

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاها‌ی زیرزمینی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

پیش‌بینی سرعت پیشروی TBM با استفاده از روش‌های احتمالاتی - مطالعه

موردی: قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان

نگارنده:

محسن سرداری

استاد راهنما:

شکراله زارع

بهمن ۱۳۹۷

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به:

محضر ارزشمند **پرومادر عزیزم** به خاطر همه تلاش‌های محبت‌آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.

سپاسگزاری

از زحمات استاد محترم خویش، جناب آقای دکتر زارع بخاطر راهنمایی‌های لازم سپاسگزاری می‌نمایم. همچنین بر خود لازم می‌دارم از کمک‌های جناب مهندس خسروی در جهت تهیه اطلاعات مورد نیاز و جناب دکتر ماسیاس، دکتر رستمی و مهندس فاضلی به خاطر راهنمایی‌های بی‌دریغشان در پیشبرد پایان‌نامه تشکر نمایم.

تشکر و قدردانی ویژه من از پدر و مادر فداکارم است که در تمامی دوران تحصیلی با تامین امنیت و آسایش فکری زمینه را برای پیشرفت و ترقی بنده آماده نمودند. بی‌شک بدون تشویق‌ها و حمایت‌های مادی و معنوی ایشان پیمودن این مسیر بسیار دشوار می‌شد.

تعهدنامه

اینجانب محسن سرداری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع پیش بینی سرعت پیشروی TBM با استفاده از روش های احتمالاتی - مطالعه موردی: قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست و مقالات مستخرج بانام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا Shahrood University of Technology به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

امروزه به طور گسترده‌ای از ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل در پروژه‌های تونل‌سازی استفاده می‌شود. یکی از پارامترهای مهم در تخمین زمان و هزینه یک پروژه تونل‌سازی، پیش‌بینی عملکرد ماشین است. عملکرد ماشین توسط پارامترهایی همچون نرخ پیشروی، نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری ارزیابی می‌شود. روش‌ها و مدل‌های مختلفی جهت تخمین این پارامترها ارائه شده است. هدف از انجام این تحقیق، استفاده از روش‌های احتمالاتی جهت تخمین نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع تونل است. برای این منظور از روابط مدل‌های Q_{TBM} ، NTNU، CSM، حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱) و فرخ و همکاران (۲۰۱۲) به عنوان تابع عملکرد در سه روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور استفاده شده است. ابتدا برای پارامترهای ورودی مدل‌ها، بر اساس داده‌های قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان تابع توزیع احتمال مناسب مشخص شده، سپس با اجرای شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نرخ پیشروی با ۹۵ درصد قطعیت به دست آمده است. در روش‌های تخمین نقطه‌ای و سری تیلور، روابط موجود در این دو روش، به صورت کد در نرم افزار متلب نوشته شده و پس از اجرای کد، با وارد کردن میانگین و انحراف استاندارد پارامترها و روابط هر مدل، میانگین و انحراف استاندارد نرخ پیشروی محاسبه شده است. در بین مدل‌ها، برای واحدهای زمین‌شناسی شامل سنگ‌های توف شیلی و مارن، متوسط نرخ پیشروی محاسبه‌شده توسط مدل CSM تصحیح‌شده با فاکتور تصحیح روش EMI و در واحدهای شامل سنگ‌های گابرو، ماسه‌سنگ، سیلتستون و زون شکسته، نتایج مدل فرخ و همکاران (۲۰۱۲) به مقدار متوسط نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است. مدل NTNU در تمامی واحدهای زمین‌شناسی، مقدار نرخ پیشروی بسیار کمتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه داده است. در بین روش‌های احتمالاتی استفاده‌شده، متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده توسط روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو به مقدار متوسط نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است.

همچنین نرخ پیشروی با روش تحلیل قطعی یعنی استفاده از مقدار محتمل پارامترها در مدل‌های مختلف، محاسبه شده است. در تحلیل قطعی فقط یک مقدار متوسط برای نرخ پیشروی محاسبه شده،

در حالیکه در روش‌های احتمالاتی، نرخ پیشروی محاسبه‌شده به صورت هیستوگرام با سطح اطمینان است. استفاده از روش‌های احتمالاتی در ترکیب با مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM، با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف کمک می‌کند تا بازه تغییرات نرخ پیشروی با اطمینان بیشتری تخمین زده شود.

کلمات کلیدی: ماشین حفر تمام مقطع تونل، نرخ پیشروی، روش‌های احتمالاتی، روش شبیه‌سازی

مونت کارلو، تحلیل قطعی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- سرداری م، زارع ش، "تخمین نرخ نفوذ ماشین حفر تمام مقطع تونل با روش احتمالاتی"،
کنفرانس بین‌المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، دانشگاه تهران، ۱۳۹۷.

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- پیشینه مطالعات.....	۴
۳-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۷
۴-۱- روش تحقیق.....	۸
۵-۱- ساختار پایان نامه.....	۸
۲- فصل دوم: روش های قطعی و احتمالاتی.....	۱۱
۱-۲- مقدمه.....	۱۲
۲-۲- روش های قطعی.....	۱۲
۳-۲- روش های احتمالاتی.....	۱۳
۱-۳-۲- روش تخمین نقطه ای.....	۱۵
۲-۳-۲- روش سری تیلور.....	۱۷
۳-۳-۲- روش شبیه سازی مونت کارلو.....	۱۸
۴-۲- تحلیل حساسیت.....	۲۶
۵-۲- جمع بندی.....	۲۷
۳- فصل سوم: مدل های پیش بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل.....	۲۹
۱-۳- مقدمه.....	۳۰
۲-۳- پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین.....	۳۰
۱-۲-۳- نرخ نفوذ.....	۳۰
۲-۲-۳- ضریب بهره‌وری.....	۳۱

۳۲	..... نرخ پیشروی
۳۳	..... مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل
۳۳	..... مدل‌های نظری
۳۷	..... مدل‌های تجربی
۵۸	..... جمع‌بندی
۵۹	..... فصل چهارم: ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان
۶۰	..... ۱-۴ مقدمه
۶۱	..... ۲-۴ سیمای پروژه
۶۲	..... ۴-۴ جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه
۶۳	..... ۵-۴ سنگ‌شناسی محدوده مورد مطالعه
۶۳	..... ۶-۴ مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در محدوده مورد مطالعه
۶۵	..... ۸-۴ ناپیوستگی‌ها
۶۷	..... ۹-۴ پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر
۶۷	..... ۱۰-۴ طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌ها
۶۹	..... ۱۱-۴ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ
۷۰	..... ۱۲-۴ تنش مماسی
۷۱	..... ۱۳-۴ مشخصات ماشین حفر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان
۷۳	..... ۱۴-۴ جمع‌بندی
۷۵	..... فصل پنجم: تخمین نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان
۷۶	..... ۱-۵ مقدمه
۷۶	..... ۲-۵ توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی

۷۸	۳-۵- محاسبه تعداد تکرار مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو.....
۷۸	۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو.....
۷۸	۱-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل Q _{TBM}
۸۱	۲-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل NTNU.....
۸۴	۳-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل CSM.....
۸۷	۴-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱).....
۸۹	۵-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل فرخ و همکاران (۲۰۱۲).....
۹۰	۶-۴-۵- نرخ پیشروی کل TBM.....
۹۲	۵-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش تخمین نقطه‌ای.....
۹۴	۶-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش سری تیلور.....
۹۵	۷-۵- تحلیل حساسیت مدل‌ها.....
۱۰۲	۸-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش تحلیل قطعی.....
۱۰۴	۹-۵- مقایسه نتایج مدل‌های مختلف استفاده شده در روش شبیه‌سازی مونت کارلو.....
۱۰۹	۱۰-۵- مقایسه نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور.....
۱۱۵	۱۱-۵- مقایسه نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل قطعی.....
۱۱۸	۱۲-۵- جمع‌بندی.....
۱۲۱	۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
۱۲۲	۱-۶- نتیجه‌گیری.....
۱۲۴	۲-۶- پیشنهادها.....
۱۲۵	۷- منابع.....
۱۳۱	۸- پیوست.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: طرح روش تحلیل قطعی ۱۳
- شکل ۲-۲: طرح روش تحلیل احتمالاتی ۱۴
- شکل ۳-۲: اصول محاسبه روش تخمین دو نقطه‌ای ۱۶
- شکل ۴-۲: ماتریس پارامتر در روش روزنبلت برای سیستم سه‌متغیره ۱۷
- شکل ۵-۲: ماتریس همبستگی در روش روزنبلت برای سیستم سه‌متغیره ۱۷
- شکل ۶-۲: چارچوب کلی محاسبه عدم قطعیت با روش شبیه‌سازی مونت کارلو ۲۱
- شکل ۷-۲: تعداد تکرار مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو ۲۵
- شکل ۸-۲: تعداد آزمون‌های مورد نیاز مونت کارلو بر اساس سطح اطمینان و تعداد متغیرها ۲۶
- شکل ۱-۳: شکل عمومی توابع فشار و نیروها در زیر برش‌دهنده ۳۵
- شکل ۲-۳: انواع مختلف مدل‌های تجربی ۳۸
- شکل ۳-۳: سال‌های ارائه به روزرسانی مختلف مدل NTNU ۳۹
- شکل ۴-۳: الف) نیروی پیشران بحرانی و ب) ضریب نفوذ به عنوان تابعی از فاکتور خردشدگی معادل ۴۰
- شکل ۵-۳: نمایش زوایای رابطه (۲۲-۳) در استریونت ۴۱
- شکل ۶-۳: فاکتور خردشدگی تابعی از کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف ۴۲
- شکل ۷-۳: فاکتور خردشدگی تابعی از کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف برای محاسبات دقیق توده‌سنگ‌های با درجه شکستگی پایین ۴۲
- شکل ۸-۳: نمودار فاکتور اصلاح برای مقدار DRI ۴۳
- شکل ۹-۳: الف) نمایی شماتیک، ب) دستگاه در آزمایشگاه مورد استفاده در آزمون تعیین S_{20} ۴۴
- شکل ۱۰-۳: الف) نمایی شماتیک، ب) دستگاه در آزمایشگاه مورد استفاده در آزمون تعیین S_r ۴۵
- شکل ۱۱-۳: نمودار محاسبه DRI ۴۵
- شکل ۱۲-۳: نمودار فاکتور تصحیح برای مقدار تخلخل سنگ ۴۶
- شکل ۱۳-۳: الف) فاکتور تصحیح برای فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها، ب) فاکتور تصحیح برای قطر برش‌دهنده ۴۷
- شکل ۱۴-۳: نیروی پیشران ناخالص متوسط در هر برش‌دهنده ۴۸
- شکل ۱۵-۳: نرخ نفوذ پایه (i_0) به عنوان تابعی از فاکتور خردشدگی معادل و نیروی پیشران معادل برای قطر

- برش‌دهنده ۴۸۳ میلی‌متر و فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها در حدود ۷۰ میلی‌متر ۴۸
- شکل ۱۶-۳: نمودار فاکتور تصحیح برای RPM ۴۹
- شکل ۱۷-۳: رابطه عمومی میان Q، PR و AR ۵۰
- شکل ۱۸-۳: ابزار مورد نیاز برای انجام آزمون ساینده NTNU ۵۳
- شکل ۱۹-۳: نمودار برآورد اولیه گرادیان منفی نرخ پیشروی به عنوان تابعی از مقدار Q ۵۵
- شکل ۲۰-۳: رابطه پیشنهادی بین AR، PR و Q_{TBM} ۵۶
- شکل ۲۱-۳: چارت تخمین FPI بر اساس ویژگی‌های توده‌سنگ ۵۸
- شکل ۱-۴: مسیر مصوب سامانه انتقال آب لار-کلان ۶۱
- شکل ۲-۴: موقعیت گمانه‌های حفاری شده در طول قطعه ۲ تونل لار-کلان ۶۳
- شکل ۳-۴: طرحی از پروفیل تونل ۶۵
- شکل ۴-۴: ساختار و اجزای ماشین حفر تونل با سپر دوگانه ۷۲
- شکل ۱-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل Q_{TBM} ۸۰
- شکل ۲-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل Q_{TBM} ۸۰
- شکل ۳-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل NTNU ۸۴
- شکل ۴-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل NTNU ۸۴
- شکل ۵-۵: تابع توزیع احتمال نرخ نفوذ پایه برای واحدهای KTM (الف)، MSC (ب)، MP (پ) و GT (ت) ۸۵
- شکل ۶-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل CSM ۸۶
- شکل ۷-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل CSM ۸۶
- شکل ۸-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل CSM اصلاح‌شده ۸۷
- شکل ۹-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل CSM اصلاح‌شده ۸۷
- شکل ۱۰-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل حسن‌پور و همکاران ۸۸
- شکل ۱۱-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل حسن‌پور و همکاران ۸۸
- شکل ۱۲-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل فرخ و همکاران ۹۰
- شکل ۱۳-۵: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل فرخ و همکاران ۹۰
- شکل ۱۴-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی کل TBM بر اساس مدل Q_{TBM} ۹۱
- شکل ۱۵-۵ (الف): تابع توزیع نرمال برای واحد KTM بر اساس مدل Q_{TBM} با سطح اطمینان ۹۵ درصد در روش

- تخمین نقطه‌ای (ب) نمایش بازه اطمینان در تابع توزیع نرمال ۹۳
- شکل ۵-۱۶: تابع توزیع نرمال برای واحد KTM بر اساس مدل Q_{TBM} با سطح اطمینان ۹۵ درصد در روش سری تیلور ۹۵
- شکل ۵-۱۷: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل Q_{TBM} ۹۷
- شکل ۵-۱۸: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل NTNU ۹۸
- شکل ۵-۱۹: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل CSM ۱۰۰
- شکل ۵-۲۰: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل CSM اصلاح شده ۱۰۰
- شکل ۵-۲۱: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل حسن پور ۱۰۱
- شکل ۵-۲۲: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل فرخ ۱۰۲
- شکل ۵-۲۳: نتایج تحلیل قطعی بر اساس مدل‌های مختلف ۱۰۳
- شکل ۵-۲۴: بازه نرخ پیشروی بر اساس مدل‌های مختلف در الف) واحد KTM و ب) واحد MSC، پ) واحد MP، ت) واحد GT و ث) واحد Cr ۱۰۵
- شکل ۵-۲۵: مقایسه نمودار تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو با نمودار مقدار واقعی در واحد KTM بر اساس نتایج مدل CSM اصلاح شده ۱۰۶
- شکل ۵-۲۶: نمودار مقایسه متوسط نرخ پیشروی مدل‌های مختلف با مقدار واقعی در واحدهای مختلف ۱۰۷
- شکل ۵-۲۷: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل بدون در نظر گرفتن زون شکسته ۱۰۸
- شکل ۵-۲۸: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل با در نظر گرفتن زون شکسته ۱۰۹
- شکل ۵-۲۹: بازه نرخ پیشروی در واحد KTM الف) روش تخمین نقطه‌ای، ب) روش سری تیلور ۱۰۹
- شکل ۵-۳۰: بازه نرخ پیشروی در واحد MSC الف) روش تخمین نقطه‌ای، ب) روش سری تیلور ۱۱۰
- شکل ۵-۳۱: بازه نرخ پیشروی در واحد MP الف) روش تخمین نقطه‌ای، ب) روش سری تیلور ۱۱۰
- شکل ۵-۳۲: بازه نرخ پیشروی در واحد GT الف) روش تخمین نقطه‌ای، ب) روش سری تیلور ۱۱۰
- شکل ۵-۳۳: بازه نرخ پیشروی در واحد Cr الف) روش تخمین نقطه‌ای، ب) روش سری تیلور ۱۱۱
- شکل ۵-۳۴: مقایسه نتایج سه روش تخمین نقطه‌ای الف) سری تیلور ب) و شبیه‌سازی مونت کارلو پ) در واحد KTM ۱۱۱
- شکل ۵-۳۵: مقایسه نمودار تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تخمین

- نقطه‌ای با نمودار مقدار واقعی در واحد KTM بر اساس نتایج مدل CSM اصلاح شده ۱۱۲
- شکل ۵-۳۶: مقایسه نتایج نرخ پیشروی متوسط سه روش تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و شبیه‌سازی مونت کارلو در واحدهای KTM (الف)، MSC (ب) و MP (پ) ۱۱۳
- شکل ۵-۳۷: مقایسه نتایج نرخ پیشروی متوسط سه روش تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و شبیه‌سازی مونت کارلو در واحدهای GT (الف) و Cr (ب) ۱۱۴
- شکل ۵-۳۸: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده در سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور ۱۱۵
- شکل ۵-۳۹: مقایسه نرخ پیشروی در دو روش تحلیل قطعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای واحد KTM (الف)، واحد MSC (ب) ۱۱۶
- شکل ۵-۴۰: مقایسه متوسط نرخ پیشروی در دو روش تحلیل قطعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای واحد KTM (الف)، واحد MSC (ب)، واحد MP (پ)، واحد GT (ت) و واحد Cr (ث) ۱۱۷

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: برخی از توابع توزیع احتمال پیوسته ۲۳
- جدول ۲-۲: مقدار Z برای سطح اطمینان مختلف ۲۴
- جدول ۱-۳: پارامترهای ماشین و سنگ تاثیرگذار بر میزان نفوذ خالص در مدل NTNU ۳۹
- جدول ۲-۳: کلاس شکستگی توده سنگ به عنوان تابعی از فاصله داری شکستگی ها ۴۱
- جدول ۳-۳: دامنه تغییرات شاخص حفرپذیری ماده سنگ برای سنگ های مختلف ۴۶
- جدول ۴-۳: دامنه تغییرات CLI برای سنگ های مختلف ۵۴
- جدول ۵-۳: تبیین گرادیان منفی m و ارتباط تقریبی آن با مقدار Q ۵۴
- جدول ۶-۳: طبقه بندی نوع سنگ در پایگاه داده مدل فرخ و همکاران ۵۷
- جدول ۷-۳: طبقه بندی RQD در پایگاه داده مدل فرخ و همکاران ۵۷
- جدول ۱-۴: توصیف های میدانی واحدهای زمین شناسی مهندسی موجود در محدوده مورد مطالعه ۶۴
- جدول ۲-۴: ویژگی های ناپیوستگی ها برای واحدهای زمین شناسی مختلف ۶۶
- جدول ۳-۴: ویژگی های نمونه سنگ بر اساس آزمون های آزمایشگاهی در واحدهای زمین شناسی مختلف در محدوده مورد مطالعه تونل ۶۸
- جدول ۴-۴: نتایج طبقه بندی مهندسی در واحدهای زمین شناسی مختلف ۶۹
- جدول ۵-۴: مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی توده سنگ در واحدهای مختلف ۷۰
- جدول ۶-۴: مقادیر تنش مماسی برای واحدهای زمین شناسی مختلف ۷۱
- جدول ۷-۴: مشخصات فنی ماشین حفر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان ۷۲
- جدول ۱-۵: توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل های پیش بینی مختلف ۷۷
- جدول ۲-۵: تابع توزیع احتمال F_n ، RPM و U در واحدهای زمین شناسی مختلف ۷۷
- جدول ۳-۵: مقدار CLI و q بر اساس نوع سنگ در واحدهای زمین شناسی مختلف ۷۹
- جدول ۴-۵: نتایج مدل Q_{TBM} ۸۰
- جدول ۵-۵: وضعیت ناپیوستگی ها و فاکتور خردشدگی در هر دسته برای واحدهای زمین شناسی مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان ۸۱
- جدول ۶-۵: مقدار DRI در واحدهای زمین شناسی مختلف ۸۲

- جدول ۷-۵: رابطه بین DRI و k_{DRI} در واحدهای زمین‌شناسی مختلف ۸۲
- جدول ۸-۵: فاکتور خردشدگی معادل برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف ۸۳
- جدول ۹-۵: فاکتور تصحیح فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و قطر برش‌دهنده ۸۳
- جدول ۱۰-۵: رابطه بین فاکتور خردشدگی معادل با M_1 و b ۸۳
- جدول ۱۱-۵: نتایج مدل NTNU ۸۴
- جدول ۱۲-۵: نتایج مدل CSM ۸۵
- جدول ۱۳-۵: نتایج مدل CSM اصلاح‌شده ۸۷
- جدول ۱۴-۵: نتایج مدل حسن‌پور و همکاران ۸۸
- جدول ۱۵-۵: مقادیر RT_c و RQD_c برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف ۸۹
- جدول ۱۶-۵: نتایج مدل فرخ و همکاران ۸۹
- جدول ۱۷-۵: نرخ پیشروی کل TBM بر اساس مدل‌های مختلف ۹۱
- جدول ۱۸-۵: نتایج روش تخمین نقطه‌ای بر اساس مدل‌های مختلف ۹۲
- جدول ۱۹-۵: نتایج متوسط نرخ پیشروی با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای ۹۳
- جدول ۲۰-۵: نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش تخمین نقطه‌ای ۹۳
- جدول ۲۱-۵: متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش تخمین نقطه‌ای ۹۳
- جدول ۲۲-۵: نتایج روش سری تیلور ۹۴
- جدول ۲۳-۵: نتایج متوسط نرخ پیشروی به دست آمده از روش سری تیلور ۹۴
- جدول ۲۴-۵: نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش سری تیلور ۹۵
- جدول ۲۵-۵: متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش سری تیلور ۹۵
- جدول ۲۶-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل Q_{TBM} برای انجام تحلیل حساسیت ۹۷
- جدول ۲۷-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل NTNU برای انجام تحلیل حساسیت ۹۸
- جدول ۲۸-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل CSM برای انجام تحلیل حساسیت ۹۹
- جدول ۲۹-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل حسن‌پور برای انجام تحلیل حساسیت ۱۰۱
- جدول ۳۰-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل فرخ برای انجام تحلیل حساسیت ۱۰۲
- جدول ۳۱-۵: نتایج تحلیل قطعی بر اساس مدل‌های مختلف ۱۰۳
- جدول ۳۲-۵: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل بدون در نظر گرفتن زون شکسته ۱۰۸

جدول ۳۳-۵: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل ۱۰۸

فصل اول

کلیات

تسلط به صنعت تونل‌سازی نقش بسیار مهمی در توسعه هر کشوری ایفا می‌کند. این صنعت، تکنولوژی و علوم مربوط به آن در راه‌ها، راه‌آهن، انتقال آب، فاضلاب و مخصوصاً در قطار شهری و متروها کاربرد جدی دارد. طراحی، ایجاد و در نهایت راه‌اندازی و بهره‌برداری از فضاهای زیرزمینی ارزش افزوده بالایی برای کشورها بوجود می‌آورد. این گونه ساخت‌وساز با روش‌های مختلفی همچون حفاری سنتی، ترانشه‌باز، نیمه‌مکانیزه و مکانیزه کامل به انجام می‌رسند. استفاده از تکنولوژی حفاری مکانیزه برای حفر تونل‌های بلند موجب کوتاه‌تر شدن زمانبندی، کاهش هزینه‌های اجرا و ایمنی بیشتر شده است [۱].

یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری مدیران پروژه و مهندسان طراح در مرحله مطالعات امکان‌پذیری، ضریب بهره‌وری ماشین حفر تمام مقطع^۱ تونل است. ضریب بهره‌وری به صورت نسبت زمان حفر ماشین به زمان شیفت تعریف می‌شود. زمان در پروژه‌های تونل‌سازی بسیار مهم است. یک پروژه باید در قالب زمانی مشخص انجام شود؛ در غیر اینصورت ممکن است پیامدهای نامطلوب برای پیمانکاران داشته باشد. زمان تکمیل و هزینه پروژه تونل‌سازی، از سرعت/نرخ پیشروی^۲ تونل تاثیر می‌پذیرند. سرعت حفاری تونل در پروژه‌های حفاری مکانیزه برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ^۳ در ضریب بهره‌وری ماشین است. نرخ نفوذ ماشین در سنگ به هنگام حفاری معمولاً برحسب میلی‌متر بر دور کله حفار^۴ یا به صورت متر بر ساعت بیان می‌شود. نرخ پیشروی نیز به صورت میزان پیشروی در مدت معین تعریف می‌شود و ممکن است بر حسب متردرشیفت، متردرروز و یا متردرماه بیان شود. نرخ نفوذ ماشین حفر تونل به صورت معمول با توجه به خواص سنگ، مشخصات ماشین و برش‌دهنده تخمین زده می‌شود [۲]. به صورت کلی می‌توان گفت که

¹ Tunnel Boring Machine (TBM)

² Advance Rate

³ Penetration Rate

⁴ Cutterhead

ضریب بهره‌وری، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی سه پارامتر اصلی در پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تونل در یک پروژه هستند.

مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی ضریب بهره‌وری، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی وجود دارد که هر کدام ویژگی‌های خاص خود را دارد و بر اساس پارامترهای مربوط به سنگ بکر، توده‌سنگ و مشخصات ماشین ارائه شده‌اند. مدل‌ها و روابط اولیه پیشنهاد شده برای پیش‌بینی عملکرد ماشین ساده و عمدتاً بر پایه استفاده از تک پارامترهای موثر بر عملکرد بودند. تجربیات تونل‌های حفر شده کمک نمودند تا مدل‌های بعدی با استفاده از نتایج ثبت شده حین حفر تونل‌های قبلی ارائه شوند. در برخی از مدل‌های پیش‌بینی، آزمایش‌های خاصی انجام می‌گیرد که نتیجه این آزمایش‌ها، در پیش‌بینی عملکرد TBM در برخورد با واحدهای سنگی مسیر تونل تاثیرگذار است. بنابراین با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده 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. پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های^۱ 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 بسیار سخت خواهد بود [۳].

روش‌های مورد استفاده برای حل مسائل مهندسی به صورت روش‌های تحلیل قطعی^۲ و تحلیل احتمالاتی^۳ هستند. در روش‌های تحلیل قطعی به هر پارامتر موثر تنها یک مقدار عددی اختصاص

¹ Uncertainty

² Deterministic

³ Probabilistic

داده می‌شود و نتایج خروجی بر اساس داده‌های برداشت شده و با استفاده از معادلات ریاضی به صورت یک مقدار مشخص ارائه می‌شوند. در مقابل، در روش‌های احتمالاتی عدم قطعیت‌ها به صورت پراکندگی آماری در نظر گرفته شده و به جای اختصاص یک مقدار مشخص به هر پارامتر ورودی، یک تابع توزیع احتمال به آن اختصاص داده می‌شود و به همین ترتیب نتایج مدل‌های محاسباتی در مورد رفتار خروجی نیز به صورت تابع توزیع به دست می‌آید [۴].

۲-۱- پیشینه مطالعات

استفاده از روش‌های احتمالاتی بدلیل وجود عدم قطعیت در مسائل ژئوتکنیکی بسیار حائز اهمیت است. بررسی عدم قطعیت در بخش‌های مختلف مسائل ژئوتکنیک مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه برخی از این مطالعات آمده است.

وارگاس^۱ و همکاران [۵] و بابائی [۶] در مطالعات خود به معرفی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و کاربرد آن در طراحی و حفر تونل پرداخته‌اند. در این مطالعات، زمان حفاری تونل شبیه‌سازی شده و زمان حفر تونل به صورت توزیع احتمال به دست آمده است. ولبو^۲ [۷] و راملی^۳ و همکاران [۸]، روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را برای تحلیل پایداری سطوح شیب‌دار بکار برده و ضریب ایمنی را به صورت هیستوگرام و توزیع محاسبه کرده‌اند. سپس مقایسه‌ای بین میانگین محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با مقدار واقعی انجام شده است. جابری [۹] در مطالعه‌ای به بررسی عدم قطعیت‌ها و تغییرات پارامترهای تاثیرگذار توده‌سنگ ساختگاه نیروگاه با استفاده از روش مونت‌کارلو و بر اساس معیار شکست هوک-براون پرداخته است. سپس با استفاده از این پارامترها، به منظور تحلیل پایداری و تحلیل سیستم نگهداری مغار نیروگاه، از روش برآورد نقطه‌ای استفاده شده است. نتایج به صورت هیستوگرام با ۹۰ درصد قطعیت برای میزان فشار نگهداری و جابجایی کل در دیواره سمت راست و

¹ Vargas

² Wolebo

³ Ramly

چپ بودند. شیخی [۱۰] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تخمین نقطه‌ای و بوکاچی^۱ و همکاران [۱۱] از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل پایداری تونل و فضا‌های زیرزمینی استفاده شده است. در این مطالعات ضریب ایمنی به صورت هیستوگرام به دست آمده و احتمال شکست که مقدار کمتر از یک است، از روی نمودار تابع توزیع تجمعی محاسبه شده است.

سیدراشتورم^۲ [۱۲] در مطالعه‌ای به معرفی کاربرد روش‌های احتمالاتی در محاسبات پایداری شیب پرداخته است. در این مطالعه از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و ممان دوم مرتبه اول^۳ (سری تیلور) برای محاسبه ضریب ایمنی استفاده شده است.

هوک^۴ [۱۳] پس از تعیین توابع توزیع احتمال برای مقاومت فشاری تک‌محوره، ثابت هوک-براون و GSI، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو تابع توزیع احتمال زاویه اصطکاک، چسبندگی، مقاومت فشاری توده‌سنگ و مدول تغییر شکل را به دست آورده است. سپس با استفاده از این توابع توزیع احتمال و روش تخمین نقطه‌ای، انحراف استاندارد و میانگین ضریب ایمنی را محاسبه و تابع توزیع احتمال آن را بدست آورده است. ساری^۵ و همکاران [۱۴] و محمدی [۱۵] با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی معیار هوک-براون، به تعیین توابع توزیع احتمال پارامترهای توده‌سنگ و تخمین آنها با ۹۵ درصد قطعیت پرداخته‌اند.

رو و همکاران [۱۶] به ارزیابی احتمالاتی شاخص نرخ حفرپذیری^۶ محاسبه شده بوسیله روش ماشین بردار پشتیبان حداقل مربعات با شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته‌اند. همچنین در مطالعه سعیدی و همکاران [۱۷]، روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل حساسیت مدل پیش‌بینی نرخ نفوذ حفاری سرمته‌های دورانی در معادن روباز استفاده شده است.

در ارتباط با پروژه‌های تونل‌سازی، در مطالعه شعبانی و همکاران [۱۸] به بررسی تاثیر عوامل

¹ Bukaçi

² Cederström

³ First-Order Second-Moment Method (FOSM)

⁴ Hoek

⁵ Sari

⁶ Drilling Rate Index (DRI)

عدم قطعیت در هزینه پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته 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 سپس دامنه تغییرات هزینه کل پروژه با ۹۵ درصد قطعیت برآورد گردیده است. پیاجیو^۱ و همکاران [۱۹] در یک پروژه تونل‌سازی با استفاده از مدل CSM، سرعت حفاری ماشین حفار تونل را پیش‌بینی کرده‌اند. در ابتدا با روش شبیه‌سازی مونت کارلو تابع توزیع احتمال مناسب برای سرعت حفاری و نرخ پیشروی ماشین حفار تونل تعیین و سپس سناریوهای مختلفی برای زمان تکمیل پروژه ارائه شده است. همچنین فرنزل [۲۰] نیز از ترکیب مدل CSM و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای بدست آوردن هیستوگرام نرخ نفوذ ماشین حفار 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 [۲۱] با استفاده از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نرخ نفوذ ماشین حفار 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 مطالعه کاپور^۲ و همکاران [۲۲] عملکرد ماشین حفار تونل EPB^۳ 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.

^۱ Piaggio

^۲ Copur

^۳ Earth Pressure Balance (EPB)

دهقانی و بیرانوند [۲۳] در مطالعه‌ای ابتدا پایگاه داده‌ای متشکل از اطلاعات مکانیک سنگی از قبیل مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، سختی و سفتی سنگ، فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و نرخ نفوذ اندازه‌گیری شده ماشین حفر تونل در ۱۵۱ نقطه از یک تونل آب جمع‌آوری کرده و سپس با استفاده از روش تحلیل ابعادی یک رابطه ریاضیاتی جامع برای محاسبه میزان نرخ نفوذ ماشین حفر تونل براساس داده‌های یاد شده توسعه داده‌اند. در نهایت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو تابع توزیع احتمال نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته و با قطعیت خاصی بازه مربوط به نرخ نفوذ ماشین برآورد شده است. همچنین مطالعه مشابه‌ای توسط ماجی و تجا^۱ [۲۴] برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تونل انجام شده است. در این مطالعه از رگرسیون برای به دست آوردن مدل تجربی بر اساس اطلاعات ۶ پروژه تونل‌سازی استفاده شده و سپس ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای ارائه هیستوگرام نرخ نفوذ بکار برده شده است. سپس مقایسه‌ای بین مقدار میانگین محاسبه شده از ترکیب روش مونت کارلو و مدل، مقدار میانگین محاسبه شده با مدل و مقدار واقعی در پروژه‌های مختلف انجام شده است. نتایج نشان‌دهنده نزدیکی مقدار میانگین محاسبه‌شده به مقدار واقعی است.

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق

روش حفاری مکانیزه تونل کاربرد وسیعی در جهان یافته است. استفاده از تکنولوژی حفاری مکانیزه برای حفر تونل‌های بلند موجب کوتاه‌تر شدن زمان‌بندی، کاهش هزینه‌های اجرا و ایمنی بیشتر شده است. پس از تعیین مشخصات ژئوتکنیکی مسیر و انتخاب دستگاه مناسب برای عملیات حفاری، نوبت به پیش‌بینی عملکرد دستگاه می‌رسد. پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل به منظور تعیین زمان نهایی تکمیل پروژه امری ضروری بوده و از آنجایی که زمان تکمیل پروژه و هزینه از سرعت حفاری تاثیر می‌پذیرند، پیش‌بینی عملکرد با نرخ نفوذ و نرخ پیشروی قابل بیان است. بدیهی است که نتایج بدست آمده با توجه به اطلاعات موجود قبل از

¹ Maji and Theja

حفاری تونل، نمی‌توانند کاملاً قطعی باشند؛ با این حال، از این پیش‌بینی‌ها می‌توان به عنوان ایده‌ای کلی برای ارزیابی عملکرد دستگاه در بخش‌های مختلف مسیر تونل بهره گرفت.

۴-۱- روش تحقیق

هدف از این تحقیق، استفاده از روش‌های احتمالاتی با ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان است. در این رویکرد، از روابط مدل‌های تجربی Q_{TBM} ، NTNU، CSM، حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱) و فرخ و همکاران (۲۰۱۲) به عنوان تابع عملکرد جهت تخمین عملکرد ماشین حفر تونل با سه روش استفاده شده است. مقدار پارامترهای ورودی مدل‌ها به صورت تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده و در روش مونت کارلو با تولید داده‌های تصادفی، بازه نرخ پیشروی با ۹۵ درصد قطعیت محاسبه خواهد شد. در روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور، از میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای ورودی استفاده می‌شود. همچنین نرخ پیشروی با روش تحلیل قطعی نیز محاسبه خواهد شد. در این روش از مقدار میانگین پارامترها در مدل‌های مختلف استفاده شده و مقدار نرخ پیشروی محاسبه می‌شود. سپس مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی مونت کارلو با مقدار واقعی نرخ پیشروی در هر واحد زمین‌شناسی، نتایج سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور و نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل قطعی انجام می‌پذیرد. همچنین با انجام تحلیل حساسیت^۱، تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی مدل‌های مختلف بر نرخ نفوذ بررسی خواهد شد.

۵-۱- ساختار پایان‌نامه

به طور کلی مطالب این پایان‌نامه شامل ۶ فصل است.

فصل اول- در این فصل ضرورت انجام تحقیق در مورد پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع

¹ Sensitivity Analysis

تونل، روش انجام تحقیق و پیشینه مطالعات ارائه شده است.

فصل دوم- در این فصل به معرفی روش‌های قطعی و احتمالاتی، انواع روش‌های احتمالاتی در مسائل ژئوتکنیک و تحلیل حساسیت پرداخته شده است.

فصل سوم- در این فصل به معرفی پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین، انواع مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین پرداخته شده است.

فصل چهارم- در این فصل مشخصات زمین‌شناسی، پارامترهای ژئومکانیکی و اطلاعات ماشین مورد استفاده در پروژه قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان تونل تشریح داده شده است.

فصل پنجم- در این فصل نرخ پیشروی ماشین حفر تونل قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و تحلیل قطعی بر اساس روابط مدل‌های Q_{TBM} و NTNU و CSM، حسن‌پور و فرخ پیش‌بینی شده است. همچنین مدل‌های پیش‌بینی نرخ پیشروی و روش‌های احتمالاتی استفاده شده، با مقدار واقعی نرخ پیشروی در هر واحد زمین‌شناسی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همچنین تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های استفاده شده، انجام شده است.

فصل ششم- نتایج نهایی به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر اساس روابط مدل‌های استفاده شده و نتایج مقایسه روش‌های مختلف با همدیگر و با مقدار واقعی نرخ پیشروی در پروژه قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان ارائه شده است.

فصل دوم

روش‌های قطعی و احتمالاتی

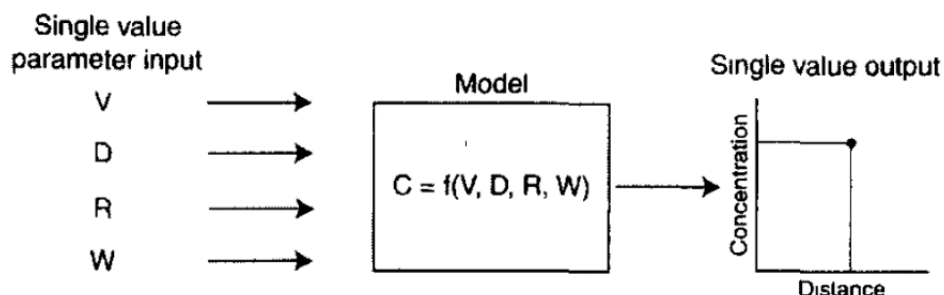
۱-۲- مقدمه

روش‌های مختلفی برای تحلیل مسائل مهندسی وجود دارد. همانند تمام علوم در موضوعات مرتبط با مهندسی، عدم قطعیت‌هایی وجود دارند که باید برای حصول نتایج قابل قبول به نحو مطلوب مورد ملاحظه قرار گیرند. این عدم قطعیت‌ها به خصوص در مباحث مهندسی ژئوتکنیک ملموس‌تر است، که اغلب به علت خطاهای آزمایشگاهی، کمبود داده‌ها، عدم یکنواختی خصوصیات و بعضاً کمبود دانش کافی برای مدل کردن مساله ایجاد می‌شوند.

عدم قطعیت‌ها و تغییرات در داده‌های به دست آمده از محیط‌های طبیعی مثل خواص ژئومکانیکی وجود دارد؛ بنابراین یک روش طراحی قابل اعتماد باید قادر به در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها باشد. برای بررسی اثر عدم قطعیت‌ها یک ابزار آماری-احتمالاتی که اجازه گسترش عدم قطعیت پارامترهای ورودی را به معیار طراحی می‌دهد، مورد نیاز است. در این فصل به معرفی روش‌های تحلیل قطعی و احتمالاتی پرداخته شده است.

۲-۲- روش‌های قطعی

روش‌های تحلیل قطعی، یکی از روش‌های تحلیل مسائل مهندسی بوده و معمولاً زمانی که عدم قطعیت در داده‌ها وجود نداشته باشد، کاربرد دارد. همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، تحلیل قطعی شامل یک مدل ریاضی است که در رابطه بین پارامتر هدف و پارامترهای ورودی، به هر پارامتر موثر تنها یک مقدار عددی اختصاص داده می‌شود و نتایج خروجی بر اساس داده‌های برداشت شده، به صورت یک مقدار مشخص ارائه می‌شوند. در برآورد قطعی معمولاً از مقدار میانگین پارامترها استفاده می‌شود [۴]. شکل (۱-۲) یک طرح از روش تحلیل قطعی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۲: طرح روش تحلیل قطعی [۲۵]

۳-۲- 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 [۲۶].

مورگنسترن^۱ عدم قطعیت‌های موجود در ژئوتکنیک را به سه گروه عمده تقسیم‌بندی نموده است:

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

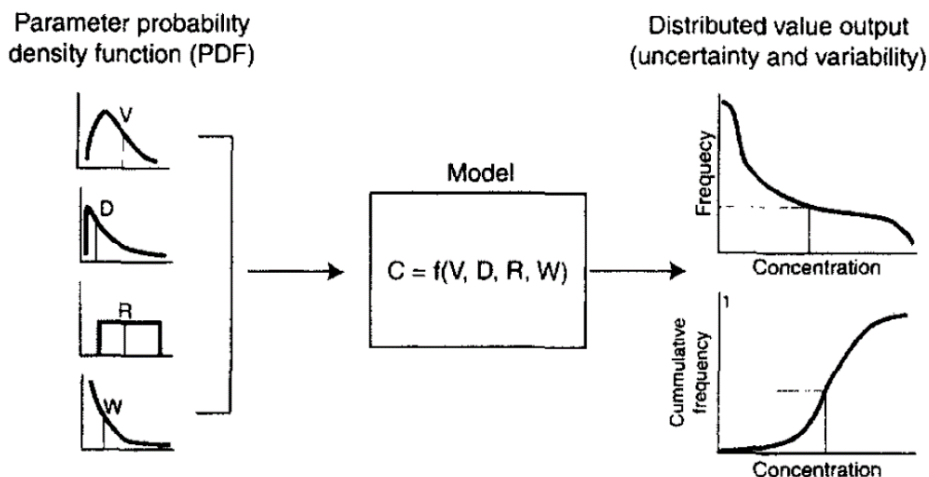
عدم قطعیت پارامتری عبارت است از عدم قطعیت در داده‌های ورودی تحلیل، عدم قطعیت مدل‌سازی، ناشی از محدودیت تئوری‌ها و مدل‌های مورد استفاده جهت پیش‌بینی عملکرد یک سازه ژئوتکنیکی بوده و عدم قطعیت انسانی مربوط به خطاها و اشتباهات انسانی می‌شود. به دلیل وقوع حتمی عدم قطعیت در تمام مسائل ژئوتکنیک، خروجی تحلیل همه آنها نیز دارای عدم قطعیت است [۲۷].

عوامل رایج عدم قطعیت در مهندسی سنگ شامل متغیر بودن زمانی و مکانی خواص سنگ،

¹ Morgenstern

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 [۲۸].

شکل (۲-۲) یک طرح از روش تحلیل احتمالاتی را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، پارامترهای ورودی به صورت تابع توزیع احتمال بوده و پس از جایگذاری در مدل ریاضی، خروجی نیز به صورت تابع توزیع احتمال بدست آمده است.



شکل ۲-۲: طرح روش تحلیل احتمالاتی [۲۵]

برای توصیف عدم قطعیت یک پارامتر، یک تابع یا یک مدل از مشخصه‌های مختلفی استفاده می‌شود. همانطور که بیان شد، عدم قطعیت مدل‌ها یا توابع، عموماً از عدم قطعیت پارامترهای موثر 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 [۲۹].

از روش‌های احتمالاتی می‌توان روش‌های تخمین نقطه‌ای^۱، سری تیلور^۲ و روش شبیه‌سازی مونت کارلو^۳ 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 لاگ نرمال 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 TBM مورد استفاده قرار گرفته، که در بخش (۱-۲) به مطالعات انجام شده اشاره شد. یکی از مزایای روش شبیه‌سازی مونت کارلو این است که به نوع توزیع احتمال پارامترهای بستگی ندارد و تابع توزیع احتمال هدف، با جزئیات بیشتر قابل مشاهده است که این ویژگی در دو روش روش احتمالاتی وجود ندارد و این می‌تواند به عنوان دلیلی برای عدم استفاده از این دو روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور در مسائل مربوط به تخمین نرخ نفوذ و هزینه باشد.

۲-۳-۱- روش تخمین نقطه‌ای

روش‌های برآورد نقطه‌ای بر مشکلات مرتبط با عدم دانش کامل از توابع احتمال متغیرهای تصادفی غلبه کرده‌اند؛ از آن جا که این توابع، تنها با استفاده از چند مقدار اول آماری خود (به عنوان مثال میانگین، واریانس و انحراف معیار) تقریب زده می‌شوند، بنابراین سطح کمتری از اطلاعات داده‌ها مورد نیاز است.

¹ Point Estimate Method

² Taylor series

³ Monte Carlo Simulation (MCS)

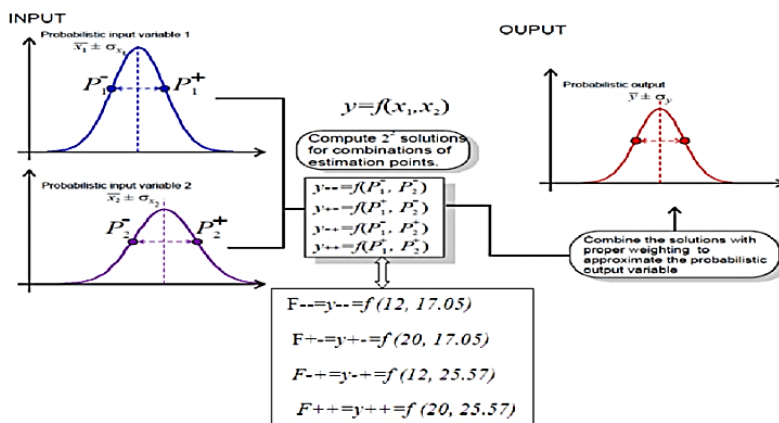
اولین روش برآورد نقطه‌ای توسط روزنبلت^۱ در سال ۱۹۷۵ [۳۰] برای متغیرهای متقارن و بعدها در سال ۱۹۸۱ [۳۱] با در نظر گرفتن متغیرهای نامتقارن توسعه داده شد. از آن زمان به بعد، روش‌های متعددی برای بهبود روش اصلی روزنبلت ارائه شده است. هنگامی که تعداد متغیرهای تصادفی ورودی بالا باشد، اغلب روش اصلی روزنبلت و همچنین روش‌های برآورد نقطه‌ای با تعداد نقاط زیاد که بر اساس رویکرد روزنبلت اصلی هستند، مناسب نیستند؛ چرا که تعداد شبیه‌سازی آنها می‌تواند بیشتر باشد [۳۲]. اصول محاسبه روش تخمین دو نقطه‌ای در شکل (۳-۲) نمایش داده شده است. مقادیر متوسط و انحراف استاندارد تابع عملکرد بر اساس روابط (۱-۲) و (۲-۲) تعیین می‌شوند [۳۳]:

$$\mu_F = \sum_{i=1}^{2^n} w_i \times f_i \quad (1-2)$$

$$\sigma_F^2 = \left(\sum_{i=1}^{2^n} w_i \times f_i^2 \right) - \mu_F^2 \quad (2-2)$$

در روابط (۱-۲) و (۲-۲)، f_i تابع عملکرد و w_i وزن در سعی i -ام هستند. w_i بر اساس رابطه (۳-۲) تعیین می‌شود:

$$w_i = \frac{1 + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \rho_{jk} \times A}{2^n} \quad j \neq k \quad (3-2)$$



شکل ۳-۲: اصول محاسبه روش تخمین دو نقطه‌ای [۳۴]

¹ Rosenblueth

در رابطه (۳-۲)، ρ_{jk} همبستگی بین هر دو پارامتر و A دارای مقدار ۱ و -۱ است. برای محاسبه مقدار A ، از دو ماتریس با عنوان ماتریس پارامتر و ماتریس همبستگی می‌توان استفاده کرد. ماتریس پارامتر را می‌توان به صورت ماتریس باینری نیز بیان کرد که شامل 2^n سطر (دنباله) و n ستون (تعداد متغیرها) است. ماتریس پارامتر برای سیستم سه متغیره در شکل (۴-۲) نمایش داده شده است.

