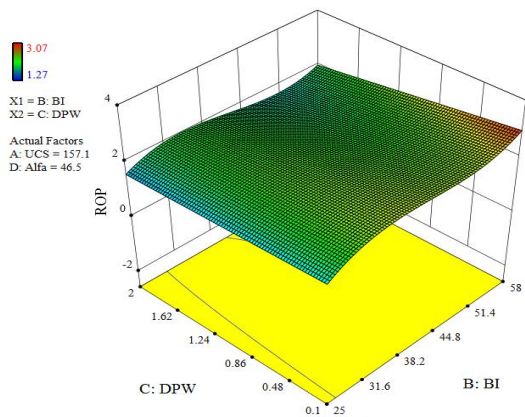
مقدار	مشخصه آماری
۰/۱۳	انحراف استاندارد خطا
۲/۰۵	میانگین
۶/۳۰	ضریب تغییرات (%)
۲/۲۶	مجموع مربع‌های باقی‌مانده پیش‌بینی شده <sup>۱</sup>
۰/۹۳۹	ضریب تعیین ( $R^2$ )
۰/۸۸۹	ضریب تعیین تعدیل شده ( $R_{Adj}^2$ )
۲۰/۵۹۹	کفایت دقت <sup>۲</sup>

با توجه به جدول ۵، مقدار انحراف استاندارد خطای کوچک (۰/۱۳)، بیانگر دقت بسیار بالای مدل تخمین است. هرچه مقدار ضریب تعیین یا ضریب رگرسیون ( $R^2$ ) به ۱ نزدیک‌تر باشد، ارتباط بهتری بین داده‌های ثبت‌شده و محاسبه‌شده از مدل وجود دارد که این مقدار برای مدل پاسخ بسط‌یافته برابر ۰/۹۳۹ است. ضریب تعیین تعدیل شده ( $R_{Adj}^2$ )، حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل بر مدل پاسخ است و هرچه تفاوت میان  $R^2$  و  $R_{Adj}^2$  کمتر باشد، مؤید انتخاب صحیح متغیرهای مستقل است. در مدل پاسخ بسط‌یافته، اختلاف این دو کمیت آماری کم است. درنهایت، کفایت دقت نسبت سیگنال به نویز را اندازه‌گیری می‌کند که نسبت

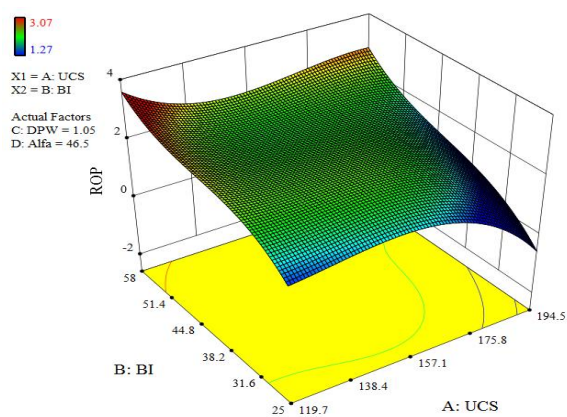
<sup>2</sup>. Adequate precision

<sup>1</sup>. Predicted Residual Sum of Squares





شکل ۲- اثر BI و DWP بر نرخ نفوذ



شکل ۱- اثر UCS و BI بر نرخ نفوذ

جدول ۶- جزئیات مربوط به مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده نرخ نفوذ

