



تحلیل احتمالاتی مدل‌های برآورد نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع تونل

محسن سرداری، شکراله زارع*، مسعود مزرعه لی

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۵

بازنگری: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰

پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۸/۱۶

کلمات کلیدی:

تحلیل احتمالاتی،

عدم قطعیت،

نرخ پیشروی،

شبیه‌سازی مونت کارلو،

بازه اطمینان.

خلاصه: عدم قطعیت‌ها و تغییرات در داده‌های به دست آمده از سنگ‌های موجود در مسیر تونل وجود دارد. برای بررسی اثر عدم قطعیت‌ها یک ابزار آماری-احتمالاتی که اجازه گسترش عدم قطعیت پارامترهای ورودی را به معیار طراحی می‌دهد، مورد نیاز است. یکی از پارامترهای مهم در تخمین زمان و هزینه یک پروژه تونل‌سازی، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر است. هدف از انجام این مطالعه، استفاده از روش‌های احتمالاتی جهت تخمین نرخ پیشروی ماشین‌های حفر تمام مقطع است. برای این منظور از روابط مدل‌های بارتن (QTBM)، مؤسسه علوم و فناوری نروژ (NTNU) و مدرسه معدن کلرادو (GSM)، به عنوان تابع عملکرد در روش شبیه‌سازی مونت کارلو ۷۵ استفاده شده است. ابتدا با استفاده از اطلاعات واحدهای زمین‌شناسی و حفاری قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان تابع توزیع احتمال مناسب برای پارامترهای ورودی مدل‌ها مشخص شده و سپس با اجرای شبیه‌سازی، بازه نرخ پیشروی با قطعیت ۹۵ درصد محاسبه شده است. با مقایسه نتایج مدل‌ها با مقدار واقعی نرخ پیشروی، مشخص شد که مدل QTBM در تمامی واحدهای زمین‌شناسی و مدل GSM در طول کل تونل، متوسط نرخ پیشروی نزدیکتری به مقدار واقعی نرخ پیشروی تخمین زده است. نتایج تحلیل احتمالاتی نشان می‌دهد که بازه نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل NTNU در تمامی واحدهای زمین‌شناسی بسیار کمتر از بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی است. همچنین، بررسی پارامترهای مؤثر بر مدل‌های مذکور نشان می‌دهد که برخلاف مدل‌های QTBM و GSM، پارامترهای عملیاتی تأثیر بیشتری در نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل NTNU دارند.

۱- مقدمه

می‌شود.

مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی پارامترهای عملکرد ماشین وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارد و بر اساس پارامترهای مربوط به سنگ بکر، توده‌سنگ و مشخصات ماشین ارائه شده‌اند. مدل‌های ارائه شده به دو دسته نظری و تجربی تقسیم‌بندی شده‌اند. از مدل‌های نظری می‌توان به مدل‌های راکس برو و فیلیپس [۱]، سانویو [۲]، ساتو [۳]، اسنودن و همکاران [۴]، بوید [۵] و اوزدمیر [۶] اشاره کرد. مدل‌های پیش‌بینی تجربی بر اساس نحوه ارائه به دو دسته بر مبنای پارامترهای توده‌سنگ و بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی تقسیم‌بندی شده‌اند. از مدل‌های تجربی بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی می‌توان مدل‌های گراهام [۷]، فارمر

ماشین حفر تمام مقطع تونل (TBM) امروزه یکی از رایج‌ترین روش‌ها در حفاری بسیاری از پروژه‌های تونل‌سازی با شرایط زمین‌شناسی مختلف است. مدت زمان و هزینه‌های اجرا از پارامترهای کلیدی در موفقیت کاربرد ماشین حفر تونل است. از همان ابتدای استفاده از ماشین حفر تونل، تخمین عملکرد ماشین اصلی‌ترین قسمت در تخمین هزینه و زمان پروژه بوده است. با پیشرفت فناوری ساخت ماشین‌های حفر تونل، از ماشین حفر تمام مقطع تونل به عنوان یک جایگزین مناسب روش‌های متداول، حتی در شرایط زمین‌شناسی پیچیده استفاده شده است. با گسترش استفاده از این ماشین‌ها، پیش‌بینی دقیق عملکرد ماشین امری حیاتی و مهم تلقی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: zare@shahroodut.ac.ir



پرداخته‌اند. در این مطالعات، زمان حفاری تونل شبیه‌سازی شده و زمان حفر تونل به صورت توزیع احتمال به دست آمده است. در مطالعات شعبانی و همکاران [۲۵] تأثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو بررسی شده است. در این مطالعه ابتدا توابع توزیع احتمال نرخ تورم، نرخ برابری ارز و تاخیر زمانی با توجه به داده‌های موجود به دست آمده و سپس دامنه تغییرات هزینه کل پروژه با ۹۵ درصد قطعیت برآورد گردیده است. پیاجو و همکاران [۲۶] در یک پروژه تونل‌سازی با استفاده از مدل مدرسه معدن کلرادو (CSM)، سرعت حفاری ماشین حفر تونل را پیش‌بینی کرده‌اند. در ابتدا با روش شبیه‌سازی مونت کارلو تابع توزیع احتمال مناسب برای سرعت حفاری و نرخ پیشروی ماشین حفر تونل تعیین و سپس سناریوهای مختلفی برای زمان تکمیل پروژه ارائه شده است. همچنین فرنزل [۲۷] نیز از ترکیب مدل CSM و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای بدست آوردن هیستوگرام نرخ نفوذ ماشین حفر تونل و عمر برش‌دهنده بر اساس توابع توزیع احتمال پارامترهای این مدل استفاده کرده است. سپس مقایسه‌ای بین مقدار میانگین محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو با میانگین مقدار واقعی برای دو پارامتر، انجام شده است. افتخاری و همکاران [۲۸] با استفاده از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نرخ نفوذ ماشین حفر تونل را پیش‌بینی کرده‌اند. در این مطالعه ابتدا با استفاده از مشخصات سنگ بکر، توده‌سنگ و پارامترهای اجرایی ماشین و روش شبکه عصبی مصنوعی، شبکه بهینه با انجام آزمایش‌های مختلف به دست آمده است. سپس به منظور ارزیابی شبکه بهینه، مجموعه پارامترهای اجرایی ماشین با استفاده از روش مونت کارلو و به طور تصادفی ایجاد شده و نتایج خروجی با مقادیر واقعی مورد مقایسه قرار گرفته است. در مطالعات چپور و همکاران [۲۹] عملکرد ماشین حفاری سپر متعادل کننده فشار زمین (EPB) توسط ترکیب مدل قطعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برآورد شده است. در این مطالعه پس از تعیین توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل قطعی، شبیه‌سازی انجام شده و تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی و پارامترهای هدف دیگر با ۹۵ درصد قطعیت محاسبه شده است. یاگیز و کاراهان [۳۰] مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM را با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی ارائه نموده و عنوان کردند که نتایج حاصل از این مدل‌ها با مدل‌های مقبول پیشین تفاوت اندکی

[۸]، نلسون و همکاران [۹] و بامفورد [۱۰] را نام برد. مدل‌های تجربی مبتنی بر پارامترهای توده‌سنگ نیز بر اساس روش استفاده شده به سه دسته تقسیم شده‌اند. مدل‌های گریما و همکاران [۱۱]، ارمغان و همکاران [۱۲]، میکائیل و همکاران [۱۳] از سیستم‌های طبقه بندی فازی برای ارائه مدل استفاده کرده‌اند. همچنین مدل‌های مؤسسه علوم و فناوری نروژ (NTNU) [۱۴]، رمضان زاده [۱۵]، حسن پور و همکاران [۱۶] و فرخ و همکاران [۱۷] از روش‌های آماری استفاده کرده‌اند. مدل‌های شاخص توده سنگ (RMI) [۱۸]، بارتن (Q_{TBM}) [۱۹] و حفریزیری توده سنگ (RME) [۲۰] نیز مبتنی بر سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ هستند.

در برخی از مدل‌های پیش‌بینی، آزمایش‌های خاصی انجام می‌گیرد که نتیجه این آزمایش‌ها، در پیش‌بینی عملکرد TBM در برخورد با واحدهای سنگی مسیر تونل تأثیرگذار است. بنابراین با توجه به آزمایش‌های انجام شده و گستردگی پایگاه داده مدل‌ها، برخی از آنها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مهم‌ترین این مدل‌ها می‌توان به مدل CSM، NTNU و Q_{TBM} اشاره کرد. در سالیان اخیر نیز مطالعاتی در این زمینه توسط آووندوک و چپور [۲۱] و آتش و همکاران [۲۲] انجام شده است. اما به دلیل محدود بودن امکانات آزمایشگاهی امکان انجام مطالعات مذکور به صورت گسترده وجود ندارد. پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در پروژه‌های مرتبط با زمین، دقت روابط ارائه شده را کاهش می‌دهد. به خصوص چنانچه ساختگاه و شرایط زمین‌شناسی تونل مورد پیش‌بینی و تونلی که بر اساس آن روابط پیش‌بینی ارائه شده است، متفاوت باشد. این امر منجر به استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی برای پیش‌بینی عملکرد ماشین شده و در بعضی موارد به جای یک عدد مشخص، یک دامنه برای نرخ نفوذ یا پیشروی پیشنهاد شده است. به ویژه اگر هدف ارائه مدل جامع باشد که در ساختارهای با شرایط ساختارهای سنگی متنوع قابل استفاده باشد، پیش‌بینی دقیق مقدار پارامترهای عملکرد ماشین بسیار سخت خواهد بود.

استفاده از روش‌های احتمالاتی دلیل وجود عدم قطعیت در مسائل ژئوتکنیکی بسیار حائز اهمیت است. بررسی عدم قطعیت در بخش‌های مختلف مسائل ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. وارگاس و همکاران [۲۳] و بابائی [۲۴] در مطالعات خود به معرفی روش شبیه‌سازی مونت کارلو و کاربرد آن در طراحی و حفر تونل

و مقادیر به دست آمده برای طول کل واحد اعمال می‌شود. وجود عدم قطعیت در این داده‌ها باعث می‌شود که نتوان در هر نقطه‌ای، با استفاده از مدل‌ها، پارامترهای عملکرد ماشین را محاسبه کرد. در روش‌های احتمالاتی به خصوص روش شبیه‌سازی مونت کارلو، با تولید داده‌های تصادفی زیاد از توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل‌ها، حالت‌های مختلف بررسی شده و هیستوگرام نرخ پیشروی، بازه، میانگین و شکل تغییرات داده‌ها به دست می‌آید. همچنین در رابطه با به دست آوردن بازه تغییرات بر اساس مدل‌های مختلف، باید گفت، چنانچه مدلی، بازه و متوسط نزدیکتری به بازه و متوسط مقدار واقعی تخمین بزند، با احتمال زیادی در حالت تحلیل قطعی، منظور نقطه به نقطه، نسبت به مدلی که بازه به دست آمده از آن، بازه مقدار واقعی را در بر نمی‌گیرد، مقدار نزدیکتری تخمین خواهد زد.