	Variable 1	Variable 2	Variable 3
Trail 1	1	1	1
Trail 2	1	1	0
Trail 3	1	0	1
Trail 4	1	0	0
Trail 5	0	1	1
Trail 6	0	1	0
Trail 7	0	0	1
Trail 8	0	0	0

شکل ۴-۲: ماتریس پارامتر در روش روزنبلت برای سیستم سه‌متغیره [۳۳]

برای محاسبه A به این صورت عمل می‌شود که اگر دو متغیر در ماتریس پارامتر یکسان باشند (هر دو ۱ یا هر دو صفر)، A برابر با +۱ و اگر دو متغیر غیر یکسان باشند (یکی صفر و دیگری ۱)، A برابر با -۱ می‌شود. ماتریس همبستگی برای سیستم سه متغیره در شکل (۵-۲) نمایش داده شده است.

	Variable 1-2	Variable 1-3	Variable 2-3
Trail 1	1	1	1
Trail 2	1	-1	-1
Trail 3	-1	1	-1
Trail 4	-1	-1	1
Trail 5	-1	-1	1
Trail 6	-1	1	-1
Trail 7	1	-1	-1
Trail 8	1	1	1

شکل ۵-۲: ماتریس همبستگی در روش روزنبلت برای سیستم سه‌متغیره [۳۳]

۲-۳-۲- روش سری تیلور

روش سری تیلور به منظور برآورد گشتاورهای تابع عملکرد استفاده می‌شود. این روش بر پایه بسط سری‌های تیلور تابع عملکرد در اطراف یک نقطه قرار دارد. این بسط می‌تواند در اطراف مقادیر مورد انتظار متغیرهای تصادفی انجام شود. روش سری‌های تیلور، روش گشتاور دوم مرتبه اول نیز نامیده می‌شود، زیرا فقط عبارات مرتبه اول (خطی) سری‌های تیلور نگه داشته شده و فقط دو گشتاور اول

(میانگین و انحراف معیار) در نظر گرفته می‌شود. اگر تابع عملکرد به صورت رابطه (۴-۲) در نظر گرفته شود، بسط تیلور برای تابع عملکرد حول مقادیر میانگین متغیرهای تصادفی در حالت کلی به صورت رابطه (۵-۲) خواهد بود [۳۵]:

$$Y = g(X_i) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (۴-۲)$$

$$Y = g(\mu_x) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial X_i} (X_i - \mu_{X_i}) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} (X_i - \mu_{X_i})(X_j - \mu_{X_j}) + \dots \quad (۵-۲)$$

با صرف نظر کردن از سایر جملات بسط فوق، میانگین و واریانس تابع عملکرد به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\mu_Y \approx g(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (۶-۲)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial X_i \partial X_j} Cov(X_i, X_j) \quad (۷-۲)$$

$Cov(X_i, X_j)$ ، کواریانس دو متغیر X_i و X_j است. در صورتی که متغیرهای تصادفی مستقل باشند، واریانس تابع عملکرد به صورت رابطه (۸-۲) خواهد بود:

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)^2 Var(X_i) \quad (۸-۲)$$

۳-۳-۲- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

عبارت مونت کارلو یک واژه بسیار عمومی است. روش‌هایی که در این گروه قرار می‌گیرند، از فنون آمار و احتمالات استفاده می‌کنند. این روش در همه علوم از فیزیک هسته‌ای گرفته تا ژنتیک و اقتصاد، کاربرد پیدا کرده است. البته، شیوه‌هایی که این علوم در بکارگیری روش‌های مونت کارلو دارند، بسیار متفاوت از یکدیگر است؛ اما همگی یک وجه تشابه دارند، یعنی تمامی آنها از اعداد تصادفی برای آزمون و شبیه‌سازی یک پدیده طبیعی و حقیقی بهره می‌برند. بنابراین، برای اینکه به یک آزمون عنوان مونت کارلو اطلاق شود، کافی است مشاهده گردد که در آن از شیوه‌های خلق اعداد تصادفی استفاده شده است یا خیر [۳۶].

روش مونت کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. از طرف دیگر روش مونت کارلو یک طبقه از الگوریتم‌های محاسبه‌گر است که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرار شونده‌ی تصادفی اتکاء می‌کند. به دلیل اتکای آنها بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی یا تصادفی کاذب، روش‌های مونت کارلو اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش‌های مونت کارلو زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد. به عبارت دیگر روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی پدیده‌هایی که عدم قطعیت زیادی در ورودی آنها وجود دارد، استفاده می‌شود [۳۷]. روش شبیه‌سازی مونت کارلو ابتدا توسط متروپولیس^۱، اولام^۲ و نویمان^۳ در سال ۱۹۴۹ برای تشریح پتانسیل برهم کنش مولکول‌های ترکیبات گازی اورانیم استفاده شده در ساخت بمب اتم در خلال جنگ جهانی دوم (پروژه منهتن) استفاده شد. در آن زمان دستگاه‌های محاسباتی سریع مکانیکی الکترونیکی (که بعدها رایانه نام گرفت) ارائه و اولین نسل ماشین محاسبه سریع بنام MANIAC در خدمت این گروه قرار گرفت.

علاقه شدید اولام ریاضیدان به بازی‌های بر مبنای شانس، این ایده را مطرح کرد که آیا می‌توان رفتار فرایند مورد بررسی را به کمک رخداد‌های تصادفی تشریح کرد. هنگامی که مشغول گذراندن تعطیلات و اوقات فراغت در تفریحگاه‌های منطقه مونت کارلو بود، به ابداع این روش و جزئیات آن پرداخت. در مجموعه‌ای از مقالات ارائه شده توسط این گروه پس از اتمام جنگ، ضمن معرفی روش، نکات مختلف آن تشریح و پشتوانه ریاضی آن ارائه و کاربرد آن در حل مسائل مربوط به پروژه منهتن معرفی شد. بدین ترتیب، نام مونت کارلو بر این روش اطلاق شد [۳۸].

¹ Metropolis

² Ulam

³ Neumann

۲-۳-۱- مراحل روش شبیه‌سازی مونت کارلو

گام‌های اساسی در روش شبیه‌سازی مونت کارلو به شرح زیر است [۳۹]:

گام ۱: تعریف مدل ریاضی

رابطه ریاضی میان پارامتر هدف و عوامل مؤثر بر آن پارامتر که به آنها وابسته است، مشخص

می‌شود (رابطه (۲-۹)):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (۲-۹)$$

گام ۲: اختصاص توابع چگالی احتمال به کمیت‌های ورودی

بر اساس دانش و اطلاعات در دسترس، توابع چگالی احتمال به کمیت‌های ورودی اختصاص داده

می‌شود.

گام ۳: بدست آوردن توابع چگالی احتمال کمیت خروجی

توابع چگالی احتمال کمیت‌های ورودی از طریق مدل تعیین شده، به منظور بدست آوردن تابع

چگالی احتمال کمیت خروجی، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو انتشار می‌یابند. بدین منظور

بر اساس توابع چگالی احتمال مشخص شده در گام قبلی برای هر یک از کمیت‌های ورودی، تعدادی

زیادی اعداد تصادفی (n بار) مطابق با تابع توزیع آنها ایجاد می‌شود. اعداد تصادفی ایجاد شده برای هر

یک از کمیت‌های ورودی در مدل ریاضی سیستم اندازه‌گیری قرار داده می‌شود و بر اساس آن n مقدار

برای متغیر خروجی بدست می‌آید. در نهایت بر اساس مقادیر بدست آمده، تابع چگالی احتمال متغیر

خروجی بدست می‌آید [۳۹].

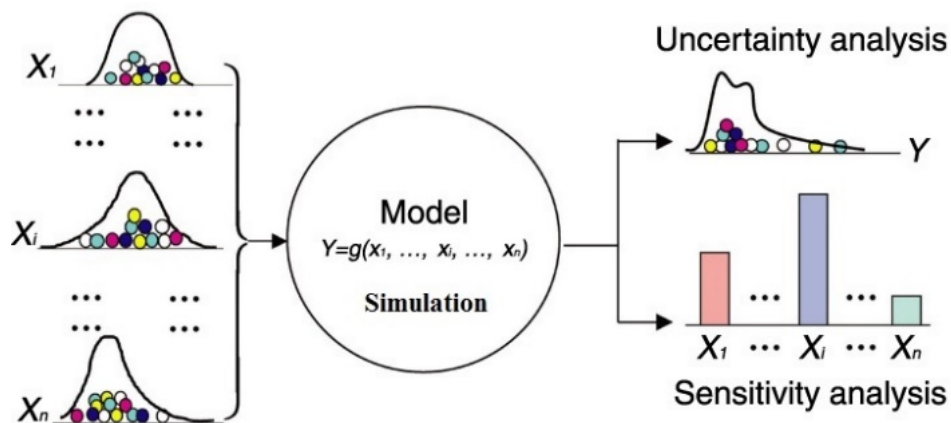
گام ۴: تعیین عدم قطعیت پارامتر هدف

در این مرحله با استفاده از تابع چگالی احتمال تعیین شده برای کمیت خروجی، امید ریاضی و

انحراف استاندارد و فاصله اطمینانی که در برگیرنده با احتمالی مشخص شده است یا همان احتمال

پوشش، تعیین می‌شود [۳۹]. چارچوب کلی محاسبه عدم قطعیت به روش شبیه‌سازی مونت کارلو در

شکل (۲-۶) نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶: چارچوب کلی محاسبه عدم قطعیت با روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۴۰]

۲-۳-۳-۲- توابع توزیع احتمال

در روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده از تابع توزیع احتمال^۱ اهمیت بسیار ویژه‌ای دارد یک تابع توزیع احتمال به ازای یک مقدار عددی تصادفی (x) در یک دامنه مشخص به طور پیوسته یا گسسته، مقدار احتمال رخداد آن را بصورت $f(x, t)$ به دست می‌دهد، که در آن t بیانگر وجود پارامترهای موثر در تابع توزیع است. افزون بر این، از انتگرال تابع توزیع به عنوان تابع توزیع تجمعی^۲ و برای بررسی و ارزیابی عملکرد الگوریتم مونت کارلو نیز استفاده می‌شود. به ازای تابع توزیع $f(x)$ مقدار تابع توزیع تجمعی به حالت انتگرال روی تمام دامنه به شکل رابطه (۲-۱۰) تعریف می‌شود:

$$F(x) = \int_a^x f(t) dt \quad (۲-۱۰)$$

به طور کلی، $f(x)$ مبین شانس یا احتمال یک رخداد به ازای یک مقدار تصادفی و $F(x)$ مبین شانس یا احتمال رخداد تمام رویدادها به ازای دامنه تصادفی ($0 < x < 1$) است. تابع توزیع در علم آمار و احتمال به دو حالت تعریف می‌شود: الف) حالت گسسته ب) حالت پیوسته. در حالت گسسته، تابع توزیع بیانگر احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی بوده و در حالت پیوسته احتمال قرار گرفتن متغیر در یک بازه معین تعریف می‌شود [۳۸]. شماری از توابع توزیع احتمال پیوسته متداول در آمار و

^۱ Probability Distribution Function

^۲ Cumulative Distribution Function

احتمالات در جدول (۱-۲) آورده شده است.

۲-۳-۳-۳- اعداد تصادفی

هسته اصلی هر روش شبیه‌سازی تصادفی یا روش‌مونت‌کارلو بر مبنای استفاده مدام از اعداد تصادفی است. طبق تعریف ریاضی عدد تصادفی، عددی است که کاملاً شانسی و بدون در نظر گرفتن قواعد خاصی معین می‌شود. در رایانه معمولاً اعداد تصادفی بر مبنای قواعد ماشین تهیه می‌شود. بدین معنی که بر مبنای استفاده از فرمول‌های ریاضی خاص تولیدکننده اعداد، در هر بار فراخوان، یک عدد حقیقی در دامنه بین صفر و یک تولید می‌شود. به این نوع اعداد شبه تصادفی^۱ و به برنامه تولید آنها مولد اعداد تصادفی^۲ می‌گویند. امروزه، الگوریتم‌های بسیار متعدد و پیچیده برای ارائه و تولید اعداد تصادفی با اطمینان مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که اعداد بر مبنای فرمول ریاضی تولید می‌شوند، لازم است اطمینان حاصل شود که دنباله اعداد تولید شده تکراری نباشد [۳۸]. این مسئله به معنای تضمین برای تولید احتمال یکسان برای اتفاقات متوالی است. امروزه مولدهای اعداد تصادفی آن قدر پیشرفت کرده‌اند که دنباله اعداد پس از 10^{28} تولید یا فراخوان، ممکن است تولید عدد تصادفی مشابه کند [۳۸].

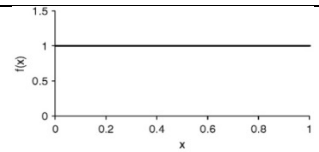
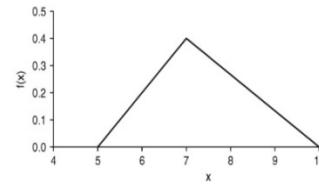
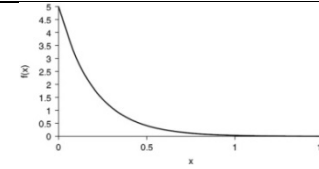
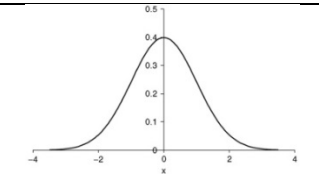
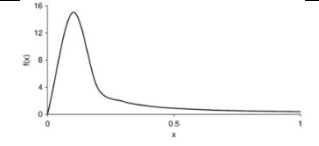
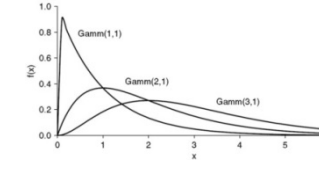
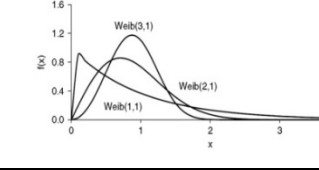
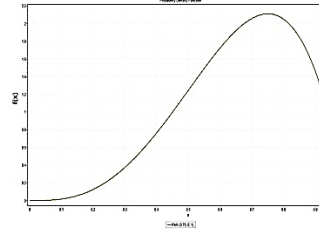
۲-۳-۳-۴- تبدیل اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت به سایر توزیع‌ها

تولید اعداد تصادفی که در بخش قبل ذکر شد مبنای اطلاعات ورودی موردنیاز برای شبیه‌سازی مونت‌کارلو است. گاهی این اعداد را می‌توان مستقیماً در برخی از مسائل شبیه‌سازی بکار برد و در برخی دیگر از مسائل باید قبل از کاربرد در مسئله شبیه‌سازی به سایر توزیع‌های غیریکنواخت تبدیل نمود.

¹ Pseudo - Random Number

² Random Number Generator

جدول ۱-۲: برخی از توابع توزیع احتمال پیوسته [۴۱]

نام توزیع	پارامترهای ورودی	تابع چگالی احتمال	شکل تابع
Uniform	Unif(a,b)	$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$	
Triangular	Tria(a,c,b)	$f_X(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{if } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{if } c \leq x \leq b \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$	
Exponential	Expo(λ)	$f_X(x) = \lambda e^{-\lambda x} \cdot x \geq 0$	
Normal	Norm(μ, σ²)	$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ $-\infty < x < +\infty$	
Lognormal	Logn(μ, σ)	$f_X(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ $x > 0$	
Gamma	Gamm(α, β)	$f_X(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \cdot x > 0$	
Weibull	Weib(α, β)	$f_X(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right)$ $x > 0$	
Pert	Pert(a, m, b)	$f_X(x) = \frac{1}{B(\alpha_1, \alpha_2)} \frac{(x-a)^{\alpha_1-1} (b-x)^{\alpha_2-1}}{(b-a)^{\alpha_1+\alpha_2-1}}$ $\alpha_1 = \frac{4m+b-5a}{b-a}$ $\alpha_2 = \frac{5b-a-4m}{b-a}$ $a < x < b$	

۲-۳-۵- تعیین تعداد تکرار مورد نیاز برای شبیه‌سازی مونت کارلو

تحلیل احتمالاتی که از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده می‌کند، شامل تعداد زیادی مرحله اجرایی است. هر چه اجرای دنباله‌های بکار رفته در یک تحلیل بیشتر باشد، آمارها دقیق‌تر خواهند بود و تحلیلگر می‌تواند اطمینان کافی به نتایج گرفته شده داشته باشد. روش‌های مختلفی برای محاسبه تعداد تکرار مورد نیاز برای شبیه‌سازی مونت کارلو وجود دارد. یکی از پارامترهای مهم در این محاسبه سطح اطمینان^۱ است. منظور از سطح اطمینان، تعیین میزان شک یا یقینی است که نسبت به دربرگیری پارامتر توسط فاصله اطمینان وجود دارد. سطح اطمینان می‌تواند با رابطه (۲-۱۱) محاسبه شود [۴۲]:

$$CI = \left(\bar{x} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (11-2)$$

در رابطه (۲-۱۱)، \bar{x} میانگین نمونه، z مقدار مرتبط با سطح اطمینان در جدول توزیع نرمال استاندارد، S انحراف استاندارد نمونه و n تعداد نمونه‌ها است. جدول (۲-۲) ضریب اطمینان مربوط به چند سطح اطمینان را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲: مقدار z برای سطح اطمینان مختلف

Confidence Level %	۹۹/۷۵	۹۹	۹۸	۹۶	۹۵/۵	۹۵	۹۰	۸۰	۶۸	۵۰
Z_c	۳	۲/۵۸	۲/۳۳	۲/۰۵	۲	۱/۹۶	۱/۶۴۵	۱/۲۸	۱	۰/۶۷

با در نظر گرفتن سطح اطمینان مورد نظر، حداکثر خطا با رابطه (۲-۱۲) به دست می‌آید:

$$error_{max} = \frac{z_c S_x}{\sqrt{n}} \quad (12-2)$$

با انجام جابجایی در رابطه (۲-۱۲)، رابطه (۲-۱۳) برای محاسبه تعداد تکرار حاصل می‌شود:

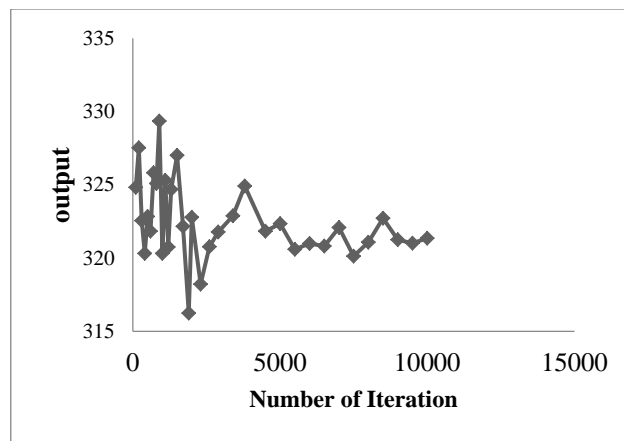
$$n = \left[\frac{z_c S_x}{E} \right]^2 \quad (13-2)$$

در رابطه (۲-۱۳)، n تعداد تکرارهای مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی با خطای معین (E) و انحراف نرمال استاندارد مطابق با سطح اطمینان مشخص (z_c) است. S_x نیز انحراف استاندارد پارامتر وابسته

^۱ Confidence Level

(خروجی) است. برای به دست آوردن انحراف استاندارد ابتدا شبیه‌سازی با تعداد ۱۰۰ تکرار انجام شده و تخمینی از انحراف استاندارد بدست می‌آید. با قرار دادن این مقدار تخمینی در رابطه (۲-۱۳)، حداقل تعداد تکرار مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی قابل محاسبه است.

روش دوم که برای محاسبه تعداد تکرار برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو وجود دارد، استفاده از نمودار همگرایی^۱ است. بدین صورت که با انجام شبیه‌سازی با تعداد تکرار مختلف، مقادیر مختلفی برای پارامتر خروجی به دست می‌آید. با دقت در نمودار همگرایی شکل (۲-۷)، می‌توان دید که بعد از تعداد تکرار مشخصی تغییرات در مقدار پارامتر خروجی کمتر می‌شود. این تعداد تکرار، همان تعداد تکرار بهینه است.



شکل ۲-۷: تعداد تکرار مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو [۴۳]

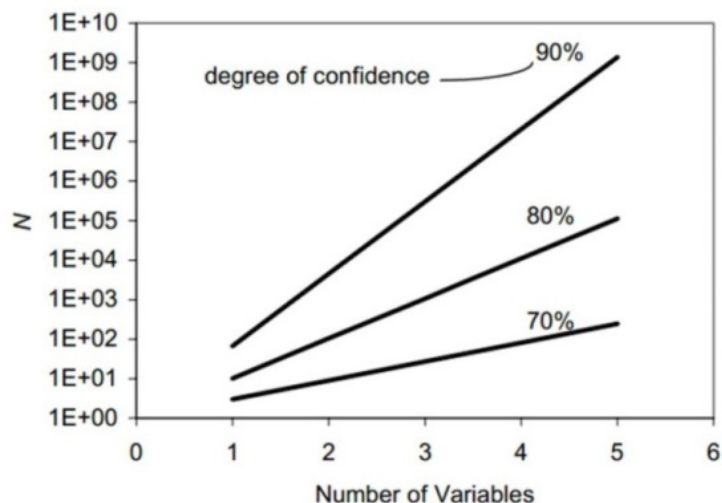
همچنین روش سومی نیز برای محاسبه تعداد تکرارهای موردنیاز برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو وجود دارد که به ضریب اطمینان و تعداد متغیرهای موجود و یا در نظر گرفته شده بستگی دارد و به صورت رابطه (۲-۱۴) تعریف می‌شود [۴۴]:

$$N_{mc} = \left[\frac{d^2}{4(1 - \varepsilon)^2} \right]^m \quad (۲-۱۴)$$

در رابطه (۲-۱۴)، N_{mc} تعداد دنباله‌های مونت کارلو، d انحراف نرمال استاندارد مطابق با سطح اطمینان، ε سطح اطمینان مورد نظر (۰ تا ۱۰۰ درصد) به شکل اعشاری و m تعداد متغیرها است.

^۱Convergence

رابطه (۲-۱۴) به صورت نموداری در شکل (۲-۸) نمایش داده شده است. همانگونه که از شکل (۲-۸) پیداست، تعداد دنباله‌های مونت کارلو بصورت تصاعد هندسی با افزایش ضریب اطمینان و تعداد متغیرها افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۸: تعداد آزمون‌های مورد نیاز مونت کارلو بر اساس سطح اطمینان و تعداد متغیرها [۴۴]

۲-۴- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، مطالعه تاثیرپذیری متغیر خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری است. به عبارت دیگر روشی برای تغییر دادن ورودی‌های یک مدل به صورت سازمان یافته است که بتوان تاثیرات این تغییر را در خروجی مدل پیش‌بینی کرد. تحلیل حساسیت می‌تواند باعث درک بهتر ارتباط بین پارامترهای ورودی با متغیر خروجی، کمک به پیدا کردن خطاهای مدل ناشی از ارتباط غیر قابل انتظار بین ورودی و خروجی و ساده‌سازی روابط و ثابت کردن پارامترهای بی‌تاثیر در مدل شود.

تاکنون روش‌های متنوعی برای تحلیل حساسیت ارائه شده است. روش‌های تحلیل حساسیت از نظر روش‌های آماری، ریاضی و گرافیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. ساده‌ترین شکل تحلیل حساسیت، تغییر یک متغیر، با ثابت نگه داشتن سایر متغیرها و بررسی تاثیر تغییر بر نتایج مدل است. این روش

به عنوان تحلیل حساسیت یک طرفه^۱ شناخته شده است. از آنجا که در این روش تنها یک پارامتر است که تغییر می‌کند، حساسیت مدل به آن پارامتر مشخص خواهد شد؛ البته در دفعات بعد تحلیل بر روی پارامترهای دیگر می‌تواند انجام شود و حساسیت مدل به هر کدام از پارامترها با هم مقایسه شود. تجزیه و تحلیل حساسیت یک طرفه در نشان دادن تاثیر یک پارامتر در مدل مفید است؛ بعضی مواقع لازم است که تاثیر تغییر دو یا چند پارامتر به صورت همزمان بررسی شود. تحلیل حساسیت چند وجهی^۲ این امکان را فراهم می‌کند که تاثیر تغییر ترکیب‌های احتمالی پارامترهای تاثیرگذار، در دامنه تغییرات آن‌ها ارزیابی شود. لازم به ذکر است که تفسیر و نمایش تحلیل حساسیت چند وجهی با افزایش تعداد پارامترها پیچیده و مشکل خواهد شد.

در روش تحلیل حساسیت احتمالی، به جای اختصاص دادن یک مقدار مشخص به هر پارامتر، یک توزیع برای تمام پارامترهای موجود در مدل اختصاص داده می‌شود. این توزیع یا با برآزش یک تابع روی داده‌های استفاده شده در مدل و یا با داشتن میانگین، انحراف معیار و شکل گسترش داده‌ها به ورودی‌های مدل نسبت داده می‌شود. در این روش، مشابه روش چند وجهی، تاثیر همزمان پارامترها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مقادیر ورودی مدل از تابع توزیع احتمالی آن‌ها انتخاب و حساسیت مدل نسبت به تغییر هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌شود [۳].

۲-۵- جمع‌بندی

تغییرپذیری ویژگی‌های سنگ، سهم عمده‌ای در عدم قطعیت تحلیل‌های 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. تجزیه و تحلیل عدم قطعیت یک چارچوب منظم برای کمی کردن عدم قطعیت‌های خروجی مدل تهیه می‌کند و با استفاده از آن می‌توان تاثیر پارامترهای ورودی و مدل را بر عدم قطعیت کلی خروجی مدل تعیین کرد. روش‌های تحلیل احتمالاتی مانند

¹ One-way sensitivity analysis

² Multiway sensitivity analysis

شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور برای تحلیل مسائل دارای عدم قطعیت استفاده می‌شوند که کاربرد این روش‌ها در مطالعات مختلف، در فصل ۱ بخش (۴-۱) تشریح شد. نتیجه خروجی مطالعات انجام شده با روش‌های احتمالاتی به صورت بازه و هیستوگرام است. تحلیل حساسیت می‌تواند به منظور بررسی تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر پارامتر خروجی یک مدل انجام پذیرد.

فصل سوم

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین

حفر تمام مقطع تونل

مدت زمان و هزینه‌های اجرا از پارامترهای کلیدی در موفقیت کاربرد ماشین حفر تونل است. از همان ابتدای استفاده از ماشین حفر تونل، اصلی‌ترین قسمت در تخمین هزینه و زمان پروژه، تخمین عملکرد ماشین در ساختگاه مورد نظر بوده است. با پیشرفت فناوری ساخت ماشین‌های حفر تونل، از ماشین حفر تمام مقطع تونل به عنوان یک جایگزین مناسب روش‌های سنتی، حتی در شرایط زمین‌شناسی پیچیده استفاده شده است. با گسترش استفاده از این ماشین‌ها، پیش‌بینی دقیق عملکرد ماشین امری حیاتی و مهم تلقی می‌شود.

برای پیش‌بینی عملکرد ماشین، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. این مدل‌ها به دو نوع مدل‌های نظری و تجربی تقسیم‌بندی شده‌اند. مدل‌ها و روابط اولیه پیشنهاد شده برای پیش‌بینی عملکرد ماشین ساده و عمدتاً بر پایه استفاده از تک پارامترهای موثر بر عملکرد بودند. تجربیات تونل‌های حفر شده کمک نمودند تا مدل‌های بعدی با استفاده از نتایج ثبت شده حین حفر تونل‌های قبلی ارائه شود. در این فصل، پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین و مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تونل که در تحقیق استفاده شده، تشریح شده است.

۳-۲- پارامترهای مربوط به عملکرد ماشین

به منظور ارزیابی عملکرد ماشین از شاخص‌های مختلفی استفاده شده است که از جمله آنها می‌توان نرخ نفوذ، ضریب بهره‌وری و نرخ پیشروی را نام برد.

۳-۲-۱- نرخ نفوذ

یکی از پارامترهای مهم تعیین‌کننده عملکرد ماشین حفار، نرخ نفوذ است. نرخ نفوذ ماشین در تعریف، نسبت طول حفر شده تونل به زمان مفید حفر همان بخش از تونل بوده و معمولاً بر حسب میلی‌متر بر دور کله حفار یا به صورت متر بر ساعت بیان می‌شود. تعریف گفته شده را می‌توان به صورت رابطه (۳-۱) نشان داد [۴۶]:

$$ROP(m/h) = \frac{L_b(m)}{t_b(h)} \quad (1-3)$$

ROP نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، L طول حفر شده تونل و t زمان مفید حفر همان بخش از تونل بر حسب ساعت است. نرخ نفوذ را بر حسب عمق نفوذ برش دهنده در هر دور چرخش کله حفاری با علامت PR نیز می‌توان به شکل رابطه (۲-۳) تعریف کرد:

$$PR(mm/rev) = \frac{ROP(m/h) \times 1000}{60 \times RPM} \quad (2-3)$$

PR نرخ نفوذ برش دهنده بر حسب میلیمتر در هر دور چرخش کله حفار، ROP نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت و RPM سرعت چرخش کله حفار بر حسب دور بر دقیقه است.

۲-۲-۳- ضریب بهره‌وری

همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، یکی از عوامل مهم در تصمیم‌گیری مدیران پروژه و مهندسان طراح در مرحله مطالعات امکان‌پذیری، ضریب بهره‌وری ماشین حفر تونل است. ضریب بهره‌وری به صورت زمان حفر ماشین به زمان شیفت تعریف می‌شود. استقرار مجدد دیوار گیرها، نصب سیستم نگهدارنده و فعالیت‌های زمان‌بر دیگر (نظیر برنامه نگهداری و تعمیرات^۱، تعویض برش‌دهنده‌ها و غیره) و تاخیرات ناخواسته (نظیر قطع برق، تاخیر در تخلیه، خرابی ماشین و غیره) متوسط نرخ نفوذ را تا حد زیادی کاهش می‌دهند. این کاهش که تحت عنوان ضریب بهره‌وری متوسط ماشین حفر تونل تعریف می‌شود، می‌تواند بین صفر تا بیش از ۵۵ درصد تغییر نماید. بنابراین بهره‌وری یک ماشین وابستگی زیادی به تاخیرات ناشی از نصب سیستم نگهدارنده، تعمیرات ماشین، تعویض کاترها، ترابری داخل تونل، کیفیت ساخت ماشین، نگهداری و تعمیرات به موقع و همچنین مدیریت پروژه دارد [۴۵]. همانطور که گفته شد، ضریب بهره‌وری عبارت است از نسبت زمان خالص حفاری به یک بازه زمان مشخص و با رابطه (۳-۳) تعریف می‌شود:

¹ Maintenance

$$U(\%) = \frac{t_b}{t} \quad (3-3)$$

۳-۲-۳- نرخ پیشروی

نرخ پیشروی به صورت میزان پیشروی در مدت معین تعریف می‌شود و ممکن است برحسب متردرشیفت، متردرروز یا متردرماه یا ساعت بیان شود. برای تعیین نرخ پیشروی ماشین در هر مقطع از تونل، می‌توان از رابطه (۳-۴) استفاده کرد [۴۶]:

$$AR (m/h) = \frac{L(m)}{t(h)} \quad (4-3)$$

در رابطه (۳-۴)، AR نرخ پیشروی بر حسب متر در روز، L طول مقطع حفر شده بر حسب متر و t زمان‌های کاری^۱ بر حسب ساعت بوده و شامل فعالیت‌هایی نظیر حفاری، استقرار مجدد دیوار گیرها^۲ و نصب نگهداری (در ماشین‌های باز^۳) و زمان مورد نیاز برای نصب سگمنت‌ها (در ماشین‌های سپردار^۴) می‌شود که برای تکمیل یک سیکل پیشروی لازم است. زمان‌های کاری همچنین شامل توقفات^۵ لازم برای تعمیر و نگهداری، تعویض برش‌دهنده‌ها، حفاری پیشرو و سایر فعالیت‌های کاری می‌شود. مجموع زمان‌های صرف شده برای فعالیت‌های مختلف معادل کل ساعات کاری در روز است که می‌تواند ۲۴ ساعت برای سه شیفت ۸ ساعته و یا ۲۰ ساعت برای دو شیفت ۱۰ ساعته باشد.

همانطور که بیان شد، نرخ پیشروی یک ماشین حفار به دو فعالیت اساسی تونل‌سازی شامل حفاری در سنگ و نصب سیستم نگهدارنده و دیگر فعالیت‌های زمان‌بر بستگی دارد. حفاری در سنگ، با پارامتر نرخ نفوذ توصیف می‌شود. با آگاهی از مقدار نرخ نفوذ واقعی می‌توان نرخ پیشروی متوسط را از طریق کاهش نرخ نفوذ بر اساس مقدار ضریب بهره‌وری به دست آورد. نرخ پیشروی از حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری ماشین طبق رابطه (۳-۵) به دست می‌آید [۴۶]:

¹ Working Time

² Regrip

³ Open TBMS

⁴ Shield TBMS

⁵ Downtime

$$AR (m/day) = 24 ROP (m/h) \times U (\%) \quad (5-3)$$

در رابطه (۵-۳)، AR نرخ پیشروی بر حسب متر بر روز، ROP نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت و U ضریب بهره‌وری دستگاه بر حسب درصد است.

۳-۳- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل

در طول چند دهه گذشته مدل‌های مختلفی جهت ارزیابی عملکرد ماشین حفاری معرفی و توسعه داده شده‌اند تا بتوانند یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد ماشین را با یک یا چند پارامتر ماشین و یا شرایط زمین مرتبط نمایند. تاکنون محققان زیادی مدل‌های تجربی و نظری برای پیش‌بینی عملکرد ماشین ارائه دادند. مدل‌ها به دو دسته نظری و تجربی تقسیم‌بندی شده‌اند.

در این تحقیق از مدل‌های NTNU، Q_{TBM}، CSM، CSM تصحیح شده با فاکتور تصحیح روش EMI، حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱) و فرخ و همکاران (۲۰۱۲) برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل استفاده شده است. دلیل انتخاب مدل‌های NTNU، Q_{TBM} و CSM، گستردگی پایگاه داده این مدل‌ها و استفاده در بیشتر مطالعات است. همچنین مدل فرخ و حسن‌پور، به دلیل وجود اطلاعات برخی از تونل‌های حفاری شده در ایران، در پایگاه داده این مدل‌ها، انتخاب شده‌اند. همچنین به دلیل در نظر گرفته نشدن اثر درزه‌داری در مدل CSM، از فاکتور تصحیح روش EMI برای در نظر گرفتن تاثیر درزه‌داری بر نرخ نفوذ محاسبه شده از مدل CSM و با عنوان مدل CSM اصلاح شده در تحقیق استفاده شده است.

۳-۳-۱- مدل‌های نظری

از آنجایی که اولین کاربردهای TBM در توده‌سنگ‌های تقریباً یکپارچه و سالم بوده است، مدل‌های نظری اولیه بر مبنای پارامترهای ماشین و معادلات تعادل نیرو و انرژی در حین برش پیشنهاد شده‌اند. بعضی از این مدل‌ها با رویکرد نیروی وارد بر برش‌دهنده و بعضی با رویکرد انرژی ویژه ارائه شده و معمولاً رابطه‌ای نظری میان پارامترهای سنگ با پارامترهای ماشین برقرار نموده‌اند. با

توجه به اساس ارائه، ضعف مهم این گونه مدل‌ها، در نظر نگرفتن پارامترهای تاثیرگذار ساختاری زمین (مانند خردشدگی و وضعیت دسته درزه‌ها در توده‌سنگ) است [۳]. یکی از مهم‌ترین این مدل‌ها CSM است.

۳-۱-۱-۳-۳ مدل CSM

نگارش اولیه این مدل توسط اوزدمیر^۱ در سال ۱۹۷۷ [۴۶] و اوزدمیر و میلر در سال ۱۹۷۸ [۴۷] در مدرسه معدن کلرادو ارائه شد. این محققین با در نظر گرفتن اثر فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و میزان نفوذ برش‌دهنده در سنگ و با فرض تشکیل تراشه‌ها بر اثر گسیختگی برشی در مجاورت برش‌دهنده‌ها، مدلی نظری را برای پیش‌بینی نیروهای برش در برش‌دهنده‌های V شکل، توسعه دادند. در واقع این مدل روابطی را برای تخمین نیروی مورد نیاز برای نفوذ برش‌دهنده (با ویژگی‌های هندسی مشخص) در سنگ با یک نرخ ثابت ارائه می‌دهد [۳]. این مدل در دهه ۹۰ توسط رستمی و اوزدمیر به روز شد [۴۸]. روابط ارائه شده، توسط رستمی در سال ۱۹۹۷ با فرض استفاده از برش‌دهنده‌های با سطح مقطع ثابت و بر اساس وقوع گسیختگی کششی در سنگ توسعه داده شده‌اند [۴۹]. برش‌دهنده‌های با مقطع ثابت امروزه کاربرد گسترده‌تری در ماشین‌های حفر تونل دارند و تقریباً می‌توان گفت استفاده از برش‌دهنده‌های V شکل منسوخ شده است. در مدل اصلاح شده، گسیختگی کششی در سنگ، بر اساس مشاهده انتشار و توسعه ترک‌های شعاعی از زون خردشده زیر لبه کاتر، در نظر گرفته شده است [۳].

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 توان) 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 که در شکل (۳-۱) نمایش داده

^۱ Özdemir

شده‌اند، از رابطه (۶-۳) به دست می‌آید [۴۸]:

$$F_t = \frac{T \cdot R \cdot P^0 \cdot \phi}{1 + \psi} \quad (6-3)$$

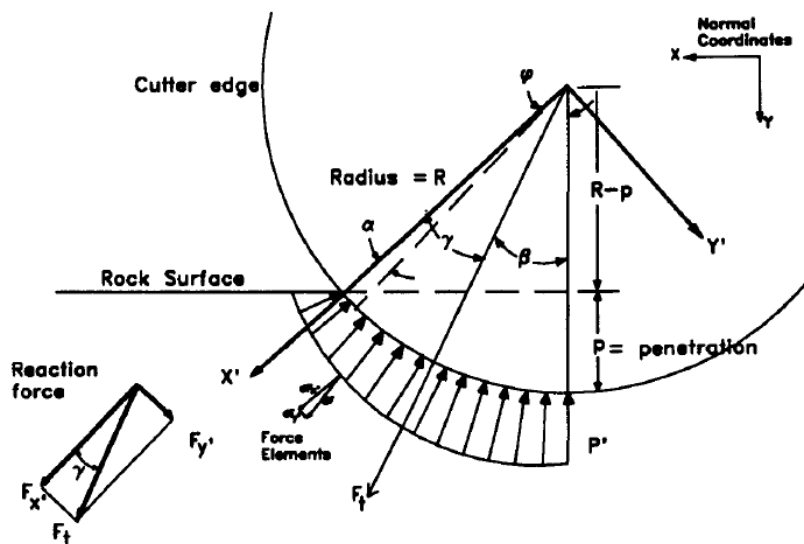
R شعاع برش دهنده (in)، T عرض لبه برش دهنده (in) و Ψ ثابت توزیع فشار که بین ۰/۲ تا -۰/۲ متغیر است. ϕ زاویه تماس بین سنگ و برش دهنده (rad) و P^0 فشار پایه (psi) است. از رابطه (۷-۳) برای محاسبه ϕ و رابطه (۸-۳) برای محاسبه فشار زون خردشده (P_r) استفاده می‌شود:

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{R - P}{R} \right) \quad (7-3)$$

$$P_r = P^0 \left(\frac{\alpha}{\phi} \right) \psi \quad (8-3)$$

در دو رابطه (۷-۳) و (۸-۳)، P^0 فشار پایه در زون خردشده در نقطه ای دقیقاً زیر برش دهنده و α زاویه موقعیت^۱ است. T و R پارامترهای مربوط به شکل هندسی برش دهنده بوده که از قبل معلوم هستند. زاویه ϕ نیز با معلوم بودن میزان نفوذ برش دهنده (p) در سنگ قابل محاسبه است.

فشار پایه (P^0) را نیز می‌توان با رابطه (۹-۳) که توسط رستمی [۴۹] بر اساس خصوصیات سنگ و فاصله برش دهنده‌ها و با استفاده از روش‌های آماری ارائه شده، محاسبه کرد.



شکل ۳-۱: شکل عمومی توزیع فشار و نیروها در زیر برش دهنده [۴۹]

¹ Position angle

$$P^0 = 2.12 \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c^2 \cdot \sigma_t}{\phi \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \quad (9-3)$$

در رابطه (۹-۳)، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ (psi)، σ_t مقاومت کششی سنگ (psi)، S فاصله‌داری برش دهنده (in) و C ثابتی که با توجه به نتایج آزمون‌های برش خطی در حدود ۲/۱۲ است. ثابت کاتر از رابطه (۳-۱۰)، نیروی عمودی از رابطه (۳-۱۱) و غلتشی از رابطه (۳-۱۲) با معلوم بودن F_t و زاویه ϕ قابل محاسبه هستند [۴۸]:

$$C_c = \frac{F_r}{F_n} \quad (10-3)$$

$$F_n = F_t \cos \beta \quad (11-3)$$

$$F_r = F_t \sin \beta \quad (12-3)$$

$$\frac{F_r}{F_n} = \tan \beta = \tan\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (13-3)$$

در این مدل گام‌های زیر برای پیش‌بینی عملکرد TBM دنبال می‌شود [۵۰]:

۱- محاسبه نیروی پیشران مورد نیاز

$$T_h^* = \sum_1^N F_n = N F_n \quad (14-3)$$

۲- محاسبه گشتاور کل

$$T_q^* = \sum_1^N F_{ri} \cdot R_i \approx 0.3 \cdot D_{TBM} \cdot N \cdot F_r \quad (15-3)$$

۳- محاسبه سرعت دوران کله حفاری

$$RPM = \left(\frac{V}{\pi \cdot D_{TBM}} \right) \quad (16-3)$$

۴- محاسبه توان مورد نیاز

$$HP^* = \frac{T_q \cdot RPM}{K} \quad (17-3)$$

۵- گشتاور و توان نهایی نصب شده با مشخص بودن راندمان مکانیکی ماشین (η) با رابطه (۳-۱۸) به

دست می‌آید:

$$Th = Th^*/\eta \quad (18-3)$$

در روابط (۱۵-۳) تا (۱۸-۳)، D_{TBM} قطر ماشین (m)، N_{TBM} تعداد برش‌دهنده‌ها و V_{max} محدوده سرعت خطی برش‌دهنده‌ها هستند. همچنین η ضریب راندمان مکانیکی ماشین و K ضریب تبدیل گشتاور به اسب بخار (۵۲۵۰) یا کیلووات (۹/۵۶) است.

مهمترین محدودیت این مدل، عدم در نظر گرفتن ویژگی‌های درزه‌داری توده‌سنگ در روابط توسعه یافته است. اولین تلاش در این زمینه، پیشنهاد ضرایبی برای تصحیح مقادیر نرخ نفوذ بر اساس میزان RQD توده‌سنگ بوده است که توسط انستیتوی مکانیک زمین (EMI) در مدرسه معدن کلرادو ارائه شده است. با استفاده از داده‌های موجود در یک بانک اطلاعاتی که به همین منظور توسعه یافته است، ضریب تصحیح F1 به صورت روابط (۱۹-۳) و (۲۰-۳) تعیین شده است [۳]:

$$F1 = 1 + \frac{100 - RQD}{150} \quad UCS < 110 \text{ MPa} \quad (19-3)$$

$$F1 = 1 + \frac{100 - RQD}{150} \quad UCS > 110 \text{ MPa} \quad (20-3)$$

این محدودیت توسط برخی محققین دیگر نظیر شیما [۵۱]، یاگیز [۵۲] و رمضان‌زاده [۵۳] نیز مطالعه شده و تصحیحاتی بر روی مدل اعمال شده است.

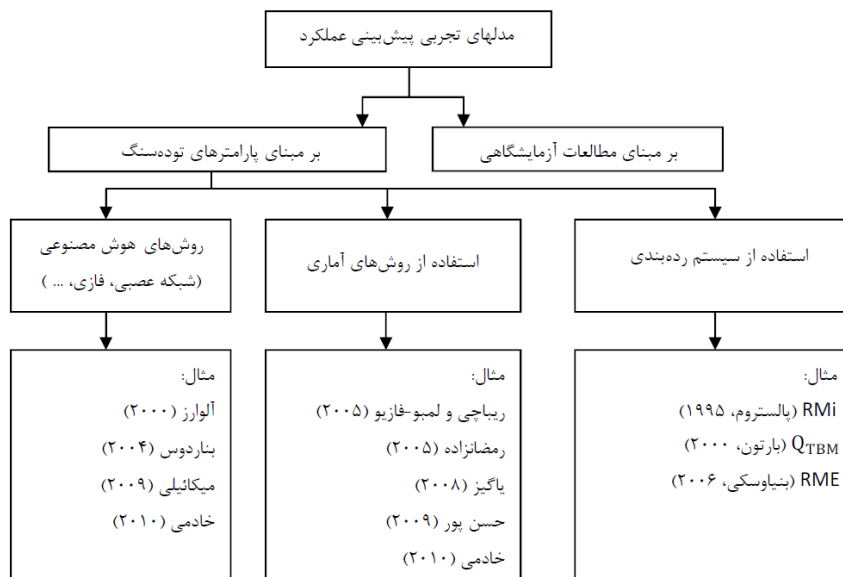
۳-۳-۲- مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی، ارتباط و همبستگی بین شرایط زمین و پارامترهای عملیاتی ماشین را با مقادیر نرخ نفوذ واقعی ثبت شده آزمون‌های آزمایشگاهی و یا تونل حفر شده بررسی می‌نمایند و در نهایت یک رابطه تجربی که در اکثر مواقع از روش‌های آماری بدست می‌آید، جهت پیش‌بینی نرخ نفوذ ارائه می‌دهند. روش‌های تجربی از مطالعات آزمایشگاهی تک پارامترهای مربوط به سنگ و ماشین برای پیش‌بینی نرخ نفوذ استفاده کرده‌اند؛ اما به دلیل ساده‌سازی و دقت پایین این مدل‌ها، معمولاً در صنعت از این روابط استفاده نمی‌شود. روش‌های تجربی مبتنی بر داده‌های واقعی تونل‌های حفاری شده، از مجموعه عوامل تاثیرگذار بر عملکرد ماشین استفاده می‌کنند و در نهایت با استفاده از

روش‌های آماری و یا هوش مصنوعی مدلی جهت پیش‌بینی عملکرد ماشین ارائه می‌کنند.

