

تحلیل حساسیت مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع در تونل انتقال آب لار-کلان

محسن سرداری^۱، شکراله زارع^{۲*}، مسعود مزرعه لی^۳

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
۳- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت ۱۳۹۸/۰۶/۰۵، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۲)

چکیده

در بیشتر پروژه‌های تونل‌سازی از ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل (TBM) استفاده می‌شود. ارزیابی عملکرد این ماشین‌ها در تخمین میزان هزینه و زمان حفر تونل بسیار مهم است. نرخ نفوذ، یکی از شاخص‌های مهم در ارزیابی عملکرد ماشین است که با روش‌های مختلف برآورد می‌شود. تحلیل حساسیت یک مدل، برای بررسی تأثیرپذیری متغیر خروجی از متغیرهای ورودی انجام می‌شود. در این مطالعه، سه مدل اصلی Q_{TBM} ، CSM، NTNU و دو مدل حسن‌پور و فرخ براساس اطلاعات مربوط به شرایط زمین‌شناسی و اطلاعات حفاری تونل انتقال آب لار-کلان، مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته و تأثیر تغییرات عوامل ورودی مدل‌ها بر تغییرات نرخ نفوذ بررسی شده است. نتایج کلی به این صورت است که افزایش نیروی پیشران، RPM، CLI، تخلخل و شاخص خردشدگی و کاهش Q، محتوای کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی، تنش مماسی و RQD، باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شوند. تحلیل حساسیت، براساس دو نمودار گردبادی و عنکبوتی، مورد ارزیابی قرار گرفته و برای مدل‌های مختلف، تأثیر تغییرات شاخص‌ها بر روی تغییرات نرخ نفوذ، بررسی و عواملی که بیشترین تأثیر را بر نرخ نفوذ دارند، مشخص شده‌اند؛ از عوامل مربوط به شرایط زمین‌شناسی تغییرات Q، تخلخل، مقاومت فشاری تک‌محوره و RQD و از شاخص‌های مربوط به ماشین حفر تونل، تغییرات نیروی پیشران و RPM، بیشترین تأثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ در تونل مورد مطالعه داشتند.

کلمات کلیدی

ماشین حفر تمام مقطع، نرخ نفوذ، تحلیل حساسیت، نمودار گردبادی، نمودار عنکبوتی.

۱- مقدمه

یکی از شاخص‌های مهم در تخمین زمان و هزینه پروژه تونل‌سازی، پیش‌بینی عملکرد ماشین حفر تمام مقطع تونل است. روش‌های مختلفی که برای تخمین عملکرد ماشین ارایه شده، به دو دسته مدل‌های تجربی و نظری تقسیم‌بندی می‌شوند. از مدل‌های نظری می‌توان به مدل‌های راکسبورور و فیلیپس [۱]، سانپو [۲]، ساتو [۳]، اسنودون و همکاران [۴]، بوید [۵] و [۶] CSM اشاره کرد. مدل‌های پیش‌بینی تجربی براساس نحوه ارایه، بر مبنای شاخص‌های توده‌سنگ و یا مطالعات آزمایشگاهی تقسیم‌بندی شده‌اند. مدل‌های تجربی مبتنی بر شاخص‌های توده‌سنگ نیز با توجه به روش استفاده شده به سه دسته تقسیم می‌شوند. آلوارز [۷]، ارمغانی [۸] و میکایل [۹] از روش‌های هوش مصنوعی برای ارایه مدل استفاده کرده‌اند. مدل‌های [۱۰] NTNU، رمضان‌زاده (۲۰۰۵) [۱۱]، حسن‌پور [۱۲] و فرخ [۱۳] از روش‌های آماری استفاده کرده‌اند. مدل‌های RMI [۱۴]، QTBM [۱۵] و RME [۱۶] مبتنی بر سیستم‌های رده‌بندی توده‌سنگ هستند. بر روی برخی از این مدل‌ها، تحلیل حساسیت انجام شده است. زورآبادی و همکاران [۱۷] با تحلیل حساسیت مدل‌های QTBM، NTNU و RMI و طبق پایگاه داده اصلی مدل‌ها و براساس نمودار گردباد شاخص‌ها، به این نتیجه رسیدند که در مدل QTBM مقدار Q، نیروی پیشران و تنش مماسی و در مدل NTNU و RMI، نیروی پیشران و فاصله‌داری درزه، بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارند [۱۷]. ماسیاس در سال ۲۰۱۶ با افزودن داده‌های تعدادی پروژه تونل‌سازی، مدل NTNU را به‌روزرسانی کرد و به تحلیل حساسیت مدل، براساس نمودار عنکبوتی شاخص‌ها پرداخت. نتیجه به‌دست آمده نشان داد که نیروی پیشران و فاکتور خردشدگی، بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارند [۱۸]. فاطمی و همکاران در مطالعه‌ای مدل‌های یاگیز، خادمی، گانگ و فرخ را براساس پایگاه داده اصلی مدل‌ها مورد تحلیل قرار داده و با عنایت به نتایج نمودارهای گردباد و عنکبوتی دریافتند که در مدل یاگیز، PSI، در مدل خادمی، مقاومت فشاری تک‌محوره، در مدل گانگ، حجم بلوکی درزه (Jv) و در مدل فرخ، RPM، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارند [۱۹]. یانگ و همکاران (۲۰۱۷) نیز به تحلیل حساسیت مدل‌های CSM، NTNU، QTBM برپایه اطلاعات پروژه‌های در اروپا که توسط TBM باز حفاری شده بود، پرداخته‌اند. این پروژه دارای سنگ‌هایی با مقاومت بالا (۱۳۰-۲۵۰ مگاپاسکال) و میزان خردشدگی کم (۱/۷۳-۰/۳۶) بوده و می‌توان گفت دارای