با وجود این که شبیه‌سازی مونت کارلو با هدف تحلیل احتمالاتی نرخ پیشروی حفاری تونل‌های مکانیزه در ترکیب با محاسبات نرم در مطالعات پیشین انجام شده است، اما تاکنون بررسی و مقایسه احتمالاتی نتایج حاصل از مدل‌های پیش‌بینی مرسوم مورد توجه قرار نگرفته است. هدف از انجام این مطالعه، استفاده از مدل‌های Q_{TBM} ، NTNU و CSM در ترکیب با روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای محاسبه نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان است. تونل مورد مطالعه از لحاظ زمین‌شناسی جزء شرایط ضعیف است. همان‌طور که بیان شد از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در برخی از مطالعات برای محاسبه نرخ نفوذ TBM استفاده شده ولی نرخ پیشروی با استفاده از روش احتمالاتی محاسبه نشده است. باید گفت که ماشین حفر تونل در هنگام حفاری در واحدهای زمین‌شناسی در مقاطع مختلف، دارای ضریب بهره‌وری مختلفی بوده که این پارامتر را نیز باید به صورت تابع توزیع احتمال در نظر گرفت. بنابراین با محاسبه نرخ نفوذ به صورت تابع توزیع احتمال و در نظر گرفتن ضریب بهره‌وری نیز به صورت تابع توزیع احتمال، نرخ پیشروی که از حاصلضرب این دو پارامتر محاسبه می‌شود، به صورت تابع توزیع احتمال خواهد بود. بنابراین با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای زمین‌شناسی و پارامترهای عملکرد ماشین، روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک ابزار بسیار کارآمد برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود است.

دارند. سلیمی و همکاران [۳۱] تکنیک آماری درخت طبقه بندی و رگرسیون (CART) را به منظور برآورد عملکرد TBM ارائه نمودند که در آن هر دو پارامتر مربوط به توده سنگ و ماشین دخیل هستند. رسولی ملکی [۳۲] روش نرخ درزه سنگ (RJR) را با تأکید بر نقش درزه‌ها در عملکرد دستگاه و مبتنی بر داده‌های زمین‌شناختی و عملیاتی جمع‌آوری شده حین حفاری مکانیزه در گروهی از سنگ‌های آذرین و رسوبی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM در سنگ‌های سخت پیشنهاد کرد. مطالعه مشابهی توسط ماجی و تیا [۳۳] برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفر تونل انجام شده است. در این مطالعه از رگرسیون چندمتغیره برای به دست آوردن مدل تجربی بر اساس اطلاعات ۶ پروژه تونل‌سازی استفاده شده و سپس ترکیب این مدل و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارائه هیستوگرام نرخ نفوذ بکار برده شده است. نتایج نشان داد که مقدار نرخ نفوذ محاسبه شده با ترکیب روش احتمالاتی و مدل تجربی نسبت به مقدار متوسط محاسبه شده با مدل تجربی تنها، مقدار نزدیک‌تری به مقدار نرخ نفوذ واقعی تخمین زده است.

تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یک چارچوب منظم برای کمی کردن عدم قطعیت‌های خروجی مدل تهیه می‌کند و با استفاده از آن می‌توان تأثیر پارامترهای ورودی و مدل را بر عدم قطعیت کلی خروجی مدل تعیین کرد. برای توصیف عدم قطعیت یک پارامتر، یک تابع یا یک مدل از مشخصه‌های مختلفی استفاده می‌شود. عدم قطعیت مدل‌ها یا توابع، عموماً از عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در آنها ناشی می‌شود. کامل‌ترین نحوه توصیف یک پارامتر، تعیین تابع توزیع احتمال مربوط به آن پارامتر است. کمیت دیگری که برای توصیف عدم قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد، بازه‌های اطمینان است. یک بازه اطمینان، محدوده‌ای بین دو عدد بوده که مقدار متغیر نامطمئن با احتمال مشخص، داخل آن بازه قرار می‌گیرد.

در طول یک واحد زمین‌شناسی می‌توان با استفاده از مدل‌های تجربی یا نظری، در نقاط مختلف پارامترهای عملکرد ماشین مانند نرخ نفوذ یا نرخ پیشروی را محاسبه کرد، ولی محاسبات، به وجود داده مورد نیاز مدل در هر یک از آن نقاط یا مقاطع بستگی دارد. در پروژه‌های تونل‌سازی مانند پروژه استفاده شده در این تحقیق، برخی از داده‌ها مانند نتایج مطالعات آزمایشگاهی، شاخص کیفیت سنگ و غیره، فقط در بخش‌ها یا نقاط خاصی از تونل انجام گرفته

۲- روش‌های احتمالاتی

به طور کلی تحلیل احتمالاتی در مقابل تحلیل قطعی مطرح می‌شود. اغلب پدیده‌هایی که در زندگی ما اتفاق می‌افتند، دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که قادر به پیش‌بینی آنها نیستیم؛ بدین صورت که پارامترهای مختلف در مکان و یا زمان‌های متفاوت دارای فراوانی‌های متفاوتی بوده و لذا خروجی‌های چندگانه و بدون هیچ الگوی مشخصی با عباراتی همچون شانس و یا احتمال بیان می‌شوند [۳۴]. مورگنسترن [۳۵] عدم قطعیت‌های موجود در ژئوتکنیک را به سه گروه عمده تقسیم‌بندی نموده است:

- عدم قطعیت پارامتری
- عدم قطعیت انسانی
- عدم قطعیت مدل‌سازی

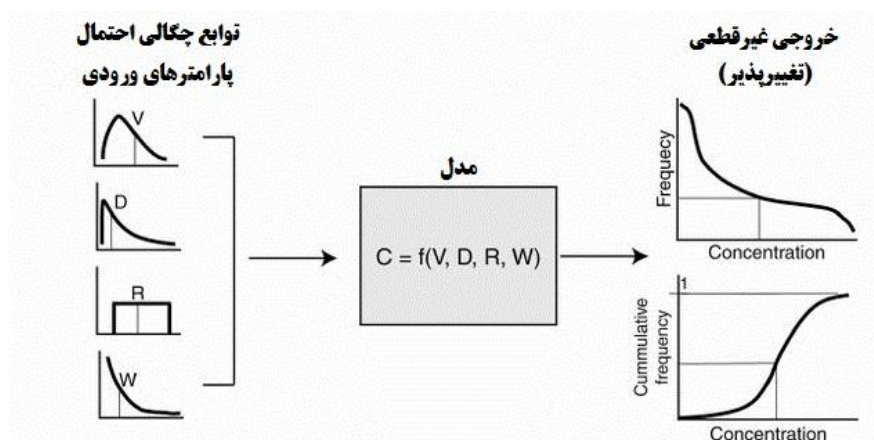
عدم قطعیت پارامتری عبارت است از عدم قطعیت در داده‌های ورودی تحلیل، عدم قطعیت مدل‌سازی، ناشی از محدودیت تئوری‌ها و مدل‌های مورد استفاده جهت پیش‌بینی عملکرد یک سازه ژئوتکنیکی بوده و عدم قطعیت انسانی مربوط به خطاها و اشتباهات انسانی می‌شود. به دلیل وقوع حتمی عدم قطعیت در تمام مسائل ژئوتکنیک، خروجی تحلیل همه آنها نیز دارای عدم قطعیت است.

عوامل رایج عدم قطعیت در مهندسی سنگ شامل متغیر بودن زمانی و مکانی خواص سنگ، خطاهای اتفاقی و سیستماتیک در برداشت داده‌ها، آزمایش و رفتارسنجی، ساده‌سازی مدل‌های عددی و تحلیلی و همچنین حذفیات و خطاهای انسانی است. از این رو روش مناسب برای مقابله با عدم قطعیت، ارزیابی و مدیریت خطرات مربوط

به عدم قطعیت بوده، و در نظر گرفتن این میزان عدم قطعیت در فرآیند تصمیم‌گیری ضروری است. امروزه از مفاهیم آماری و احتمالاتی برای تشریح و توصیف تغییرپذیری پارامترهای ورودی انتخاب شده استفاده می‌کنند. در روش‌های رایج برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سنگ معمولاً از مقدار میانگین پارامترها استفاده می‌شود. حتی تحت بهترین شرایط نیز مقدار میانگین بهترین نماینده این پارامترها نیست. بنابراین با توجه به تغییرات ذاتی پارامترهای ژئومکانیکی، ضروری است که توزیع این پارامترها لحاظ شود. لذا روش‌هایی در طراحی که مساله عدم قطعیت‌ها و برآیند آنها را در نظر بگیرند، بسیار با ارزش هستند [۳۶].

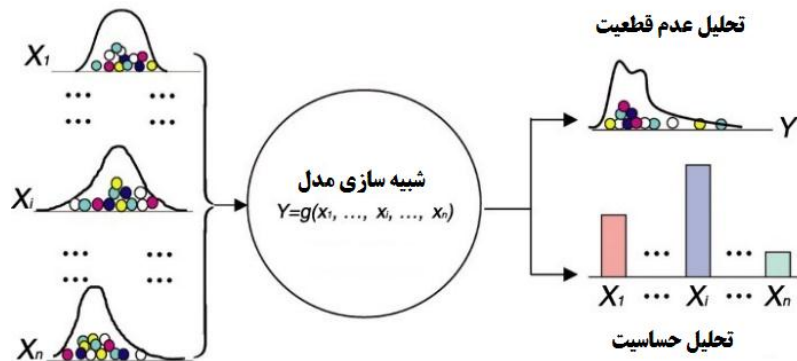
شکل ۱ یک طرح از روش تحلیل احتمالاتی را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای ورودی به صورت تابع توزیع بوده و پس از جایگذاری در مدل ریاضی، خروجی نیز به صورت تابع توزیع بدست آمده است [۳۴].