بسیاری از روش‌های پیش‌بینی در اغلب اوقات تطابق خوبی با نتایج واقعی دارند؛ اما باید توجه داشت که یک مدل تجربی بر اساس بانک اطلاعات خاص (ویژگی‌های خاص زمین‌شناسی و عملیاتی ماشین) ارائه می‌شود و لذا باید به شباهت خصوصیات زمین در بانک اطلاعاتی با خصوصیات زمین در پروژه مورد مطالعه، توجه شود. به علاوه، روش‌های پیش‌بینی که شرایط عملیاتی ماشین (نیروی پیشران و گشتاور) را در نظر نمی‌گیرند، نخواهند توانست پیش‌بینی دقیقی در مورد نرخ نفوذ با پارامترهای عملیاتی متفاوت ارائه دهند.

علیرغم محدودیت‌های روش‌های تجربی با توجه به اینکه در مدل‌های تجربی امکان در نظر گرفتن پارامترهای توده‌سنگ و لحاظ کردن تاثیر آنها در پیش‌بینی عملکرد ماشین آسانتر بوده و همچنین به انجام آزمون‌های آزمایشگاهی خاصی که امکان انجام در آزمایشگاه‌های محدودی در دنیا وجود دارد، نیاز ندارند. این روش‌ها موضوع پژوهش بسیاری از محققین بوده و در سال‌های اخیر استفاده از آنها گسترش یافته است [۳]. انواع مختلف مدل‌های تجربی در شکل (۲-۳) ارائه شده است.

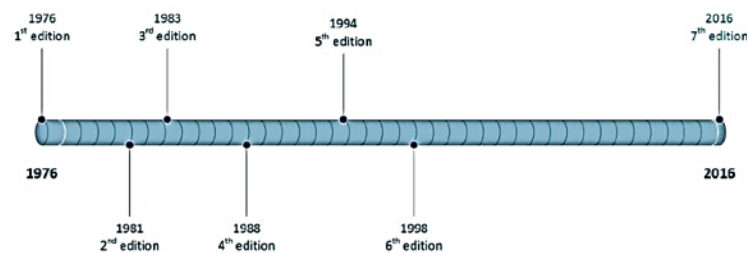


شکل ۲-۳: انواع مختلف مدل‌های تجربی [۳]

۳-۲-۱- 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 ۱۹۷۶ در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ^۱ ارائه شد [۵۴] و تا سال ۱۹۹۸ با توجه به تکمیل شدن داده‌های بانک اطلاعاتی مربوطه توسط محققین مختلف، مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت. آخرین به روز رسانی این مدل در سال ۲۰۱۶ توسط ماسیاس^۲ ارائه شد. سال‌های ارائه به روز رسانی‌های مختلف این مدل در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: سال‌های ارائه به روزرسانی مختلف مدل NTNU [۵۵]

فلسفه مدل NTNU دستیابی به پیش‌بینی‌های قابل اعتماد با ترکیب ویژگی‌های سنگ مربوطه و پارامترهای دستگاه است. در این مدل پارامترهایی مانند نرخ نفوذ خالص^۳، عمر برش‌دهنده، بهره‌وری ماشین، نرخ پیشروی هفتگی و هزینه‌های حفاری قابل محاسبه هستند [۵۵]. پارامترهای ورودی این مدل به دو دسته کلی شامل پارامترهای توده‌سنگ و پارامترهای مربوطه به ماشین تقسیم‌بندی شده است. این دو دسته پارامتر خود به مجموعه‌ای از عوامل مختلف بستگی دارند که در جدول (۳-۱) آورده شده‌اند.

جدول ۳-۱: پارامترهای ماشین و سنگ تاثیرگذار بر میزان نفوذ خالص در مدل NTNU [۵۵]

پارامترهای توده‌سنگ		پارامترهای ماشین
سنگ بکر	درجه خردشدگی	نیروی رانش متوسط دیسک کاترها
شاخص نرخ حفاری پذیری (DRI)	کلاس شکستگی	فاصله متوسط دیسک کاترها
شاخص عمر کاتر (CLI)	زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف	قطر دیسک کاترها
تخلخل		توان کله حفاری
		سرعت چرخش کله حفاری

¹ Norwegian University of Science and Technology

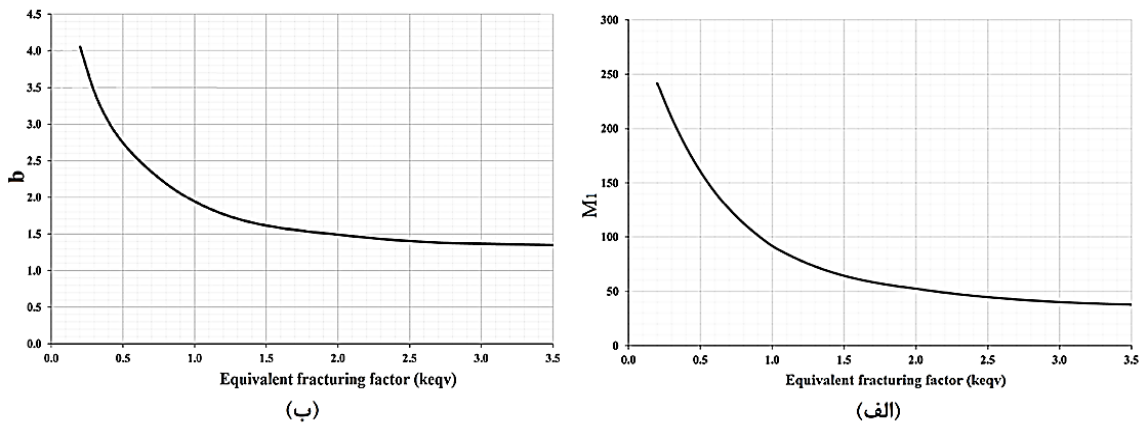
² Macias

³ Net penetration rate

در مدل NTNU کلیه پارامترهای مربوط به توده‌سنگ در قالب یک پارامتر با نام فاکتور خردشدگی معادل^۱ یا K_{ekv} و کلیه پارامترهای مربوط به ماشین در قالب یک پارامتر تحت عنوان نیروی رانش معادل^۲ با علامت اختصاری M_{ekv} با هم ترکیب می‌شوند. رابطه (۳-۲۱)، رابطه اصلی مدل NTNU است، که از تحلیل تعداد زیادی آزمون نفوذ کله حفار به دست آمده است [۵۵]:

$$i_0(mm/rev) = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1}\right)^b \quad (21-3)$$

در رابطه (۳-۲۱) که منحنی نفوذ نرمال شده نامیده می‌شود، i_0 نرخ نفوذ پایه بر حسب میلیمتر بر دور کله حفار، M_{ekv} نیروی رانش معادل بر حسب کیلونیوتن بر برش‌دهنده، 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، که این وابستگی در نمودارهای شکل (۳-۴) آورده شده است. با توجه به رابطه (۳-۲۱) می‌توان گفت که نرخ نفوذ به دو عامل اساسی فاکتور خردشدگی معادل و نیروی رانش معادل وابسته است.



شکل ۳-۴: الف) نیروی پیشران بحرانی و ب) ضریب نفوذ به عنوان تابعی از فاکتور خردشدگی معادل [۵۵]

۳-۳-۲-۱- تعیین فاکتور خردشدگی معادل

فاکتور خردشدگی توده‌سنگ توسط فاکتور شکستگی (k_s) که به درجه شکستگی و زاویه بین

¹ Equivalent Fracturing Factor

² Equivalent Thrust

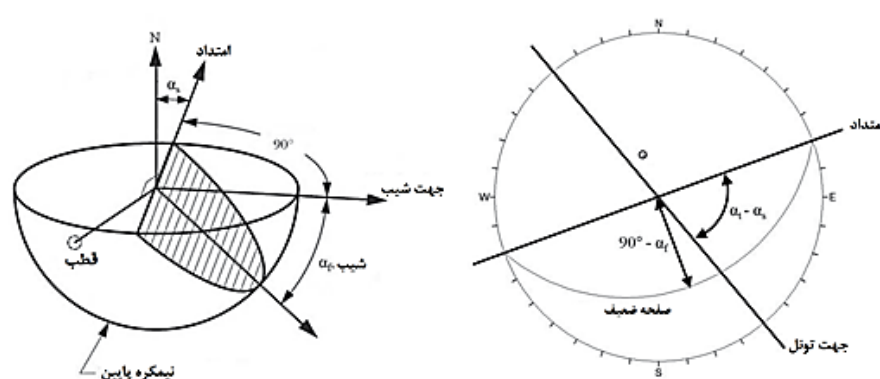
محور تونل و صفحات ضعیف (α) وابسته است، بیان می‌شود. برای اهداف برداشت عملی^۱ در ارتباط با پروژه‌های تونل‌زنی توسط TBM، درجه شکستگی به طور سیستماتیک، به کلاس‌های مختلف تقسیم می‌شود که در جدول (۲-۳) ذکر شده‌اند. راستای شکستگی‌ها بوسیله اندازه‌گیری امتداد و شیب تعیین می‌شود. رابطه (۲۲-۳) برای محاسبه زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف استفاده می‌شود:

$$\alpha = \text{Arcsin}(\text{Sin}\alpha_f \cdot \text{Sin}(\alpha_t - \alpha_s)) \quad (22-3)$$

در رابطه (۲۲-۳)، α_s و α_f به ترتیب امتداد و مقدار شیب ناپیوستگی (درجه) و α_t جهت تونل (درجه) است. این پارمترها در شکل (۵-۳) در استریونت نمایش داده شده‌اند.

جدول ۲-۳: کلاس شکستگی توده‌سنگ به عنوان تابعی از فاصله‌داری شکستگی‌ها [۵۵]

کلاس شکستگی (Sf)	متوسط فاصله‌داری بین شکستگی‌ها (cm)	دامنه فاصله‌داری شکستگی‌ها (cm)	درجه خردشدگی
۰	∞	۴۸۰ - ∞	بدون شکستگی
۱	۳۲۰	۲۴۰ - ۴۸۰	فوق‌العاده کم
۲	۱۶۰	۱۲۰ - ۲۴۰	خیلی کم
۳	۸۰	۶۰ - ۱۲۰	کم
۴	۴۰	۳۰ - ۶۰	متوسط
۵	۲۰	۱۵ - ۳۰	زیاد
۶	۱۰	۷/۵ - ۱۵	خیلی زیاد
۷	۵	۴ - ۷/۵	فوق‌العاده زیاد



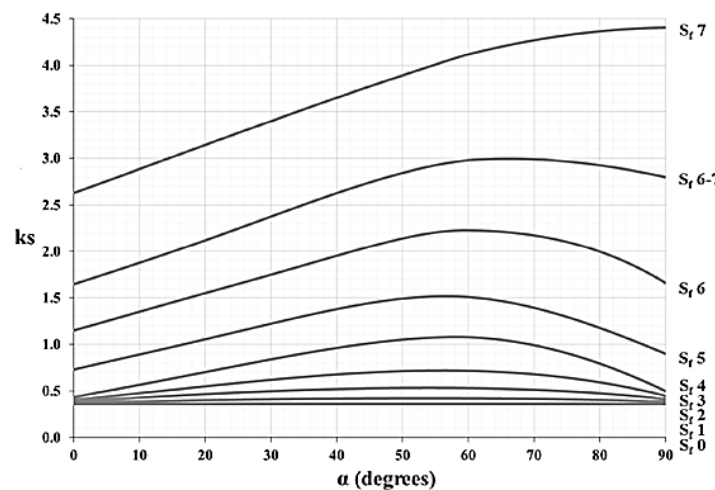
شکل ۵-۳: نمایش زوایای رابطه (۲۲-۳) در استریونت [۵۵]

¹ Practical Mapping

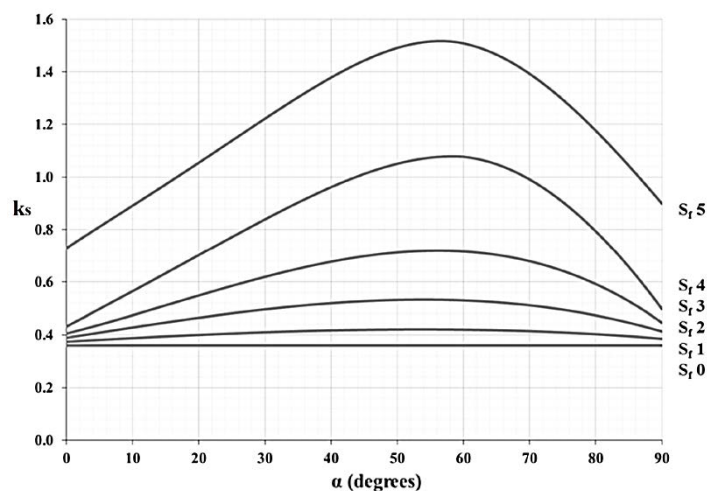
فاکتور خردشدگی برای هر ناپیوستگی بر اساس نمودارهای شکل (۳-۶) و (۳-۷) و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف تعیین می‌شود. نمودارهای شکل (۳-۷) برای محاسبه دقیق فاکتور خردشدگی توده‌سنگ‌ها برای شکستگی با درجه کم بکار می‌رود. هنگامی که تعداد ناپیوستگی زیاد شود، رابطه (۳-۲۳) برای محاسبه فاکتور خردشدگی کل استفاده می‌شود [۵۵]:

$$K_{s-total} = \sum_{i=1}^n k_{si} - (n - 1) \cdot 0.36 \quad (3-23)$$

در رابطه (۳-۲۳)، K_{s-tot} فاکتور خردشدگی کل، k_{si} فاکتور خردشدگی برای مجموعه شکستگی (دسته درزه) i -ام و n تعداد مجموعه شکستگی‌ها (دسته درزه) است.



شکل ۳-۶: فاکتور خردشدگی تابعی از کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف [۵۵]

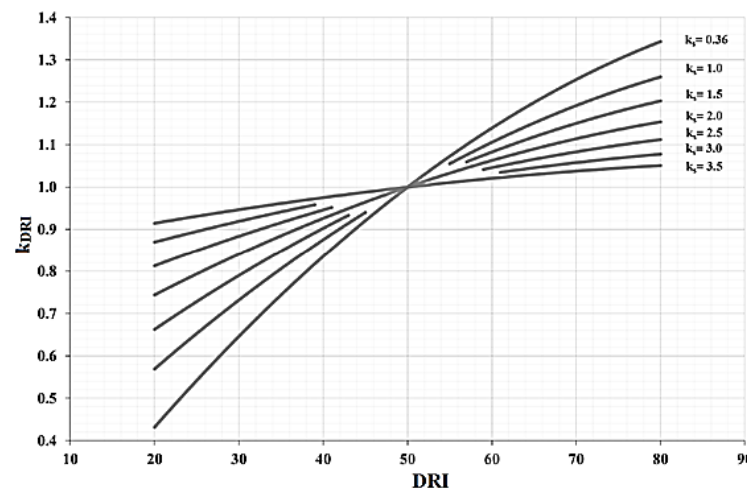


شکل ۳-۷: فاکتور خردشدگی تابعی از کلاس شکستگی و زاویه بین محور تونل و صفحات ضعیف برای محاسبات دقیق توده‌سنگ‌های با درجه شکستگی پایین [۵۵]

در کل، فاکتور خردشدگی معادل برای بیان ویژگی‌های توده‌سنگ با رابطه (۲۴-۳) قابل محاسبه است:

$$K_{ekv} = K_{s-tot} \cdot K_{DRI} \cdot K_{por} \quad (24-3)$$

در رابطه (۲۴-۳)، K_{s-tot} فاکتور خردشدگی کلی توده‌سنگ، K_{DRI} ضریب تصحیح شاخص نرخ حفرپذیری ماده‌سنگ و K_{por} ضریب تصحیح تخلخل هستند. ضریب تصحیح نرخ حفرپذیری را می‌توان براساس شاخص نرخ حفرپذیری سنگ و فاکتور خردشدگی کل، با استفاده از نمودار شکل (۸-۳) محاسبه کرد.



شکل ۸-۳: نمودار فاکتور اصلاح برای مقدار DRI [۵۵]

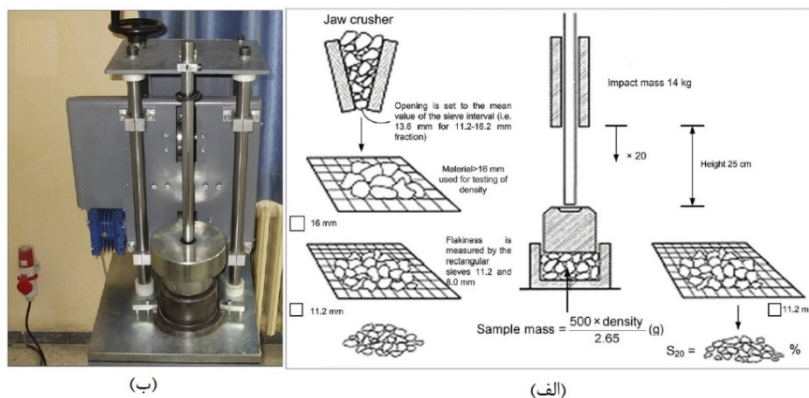
برای محاسبه DRI از آزمون‌های حفرپذیری و حفرپذیری که به منظور ارزیابی و شناخت رفتار ماده‌سنگ در مواجهه با برش‌دهنده طراحی شده‌اند، استفاده می‌شود. روش‌های آزمایشگاهی مختلفی تاکنون در این زمینه پیشنهاد شده است. یکی از مهمترین این روش‌ها آزمون‌هایی است که در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ توسعه داده شده است. برای تعیین شاخص نرخ حفرپذیری از نتایج آزمون تردی S_{20} ^۱ و آزمون تعیین S_r ^۲ استفاده می‌شود [۵۶].

آزمون تردی S_{20} ، معیاری برای سنجش تردی سنگ است. روش آزمون در سوند توسط وون مترن

^۱ Brittleness

^۲ Siever's Value Test

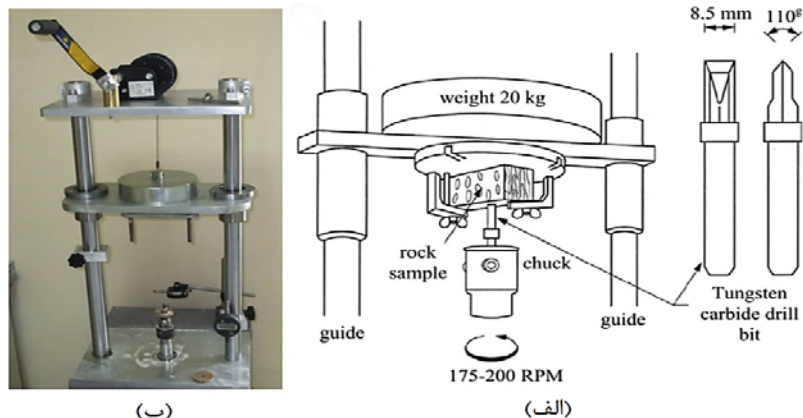
و هلمر^۱ در سال ۱۹۴۳ توسعه داده شد. تعدادی از نسخه‌های اصلاح شده آزمون، برای اهداف مختلف طراحی شده‌اند. در این آزمایش ۵۰۰ گرم از تکه‌های سنگ با قطر ۱۱/۲ تا ۱۶ میلی‌متر در یک ظرف مخصوص با یک وزنه ۱۴ کیلوگرمی که از ارتفاع ۲۵ سانتی‌متری رها می‌شود، توسط ۲۰ ضربه کوبیده می‌شود. درصد مصالح عبوری از الک ۱۱/۲ میلی‌متری بعد از کوبیدن مصالح، تحت عنوان S₂₀ معرفی می‌شود [۵۶]. نمایی از دستگاه مورد استفاده در این آزمون در شکل (۳-۹) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۹: الف) نمایی شماتیک، ب) دستگاه در آزمایشگاه مورد استفاده در آزمون تعیین S₂₀ [۵۷]

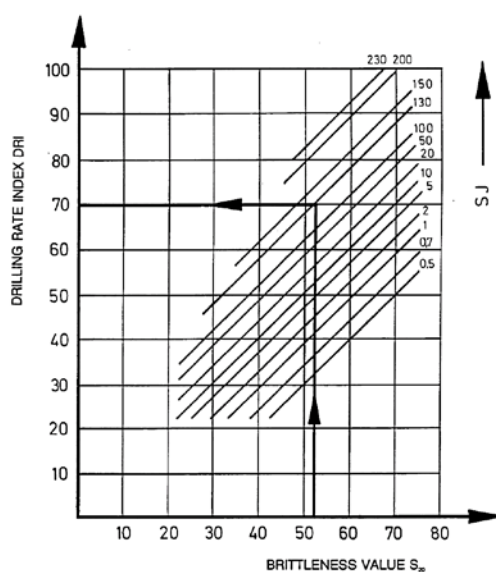
آزمون تعیین S_I نیز تخمینی از سختی سطحی سنگ یا مقاومت آن در مقابل نفوذ را به دست می‌دهد. روش آزمایش ابتدا توسط سیورز در سال ۱۹۵۰ توسعه داده شد. نمایی از دستگاه مورد استفاده در این آزمون در شکل (۳-۱۰) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل نیز مشخص شده، این دستگاه متشکل از یک مته حفاری با سرعت دوران ۲۰۰ دور در دقیقه و یک وزنه ۲۰ کیلوگرمی برای تامین فشار لازم بر روی نمونه است. مته مورد استفاده دارای عرض ۸/۵ میلی‌متر و زاویه رأس ۱۱۰ درجه است [۵۶].

¹ Von Matern And Hjelmer



شکل ۳-۱۰: الف) نمایی شماتیک، ب) دستگاه در آزمایشگاه مورد استفاده در آزمون تعیین S_r [۵۷]

پارامتر S_r که خروجی این آزمون بوده عبارت است از عمق سوراخ ایجاد شده در سنگ بعد از یک دقیقه چرخش مته (یا ۲۰۰ دور چرخش) که بر حسب $0/1$ میلیمتر بیان می‌شود. مقدار شاخص نرخ حفزپذیری (DRI) با استفاده از نتایج بدست آمده از این آزمون و آزمون تردی تعیین می‌شود. با داشتن مقادیر S_r و S_2 ، با استفاده از نمودار شکل (۳-۱۱)، مقدار DRI را می‌توان تعیین کرد [۵۶].

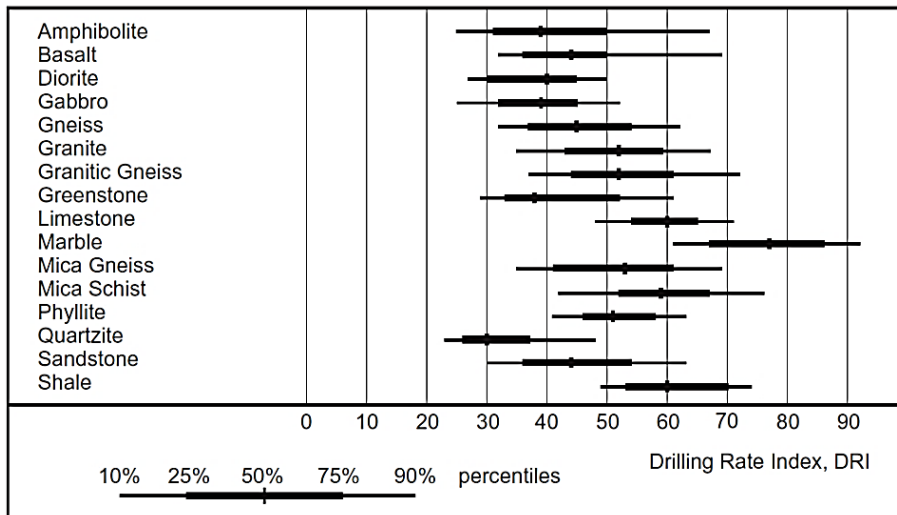


شکل ۳-۱۱: نمودار محاسبه DRI [۵۶]

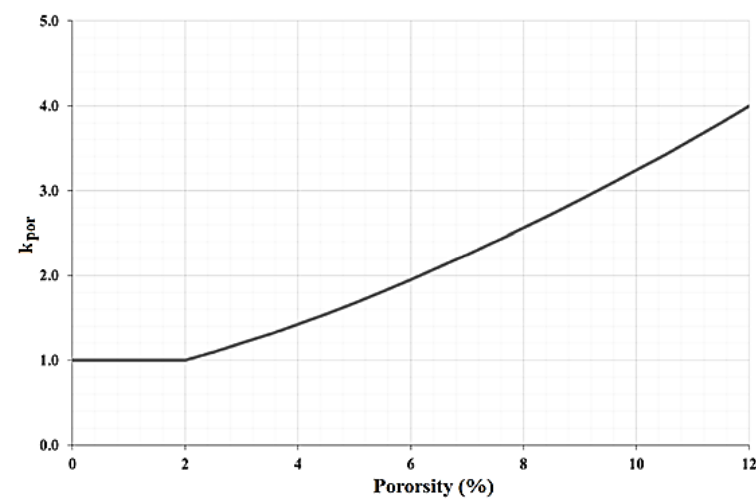
به دلیل محدود بودن آزمایشگاه‌های مجهز به تجهیزات مورد نیاز برای تعیین پارامتر DRI، انجام این آزمون به ویژه در ایران بسیار دشوار و پرهزینه است. در مواردی که انجام این آزمون غیر ممکن باشد، می‌توان تخمینی از مقادیر این پارامتر را بر اساس تجربیات گذشته به ویژه با مراجعه به بانک

اطلاعاتی آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF (جدول ۳-۳). به دست آورد.

جدول ۳-۳: دامنه تغییرات شاخص حفرپذیری ماده سنگ برای سنگ‌های مختلف [۵۸]



در مدل NTNU تخلخل انواع سنگ‌ها باید بالای ۲ درصد باشد. تاثیر تخلخل روی DRI برای تخلخل‌های کمتر از ۱۰ تا ۱۲ درصد ناچیز است. به همین دلیل تخلخل باید به عنوان یک پارامتر مستقل در مدل نرخ نفوذ قرار گیرد [۵۵]. فاکتور تصحیح تخلخل با استفاده از نمودار شکل (۳-۱۲) قابل محاسبه است.



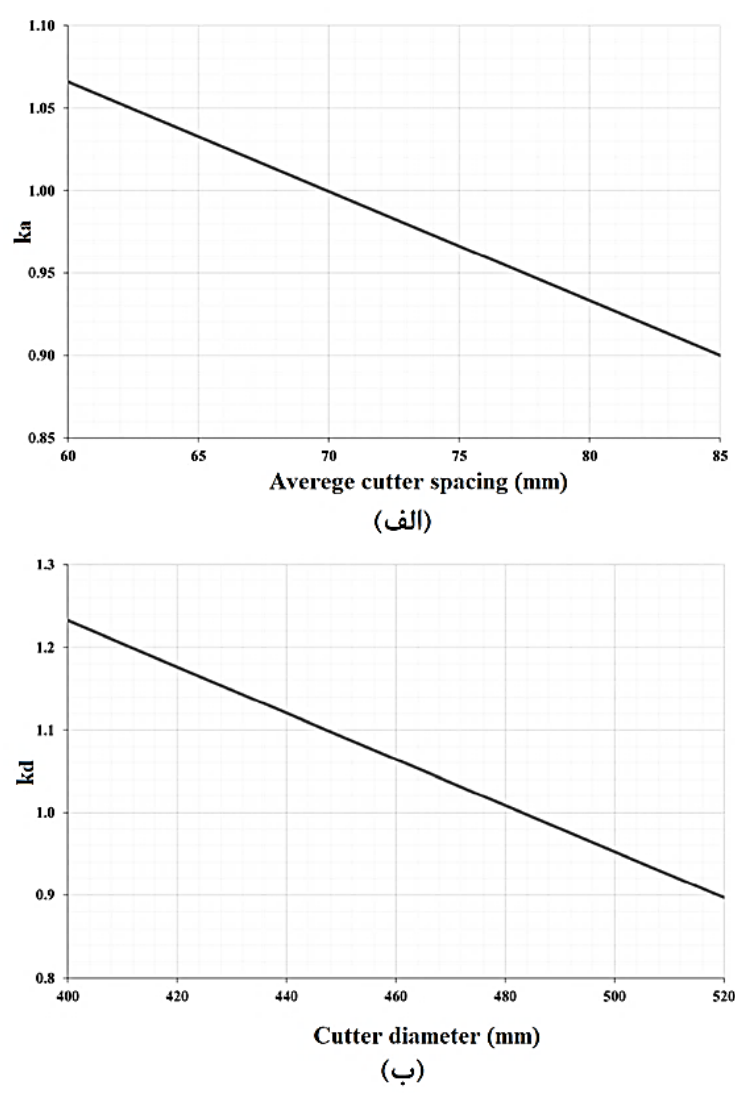
شکل ۳-۱۲: نمودار فاکتور تصحیح برای مقدار تخلخل سنگ [۵۵]

همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد، در مدل NTNU پارامترهای مربوط به ماشین در قالب یک پارامتر تحت عنوان نیروی پیشران معادل با هم ترکیب می‌شوند. این پارامتر از رابطه (۳-۲۵)

محاسبه می‌شود [۵۵]:

$$M_{ekv} = M_B \times K_a \times K_d \quad (۲۵-۳)$$

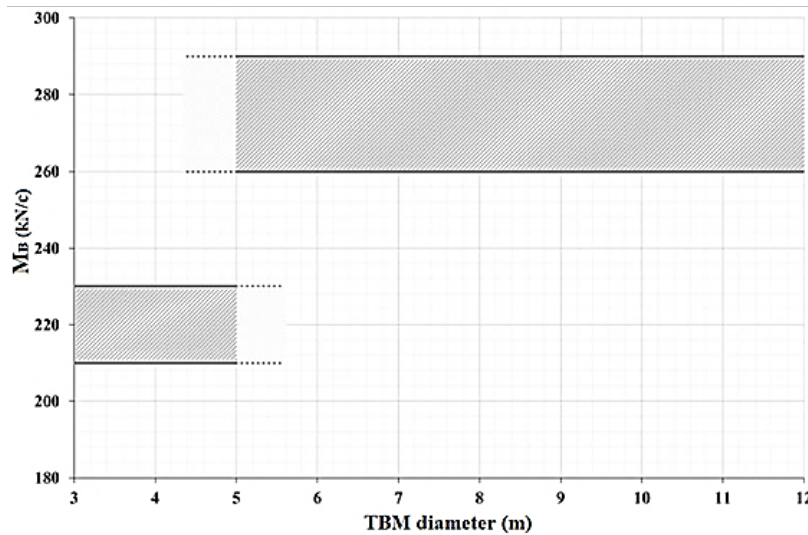
در رابطه (۲۵-۳)، M_B نیروی پیشران متوسط اعمال شده بر روی هر برش‌دهنده (kN)، K_d ضریب تصحیح برای قطر برش‌دهنده و K_a ضریب تصحیح برای فاصله‌داری متوسط برش‌دهنده‌ها است. برای تعیین دو ضریب تصحیح مورد نظر، نمودارهای شکل (۳-۱۳) پیشنهاد شده‌اند.



شکل ۳-۱۳: الف) فاکتور تصحیح برای فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها، ب) فاکتور تصحیح برای قطر برش‌دهنده [۵۵]

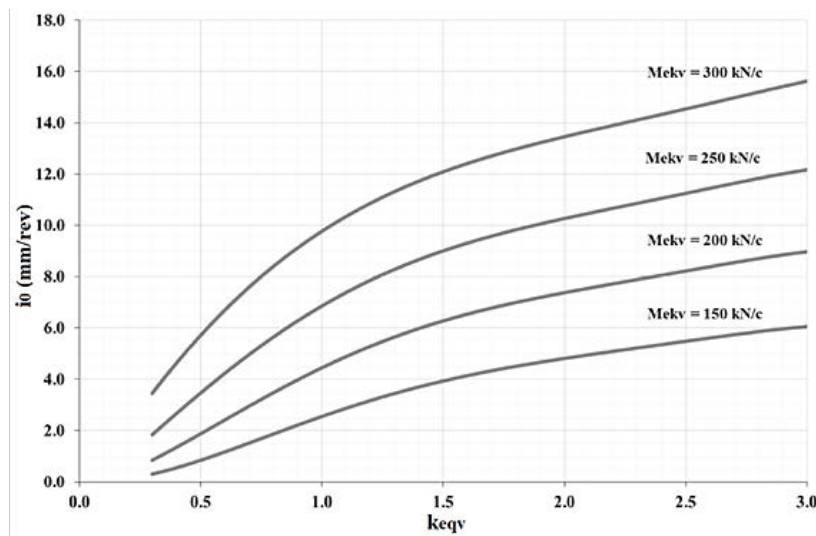
نیروی پیشران متوسط (M_B) که عبارتست از کل نیروی سیلندرهای جلو برنده دستگاه تقسیم بر تعداد برش‌دهنده‌ها، تاثیر قابل توجهی در میزان نرخ نفوذ دارد. نیروی پیشران بالا منجر به انتقال

انرژی موثر بیشتر از کله حفار به توده سنگ شده، که باعث نفوذ عمیق تر می شود [۵۵]. شکل (۳-۱۴) حداکثر نیروی پیشران متوسط در هر برش دهنده را به عنوان تابعی از قطر TBM نشان می دهد.



شکل ۳-۱۴: نیروی پیشران ناخالص متوسط در هر برش دهنده [۵۵]

شکل (۳-۱۵)، نرخ نفوذ پایه (i_0) را به عنوان تابعی از فاکتور خردشدگی معادل و نیروی پیشران معادل زمانی که قطر برش دهنده ۴۸۳ میلیمتر و فاصله داری برش دهنده ها در حدود ۷۰ میلیمتر است، ارائه می دهد.



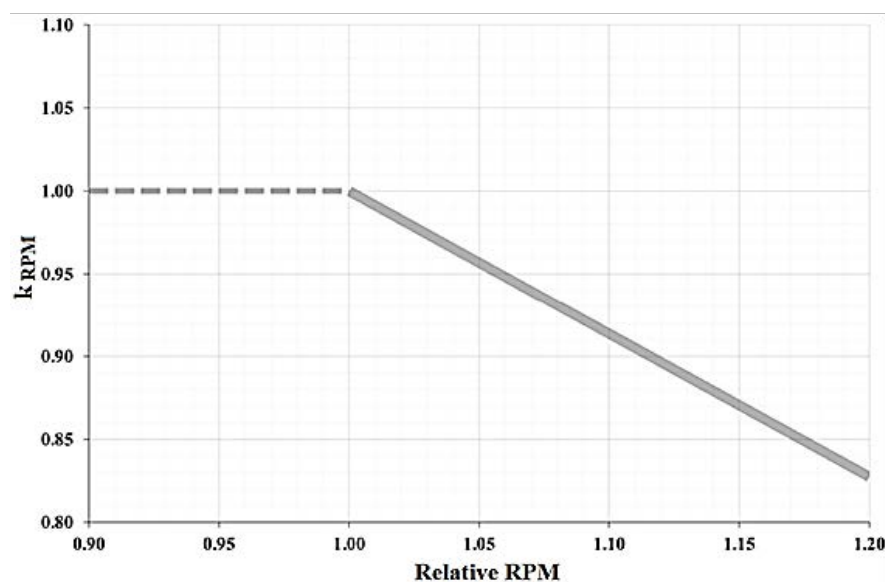
شکل ۳-۱۵: نرخ نفوذ پایه (i_0) به عنوان تابعی از فاکتور خردشدگی معادل و نیروی پیشران معادل برای قطر برش دهنده ۴۸۳ میلیمتر و فاصله داری برش دهنده ها در حدود ۷۰ میلیمتر [۵۵]

۳-۲-۱-۲-۳-۳- محاسبه نرخ نفوذ

با معلوم بودن دو پارامتر فاکتور خردشدگی معادل و نیروی پیشران معادل، نرخ نفوذ پایه (i_0) بر حسب میلیمتر بر دور قابل تخمین است. نرخ نفوذ خالص (I_0) بر حسب متر بر ساعت نیز از طریق رابطه (۲۶-۳) محاسبه می‌شود [۵۷]:

$$I_0 = i_0 \text{RPM} \cdot \frac{60}{1000} \times k_{rpm} \quad (26-3)$$

در رابطه (۲۶-۳)، RPM سرعت چرخش کله حفاری بر حسب دور بر دقیقه و k_{rpm} فاکتور تصحیح برای RPM بوده که از نمودار شکل (۱۶-۳) قابل محاسبه است.



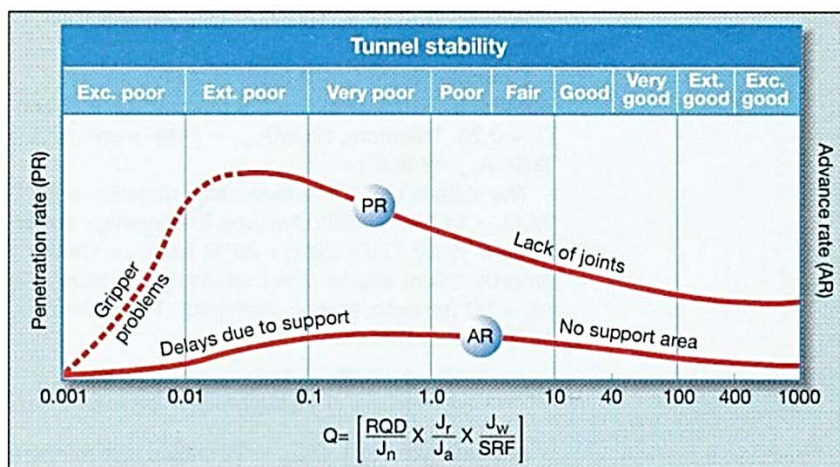
شکل ۱۶-۳: نمودار فاکتور تصحیح برای RPM [۵۵]

از آنجایی که نمودار شکل (۱۶-۳) بر اساس اطلاعات محدودی به دست آمده است، توصیه شده که با احتیاط از آن استفاده شود. همچنین در صورتی که در طول محور تونل ناپیوستگی‌های مهم همچون تورق و گسل‌های بزرگ که تک درزه‌های مشخص^۱ نامیده می‌شود، وجود داشته باشد، فاکتور تصحیحی برای نرخ نفوذ پیش‌بینی شده در نظر گرفته می‌شود، که جزئیات بیشتر در [۵۵] ارائه شده است.

¹ Marked Single Joints (MSJ)

مدل Q_{TBM} - ۲-۲-۳-۳

رده‌بندی Q در سال ۱۹۷۴ بر مبنای تونل‌هایی که توسط آتشفشاری حفر شده بودند، پیشنهاد شده است. این رده‌بندی، سنگ‌ها را به شش رده تقسیم می‌کند. مقدار Q از ۰/۰۰۱ در سنگ‌های فشارنده و رس‌ها تا ۱۰۰۰ در سنگ‌های سخت بدون درزه متغیر است. هر دو این شرایط برای حفاری مناسب نیستند. متوقف کردن عملیات حفاری، نگهداری و پیش‌تحکیمی می‌تواند نرخ پیشروی را تا ۰/۲ متر بر ساعت کاهش دهد [۵۹]. مدل Q_{TBM} بر اساس نگارش جدیدی از سیستم رده‌بندی 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 O_{TBM} را معرفی نمود که با پارامتر نرخ نفوذ ماشین مرتبط است. بارتن در مطالعات خود، رابطه عمومی میان مقادیر Q و نرخ نفوذ و نرخ پیشروی واقعی را که در دوره‌ای طولانی مدت اندازه‌گیری شده است، برای رده‌های مختلف سنگ در قالب یک نمودار ارائه داد که در شکل (۳-۱۷) نمایش داده شده است. همانطور که از شکل (۳-۱۷) مشخص است، مقدار Q می‌تواند تا حدی در تخمین مقادیر PR و AR استفاده شود، اما به اعتقاد بارتن این پارامتر بدون تصحیح و اضافه کردن پارامترهای اندرکنش سنگ و ماشین کفایت لازم برای انجام این کار را ندارد. لذا وی با اضافه نمودن برخی پارامترها به سیستم Q پارامتر Q_{TBM} را برای محاسبه ماشین معرفی نمود [۴۵].



شکل ۳-۱۷: رابطه عمومی میان Q، PR و AR [۵۹]

در سیستم Q_{TBM} جهت‌داری درزه‌ها، مقاومت فشاری، شاخص بار نقطه‌ای^۱ و مقاومت کششی سنگ لحاظ شده‌اند. همچنین میزان ساینده‌گی سنگ (براساس شاخص عمر برش‌دهنده یا CLI)، درصد کانی‌های ساینده^۲، متوسط بار وارده به برش‌دهنده، مقاومت توده‌سنگ و سطح تنش سنگ نیز در نظر گرفته شده‌اند. رابطه (۳-۲۷)، رابطه اصلی مدل Q_{TBM} است [۵۹]:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \cdot \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma_\theta}{5} \quad (۳-۲۷)$$

در رابطه (۳-۲۷)، ROD_0 مقدار RQD بر حسب درصد بوده که در جهت موازی با محور تونل اندازه‌گیری شده است. پارامترهای J_n عدد معرف تعداد دسته درزه، J_r عدد معرف زبری درزه، J_a عدد معرف هوازدگی درزه، J_w ضریب کاهش آب درزه‌ها و SRF ضریب کاهش تنش مطابق همان سیستم مرسوم Q امتیازدهی می‌شوند. باید توجه داشت که دو پارامتر J_r و J_a برای دسته درزه‌ای که بیشترین کمک را در جهت تسهیل حفاری می‌کند، اندازه‌گیری می‌شوند. $SIGMA$ مقاومت توده‌سنگ (MPa) براساس فرایند شکست غالب (فشاری یا کششی) طبق روابط (۳-۲۸) و (۳-۳۰)، پارامتر F متوسط بار برش‌دهنده (برحسب تن-نیرو)، پارامتر CLI شاخص عمر برش‌دهنده، q محتوای کوارتز به درصد و σ_θ تنش دو محوری ایجاد شده در سینه‌کار تونل (MPa) است که نسبت به عمق ۱۰۰ متر نرمالیزه شده است. در روابط (۳-۲۸) و (۳-۳۰) مقدار $SIGMA$ ، بر اساس روابط سینگ (روابط (۳-۲۹) و (۳-۳۱)) قابل محاسبه است، به شرطی که در محاسبه مقدار Q از ROD_0 استفاده شده باشد.

$$SIGMA_{cm} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_c^{1/3} \quad (۳-۲۸)$$

$$Q_c = Q \times \sigma_c / 100 \quad (۳-۲۹)$$

$$SIGMA_{tm} = 5 \cdot \gamma \cdot Q_t^{1/3} \quad (۳-۳۰)$$

$$Q_t = Q \times I_{S50} / 4 \quad (۳-۳۱)$$

همانطور که گفته شد، CLI یکی از پارامترهایی است که برای تخمین نرخ نفوذ در مدل Q_{TBM}

^۱ Point Load Index

^۲ Quartz Content

استفاده می‌شود. ساینده‌گی سنگ به عنوان معیاری برای تخمین میزان فرسودگی برش‌دهنده‌ها و ابزار حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. آزمون‌های مختلفی برای تعیین درجه ساینده‌گی سنگ‌ها توسعه یافته است. روش آزمایش تعیین درجه ساینده‌گی سنگ‌ها در ساختمان زمین‌شناسی در NTH¹ در سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۱ توسعه داده شد. در این آزمون پارامترهای AV و AVS یا مقدار سایش^۲ تیغه‌هایی از جنس کاربید تنگستن و فولاد که معیاری برای سنجش قدرت ساینده‌گی سنگ هستند، تعیین می‌شوند. همچنین با استفاده از نتایج این آزمون و دو آزمون تعیین پارامترهای S_J و S₂₀ که شرح آنها در بخش قبل ارائه شد، دو پارامتر مهم مربوط به ساینده‌گی سنگ یعنی شاخص سایش تیغه^۳ یا BWI و شاخص عمر برش‌دهنده یا CLI نیز تعیین می‌شود [۵۶].

در این آزمون برای تعیین پارامتر AV، تیغه تنگستن کاربید (که تحت بار ۱۰ کیلوگرم قرار دارد) بر اثر تماس با پودر سنگ خرد شده (با ابعاد کمتر از یک میلیمتر) که بر روی صفحه‌ای دوار می‌چرخد، مورد سنجش قرار می‌گیرد. مقدار AV عبارت است از کاهش وزن تیغه بعد از ۱۰۰ دور چرخش دیسک فولادی (بر حسب میلی‌گرم). زمان ۱۰۰ دور چرخش دستگاه حدود ۵ دقیقه است. علاوه بر AV، پارامتر AVS نیز با استفاده از این آزمون قابل اندازه‌گیری است. پارامتر AVS نیز مشابه با AV اندازه‌گیری می‌شود، با این تفاوت که در این آزمون از یک تیغه فولادی استفاده می‌شود. زمان آزمون نیز یک دقیقه یا ۲۰ دور چرخش دستگاه است [۵۶]. در شکل (۳-۱۸) طرح شماتیک از دستگاه مربوط به آزمون سایش نیروژی نمایش داده شده است.