Case	Mesured*	PSO*	HS-BFGS*	DE*	GWO*	RSM
۱	۲/۳۷	۲/۵۴	۲/۵۶	۲/۴۸	۲/۴۸	۲/۴۱
۲	۲/۳۴	۲/۴۲	۲/۴۶	۲/۳۸	۲/۳۸	۲/۳۲
۳	۳/۰۷	۲/۷۷	۲/۷۱	۲/۶۹	۲/۷	۳
۴	۲/۳	۲/۵۲	۲/۴۵	۲/۴۷	۲/۴۸	۲/۳۸
۵	۲	۲/۱۸	۲/۱۶	۲/۱۹	۲/۲	۱/۸۷
۶	۲/۰۹	۲/۲۵	۲/۲۱	۲/۲	۲/۲	۲/۰۹
۷	۲/۴۶	۲/۶۷	۲/۵۹	۲/۵۹	۲/۵۹	۲/۵۳
۸	۲/۲۱	۱/۹۳	۱/۹۶	۱/۹۴	۱/۹۴	۲/۱۶
۹	۲/۱۷	۱/۹۱	۱/۹۶	۱/۹۲	۱/۹۲	۲/۱۱
۱۰	۱/۸۷	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۷۹
۱۱	۲/۴۳	۲/۲۳	۲/۱۷	۲/۲	۲/۲۱	۲/۲۱
۱۲	۲/۱۳	۲/۱	۲/۰۸	۲/۰۹	۲/۰۹	۲/۱۶
۱۳	۱/۸۸	۲/۱۱	۲/۰۹	۲/۱	۲/۱	۲/۱۲
۱۴	۲/۱۴	۲/۰۷	۲/۰۴	۲/۰۶	۲/۰۶	۲/۱۱
۱۵	۲/۴۲	۲/۲۲	۲/۱۶	۲/۱۸	۲/۱۸	۲/۳۵
۱۶	۲/۲۸	۱/۸۸	۱/۹	۱/۸۹	۱/۸۹	۱/۲۲
۱۷	۲/۳۵	۲/۲۷	۲/۲۴	۲/۲۴	۲/۲۴	۲/۳۲
۱۸	۲/۶۱	۲/۲۱	۲/۱۹	۲/۲۱	۲/۲۱	۲/۶۱
۱۹	۱/۵۱	۱/۵۹	۱/۶۱	۱/۶	۱/۶	۱/۶۲
۲۰	۱/۸۴	۱/۸۸	۱/۸۵	۱/۹۱	۱/۹۱	۲
۲۱	۱/۶	۱/۷۱	۱/۷۶	۱/۷۹	۱/۷۹	۱/۶۱
۲۲	۱/۸۸	۱/۷۹	۱/۸۲	۱/۸۶	۱/۸۶	۱/۸۱
۲۳	۱/۸۴	۱/۸۱	۱/۸۶	۱/۸۵	۱/۸۵	۱/۹۸
۲۴	۱/۴۶	۱/۷۹	۱/۷۶	۱/۷۵	۱/۷۵	۱/۴۳
۲۵	۱/۹۴	۲/۱۵	۲/۱۳	۲/۱۲	۲/۱۲	۱/۹۶
۲۶	۱/۹۷	۲/۳۳	۲/۲۷	۲/۲۹	۲/۲۹	۱/۹۹
۲۷	۱/۶۵	۱/۷۶	۱/۷۸	۱/۷۷	۱/۷۷	۱/۷۶
۲۸	۱/۵۶	۱/۸۱	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۶۲
۲۹	۱/۲۷	۱/۴۱	۱/۴۵	۱/۴۴	۱/۴۴	۱/۱۸
۳۰	۱/۸	۱/۶۵	۱/۶۸	۱/۷۱	۱/۷۱	۱/۶۹

\*[36]

گرفت که نتیجه آن در جدول ۸ ارائه شده است. همان طور که در این جدول مشخص است، بر مبنای آزمون‌های آماری، رابطه تخمین RSM در تمام ارزیابی‌ها بهترین مقدار را دارا است؛ بنابراین، رابطه مذکور به عنوان مناسب‌ترین رابطه تخمین نرخ پیشروی TBM در تونل کوئینز پیشنهاد می‌شود.