از روش‌های احتمالاتی می‌توان روش‌های تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و روش شبیه‌سازی مونت کارلو را نام برد. روش‌های تخمین نقطه‌ای و سری تیلور بیشتر در مسائل مربوط به پایداری سطوح شیب‌دار استفاده شده و در مسائل پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تونل مورد استفاده قرار نگرفته است. در بیشتر مسائل ژئوتکنیک، برای پارامترهای سنگ و خاک تابع توزیع احتمال نرمال و لاگ‌نرمال فرض می‌شود؛ اما در واقعیت، شاید پارامترها از توابع توزیعی پیروی کنند که در روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور نمی‌توان از آنها استفاده کرد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو در تخمین نرخ نفوذ و سرعت پیشروی



شکل ۱. طرح روش احتمالاتی [۳۷]

Fig. 1. Probabilistic method design [37]



شکل ۲. چارچوب کلی محاسبه عدم قطعیت با روش شبیه سازی مونت کارلو [۴۰]

Fig. 2. Uncertainty evaluation framework using Monte Carlo method [40]

گام ۳: بدست آوردن توابع چگالی احتمال کمیت خروجی

گام ۴: تعیین عدم قطعیت پارامتر هدف

چارچوب کلی محاسبه عدم قطعیت به روش شبیه سازی مونت کارلو در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۳- مدل های پیش بینی عملکرد TBM

در طول چند دهه گذشته مدل های مختلفی جهت ارزیابی عملکرد ماشین حفاری معرفی و توسعه داده شده اند تا بتوانند یکی از شاخص های ارزیابی عملکرد ماشین را با یک یا چند پارامتر ماشین و یا شرایط زمین مرتبط نمایند. تاکنون محققان زیادی مدل های تجربی و نظری برای پیش بینی عملکرد ماشین ارائه دادند. مدل هایی که در این مطالعه برای محاسبه نرخ پیشروی استفاده شده اند، در ادامه تشریح می شوند.

۳-۱- مدل Q_{TBM}

مدل Q_{TBM} بر اساس نگارش جدیدی از سیستم رده بندی Q توسط بارتن در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شده است. در واقع وی با اضافه نمودن پارامترهایی که در عملکرد ماشین مؤثر هستند، پارامتر جدیدی به نام Q_{TBM} را معرفی نمود که با پارامتر نرخ نفوذ ماشین مرتبط است. رابطه (۱)، ارتباط بین پارامترهای مختلف با Q_{TBM} را نشان داده و رابطه نرخ نفوذ نیز به صورت رابطه (۲) است [۱۹]:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \cdot \frac{J_f}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

$$\frac{SIGMA}{F^{10} / 20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma_\theta}{5}$$

۲-۱ روش شبیه سازی مونت کارلو

عبارت مونت کارلو یک واژه بسیار عمومی است. روش هایی که در این گروه قرار می گیرند، از فنون آمار و احتمالات استفاده می کنند. این روش در همه علوم از فیزیک هسته ای گرفته تا ژنتیک و اقتصاد، کاربرد پیدا کرده است. روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می کند. از طرف دیگر روش مونت کارلو یک طبقه از الگوریتم های محاسبه گر است که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه گیری های تکرار شونده تصادفی اتکاء می کند. روش شبیه سازی مونت کارلو ابتدا توسط متروپولیس، اولام و نویمان در سال ۱۹۴۹ برای تشریح پتانسیل برهم کنش مولکول های ترکیبات گازی اورانیوم استفاده شده در ساخت بمب اتم در خلال جنگ جهانی دوم (پروژه منهتن) استفاده شد [۳۸].

گام های اساسی در روش شبیه سازی مونت کارلو به شرح زیر است [۳۹]:

گام ۱: تعریف مدل ریاضی

گام ۲: اختصاص توابع چگالی احتمال به کمیت های ورودی

در رابطه (۳)، که منحنی نفوذ نرمال شده نیز نامیده می‌شود، i_0 نرخ نفوذ پایه برحسب میلی‌متر بر دور کله حفار، M_{ekv} نیروی رانش معادل بر حسب کیلونیوتن بر کاتر، M_1 نیروی پیشران بحرانی است، که طبق تعریف نیرویی است که برای ایجاد یک میلی‌متر نفوذ در سنگ لازم است. این پارامتر و ضریب ثابت نفوذ (b) به فاکتور خردشدگی معادل وابسته هستند. در رابطه (۴)، $ks-tot$ فاکتور خردشدگی کل، k_{por} فاکتور تصحیح تخلخل و k_{DRI} فاکتور شاخص نرخ پالخوری است. در رابطه (۵)، MB نیروی پیشران متوسط اعمال شده بر روی هر کاتر، K_d ضریب تصحیح برای قطر دیسک کاتر و K_a ضریب تصحیح برای فاصله‌داری متوسط دیسک کاترها است. برای تعیین دو ضریب تصحیح مورد نظر، RPM سرعت چرخش کله حفاری بر حسب دور بر دقیقه و $kRPM$ فاکتور تصحیح برای RPM است.

۳-۳- مدل CSM

نگارش اولیه این مدل توسط اوزدمیر [۶] و اوزدمیر و میلر [۴۲] در مدرسه معدن کلرادو ارائه شد. این محققین با در نظر گرفتن اثر فاصله‌داری دیسک کاترها و میزان نفوذ دیسک کاتر در سنگ و با فرض تشکیل تراشه‌ها بر اثر گسیختگی برشی در مجاورت دیسک کاترها، مدلی نظری را برای پیش‌بینی نیروهای برش در دیسک کاترهای V شکل، توسعه دادند. در واقع این مدل روابطی را برای تخمین نیروی مورد نیاز برای نفوذ دیسک کاتر (با ویژگی‌های هندسی مشخص) در سنگ با یک نرخ ثابت ارائه می‌دهد. این مدل در دهه ۹۰ توسط رستمی و اوزدمیر [۴۳] به روز گردید. روابط ارائه شده، توسط رستمی [۴۴] با فرض استفاده از کاترهای با سطح مقطع ثابت و بر اساس وقوع گسیختگی کششی در سنگ توسعه داده شده‌اند. در این مدل برای تعیین حداکثر نرخ نفوذ ماشین در سنگ با ویژگی‌های مشخص، از یک روش آزمون و خطا استفاده می‌شود که در آن پارامترهای ماشین (گشتاور، نیروی پیشران و غیره) برای یک مقدار مشخص از نرخ نفوذ در سنگ تخمین زده می‌شود و آنقدر مقدار این نرخ نفوذ در روابط تغییر داده می‌شود تا ظرفیت توان و نیروی پیشران ماشین به طور کامل استفاده شود. بر اساس این مدل نیروی کل یا برآیند نیروهای عمودی و غلتشی از رابطه (۷) بدست می‌آید [۴۳]. رابطه (۹) بر اساس مطالعات رستمی [۴۴] به دست آمده است.

$$PR(m/hr) = 5(Q_{TBM})^{-0.2} \quad (2)$$

در رابطه (۱)، RQD_0 مقدار RQD در جهت موازی با محور تونل، J_r عدد معرف زبری درزه، J_a عدد معرف هوازدگی درزه، J_w عدد معرف جریان آب در درزه، S_{RF} ضریب کاهش تنش، $SIGMA$ مقاومت توده‌سنگ پارامتر F متوسط بار کاتر (برحسب تن-نیرو)، CLI شاخص عمر کاتر، q محتوای کوارتز به درصد و σ_θ تنش دو جانبه ایجاد شده سینه‌کار تونل (بر حسب مگاپاسکال) است که نسبت به عمق ۱۰۰ متر نرمالیزه شده است.

۲-۲- مدل NTNU

در میان روش‌های تجربی، مدل $NTNU$ کامل‌ترین و پرکاربردترین مدل برای تخمین عملکرد ماشین‌های سنگ سخت محسوب می‌شود. اولین نگارش این مدل در سال ۱۹۷۹ در مؤسسه علوم و فناوری نروژ ارائه شد [۱۴] و تا سال ۱۹۹۸ با توجه به تکمیل شدن داده‌های بانک اطلاعاتی مربوطه توسط محققین مختلف، مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت. آخرین بروزرسانی این مدل در سال ۲۰۱۶ توسط ماسیاس [۴۱] ارائه شد. فلسفه مدل $NTNU$ دستیابی به پیش‌بینی‌های قابل اعتماد با ترکیب ویژگی‌های سنگ مربوطه و پارامترهای دستگاه است. در این مدل کلیه پارامترهای مربوط به توده‌سنگ در قالب یک پارامتر با نام فاکتور خردشدگی معادل یا K_{ekv} و کلیه پارامترهای مربوط به ماشین در قالب یک پارامتر تحت عنوان نیروی رانش معادل یا M_{ekv} با هم ترکیب می‌شوند. رابطه (۳)، رابطه اصلی مدل $NTNU$ است، که از تحلیل تعداد زیادی آزمون نفوذ کله حفار به دست آمده است. فاکتور خردشدگی معادل با رابطه (۴) و نیروی پیشران معادل با رابطه (۵) قابل محاسبه هستند. پس از محاسبه نرخ نفوذ پایه (i_0)، نفوذ خالص (I_0) بر حسب متر بر ساعت از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۴۱]:

$$i(mm/rev) = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1}\right)^b \quad (3)$$

$$K_{ekv} = K_{s-tot} \cdot K_{DRI} \cdot K_{por} \quad (4)$$

$$M_{ekv} = M_B \cdot K_a \cdot K_d \quad (5)$$

$$I_0 = i_0 \cdot RPM \cdot \frac{60}{1000} \cdot k_{rpm} \quad (6)$$

۱- محاسبه نیروی پیشران مورد نیاز

$$T_h^* = \sum_1^N F_n = NF_n \quad (14)$$

۲- محاسبه گشتاور کل

$$T_q^* = \sum_1^N F_{ri} \cdot R = 0.3 D_{TBM} \cdot N \cdot F_r \quad (15)$$

۳- محاسبه سرعت دوران کله حفاری

$$RPM = \left(\frac{V}{\pi \cdot D_{TBM}} \right) \quad (16)$$

۴- محاسبه توان مورد نیاز

$$HP^* = \frac{T_q \cdot RPM}{K} \quad (17)$$

۵- گشتاور و توان نهایی نصب شده با مشخص بودن راندمان مکانیکی ماشین (η) به دست می‌آید:

$$Th = Th^* / \eta \quad (18)$$

D_{TBM} قطر ماشین، N_{TBM} تعداد دیسک کاترها و V محدوده سرعت خطی دیسک کاترها هستند. همچنین η ضریب راندمان مکانیکی ماشین و K ضریب تبدیل گشتاور به اسب بخار یا کیلووات است.