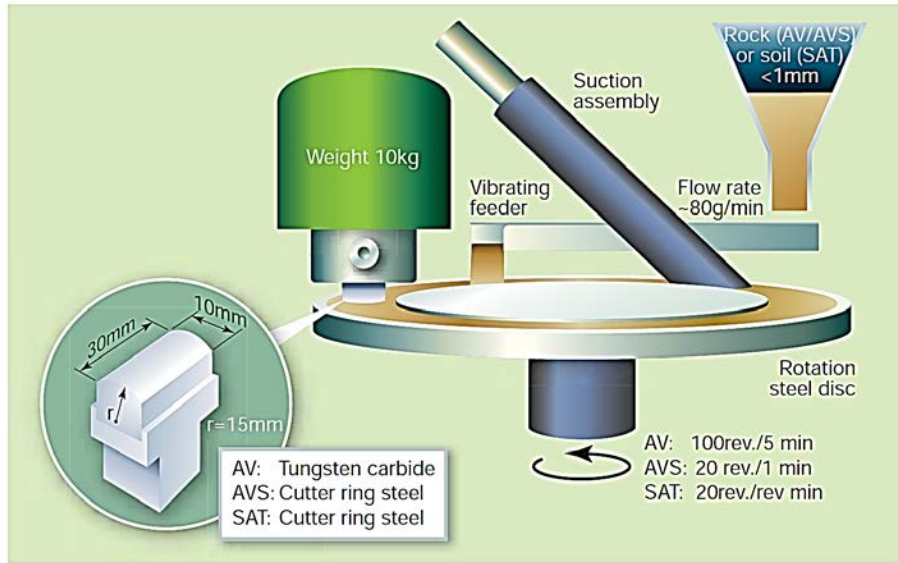
CLI با استفاده از رابطه (۳-۳۲)، که CLI را با پارامترهای آزمایشگاهی S_J و AVS مربوط می‌سازد، تعیین می‌شود [۵۶]:

$$CLI = 13.84(S_J/AVS)^{0.3847} \quad (3-32)$$

^۱ بخش فعلی مهندسی زمین‌شناسی و منابع معدنی در NTNU

^۲ Abarasion Value (AV)

^۳ Bit Wear Index (BWI)



شکل ۳-۱۸: ابزار مورد نیاز برای انجام آزمون سایندگی NTNU [۵۶]

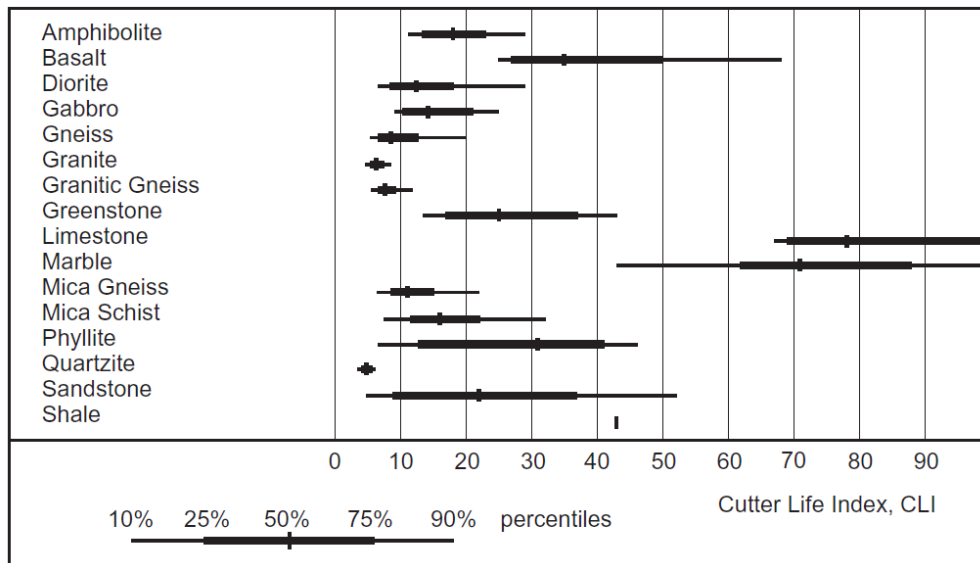
پارامتر CLI به عنوان معیاری مهم و کاربردی برای ارزیابی میزان سایش برش‌دهنده قابل استفاده است. در مدل NTNU نیز پارامتر CLI به منظور تخمین میزان سایش و طول عمر برش‌دهنده و هزینه اجرای تونل مورد استفاده قرار گرفته و پارامتر تأثیرگذاری در این زمینه محسوب می‌شود. همانطور که در مورد پارامتر DRI توضیح داده شد، در مورد CLI نیز به دلیل محدود بودن آزمایشگاه‌های مجهز به تجهیزات مورد نیاز، انجام این آزمون به ویژه در ایران بسیار دشوار و پرهزینه است، لذا می‌توان تخمینی از مقادیر این پارامتر را با مراجعه به داده‌های پروژه‌های دیگر یا بانک اطلاعاتی آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF به دست آورد. دامنه مقادیر این پارامتر برای سنگ‌های مختلف بر اساس نتایج تحلیل‌های آماری داده‌های بانک اطلاعاتی آزمون‌های حفرپذیری آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF در جدول (۳-۴) ارائه شده است.

۳-۲-۱-۲-۳-۳ رابطه نرخ نفوذ با نرخ پیشروی

همانطور که در بخش‌های قبل بیان شد، رابطه مرسوم بین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با بهره‌گیری از ضریب بهره‌وری به شکل رابطه (۳-۳۳) تعریف می‌شود:

$$AR = PR \times U \quad (۳-۳۳)$$

جدول ۳-۴: دامنه تغییرات CLI برای سنگ‌های مختلف [۵۸]



بنا به عقیده بارتن (۱۹۹۹)، روند کاهش نرخ نفوذ را به شکل دیگری نیز می‌توان بیان نمود [۵۹]:

$$AR = PR \times T^m \quad (3-34)$$

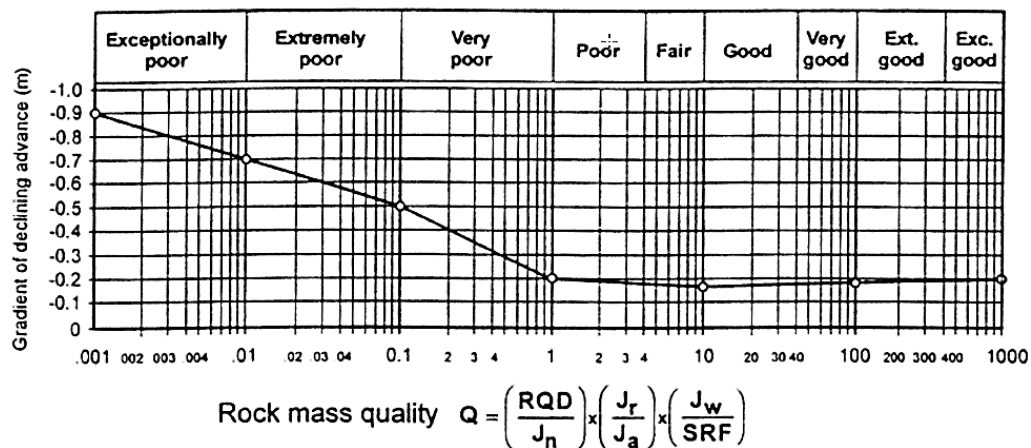
در رابطه (۳-۳۴)، T زمان برحسب ساعت، m گرادیان منفی با دیمانسیون LT^{-2} بیان کننده کاهش متوسط نرخ پیشروی مشاهده شده در افزایش واحد زمان بوده که در جدول (۳-۵) بر اساس مقدار Q تعریف و در نمودار شکل (۳-۱۹) نیز نشان داده شده است. به نظر می‌رسد مقدار m علاوه بر پارامتر Q به پارامترهای دیگری مانند قطر تونل (D) و ساینده‌گی (پارامترهای CLI و q) و تخلخل (n) سنگ نیز وابسته است. بنابراین بارتن برای محاسبه مقدار تصحیح شده m رابطه (۳-۳۵) را پیشنهاد داده است:

$$m \approx m_1 \left(\frac{D}{5}\right)^{0.2} \left(\frac{20}{CLI}\right)^{0.15} \left(\frac{q}{20}\right)^{0.1} \left(\frac{n}{2}\right)^{0.05} \quad (3-35)$$

در رابطه (۳-۳۵) به منظور پرهیز از مقدار صفر، هم برای q و هم برای n رقم 0.5 درصد در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۵: تبیین گرادیان منفی m و ارتباط تقریبی آن با مقدار Q [۵۹]

Q =	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
$m_1 \approx$	-0.9	-0.7	-0.5	-0.22	-0.17	-0.19	-0.21
Unexpected events or expected bad ground. Many stability and support-related delays and gripper problems. Operator reduces PR. This increases Q_{TBM} .	Most variation of (-) m may be due to rock abrasiveness, i.e. cutter life index CLI, quartz content and porosity are important. PR depends on Q_{TBM} .						



شکل ۳-۱۹: نمودار برآورد اولیه گرادیان منفی نرخ پیشروی به عنوان تابعی از مقدار Q [۶۰]

۳-۳-۲-۲-۲-۳ - رابطه نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با Q_{TBM}

ایجاد یک رابطه قابل استفاده بین نرخ نفوذ و Q_{TBM} بایستی براساس سعی و خطا مبتنی بر

پردازش اطلاعات پروژه‌های اجرا شده قبلی باشد. چگونگی ایجاد این رابطه توسط بارتن در [۶۰]

توضیح داده شده است. تلاش زیادی که برای دستیابی به یک رابطه ساده انجام شده، منجر به ارائه

رابطه (۳-۳۶) شده است. همچنین زمان مورد نیاز برای پیشروی تونل به مقدار L با رابطه (۳-۳۷)

محاسبه می‌شود:

$$PR (m/hr) = 5. (Q_{TBM})^{-0.2} \quad (۳-۳۶)$$

$$T = \left(\frac{L}{PR}\right)^{\frac{1}{1+m}} \quad (۳-۳۷)$$

نرخ پیشروی نیز با رابطه (۳-۳۸) تخمین زده می‌شود:

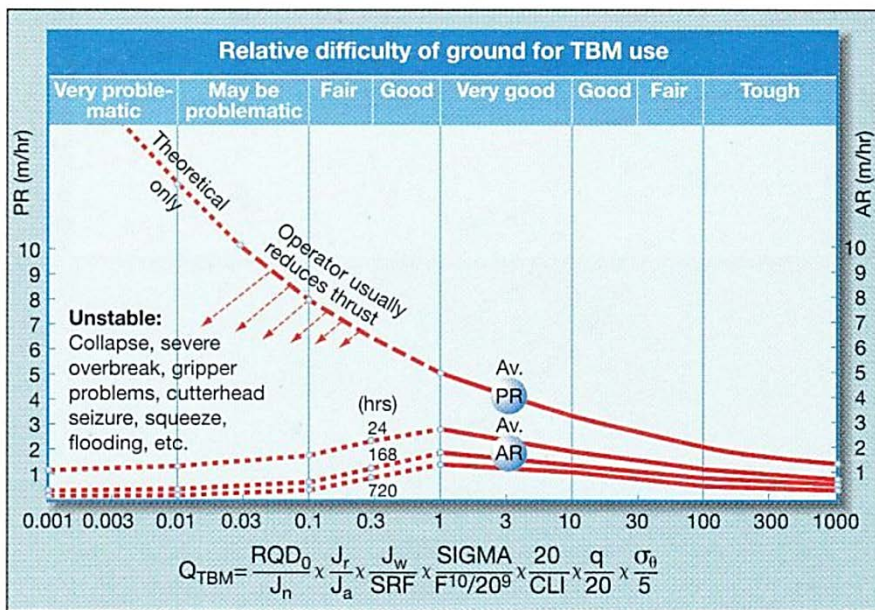
$$AR (m/hr) = 5. (Q_{TBM})^{-0.2} . T^m \quad (۳-۳۸)$$

رابطه عمومی میان معیار Q_{TBM} و پارامترهای PR و AR در شکل (۳-۲۰) نیز نمایش داده شده

است. توصیفات ارائه شده در بالای این شکل، صعوبت یا سهولت حفاری در زمین مورد نظر را نشان

می‌دهند. با معلوم بودن مقادیر Q_{TBM} می‌توان با استفاده از روابط ارائه شده، نرخ نفوذ و نرخ پیشروی

TBM را در واحدهای زمین‌شناسی مختلف پیش‌بینی کرد.



شکل ۳-۲۰: رابطه پیشنهادی بین PR، AR و Q_{TBM} [۵۹]

فرخ و همکاران (۲۰۱۲) مدل ۳-۲-۳-۳

فرخ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به منظور ارائه مدلی جدید برای پیش‌بینی عملکرد TBM با سطح دقت بیشتر، با تجزیه و تحلیل اطلاعات بیش از ۳۰۰ پروژه تونل‌سازی ثبت شده، پایگاه داده جامعی را تشکیل دادند. تجزیه و تحلیل اطلاعات این پایگاه داده مدلی ساده‌تر را با تاکید بر اندازه‌گیری پارامترهای اصلی همانند قطر تونل، RQD، USC، RPM و نوع سنگ فراهم کرد. با انجام رگرسیون چند متغیره رابطه (۳-۳۹) برای نرخ نفوذ ارائه شده است [۶۱]:

$$PR = \frac{Fn^{0.186} \cdot RQD_c^{0.133} \cdot RT_c^{0.183} \cdot RPM^{0.363} \cdot D^{5.47} \cdot \exp(0.046 \cdot D^2)}{5.64 \cdot UCS^{0.248} \cdot \exp(1.58 \cdot D)} \quad (3-39)$$

در رابطه (۳-۳۹)، D قطر تونل برحسب متر، RT_c کد عددی مربوط به نوع سنگ (جدول (۳-۶))، UCS مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ برحسب مگاپاسکال، RQD_c کد عددی شاخص کیفیت سنگ یا RQD (جدول (۳-۷))، Fn نیروی عمودی برش‌دهنده بر حسب کیلونیوتن و RPM سرعت چرخش کله حفاری بر حسب دور بر دقیقه است.

جدول ۳-۶: طبقه‌بندی نوع سنگ در پایگاه داده مدل فرخ و همکاران [۶۱]

نوع سنگ	کد	(RTc)
رس، مادستون، مارن، اسلیت، فیلیت، آرژیلیت	C	۵
ماسه‌سنگ، سیلتستون، کنگلومرا، کوارتزیت	S	۳
لای‌سنگ، گچ، دولومیت، ماربل	L	۳
لای‌سنگ کارستی	K	۳
سنگ‌های دگرگونی مانند گنایس و شیست	M	۲
آذرین دانه‌درشت مانند گرانیت و دیوریت	G	۱
آتشفشانی مانند بازالت، توف و آندزیت	V	۲

جدول ۳-۷: طبقه‌بندی RQD در پایگاه داده مدل فرخ و همکاران [۶۱]

CFF	کد	توضیحات	محدوده RQD
کمتر از ۸ ناپیوستگی در هر متر	S or 1	فراوانی کم	۹۰-۱۰۰
۸-۱۲ ناپیوستگی در هر متر	M or 2	فراوانی متوسط	۶۰ - ۹۰
۱۲-۱۶ ناپیوستگی در هر متر	H or 3	فراوانی زیاد	<۶۰

۳-۲-۴-۳-۳ مدل حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۱)

حسن‌پور و همکارانش در سال ۲۰۱۱ بر اساس اطلاعات ۱۵۸ مقطع از تونل انتقال آب در ایران و تونل دوم ماناپوری^۱ با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره مدلی را جهت پیش‌بینی عملکرد TBM ارائه دادند. این تونل‌ها در انواع سنگ‌ها شامل رسوبی، آذرین و دگرگونی با طیف گسترده‌ای از مقاومت حفاری شده‌اند. مقدار شاخص نفوذ صحرایی^۲ با رابطه (۳-۴۰) قابل محاسبه است [۶۲]:

$$FPI = \exp((0.008 UCS) + (0.015 RQD) + 1.384) \quad (۳-۴۰)$$

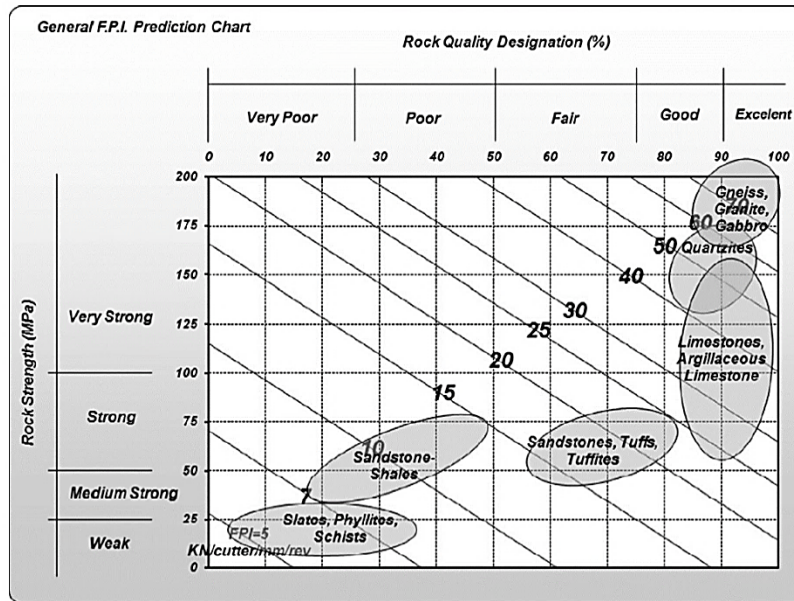
میزان نرخ نفوذ را می‌توان با رابطه (۳-۴۱) محاسبه کرد:

$$ROP(m/hr) = \frac{0.06 \times F_N \times RPM}{FPI} \quad (۳-۴۱)$$

در رابطه (۳-۴۱)، ROP نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت، F_N متوسط نیروی برش‌دهنده بر حسب کیلونیوتن، RPM سرعت چرخش کله حفاری بر حسب دور بر دقیقه است. همچنین همراه با این مدل نموداری برای تخمین اولیه FPI برای سنگ‌های مختلف ارائه شده است (شکل (۳-۲۱)).

¹ Manapouri Second Tailrace Tunnel.

² Field Penetration Index (FPI)



شکل ۳-۲۱: چارت تخمین FPI بر اساس ویژگی‌های توده‌سنگ [۶۲]

۳-۱- جمع‌بندی

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل بر اساس تهیه داده‌ها برای توسعه مدل، به دو دسته نظری و تجربی طبقه‌بندی شده‌اند. استفاده از روش‌های تجربی محدود به شرایط زمین‌شناسی مشابه با بانک اطلاعاتی مدل‌ها است. البته باید گفت که برخی از مدل‌ها با توجه به گستردگی بانک اطلاعاتی و به روز رسانی آن، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر خواص حفرپذیری سنگ و در نتیجه نفوذ برش‌دهنده در سنگ، ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ همچون تخلخل، مقاومت فشاری و مقاومت کششی و غیره است. علاوه بر ویژگی‌های ماده‌سنگ، شرایط درزه‌داری توده‌سنگ همچون درجه خردشدگی، جهت‌داری درزه‌ها و ویژگی‌های درزه‌ها نیز اهمیت ویژه‌ای در عملکرد ماشین دارند. در رابطه با ویژگی‌های ماشین، پارامترهای عملیاتی ماشین همچون نیروی پیشران، گشتاور، توان، تعداد، قطر و فاصله برش‌دهنده‌ها، قطر ماشین و غیره نقش قابل توجهی در عملکرد ماشین دارند.

فصل چهارم

ویژگی‌های زمین‌شناسی و

ژئومکانیکی قطعه ۲ تونل انتقال

آب لار-کلان

کار احداث سد خاکی لار و مخزن آن در سال ۱۳۵۹ به پایان رسیده است که با گذشت بیش از ۳۰ سال از بهره‌برداری آن به سبب گریز آب از دریاچه سد لار، در هیچ مقطع زمانی آبگیری سد تا تراز نرمال تحقق نیافته است. فرار آب از سد لار در تکیه‌گاه راست، عمدتاً به دلیل وجود درزه‌هایی با باز شدگی زیاد بوده و در تکیه‌گاه چپ حضور فروچاله‌های کارستی به عنوان عامل اصلی است.

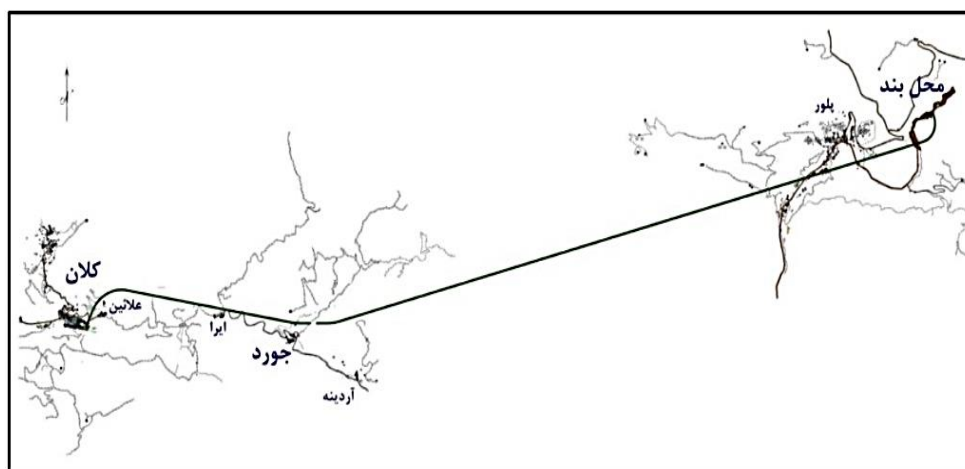
به دلیل هدرروی آب از سد لار، انتقال آب توسط تونل به نیروگاه کلان آخرین و تنها کار ممکن بود که می‌توانست انجام شود؛ کارشناسان زیادی از سراسر دنیا به ایران آمده و طرح‌های مختلفی را پیشنهاد داده بودند که در نهایت، این اقدام بهترین کار ممکن بود و خوش‌بختانه قرارگاه خاتم الانبیاء ساخت این تونل را آغاز کرد.

تونل انتقال آب لار-کلان شامل دو قطعه است؛ قطعه دوم از دره جورد شروع شده و به طول ۷/۵ کیلومتر به حوضچه پایاب نیروگاه کلان انتقال می‌یابد. یک کانال رابط مستطیلی شکل به ابعاد ۲/۸۵ در ۳/۹ متر (عرض در ارتفاع) و طول ۱۴۱ متر قطعه دوم را به قطعه اول در دره جورد متصل می‌نماید. قطر حفاری و تمام شده تونل قطعه اول ۵/۵۶ و ۴/۸ متر و قطعه دوم ۴/۵ و ۳/۸ متر با مقطع دایره‌ای شکل و جریان آزاد است. تراز کف دهانه ورودی تونل اول ۲۰۹۰/۲ و دهانه خروجی آن ۲۰۷۰/۲۲ متر از سطح دریا و همچنین تراز کف دهانه ورودی تونل دوم ۲۰۷۰ و دهانه خروجی آن ۲۰۵۵ متر از سطح دریا و شیب حفاری تونل قطعه اول ۰/۰۰۹۸ و قطعه دوم ۰/۰۰۲ است.

مطالعات زمین‌شناسی مهندسی در طول ۷/۵ کیلومتر تونل انتقال آب لار-کلان قطعه ۲، به منظور تعیین خصوصیات مهندسی واحدهای سنگی مختلف، ارزیابی پارامترهای مؤثر در پایداری تونل و پیش‌بینی مخاطرات احتمالی انجام گرفته تا بتوان با استفاده از آن، شرایط ژئومکانیکی و وضعیت پایداری زمین در حین حفر و زمان بهره‌برداری تونل را برآورد نمود [۶۳]. در این فصل قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان معرفی و مشخصات زمین‌شناسی و ماشین حفر تونل تشریح شده است.

۲-۴- سیمای پروژه

سیمای طرح تونل انتقال آب لار-کلان در شکل (۴-۱) نمایش داده شده است. به طور کلی این طرح را می‌توان به چند بخش تقسیم‌بندی کرد. بخش اول احداث بند انحرافی در کنار گذر تونل دوم جاده تهران-هراز، بخش دوم انتقال توسط حوضچه‌های رسوب‌گیر، بخش سوم شامل قطعه اول، بخش چهارم کانال رابط بین دو قطعه و در نهایت قطعه دوم که به حوضچه پایاب نیروگاه کلان ختم می‌شود [۶۳].



شکل ۴-۱: مسیر مصوب سامانه انتقال آب لار-کلان [۶۳]

۳-۴- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محدوده مورد مطالعه

قطعه دوم تونل انتقال آب لار-کلان، از دره جورد واقع در شمال شرقی روستای جورد با مختصات $X=578749$ و $Y=3962804$ آغاز شده و تا بخش انتهایی تونل انتقال آب لار-کلان در مجاورت نیروگاه و روستای کلان با مختصات $X=571819$ و $Y=3962711$ ادامه می‌یابد. این قطعه از تونل ۷۴۹۲ متر طول داشته و روند کلی آن شرقی-غربی است. جهت دسترسی به ورودی آب به این قطعه از تونل واقع در منتهی الیه شرقی آن، با عبور از رودهن به روستای جورد رسیده و از آنجا می‌توان به پرتال جورد و سایر بخش‌های شرقی محور تونل دسترسی داشت. همچنین با عبور از جاجرود و مجاورت سد لتیان، می‌توان به نیروگاه و روستای کلان رسیده و به این ترتیب به خروجی آب در پرتال کلان و سایر قسمت‌های غربی مسیر تونل دسترسی داشت [۶۳].

۴-۴- جایگاه زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه

به لحاظ تقسیمات پهنه‌های زمین‌ساختی ایران، محدوده اجرای پروژه تونل انتقال آب لار-کلان در کمربند کوهستانی البرز و در بخش جنوبی زیر پهنه البرز مرکزی قرار دارد. پهنه رسوبی-ساختاری البرز شامل بلندی‌های شمال صفحه ایران است که به شکل تاقدیسی مرکب، در یک راستای عمومی خاوری-باختری، از آذربایجان تا خراسان امتداد دارد. از نگاه زمین‌ریخت‌شناسی، مرز شمالی البرز منطبق بر تپه ماهورهای متشکل از نهشته‌های ترشیری و دشت ساحلی خزر است و از دیدگاه زمین‌شناختی، مرز شمالی البرز محدود به زمین‌درز تتیس کهن است که از برخورد سنگ‌کره قاره‌های البرز با سنگ‌کره توران، در تریاس پسین به وجود آمده است. ولی در بیشتر نقاط، محل زمین‌درز با ورق‌های رانده شده از شمال به جنوب پوشیده شده است. حد جنوبی البرز چندان روشن نیست. گسل تبریز، آنتی البرز، گسل گرمسار، گسل سمنان و گسل عطاری مرز جنوبی البرز دانسته شده‌اند. ولی چنین به نظر می‌رسد که مرز شاخصی در مرز جنوبی البرز وجود نداشته و گذر از پهنه ایران مرکزی به پهنه البرز تدریجی باشد.

از نظر کوه‌نگاری، مرز باختری البرز تا قفقاز کوچک و مرز خاوری آن تا کوه‌های پاراپا میسوس افغانستان گسترش دارد. وجود سنگ‌های ماگمایی همسان با آن در دیگر نواحی ایران، و به ویژه با دستیابی به یافته‌های بیشتری از زمین‌شناسی ایران، یقین شد که بسیاری از واحدهای سنگ چین‌های البرز و ایران مرکزی، از دیدگاه رخساره و شرایط تشکیل همانند هستند به گونه‌ای که البرز را می‌توان چین‌های حاشیه‌ای ایران مرکزی دانست که در شکل‌گیری آن برخورد دو صفحه ایران و توران و پیامدهای آن نقش اساسی داشته‌اند.

در زمان‌های پالئوزوئیک-مزوزوئیک حوضه رسوبی دامنه شمالی البرز عمیق‌تر از دامنه جنوبی بوده است، در حالی که از سنوزوئیک به بعد شرایط دیرینه جغرافیا تغییر عمده کرده و در حالی که در دامنه شمالی گسلش راندگی و فراخاست روی داده، در دامنه جنوبی البرز، دریای پس‌رونده، کم ژرفا و در حال فرو نشستی وجود داشته است که در آن چند هزار متر انباشته‌های آذرآواری-تخریبی

همزمان با کوهزایی بر جای نهاده شده است، که این وضعیت به خوبی در واحدهای رخنمون یافته در مسیر تونل که در دامنه‌های جنوبی البرز قرار گرفته‌اند، قابل پیگیری است [۶۳].

۴-۵- سنگ‌شناسی محدوده مورد مطالعه

مطالعات زمین‌شناسی و بررسی ویژگی‌های پتروگرافیک^۱ سنگ‌های محدوده نشان می‌دهد در محدوده مورد مطالعه (مقطع تونل)، واحدهای سنگی شامل سنگ‌های رسوبی تخریبی و بعضاً شیمیایی و بیوشیمیایی، سنگ‌های آذرآواری و سنگ‌های آذرین هستند [۶۳].

۴-۶- مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در محدوده مورد مطالعه

در مرحله اول مطالعات، در محدوده مورد مطالعه ۴ گمانه (گمانه‌های JK01، JK02، JK05، JK06) حفاری شده و در برخی از آنها آزمایشات درون گمانه‌ای نظیر تست لوژان و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده است. با توجه به عدم کفایت این تعداد از گمانه و آزمایشات برای شناسایی کل مسیر قطعه ۲ تونل، در مطالعات تکمیلی نیز ۳ گمانه دیگر (JK03، JK04، JK07) جانمایی و حفاری شده و آزمایش‌های مورد نیاز بر روی آنها صورت پذیرفته است. موقعیت گمانه‌ها تقریباً منطبق با محور تونل بوده و عمدتاً فاصله چندانی با آن ندارند [۶۳]. موقعیت گمانه‌های مورد استفاده در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



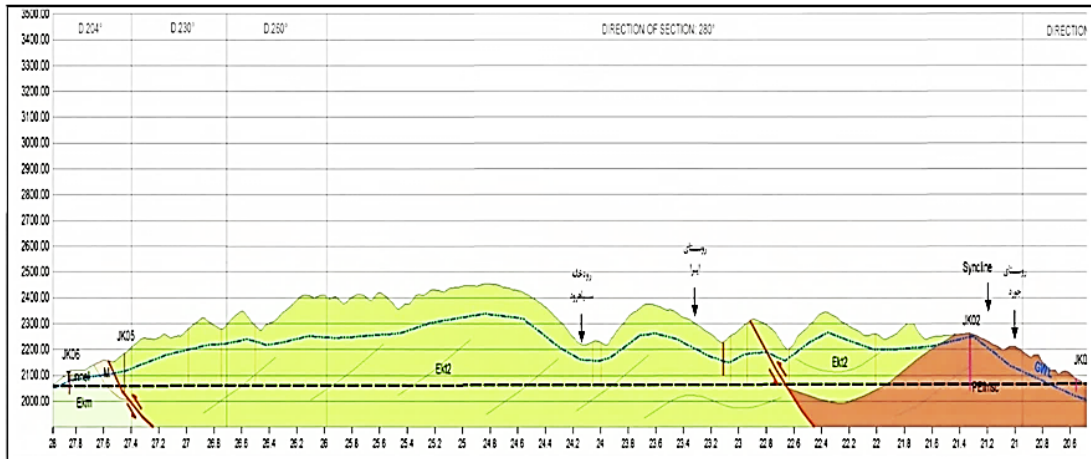
شکل ۴-۲: موقعیت گمانه‌های حفاری شده در طول قطعه ۲ تونل لار-کلان [۶۳]

^۱ Petrographic

۷-۴ واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه تونل

جهت تفکیک واحدهای سنگی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، علاوه بر ویژگی‌های سنگ‌شناسی، تغییرات ساختاری از قبیل ضخامت لایه‌ها، میزان خردشدگی، فراوانی ناپیوستگی‌ها، میزان هوازدگی و غیره لحاظ می‌شود. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در 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 [۶۳]. توصیف کلی این واحدها را جدول (۱-۴) می‌توان دید. همچنین طرحی از پروفیل تونل در شکل (۳-۴) نمایش داده شده است. جدول ۱-۴: توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی موجود در محدوده مورد مطالعه [۶۳]

واحد زمین‌شناسی مهندسی	واحد زمین‌شناسی	طبقه‌بندی سنگ	
		توصیف	مقاومت
SSCT	PEfmsc	Sandy Silty Clayey Tuff	Medium
LP	Ts	Leucocratic Plutonic Rocks	Strong to Very Strong
GT	Ekt	Green Tuff and Tuffaceous Shale	Medium
MP	TS	Melanocratic Plutonic Rocks, highly weathered	Weak
MSC	M	Marl, Sandstone, Siltstone, Conglomerate	Weak
KTM	Ekm	Light Green Tuff and Tuffite, Marly Tuff	Medium
Cr	-	Crushed Zone	Very Weak
Qt	Q	Gravel, Sand, Silt, Clay	Very Weak



شکل ۴-۳: طرحی از پروفیل تونل [۶۳]

۴-۸- ناپیوستگی‌ها

در میان ساخت‌های متعدد زمین‌شناسی، ناپیوستگی‌های (لایه‌بندی، گسل‌ها، درز و شکاف‌ها و برگوارگی^۱) موجود در توده‌سنگ، بیش از همه در پایداری فضاهای زیرزمینی مؤثر است. ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها که بر رفتار ژئومکانیکی توده‌سنگ مؤثر هستند را می‌توان در دو گروه زمین‌شناسی و ژئومکانیکی دسته‌بندی نمود. ویژگی‌های زمین‌شناسی ناپیوستگی‌ها شامل موقعیت فضایی و هندسی ناپیوستگی‌ها (جهت شیب، زاویه شیب، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری و تداوم) و شرایط سطح ناپیوستگی‌ها (زبری، مقاومت دیواره، بازشدگی و مواد پرکننده) است.

ویژگی‌های مختلف ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در واحدهای زمین‌شناسی مهندسی محدوده مورد مطالعه با استفاده از روش‌های استاندارد ISRM نسخه ۱۹۸۱ توسط شرکت ایمن‌سازان برداشت شده، تا با استفاده از این اطلاعات و خصوصیات سنگ بکر، پارامترهای مهندسی توده‌سنگ برآورد شود. برداشت ناپیوستگی‌ها عمدتاً به صورت پنجره‌ای و عمدتاً در رخنمون‌های مجاور محور تونل صورت گرفته است. لازم به ذکر است انتخاب ایستگاه‌های برداشت، تابعی از موجود بودن برونزدهای سنگی بوده است. با توجه به حجم برداشت‌های صورت گرفته در زمینه خصوصیات ناپیوستگی‌ها، این خصوصیات برای کلیه مسیر تونل به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفته است [۶۳].

¹ Foliation

در طبقه‌بندی‌های مهندسی سنگ از جمله RMR دسته ناپیوستگی‌های بحرانی که بیشترین تأثیر را در پایداری فضاهای زیرزمینی داشته باشد، مورد توجه ویژه قرار می‌گیرد. در محدوده مورد مطالعه با توجه به مشاهدات صحرایی و وضعیت هندسی سازه تونل و جهت‌یابی دسته ناپیوستگی‌های مختلف در واحدهای متفاوت، دسته درزه J1 با توجه به شیب، امتداد و فراوانی، به عنوان دسته درزه مهم و بحرانی معرفی شده است. مهم‌ترین دسته درزه هر واحد تحت عنوان J1 نامگذاری شده است که شیب، امتداد و سایر مشخصات آن برای واحدهای مختلف متفاوت است [۶۳]. اطلاعات مربوط به ناپیوستگی‌ها برای واحدهای مختلف در جدول (۲-۴) آمده است.

جدول ۲-۴: ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف [۶۳]

واحد زمین‌شناسی	دسته درزه	راستای درزه		فاصله‌داری (متر)			
		شیب	جهت شیب	۰/۰۲ - ۰/۰۶	۰/۰۶ - ۰/۲	۰/۲ - ۰/۶	۰/۶ - ۲
SSCT-1	B	۶۱	۲۶۷	-	۲۰	۸۰	-
	J1	۷۵	۱۸۱	-	۲۰	۸۰	-
	J2	۳۳	۸۴	-	-	-	۱۰۰
	J3	۴۸	۸	-	-	-	۱۰۰
SSCT-2	B	۶۷	۲۰۱	-	۲۵	۷۵	-
	J1	۳۵	۷	-	-	۵۰	۵۰
	J2	۶۰	۱۲۶	-	-	۳۵	۶۵
	J3	۳۹	۲۹۴	-	-	۴۰	۶۰
LP-1	J1	۶۱	۳۲	-	-	۴۰	۶۰
	J2	۶۰	۱۰۹	-	-	۴۰	۶۰
	J3	۳۴	۱۸۵	-	-	۴۰	۶۰
LP-2	J1	۵۸	۱۷۶	-	۳۰	۷۰	-
	J2	۶۰	۹۰	-	۳۰	۷۰	-
	J3	۴۸	۲	-	-	۲۰	۸۰
GT	B	۶۲	۳۴۵	-	۷۰	۳۰	-
	J1	۸۱	۲۲۹	-	۱۰	۹۰	-
	J2	۸۸	۹۸	-	-	۸۰	۲۰
	J3	۳۰	۱۸۶	-	-	۳۰	۷۰
	J4	۲۵	۹۳	-	-	۱۰	۹۰
MP	J1	۳۵	۲۲۰	-	-	۹۰	۱۰
	J2	۷۱	۲۶۷	-	-	۶۰	۴۰
	J3	۷۵	۱۹۵	-	-	-	۱۰۰
MSC	B	۸۶	۳۳۴	-	۲۰	۶۰	۲۰
	J1	۴۷	۲۱۲	-	-	۶۰	۴۰
	J2	۷۰	۹۸	-	-	۴۰	۶۰
	J3	۵۶	۱۰	-	-	۲۰	۸۰
KTM	B	۷۰	۳۰۴	۱۰	۴۰	۵۰	-
	J1	۴۵	۲۱۵	-	۴۰	۶۰	-
	J2	۶۸	۹۶	-	۲۰	۸۰	-
	J3	۵۵	۸	-	-	۹۰	۱۰
	J4	۶۴	۱۱۹	-	-	۲۵	۷۵

۴-۹- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر

برای تعیین پارامترهای مقاومتی سنگ‌ها علاوه بر انجام آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه‌ها که شامل آزمایش تعیین دانسیته خشک و مرطوب، تخلخل، جذب آب، مقاومت تراکمی تک محوری، بار نقطه‌ای، مقاومت فشاری سه محوری، مقاومت کششی، سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی و مطالعات مقطع نازک است. آزمایش‌های ساده صحرایی بر روی رخنمون‌های سطحی نیز صورت گرفته است. ساده‌ترین آزمونی که در این زمینه استفاده شده، آزمون شاخص دستی است که با استفاده از چکش زمین‌شناسی و چاقوی جیبی، مقاومت تراکمی تک محوری سنگ‌ها را تعیین می‌نماید. این آزمون توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استاندارد شده است. همچنین از چکش اشمیت نیز برای تخمین پارامترهای مقاومتی نمونه سنگ واحدهای مختلف استفاده شده است. بدین منظور در هر یک از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، بر روی سنگ ضربات چکش اشمیت نواخته شده و پس از حذف اعداد نامتعارف، متوسط اعداد به عنوان مقاومت تک‌محوری سنگ، در نظر گرفته شده است. آزمایش‌های ذکر شده بر روی تمامی واحدهای سنگی رخنمون یافته در محدوده مورد مطالعه صورت پذیرفته است [۶۳]. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و آزمون‌های صحرایی که بر روی نمونه‌های واحدهای مختلف صورت گرفته، در جدول (۴-۳) ارائه شده است.

۴-۱۰- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ‌ها

رفتار مکانیکی توده‌سنگ، توسط مقاومت ژئومکانیکی آن کنترل می‌شود. مقاومت ژئومکانیکی توده‌سنگ به دو عامل ویژگی‌های سنگ بکر و شرایط ناپیوستگی‌ها وابسته است. اولین گام در شناسایی و تعیین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ، طبقه‌بندی آن است. معمولاً برای طبقه‌بندی توده‌سنگ‌ها از نظر ژئومکانیکی به منظور حفاری تونل، از برخی روش‌های تجربی نظیر Q ، GSI ، RMR ، RQD و N استفاده می‌شود. این طبقه‌بندی‌ها مبتنی بر پارامترهایی نظیر خواص سنگ بکر و وضعیت عمومی ناپیوستگی‌ها هستند.

جدول ۳-۴: ویژگی‌های نمونه سنگ بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی در واحدهای زمین‌شناسی مختلف در محدوده مورد مطالعه تونل [۶۳]

واحد زمین‌شناسی	محدوده	Physical Properties					σ_t (Mpa)		Is(50) (Mpa)	σ_c (Mpa)
		γ_{dry} (g/cm ³)	γ_{sat} (g/cm ³)	n %	Water Absorbed %	W %	Sat	Nat		
SSCT	Min	۲/۳۴	۲/۳۹	۰/۹۹	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۶	۰/۷	۰/۱۷	۶/۷
	Max	۲/۷۴	۲/۷۶	۴/۸	۲/۰۲	۱/۱	۱۱/۴۹	۱۱/۵۶	۵/۳۳	۱۱۸/۱
	Mean	۲/۶۷	۲/۶۹	۲/۴۳	۰/۹۱	۰/۶۴	۵/۹۷	۵/۹۱	۲/۳۷	۵۴/۰۷
	S.D	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۹۸	۰/۳۹	۰/۳۴	۳/۱	۳/۵۷	۱/۶۱	۳۴/۳۷
LP	Min	۲/۵۶	۲/۶	۰/۳	-	-	۳/۴۲	۴/۲۶	۳/۲۷	۶۰/۶
	Max	۲/۸۴	۲/۸۵	۴	-	۱/۶	۱۲/۳۵	۱۳/۴۶	۷/۶۳	۹۵
	Mean	۲/۷۲	۲/۷۳	۱/۷	-	۰/۶	۷/۵۵	۱۰/۴۱	۴/۷۶	۷۷/۸
	S.D	-	-	-	-	-	-	-	-	۱۷/۲
GT	Min	۲/۲۶	۲/۳۷	۱/۳	۰/۵	۰/۳	۲/۹۹	-	۱/۴	۳۵
	Max	۲/۶۳	۲/۶۵	۱۰/۷	۴/۷	۱/۱	۱۰/۷	-	۳/۷۷۶	۹۴/۴
	Mean	۲/۴۴	۲/۵۱	۶/۷۳	۲/۸۵	۰/۶	۵/۵	-	۲/۴۸۲۴	۶۲/۰۶
	S.D	۰/۱۳	۰/۱۱	۳/۴۳	۱/۵۳	۲/۳۶	-	-	-	۶۲/۰۶
MP	Min	۲/۴۸	۲/۶	۲/۴۸	-	۰/۵	۱/۷۶	-	۱/۳۳	۲۷/۳۱
	Max	۲/۷۸	۲/۸۳	۳/۸۸	-	۱/۹۹	۵/۹	-	۲/۵۶	۵۱/۷۷
	Mean	۲/۶۹	۲/۷۵	۳/۱	-	۱/۲	۳/۷	-	۱/۸۲	۳۴/۵۶
	S.D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MSC	Min	۲/۴۴	۲/۲۵	۴/۷۶	۱/۹۹	۰/۳	۲/۲۳	-	۲/۰۸	۱۴/۰۷
	Max	۲/۶۳	۲/۸۵	۸/۸۸	۳/۷۳	۱/۰۸	۶/۷۳	-	۳/۴۲	۵۰/۴۳
	Mean	۲/۵۴	۲/۵۸	۶/۰۵	۲/۶۹	۰/۴۶	۴/۴	-	۲/۶۸	۲۰/۹۹
	S.D	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KTM	Min	۲/۳۴	۲/۲۹	۷/۸	۳/۳	۰/۲۷	۲/۹۹	-	۲/۴۸	۱۲/۱۶
	Max	۲/۵۵	۲/۷۷	۱۲/۱	۵/۱	۱/۰۷	۸/۲	-	۲/۹۳	۴۵/۷
	Median	۲/۴۳	۲/۴۸	۹/۷	۴/۱	۰/۶۵	۵/۶	-	۲/۷۵	۲۲/۷۷
	S.D	۰/۰۹	-	-	-	-	۲/۶۳	-	۰/۱۹	-

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته از ناپیوستگی‌ها در ایستگاه‌های مختلف و ویژگی‌های سنگ بکر در واحدهای مختلف در محدوده مورد مطالعه و با انجام تحلیل‌های آماری مانند محاسبه میانگین، پارامترهای مورد نیاز برای انجام طبقه‌بندی توده‌سنگ به دست آمده‌اند [۶۳]. نتایج طبقه‌بندی مهندسی واحدهای مختلف در جدول (۴-۴) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در واحدهای فاقد گمانه، میزان RQD از رابطه (۴-۱) محاسبه شده است. همچنین با توجه به اهمیت شاخص مقاومت زمین‌شناسی در برآورد پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ، این پارامتر علاوه بر روش مشاهده سر زمین و استفاده از جدول استاندارد، از روش هوک (۲۰۱۳) [۶۴] و کای^۱ (۲۰۰۴) [۶۵] نیز محاسبه شده و میانگین سه روش در ستون جداگانه‌ای ارائه

¹ Cai

جدول ۴-۴: نتایج طبقه‌بندی مهندسی در واحدهای زمین‌شناسی مختلف [۶۳]

Unit	Range	RQD (%)	RMR (Basic)	Q	N	GSI			
						(Observed)	(Hoek 2013)	(Cai 2004)	(Average)
SSCT	Min	۱۰	۳۱	-/۱	۰/۷۵	۲۸	۳۵	۲۷	۳۰
	Max	۶۰	۶۲	۲	۵	۴۵	۶۷/۵	۵۷	۵۷
	Ave	۲۵	۴۲	-/۴	۲	۳۴	۴۲/۵	۳۳	۳۷
LP-1	Min	۴۰	۵۲	۱	۵	۵۰	۵۰	۴۲	۴۷
	Max	۹۰	۸۲	۲۰	۵۰	۶۸	۹۰	۷۲	۷۷
	Ave	۷۰	۶۷	۵	۲۵	۶۰	۷۲/۵	۵۶	۶۳
LP-2	Min	۳۰	۳۸	-/۸	۴	۴۴	۴۵	۴۱	۴۳
	Max	۸۵	۷۴	۱۰	۲۵	۵۹	۸۷/۵	۷۰	۷۲
	Ave	۵۵	۵۵	۲	۱۰	۵۰	۶۵	۵۵	۵۷
GT	Min	۲۰	۳۱	-/۱	۰/۷۵	۲۷	۴۰	۲۶	۳۱
	Max	۷۰	۶۰	۱/۵	۳/۷۵	۴۵	۷۲/۵	۵۶	۵۸
	Ave	۴۰	۳۷	-/۲۵	۱/۸۷۵	۳۴	۵۰	۳۵	۴۰
MP	Min	۲۵	۳۸	۰/۲۵	۱/۲۵	۳۵	۴۲/۵	۳۵	۳۸
	Max	۸۵	۶۴	۴	۱۰	۵۰	۸۰	۵۸	۶۳
	Ave	۵۵	۴۴	-/۷	۳/۵	۴۰	۵۷/۵	۴۶	۴۸
MSC	Min	۲۰	۳۲	-/۱	۱	۲۹	۴۰	۲۶	۳۲
	Max	۶۵	۵۰	۱/۸	۴/۵	۴۵	۷۰	۵۲	۵۶
	Ave	۳۵	۳۹	-/۲۵	۱/۸۷۵	۳۴	۴۷/۵	۳۷	۴۰
KTM	Min	۲۵	۳۴	-/۱۵	۰/۷۵	۳۰	۴۲/۵	۲۸	۳۴
	Max	۷۰	۵۰	۱/۶	۴	۴۵	۷۲/۵	۵۰	۵۶
	Ave	۵۰	۴۰	-/۴	۲	۳۵	۵۵	۴۱	۴۴
Cr	Min	-	۱۵	۰/۰۲	۰/۲	۱۴	-	-	-
	Max	-	۳۳	۰/۱۵	۰/۷۵	۳۱	-	-	-
	Ave	-	۲۳	-/۰۵	۰/۳۷۵	۲۱	-	-	-

شده است. محاسبه RMR بر اساس جدول پیشنهادی بینیاویسکی^۱ (۱۹۸۹) [۶۶] صورت گرفته و در صورت لزوم مقادیر به دست آمده بر اساس مقادیر GSI و مشاهدات صحرایی و با استفاده از قضاوت مهندسی تعدیل شده است. این تعدیل‌ها بیشتر در مورد مقادیر حداقل و حداکثر و به منظور کوچک‌تر نمودن بازه به دست آمده، انجام شده است [۶۳].

$$RQD = 3.3J_v - 115 \quad (1-4)$$

۴-۱۱- تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ

تعیین دقیق پارامترهای مقاومتی و ژئومکانیکی توده‌های سنگی، با انجام آزمایش‌های برجا صورت گرفته است. در پروژه‌هایی که نسبت به تغییر شکل‌های جزئی نیز حساس هستند، تعیین دقیق این

¹ Bieniawski

پارامترها اهمیت زیادی دارد. پروژه‌هایی همچون نیروگاه‌های هسته‌ای، سدهای قوسی، تونل‌ها و برج‌های مسکونی از جمله پروژه‌هایی هستند که در طول عمر مفید آنها نباید کمترین تغییر شکل اتفاق افتد. در این پروژه‌ها حتی زمانی که خطر گسیختگی وجود ندارد نیز تغییر شکل زمین بسیار نگران کننده است، زیرا تغییر شکل ناهمگن حتی به مقداری جزئی می‌تواند باعث افزایش شدید تنش در سازه شود. پارامترهای ژئومکانیکی واحدهای مختلف تونل در جدول (۴-۵) ارائه شده است. مقاومت فشاری توده‌سنگ برای تونل مورد نظر از رابطه هوک (۲۰۰۲) محاسبه شده است [۶۳].