شرایط زمین‌شناسی خوب است. نتایج نشان داد که در مدل CSM، نیروی پیشران، در مدل NTNU، نیروی پیشران و میزان خردشدگی و در مدل QTBM، تغییرات Q، بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ داشتند [۲۰].

در این مطالعه تحلیل حساسیت روی سه مدل اصلی QTBM، NTNU و CSM و دو مدل حسن‌پور و همکاران [۱۲] و فرخ و همکاران [۱۳] با دراختیار داشتن اطلاعات پروژه تونل‌سازی لار-کلان انجام شده است. در برخی از واحدهای زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه، حفاری انجام گرفته و اطلاعات این واحدهای زمین‌شناسی برای تحلیل حساسیت استفاده شده است. سنگ‌های موجود در مسیر تونل مورد مطالعه، بیشتر شامل سنگ‌های رسوبی با مقاومت کم تا زیاد (۹۴-۶/۵ مگاپاسکال) و تخلخل کم تا زیاد (۱۲-۱ درصد) است. بیشتر تحلیل حساسیت‌های انجام شده تاکنون، با توجه به پایگاه داده اصلی مدل‌ها بوده و مطالعات کمی برپایه شرایط زمین‌شناسی مشابه تونل لار-کلان انجام شده است. با تحلیل حساسیت مدل‌ها بر اساس شرایط تونل نامبرده، می‌توان کارایی مدل‌ها را مورد ارزیابی قرار داد. به‌عنوان نمونه، در تحلیل حساسیت انجام شده بر روی مدل NTNU در مطالعات گذشته، تاکنون تاثیر تخلخل، زیاد مد نظر قرار نگرفته که دلیل آن نیز تحلیل حساسیت در شرایط زمین‌شناسی با تخلخل کم بوده است. همچنین در شرایط زمین‌شناسی ضعیف، چون نرخ نفوذ بالا با نیروی پیشران و سرعت چرخش کله حفار کم به‌دست می‌آید، معمولاً تغییرات شاخص‌های توده‌سنگ نسبت به تغییرات عوامل مرتبط با ماشین متفاوت خواهد بود. در این مطالعه موارد ذکر شده، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت، مطالعه تاثیرپذیری متغیر خروجی از متغیرهای ورودی یک مدل آماری است. به‌عبارت دیگر، روشی برای ارزیابی تغییرات شاخص خروجی در اثر تغییرات عوامل ورودی با بهره‌گیری از یک مدل ریاضی است. تاکنون روش‌های متنوعی برای تحلیل حساسیت ارایه شده است. روش‌های تحلیل حساسیت از نظر روش‌های آماری، ریاضی و گرافیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. ساده‌ترین شکل تحلیل حساسیت، تغییر یک متغیر، با ثابت نگه‌داشتن سایر متغیرها و بررسی تاثیر تغییر بر نتایج مدل است. این روش به‌عنوان تحلیل حساسیت یک طرفه شناخته شده است. از آن‌جا که در این روش، تنها یک