مهمترین محدودیت این مدل، عدم در نظر گرفتن ویژگی های

$$Ft = \int_0^\phi T \cdot R \cdot P_r \cdot \left(\frac{\theta}{\phi} \right)^\psi \quad (7)$$

$$d\theta = \frac{T \cdot R \cdot P^0 \cdot \phi}{1 + \psi} \quad (8)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R - P}{R} \right) \quad (9)$$

$$P = \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\phi \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \quad (9)$$

R شعاع برش دهنده، T عرض لبه برش دهنده و Ψ ثابت توزیع فشار که بین ۰/۲ تا ۰/۲- متغیر است. ϕ زاویه تماس بین سنگ و برش دهنده، P_0 فشار پایه در زون خردشده در نقطه ای دقیقا زیر کاتر، p میزان نفوذ کاتر در سنگ بر حسب میلیمتر بر دور کله حفار، σ_c مقاومت فشاری، σ_t مقاومت کششی، S فاصله‌داری برش دهنده و C در حدود ۲/۱۲ است. پس از محاسبه Ft و ϕ ثابت کاتر با رابطه (۱۰)، نیروی عمودی با رابطه (۱۱) و غلتشی با رابطه (۱۲) قابل محاسبه هستند:

$$C_c = \frac{F_r}{F_n} \quad (10)$$

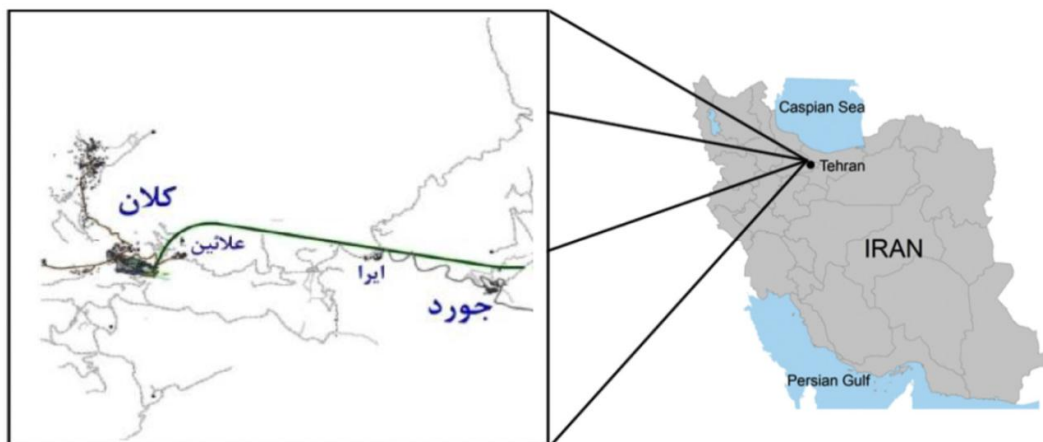
$$F_n = F_t \cos \beta \quad (11)$$

$$F_r = F_t \sin \beta \quad (12)$$

$$\frac{F_r}{F_n} = \tan \beta = \tan \left(\frac{\phi}{2} \right) \quad (13)$$

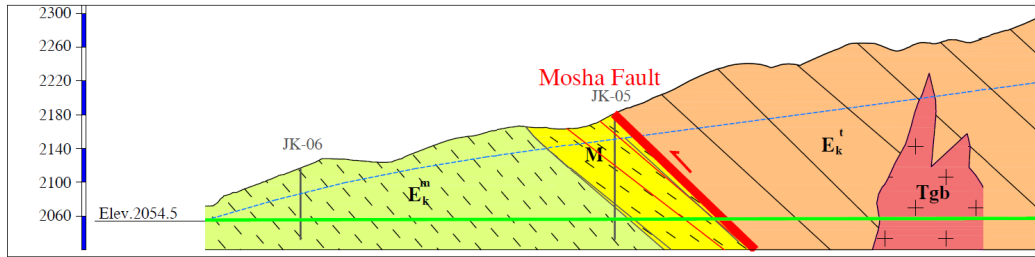
در این مدل گام های زیر برای پیش بینی عملکرد TBM دنبال

می‌شود [۴۵]:



شکل ۳. مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان

Fig. 3. Trajectory of 2nd lot of Laar-Kalan water conveyance tunnel



شکل ۴. پروفیل واحدهای زمین‌شناسی حفر شده

Fig. 4. Profiles of excavated geological units

لار-کلان در مجاورت نیروگاه و روستای کلان می‌یابد (شکل ۳). این قطعه از تونل ۷۴۹۲ متر طول داشته و روند کلی آن شرقی-غربی است. قطر حفاری و تمام شده تونل ۴/۵ و ۳/۸ متر با مقطع دایره‌ای شکل است. طرحی از پروفیل تونل برای واحدهای زمین‌شناسی که حفاری در آنها انجام شده، در شکل ۴ نمایش داده شده است. محدوده مورد مطالعه (مقطع تونل)، شامل واحدهای سنگی شامل سنگ‌های رسوبی تخریبی و بعضاً شیمیایی و بیوشیمیایی، سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های آذرین است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در

درزه‌داری توده سنگ در روابط توسعه یافته است. این محدودیت توسط برخی محققین دیگر نظیر چیما [۴۶]، یاگیز [۴۵] و رمضان زاده [۱۵] نیز مطالعه شده و تصحیحاتی بر روی مدل اعمال شده است.

۴- مطالعه موردی

قطعه دوم تونل انتقال آب لار-کلان، از دره جورد واقع در شمال شرقی روستای جورد آغاز شده و تا بخش انتهایی تونل انتقال آب

جدول ۱. توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی موجود در محدوده مورد مطالعه

Table 1. Descriptions of engineering geological units

واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد زمین‌شناسی	توصیف	مقاومت
SSCT	Pefnsc	Sandy Silty Clayey Tuff	Medium
LP	Ts	Leucocratic Plutonic Rocks	Strong To Very Strong
GT	Ekt	Green Tuff And Tuffaceous Shale	Medium
MP	Tgb	Melanocratic Plutonic Rocks	Weak
MSC	M	Marl, Sandstone, Siltstone	Weak
KTM	Ekm	Green Tuff, Marly Tuff	Medium
Cr	-	Crushed Zone	Very Weak
Qt	Q	Gravel, Sand, Silt, Clay	Very Weak

جدول ۲. مشخصات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی واحدهای سنگی مسیر تونل

Table 2. Geological and geotechnical properties of rocks

واحد زمین‌شناسی	Range	σ_0 (MPa)	UCS (MPa)	qu (%)	DRI	CLI	Q	RQD	γ (gr/cm ³)	Porosity (%)
Ekm	Min	۴/۹۶	۱۲/۱۶	۵	۴۵	۷۵	۰/۱۵	۲۵	۲/۲۹	۷/۸
	Max	۰/۶۹	۴۵/۷	۱۵	۵۵	۱۰۰	۱/۶	۷۰	۲/۷۷	۱۲/۱
	Ave	۳/۷۲	۲۲/۷۷	-	-	-	۰/۴	۵۰	۲/۴۸	۹/۷
M	Min	۶/۷۵	۱۴/۰۷	۱۰	۴۵	۵۰	۰/۱	۲۰	۲/۲۵	۴/۷۶
	Max	۶/۱۸	۵۰/۴۳	۲۰	۶۵	۸۰	۱/۸	۶۵	۲/۸۵	۸/۸۸
	Ave	۶/۶۷	۲۰/۹۹	-	-	-	۰/۲۵	۳۵	۲/۵۸	۶/۰۵
Tgb	Min	۹/۳۲	۲۷/۳۱	۰	۳۳	۱۱	۰/۲۵	۲۵	۲/۶	۲/۴۸
	Max	۹/۶۸	۵۱/۷۷	۵	۴۵	۲۲	۴	۸۵	۲/۸۳	۳/۸۸
	Ave	۹/۶۳	۳۴/۵۶	-	-	-	۰/۷	۵۵	۲/۷۵	۳/۱
Ekt	Min	۲۰/۰۸	۳۵	۵	۴۵	۷۵	۰/۱	۲۰	۲/۳۷	۱/۳
	Max	۷/۷۳	۹۴/۴	۱۵	۷۵	۱۰۰	۱/۵	۷۰	۲/۶۵	۱۰/۷
	Ave	۱۲/۵۶	۶۲/۰۶	-	-	-	۰/۲۵	۴۰	۲/۵۱	۶/۷۳

آب لار-کلان در جدول ۳ ارائه شده است.

۵- تخمین نرخ پیشروی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

همان‌طور که بیان شد، گام اول در روش شبیه‌سازی مونت کارلو تعیین تابع توزیع احتمال برای پارامترهای ورودی مدل‌ها است. با توجه به موجود بودن حداکثر سه مقدار (حداکثر، حداقل و در برخی موارد محتمل‌ترین مقدار) برای برخی پارامترها همچون Q ، UCS و غیره و نبود جزئیات در طول کل تونل، نمی‌توان به طور صریح بیان کرد که این نوع پارامترها از چه نوع تابع توزیع احتمالی پیروی می‌کنند. بدین منظور از دو تابع توزیع احتمال پرت و یکنواخت برای بیشتر پارامترهای محیط استفاده شده است که برای تعریف آن‌ها می‌توان از مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین (مختص توزیع پرت) استفاده کرد اما بهره‌گیری از توابع توزیع احتمال دیگر مستلزم وجود داده‌های تفصیلی‌تر برای محاسبه پارامترهای ورودی می‌باشد. بنابراین، برای پارامترهای شامل سه مقدار حداقل، حداکثر و میانگین، تابع توزیع احتمال پرت و برای پارامترهای دارای دو مقدار حداقل و حداکثر، تابع توزیع احتمال یکنواخت در نظر گرفته شد. نمودار مربوط به این توابع توزیع احتمال در شکل ۵ نمایش داده شده است. همچنین بر اساس اطلاعات ثبت شده از پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین حفار در واحدهای زمین‌شناسی حفر شده، در محاسبه نرخ پیشروی در این مطالعه، برای سه پارامتر نیروی پیشران، دور کله حفاری و ضریب بهره‌وری از مقادیر ثبت شده در واحدهای مختلف، استفاده شده و با نرم‌افزار Easyfit، تابع توزیع احتمال این پارامترهای برای واحدهای مختلف مشخص شده و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

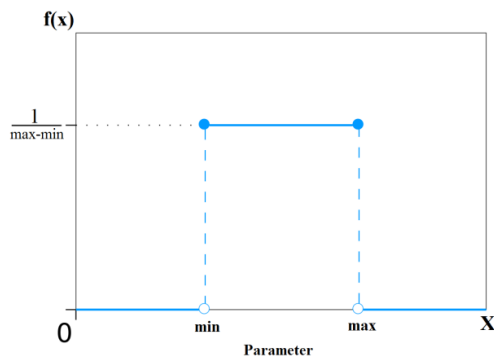
جدول ۳. مشخصات ماشین حفر تونل

Table 3. Tunnel boring machine characteristics

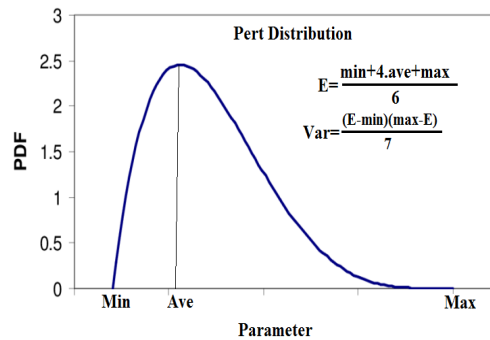
پارامتر	مقدار
قطر ماشین حفار (متر)	۴/۵۳
قطر کاتر دیسک (میلیمتر)	۴۳۲
فاصله داری کاترها (میلیمتر)	۷۵
توان (وات)	۱۱۲۰
آر پی ام	۱۲
گشتاور (کیلو نیوتن متر)	۸۰۲
نیروی تراست (کیلو نیوتن)	۱۸۰۰۰

مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن مقیاس نقشه، از نظر زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه شامل ۶ واحد است. بر اساس بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته و با در نظر گرفتن وجود واحدهای سنگی موجود در مسیر حفاری تونل، ۸ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تشخیص است. توصیف کلی این واحدها را جدول ۱ می‌توان دید. برداشت‌های زمین‌شناسی و مطالعات آزمایشگاهی در واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل انجام شده که نتایج برای پارامترهای مختلف در جدول ۲ آمده است. مقایر پارامترهای DRI، CLI و محتوای کوارتز به دلیل انجام نشدن آزمایش‌های مربوطه در تونل مورد مطالعه، از روی مطالعات انجام شده (برای مثال [۴۷] و [۴۸]) بر روی تونل‌هایی که تا حدودی زمین‌شناسی مشابه با تونل مورد مطالعه داشتند، برداشت شده است.