جدول ۴-۵: مقادیر پارامترهای ژئوتکنیکی توده‌سنگ در واحدهای مختلف [۶۳]

واحد زمین‌شناسی	Range	Depth	C (MPa)	Phi (Degree)	Sigma-t (KPa)	Sigma-c (MPa)	Sigma-cm (MPa)	Em (GPa)		ν	G(Gpa)	K(Gpa)
								Hoek 2006	Hoek 2002			
SSCT	Min	۲۰	-/۰.۷	۴۲	۲/۶	-/۱۱۵	-/۸۴۱	-	-/۸۱۹	-/۳۵	-/۳	-/۹۱
	Max	۳۱۵	۲/۲۷۴	۵۰	۳۳۵	۱۰/۶۵۳	۲۷/۱۳۲	۱۴/۲۵۹	-	-/۴۴	۴/۹۶	۳۷/۷۲
	Ave	۲۰۰	-/۷۷۳	۴۳	۳۶	۱/۴۸۱	۸/۰۴۱	۱/۸۵۲	-	-/۴	-/۶۶	۳
LP-۱	Min	۱۴۰	۱/۱۲۷	۵۸	۶۳	۴/۷۷۸	۲۳/۲۰۶	۲/۳۶۹	-	-/۳۶	-/۸۷	۲/۷۳
	Max	۱۹۰	۳/۲۲۸	۶۲	۵۷۸	۲۶/۴۲	۴۸/۹۸۸	۱۰/۳۸۴	-	-/۳۳	۳/۹۱	۹/۹۸
	Ave	۱۶۵	۱/۶۸۲	۵۹	۱۶۵	۹/۸۶۷	۲۹/۵۴۸	۶/۳۴۸	-	-/۳۴	۲/۳۶	۶/۸
LP-۲	Min	۱۶۰	-/۹۹۲	۵۳	۲۸	۲/۴۰۸	۱۵/۳۷۷	۱/۸۲	-	-/۳۳	-/۶۸	۱/۸۲
	Max	۲۸۵	۳/۰۵۹	۵۹	۳۹۷	۱۹/۹۸	۴۳/۶۷۸	۹/۴۵۳	-	-/۳۷	۳/۴۶	۱۱/۷۲
	Ave	۲۱۰	۱/۶۶۸	۵۷	۱۰۵	۷/۰۱۸	۲۶/۱۷۲	۴/۸۸۴	-	-/۳۵	۱/۸۱	۵/۳۱
GT	Min	۱۷۵	-/۵۳۴	۳۸	۱۵	-/۶۴۵	۴/۵۰۶	-/۴۰۸	-	-/۳۹	-/۱۵	-/۶۱
	Max	۵۰۸	۲/۶۹۹	۴۵	۳۰۶	۹/۰۱۵	۲۲/۱۶۸	۷/۱۲	-	-/۴۸	۲/۴	۷۶/۰۷
	Ave	۳۰۰	۱/۰۸۴	۴۲	۵۲	۲/۰۵۲	۹/۸۷۸	۱/۸۴۲	-	-/۴۲	-/۶۵	۳/۸۷
MP	Min	۲۰۵	-/۷۴۹	۴۳	۱۱	-/۷۹۷	۵/۶۶۴	-/۹۹۱	-	-/۳۷	-/۳۶	۱/۲۲
	Max	۲۱۵	۱/۵۸۷	۵۴	۱۳۳	۶/۵۶۶	۱۷/۹۸۶	۹/۶۹۸	-	-/۳۷	۳/۵۳	۱۲/۸۹
	Ave	۲۱۰	-/۹۹۵	۴۷	۲۹	۱/۸۵۱	۸/۸۴	۳/۱۸۷	-	-/۳۷	۱/۱۶	۴/۲۳
MSC	Min	۱۳۰	-/۲۷۶	۳۴	۸	-/۲۷۸	۱/۷۰۵	-/۲۵۴	-	-/۳۹	-/۰۹	-/۳۷
	Max	۱۸۰	۱/۰۸۶	۴۶	۱۶۶	۴/۲۹۶	۱۰/۴۹۲	۵/۶	-	-/۳۹	۲/۰۲	۸/۳۸
	Ave	۱۵۵	-/۴۵۴	۳۷	۲۱	-/۶۹۴	۳/۰۷۴	۱/۴۲۴	-/۴	-/۵	۲/۴	۲/۴
KTM	Min	۱۵	-/۰۷۶	۵۱	۶	-/۲۷۴	۱/۶۸۶	-/۲۵۵	-	-/۳۸	-/۰۹	-/۳۶
	Max	۱۲۰	-/۸۸۳	۵۰	۱۲۸	۳/۹	۱۰/۲۹۱	۵/۱۳۵	-	-/۴	۱/۸۴	۸/۴۲
	Ave	۹۰	-/۳۷۲	۴۵	۲۶	-/۹۵۸	۳/۹۴۴	۱/۹	-	-/۳۸	-/۶۹	۲/۷
Cr	Min	۱۵	-/۰۳۴	۳۷	۱/۴	-/۰۴	-/۵۷۳	-	-/۳۷۶	-/۳۵	-/۱۴	-/۴۳
	Max	۳۰۰	-/۷۷۷	۳۴	۲۵	-/۸۳۷	۵/۱۰۸	۱/۱۵۶	-	-/۴۳	-/۴	۲/۸۳
	Ave	۱۶۰	-/۲۸۶	۲۸	۴/۹	-/۱۶۳	۱/۵۸۳	-	-/۸۱۸	-/۳۹	-/۲۹	۱/۲۲

۱۲-۴- تنش مماسی

حفر فضاهای زیرزمینی موجب تنظیم مجدد میدان تنش می‌شود. در این صورت جهت و اندازه تنش‌ها تغییر می‌یابد تا امکان توزیع مجدد بار از نواحی حفر شده به نواحی حفر نشده فراهم شود. تنش حاصل از تنظیم دوباره تنش‌ها در دیواره حفاری‌های زیرزمین بیشتر بوده، با افزایش فاصله از

دیواره کاهش پیدا می‌کند. مقدار این تنش‌ها در دیواره تونل با عنوان تنش مماسی شناخته شده و این در مدل Q_{TBM} مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت محاسبه میزان تنش مماسی از رابطه کرش^۱ استفاده شده است. مقادیر تنش مماسی برای واحدهای مختلف زمین‌شناسی مهندسی در جدول (۴-۶) آورده شده است.

جدول ۴-۶: مقادیر تنش مماسی برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف [۶۳]

واحد زمین‌شناسی	محدوده	σ_{θ} (MPa)	واحد زمین‌شناسی	محدوده	σ_{θ} (MPa)
SSCT	Max	۱۲/۵۶	MP	Max	۹/۳۲
	Min	۰/۹۷		Min	۹/۶۸
	Avg	۸/۹۷		Avg	۹/۶۳
LP-1	Max	۸/۲۴	MSC	Max	۶/۷۵
	Min	۶/۶۵		Min	۶/۱۸
	Avg	۷/۵۱		Avg	۶/۶۷
LP-2	Max	۱۲/۸۸	KTM	Max	۴/۹۶
	Min	۷/۴۴		Min	۰/۶۹
	Avg	۹/۶۷		Avg	۳/۷۲
GT	Max	۲۰/۰۸	Cr	Max	۱۳/۰۲
	Min	۷/۷۳		Min	۰/۷۴
	Avg	۱۲/۵۶		Avg	۷/۷۴

۴-۱۳- مشخصات ماشین حفر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان

برای اولین بار شرکت سلی^۲ از ایتالیا که سابقه‌ای طولانی در پروژه‌های حفاری مکانیزه دارد، ایده ساخت ماشینی با توانایی کار در زمین‌های بسیار خردشده و ضعیف و نیز زمین‌هایی با مقاومت مناسب را مطرح کرد و این ماشین تحت عنوان ماشین حفر تونل با سپر دوگانه^۳ یا تلسکوپی توسط کارخانه رایبیز^۴ آمریکا ساخته شد. ماشین با سپر دوگانه عملیات گریپ و سپر را همزمان و در ترکیب با یکدیگر به کار می‌گیرد و لذا می‌تواند در دامنه وسیع‌تری از شرایط زمین‌شناسی مورد استفاده قرار

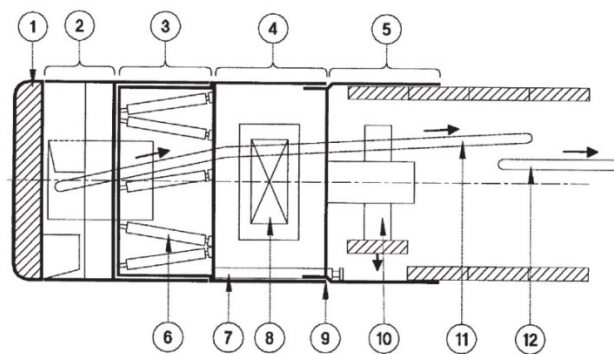
¹ Kirsch

² SELI Company

³ Double Shield

⁴ Robbins

گیرد. به دلیل همین ویژگی، مزیت مهم ماشین‌های سپر دوگانه نسبت به ماشین‌های تک سپر امکان نصب نگهداری به صورت همزمان با حفاری است. اجزا سازنده این ماشین عبارتند از سپر جلویی و کله حفار، سپر اصلی همراه با جک‌های جلو برنده و دیوارگیرها، سپر دنباله جهت نصب پوشش تونل، سیستم نصب نگهداری و سیستم پیشروی ثانویه که مجموعه‌ای از سیلندرهای هیدرولیکی بوده و می‌تواند ماشین را در شرایط خاص با اتکا به پوشش نصب شده در تونل به جلو براند [۴۵]. شکل (۴-۴) طرحی از ماشین حفر تلسکوپی را نمایش می‌دهد. ماشین مورد استفاده در قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان ساخت شرکت ویرث^۱ بوده و مشخصات آن در جدول (۴-۷) آورده شده است.



- | | |
|-----------------|----------------------|
| ۱- تاج حفار | ۶- جک‌های تراست اصلی |
| ۲- سپر جلو | ۷- جک‌های تراست کمکی |
| ۳- سپر تلسکوپی | ۸- دیوارگیر |
| ۴- سپر دیوارگیر | ۹- دستگاه نصب سگمنت |
| ۵- سپر دنباله | ۱۰- نوار نقاله |

شکل ۴-۴: ساختار و اجزای ماشین حفر تونل با سپر دوگانه [۶۷]

جدول ۴-۷: مشخصات فنی ماشین حفر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان [۶۸]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
قطر ماشین (متر)	۴/۵۳	توان نصب شده (کیلو وات)	۱۱۲۰
قطر دیسک کاتر (میلی‌متر)	۴۳۲	سرعت چرخش کله حفاری (دور بر دقیقه)	۱۲
فاصله‌داری دیسک کاترها (میلی‌متر)	۷۵	گشتاور نصب شده (کیلو نیوتن-متر)	۸۰۲
تعداد دیسک کاترها	۳۶	حداکثر نیروی پیشران (کیلو نیوتن)	۱۸۰۰۰

^۱ Wirth

۴-۱۴- جمع‌بندی

در این فصل، مشخصات زمین‌شناسی، ژئومکانیکی و مشخصات ماشین حفر تونل قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان تشریح شد. تعیین خصوصیات مهندسی واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، برای ارزیابی پارامترهای موثر در پایداری تونل و پیش‌بینی مخاطرات احتمالی انجام گرفته، تا بتوان با استفاده از اطلاعات به دست آمده، وضعیت پایداری زمین در حین حفر و زمان بهره‌برداری تونل را برآورد نمود. همچنین با استفاده از مشخصات واحدهای زمین‌شناسی، می‌توان عملکرد ماشین حفر تونل را در برخورد با هر یک واحدها مورد ارزیابی قرار داد. همچنین استفاده از ماشین حفر تمام مقطع تلسکوپی در زمین‌های با شرایط متغیر، بسیار کاربردی است.

فصل پنجم

تخمین نرخ پیشروی ماشین حفر

تمام مقطع قطعه ۲ تونل انتقال آب

لار-کلان

در این فصل با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و تحلیل قطعی نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع تونل برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان که اطلاعات آنها موجود بود (یک کیلومتر از طول تونل)، تخمین زده شده است. در این روش‌ها، نرخ پیشروی بر اساس روابط مدل‌های Q_{TBM} ، NTNU، CSM، CSM تصحیح شده با فاکتور تصحیح روش EMI، حسن پور و فرخ به دست آمده و با مقدار واقعی نرخ پیشروی ثبت شده در هنگام حفاری مقایسه شده است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور با مقدار واقعی و مقایسه‌ای بین نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش تحلیل قطعی انجام شد. در هر یک از مدل‌ها تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر روی نرخ نفوذ، با تحلیل حساسیت مشخص شده است.

۵-۲- توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی

نوع توابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای پارامترهای ورودی مدل‌های مختلف در جدول (۵-۱) آورده شده است. نیروی پیشران، RPM و ضریب بهره‌وری نیز همان مقدار واقعی عملکرد ماشین در واحدهایی که حفاری انجام شده است، در نظر گرفته شد. تابع توزیع مربوط به این پارامترها با استفاده از نرم‌افزار EasyFit به دست آمده و برای واحدهایی که تعداد داده مربوط به این سه پارامتر کم بوده، تابع توزیع یکنواخت در نظر گرفته شده است (جدول (۵-۲)).

با توجه به موجود بودن تنها سه مقدار (حداکثر، حداقل و محتمل‌ترین)، 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 نوع تابع توزیع احتمال (مثلی^۱ و پرت^۲) برای بیشتر پارامترها استفاده شده است؛ تنها در این دو نوع تابع توزیع احتمال

^۱ Triangular

^۲ Pert

می‌توان از مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین استفاده کرد و توابع توزیع احتمال دیگر نیازمند وجود داده‌ها برای محاسبه پارامترهای ورودی خود هستند. هنگام اجرای شبیه‌سازی برای پارامترهایی که دو نوع تابع توزیع احتمال دارند، یکبار تابع توزیع احتمال مثلثی برای همه پارامترها (بجز پارامترهای دارای توزیع احتمال خاص) بکار گرفته شده، و بار دیگر تابع توزیع احتمال پرت استفاده شده و نتایج برای هر دو تابع توزیع احتمال به صورت جداگانه به دست آمده است. همچنین در سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور، پارامترهای ورودی مستقل از هم در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۵-۱: توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل‌های پیش‌بینی مختلف

نوع تابع توزیع احتمال				پارامترهای ورودی	مدل
Triangular	Pert	Uniform	Fix		
✓	✓			Q	Q _{TBM}
✓	✓			UCS	
✓	✓			Y	
		✓		CLI	
		✓		Quartz content	
✓	✓			σ_{θ}	NTNU
		✓		DRI	
			✓	Alpha	
			✓	Fracture Class	
✓	✓			Prosity	
			✓	Ka	CSM
			✓	Ks	
	✓			UCS	
	✓			σ_t	
			✓	R	
			✓	T	حسن پور
			✓	S	
✓	✓			UCS	
✓	✓			RQD	
✓	✓			UCS	
			✓	D	فرخ
			✓	Rock Type	
			✓	RQDc	

جدول ۵-۲: تابع توزیع احتمال F_n ، RPM و U در واحدهای زمین‌شناسی مختلف

تابع توزیع احتمال			واحد زمین‌شناسی
RPM	U	FN	
Gamma	Triangular	Weibull	KTM
Uniform	Uniform	Uniform	MSC
Uniform	Uniform	Uniform	MP
Uniform	Uniform	Uniform	GT
Uniform	Uniform	Uniform	Cr

۵-۳- محاسبه تعداد تکرار مورد نیاز برای انجام شبیه‌سازی مونت کارلو

همانطور که در بخش (۲-۳-۳-۵) بیان شد، هر چه اجرای دنباله‌های بکار رفته در یک تحلیل بیشتر باشد، آمارها دقیق‌تر خواهند بود و تحلیلگر می‌تواند اطمینان کافی به نتایج گرفته شده داشته باشد. در این تحقیق تعداد تکرار مورد نیاز در هر مدل از رابطه (۲-۱۳) محاسبه شده است. بدین منظور ابتدا شبیه‌سازی با تعداد ۱۰۰ تکرار انجام و انحراف استاندارد نرخ پیشروی در هر واحد زمین‌شناسی به دست آمد؛ در نتیجه مقدار حداکثر انحراف استاندارد برای تخمین حداقل تکرار مورد نیاز با سطح اطمینان ۹۵ درصد و خطای ۵ درصد، مد نظر قرار گرفته است. حداقل تعداد تکرار در نظر گرفته شده برای تمامی مدل‌ها برابر با ۱۰۲۰۰۰ است.

در بخش‌های بعد، ابتدا بر اساس هر یک از روش‌ها یعنی روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و تحلیل قطعی، به دست آمده و در جداولی ارائه شده است. سپس مقایسه‌ای بین بازه و متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل‌های مختلف مورد استفاده در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، با بازه و متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی، در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی انجام شده است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج سه روش احتمالاتی و مقایسه‌ای بین نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو و نتایج تحلیل قطعی با مقدار واقعی نرخ پیشروی انجام می‌شود.

۵-۴- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

پس از مشخص شدن توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی مدل‌ها و تعداد تکرار مورد نیاز و نوشتن روابط مدل‌ها در نرم‌افزار اکسل، با استفاده از افزونه Oracle crystal ball شبیه‌سازی انجام شده و هیستوگرام نرخ پیشروی برای مدل‌ها به دست آمده است.

۵-۴-۱- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل QTBM

همانطور که در بخش (۳-۲-۳-۲) بیان شد، به دلیل محدود بودن آزمایشگاه‌های مجهز به تجهیزات مورد نیاز برای تعیین CLI، انجام این آزمون به ویژه در ایران بسیار دشوار و پرهزینه است،

لذا مقدار این پارامتر براساس بانک اطلاعاتی آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF، جدول (۳-۴) و اطلاعات موجود در مقالات مختلف ([۶۹] و [۷۰]) برای پروژه‌هایی که به نحوی می‌توانست زمین‌شناسی مشابه با پروژه تونل انتقال آب لار-کلان داشته باشد، تخمین زده شده و نتایج برای واحدهای مختلف در جدول (۳-۵) آورده شده است. همچنین روش مشابه برای تخمین مقدار کوارتز محتوا براساس نوع سنگ در هر واحد زمین‌شناسی به کار گرفته شده است. مقدار کوارتز محتوا برای واحدهای مختلف را در جدول (۳-۵) می‌توان دید. تابع توزیع احتمال یکنواخت برای CLI و q در نظر گرفته شده است. برای زون شکسته، مقدار CLI و q سنگ واحد در بر گیرنده در نظر گرفته شد.

جدول ۳-۵: مقدار CLI و q بر اساس نوع سنگ در واحدهای زمین‌شناسی مختلف

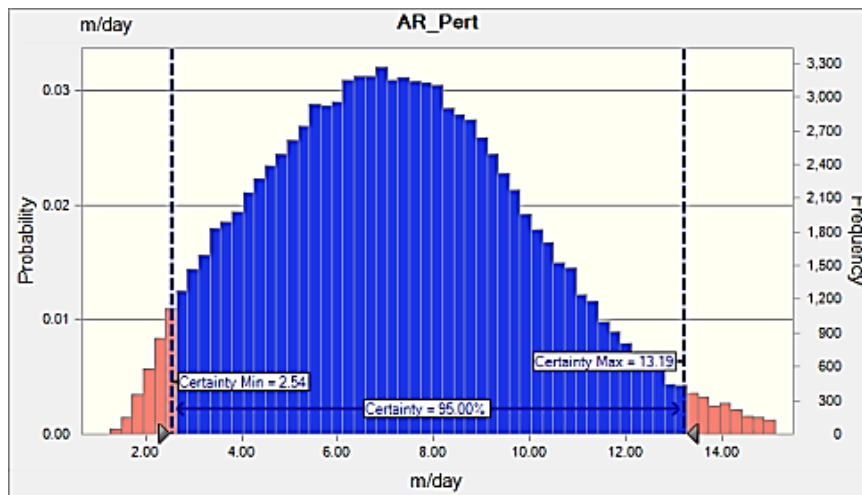
واحد زمین‌شناسی	نوع سنگ	CLI	q (%)
KTM	Green tuff	۷۵-۱۰۰	۵-۱۵
MSC	Sandy marl / shale sandstone / Breccia Siltstone	۵۰-۸۰	۱۰-۲۰
MP	Green Gabro	۱۱-۲۲	۰-۵
GT	Shaly Tuff / Tuffy shale	۷۵-۱۰۰	۵-۱۵

از آنجایی که در روش شبیه‌سازی مونت کارلو اعداد تصادفی بر اساس تابع توزیع احتمال Q تولید می‌شود و با توجه به بازه تغییرات Q ، ارائه رابطه خاص بین Q و m با توجه به نمودار شکل (۳-۱۹) مقدور نبود؛ به همین دلیل در مدل Q_{TBM} بعد از محاسبه نرخ نفوذ با رابطه این مدل، از رابطه عمومی بین نرخ پیشروی با نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری ($AR=24.PR.U$) استفاده شده است.

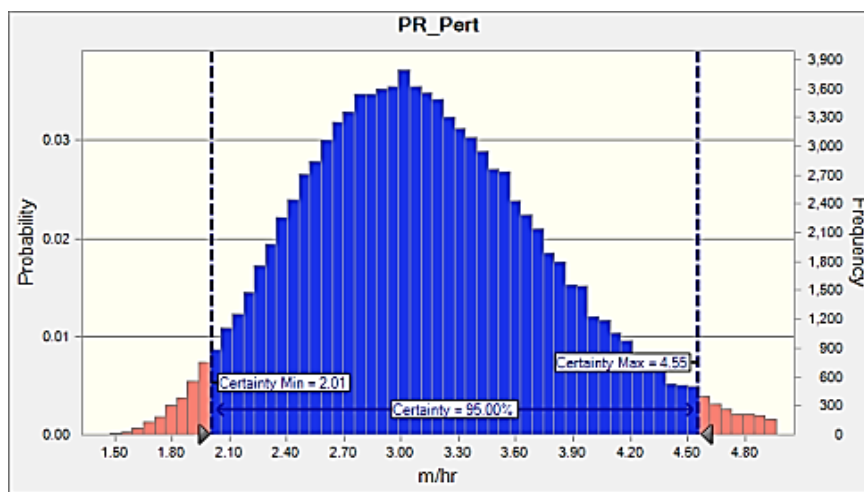
در نهایت با استفاده از توابع توزیع احتمال مربوط به پارامترهای ورودی مدل Q_{TBM} ، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با در نظر گرفتن ۹۵ درصد قطعیت بر اساس دو نوع تابع توزیع احتمال، در جدول (۴-۵) آورده شده است. نتایج به دست آمده به صورت هیستوگرام بوده، که برای واحد KTM در شکل (۱-۵) و (۲-۵) نمایش داده شده است. در این هیستوگرام‌ها محور افقی، مقدار پارامتر مورد نظر (نرخ نفوذ یا نرخ پیشروی) و محور عمودی، احتمال رخداد هر یک از داده‌ها است.

جدول ۴-۵: نتایج مدل Q_{TBM}

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع احتمال	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	Pert	۲/۵۴ - ۱۳/۱۹	۲/۰۱ - ۴/۵۵
	Triangular	۲/۳۹ - ۱۲/۶۷	۱/۹۰ - ۴/۴۰
MSC	Pert	۳/۶۶ - ۱۲/۲۲	۰/۸۴ - ۲/۴۵
	Triangular	۳/۲۶ - ۱۱/۰۴	۰/۷۵ - ۲/۳۱
MP	Pert	۱۲/۰۶ - ۲۳/۵۹	۲/۳۴ - ۴/۵۸
	Triangular	۱۱/۰۹ - ۲۱/۷۰	۲/۱۵ - ۴/۲۰
GT	Pert	۶/۳۸ - ۱۴/۳۳	۱/۳۱ - ۲/۷۵
	Triangular	۵/۷۷ - ۱۳/۱۰	۱/۱۸ - ۲/۵۲
Cr	Pert	۱۰/۶۳ - ۲۹	۳/۳۱ - ۶/۷۵
	Triangular	۱۰/۱۶ - ۲۸/۳۳	۳/۱۶ - ۶/۶۳



شکل ۴-۵: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل Q_{TBM}



شکل ۴-۶: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل Q_{TBM}

۵-۴-۲- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل NTNU

اولین گام در این مدل محاسبه فاکتور خردشدگی (k_s) برای هر دسته درزه در واحدهای مختلف زمین‌شناسی است. در این مطالعه فاصله‌داری برای دسته درزه‌ها به صورت درصد بوده، بدین منظور میانگین وزنی برای محاسبه فاصله‌داری متوسط برای هر دسته درزه بکار گرفته شد. با توجه به اطلاعات درزه‌ها و آزمون‌های تونل در واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل، فاکتور خردشدگی برای هر دسته درزه محاسبه شده است؛ با استفاده از مقادیر به دست آمده، با رابطه (۳-۲۳) فاکتور خردشدگی کل محاسبه شده و نتایج در جدول (۵-۵) ارائه شده است.

جدول ۵-۵: وضعیت ناپیوستگی‌ها و فاکتور خردشدگی در هر دسته برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان

واحد زمین‌شناسی مهندسی	ناپیوستگی‌ها	آزمون تونل (درجه)	α (درجه)	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (سانتی‌متر)	کلاس شکستگی	فاکتور خردشدگی	فاکتور خردشدگی کل
KTM	B	۲۰۴	۹/۳۹	۲۵/۶	۵	۰/۱۸۸	۲/۸۸
	J ₁		۴۳/۹۵	۲۹/۲	۵	۱/۴	
	J ₂		۱۶/۶۴	۳۴/۶	۴	۰/۶۴	
	J ₃		۵۱/۹۴	۴۹	۴	۰/۹۲	
	J ₄		۴/۵	۱۰۷/۵	۳	۰/۴۸	
MSC	B	۲۰۴	۳۹/۸۸	۳۴/۶	۴	۰/۹۶	۱/۸
	J ₁		۴۶/۴	۷۶	۳	۰/۷	
	J ₂		۱۵/۰۱	۹۵	۳	۰/۵۱	
	J ₃		۵۳/۵۵	۱۱۲	۳	۰/۷۱	
MP	J ₁	۲۳۰	۳۴/۳۹	۴۹	۴	۰/۱۸۸	۱/۴۲
	J ₂		۴۹/۰۳	۷۶	۳	۰/۷۲	
	J ₃		۵۳/۳	۱۳۰	۲	۰/۵۴	
GT	B	۲۳۰	۳۱/۹۱	۲۱/۲	۵	۱/۰۸	۲/۴۴
	J ₁		۸۰/۹۴	۳۷/۳	۴	۰/۸	
	J ₂		۴۱/۹۶	۵۸	۴	۰/۹۸	
	J ₃		۲۱/۰۷	۱۰۳	۳	۰/۵۶	
	J ₄		۱۸	۱۲۱	۲	۰/۴۶	

برای محاسبه فاکتور تصحیح تخلخل، رابطه نمودار شکل (۳-۱۲)، با انتخاب نقاط از نمودار و انجام

رگرسیون به صورت رابطه (۵-۱) به دست آمده است:

$$k_{por} = 0.774401 + 0.0875975 \times (\text{Prosity}(\%))^{1.45} \quad (۵-۱)$$

ضریب همبستگی (R^2) برای رابطه (۵-۱) برابر با ۹۹/۹۴ درصد و نیز مقدار خطای جذر میانگین

مربعات برابر ۰/۰۲۶ است. مقدار DRI همانند CLI براساس بانک اطلاعاتی آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF، جدول (۳-۳) و اطلاعات موجود در مقالات مختلف ([۶۹] و [۷۰]) برای پروژه‌هایی که به نحوی می‌توانست زمین‌شناسی مشابه با پروژه تونل انتقال آب لار-کلان داشته باشد، تخمین زده شده و نتایج برای واحدهای مختلف در جدول (۵-۶) ارائه شده است.

جدول ۵-۶: مقدار DRI در واحدهای زمین‌شناسی مختلف

واحد زمین‌شناسی	DRI
KTM	۴۵-۵۵
MSC	۴۵-۶۵
MP	۳۳-۴۵
GT	۴۵-۷۵

تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای DRI به صورت یکنواخت است. با استفاده از مقدار فاکتور خردشدگی کل برای هر واحد زمین‌شناسی، رابطه بین DRI و k_{DRI} براساس نمودارهای شکل (۳-۸)، با انجام رگرسیون به دست آمده است (جدول (۵-۷)).

جدول ۵-۷: رابطه بین DRI و k_{DRI} در واحدهای زمین‌شناسی مختلف (پیوست)

واحد زمین‌شناسی مهندسی	RMSE	R^2	رابطه	k_s
KTM	۰/۰۰۷	۹۹/۶۲	$k_{DRI} = 1/44 + 2/57 \times DRI^{-0.45}$	۲/۸۸
MSC	۰/۰۰۵	۹۹/۹۲	$k_{DRI} = -1/47 + 1/37 \times DRI^{-1.15}$	۱/۸
MP	۰/۰۰۷	۹۹/۸۸	$k_{DRI} = -1/0.54 + 0/94 \times DRI^{-1.2}$	۱/۴۲
GT	۰/۰۰۵	۹۹/۸	$k_{DRI} = 0/28 + 0/2 \times DRI^{-1.22}$	۲/۴۴

با محاسبه فاکتور خردشدگی کل، فاکتور تصحیح تخلخل و فاکتور تصحیح نرخ حفرپذیری سنگ، فاکتور خردشدگی معادل طبق رابطه (۳-۲۴)، محاسبه و برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در جدول (۵-۸) آورده شده است. از آنجایی که در واحد KTM، مقادیر به دست آمده برای فاکتور خردشدگی معادل خارج از محدود مدل بود (بزرگتر از ۳/۵)، به همین دلیل حداکثر مقدار فاکتور خردشدگی معادل موجود در مدل جایگزین شده است. همچنین در واحدهای MSC و GT، مقدار فاکتور خردشدگی معادل به صورت تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده است. در مورد زون شکسته نیز باید گفت که این مدل قادر به پیش‌بینی برای زون شکسته نبوده ولی با این حال مقدار فاکتور

خردشده معادل همان مقدار حداکثر (۳/۵) در نظر گرفته شده و محاسبات انجام شد.

جدول ۸-۵: فاکتور خردشده معادل برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف (پیوست)

واحد زمین‌شناسی	keqv	keqv (در نظر گرفته شده)	تابع توزیع احتمال
KTM	۷/۰۹ - ۱۱/۸۸	۳/۵	-
MSC	۲/۸۵ - ۵/۳۶	۲/۸۵ - ۳/۵	Beta(۱/۸۶, ۳/۹۶)
MPC	۱/۳۵ - ۱/۸۷	۱/۳۵ - ۱/۸۷	-
GT	۲/۱۶ - ۹/۳۶	۲/۱۶ - ۳/۵	Beta(۱/۴۲, ۳)
Cr	--	۳/۵	-

متوسط نیروی رانش به ازای هر برنده (MB) همانطور که در بخش (۲-۵) گفته شد، برابر مقادیر واقعی در نظر گرفته شد. فاکتور تصحیح فاصله‌داری متوسط برش‌دهنده‌ها و قطر برش‌دهنده با توجه به مشخصات ماشین استفاده شده طبق نمودارهای شکل (۳-۱۳) به دست آمده است.

جدول ۹-۵: فاکتور تصحیح فاصله‌داری برش‌دهنده‌ها و قطر برش‌دهنده

kd	ka
۱/۱۴	۰/۹۶۵

رابطه بین فاکتور خردشده معادل با M_1 و b ، طبق نمودارهای شکل (۳-۴) نیز با انجام رگرسیون به دست آمده و در جدول (۵-۱۰) ارائه شده است.

جدول ۱۰-۵: رابطه بین فاکتور خردشده معادل با M_1 و b (پیوست)

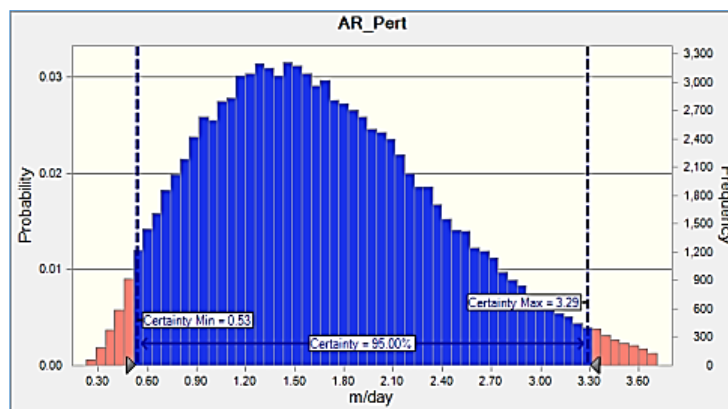
رابطه	R^2	RMSE
$M_1 = -۱۹/۴۸ + ۱۱۱/۹۱ \times keqv^{-۰/۵۴}$	۹۹	۷/۵۵
$b = ۰/۹۱۶ + ۱/۰۱۱ \times keqv^{-۰/۷۲}$	۹۹/۵۷	۰/۰۷

در مدل NTNU تنها برای تخلخل دو نوع تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده بود؛ اما از آنجایی که تنها فاکتور خردشده معادل در واحد MP از نوع تابع توزیع احتمال تخلخل تاثیر می‌پذیرد، نرخ پیشروی برای این واحد به صورت دو نوع تابع توزیع احتمال بیان شده است. بر اساس تابع توزیع احتمال پارامترها، روابط به دست آمده برای برخی از پارامترها و روابط موجود برای محاسبه نرخ

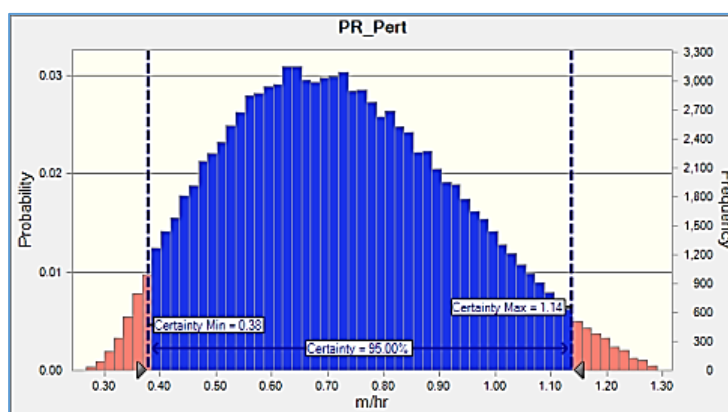
پیشروی در مدل NTNU، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج با در نظر گرفتن ۹۵ درصد قطعیت برای نرخ نفوذ و نرخ پیشروی به دست آمده است (جدول (۵-۱۱)). همچنین هیستوگرام نرخ پیشروی در شکل (۵-۳) و نرخ نفوذ در شکل (۵-۴) برای واحد KTM نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۱: نتایج مدل NTNU

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع احتمال	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	--	۰/۵۳ - ۳/۲۹	۰/۳۸ - ۱/۱۴
MSC	--	۱/۴۱ - ۴/۰۶	۰/۳۳ - ۰/۸۰
MP	Pert	۴/۹۳ - ۵/۸۵	۰/۹۶ - ۱/۱۳
	Triangular	۴/۹۳ - ۵/۹۰	۰/۹۵ - ۱/۱۴
GT	--	۲/۴۴ - ۴/۴۷	۰/۵۰ - ۰/۸۴
Cr	--	۱/۴۵ - ۳/۶۰	۰/۴۶ - ۰/۷۹



شکل ۵-۳: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل NTNU

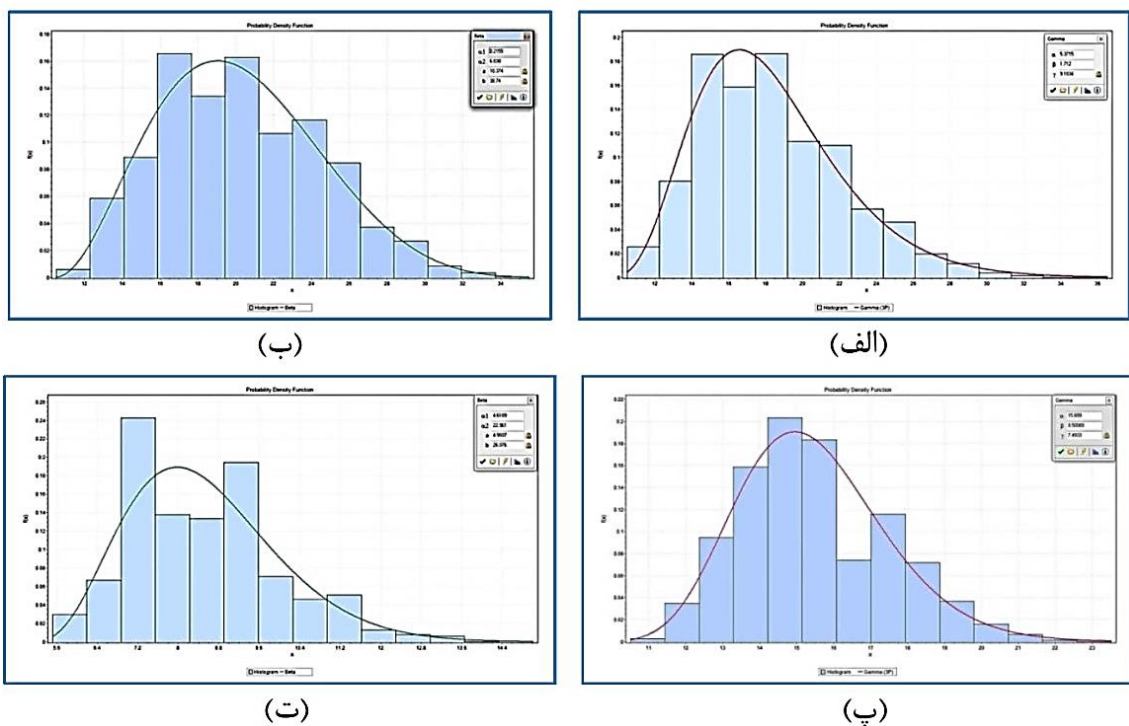


شکل ۵-۴: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل NTNU

۵-۴-۳- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل CSM

در این مدل ابتدا برای دو پارامتر مقاومت فشاری و مقاومت کششی ۱۰ هزار داده تصادفی تولید

شد. سپس برای این داده‌ها، نرخ نفوذ پایه با محدودیت گشتاور و توان نصب‌شده، بر اساس روابط (۳-۶) تا (۳-۱۸) محاسبه و با نرم‌افزار Easyfit تابع توزیع احتمال برای واحدهای مختلف به دست آمد. تابع توزیع احتمال برای واحدهای مختلف در شکل (۵-۵) نشان داده شده است. در ادامه با تابع توزیع احتمال RPM و U، نرخ پیشروی محاسبه شد. نتایج برای مدل CSM در جدول (۵-۱۲) با قطعیت ۹۵ درصد آورده شده است. همچنین مقدار به دست آمده برای زون شکسته خیلی بالا بوده و نشان دهنده این بود که این مدل برای این زون کاربرد ندارد، به همین خاطر در نتایج آورده نشده است.

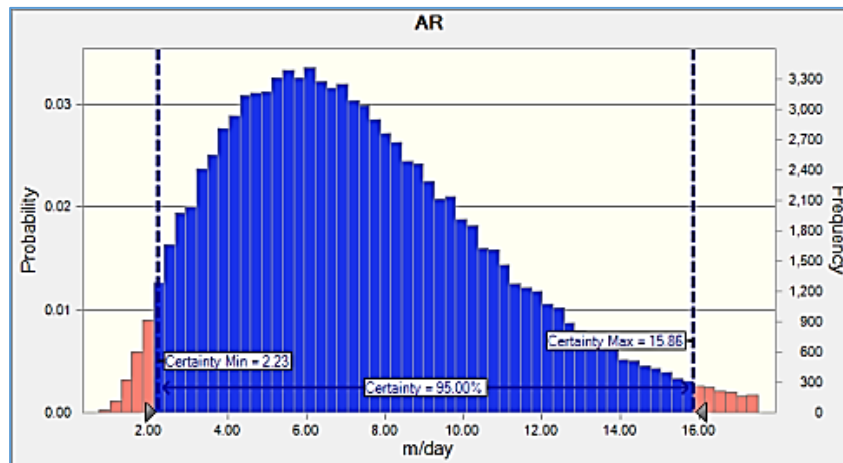


شکل ۵-۵: تابع توزیع احتمال نرخ نفوذ پایه برای واحدهای KTM (الف)، MSC (ب)، MP (پ) و GT (ت)

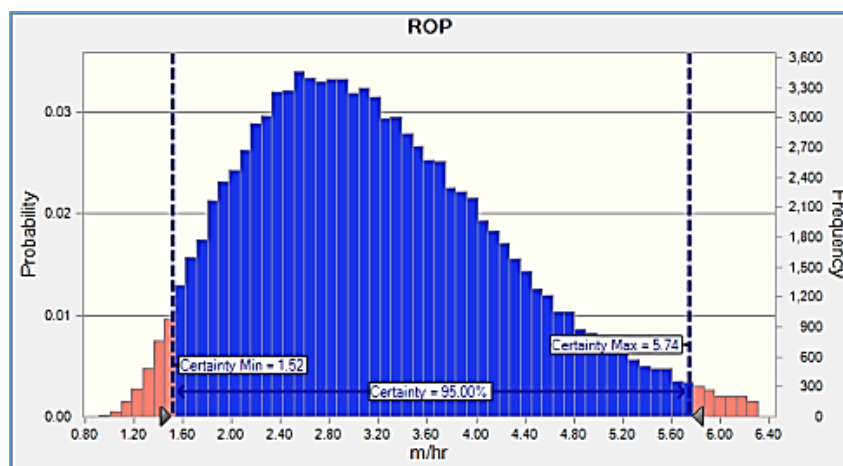
جدول ۵-۱۲: نتایج مدل CSM

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	۲/۲۳ - ۱۵/۸۶	۱/۵۲ - ۵/۷۴
MSC	۹/۶۴ - ۳۱/۲۷	۲/۲۱ - ۶/۳۱
MP	۱۸/۶۲ - ۳۰/۴۶	۳/۶۱ - ۵/۹۰
GT	۶/۵۱ - ۱۳/۷۷	۱/۳۵ - ۲/۶۵
Cr	--	--

همچنین هیستوگرام نرخ پیشروی به دست آمده از مدل CSM در شکل (۵-۶) و نرخ نفوذ در شکل (۵-۷) برای واحد KTM نمایش داده شده است.