معادلات ریاضی مربوط به هر یک از این شاخص‌ها به صورت جداگانه معرفی و توضیحات لازم برای تفسیر آسان‌تر ذکر شده است. در معادلات ارائه شده برای آزمون‌های آماری،  $ROP_{Meas}$  و  $ROP_{Esti}$  به ترتیب برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین‌زده شده نرخ نفوذ هستند. بر مبنای شاخص‌های قیدشده در جدول ۷ تمام مدل‌های تخمین نرخ نفوذ بررسی شده در تحقیق حاضر، مورد ارزیابی قرار

جدول ۷- آزمون‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه میزان برازندگی تخمین

توضیحات	معادله	پارامتر آماری
مقدار کوچک‌تر بهتر است	$MAPE = \frac{1}{n} \times \left[ \sum_{i=1}^{i=n} \left  \frac{ROP_{Meas}^i - ROP_{Esti}^i}{ROP_{Meas}^i} \right  \right] \times 100$	میانگین درصد قدرمطلق خطا <sup>۱</sup> (MAPE)
مقدار کوچک‌تر بهتر است	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{i=n} (ROP_{Meas}^i - ROP_{Esti}^i)^2}$	مجذور میانگین مربعات خطا <sup>۲</sup> (RMSE)
مقدار کوچک‌تر بهتر است	$VARE = \text{var} \left( \frac{ROP_{Meas} - ROP_{Esti}}{ROP_{Meas}} \right) \times 100$	واریانس قدرمطلق خطای نسبی <sup>۳</sup> (VARE)
مقدار بزرگ‌تر بهتر است	$VAF = \left[ 1 - \frac{\text{var}(ROP_{Meas} - ROP_{Esti})}{\text{var}(ROP_{Meas})} \right] \times 100$	به حساب واریانس <sup>۴</sup> (VAF)
مقدار بزرگ‌تر بهتر است	$CC = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} [(ROP_{Meas}^i - \overline{ROP_{Meas}})(ROP_{Esti}^i - \overline{ROP_{Esti}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (ROP_{Meas}^i - \overline{ROP_{Meas}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (ROP_{Esti}^i - \overline{ROP_{Esti}})^2}}$	ضریب همبستگی <sup>۵</sup> (CC)

جدول ۸- مقایسه مدل‌های مختلف تخمین نرخ نفوذ بر مبنای آزمون‌های آماری

مدل مبتنی بر	MAPE (%)	RMSE	VARE (%)	VAF (%)	CC
PSO	۸/۹۹۵	۰/۲۱۰	۰/۲۶۲	۶۹/۶۴۲	۰/۸۳۵
BFGS-HS	۸/۸۹۹	۰/۲۰۸	۰/۲۴۷	۷۰/۲۸۸	۰/۸۴۰
DE	۸/۷۴۶	۰/۲۰۷	۰/۲۷۲	۷۰/۴۱۳	۰/۸۴۲
GWO	۸/۷۵۲	۰/۲۰۷	۰/۲۷۱	۷۰/۵۲۴	۰/۸۴۳
RSM	۳/۸۴۹	۰/۰۹۴	۰/۰۹۴	۹۳/۸۹۶	۰/۹۶۹

از میان چهار مدل ارائه شده توسط یاکیز و کاراهان مدل مبتنی بر GWO دارای مزیت نسبی است؛ پس این مدل برای مقایسه نمودار تخمین - مقدار واقعی انتخاب شده است. نتایج حاصل از آزمون تخمین - مقدار واقعی برای مدل‌های تخمین مبتنی بر GWO و RSM به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. همان طور که از شکل‌های (۳) و (۴) مشخص است، معادله خط حاصل از برازش برای مدل مبتنی بر RSM با ضریب تعیین ( $R^2$ )

علاوه بر آزمون‌های آماری بررسی شده در جدول ۸، نمودار تخمین - مقدار واقعی نیز به عنوان یک ابزار بررسی دقت تخمین در متون فنی، در این بخش به کار گرفته شده است. در این آزمون، مقادیر تخمین‌زده شده ROP توسط هر یک از مدل‌ها در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده ROP ترسیم می‌شود. به هر مقدار که ضریب تعیین یا رگرسیون ( $R^2$ ) به عدد یک نزدیک‌تر باشند، دقت تخمین ROP توسط مدل بهتر خواهد بود. همان گونه که از جدول ۸ مشخص است،

<sup>۴</sup>. Variance Account for  
<sup>۵</sup>. Correlation Coefficient

<sup>۱</sup>. Mean Absolute Percentage Error  
<sup>۲</sup>. Route Mean Square Error  
<sup>۳</sup>. Variance Absolute Relative Error