نوع ماشین مورد استفاده برای حفاری این تونل از نوع ماشین حفار تمام مقطع تلسکوپی است. این نوع از ماشین‌ها بسیار کاربردی بوده و معمولاً در مواقعی که شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل متغیر است، بکار می‌روند. مشخصات ماشین مورد استفاده در قطعه ۲ تونل انتقال



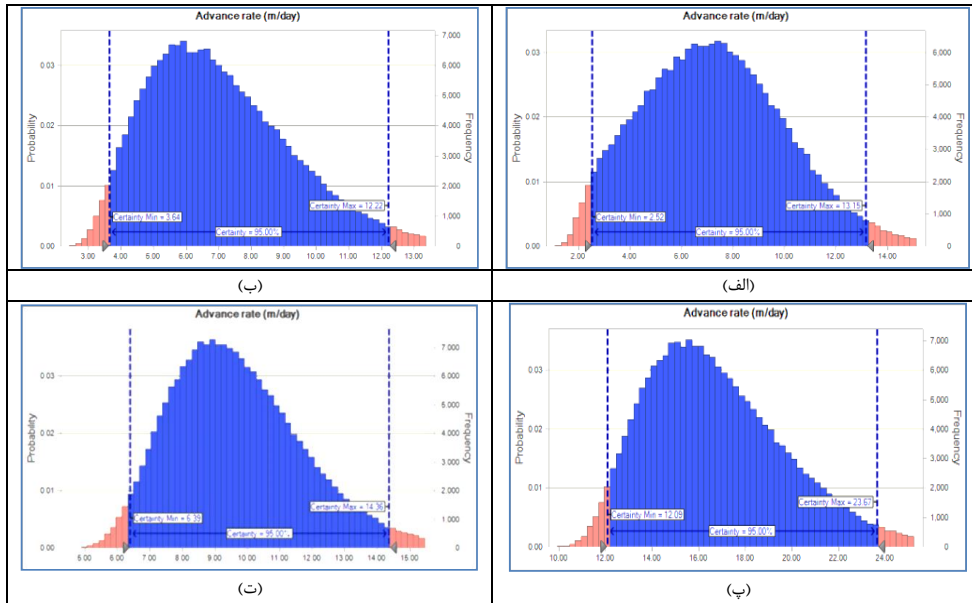
(ب)



(الف)

شکل ۵. الف) تابع توزیع احتمال پرت، ب) تابع توزیع احتمال یکنواخت

Fig. 5. a) Pert distribution function, b) Uniform distribution function



شکل ۶: نتایج مدل QTBM برای الف) واحد Ekm، ب) واحد M، پ) واحد Tgb، ت) واحد Ekt

Fig. 6. QTBM model results for a) Ekm, b) M, c) Tgb, d) Ekt

تمامی مدل‌های استفاده شده در این مطالعه، بعد از محاسبه نرخ نفوذ با روابط هر یک از مدل‌ها، نرخ پیشروی (AR) با استفاده از رابطه $AR(m/day) = 24PR(m/h)U(\%)$ (۱۹)

اوزدمیر [۶] محاسبه شده است:

نتایج به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل Q_{TBM} در جدول ۵ و شکل ۶ ارائه شده است.

برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو از نرم‌افزار Crystal ball Oracle استفاده شده است. این نرم‌افزار یک افزونه بوده که بر روی نرم‌افزار اکسل قرار می‌گیرد. نحوه کار با این نرم‌افزار به این صورت است که توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل‌ها در سلول‌ها مشخص شده، رابطه مدل در سلول دیگر نوشته شده و با اجرای شبیه‌سازی نتایج برای پارامتر هدف به صورت هیستوگرام‌هایی نمایش داده می‌شود.

۵-۱- مدل Q_{TBM}

در بیشتر پروژه‌های تونل‌سازی، مغزه‌گیری از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، معمولاً در راستای عمود بر محور تونل انجام شده و به ندرت در راستای محور تونل انجام می‌شود. در این پروژه نیز به دلیل انجام نشدن این نوع مغزه‌گیری، در محاسبه نرخ پیشروی با مدل Q_{TBM} از Q معمولی که در آن RQD از مغزه‌گیری در راستای عمود بر محور تونل انجام شده، استفاده شده است. همچنین در

جدول ۴. تابع توزیع احتمال پارامترهای عملیاتی ماشین

Table 4. Probabilistic distribution functions of TBM operational parameters

واحد زمین‌شناسی	U	آر پی ام	نیروی تراست (کیلونیوتن)
Ekm	Triangular(11.7,0.32,16.78)	Gamma(9.056,0.34)	Weibull(16.612,125.48,-23.72)
M	Uniform(0.15,0.24)	Uniform(2.3,4.2)	Uniform(61.11,91.33)
Tgb	0.21	5	130.86
Ekt	Uniform(0.18,0.24)	Uniform(3.4,4)	Uniform(75.99,95.28)

۵-۲- مدل NTNU

در مدل NTNU ابتدا بر اساس شیب و جهت شیب درزه‌های موجود در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، فاکتور خردشدگی کل محاسبه شده و نتایج در جدول ۶ ارائه شده است. در مدل NTNU، برخی از پارامترها همچون فاکتور تصحیح تخلخل، شاخص حفرپذیری (DRI)، نیروی پیشران بحرانی و ضریب ثابت b

جدول ۵. نتایج نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل QTBM
Table 5. Advance rates obtained using QTBM model

واحد زمین‌شناسی	میانگین (متر بر روز)	انحراف استاندارد	۹۵ درصد قطعیت (متر بر روز)
Ekm	۷/۲۸	۲/۷۹	۲/۵۲-۱۳/۱۵
M	۷/۰۶	۲/۲۵	۳/۶۴-۱۲/۲۲
Tgb	۱۶/۷۷	۳/۰۲	۱۲/۰۹-۲۳/۶۷
Ekt	۹/۷۱	۲/۰۵	۶/۳۹-۱۴/۳۶

معادل ۳/۵ بوده و در واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل به دلیل تخلخل و درزه‌داری بالا، مقدار محاسبه شده برای این پارامتر در بیشتر واحدهای مسیر تونل از مقدار مجاز مدل بیشتر شده و برای اینکه بتوان ادامه محاسبات را انجام داد از مقدار جایگزین یعنی همان مقدار حداکثر و مجاز مدل برای بیشتر واحدها استفاده شده است.

همچنین رابطه بین نیروی پیشران بحرانی و ضریب ثابت b با فاکتور خردشدگی معادل از روی نمودارها استخراج شد. روابط استخراجی را در جدول ۹ می‌توان دید. همچنین مقدار K_{RPM} در این مطالعه برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

با استفاده از روابط استخراج شده و توابع توزیع احتمال پارامترها، شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انجام شده و نتایج به دست آمده برای مدل $2NTNU$ در جدول ۱۰ و شکل ۷ ارائه شده است.

۵-۳- مدل CSM

جدول ۶. وضعیت ناپیوستگی‌ها و فاکتور خردشدگی در هر دسته برای واحدهای زمین‌شناسی
Table 6. Discontinuities and fracturing factors for different geological units

واحد زمین‌شناسی	ناپیوستگی‌ها	آزیموت (درجه)	α (درجه)	فاصله داری ناپیوستگی‌ها (سانتی متر)	کلاس شکستگی	فاکتور خرد شدگی ks	فاکتور خرد شدگی ks-total
KTM	B	۲۰۴	۹/۳۹	۲۵/۶	۵	۰/۸۸	۲/۸۸
	J1	۲۰۴	۴۳/۹۵	۲۹/۲	۵	۱/۴	۲/۸۸
	J2	۲۰۴	۱۶/۶۴	۳۴/۶	۴	۰/۶۴	۲/۸۸
	J3	۲۰۴	۵۱/۹۴	۴۹	۴	۰/۹۲	۲/۸۸
MSC	J4	۲۰۴	۴/۵	۱۰۷/۵	۳	۰/۴۸	۲/۸۸
	B	۲۰۴	۳۹/۸۸	۳۴/۶	۴	۰/۹۶	۱/۸
	J1	۲۰۴	۴۶/۴	۷۶	۳	۰/۷	۱/۸
MP	J2	۲۰۴	۱۵/۰۱	۹۵	۳	۰/۵۱	۱/۴۲
	J3	۲۰۴	۵۳/۵۵	۱۱۲	۳	۰/۷۱	۱/۴۲
	J1	۲۳۰	۳۴/۳۹	۴۹	۴	۰/۸۸	۱/۴۲
GT	J2	۲۳۰	۴۹/۰۳	۷۶	۳	۰/۷۲	۱/۴۲
	J3	۲۳۰	۵۳/۳	۱۳۰	۲	۰/۵۴	۱/۴۲
	B	۲۳۰	۲۱/۹۱	۲۱/۲	۵	۱/۰۸	۲/۴۴
	J1	۲۳۰	۸۰/۹۴	۳۷/۳	۴	۰/۸	۲/۴۴
GT	J2	۲۳۰	۴۱/۹۶	۵۸	۴	۰/۹۸	۲/۴۴
	J3	۲۳۰	۲۱/۰۷	۱۰۳	۳	۰/۵۶	۲/۴۴
GT	J4	۲۳۰	۱۸	۱۲۱	۲	۰/۴۶	۲/۴۴