شکل ۵-۶: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل CSM

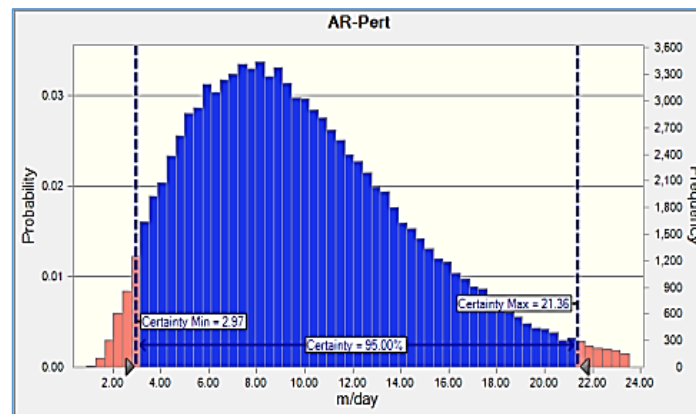


شکل ۵-۷: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل CSM

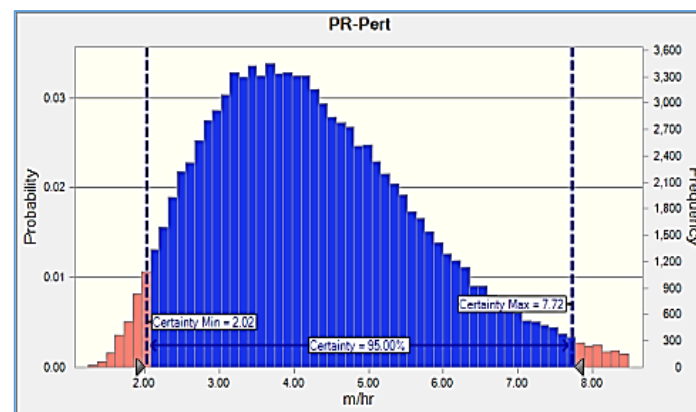
در مدل CSM اصلاح شده نیز برای RQD دو نوع تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده بود و به همین دلیل فاکتور اصلاحی نیز به صورت تابع توزیع احتمال به دست آمد. در این مدل فاکتور اصلاحی بر نرخ نفوذ محاسبه شده ضرب و سپس نرخ پیشروی محاسبه شد. بازه نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل CSM اصلاح شده با ۹۵ درصد قطعیت در جدول (۵-۱۳) و همچنین هیستوگرام نرخ پیشروی در شکل (۵-۸) و نرخ نفوذ در شکل (۵-۹) برای واحد KTM نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۳: نتایج مدل CSM اصلاح شده

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع احتمال	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	Pert	۲/۹۷ - ۲۱/۳۶	۲/۰۲ - ۷/۷۲
	Triangular	۲/۹۹ - ۲۱/۴۵	۲/۰۳ - ۷/۷۷
MSC	Pert	۱۲/۵۸ - ۴۴/۵۵	۳/۱۱ - ۸/۹۹
	Triangular	۱۲/۳۹ - ۴۳/۹۸	۳/۰۷ - ۸/۸۹
MP	Pert	۲۲/۵۵ - ۴۰/۵۴	۴/۵۶ - ۷/۸۶
	Triangular	۲۳/۴۰ - ۴۰/۷	۴/۵۴ - ۷/۸۹
GT	Pert	۸/۹۳ - ۱۹/۳۱	۱/۸۵ - ۳/۷۲
	Triangular	۸/۸۱ - ۱۹/۲۰	۱/۸۳ - ۳/۷
Cr	--	--	--



شکل ۵-۸: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل CSM اصلاح شده



شکل ۵-۹: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل CSM اصلاح شده

۵-۴-۴- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل حسن پور و همکاران (۲۰۱۱)

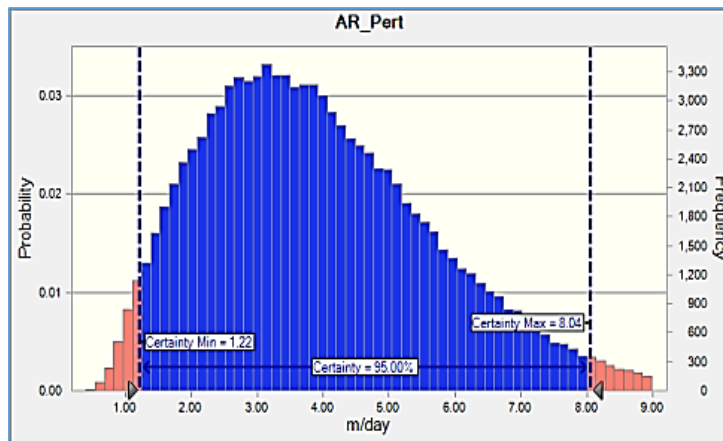
برای این مدل، بر اساس توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی و روابط مدل شبیه‌سازی انجام

شده و نتایج با در نظر گرفتن ۹۵ درصد قطعیت برای نرخ نفوذ و نرخ پیشروی در جدول (۵-۱۴) ارائه

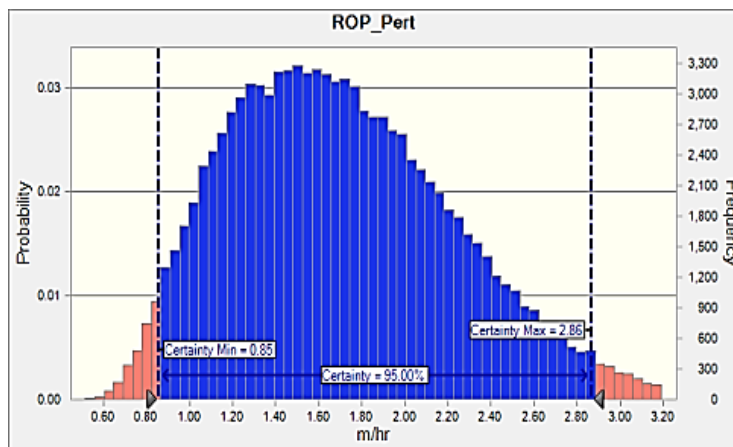
شده است. همچنین هیستوگرام نرخ پیشروی در شکل (۵-۱۰) و نرخ نفوذ در شکل (۵-۱۱) برای واحد KTM نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۴: نتایج مدل حسن پور و همکاران

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع احتمال	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	Pert	۱/۲۲ - ۸/۰۴	۰/۸۵-۲/۸۶
	Triangular	۱/۲۲ - ۸/۱۱	۰/۸۴-۲/۸۹
MSC	Pert	۴/۵۱ - ۱۳/۵۵	۱/۰۴-۲/۶۹
	Triangular	۴/۱۳ - ۱۲/۹۱	۰/۹۵-۲/۵۸
MP	Pert	۱۲/۰۲ - ۲۳/۰۴	۲/۳۳-۴/۴۷
	Triangular	۱۱/۴۹ - ۲۳/۵۳	۲/۲۳-۴/۵۶
GT	Pert	۵/۳۷ - ۱۱/۵۴	۱/۱۰-۲/۲۱
	Triangular	۵/۰۶ - ۱۱/۴۵	۱/۰۳-۲/۱۹
Cr	Pert	۷/۳۳ - ۱۷/۳	۲/۳۶ - ۳/۸۵
	Triangular	۷/۳۳ - ۱۷/۳	۲/۳۶ - ۳/۸۵



شکل ۵-۱۰: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل حسن پور و همکاران



شکل ۵-۱۱: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل حسن پور و همکاران

۵-۴-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با مدل فرخ و همکاران (۲۰۱۲)

مقادیر مربوط به RT_c و RQD_c برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در جدول (۵-۱۵) ارائه شده است. تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده برای RQD_c به صورت گسسته با احتمال برابر برای ۲ و ۳ است.

جدول ۵-۱۵: مقادیر RT_c و RQD_c برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف

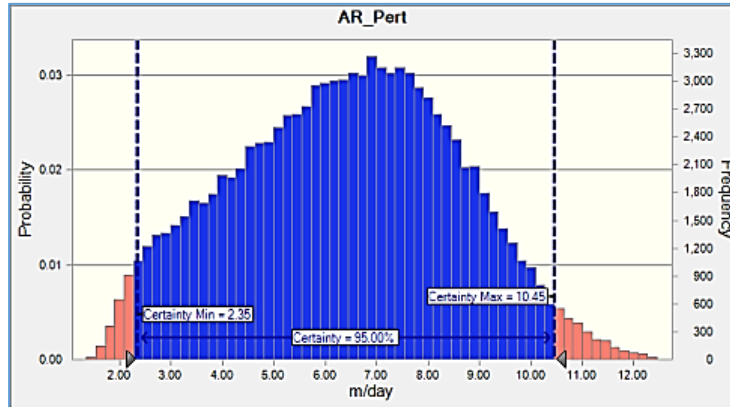
واحد زمین‌شناسی	RT_c	RQD_c	قطر تونل (m)
KTM	۲	۲.۳	۴/۵
MSC	۳	۲.۳	
MP	۲	۲.۳	
GT	۲	۲.۳	
Cr	۲	۳	

بر اساس مقادیر و توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی، شبیه‌سازی انجام شده و نتایج با در نظر گرفتن ۹۵ درصد قطعیت برای نرخ نفوذ و نرخ پیشروی در جدول (۵-۱۶) ارائه شده است.

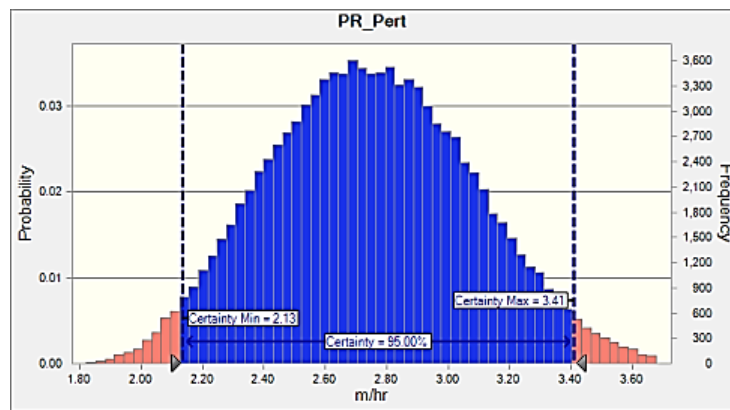
جدول ۵-۱۶: نتایج مدل فرخ و همکاران

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع احتمال	نرخ پیشروی (m/day)	نرخ نفوذ (m/hr)
KTM	Pert	۲/۳۵ - ۱۰/۴۵	۲/۱۳ - ۳/۴۱
	Triangular	۲/۳۱ - ۱۰/۲۸	۲/۰۹ - ۳/۳۷
MSC	Pert	۹/۸۷ - ۱۸/۵۹	۲/۴۴ - ۳/۵۱
	Triangular	۹/۴۹ - ۱۸/۱۱	۲/۳۴ - ۳/۴۳
MP	Pert	۱۳/۵۱ - ۱۵/۷۵	۲/۶۲ - ۳/۰۵
	Triangular	۱۳/۲۷ - ۱۵/۶۶	۲/۵۸ - ۳/۰۳
GT	Pert	۱۰/۴۰ - ۱۵/۱۶	۲/۲۶ - ۲/۸۱
	Triangular	۱۰/۳۵ - ۱۵/۱۷	۲/۲۴ - ۲/۸۲
Cr	Pert	۹/۹۸ - ۱۹/۲۴	۳/۴۶ - ۴/۰۵
	Triangular	۹/۹۸ - ۱۹/۲۴	۳/۴۶ - ۴/۰۵

هیستوگرام نرخ پیشروی به دست آمده از مدل فرخ و همکاران در شکل (۵-۱۲) و نرخ نفوذ در شکل (۵-۱۳) برای واحد KTM نمایش داده شده است.



شکل ۵-۱۲: هیستوگرام نرخ پیشروی برای واحد KTM در مدل فرخ و همکاران



شکل ۵-۱۳: هیستوگرام نرخ نفوذ برای واحد KTM در مدل فرخ و همکاران

۵-۴-۶- نرخ پیشروی کل TBM

برای محاسبه نرخ نفوذ و نرخ پیشروی کل TBM، از میانگین وزنی استفاده شده است. نرخ نفوذ و

نرخ پیشروی کل از روابط (۲-۵) و (۳-۵) قابل محاسبه هستند [۷۱]:

$$\overline{PR} = \frac{\sum_{i=1}^n PR_i \times l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (2-5)$$

$$\overline{AR} = \frac{\sum_{i=1}^n AR_i \times T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (3-5)$$

در رابطه (۲-۵)، \overline{PR} نرخ نفوذ کل، PR_i نرخ نفوذ در واحد i -ام و l_i طول واحد i -ام است. همچنین

در رابطه (۳-۵)، \overline{AR} نرخ پیشروی کل، AR_i نرخ پیشروی در واحد i -ام و T_i زمان حفر واحد i -ام

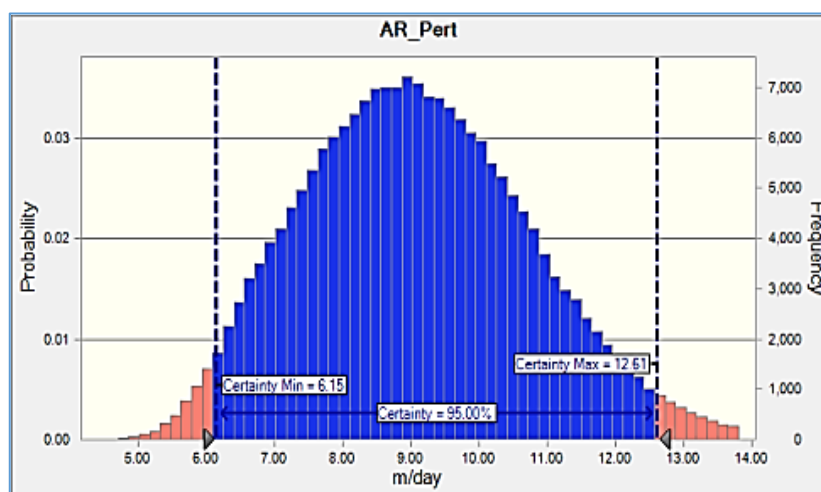
است. برای محاسبه نرخ پیشروی کل، در فایل اکسل مربوط به هر مدل، رابطه (۳-۵) نوشته شده و با

اجرای شبیه‌سازی در کنار محاسبه نرخ پیشروی برای هر واحد، نرخ پیشروی کل نیز محاسبه شده

است. در رابطه (۳-۵)، مقدار واقعی زمان حفر هر واحد از تونل قرار داده شده است. نتایج مربوط به نرخ پیشروی کل ماشین در یک کیلومتر تونل لار-کلان قطعه ۲ با ۹۵ درصد قطعیت در جدول (۱۷-۵) ارائه شده است. از آنجایی که در مدل CSM نرخ پیشروی برای زون شکسته محاسبه نشد، نرخ پیشروی کل در طول یک کیلومتر نمی‌توانست محاسبه شود. در بخش‌های بعد، نرخ نفوذ کل بدون در نظر گرفتن زون شکسته، بر اساس مدل‌های مختلف محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفته است. هیستوگرام نرخ پیشروی کل به دست آمده بر اساس مدل Q_{TBM} در شکل (۱۴-۵) نمایش داده شده است.

جدول ۵-۱۷: نرخ پیشروی کل TBM بر اساس مدل‌های مختلف

واحد زمین‌شناسی	تابع توزیع	نرخ پیشروی (m/day)
QTBM	Pert	۶/۱۵ - ۱۲/۶۱
	Triangular	۵/۶۸ - ۱۱/۹
NTNU	Pert	۱/۷۶ - ۳/۴۱
	Triangular	۱/۷۶ - ۳/۴۱
حسن پور	Pert	۴/۹۴ - ۹/۳۶
	Triangular	۴/۸ - ۹/۲۶
فرخ	Pert	۷/۱۱ - ۱۱/۹۷
	Triangular	۷/۰۱ - ۱۱/۷۸
CSM	---	--
CSM-f	--	--



شکل ۵-۱۴: هیستوگرام نرخ پیشروی کل TBM بر اساس مدل Q_{TBM}

۵-۵- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش تخمین نقطه‌ای

برای پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش تخمین نقطه‌ای، از روابط مدل‌های بکار گرفته شده (مدل Q_{TBM} ، NTNU، حسن‌پور و فرخ) به عنوان تابع عملکرد استفاده شده است. در این روش فقط از تابع توزیع احتمال پرت برای پارامترهای ورودی استفاده شده است. در این تابع توزیع احتمال، میانگین و واریانس داده‌ها از روابط (۴-۵) و (۵-۵) محاسبه می‌شوند.

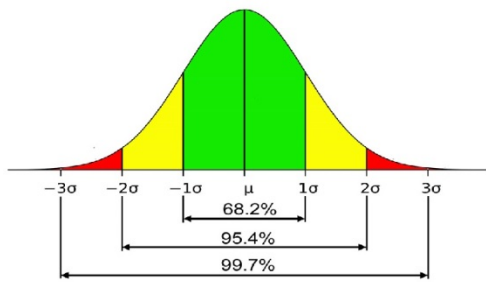
$$\mu = \frac{a + 4b + c}{6} \quad (۴-۵)$$

$$\sigma^2 = \frac{(\mu - a)(c - \mu)}{7} \quad (۵-۵)$$

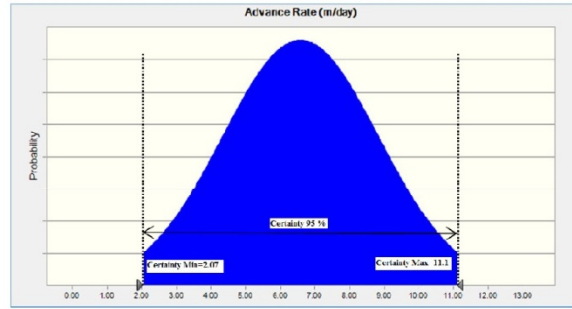
در روابط (۴-۵) و (۵-۵)، a مقدار حداقل، b مقدار محتمل، c مقدار حداکثر داده‌ها است. برای تخمین با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای، روابط موجود برای روش (روابط (۱-۲) تا (۳-۲))، به صورت کد در نرم‌افزار متلب نوشته شده است. کد نوشته شده قادر به انجام تخمین با هر تعداد پارامتر ورودی است. برای تخمین نرخ پیشروی، با اجرای کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب، در هر مدل روابط مربوطه به همراه میانگین و انحراف استاندارد پارامترهای ورودی درخواست شده، پس از وارد کردن این اطلاعات، محاسبات انجام و میانگین و انحراف استاندارد نرخ پیشروی ارائه می‌شود. تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به صورت نرمال بوده و سطح اطمینان ۹۵ درصد تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده است. شکل (۵-۱۵) الف بر اساس میانگین و انحراف استاندارد رسم شده است. نتایج به دست آمده از مدل‌های مختلف برای واحدهای زمین‌شناسی با سطح اطمینان ۹۵ در جدول (۵-۱۸) و متوسط نرخ پیشروی در جدول (۵-۱۹) ارائه شده است.

جدول ۵-۱۸: نتایج روش تخمین نقطه‌ای بر اساس مدل‌های مختلف

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)					
	Q _{TBM}	NTNU	CSM	CSM_f	حسن‌پور	فرخ
KTM	۲/۰۷ - ۱۱/۱۰	۰/۴۴ - ۲/۸۴	۱/۱۴ - ۱۳/۴۳	۱/۸۴ - ۱۸/۰۳	۰/۸۳ - ۶/۹۴	۲/۵۰ - ۹/۶۰
MSC	۲/۳۴ - ۱۰/۳۰	۱/۱۵ - ۳/۹۱	۷/۱۸ - ۲۹/۷۹	۱۰/۰۴ - ۴۲/۳۴	۳/۲۰ - ۱۲/۲۱	۸/۹۷ - ۱۷/۸۴
MP	۱۰/۰۴ - ۲۰/۷۱	۴/۹۰ - ۵/۹۰	۱۷/۹۱ - ۳۰/۱	۲۲/۴۸ - ۳۹/۹۴	۱۰/۸۳ - ۲۳/۸۲	۱۳/۴۶ - ۱۶/۰۲
GT	۵/۰۲ - ۱۲/۵۰	۲/۲۲ - ۴/۷۰	۵/۷۷ - ۱۳/۲۷	۷/۸۸ - ۱۸/۵۷	۴/۴۹ - ۱۱/۱۲	۱۰/۱۸ - ۱۵/۱۷
Cr	۸/۶۴ - ۲۷/۱۰	۱/۲۷ - ۳/۴۷	--	--	۶/۵ - ۱۷/۰۸	۸/۱۱ - ۱۷/۷۵



(ب)



(الف)

شکل ۵-۱۵: الف) تابع توزیع نرمال برای واحد KTM بر اساس مدل Q_{TBM} با سطح اطمینان ۹۵ درصد در روش تخمین نقطه‌ای، ب) نمایش بازه اطمینان در تابع توزیع نرمال

جدول ۵-۱۹: نتایج متوسط نرخ پیشروی با استفاده از روش تخمین نقطه‌ای

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)					
	Q_{TBM}	NTNU	CSM	CSM_f	حسن پور	فرخ
KTM	۶/۵۸	۱/۶۴	۷/۳۸	۹/۷۶	۳/۸۸	۶/۰۶
MSC	۶/۳۲	۲/۵۳	۱۸/۴۸	۲۶/۱۹	۷/۷۰	۱۳/۴۰
MP	۱۵/۳۷	۵/۴۰	۲۴	۳۱/۲۱	۱۷/۳۳	۱۴/۷۵
GT	۸/۷۶	۳/۴۶	۹/۵۲	۱۳/۲۲	۷/۸۰	۱۲/۶۷
Cr	۱۷/۸۷	۲/۳۷	--	--	۱۱/۷۹	۱۲/۹۳

برای محاسبه نرخ پیشروی کل، نرخ پیشروی و انحراف استاندارد محاسبه شده توسط کد نوشته شده برای هر واحد زمین‌شناسی، به همراه رابطه (۵-۳) با اجرای دوباره کد وارد شده و میانگین و انحراف استاندارد نرخ پیشروی کل محاسبه شد. نتایج مربوط به نرخ پیشروی کل با سطح اطمینان ۹۵ درصد برای یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲ در جدول (۵-۲۰) و متوسط نرخ پیشروی کل در جدول (۵-۲۱) آمده است.

جدول ۵-۲۰: نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش تخمین نقطه‌ای

نرخ پیشروی (m/day)			
Q_{TBM}	NTNU	حسن پور	فرخ
۵/۵۴ - ۱۱/۰۵	۱/۷۶ - ۳/۱۶	۴/۷ - ۸/۷۴	۷/۰۹ - ۱۱/۳۹

جدول ۵-۲۱: متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش تخمین نقطه‌ای

نرخ پیشروی (m/day)			
Q_{TBM}	NTNU	حسن پور	فرخ
۸/۲۹	۲/۴۶	۶/۷۲	۹/۲۴

۵-۶- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش سری تیلور

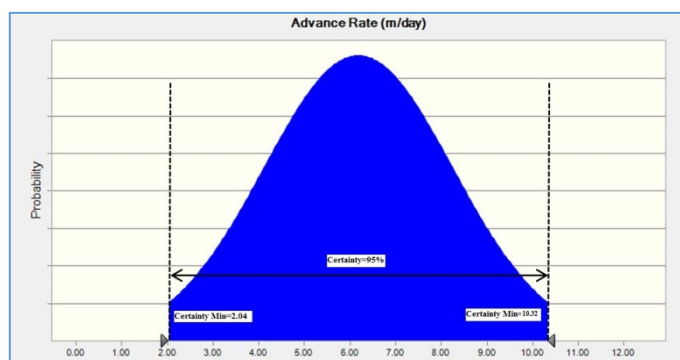
پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش سری تیلور مشابه روش تخمین نقطه‌ای است. روابط مدل‌های بکار گرفته شده به عنوان تابع عملکرد، و از واریانس و میانگین محاسبه شده با روابط تابع توزیع احتمال پرت استفاده شده است. همچنین کد مشابه‌ای با نرم‌افزار متلب برای محاسبه با هر تعداد پارامتر ورودی نوشته شد. مراحل کار با کد نوشته شده همانند روش تخمین نقطه‌ای است. تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به صورت نرمال بوده و سطح اطمینان ۹۵ درصد تابع توزیع در نظر گرفته شده است (شکل (۵-۱۶)). نتایج مربوط به نرخ پیشروی کل با سطح اطمینان ۹۵ درصد برای یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲ در جدول (۵-۲۲) و متوسط نرخ پیشروی کل در جدول (۵-۲۳) آمده است. نکته حائز اهمیت این است که این روش قادر به تخمین بازه نرخ پیشروی با مدل CSM نیست. دلیل این محدودیت نبود رابطه مستقیم بین نرخ نفوذ با مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی برای مشتق‌گیری، در محاسبه واریانس نرخ پیشروی است.

جدول ۵-۲۲: نتایج روش سری تیلور

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)			
	QTBM	NTNU	حسن‌پور	فرخ
KTM	۲/۰۴ - ۱۰/۳۲	۰/۴۶ - ۲/۸۲	۰/۸۹ - ۶/۷۹	۲/۵۲ - ۹/۵۵
MSC	۲/۲۸ - ۹/۴۲	۱/۱۵ - ۳/۸۷	۳/۲۳ - ۱۲	۸/۹۴ - ۱۷/۶۷
MP	۹/۷۶ - ۱۸/۹۷	۴/۹۱ - ۵/۹۲	۱۰/۴۱ - ۲۳/۰۹	۱۳/۴۳ - ۱۵/۹۶
GT	۴/۸۵ - ۱۱/۴۶	۲/۲۵ - ۴/۷۲	۴/۴۳ - ۱۰/۹۳	۱۰/۱۴ - ۱۵/۰۹
Cr	۸/۳۷ - ۲۵/۴۰	۱/۲۸ - ۳/۴۶	۶/۵۳ - ۱۷/۰۵	۸/۱۴ - ۱۷/۷۹

جدول ۵-۲۳: نتایج متوسط نرخ پیشروی به دست آمده از روش سری تیلور

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)					
	QTBM	NTNU	CSM	CSM_f	حسن‌پور	فرخ
KTM	۶/۱۸	۱/۶۴	۶/۹۸	۹/۳۵	۳/۸۴	۶/۰۴
MSC	۵/۸۵	۲/۵۱	۱۷/۳۵	۲۴/۵۷	۷/۶۲	۱۳/۳۱
MP	۱۴/۳۷	۵/۴۱	۲۳/۲۳	۳۰/۱۲	۱۶/۷۵	۱۴/۷۰
GT	۸/۱۶	۳/۴۹	۸/۹۶	۱۲/۴۴	۷/۶۸	۱۲/۶۱
Cr	۱۶/۸۹	۲/۳۷			۱۱/۷۹	۱۲/۹۶



شکل ۵-۱۶: تابع توزیع نرمال برای واحد KTM بر اساس مدل QTBM با سطح اطمینان ۹۵ درصد در روش سری تیلور

نحوه محاسبه نرخ پیشروی کل نیز مشابه روش تخمین نقطه‌ای بود. نتایج به دست آمده از این روش برای نرخ پیشروی کل در یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲ با سطح اطمینان ۹۵ درصد را در جدول (۵-۲۴) و متوسط نرخ پیشروی کل را در جدول (۵-۲۵) می‌توان دید.

جدول ۵-۲۴: نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش سری تیلور

نرخ پیشروی (m/day)			
QTBM	NTNU	حسن‌پور	فرخ
۵/۲۴ - ۱۰/۲۸	۱/۷۵ - ۳/۱۵	۴/۶۴ - ۸/۵۷	۷/۰۷ - ۱۱/۳۲

جدول ۵-۲۵: متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده از روش سری تیلور

نرخ پیشروی (m/day)			
QTBM	NTNU	حسن‌پور	فرخ
۷/۷۶	۲/۴۵	۶/۶	۹/۲

۵-۷- تحلیل حساسیت مدل‌ها

همانطور که در بخش‌های قبل گفته شد، تحلیل حساسیت، مطالعه تاثیرپذیری متغیرخروجی از متغیرهای ورودی یک مدل است. در این بخش با استفاده نرم‌افزار Oracle Crystal Ball، تحلیل حساسیت بر روی مدل‌های QTBM، NTNU، CSM، حسن‌پور و فرخ برای بررسی تاثیرپذیری نرخ نفوذ از پارامترهای هر یک از مدل‌ها، انجام شده است. مراحل انجام تحلیل حساسیت در این نرم‌افزار به این صورت است که بر اساس توابع توزیع احتمال پارامترهای ورودی و روابط موجود در هر مدل، به

صورت خودکار تحلیل را انجام داده و نمودارهای مربوطه را ارائه می‌دهد. نحوه انجام تحلیل حساسیت به این صورت است که ابتدا بر اساس میانگین پارامترها نرخ نفوذ متوسط محاسبه می‌شود. در مرحله بعد بر اساس مقدار حداقل پارامتر اول و مقدار میانگین پارامترهای دیگر، نرخ نفوذ محاسبه و سپس بر اساس مقدار حداکثر پارامتر اول و مقدار میانگین پارامترهای دیگر، نرخ نفوذ محاسبه شده و نمودار کلی برای پارامتر اول به دست می‌آید. همین روند برای پارامترهای دیگر تکرار می‌شود. سپس نمودار تمامی پارامترها با هم آورده شده و پارامتری که بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارد، مشخص می‌شود. محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل‌ها بر اساس داده‌های موجود برای یک کیلومتر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان و واحدهای زمین‌شناسی موجود در این طول از تونل در نظر گرفته شده است.

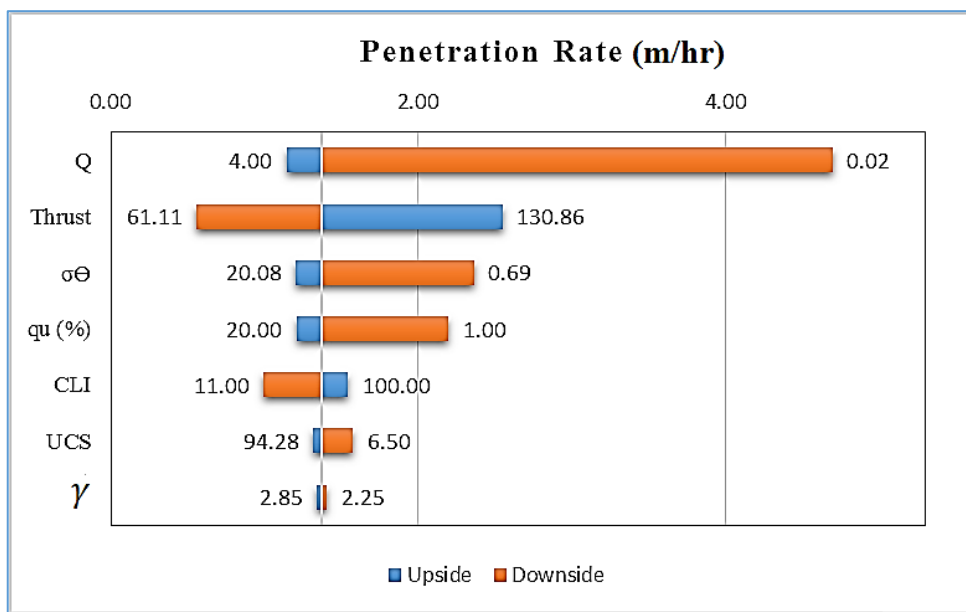
باید به این نکته توجه کرد که در هر یک از مدل‌ها، میزان تاثیر هر یک از پارامترها، علاوه بر تغییرات داده‌های پروژه‌ای که تحلیل حساسیت بر اساس انجام می‌شود، به پایگاه داده اصلی که بر اساس آن مدل ارائه شده، بستگی دارد. منظور این است که، در هر یک از مدل‌ها، پارامتری که همبستگی بیشتری با پارامتر هدف داشته است، در مدل طوری قرار داده شده که هنگام تحلیل حساسیت، این همبستگی آشکار می‌شود. در برخی از مدل‌ها نیز چنانچه دو پارامتر همبستگی برابری با پارامتر هدف داشته باشند، پارامتری که بازه تغییرات آن بیشتر است، تاثیر بیشتری در پارامتر هدف خواهد داشت. همچنین، هنگام تحلیل حساسیت باید به این نکته توجه داشت که شاید در یک مدل ارائه شده، همبستگی بیشتری بین پارامتر هدف با پارامتر ورودی وجود داشته است، در حالیکه ممکن است در پایگاه داده مدل دیگر، همبستگی ضعیفی بین این دو پارامتر وجود داشته باشد؛ بنابراین در تحلیل مدل‌ها نباید انتظار داشت که یک پارامتر در دو مدل تاثیر یکسانی داشته باشد و در هر دو مدل به عنوان موثرترین پارامتر شناخته شود.

محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل Q_{TBM} برای انجام تحلیل حساسیت در جدول (۵-۲۶) آورده شده است. برای تحلیل با استفاده نرم‌افزار، تابع توزیع یکنواخت بر اساس مقدار حداقل و حداکثر برای پارامترها در نظر گرفته شد تا تحلیل به صورت خودکار انجام شود.

جدول ۵-۲۶: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل Q_{TBM} برای انجام تحلیل حساسیت

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
Q	۰/۰۲	۴	۲/۰۱
UCS (Mpa)	۶/۵	۹۴/۴	۵۰/۴۵
Quartz content (%)	۱	۲۰	۱۰
Thrust (KN/cutter)	۶۱/۱۱	۱۳۰/۸۶	۹۵/۹۸۵
σ_{θ} (Mpa)	۰/۶۹	۲۰/۰۸	۱۰/۳۸۵
CLI	۱۱	۱۰۰	۵۵/۵
γ (gr /m ³)	۲/۲۵	۲/۸۵	۲/۵۵

تحلیل حساسیت انجام شده و نتایج به دست آمده در نمودار گردباد شکل (۵-۱۷) نمایش داده شده است. بر اساس نمودار پارامترهای مختلف در مدل Q_{TBM}، می‌توان گفت که تغییرات پارامتر Q بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارد. کاهش مقدار Q، σ_{θ} ، محتوای کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره و چگالی و افزایش نیروی پیشران و CLI باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شود. با توجه به تغییرات Q، کیفیت توده‌سنگ در محدوده بسیار ضعیف تا نسبتاً ضعیف قرار دارد که نشان می‌دهد، حفاری آسان‌تر است. باید به این نکته توجه کرد که هر چند حفاری آسان‌تر و نرخ نفوذ افزایش می‌یابد، در مقابل پایداری سنگ کم بوده و نرخ پیشروی تحت تاثیر زمان نصب سیستم نگهداری قرار می‌گیرد. نتیجه به دست آمده با نمودار شکل (۳-۱۷) مطابقت دارد.

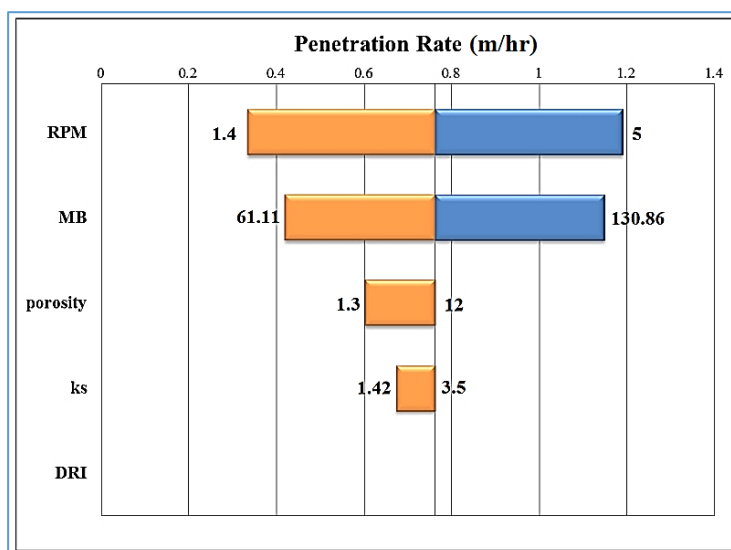


شکل ۵-۱۷: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل Q_{TBM}

برای تحلیل حساسیت مدل NTNU محدوده تغییرات پارامترهای ورودی بر اساس اطلاعات تونل مشخص و در جدول (۲۷-۵) ارائه شده است. تحلیل حساسیت مدل NTNU با استفاده از نرم‌افزار قابل انجام نبوده و به صورت دستی محاسبه شده است. دلیل عدم استفاده از نرم‌افزار حداکثر مقدار فاکتور خردشدگی معادل بود. نتایج را در نمودارهای شکل (۱۸-۵) می‌توان دید. در این مدل افزایش تمامی پارامترها باعث افزایش نرخ نفوذ شده و تغییرات دو پارامتر RPM و نیروی پیشران بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارند. از آنجایی که در محاسبه فاکتور خردشدگی معادل بر اساس میانگین تخلخل و فاکتور خردشدگی و مقدار حداقل و حداکثر DRI، حاصلضرب میانگین تخلخل و فاکتور خردشدگی باعث می‌شد که مقدار فاکتور خردشدگی بیشتر از $\frac{3}{5}$ شود و در حالت کلی تغییرات DRI تاثیر خاصی بر فاکتور خردشدگی معادل نداشته باشد.

جدول ۲۷-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل NTNU برای انجام تحلیل حساسیت

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
ks	۱/۴۲	۳/۵	۲/۴۶
Porosity	۱/۳	۱۲/۱	۶/۷
DRI	۳۳	۷۵	۵۴
RPM	۱/۴	۵	۳/۲
Thrust (KN/cutter)	۶۱/۱۱	۱۳۰/۱۸۶	۹۵/۹۸۵



شکل ۱۸-۵: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل NTNU

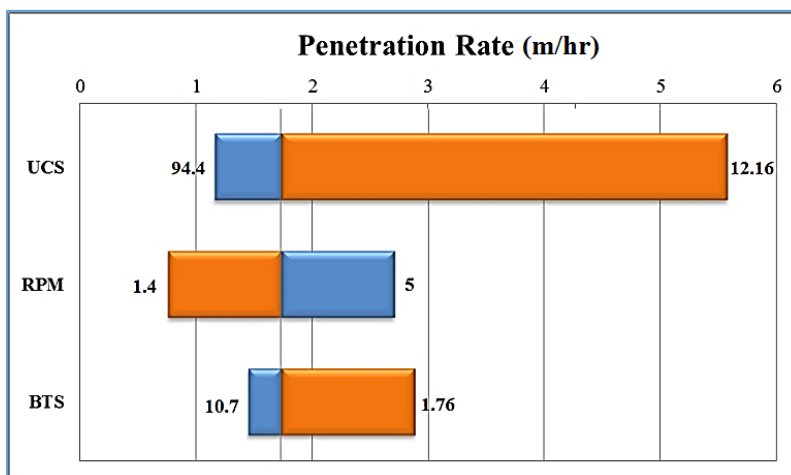
نیروهای مورد نیاز برای حفاری، بوسیله چرخش کله حفاری تامین می‌شود. بنابراین هرچه دور دستگاه بیشتر باشد، نرخ نفوذ بیشتری حاصل می‌شود، ولی با توجه به وجود محدودیت‌هایی نظیر حداکثر سرعت چرخشی مجاز برش‌دهنده‌های محیطی، شرایط زمین، ظرفیت بیلچه‌های جمع‌آوری کننده مصالح و همچنین ظرفیت نوار نقاله، امکان افزایش بیش از حد دور دستگاه وجود ندارد.

تخلخل یک پارامتر مهم در حفارپذیری سنگ‌ها بویژه در سنگ‌های رسوبی است. افزایش تخلخل باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ می‌شود که نتیجه آن، افزایش نرخ نفوذ است. ولی دلیل اینکه چرا تخلخل نسبت به فاکتور خردشدگی تاثیر بیشتری در نرخ نفوذ دارد، بیشتر به بازه تغییرات این پارامترها مربوط می‌شود. در مدل NTNU و در رابطه فاکتور خردشدگی معادل، هر دو پارامتر فاکتور خردشدگی کل و فاکتور تصحیح تخلخل به یک نسبت نقش دارند؛ در این پروژه بازه تغییرات تخلخل نسبت به فاکتور خردشدگی بیشتر بوده و به همین دلیل در تحلیل حساسیت بالاتر از فاکتور خردشدگی کل قرار گرفته است. در حالیکه بر اساس مطالعات انجام شده [۵۵] در سنگ‌های آذرین که تخلخل کمتر است، فاکتور خردشدگی کل تاثیر بیشتری نسبت به تخلخل در نرخ نفوذ دارد.

محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل CSM در جدول (۵-۲۸) آورده شده است. برای مدل CSM نیز تحلیل حساسیت به صورت دستی انجام شده است. نتایج به دست آمده را در شکل (۵-۱۹) می‌توان دید. کاهش دو پارامتر مقاومت فشاری و مقاومت کششی و افزایش RPM باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شود. در این مدل تغییرات پارامتر UCS بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارد. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره نسبت به دو پارامتر بیشتر بوده به همین دلیل موثرترین پارامتر شناخته شده است.

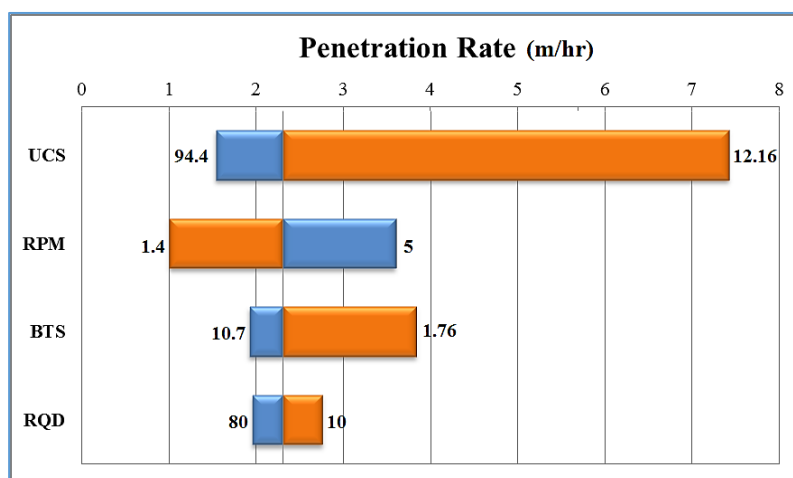
جدول ۵-۲۸: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل CSM برای انجام تحلیل حساسیت

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
UCS (Mpa)	۱۲/۱۶	۹۴/۴	۵۳/۲۸
BTS (Mpa)	۱/۷۶	۱۰/۷	۶/۲۳
RPM	۱/۴	۵	۳/۲



شکل ۵-۱۹: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل CSM

در مدل CSM اصلاح شده نیز بیشترین تاثیر نرخ نفوذ از تغییرات مقاومت فشاری تک محوره است. در این مدل پارامتر RQD نیز در تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده است. افزایش RQD باعث کاهش نرخ نفوذ می شود.

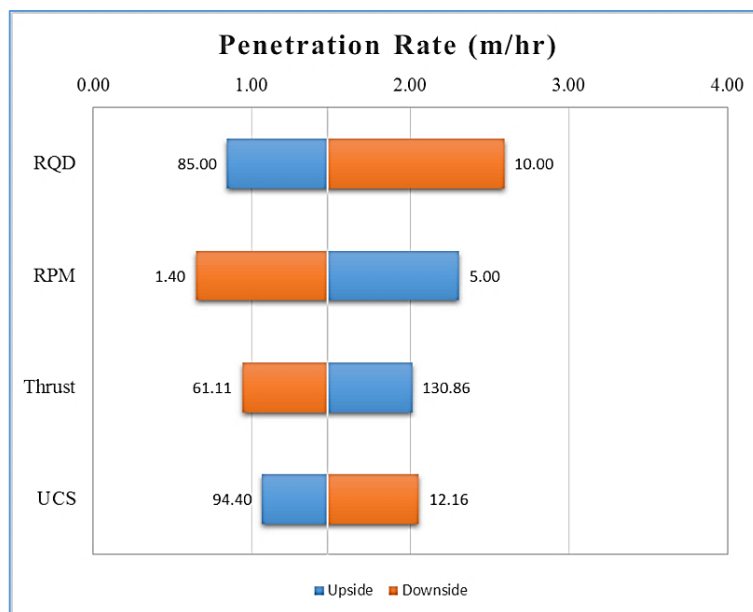


شکل ۵-۲۰: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل CSM اصلاح شده

محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل حسن پور در جدول (۵-۲۹) آورده شده است. نتایج به دست آمده در شکل (۵-۲۱) نمایش داده شده است. در این مدل تغییرات RQD و RPM بیشترین تاثیر را در تغییرات نرخ نفوذ دارند. همچنین در مدل حسن پور اختلاف بین تاثیر پارامترها بر روی نرخ نفوذ، خیلی زیاد نیست.

جدول ۵-۲۹: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل حسن پور برای انجام تحلیل حساسیت

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
UCS (Mpa)	۶/۵	۹۴/۴	۵۰/۴۵
Thrust (KN/cutter)	۶۱/۱۱	۱۳۰/۸۶	۹۵/۹۸۵
RQD	۱۰	۸۵	۴۷
RPM	۱/۴	۵	۳/۲



شکل ۵-۲۱: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل حسن پور

همچنین مدل حسن پور نشان می‌دهد که کاهش RQD و مقاومت فشاری و افزایش نیروی پیشران و RPM باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شوند.

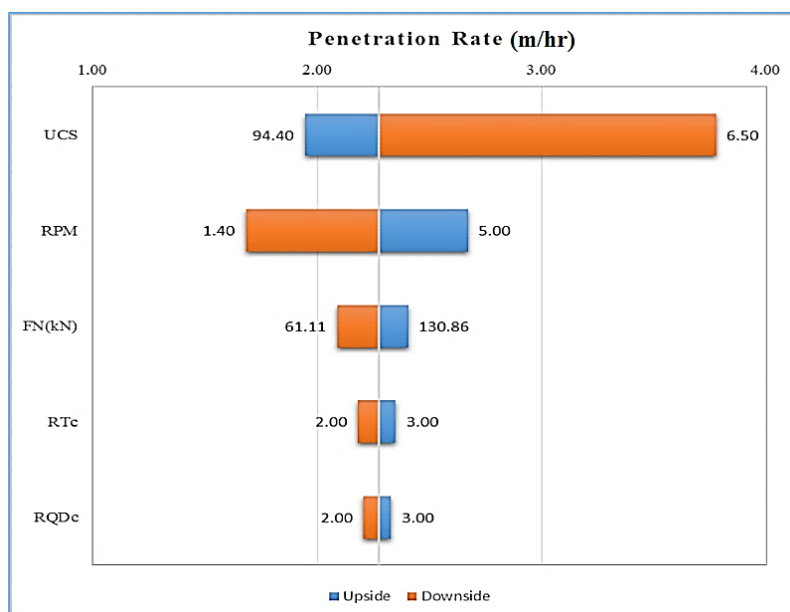
نکته قابل توجه این است که در مدل CSM اصلاح شده، مقاومت فشاری تک‌محوره بیشترین تاثیر و RQD کمترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارد، در حالیکه در مدل حسن پور، RQD بیشترین تاثیر و مقاومت فشاری تک‌محوره کمترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارد. این اختلاف همانطور که گفته شد، به پایگاه داده اصلی مدل، مقدار تغییرات هر یک از پارامترها، همبستگی بین این پارامترها با پارامتر هدف و اینکه در هر یک از مدل‌ها با چه ضریب یا توانی آمده، بستگی دارد.

محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل فرخ را در جدول (۵-۳۰) و نتایج به دست آمده را در شکل (۵-۲۲) می‌توان دید. در این مدل تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره بیشترین تاثیر را بر

تغییرات نرخ نفوذ دارد. کاهش مقاومت فشاری و افزایش پارامترهای دیگر استفاده شده باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شود.