تغییرات مقدار شاخص خروجی را برپایه تغییرات عوامل ورودی نشان می‌دهد. این نمودار میزان تغییرات مقدار خروجی را با میزان تغییرات مقادیر ورودی، بر حسب درصد، به صورت خطی نشان می‌دهد؛ هرچه شیب خط مربوط به یک شاخص ورودی بیشتر باشد، تاثیر آن بر عامل خروجی بیشتر است.

۳- مطالعه موردی

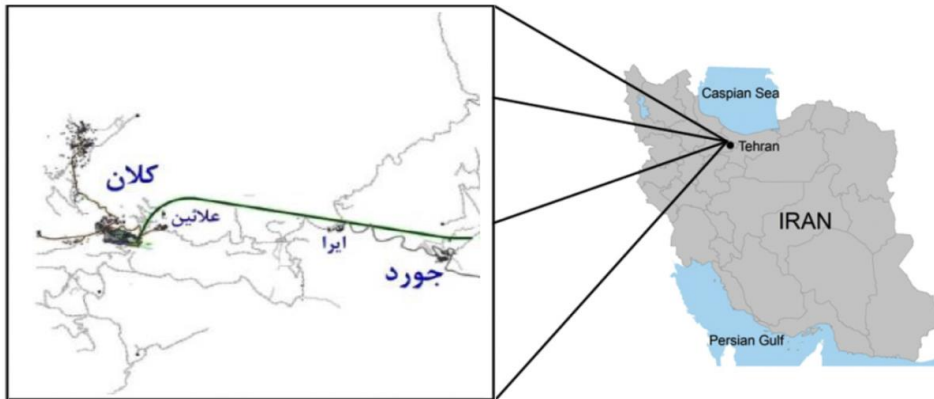
قطعه دوم تونل انتقال آب لار-کلان، از دره جورود واقع در شمال شرقی روستای جورود آغاز شده و تا بخش انتهایی تونل انتقال آب لار-کلان در مجاورت نیروگاه و روستای کلان ادامه یافته است (شکل ۱). این قطعه از تونل، ۷۴۹۲ متر طول دارد و روند کلی آن شرقی-غربی است. قطر حفاری و تمام شده تونل به ترتیب ۴/۵ و ۳/۸ متر با مقطع دایره‌ای شکل است. طرحی از پروفیل تونل، در شکل ۲ نمایش داده شده است.

محدوده مورد مطالعه (مقطع تونل)، شامل واحدهای سنگی رسوبی تخریبی و بعضاً شیمیایی و بیوشیمیایی، آذرآواری و آذرین است. با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در مطالعات صحرایی و در نظر گرفتن مقیاس نقشه، محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی، شامل ۶ واحد است. اما با بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی صورت گرفته و در نظر گرفتن وجود واحدهای سنگی موجود در مسیر حفاری تونل، ۸ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تشخیص است. توصیف کلی این واحدها را جدول ۱ می‌توان دید.