از روی نمودارهای بر حسب پارامترهای وابسته محاسبه می‌شوند. جزئیات کلی این نمودارها در منبع [۴۱] موجود است. از آنجایی که در این مطالعه برخی پارامترها به صورت تابع توزیع احتمال هستند، بنابراین رابطه پارامترهای از روی نمودارها، می‌بایست استخراج شود. رابطه استخراج شده برای فاکتور تصحیح تخلخل به صورت رابطه

$$K_{por} = 0.774401 + 0.0875975 \times (Porosity(\%))^{1.45} \quad (20)$$

(۲۰) است:

رابطه فاکتور تصحیح DRI بر اساس فاکتور خردشدگی کل از روی نمودار استخراج و برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در جدول ۷ آمده است. بر اساس روابط استخراجی با اجرای شبیه‌سازی مونت کارلو، فاکتور خردشدگی معادل محاسبه شده و نتایج در جدول ۸ ارائه شده است. در مدل $NTNU$ حداکثر مقدار فاکتور خردشدگی

جدول ۷. رابطه بین DRI و kDRI
Table 7. Relationship between DRI and Kdri

رابطه	R ²	RMSE	k _s -total	واحد زمین شناسی
kDRI=1.44+2.57.DRI-0.45	۹۹/۶۲	۰/۰۰۷	۲/۸۸	Ekm
kDRI=-1.44+1.37.DRI-0.15	۹۹/۹۲	۰/۰۰۵	۱/۸	M
kDRI=-1.054+0.94.DRI0.2	۹۹/۸۸	۰/۰۰۷	۱/۴۳	Tgb
kDRI=0.28+0.2.DRI-0.32	۹۹/۸	۰/۰۰۵	۲/۴۴	Ekt

جدول ۸. فاکتور خردشدگی معادل برای واحدهای زمین شناسی

Table 8. Equivalent fracturing factor (keqv) for different geological units

واحد زمین شناسی	keqv	keqv در نظر گرفته شده	تابع توزیع احتمال
Ekm	۷/۰۹-۱۱/۸۸	۳/۵	-
M	۲/۸۵-۵/۳۶	۲/۸۵-۳/۵	Beta(۱/۸۶,۳/۹۶)
Tgb	۱/۳۵-۱/۸۷	۱/۳۵-۱/۸۷	-
Ekt	۲/۱۶-۹/۳۶	۲/۱۶-۳/۵	Beta(۱/۴۲,۳/۸)

جدول ۹. رابطه بین فاکتور خردشدگی معادل با M1 و b

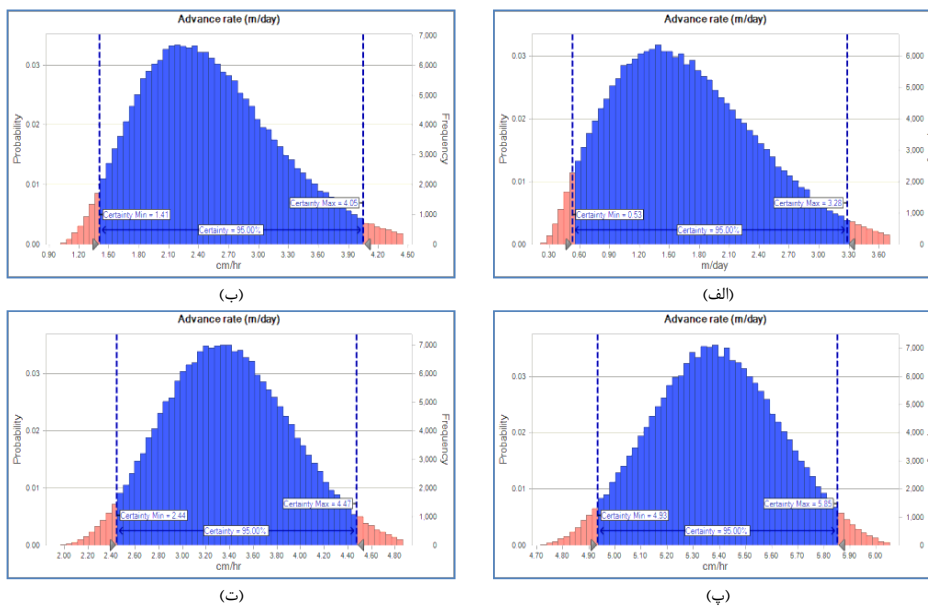
Table 9. Relationship between keqv, M1 and b

R ²	RMSE	رابطه
۹۹	۷/۵۵	M1=-19.48+111.91.keqv-0.54
۹۹/۵۷	۰/۰۷	b=-0.916+1.011.keqv ^{-0.72}

جدول ۱۰. نتایج نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل NTNU

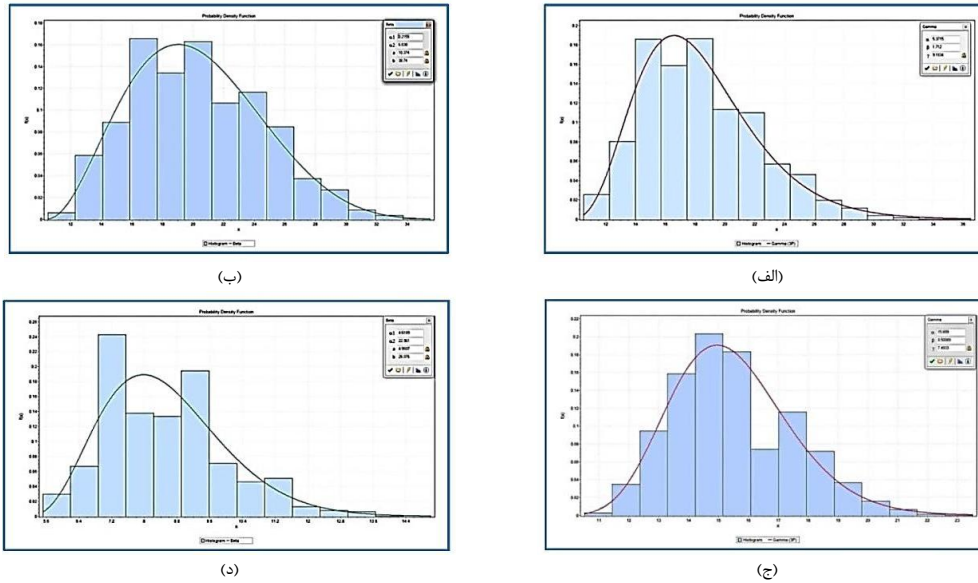
Table 10. Advance rates obtained using NTNU model

واحد زمین شناسی	میانگین (متر بر روز)	انحراف استاندارد	۹۵ درصد قطعیت (متر بر روز)
Ekm	۱/۶۸	۰/۷۲	۰/۵۳-۳/۲۸
M	۲/۵۲	۰/۶۹	۱/۴۱-۴/۰۵
Tgb	۵/۳۸	۰/۲۴	۴/۹۳-۵/۸۵
Ekt	۳/۳۹	۰/۵۳	۲/۴۴-۴/۴۷



شکل ۷. نتایج مدل NTNU برای الف) واحد Ekm، ب) واحد M، پ) واحد Tgb، ت) واحد Ekt

Fig. 7. NTNU model results for a) Ekm, b) M, c) Tgb, and d) Ekt



شکل ۸. تابع توزیع احتمال نرخ نفوذ پایه برای واحدهای الف) Ekm، ب) واحد M، پ) واحد Tgb، ت) واحد Ekt
Fig. 8. Probabilistic distribution functions of advance rate for a) Ekm, b) M, c) Tgb, d) Ekt
 ۶- مقایسه نتایج مدل‌ها

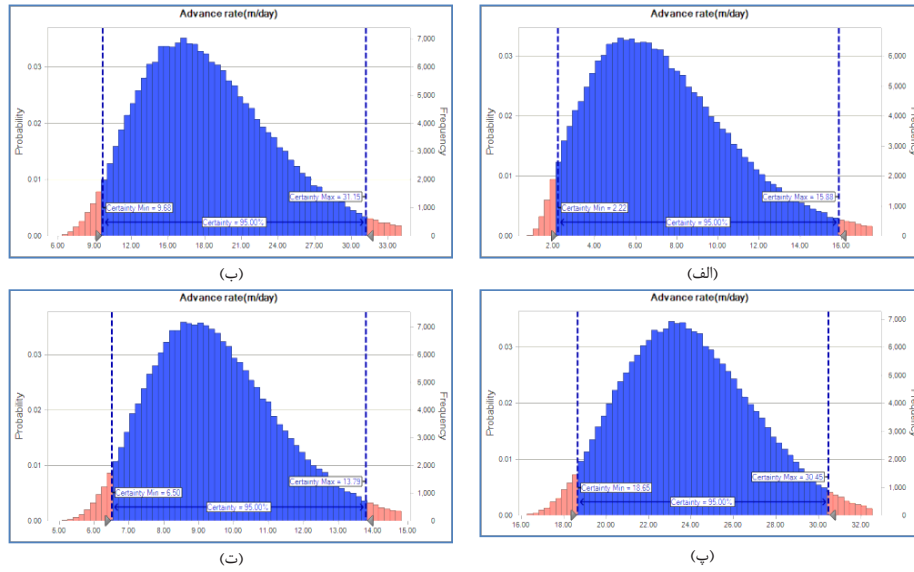
در بین مدل‌های استفاده شده، مدل Q_{TBM} تعداد پارامتر بیشتری داشته که تمامی این پارامترها دارای تابع توزیع احتمال بودند و در مدل NTNU فقط تداخل دارای تابع توزیع احتمال بود. نتایج مدل‌های بکار گرفته شده برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. نمودارهای ستونی مربوط به مدل‌ها، بر اساس مقدار بازه ۹۵ درصد قطعیت که برای هر یک مدل‌ها محاسبه شده بود، رسم شده‌اند. مقدار واقعی نمایش داده شده در نمودارها، بر اساس نرخ پیشروی حداقل و حداکثر در هر واحد رسم شده است. بازه نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل NTNU در تمامی واحدهای زمین‌شناسی بسیار کمتر از بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی است. واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل هم دارای سنگ‌هایی با تداخل بالا و همچنین تعداد دسته درزه زیاد بودند که همین دلیل باعث شد که فاکتور خردشدگی معادل، خارج از محدوده مدل NTNU شود