جدول ۳-۵: محدوده تغییرات پارامترهای ورودی مدل فرخ برای انجام تحلیل حساسیت

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
UCS (Mpa)	۶/۵	۹۴/۴	۵۰/۴۵
Thrust (KN/cutter)	۶۱/۱۱	۱۳۰/۸۶	۹۵/۹۸۵
RQDc	۲	۳	۲/۵
RPM	۱/۴	۵	۳/۲
RTc	۲	۳	۲/۵



شکل ۳-۵: تاثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر نرخ نفوذ در مدل فرخ

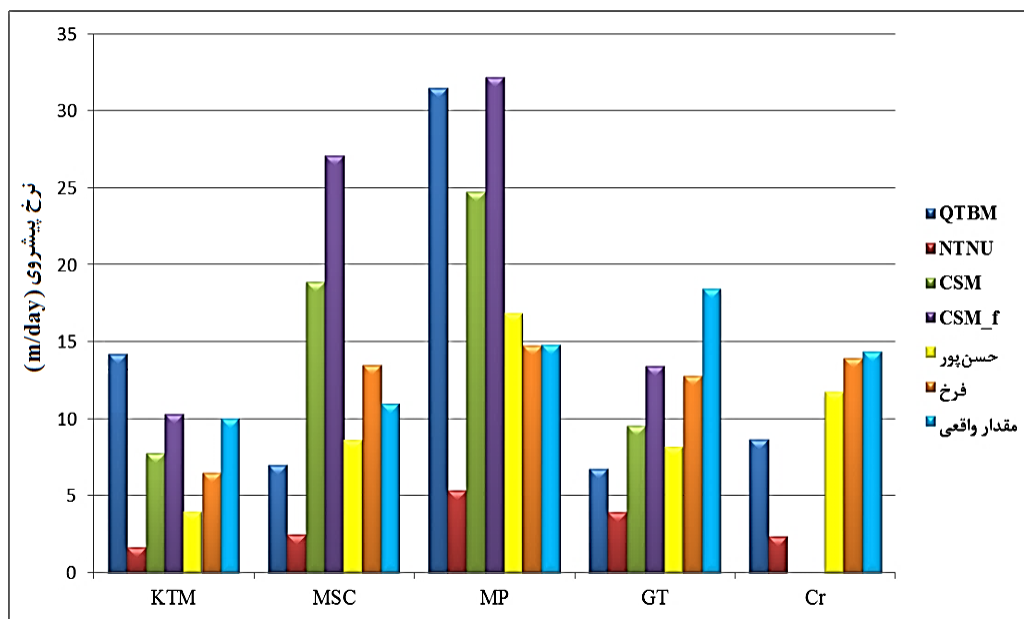
۵-۸- پیش‌بینی نرخ پیشروی با روش تحلیل قطعی

برای محاسبه نرخ پیشروی در روش تحلیل قطعی از محتمل‌ترین مقدار پارامترها استفاده شده است. در مدل Q_{TBM} ، ابتدا با توجه به مقدار Q ، از نمودار شکل (۳-۱۹) مقدار m مربوطه به دست آمده و بر اساس تخریل و پارامترهای دیگر، رابطه (۳-۳۵)، مقدار m تصحیحی محاسبه شده است. سپس با رابطه (۳-۳۷) زمان حفر هر واحد زمین‌شناسی مسیر تونل و با رابطه (۳-۳۸)، با داشتن مقدار نرخ نفوذ، زمان حفر (T) و m تصحیحی مقدار نرخ پیشروی در هر واحد زمین‌شناسی محاسبه

شده است. در مدل‌های دیگر از رابطه عمومی بین نرخ پیشروی با نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری برای محاسبه استفاده شده است. نرخ پیشروی بر اساس مدل‌های مختلف برای واحدهای زمین‌شناسی محاسبه و نتایج در جدول (۳۱-۵) و شکل (۲۳-۵) آورده شده است. در جدول (۳۱-۵) منظور از مقدار واقعی، مقدار متوسط نرخ پیشروی در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی بوده که هنگام حفاری ثبت شده است.

جدول ۳۱-۵: نتایج تحلیل قطعی بر اساس مدل‌های مختلف

واحد زمین‌شناسی	نرخ پیشروی (m/day)						مقدار واقعی
	QTBM	NTNU	CSM	CSM_f	حسن‌پور	فرخ	
KTM	۱۳/۹۶	۱/۷	۷/۷۶	۱۰/۳۵	۴/۰۴	۶/۵۴	۱۰/۰۷
MSC	۷/۰۵	۲/۴۸	۱۸/۹۳	۲۷/۱۳	۸/۶۹	۱۳/۵۴	۱۱/۰۳
MP	۳۱/۵۳	۵/۳۷	۲۴/۷۸	۳۲/۲۱	۱۶/۸۷	۱۴/۷۸	۱۴/۸۱
GT	۶/۸۹	۳/۹۴	۹/۵۸	۱۳/۴۲	۸/۲۴	۱۲/۷۹	۱۸/۴۶
Cr	۸/۶۵۶	۲/۳۸	--	--	۱۱/۸۱	۱۳/۹۸	۱۴/۴۲

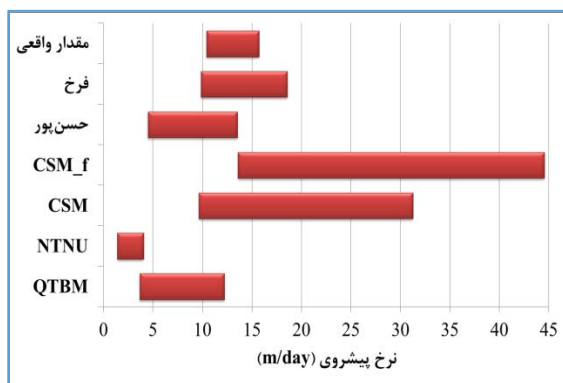


شکل ۲۳-۵: نتایج تحلیل قطعی بر اساس مدل‌های مختلف

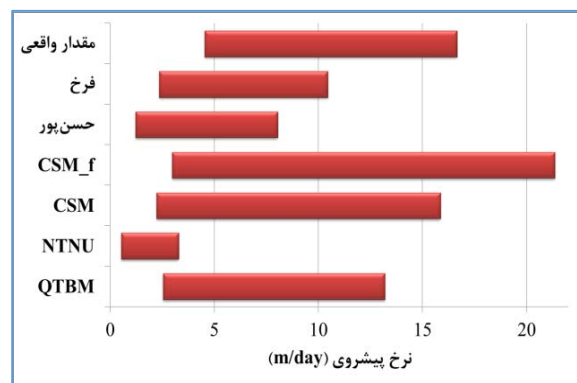
با توجه به شکل (۲۳-۵) می‌توان گفت که در واحدهای KTM و GT مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده از مدل CSM اصلاح شده به مقدار نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است. در واحدهای MSC و MP و زون خردشده، مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده از مدل فرخ به مقدار نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است.

۵-۹- مقایسه نتایج مدل‌های مختلف استفاده شده در روش شبیه‌سازی مونت کارلو

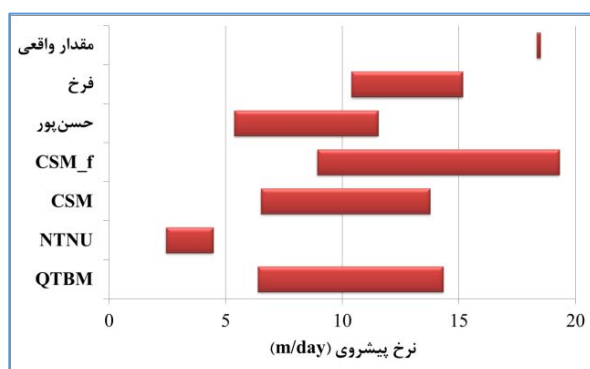
نتایج به دست آمده از دو نوع تابع توزیع احتمال مثلثی و پرت اختلاف بسیار کمی با یکدیگر داشتند که ناشی از شباهت دو نوع تابع توزیع احتمال بود؛ نتایج تابع توزیع احتمال پرت نسبت به مثلثی اختلاف کمتری با مقدار واقعی نرخ پیشروی داشت؛ به همین دلیل، نتایج تابع توزیع احتمال پرت برای مقایسه مدل‌ها استفاده شده است. نتایج مدل‌های بکار گرفته شده برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در شکل (۵-۲۴) نمایش داده شده است. نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل در NTNU تمامی واحدهای زمین‌شناسی بسیار کمتر از مقدار واقعی نرخ پیشروی است. واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل هم دارای سنگ‌هایی با تخلخل بالا و همچنین تعداد دسته درزه زیاد بودند که همین دلیل باعث شد که فاکتور خردشدگی معادل، خارج از محدوده مدل NTNU شود و نتایج این مدل اختلاف زیادی با مقدار نرخ پیشروی واقعی داشته باشد. در واحد KTM و GT تنها نتایج مدل CSM اصلاح‌شده مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر می‌گیرد. در واحد GT هر چند مدل CSM اصلاح‌شده بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را شامل می‌شود، با این حال بازه نرخ پیشروی به دست آمده بسیار بزرگ است. در واحد MSC نتایج مدل فرخ و CSM بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر گرفته و بازه مدل فرخ نسبت به بازه مدل CSM بهتر است. در واحد MP نتایج مدل‌های Q_{TBM} ، حسن‌پور و فرخ بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر گرفته و بازه مدل فرخ بهتر است. در واحد Cr (زون خرد شده) هیچ یک از مدل‌ها به صورت کامل بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر نمی‌گیرند؛ ولی با حال نتایج مدل فرخ و حسن‌پور اختلاف کمتری با بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی دارند. با توجه به محاسبات انجام شده برای زون شکسته، باید گفت که این واحد خارج از محدوده مدل‌های NTNU و CSM است. مقدار واقعی نرخ پیشروی بعد از حفاری در هر یک از واحدهای زمین‌شناسی ثبت و بر اساس مقدار حداقل و حداکثر، به صورت بازه در نمودارها رسم شده است.



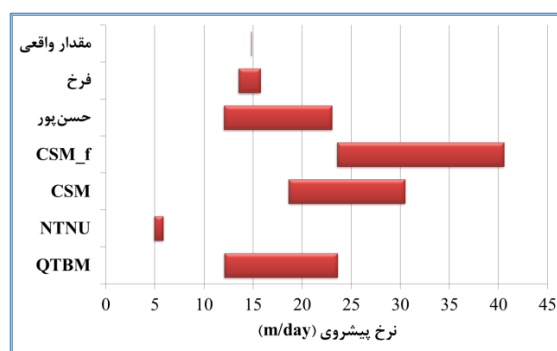
(ب)



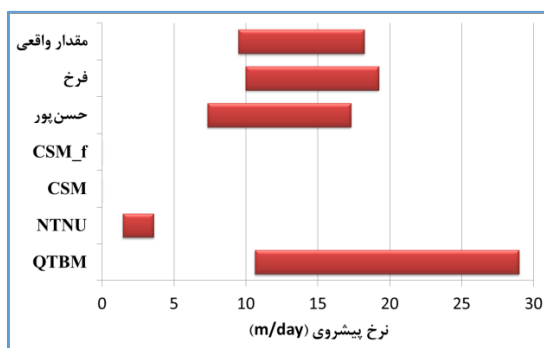
(الف)



(ت)



(پ)

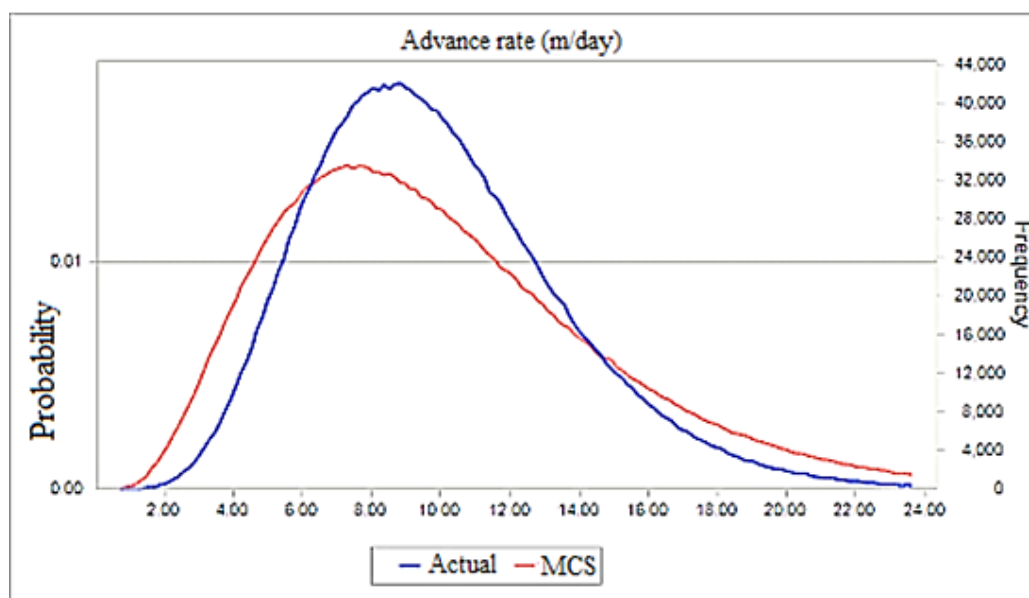


(ث)

شکل ۵-۲۴: بازه نرخ پیشروی بر اساس مدل‌های مختلف در الف) واحد KTM و ب) واحد MSC پ) واحد MP، ت) واحد GT و ث) واحد Cr

پس از مشخص شدن مدلی که بازه مقدار نرخ پیشروی را در بر می‌گیرد، در صورت وجود تعداد داده کافی برای نرخ پیشروی ثبت شده در واحدهای زمین‌شناسی و بدست آوردن تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی واقعی با نرم‌افزار Easyfit، می‌توان شکل تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو را با تابع توزیع احتمال مقدار واقعی نرخ پیشروی مقایسه کرد. در واحد

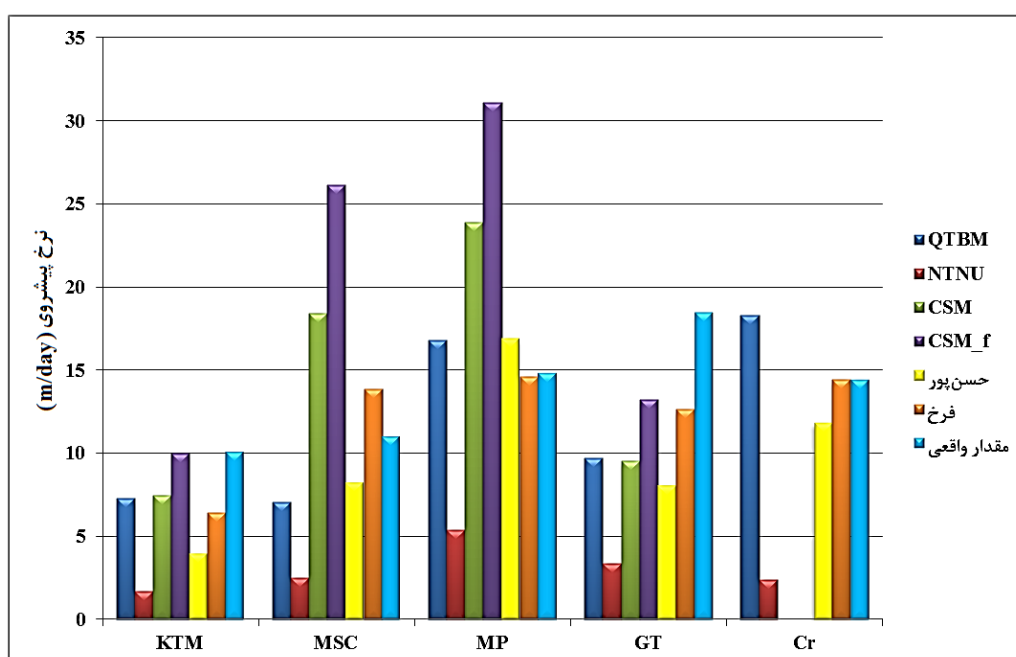
KTM همانطور که مشخص شد، بازه محاسبه شده با مدل CSM اصلاح شده، بازه مقدار واقعی را در بر می گیرد. با توجه به وجود داده های کافی در واحد KTM، تابع توزیع احتمال مناسب نرخ پیشروی برای این واحد با نرم افزار Easyfit مشخص شد. با مقایسه نمودارهای شکل (۵-۲۵)، می توان گفت که اختلاف کمی بین تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با ترکیب روش شبیه سازی مونت کارلو و مدل CSM اصلاح شده با تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی واقعی در واحد KTM وجود دارد. در واحدهای زمین شناسی دیگر به دلیل تعداد کم داده های نرخ پیشروی امکان به دست آوردن تابع توزیع احتمال مناسب نبود و باید به مقایسه انجام شده بر اساس بازه و میانگین اکتفا کرد.



شکل ۵-۲۵: مقایسه نمودار تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با روش شبیه سازی مونت کارلو با نمودار مقدار واقعی در واحد KTM بر اساس نتایج مدل CSM اصلاح شده

اگر مقایسه بر اساس متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه سازی مونت کارلو انجام شود، در واحد KTM و GT که شامل سنگ های توف، شیل و مارن است، متوسط نرخ پیشروی تخمین زده شده با مدل ها کمتر از متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی و در واحد MP که شامل سنگ گابرو است، مقدار متوسط نرخ پیشروی تخمین زده شده مدل فرخ و NTNU کمتر و بقیه مدل ها بزرگتر از متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی است. در واحد MSC نیز که شامل ماسه سنگ، سیلتستون و شیل و توف بود، نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل های CSM و فرخ، بزرگتر از مقدار واقعی نرخ

پیشروی و نتایج مدل‌های Q_{TBM} ، حسن‌پور و NTNU کمتر از متوسط مقدار واقعی است. در زون شکسته نیز متوسط مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده از مدل Q_{TBM} و فرخ بزرگتر از متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی و نتایج مدل حسن‌پور و NTNU کمتر از مقدار واقعی است. نتایج بیان شده را در شکل (۲۶-۵) می‌توان دید. در حالت کلی می‌توان گفت که در واحدهای KTM و GT متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل CSM اصلاح‌شده و در واحدهای MSC، MP و Cr متوسط نرخ پیشروی به دست آمده از مدل فرخ به متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است.

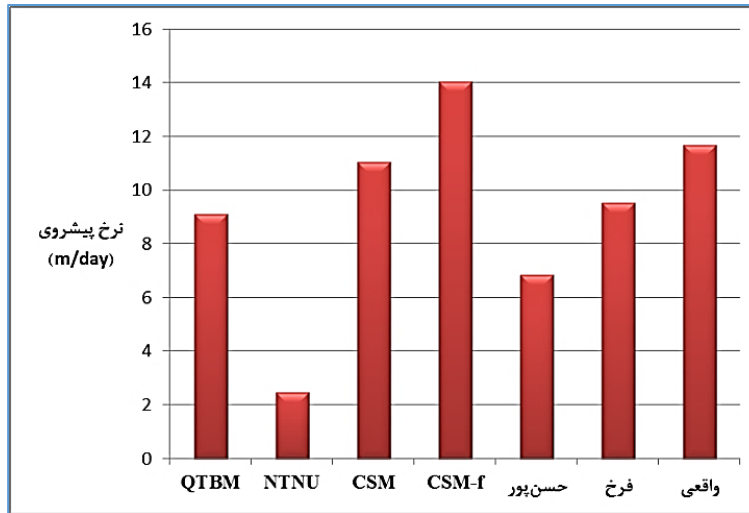


شکل ۲۶-۵: نمودار مقایسه متوسط نرخ پیشروی مدل‌های مختلف با مقدار واقعی در واحدهای مختلف

نتایج متوسط نرخ پیشروی کل برای یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲ بر اساس مدل‌های مختلف بدون در نظر گرفتن زون شکسته در جدول (۳۲-۵) و شکل (۲۷-۵) ارائه شده است. همانطور که می‌توان دید، مقدار متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده با مدل CSM اصلاح‌شده، بزرگتر از مقدار واقعی نرخ پیشروی و بقیه مدل‌ها کمتر از مقدار واقعی نرخ پیشروی کل است. مقدار متوسط نرخ پیشروی کل محاسبه شده با مدل CSM نسبت به دیگر مدل‌ها به مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است. زمان محاسبه شده برای اتمام این طول از تونل با مدل CSM برابر ۸۴ روز و در حالت واقعی برابر با ۸۱ روز است.

جدول ۵-۳۲: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل بدون در نظر گرفتن زون شکسته

متوسط نرخ پیشروی کل (m/day)						
QTBM	NTNU	CSM	CSM_f	حسن پور	فرخ	مقدار واقعی
۸/۶۹	۲/۴۶	۱۱/۰۴	۱۴/۹۵	۶/۶۲	۹/۳۱	۱۱/۶۲

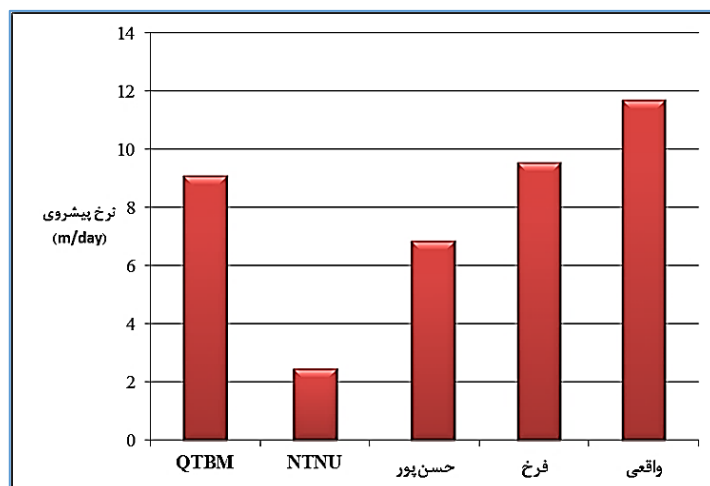


شکل ۵-۲۷: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل بدون در نظر گرفتن زون شکسته

در حالت کلی با در نظر گرفتن زون شکسته، مقایسه نتایج بین متوسط نرخ پیشروی کل طول یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲، جدول (۵-۳۳) و شکل (۵-۲۸)، نشان می‌دهد که نتایج مدل فرخ نسبت به مدل‌های QTBM، NTNU و حسن پور اختلاف کمتری با مقدار واقعی نرخ پیشروی کل دارد. زمان محاسبه شده برای اتمام یک کیلومتر تونل توسط مدل فرخ برابر ۱۰۳ روز و در حالت واقعی برابر با ۸۴ روز است. زمان اتمام کل تونل نیز با مدل فرخ برابر با ۲ سال و ۲ ماه و در حالت واقعی برابر با یک سال و ۱۰ ماه است.

جدول ۵-۳۳: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل

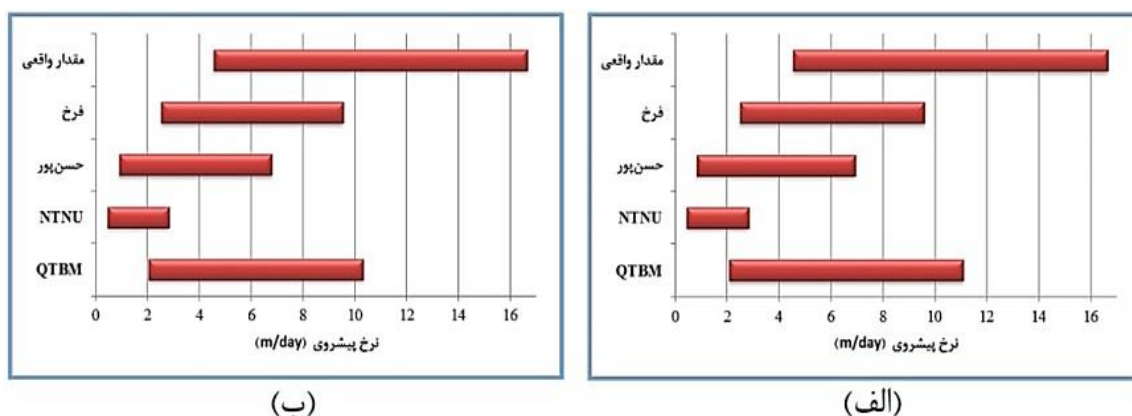
متوسط نرخ پیشروی کل (m/day)						
QTBM	NTNU	CSM	CSM_f	حسن پور	فرخ	مقدار واقعی
۹/۱	۲/۴۷	--	--	۶/۸۵	۹/۵۴	۱۱/۷



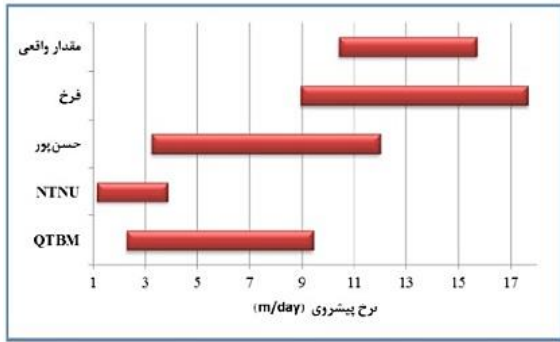
شکل ۵-۲۸: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل با در نظر گرفتن زون شکسته

۵-۱۰- مقایسه نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور

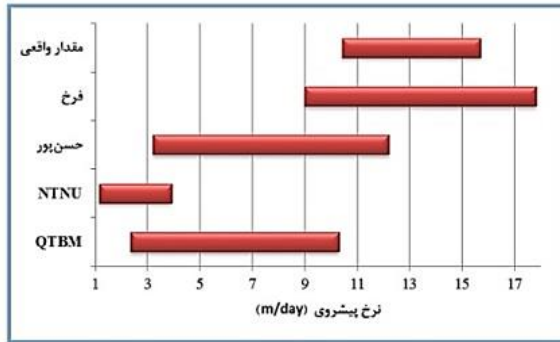
با مقایسه نتایج نرخ پیشروی به دست آمده از دو روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور با مقدار واقعی نرخ پیشروی، می‌توان گفت که نتایج دو مدل تا حدودی یکسان است؛ به این صورت که در این روش‌ها، برای واحد MP نتایج سه مدل QTBM، حسن پور و فرخ، برای واحد MSC نتایج مدل فرخ و برای واحد CI، نتایج مدل QTBM بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر گرفته و در واحد KTM بازه نرخ پیشروی به دست آمده از مدل‌ها، بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را در بر نمی‌گیرند. تنها تفاوت دو روش این است که در تخمین نقطه‌ای بازه نرخ پیشروی با مدل CSM محاسبه شده، ولی روش سری تیلور قادر به محاسبه بازه نرخ پیشروی نبود. نتایج بیان شده در شکل (۵-۲۹) تا (۵-۳۳) نمایش داده شده است.



شکل ۵-۲۹: بازه نرخ پیشروی در واحد KTM (الف) روش تخمین نقطه‌ای، (ب) روش سری تیلور

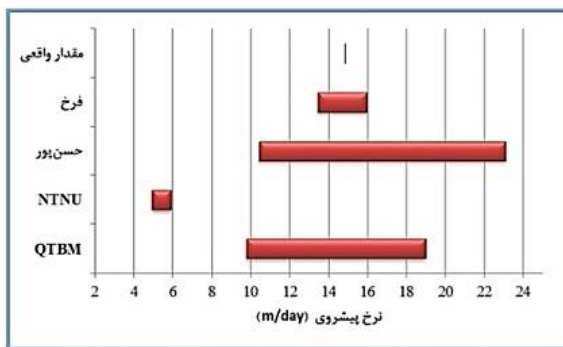


(ب)

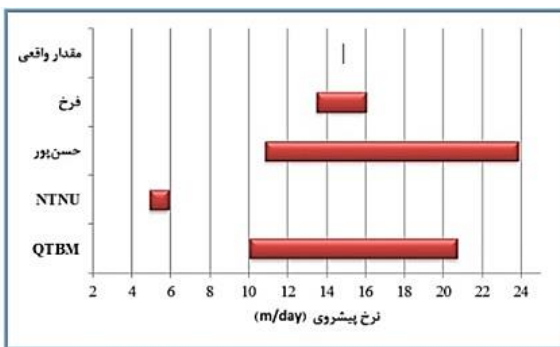


(الف)

شکل ۵-۳۰: بازه نرخ پیشروی در واحد MSC (الف) روش تخمین نقطه‌ای، (ب) روش سری تیلور

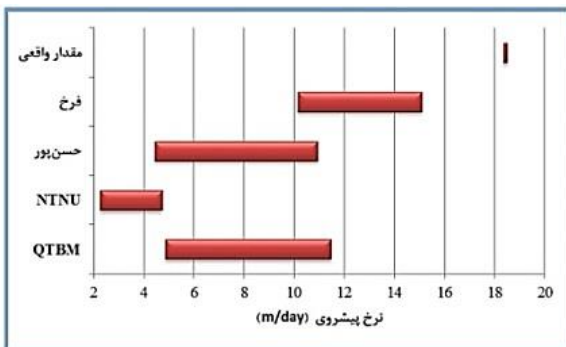


(ب)

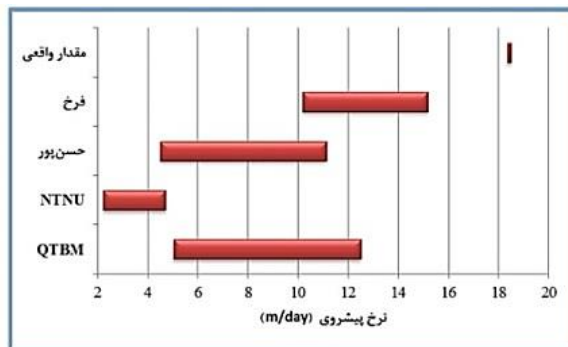


(الف)

شکل ۵-۳۱: بازه نرخ پیشروی در واحد MP (الف) روش تخمین نقطه‌ای، (ب) روش سری تیلور

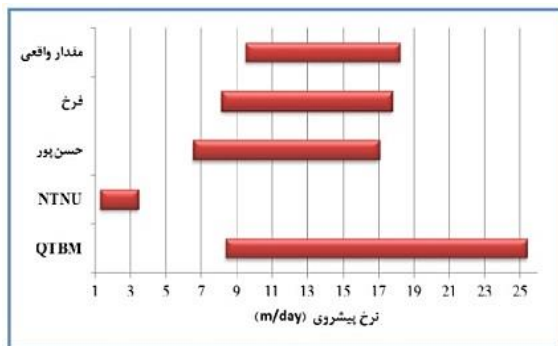


(ب)

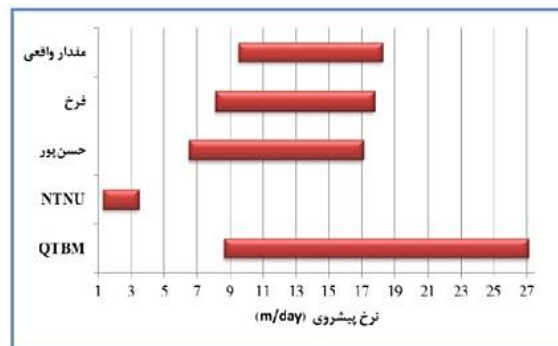


(الف)

شکل ۵-۳۲: بازه نرخ پیشروی در واحد GT (الف) روش تخمین نقطه‌ای، (ب) روش سری تیلور



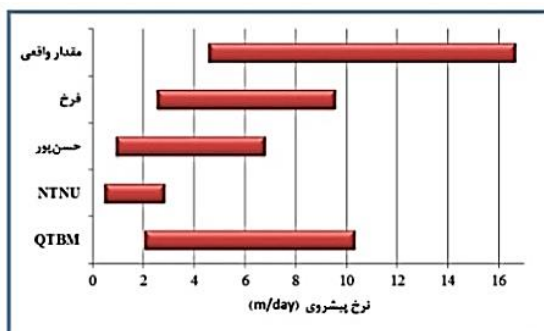
(ب)



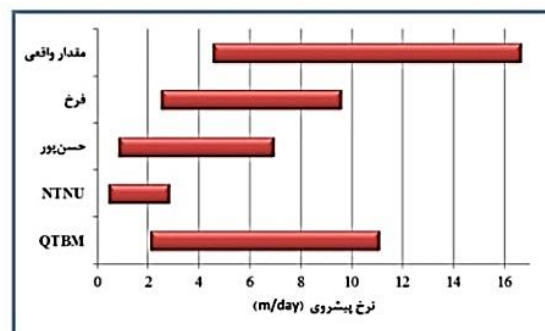
(الف)

شکل ۵-۳۳: بازه نرخ پیشروی در واحد Cr (الف) روش تخمین نقطه‌ای، (ب) روش سری تیلور

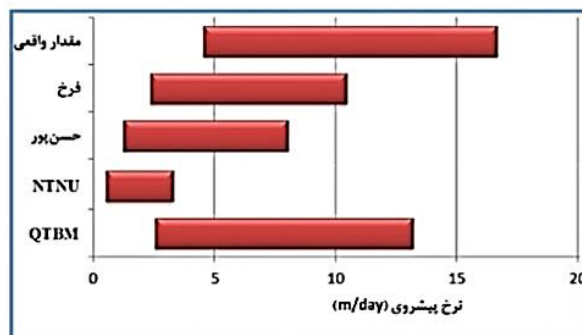
در حالت کلی با مقایسه بازه نرخ پیشروی به دست آمده از سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور که در شکل (۵-۳۴) نیز نشان داده شده، می‌توان گفت که بازه نرخ پیشروی به دست آمده از مدل‌ها در این سه روش، اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. نتایج سه روش در رابطه با مدل‌ها نیز مشابه است. تفاوت اصلی روش‌ها فقط عدم محاسبه بازه نرخ پیشروی با روش سری تیلور در مدل CSM بود.



(ب)



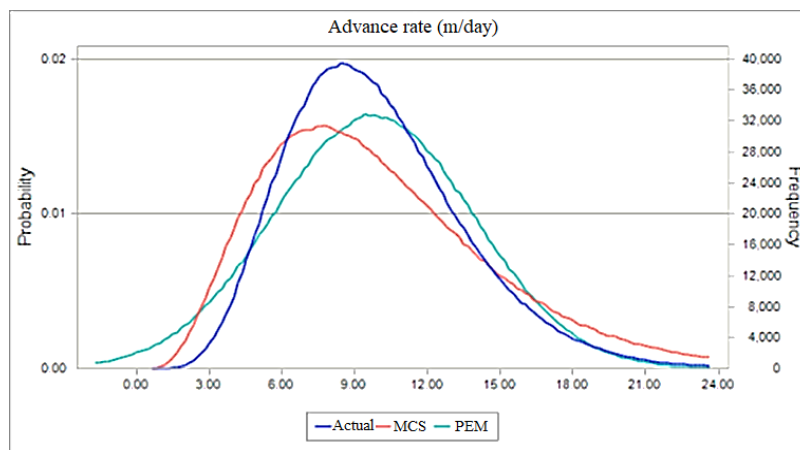
(الف)



(پ)

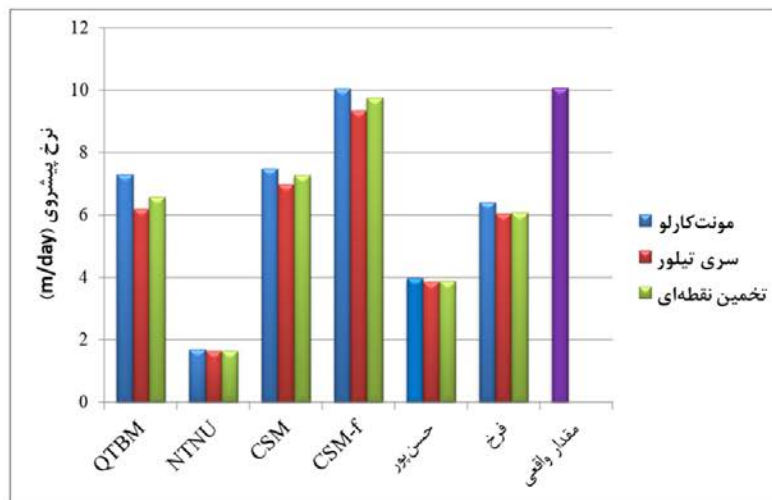
شکل ۵-۳۴: مقایسه نتایج سه روش تخمین نقطه‌ای (الف)، سری تیلور (ب) و شبیه‌سازی مونت کارلو (پ) در واحد KTM

همچنین بین تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده از روش‌ها اختلاف زیادی وجود دارد. در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تابع توزیع احتمال با جزئیات بیشتری نمایش داده می‌شود. بر اساس نمودارهای شکل (۵-۳۵)، نمودار روش شبیه‌سازی مونت کارلو مطابقت بیشتری نسبت به نمودار تخمین نقطه‌ای از نظر چولگی با نمودار نرخ پیشروی واقعی در واحد KTM بر اساس مدل CSM اصلاح‌شده دارد.

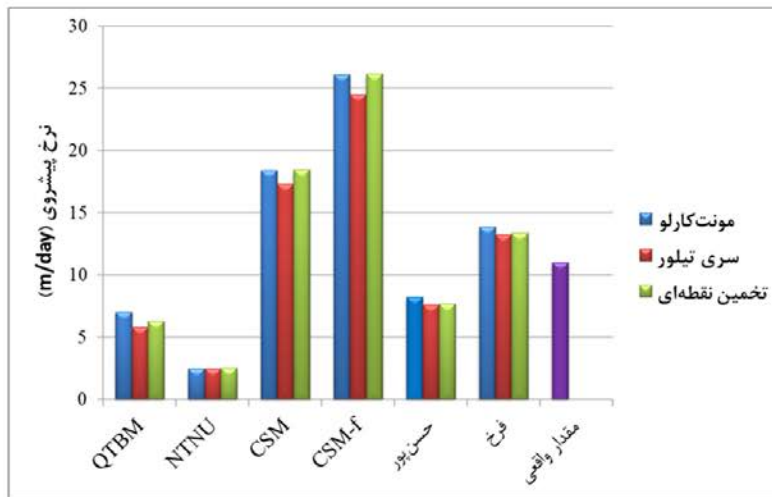


شکل ۵-۳۵: مقایسه نمودار تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی به دست آمده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تخمین نقطه‌ای با نمودار مقدار واقعی در واحد KTM بر اساس نتایج مدل CSM اصلاح‌شده

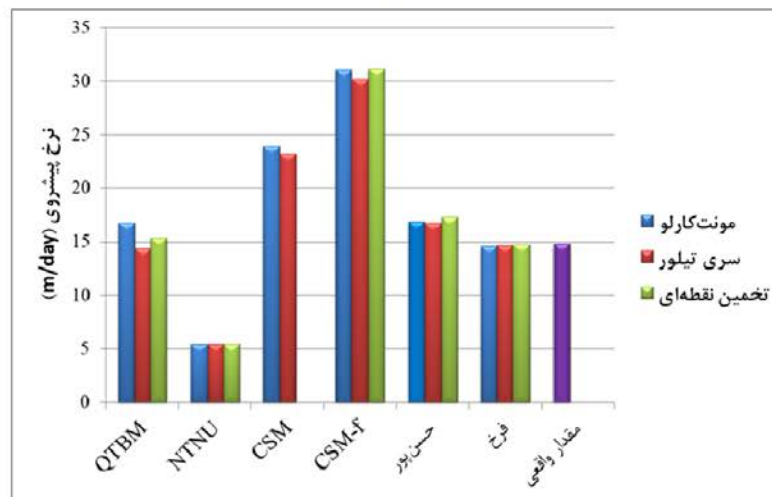
اختلاف بین متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با سه روش ذکر شده نیز بسیار کم است. در شکل (۵-۳۶)-الف، واحد KTM مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل CSM اصلاح‌شده، در شکل (۵-۳۶)-ب، واحد MSC، مقدار متوسط محاسبه شده با روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور و مدل فرخ، در شکل (۵-۳۶)-پ، واحد MP، مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل فرخ در هر سه روش برابر و نزدیکتر به متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی، در شکل (۵-۳۷)-الف، واحد GT، مقدار متوسط محاسبه شده با ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل CSM اصلاح‌شده و در شکل (۵-۳۷)-ب، واحد Cr، مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو و مدل فرخ به متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است. در نتیجه می‌توان گفت در بیشتر واحدها مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو به متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است.



(الف)

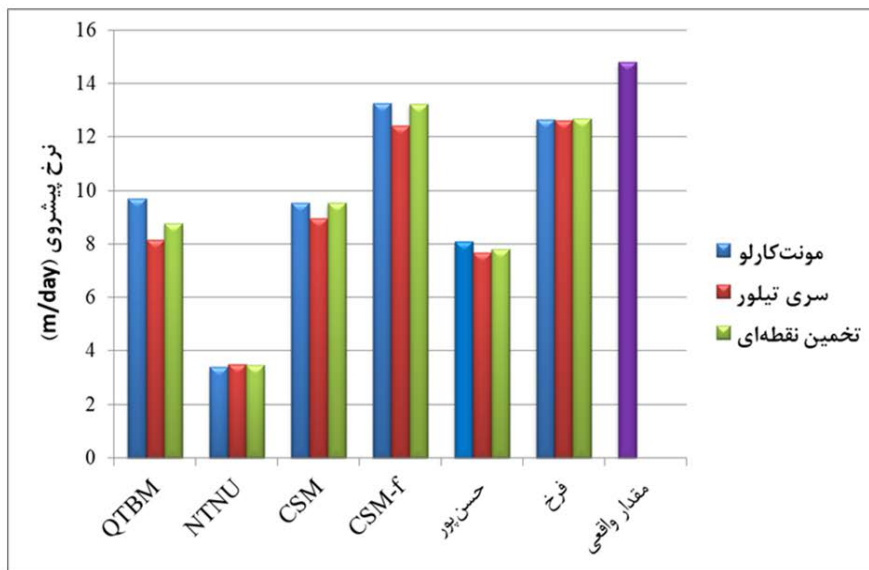


(ب)

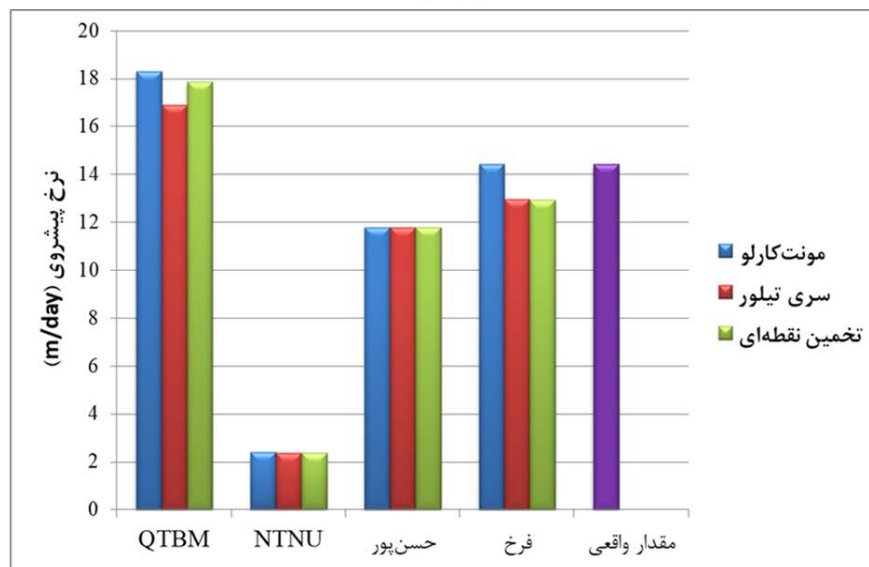


(پ)

شکل ۵-۳۶: مقایسه نتایج نرخ پیشروی متوسط سه روش تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و شبیه‌سازی مونت کارلو در واحدهای KTM (الف)، MSC (ب) و MP (پ)



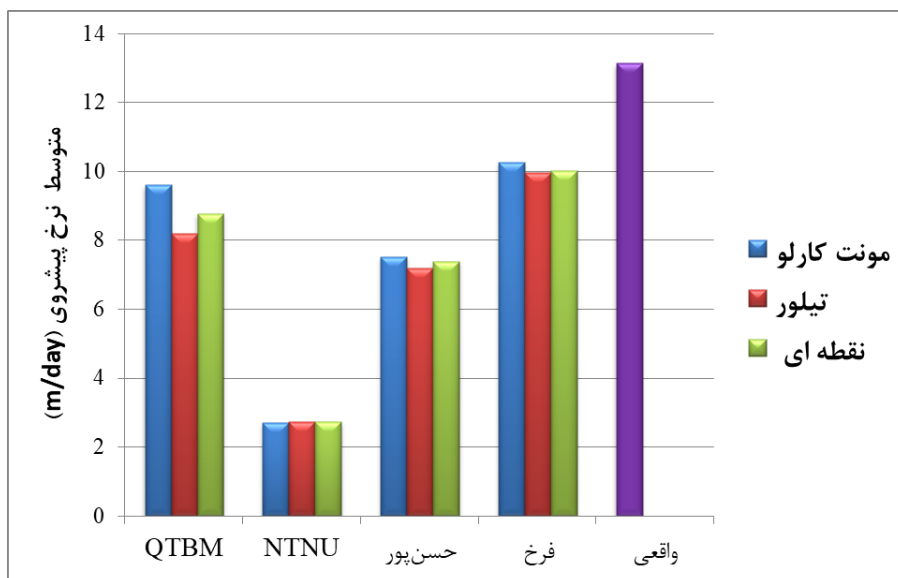
(الف)



(ب)

شکل ۵-۳۷: مقایسه نتایج نرخ پیشروی متوسط سه روش تخمین نقطه‌ای، سری تیلور و شبیه‌سازی مونت کارلو در واحدهای GT (الف) و Cr (ب)

همچنین در رابطه با متوسط نرخ پیشروی کل در یک کیلومتر از تونل، متوسط نرخ پیشروی کل محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو نسبت به دو روش تخمین نقطه‌ای و سری تیلور به مقدار واقعی نرخ پیشروی کل نزدیکتر است. نتایج بیان شده را شکل (۵-۳۸) می‌توان دید.