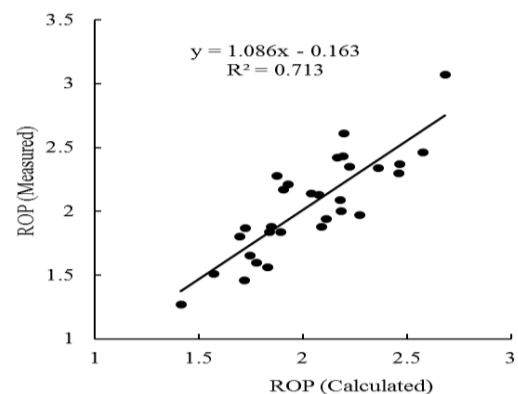


## ۵- نتیجه گیری

پیش بینی نرخ نفوذ دستگاه TBM، یکی از موارد کلیدی در موفقیت پروژه های تونلی مکانیزه است. در تحقیق حاضر، مدلی جدید بر مبنای روش سطح پاسخ (RSM) برای پیش بینی نرخ نفوذ دستگاه TBM با توجه به داده های ثبت شده از تونل کوئینز ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل پیش بینی پیشنهادی، با نتایج روش های فرا ابتکاری اجتماع ذرات (PSO)، تکامل دیفرانسیلی (DE)، جست و جوی هارمونیک ترکیبی (HS-BFGS) و بهینه ساز گری ولف (GWO) بر مبنای آزمون های آماری مقایسه شده است. با توجه به آزمون های آماری میانگین درصد قدر مطلق خطا برای روش RSM برابر با ۳/۸۴۹ بوده، در حالی که بهترین مقدار از میان روش های فرا ابتکاری، مربوط به روش DE، برابر با ۸/۷۴۶ است. یکی از پارامترهای مهم در ارائه مدل تخمین ضریب همبستگی است که مقدار این ضریب برای روش RSM برابر با ۰/۹۶۹ و برای سایر روش ها در بهترین حالت، برابر با ۰/۸۴۳ است. همچنین مدل مبتنی RSM بیشترین مقدار VAF و کمترین مقادیر RMSE و VARE را در مقایسه با روش های فرا ابتکاری دارد. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) در آزمون تخمین - مقدار واقعی برای رویکرد پیشنهادی برابر با ۰/۹۳۹ بوده، در حالی که بهترین نتیجه برای روش های فرا ابتکاری مربوط به روش GWO و برابر با ۰/۷۱۳ است. نتایج تحقیق حاضر، بیانگر قابلیت روش سطح پاسخ (RSM) در پیش بینی نرخ نفوذ دستگاه حفاری مکانیزه تمام مقطع با دقت و صحت مناسب نسبت به سایر روش ها است؛ ولی باید به این نکته نیز توجه کافی داشت که داده های مورد استفاده در این پژوهش، منحصر به چندین مقطع از یک تونل با شرایط ژئوتکنیکی مختلف و قطر مشخص است. بنابراین، در تحقیقات آتی به منظور بالا بردن جامعیت مدل تخمین، تعمیم مدل به تونل های مختلف توصیه می شود.

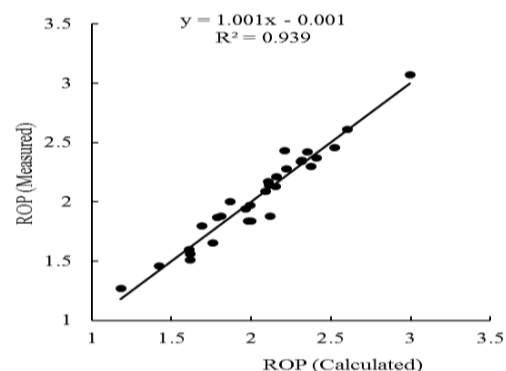
برابر با ۰/۹۳۹ نزدیک ترین مقدار را نسبت به عدد یک دارد؛ بنابراین، با توجه به این آزمون نیز برتری مدل تخمین RSM تأیید می شود.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ مقدار قدر مطلق خطای پیش بینی ( $|ROP_{Meas} - ROP_{Esti}|$ ) برای مدل های تخمین نرخ نفوذ مبتنی بر GWO و RSM محاسبه شد که در شکل (۵) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵) مشخص است که در بیشتر پیش بینی ها مقدار خطای مدل تخمین مبتنی بر RSM کوچک تر است.