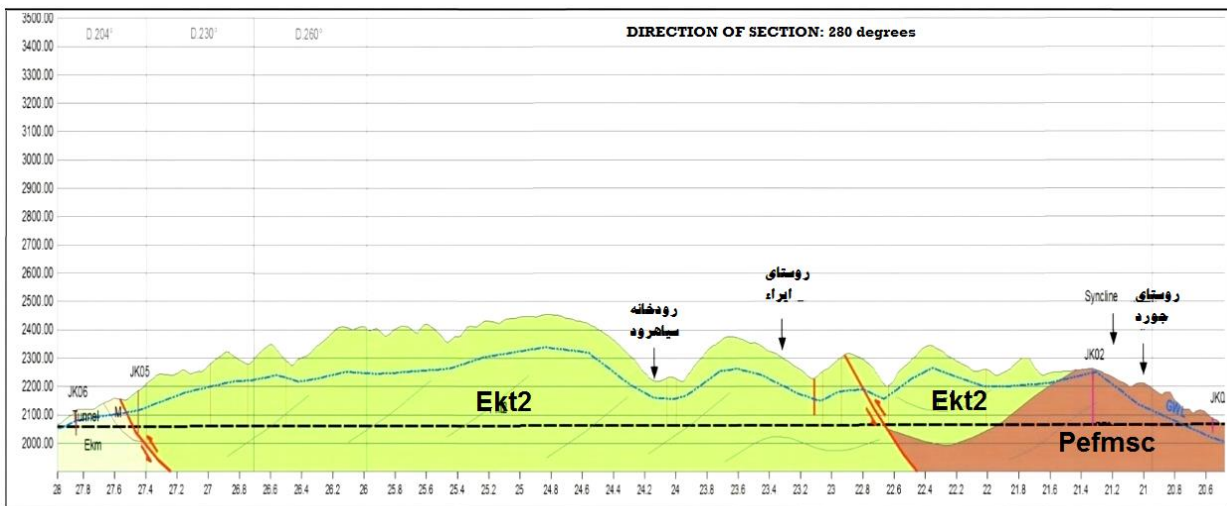
در این مطالعه، تحلیل حساسیت طبق اطلاعات واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل که حفاری شده‌اند، انجام شده است. نوع ماشین مورد استفاده برای حفاری این تونل از نوع ماشین حفر تمام مقطع تلسکوپي است. این نوع از ماشین‌ها بسیار کاربردی بوده و معمولاً در مواقعی که شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل متغیر است، به کار می‌روند. مشخصات ماشین مورد استفاده در قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان در جدول ۲ ارائه شده است. جدول ۳، پروفیل و محدوده عوامل زمین‌شناسی و عملکرد ماشین در این واحدها را نشان می‌دهد. این پارامترهای عملکردی شامل شاخص عمر کاتر (CLI)، نیروی رانش و همچنین سرعت چرخش کله حفار می‌باشند. لازم به ذکر است که مقدار شاخص حفرپذیری سنگ یا همان DRI، همانند CLI، براساس بانک اطلاعاتی آزمایشگاه مکانیک خاک و سنگ SINTEF و اطلاعات موجود در مراجع (به‌عنوان نمونه [۱۲]) برای پروژه‌های مشابه با پروژه تونل انتقال آب لار-کلان تخمین زده شده است.

شاخص تغییر می‌کند، حساسیت مدل نسبت به آن شاخص مشخص خواهد شد؛ البته در دفعات بعد، می‌تواند بر روی عوامل دیگر، تحلیل انجام شود و حساسیت مدل به هر کدام از شاخص‌ها با هم مقایسه شود. تجزیه و تحلیل حساسیت یک طرفه در نشان دادن تاثیر یک شاخص در مدل مفید است؛ بعضی مواقع لازم است که تاثیر تغییر دو یا چند عامل به صورت هم‌زمان بررسی شود. تحلیل حساسیت چند وجهی این امکان را فراهم می‌کند که تاثیر تغییر ترکیب‌های احتمالی عوامل تاثیرگذار، در دامنه تغییرات آن‌ها ارزیابی شود. لازم به ذکر است که تفسیر و نمایش تحلیل حساسیت چندوجهی با افزایش تعداد شاخص‌ها پیچیده و مشکل خواهد شد. در روش تحلیل حساسیت احتمالی، به جای اختصاص یک مقدار مشخص به هر شاخص، یک توزیع برای تمام شاخص‌های موجود در مدل در نظر گرفته می‌شود. در این روش، مشابه روش چندوجهی تاثیر هم‌زمان شاخص‌ها 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 [۲۱].