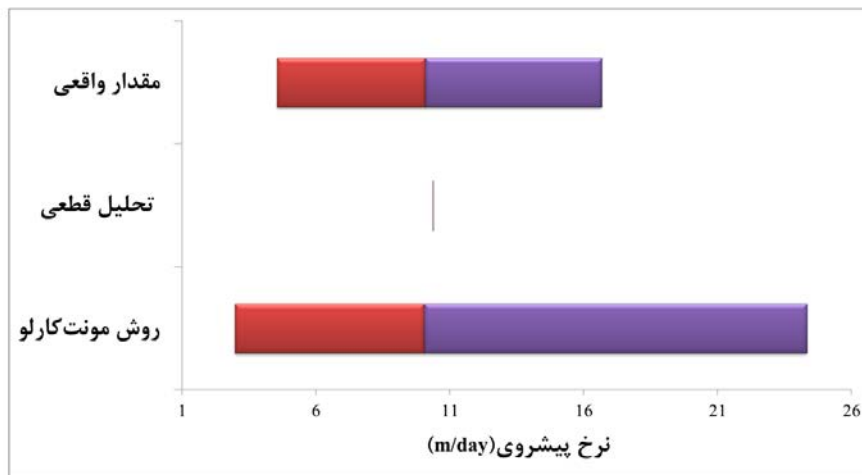


شکل ۵-۳۸: مقایسه متوسط نرخ پیشروی کل به دست آمده در سه روش شبیه‌سازی مونت کارلو، تخمین نقطه‌ای و سری تیلور

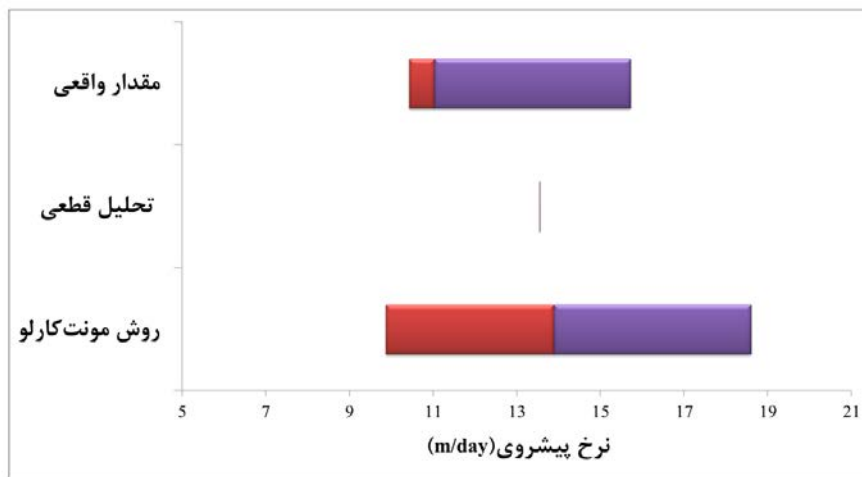
۵-۱۱- مقایسه نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل قطعی

در تحلیل قطعی، مقدار پیشروی محاسبه شده فقط به صورت یک مقدار بوده، در حالیکه در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نرخ پیشروی به صورت بازه است. از آنجایی که نرخ پیشروی واقعی نیز به صورت بازه بوده، در نتیجه می‌توان گفت که نتایج روش شبیه‌سازی مونت کارلو یا روش‌های احتمالاتی بهتر است و در مدل‌های پیش‌بینی که نتیجه مناسبی می‌دهند، ترکیب مدل با روش احتمالاتی نتایج بهتری به دست خواهد داد. نتایج بیان شده در شکل (۵-۳۹) نمایش داده شده است.

اگر مقایسه براساس متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده انجام شود، همانطور که در شکل (۵-۴۰) نمایش داده شده است، اختلاف بسیار کمی بین نتایج تحلیل قطعی با متوسط محاسبه شده روش شبیه‌سازی مونت کارلو به جز مدل QTBM وجود دارد. در برخی از مدل‌ها مقدار متوسط نرخ پیشروی روش شبیه‌سازی مونت کارلو و در برخی دیگر از مدل‌ها، مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده با تحلیل قطعی به متوسط مقدار واقعی نرخ پیشروی نزدیکتر است. تنها اختلاف خاصی که بین دو روش وجود دارد، در رابطه با مدل QTBM است. در روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نرخ نفوذ بر اساس رابطه مدل QTBM محاسبه شده و سپس با رابطه عمومی بین نرخ پیشروی با نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری، نرخ



(الف)

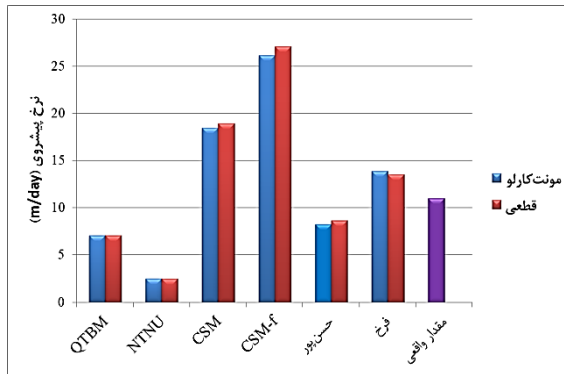


(ب)

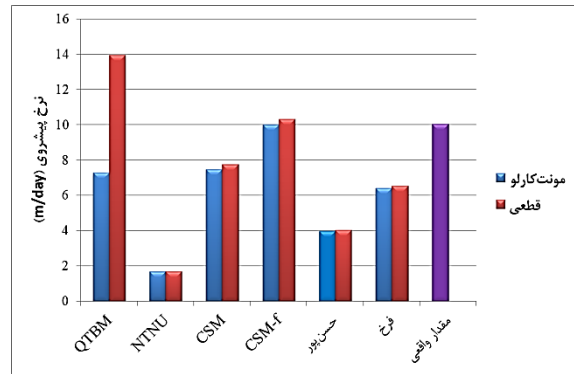
شکل ۵-۳۹: مقایسه نرخ پیشروی در دو روش تحلیل قطعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای واحد KTM (الف)، واحد MSC (ب)

پیشروی برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف محاسبه شده است؛ در حالیکه در تحلیل قطعی، مقدار نرخ پیشروی بر اساس رابطه ارائه شده توسط بارتن (رابطه نرخ پیشروی با زمان حفر تونل با طول L) محاسبه شده است. در واحد KTM، شکل (۵-۴۰)-الف، مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با مدل اصلاح شده در روش شبیه‌سازی مونت کارلو به متوسط نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است. در واحد MSC، شکل (۵-۴۰)-ب، مقدار نرخ پیشروی مدل فرخ در تحلیل قطعی به مقدار واقعی نزدیکتر است. در واحد MP، شکل (۵-۴۰)-پ، نتایج مدل فرخ در تحلیل قطعی و متوسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو و در واحد GT، شکل (۵-۴۰)-ت، نتایج مدل CSM اصلاح شده در تحلیل

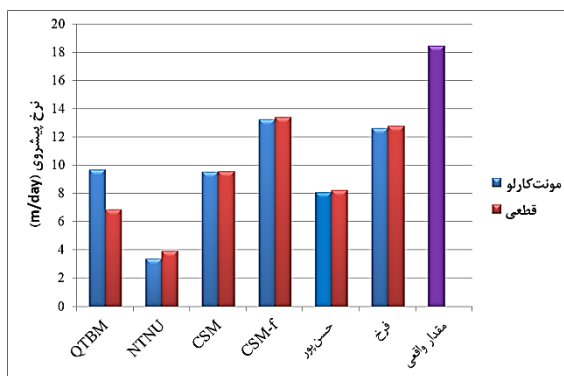
قطعی و متوسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو برابر و نزدیک به متوسط نرخ پیشروی واقعی است. در واحد Cr، شکل (۵-۴۰) - ث، متوسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو-مدل فرخ نزدیک به متوسط نرخ پیشروی واقعی است.



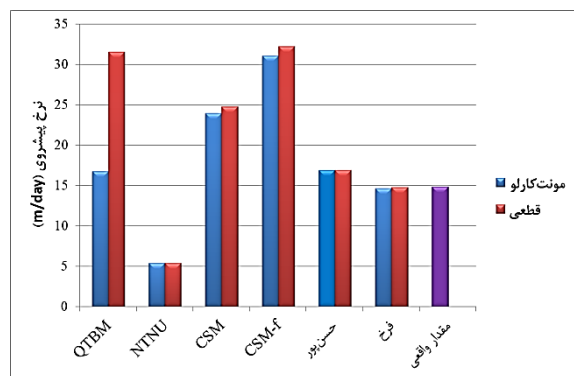
(ب)



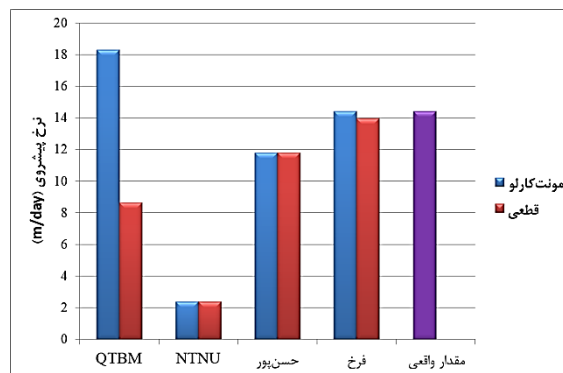
(الف)



(ت)



(پ)



(ث)

شکل ۵-۴۰: مقایسه متوسط نرخ پیشروی در دو روش تحلیل قطعی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای واحد KTM (الف)، واحد MSC (ب)، واحد MP (پ)، واحد GT (ت) و واحد Cr (ث)

در این فصل بر اساس روش‌های احتمالاتی، تحلیل قطعی و استفاده از مدل‌های مختلف به عنوان تابع عملکرد در این روش‌ها، نرخ پیشروی برای واحدهای زمین‌شناسی قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان که حفاری در آنها انجام شده، تخمین زده شد و با مقدار واقعی مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده نشان داد که متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، نسبت به متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش‌های تخمین نقطه‌ای و سری تیلور در بیشتر واحدها، مقدار نزدیکتری به متوسط نرخ پیشروی واقعی دارد. مقایسه مدل‌ها بر اساس بازه و متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو انجام شد. همچنین مقایسه‌ای بین بازه، متوسط و تابع توزیع احتمال به دست آمده از روش‌های احتمالاتی استفاده شده و مقایسه‌ای بین نتایج روش تحلیل قطعی با نتایج روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز صورت گرفت.

در طول یک واحد زمین‌شناسی می‌توان با استفاده از مدل‌ها، در نقاط مختلف نرخ پیشروی را محاسبه کرد، ولی محاسبات به وجود داده مورد نیاز مدل در آن نقطه 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 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، نرخ پیشروی را محاسبه کرد. در روش‌های احتمالاتی به خصوص روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، با تولید داده‌های تصادفی زیاد از توابع توزیع احتمال پارامترها، حالت‌های مختلف بررسی شده و هیستوگرام نرخ پیشروی، بازه، میانگین و شکل تغییرات داده‌ها به دست می‌آید. برای مقایسه نقطه به نقطه در طول یک واحد زمین‌شناسی، چنانچه در طول واحد حفر شده، نرخ پیشروی به صورت منظم ثبت شده باشد، می‌توان نتایج روش‌های احتمالاتی را با تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی واقعی مقایسه کرد، که در این تحقیق برای یک واحد زمین‌شناسی، مقایسه انجام شد. 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، به احتمال زیاد 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.

در مباحث مربوط به تحلیل حساسیت، به دست آوردن موثرترین پارامتر ورودی، بیشتر به همبستگی بین پارامتر هدف با این پارامتر در پایگاه داده اصلی بستگی دارد. همچنین علاوه بر همبستگی و ضریب یا توانی که برای این پارامتر در مدل در نظر گرفته شده، به تغییرات پارامتر در پروژه مورد بررسی، بستگی دارد. نتیجه به دست آمده از تحلیل حساسیت این است که در بین پارامترهای ماشین، RPM و نیروی پیشران و در بین پارامترهای سنگ، خردشدگی و مقاومت فشاری تک‌محوره بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارند. نتایج کلی تحقیق در فصل ۶ ارائه شده است.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تخمین نرخ پیشروی ماشین حفر تمام مقطع قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان با روش‌های احتمالاتی و تحلیل قطعی با استفاده از مدل‌های مختلف پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل پرداخته شد. نتایج به دست آمده عبارتند از:

- در بین دو نوع تابع توزیع احتمال پرت و مثلثی که برای بیشتر پارامترها در نظر گرفته شده بود، نتایج تابع توزیع احتمال پرت نسبت به مثلثی به مقدار واقعی نزدیکتر است.
- مدل Q_{TBM} نسبت به مدل‌های NTNU، CSM، حسن‌پور و فرخ از تعداد پارامترهای بیشتری برای محاسبه نرخ نفوذ استفاده می‌کند. همچنین پارامترهای مورد نیاز در این مدل (RQD_0 ، CLI) در بیشتر پروژه‌ها موجود نبوده، بنابراین استفاده از RQD معمولی در این مدل می‌تواند باعث خطا شود. در بین مدل‌ها، برای واحدهای زمین‌شناسی شامل سنگ‌های توف شیلی و مارن، بازه نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل CSM اصلاح‌شده و در واحدهای شامل سنگ‌های گابرو، ماسه‌سنگ و سیلتستون و زون شکسته، بازه نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل فرخ، بازه مقدار واقعی نرخ پیشروی را بهتر در بر می‌گیرد. همچنین بر اساس متوسط نرخ پیشروی، در واحدهای زمین‌شناسی شامل سنگ‌های توف شیلی و مارن، متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل CSM اصلاح‌شده و در واحدهای شامل سنگ‌های گابرو، ماسه‌سنگ و سیلتستون و زون شکسته، متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده توسط مدل فرخ، به متوسط نرخ پیشروی واقعی نزدیکتر است.
- مدل NTNU در تمامی واحدهای زمین‌شناسی مقدار نرخ پیشروی بسیار کمتری نسبت به مدل‌های دیگر ارائه داده است. همچنین در بین مدل‌ها، بر اساس متوسط نرخ پیشروی در واحدهای زمین‌شناسی، نتایج مدل فرخ نسبت به مدل‌های دیگر افزایش و کاهش کمتری در تمامی واحدهای زمین‌شناسی دارد. مدل CSM و NTNU، برای زون شکسته کاربرد ندارند.
- در بین مدل‌ها، مدل CSM برای نرخ پیشروی کل در یک کیلومتر از تونل لار-کلان قطعه ۲

بدون در نظر گرفتن زون شکسته، مقدار نزدیکتری به مقدار واقعی نرخ پیشروی کل ارائه داده است. در حالت کلی با در نظر گرفتن زون شکسته، مدل فرخ نسبت به مدل حسن‌پور و Q_{TBM} ، مقدار نزدیکتری به مقدار واقعی نرخ پیشروی کل در یک کیلومتر از تونل ارائه داد. زمان اتمام یک کیلومتر تونل توسط مدل فرخ برابر ۱۰۳ روز و در حالت واقعی برابر با ۸۴ روز است. زمان اتمام کل تونل نیز با مدل فرخ برابر با ۲ سال و ۲ ماه و در حالت واقعی برابر با یک سال و ۱۰ ماه است.

- در مدل NTNU در صورتی که تخلخل و تعداد دسته درزه بالا باشد، مقدار فاکتور خردشدگی معادل بزرگتر از مقدار مجاز شده و مقادیر محاسبه شده از این مدل، اختلاف زیادی با مقدار واقعی نرخ پیشروی خواهند داشت.
- در مدل Q_{TBM} تغییرات Q، در مدل NTNU تغییرات RPM و نیروی پیشران، در مدل حسن‌پور تغییرات RQD و RPM، در مدل فرخ و CSM نیز مقاومت فشاری تک‌محوره بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارند.
- روش شبیه‌سازی مونت کارلو در مدل‌هایی که مقدار متوسط نرخ پیشروی کمتر یا نزدیک مقدار واقعی ارائه می‌دهند، نسبت به روش‌های تخمین نقطه‌ای و سری تیلور بهتر بوده و مقدار نزدیکتری به نرخ پیشروی واقعی تخمین می‌زند.
- شکل تابع توزیع احتمال به دست آمده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نسبت به روش‌های تخمین نقطه‌ای و سری تیلور، مطابقت بیشتری با شکل تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی واقعی دارد.
- در روش‌های احتمالاتی نرخ پیشروی به صورت هیستوگرام با سطح اطمینان بوده، ولی در روش تحلیل قطعی، نتیجه فقط به صورت یک مقدار متوسط است.
- متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحلیل قطعی، به جزء در مدل Q_{TBM} که نحوه محاسبه نرخ پیشروی متفاوت بود (در شبیه‌سازی مونت کارلو از رابطه

عمومی نرخ پیشروی و در تحلیل قطعی از رابطه ارائه شده توسط بارتن بر اساس زمان حفر تونل استفاده شده است)، نتایج مدل‌های دیگر اختلاف زیادی با یکدیگر نداشتند. در برخی از واحدهای زمین‌شناسی، متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و در برخی دیگر از واحدها، مقدار نرخ پیشروی محاسبه شده از تحلیل قطعی با اختلاف کمتری نسبت به روش دیگر به مقدار واقعی نزدیکتر بود. در مدل Q_{TBM} ، مقدار متوسط نرخ پیشروی محاسبه شده با رابطه عمومی (در روش شبیه‌سازی مونت کارلو) نسبت به رابطه بارتن (در تحلیل قطعی)، مقدار نزدیکتری به مقدار نرخ پیشروی واقعی ارائه داده است.

۶-۲- پیشنهادها

- با توجه به کمبود داده‌های موجود در پروژه حاضر، توصیه می‌شود که مطالعه با پایگاه داده جامع نیز صورت پذیرد.
- در تحقیق حاضر توابع توزیع احتمال برخی پارامترها به صورت فرضی در نظر گرفته شده بود؛ در صورت وجود جزئیات داده‌ها، با نرم‌افزار Easyfit تابع توزیع احتمال مناسب مشخص شود.
- نرخ پیشروی بر اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو و رویکرد سیستمی احتمالاتی محاسبه شده و نتایج دو روش مورد مقایسه قرار گیرد.
- برخی از پارامترها مانند فاصله‌داری، شیب و جهت شیب درزه‌ها در این تحقیق به صورت ثابت در نظر گرفته شده بود؛ در صورتی که جزئیات این پارامترها وجود داشته باشد، به صورت تابع توزیع احتمال در نظر گرفته شده و محاسبات انجام شود.

منابع

- [1] هاشمی م، "ارزیابی عملکرد دستگاه‌های حفار مکانیزه ساخت تونل (TBM) در شرکت‌های قطار شهری در ایران"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران، ۱۳۹۱.
- [2] احمدی م، همتی شعبانی ع، فروغی م، "پیش‌بینی سرعت نفوذ TBM در حفاری سنگ سخت با استفاده از مدل NTH (مطالعه موردی تونل انتقال آب قمروند)"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۳۳-۴۰، ۱۳۹۱.
- [3] فاطمی ا.ا، "پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفر تمام مقطع حفر تونل با استفاده از سیستم رده‌بندی توده‌سنگ"، رساله دکتری تخصصی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۵.
- [4] ربیعی وزیر م، شفیع ش، پناهی م.ح، "تحلیل سینماتیکی ریزش‌های سنگی به وسیله روش‌های احتمالاتی و با در نظر گرفتن قابلیت اعتماد (بررسی موردی: معدن شماره یک گل‌گهر)"، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته دوره ۵، شماره ۱۵، صفحه ۶۷-۷۴، ۱۳۹۴.
- [5] J. P. Vargas, J. C. Koppe, and S. Pérez, "Monte Carlo simulation as a tool for tunneling planning," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 40, pp. 203–209, 2014.
- [6] بابائی ع، "کاربرد روش شبیه‌سازی مونت کارلو در تونل‌سازی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲.
- [7] A. P. Wolebo, "Advanced Probabilistic Slope Stability Analysis on Rissa Slope," Master's thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2016.
- [8] H. El-Ramly, N. R. Morgenstern, and D. M. Cruden, "Probabilistic slope stability analysis for practice," *Can. Geotech. J.*, vol. 39, no. 3, pp. 665–683, 2002.
- [9] جابری ه، "بررسی آماری پارامترهای توده‌سنگ به‌منظور تحلیل پایداری فضاها‌ی زیرزمینی (مطالعه موردی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴.
- [10] شیخی ح.ا، "تحلیل ریسک برای تعیین الگوی نگهداری تونل-مطالعه موردی: تونل تالون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.
- [11] E. Bukaçi, T. Korini, E. Periku, S. Allkja, and P. Sheperi, "Probability of failure determination for tunnels in rock by using Monte Carlo simulation," *Res. Eng. Struct.*

- Mater., vol. 3, pp. 135–146, 2017.
- [12] E. Cederström, “Application of Probabilistic Methods in Slope Stability Calculations,” Master’s thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University Of Technology, 2014.
- [13] E. Hoek, “Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35(1), pp. 63–68, 1998.
- [14] M. Sari, C. Karpuz, and C. Ayday, “Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites,” *Comput. Geosci.*, vol. 36, no. 7, pp. 959–969, 2010.
- [15] محمدی م، "تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ به روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو (مطالعه موردی: توده‌سنگ دولومیت، سازند سلطانیه)"، سومین همایش بین‌المللی معماری عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم، ۱۳۹۶.
- [16] Z. Ru, H. Zhao, and C. Zhu, “Probabilistic evaluation of drilling rate index based on a least square support vector machine and Monte Carlo simulation,” *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2018.
- [17] O. Saeidi, S. R. Torabi, M. Ataei, and J. Rostami, “A stochastic penetration rate model for rotary drilling in surface mines,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 68, pp. 55–65, 2014.
- [18] شعبانی ع، صیادی ا، گشتاسبی ک، رودباری ع، "بررسی تأثیر عوامل عدم قطعیت در هزینه پروژه‌های تونل‌سازی با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو - مطالعه موردی تونل انتقال آب دشت ذهاب"، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف، ۱۳۸۵.
- [19] G. Piaggio, J. P. Novel, G. W. Bianchi, and A. Bochon, “Probabilistic estimation of project duration using TBM prediction models: application to the safety gallery of the Fréjus Tunnel,” *World Tunn. Congr.*, pp. 1141–1148, 2013.
- [20] C. Frenzel, “Modeling uncertainty in cutter wear prediction for tunnel boring machines,” *GeoCongress 2012*, pp. 3199–3208, 2012.
- [21] افتخاری س، مختاریان س.م، باغبانان ع، "پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفر تونل تمام مقطع با استفاده از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش مونت‌کارلو"، دو فصلنامه زمین‌شناسی ژئوتکنیک، دوره ۱۰، شماره ۴، صفحه ۲۵۵ تا ۲۶۴، ۱۳۹۳.
- [22] H. Copur, H. Aydin, N. Bilgin, C. Balci, D. Tumac, and C. Dayanc, “Predicting performance of EPB TBMs by using a stochastic model implemented into a deterministic model,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 42, pp. 1–14, 2014.

- [23] H. Dehghani, N. Mikhak Beiranvand, "Estimation of penetration rate of tunnel boring machines using Monte-Carlo simulation method," *J. Min. Environ.*, vol. 7, no. 2, pp. 175–184, 2016.
- [24] V. B. Maji, G. V. Theja, "A New Performance Prediction Model for Rock TBMs," *Indian Geotech. J.*, vol. 47, no. 3, pp. 364–372, 2017.
- [25] M. M. Aral, M. L. Maslia, "Application of Monte Carlo Simulation to Analytical Contaminant Transport Modeling," in *Groundwater Quality Modeling and Management Under Uncertainty*, pp. 305–312, 2003.
- [26] جوهری ع، ثانی ف، پرواز م، "تحلیل قابلیت اعتماد شیروانی خاکی نامحدود فاقد تراوش با استفاده از روش ترکیب منحنی توزیع متغیرها"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۰
- [27] N. R. Morgenstern, "Managing risk in geotechnical engineering," in *10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1995.
- [28] M. Cai, "Rock mass characterization and rock property variability considerations for tunnel and cavern design," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 44, no. 4, pp. 379–399, Jul. 2011.
- [29] O. Ditlevsen, "Uncertainty modeling with applications to multidimensional civil engineering systems," McGraw-Hill International Book Co., 1981.
- [30] E. Rosenblueth, "Point estimates for probability moments," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 72, no. 10, pp. 3812–3814, 1975.
- [31] E. Rosenblueth, "Two-point estimates in probabilities," *Appl. Math. Model.*, vol. 5, no. 5, pp. 329–335, 1981.
- [32] J. M. Morales and J. Perez-Ruiz, "Point Estimate Schemes to Solve the Probabilistic Power Flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 1594–1601, 2007.
- [33] J. P. Wang, D. Huang, "RosenPoint: A Microsoft Excel-based program for the Rosenblueth point estimate method and an application in slope stability analysis," *Comput. Geosci.*, vol. 48, pp. 239–243, 2012.
- [34] E. Assefa & et al, "Slope Stability Evaluation for the New Railway Embankment using Stochastic and Finite Element Method," *J. Geotech. Eng.*, vol. 22, pp. 51–79, 2017.
- [35] E. Bastidas-Arteaga, A. Soubra, "Reliability Analysis Methods," 2014.
- [36] بهداد سلامی ا، "مروری بر روش شبیه سازی مونت کارلو"، پژوهشنامه اقتصادی (دانشگاه علامه طباطبایی)، دوره ۳، شماره ۸، ۱۳۸۲.
- [37] کازرونیان ع، "بررسی تحلیلی قابلیت اطمینان روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای اشباع با استفاده از روش ترکیب منحنی توزیع متغیرهای تصادفی." کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شیراز، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۹۱.

[38] غیاث م، "مقدمه‌ای بر روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو"، فصلنامه بسپارش، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۶۷ تا ۷۷، ۱۳۹۳.

- [39] I. BIPM, I. IFCC, and I. 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," Bur. Int. des Poids Mes. JCGM, vol. 101, 2008.
- [40] "Concept of uncertainty and sensitivity analysis." [Online]. Available: https://rdreview.jaea.go.jp/fukyu/review_en/2010/6_6f6_13.html.
- [41] E. Farrokh, "Study of utilization factor and advance rate of hard rock TBMS," Doctor of Philosophy, Department of Energy and Mineral Engineering, The Pennsylvania State University, 2013.
- [42] M. Liu, "Optimal Number of Trials for Monte Carlo Simulation," Valuat. Res. https://www.valuationresearch.com/wpcontent/uploads/kb/SpecialReport_MonteCarloSimulationTrials.pdf, 2017.
- [43] Y. Morris, R Driels, "Determining the Number of Iterations for Monte Carlo Simulations of Weapon Effectiveness," naval postgraduate school monterey ca dept of mechanical and astronautical engineering., PP. 1–31, 2004.
- [44] A. Jones, S. Kramer, and P. Arduino, "Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering," Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California., 2002.
- [45] حسن پور ج، رستمی ج، "عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت"، نشر خرم-نشر فن، ۱۳۸۹.
- [46] L. Ozdemir, "Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability," PhD Thesis, Colorado School of Mines, 1977.
- [47] L. Ozdemir, R. Miller, and F. D. Wang, "Mechanical tunnel boring prediction and machine design_Annual report_ch06-app," 1978.
- [48] J. Rostami and L. Ozdemir, "A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs," in Rapid Excavation & Tunneling Conference, pp. 793–809, 1993.
- [49] J. Rostami, "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical and physical measurement of crushed zone pressure," Ph. D Dissertation, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1997.
- [50] S. Yagiz, J. Rostami, and L. Ozdemir, "Colorado School of Mines approach for predicting TBM performance," in EuROCK, 2012.
- [51] S. N. Cheema, "Development of a Rock Mass Boreability Index for the Performance of Tunnel Boring Machines," Ph.D Thesis, Colorado school of Mine, 1999.
- [52] S. Yagiz, "Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of

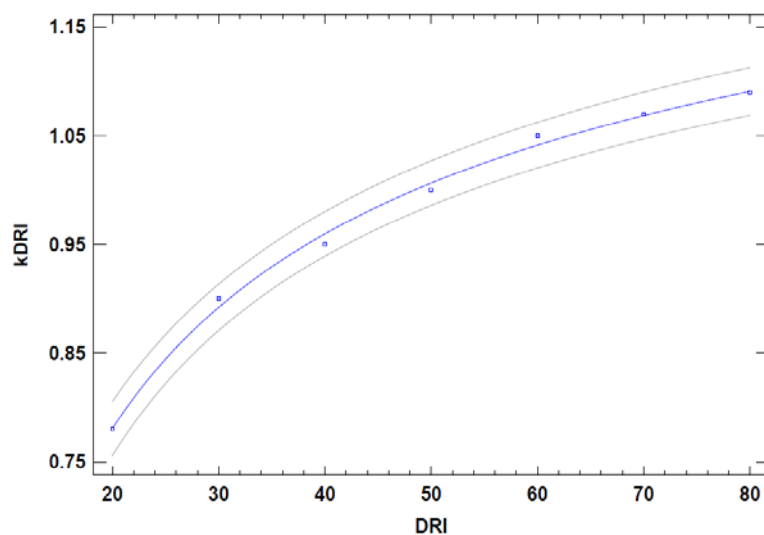
- rock mass features and toughness in the CSM Model basic penetration for hard rock tunneling machines,” Ph.D Thesis, Colorado school of Mine, 2002.
- [53] A. Ramezanzadeh, “Perforamnce analysis and development of new models for performance prediction of hard rock TBM in rock mass,” Ph.D Thesis, INSA, Lyon, 2005.
- [54] O. T. Blindheim, “Boreability predictions for tunneling,” Ph.D. Thesis, Department of geological engineering, The Norwegian Institute of Technology, 1979.
- [55] F. Macias, “Hard rock tunnel boring: performance predictions and cutter life assessments,” Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [56] A. Bruland, “Hard rock tunnel boring, drillability test methods,” Ph.D Thesis, Faculty of engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, 1998.
- [57] M. K. Özfirat, H. Yenice, F. Şimşir, and O. Yarali, “A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability,” *J. African Earth Sci.*, vol. 119, pp. 94–101, 2016.
- [58] A. Bruland, “Hard Rock Tunnel Boring Vol . 10 - Drillability - Statistics of Drillability Test Results Drillability Statistics of Drillability Test Results Amund Bruland Hard Rock Tunnel Boring”, 2000.
- [59] N. Barton, “TBM performance estimation in rock using Q_{TBM} ”, *Tunnels Tunneling Int.*, 1999.
- [60] N. Barton, “TBM tunnelling in jointed and faulted rock,” CRC Press, 2000.
- [61] E. Farrokh, J. Rostami, and C. Laughton, “Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs,” *Tunneling and. Underground. Spaces. Technology.*, vol. 30, pp. 110–123, 2012.
- [62] J. Hassanpour, J. Rostami, and J. Zhao, “A new hard rock TBM performance prediction model for project planning,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 26, no. 5, pp. 595–603, 2011.
- [63] شرکت مهندسی ایمن‌سازان تدبیر پارس، زمین‌شناسی مهندسی قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان، ۱۳۹۶.
- [64] E. Hoek and M. S. Diederichs, “Quantification of the Geological Strength Index Chart,” 47th US Rock Mech. Geomech. Symp. held San Fr. CA, USA June 23-26, p. 9, 2013.
- [65] M. Cai, P. K. Kaiser, H. Uno, Y. Tasaka, and M. Minami, “Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 41, no. 1, pp. 3–19, Jan. 2004.

- [66] Z. Bieniawski, "Engineering rock mass classifications : a complete manual for engineers and geologist in mining civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons." 1989.
- [67] P. Longchamp, "new recommendations on choosing mechanized tunnelling techniques," AFTES, 2000.
- [68] Tunnel Boring Machine (Telescopic Shield Machine) Operating and Maintenance Manual, no. 02431, 2004.
- [69] J. Hassanpour, J. Rostami, S. T. Azali, and 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," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 43, pp. 222–231, 2014.
- [70] J. Hassanpour, J. Rostami, M. Khamehchiyan, A. Bruland, and H. R. Tavakoli, "TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel," *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 427–445, Jul. 2010.
- [71] N. Barton, R. A. Abrahao, "Employing the Q_{TBM} prognosis model," *Tunnels Tunn. Int.*, 2003.

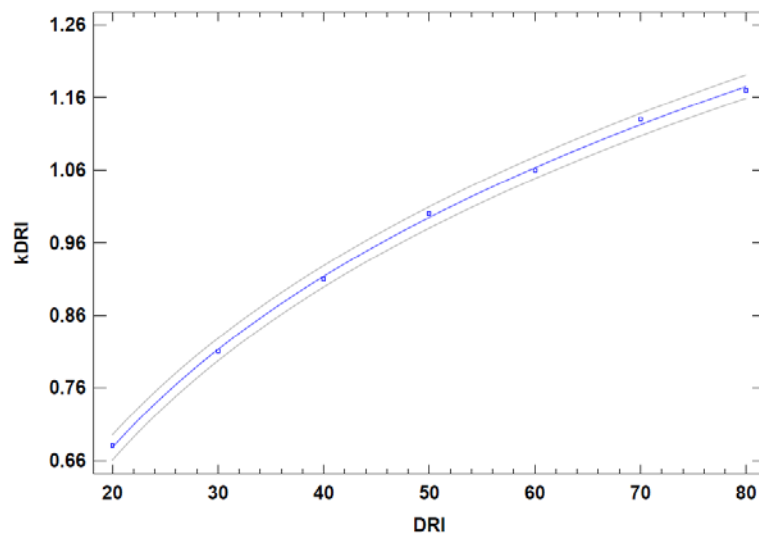
پیوست

۱- جزئیات جدول (۷-۵)

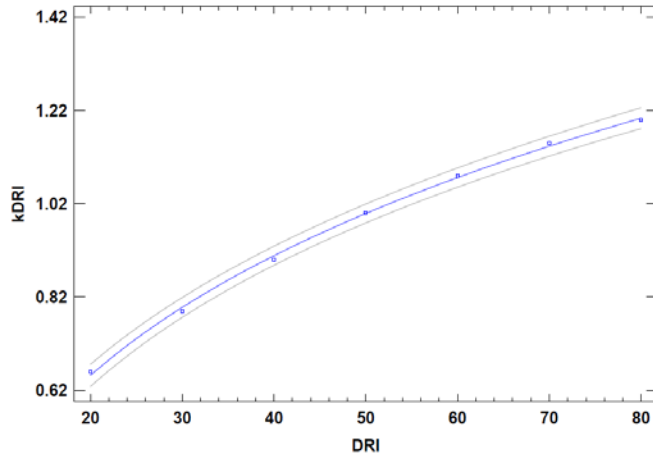
$kDRI = 1.44916 - 2.57388 * DRI^{-0.45}$
RMSE: 0.00744206, R-squared: 99.62%, P-Value: 0.0000



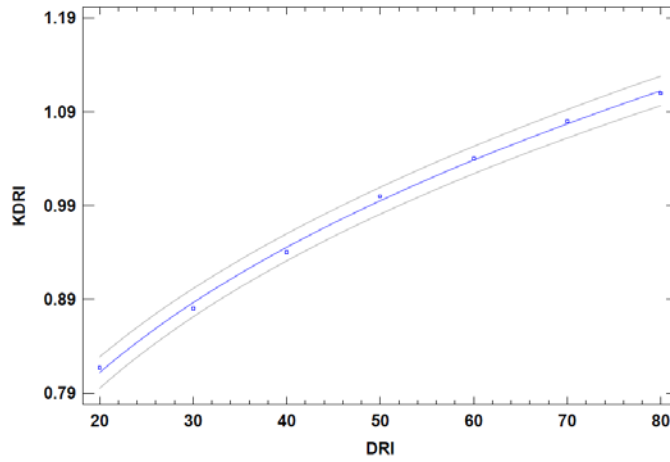
$kDRI = -1.47233 + 1.37198 * DRI^{0.15}$
RMSE: 0.00535472, R-squared: 99.92%, P-Value: 0.0000



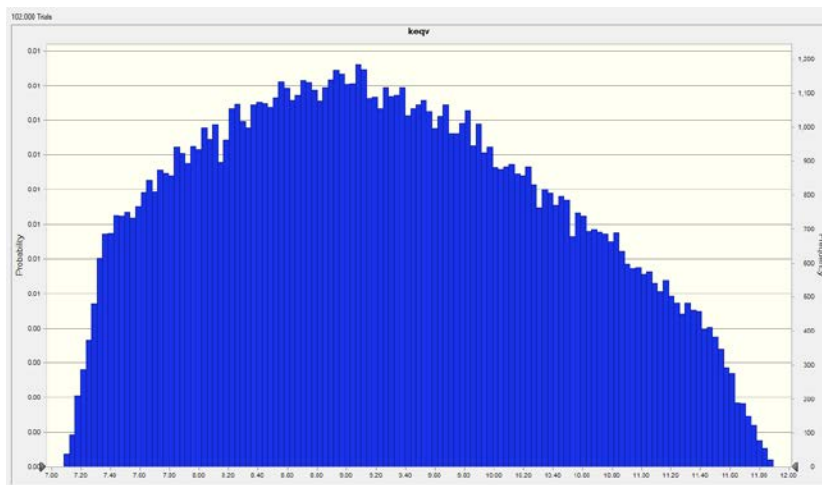
$kDRI = -1.05489 + 0.948426 \cdot DRI^{0.2}$
 RMSE: 0.00735135, R-squared: 99.88%, P-Value: 0.0000



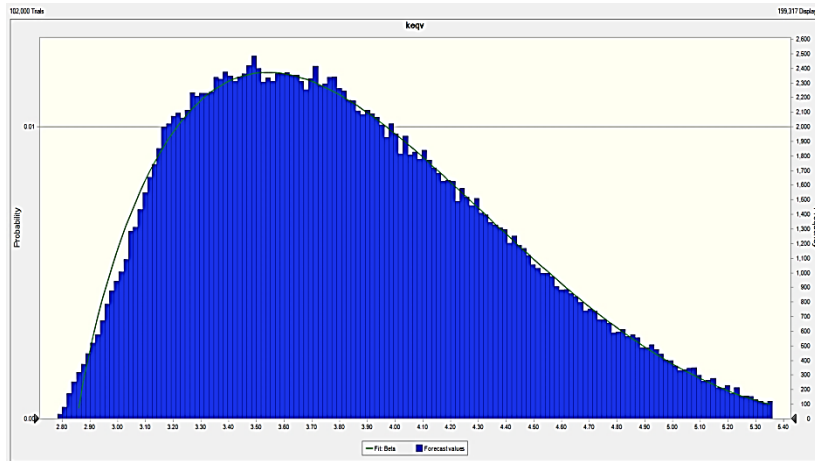
$KDRI = 0.28325 + 0.206464 \cdot DRI^{0.32}$
 RMSE: 0.0052088, R-squared: 99.80%, P-Value: 0.0000



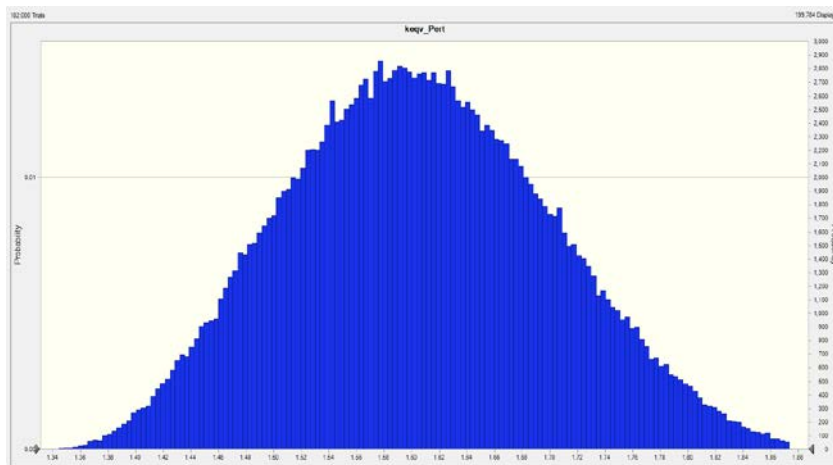
۲- جزئیات جدول (۵-۸)



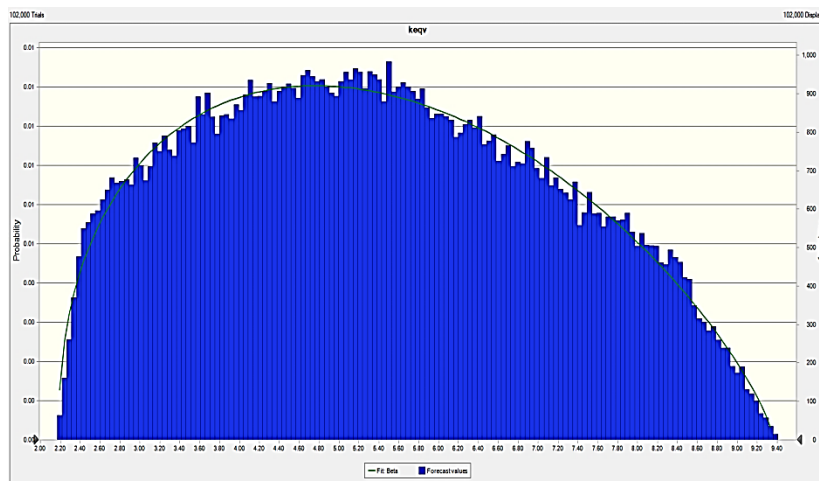
الف) هیستوگرام keqv در واحد KTM



ب) هیستوگرام keqv در واحد MSC



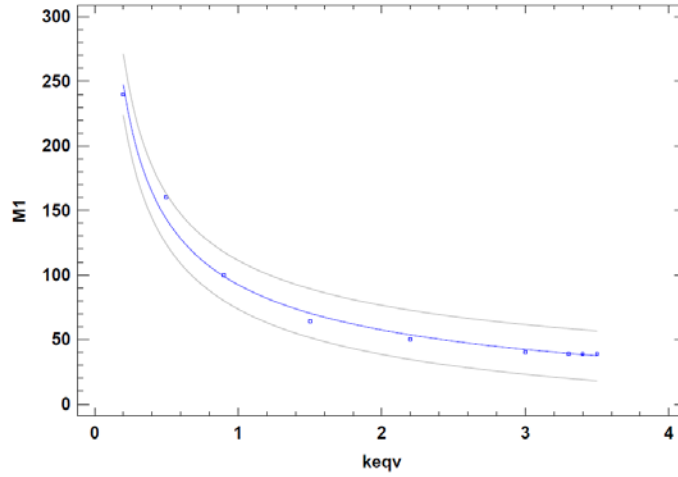
پ) هیستوگرام keqv در واحد MP



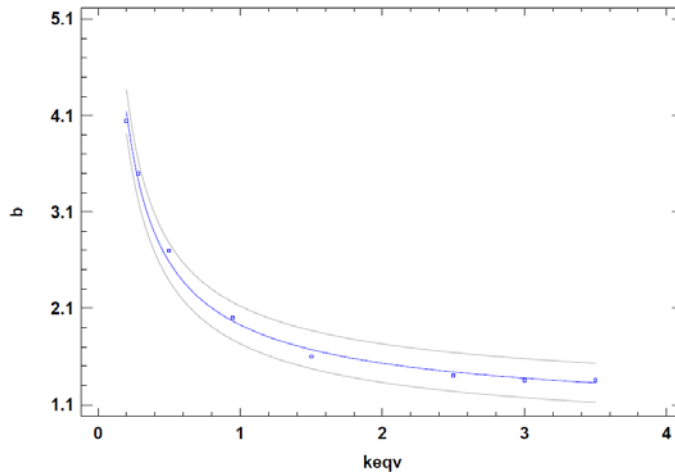
ت) هیستوگرام keqv در واحد GT

۳- جزئیات جدول (۵-۱۰)

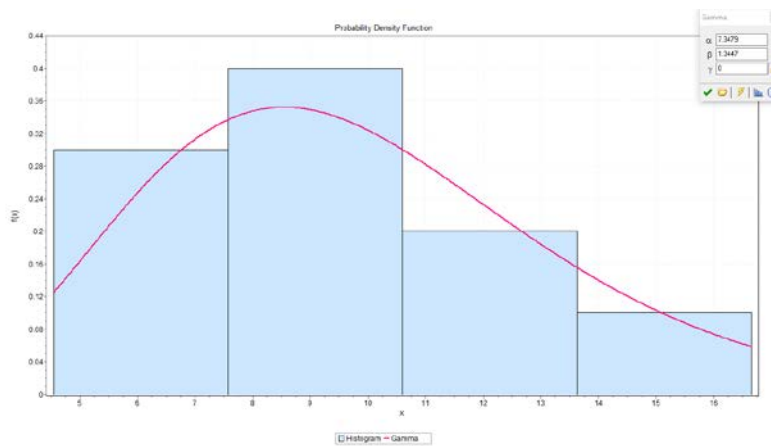
$$M1 = -19.4824 + 111.913 * keqv^{-0.54}$$
 RMSE: 7.5581, R-squared: 99.00%, P-Value: 0.0000



$$b = 0.916894 + 1.01147 * keqv^{-0.72}$$
 RMSE: 0.0749547, R-squared: 99.57%, P-Value: 0.0000



۴- تابع توزیع احتمال نرخ پیشروی واقعی واحد KTM



Abstract

Nowadays, Tunnel Boring Machine (TBM) is widely used in tunneling projects. Estimation of TBM performance is one of the most important parameters in estimation of cost and time of tunneling projects. TBM performance is evaluated using Advance Rate (AR), Penetration Rate (PR) and Utilization factor (U). Various models and method for estimation of these parameters were presented

The overall purpose of this thesis is to use probabilistic methods for estimation of TBM advance rate. For this purpose, the equations of Q_{TBM} , NTNU, CSM, Hassanpour (2011) and Farrokh (2012) models as performance function in three methods Monte Carlo Simulation (MCS), Point Estimate Method (PEM) and Taylor series are used. At First, according to data of lar water conveyance tunnel lot-2, for input parameters of models, proper distribution function was considered, then with the implementation of the Monte Carlo Simulation, the advance rate was obtained with 95% certainty. In PEM and Taylor series methods, equations of these methods were written in MATLAB, and then with the implementing of code, by entering the mean and standard deviation of the parameters and equations of each model, the mean and standard deviation of the advance rate was calculated.

Among models, for the geological units including tuffy shale and marl rocks, the average of the advance rate calculated by the modified CSM model with EMI correction factor and in the geological units including gabbro, sandstone, siltstone rocks, and crushed zone, the results of Farrokh model was closer to the average value of the actual advance rate. In all the geological units, the NTNU model has a much lower advance rate than other models .

Among the probabilistic methods, the average of the advance rate calculated by the MCS method was closer to the average of the actual advance rate. Also, the advance rate calculated by deterministic analysis (with using most-likely value of parameters in different models).

The average and value of the advance rate calculated by the MCS method and deterministic analysis, except in the Q_{TBM} model, which was calculated with two different methods, there was not much difference in the other models. In the deterministic analysis, only a mean value for the advance rate was calculated, whereas, in probabilistic methods, the calculated advance rate was histogram with a confidence level.

Using probabilistic methods in combination with TBM prediction models, with considering different states, helps to estimate the range of advance rates more confidently.

Keywords: Tunnel Boring Machine, Probabilistic method, Monte Carlo Simulation, Deterministic analysis



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

Tunnel and Underground Spaces Engineering MSc Thesis in
Estimation of advance rate of TBM using probabilistic methods -
Case study: Lar-Kalan water conveyance tunnel lot-2

By: Mohsen Sardari

Supervisor:
Shokrollah Zare

January 2019