در مدل CSM، از آنجایی که مقدار نفوذ پایه بر اساس محدودیت‌های دستگاه محاسبه می‌شود، ابتدا برای دو پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی ۱۰ هزار داده تصادفی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی تولید شد و با استفاده از روابط (۷) تا (۱۸) مقادیر نفوذ در هر دور (پارامتر P) و همچنین RPM با لحاظ محدودیت گشتاور و توان عملیاتی ماشین برای هر یک از این تعداد داده محاسبه شده و با نرم‌افزار Easyfit تابع توزیع احتمال نفوذ پایه برای هر یک از واحدهای زمین‌شناسی مشخص شد. شکل توابع توزیع احتمال در شکل ۸ نمایش داده شده است. سپس نرخ نفوذ با رابطه (۲۱) و نرخ پیشروی با رابطه (۱۹) محاسبه شد. با انجام شبیه‌سازی مونت‌کارلو نتایج ارائه شده در جدول ۱۱ و شکل ۹ برای مدل CSM بدست آمده است.

$$PR(m/h) = 0.06P(mm/rev).RPM \quad (21)$$

جدول ۱۱. نتایج نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل CSM
Table 11. Advance rates obtained using CSM model

واحد زمین‌شناسی	میانگین (متر بر روز)	انحراف استاندارد	۹۵ درصد قطعیت (متر بر روز)
Ekm	۷/۴۹	۳/۵۸	۲/۲۲-۱۵/۸۸
M	۱۸/۴۴	۵/۵۸	۹/۶۸-۳۱/۱۵
Tgb	۲۳/۹۳	۳/۰۷	۱۸/۶۵-۳۰/۴۵
Ekt	۹/۵۳	۱/۸۸	۶/۵-۱۳/۷۹

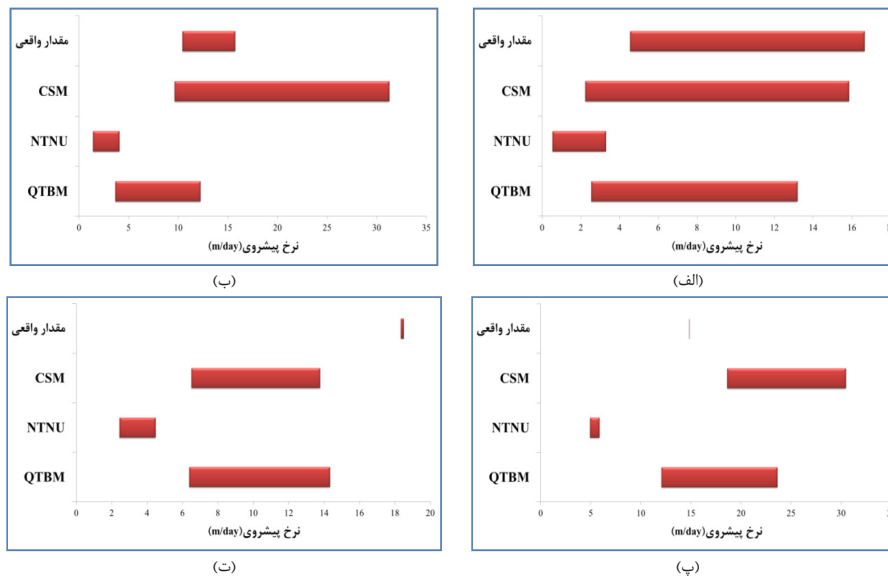


شکل ۹. نتایج مدل CSM برای الف) واحد Ekm، ب) واحد M، پ) واحد Tgb، ت) واحد Ekt

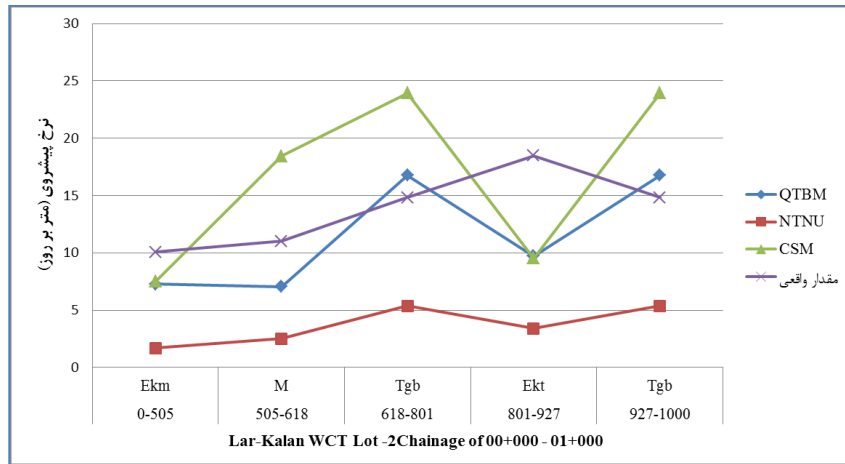
Fig. 9. CSM model results for a) Ekm, b) M, c) Tgb, and d) Ekt

در شکل ۱۱، تغییرات متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و نرخ پیشروی واقعی در طول یک کیلومتر حفاری تونل نمایش داده شده است. مدل Q_{TBM} ، در واحد Ekm، M و Ekt مقدار متوسط نرخ پیشروی کمتری و در واحد Tgb مقدار متوسط نرخ پیشروی بزرگتری از متوسط نرخ پیشروی واقعی تخمین زده شده است. مدل CSM در واحد Ekm و Tgb مقدار متوسط نرخ پیشروی کمتری و در واحد M، Tgb مقدار متوسط نرخ پیشروی بزرگتری از متوسط مقدار واقعی تخمین زده شده است. مدل NTNU

و نتایج این مدل اختلاف زیادی با مقدار نرخ پیشروی واقعی داشته باشد. در واحد Ekm و M تنها نتایج مدل CSM به بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیک است. در واحد M هر چند مدل CSM بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را شامل می‌شود، با این حال بازه نرخ پیشروی به دست آمده بسیار بزرگ است. در واحد Tgb نتایج مدل Q_{TBM} بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر گرفته است. در واحد Ekt، بازه به دست آمده از مدل‌های مختلف، بازه مقدار نرخ پیشروی واقعی را شامل نشده است.

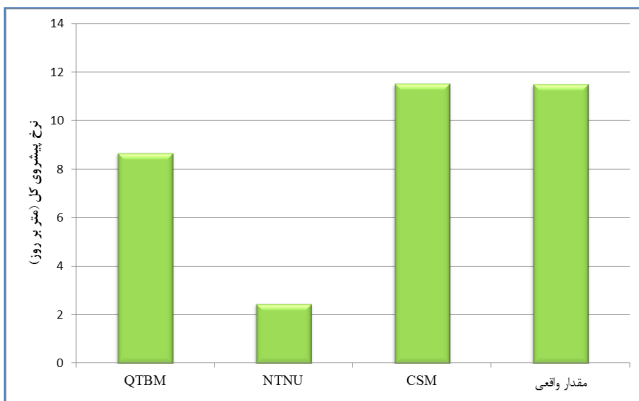


شکل ۱۰. مقایسه بازه نرخ پیشروی برای الف) واحد Ekm، ب) واحد M، پ) واحد Tgb، ت) واحد Ekt
Fig. 10. Comparison of advance rates obtained for a) Ekm, b) M, c) Tgb, and d) Ekt



شکل ۱۱. مقایسه تغییرات نرخ پیشروی در طول تونل

Fig. 11. Comparison of advance rate variation along tunnel trajectory



شکل ۱۲. مقایسه نرخ پیشروی کل

Table 12. Overall advance rate results

است، می‌توان گفت متوسط نرخ پیشروی کل محاسبه شده با مدل CSM به مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است. مقدار نرخ پیشروی کل در حالت واقعی برابر با ۱۱/۵ متر بر روز و مقدار محاسبه شده با مدل CSM برابر با ۱۱/۵۳ متر بر روز است. بررسی پارامترهای مؤثر بر مدل‌های مذکور نشان می‌دهد که برخلاف مدل‌های QTBM و CSM، شرایط عملیاتی (نظیر RPM و نیروی پیشران) تأثیر بیشتری در نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل NTNU دارند. با توجه به این نکته و همچنین محدود بودن بازه تغییرات ممکن پارامترهای عملیاتی (محدودیت حداکثر سرعت چرخش مجاز کاترها، ظرفیت بیلچه جمع‌آوری، ظرفیت نوار نقاله و غیره)، مقایسه نتایج واقعی با نتایج برآورد شده از مدل‌های پیش‌بینی بیان می‌کند که در شرایط واقعی تأثیر عوامل مذکور در نرخ پیشروی در مقایسه با پارامترهای

در تمامی واحدهای زمین‌شناسی مقدار نرخ پیشروی کمتری نسبت به متوسط مقدار نرخ پیشروی واقعی تخمین زده است. در دو واحد Ekt و Ekm، دو مدل QTBM و CSM متوسط نرخ پیشروی نسبتاً برابری تخمین زده‌اند. در حالت کلی می‌توان گفت در تمامی واحدهای زمین‌شناسی مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل QTBM نسبت به دو مدل دیگر، به مقدار متوسط نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است. علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که نرخ پیشروی پیش‌بینی شده توسط تمامی مدل‌ها برای Ekt نسبت به Tgb کمتر است اما مقادیر واقعی خلاف این موضوع را نشان می‌دهند. تخصیص مقادیر قطعی برای پارامترهای عملیاتی ماشین در واحد Tgb را می‌توان به عنوان یکی از دلایل اختلاف مقادیر برآورد شده و واقعی دانست.

در این مطالعه برای محاسبه نرخ پیشروی کل، از رابطه (۲۲) استفاده شده است:

$$\overline{AR} = \frac{\sum AR_i T_i}{\sum T_i} \quad (22)$$

در این رابطه \overline{AR} نرخ پیشروی کل تونل (متر بر روز)، AR_i نرخ پیشروی در واحد i -ام، T_i زمان حفر واحد i -ام است. نتایج نرخ پیشروی کل محاسبه با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای مدل‌های مختلف در جدول ۱۲ ارائه شده است.

با مقایسه بین متوسط نرخ پیشروی کل محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با مقدار نرخ پیشروی کل واقعی در طول ۱ کیلومتر حفاری تونل، همان‌طور که در شکل ۱۲ نیز نشان داده شده

جدول ۱۲. نتایج نرخ پیشروی کل
Table 12. Overall advance rate results

مدل	میانگین (متر بر روز)	انحراف استاندارد	۹۵ درصد قطعیت (متر بر روز)
Q _{TBM}	۸/۶۸	۱/۷۵	۵/۶۲-۱۲/۳۳
NTNU	۲/۴۷	۰/۴۵	۱/۷۴-۳/۴۵
CSM	۱۱/۵۳	۱/۹۶	۸/۳۳-۱۵/۹۳

در نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل NTNU دارند. بنابراین، می توان نتیجه گرفت که در شرایط واقعی تأثیر عوامل عملیاتی در نرخ پیشروی در مقایسه با تأثیر پارامترهای محیطی کمتر است. از این رو، مدل های Q_{TBM} و CSM نتایج نزدیک تری به نتایج واقعی حاصل می کنند.