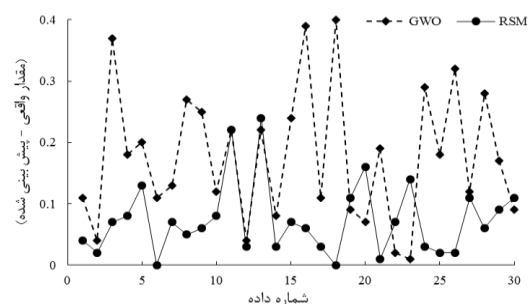
شکل ۳. نمودار تخمین - اندازه گیری شده برای مدل مبتنی بر

GWO



شکل ۴. نمودار تخمین - اندازه گیری شده برای مدل مبتنی بر

RSM



شکل ۵- مقایسه مقدار خطای مدل های تخمین نرخ نفوذ

مبتنی بر GWO و RSM

## مراجع

- [۱] م. شفيعی نیک‌آبادی، م. شفيعی نیک‌آبادی و س.ع. عظیمی، «پیش‌بینی تقاضا در زنجیره تأمین با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (مورد مطالعه: زنجیره تأمین شرکت ایران خودرو)»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۱، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۱۲۷-۱۳۶.
- [۲] م. یوسفی و م. مظلوم، «روش‌های ترکیب شبکه عصبی در پیش‌بینی نتایج آزمایشات روانی و مقاومتی بتن خودتراکم»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۳۹-۴۹.
- [3] P.J. Tarkoy, Predicting tunnel boring machine (TBM) penetration rates and cutter costs in selected rock types, 1974.
- [4] P. Graham, Rock exploration for machine manufacturers, Exploration for rock engineering, 1976.
- [5] I. Farmer and N. Glossop, "Mechanics of disc cutter penetration", Tunnels and Tunnelling International, Vol. 12, No. 6, 1980, pp. 22-25.
- [6] P. Nelson, T.D. O'Rourke and F.H. Kulhawy, "Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks", in The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1983.
- [7] F. Cassinelli, S. Cina and N. Innaurato, "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.
- [8] N. Innaurato, A. Mancini, E. Rondena and A. Zaninetti, "Forecasting and effective TBM performances in a rapid excavation of a tunnel in Italy", in 7th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics, 1991.
- [9] M. Sapigni, M. Berti, E. Bethaz, A. Busillo and G. Cardone, "TBM performance estimation using rock mass classifications", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, No. 6, 2002, pp. 771-788.
- [10] Z. Bieniawski, B. Celada and J.M. Galera, "Predicting TBM Excavatability", Tunnels & Tunnelling International, 2007.
- [11] N. Barton, "TBM performance estimation in rock using Q(TBM)", Tunnels and Tunnelling International, Vol. 31. No. 9, 1999, pp. 30-34.
- [12] J. Hassanpour, J. Rostami, M. Khamehchiyan, A. Bruland and H.R. Tavakoli, (2010). "TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, No. 4, pp. 427-445.
- [13] L. Ozdemir, Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability, Colorado School of Mines: USA CO, 1977.
- [14] J. Rostami and L. Ozdemir, "A new model for performance prediction of hard rock TBMs", in Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference. SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC, 1993.
- [15] O. Blindheim, Boreability predictions for tunneling, in Department of Geological Engineering, The Norwegian Institute of Technology, 1979.
- [16] A. Bruland, Hard Rock Tunnel Boring Machine Vol. 3 - Advance Rate and Cutter Wear, in Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology: NTNU, Trondheim 54, 1998.
- [17] F.F. Roxborough and H.R. Phillips, "Rock excavation by disc cutter", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 12, No. 12, 1975, pp. 361-366.
- [18] H.P. Sanio, "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 22, No. 3, 1985, pp. 153-161.
- [19] Q.M. Gong, Y.-Y. Jiao and J. Zhao, "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 1, 2006, pp. 46-55.

- [20] Q.M. Gong and J. Zhao, "Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, No. 3, 2007, pp. 317-324.
- [21] Q.M. Gong, J. Zhao and Y.-Y. Jiao, "Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 20, No. 2, 2005, pp. 183-191.
- [22] M. Sharifzadeh and A. Iranzadeh, "Three dimensional numerical modelling of joint spacing and orientation effects on rock cutting process by a single TBM cutter", *CIM Bulletin*, 102(1117), 2009, pp. 1-5.
- [۲۳] س.م. افتخاری، ع. باغبانان و ر. باقرپور، «تحلیل عددی تأثیر مشخصات هندسی شکستگی های توده سنگ بر نرخ نفوذ دستگاه TBM»، *مجله مهندسی معدن*، دوره ۸، شماره ۱۸، بهار ۱۳۹۲، صفحه ۱-۱۲.
- [24] C. Labra, J. Rojek and E. Oñate, "Discrete/Finite Element Modelling of Rock Cutting with a TBM Disc Cutter", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 50, No. 3, 2017, pp. 621-638.
- [25] A. Benardos and D. Kaliampakos, "Modelling TBM performance with artificial neural networks", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 19, No. 6, 2004, pp. 597-605.
- [26] Z. Zhao, Q. Gong, Y. Zhang and J. Zhao, "Prediction model of tunnel boring machine performance by ensemble neural networks", *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*, Vol. 2, No. 2, 2007, pp. 123-128.
- [27] M.A. Grima, P. Bruines and P. Verhoef, "Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 15, No. 3, 2000, pp. 259-269.
- [28] S. Mahdevari, K. Shahriar, S. Yagiz and M.A. Shirazi, "A support vector regression model for predicting tunnel boring machine penetration rates", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, No. 72, 2014, pp. 214-229.
- [29] L. Gao and X.-B. Li, "Utilizing partial least square and support vector machine for TBM penetration rate prediction in hard rock conditions", *Journal of Central South University*, Vol. 22, No. 1, 2015, pp. 290-295.
- [30] J.K. Hamidi, K. Shahriar, B. Rezai and J. Rostami, "Performance prediction of hard rock TBM using Rock Mass Rating (RMR) system", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 25, No. 4, 2010, pp. 333-345.
- [31] E. Ghasemi, S. Yagiz and M. Ataei, "Predicting penetration rate of hard rock tunnel boring machine using fuzzy logic", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 73, No. 1, 2014, pp. 23-35.
- [32] D.J. Armaghani, E.T. Mohamad, M.S. Narayanasamy, N. Narita and S. Yagiz, "Development of hybrid intelligent models for predicting TBM penetration rate in hard rock condition", *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, 2017, pp. 29-43.
- [33] S. Yagiz and H. Karahan, "Prediction of hard rock TBM penetration rate using particle swarm optimization", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 3, 2011, pp. 427-433.
- [34] D.J. Armaghani, R.S. Faradonbeh, E. Momeni, A. Fahimifar and M. Tahir, "Performance prediction of tunnel boring machine through developing a gene expression programming equation", *Engineering with Computers*, 2017, pp. 1-13.
- [35] S. Yagiz, "Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 3, 2008, pp. 326-339.
- [36] S. Yagiz and H. Karahan, "Application of various optimization techniques and comparison of their performances for predicting TBM penetration rate in rock mass", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, 2015, pp. 308-315.
- [37] M. Farooq Anjum, I. Tasadduq and K. Al-Sultan, "Response surface methodology: A neural network approach", *European Journal of Operational Research*, 101(1), 1997, pp. 65-73.
- [38] J.-S. Kwak, "Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(3), 2005, pp. 327-334.

[39] D. Baş, and I.H. Boyacı, "Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology", Journal of Food Engineering, 78(3), 2007, pp. 836-845.

[۴۰] م. مردعلی‌زاده، م.ر. سلیمانی یزدی و م. صفرخانیان، «مدل‌سازی تجربی و بررسی تأثیر پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اختلاطی آلیاژ آلومینیوم ۵۴۵۶ با استفاده از روش سطح پاسخ»، مجله مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۱۰۳-۱۱۶.