مربوط به محیط (مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، محتوای کوارتز، چگالی و کیفیت سنگ، شدت تنش های القایی و غیره) کمتر است. از این رو، مدل های Q_{TBM} و CSM نتایج نزدیک تری به نتایج واقعی حاصل می کنند.

۷- نتیجه گیری

با پیشرفت فناوری ساخت ماشین های حفر تونل، از ماشین حفر تمام مقطع تونل به عنوان یک جایگزین مناسب روش های متداول، حتی در شرایط زمین شناسی پیچیده استفاده شده است. با گسترش استفاده از این ماشین ها، پیش بینی دقیق عملکرد ماشین بسیار حائز اهمیت شده است. تغییرپذیری ویژگی های سنگ، سهم عمده ای در عدم قطعیت تحلیل های مهندسی ژئوتکنیک دارد. هدف از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت، تعیین عدم قطعیت خروجی مدل با استفاده از عدم قطعیت پارامترهای ورودی و عدم قطعیت مدل است. در این مطالعه با روش شبیه سازی مونت کارلو و استفاده از روابط سه مدل Q_{TBM}، NTNU و CSM به عنوان تابع عملکرد در روش، بازه نرخ پیشروی در واحدهای زمین شناسی مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان محاسبه شد. در مدل NTNU در بیشتر واحدهای زمین شناسی، به دلیل بالا بودن تخلخل و درزه داری، مقدار فاکتور خردشدگی معادل از حد مجاز بیشتر شد، به همین دلیل محاسبات انجام شده بیشتر با مقدار مجاز انجام و مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده بسیار کمتر از مقدار نرخ پیشروی واقعی شد. مدل Q_{TBM} نسبت به دو مدل دیگر در تمامی واحدهای زمین شناسی مقدار نرخ پیشروی نزدیکتری به مقدار واقعی نرخ پیشروی تخمین زد. از طرف دیگر، متوسط نرخ پیشروی کل محاسبه شده با مدل CSM که برابر با ۱۱/۵۳ متر بر روز بود، مقدار نزدیکتری به نرخ پیشروی کل واقعی (۱۱/۵ متر بر روز) تخمین زده است. بررسی پارامترهای مؤثر بر مدل های مذکور نشان می دهد که برخلاف مدل های Q_{TBM} و CSM، شرایط عملیاتی تأثیر بیشتری

۸- مراجع

- [1] F. Roxborough, H. Phillips, Rock excavation by disc cutter, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 12(12) (1975) 361-366.
- [2] H.P. Sanio, Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 22(3) (1985) 153-161.
- [3] K. Sato, Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting rig, in: First International symposium on Mine Mechanization, Golden, Colorado, 1991.
- [4] R.A. Snowdon, M.D. Ryley, J. Temporal, A study of disc cutting in selected British rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 19(3) (1982) 107-121.
- [5] R.J. Boyd, Hard rock continuous mining machine: Mobile Miner MM-120, in: Rock excavation engineering seminar, Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Queensland, 1986.

- performance prediction model for project planning, *Tunneling and Underground Space Technology*, 26(5) (2011) 595–603.
- [17] E. Farrokh, J. Rostami, C. Laughton, Study of various models for estimation of advance rate of hard rock TBMs, *Tunneling and Underground Space Technology*, 30 (2012) 110–123.
- [18] A. Palmström, RMI- a rock mass characterization system for rock engineering purposes Oslo University, 1995.
- [19] N. Barton, TBM performance estimation in rock using QTBM, *Tunnels and Tunneling International*, (1999).
- [20] Z.T. Bieniawski, Rock Mass Excavability (RME) index, in: *ITA World Tunnelling Congress*, Seoul, 2006.
- [21] E. Avunduk, H. Copur, Empirical modeling for predicting excavation performance of EPB TBM based on soil properties. *Tunneling and Underground Space Technology*, 71 (2018) 340–353.
- [22] U. Ates, N. Bilgin, H. Copur, Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, *Tunneling and Underground Space Technology*, 20 (2014) 46–63.
- [23] J.P. Vargas, J.C. Koppe, C. Pérez, Monte Carlo simulation as a tool for tunneling planning. *Tunneling and Underground Space Technology*, 40 (2014) 203–209.
- [24] A. Babaei, Application of Monte Carlo simulation in tunneling, Iran University of Science and Technology, 2003 (in Persian).
- [25] Shabani, O. Sayyadi, K. Goshtasbi, A. Roodbari, Investigation of Uncertainties in tunneling projects costs using Monte Carlo- Case study of Dasht Zahab Tunnel. , in: *Seventh Iranian Tunnelling Conference*, Tehran, 2006 (in Persian).
- [26] G. Piaggio, J.P. Novel, G.W. Bianchi, A. Bochon, Probabilistic estimation of project duration using TBM
- [6] L. Ozdemir, Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability, Colorado School of mines, Golden, Colorado, 1977.
- [7] P.C. Graham, Rock exploration for machine manufacturers, in: *Exploration for Rock Engineering*, Balkema, Johannesburg, 1976, pp. 173-180.
- [8] I. Farmer, N. Glossop, Mechanics of disc cutter advance, *Tunnels and Tunnelling*, 12(6) (1980) 22-25.
- [9] P. Nelson, A. Ingraffea, T. Rourke, TBM performance prediction using rock fracture parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 22(3) (1985) 189-192.
- [10] W. Bamford, Rock test indices are being successfully correlated with tunnel boring machine performance, in: *Fifth Australian Tunnelling Conference: State of the Art in Underground Development and Construction*, 1984.
- [11] M. Grima, M. Alvarez, P. A. Bruines, P. Verhoef, Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3) (2000) 259-269.
- [12] D.J. Armaghan, E.T. Mohamad, M.S. Narayansamy, N. Narita, S. Yagiz, Development of hybrid intelligent models for predicting TBM advance rate in hard rock condition, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63 (2017) 29-43.
- [13] R. Mikaeil, M.Z. Naghadehi, F. Sereshki, Multifactorial fuzzy approach to the penetrability classification of TBM in hard rock conditions, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5) (2009) 500-505.
- [14] O.T. Blindheim, Boreability predictions for tunneling The Norwegian Institute of Technology, 1979.
- [15] A. Ramezanzadeh, Performnce analysis and development of new models for performance prediction of hard rock TBM in rock mass, Ph.D Thesis, INSA, Lyon, (2005).
- [16] J. Hassanpour, J. Rostami, J. Zhao, A new hard rock TBM

- [35] N.R. Morgenstern, Managing risk in geotechnical engineering, in: 10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1995.
- [36] M. Cai, Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44(4) (2011) 379–399.
- [37] M.M. Aral, M.L. Maslia, Application of Monte Carlo Simulation to Analytical Contaminant Transport Modeling, in: *Groundwater Quality Modeling and Management Under Uncertainty*, Environmental and Water Resources, Institute of the American Society of Civil Engineers, Philadelphia, PA, American Society of Civil Engineers, 2003, pp. 305–312.
- [38] M. Ghias, An introduction to Monte Carlo simulation method, *Basparesh Quarterly*, 4(1) (2014) 67-77 (in Persian).
- [39] BIPM, IFCC, ISO, Evaluation of measurement data Supplement 1 to the ‘Guide to the expression of uncertainty in measurement’ Propagation of distributions using a Monte Carlo method, Joint committee for guides in metrology, 101 (2008). *JCGM*, 2008.
- [40] Concept of uncertainty and sensitivity analysis [Online], in: https://rdreview.jaea.go.jp/review_en/2010/6_6f6_13.html
- [41] F. Macias, Hard rock tunnel boring: performance predictions and cutter life assessments, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [42] L. Ozdemir, R. Miller, F.D. Wang, Mechanical tunnel boring prediction and machine design, Final project to NSF APR73-07776-A03, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1978.
- [43] J. Rostami, L. Ozdemir, A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs, in: *Rapid Excavation and Tunneling Conference*, 1993, pp. 793-809.
- [44] J. Rostami, Development of a force estimation model for prediction models: application to the safety gallery of the Fréjus Tunnel, in: *World Tunneling Congress (2013)* 1141–1148., 2013.
- [27] Frenzel, Modeling uncertainty in cutter wear prediction for tunnel boring machines, in: *GeoCongress*, 2012, pp. 3199–3208.
- [28] S. Eftekhari, S.M. Mokhtarian, A. Baghbanan, Advance rate prediction of tunnel boring machine using artificial neural networks and Monte Carlo methods, *Journal of geotechnical geology* 10(4) (2014) 255-264 (in Persian).
- [29] H. Copur, H. Aydin, N. Bilgin, C. Balci, D. Tumac, C. Dayanc, Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model, *Tunneling and Underground Space Technology* 42 (2014) 1–14.
- [30] S. Yagiz, 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 (2017) 308–315.
- [31] A. Salimi, R.S. Faradonbeh, M. Monjezi, C. Moormann, TBM performance estimation using a classification and regression tree (CART) technique, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 77 (2018) 429-440.
- [32] M.R. Maleki, Rock Joint Rate (RJR); a new method for performance prediction of tunnel boring machines (TBMs) in hard rocks, *Tunneling and Underground Space Technology* 73 (2018) 261–286.
- [33] V.B. Maji, G.V. Theja, A New Performance Prediction Model for Rock TBMs, *Indian Geotechnical Journal* 47(3) (2017) 364–372.
- [34] A. Johari, F. Sani, M. Parvaz, Reliability analysis of infinite soil slope stability using distribution of variables composition method, in: *6th national civil engineering congress, Semnan*, 2011 (in Persian).

- [47] J. Hassanpour, J. Rostami, S.T. Azali, J. Zhao, Introduction of an empirical TBM cutter wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran, *Tunneling and Underground Space Technology* 43 (2014) 222–231.
- [48] J. Hassanpour, J. Rostami, M. Khamchiyan, A. Bruland, H.R. Tavakoli, TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel, *Rock Mechanics and Rock Engineering* 43(4) (2010) 427–445.
- rock fragmentation with disc cutters through theoretical modelling and physical measurement of crushed zone pressure, Colorado School of Mines, 1997.
- [45] S. Yagiz, J. Rostami, L. Ozdemir, Colorado School of Mines approach for predicting TBM performance, in: *ISRM International Symposium - EUROCK 2012, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, Stockholm, Sweden, 2012.
- [46] S.N. Cheema, Development of a Rock Mass Boreability Index for the Performance of Tunnel Boring Machines, Colorado school of Mines, 1999.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Sardari, Sh. Zare, M. Mazraehi, *Probabilistic Analysis of TBM Advance Rate Prediction Models*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 935-954.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16692.6310](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16692.6310)