باید به این نکته توجه کرد که در هر یک از مدل‌ها، میزان تاثیر هر یک از عوامل، به تغییرات داده‌های پروژه‌ای که تحلیل حساسیت بر اساس انجام می‌شود و هم‌چنین به پایگاه داده اصلی که مدل بر پایه آن ارایه شده، بستگی دارد. به بیان دیگر، در هر یک از مدل‌ها، شاخصی که همبستگی بیشتری با شاخص هدف داشته است، در مدل طوری قرار داده شده که هنگام تحلیل حساسیت، این همبستگی آشکار می‌شود. در برخی از مدل‌ها چنانچه دو شاخص همبستگی با شاخص هدف، برابری داشته باشند، شاخصی که بازه تغییرات آن بیشتر است، تاثیر بیشتری در شاخص هدف خواهد داشت. هم‌چنین، هنگام تحلیل حساسیت باید به این نکته توجه داشت که شاید در یک مدل ارایه شده، همبستگی بیشتری بین شاخص هدف با شاخص ورودی وجود داشته است، در حالی که ممکن است در پایگاه داده مدلی دیگر، همبستگی ضعیفی بین این دو شاخص وجود داشته باشد؛ بنابراین در تحلیل مدل‌ها نباید انتظار داشت که یک شاخص در دو مدل، تاثیر یکسانی داشته باشد و در هر دو مدل، به‌عنوان موثرترین شاخص شناخته شود. در تحلیل حساسیت می‌توان از دو نوع نمودار گردباد و عنکبوتی استفاده کرد. نمودار گردباد تنها تغییر کلی در مقدار شاخص خروجی را براساس میانگین، حداقل و حداکثر شاخص‌ها نشان می‌دهد و شاخصی که بیشترین طول نمودار را داشته باشد، به‌عنوان موثرترین شاخص شناخته می‌شود. نمودار عنکبوتی،



شکل ۱: موقعیت و مسیر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار



شکل ۲: پروفیل تونل با واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

جدول ۱: توصیف‌های میدانی واحدهای زمین‌شناسی مهندسی موجود در محدوده مورد مطالعه

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

جدول ۲: مشخصات ماشین حفر قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان

پارامتر	مقدار
قطر ماشین حفار (متر)	۴٫۵۳
قطر کاتر دیسک (میلیمتر)	۴۳۲
فاصله‌داری کاترها (میلیمتر)	۷۵
توان (وات)	۱۱۲۰
سرعت چرخش کاتر هد (دور در دقیقه)	۱۲
گشتاور (کیلو نیوتن متر)	۸۰۲
نیروی تراست (کیلو نیوتن)	۱۸۰۰۰

متغیر اول از حداقل تا مقدار حداکثر با درصدهای مختلف تغییر یافته و نمودار به‌دست می‌آید. این روند برای سایر عوامل نیز تکرار و نمودار تمامی متغیرها در یک نمودار کلی رسم و تاثیر متغیرهای مختلف بر شاخص هدف، بررسی می‌شود.

۵- مدل‌های پیش‌بینی عملکرد TBM

در طول چند دهه گذشته، برای ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفاری، مدل‌های مختلفی معرفی و توسعه داده شده‌اند تا بتوانند یکی از شاخص‌های ارزیابی عملکرد ماشین را با یک یا چند شاخص ماشین و یا شرایط زمین مرتبط کنند. محققان زیادی تاکنون برای پیش‌بینی عملکرد ماشین حفاری، مدل‌های تجربی و نظری ارائه دادند و از این بین، مدل‌هایی که برای تحلیل حساسیت انتخاب شده، در ادامه معرفی می‌شوند.

۵-۱- مدل Q_{TBM}

مدل QTBM، براساس نگارش جدیدی از سیستم رده‌بندی Q توسط "بارتن" در سال ۱۹۹۹ پیشنهاد شده است. در واقع وی با اضافه کردن عواملی که در عملکرد ماشین مؤثر هستند، شاخص جدیدی به نام QTBM را معرفی کرد که با شاخص نرخ نفوذ ماشین مرتبط است. رابطه ۱، ارتباط

۴- روش انجام تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت شامل دو نوع نمودار گردبادی و عنکبوتی است. در رسم نمودار گردبادی، ابتدا با توجه به میانگین شاخص‌ها (یا همان متغیرهای تحقیق)، نرخ نفوذ متوسط محاسبه می‌شود. در مراحل بعد، نرخ نفوذ بر اساس مقادیر حداقل و حداکثر متغیر اول و مقدار میانگین عوامل دیگر، محاسبه و نمودار کلی برای متغیر اول به‌دست می‌آید. همین روند برای متغیرهای دیگر نیز تکرار می‌شود. سپس نمودار مربوط به تمامی متغیرها با هم مقایسه شده و متغیری که بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ دارد، مشخص می‌شود. در رسم نمودار عنکبوتی نیز برای رسم نمودار متغیر اول، از میانگین متغیرهای دیگر استفاده می‌شود و مقدار

جدول ۳: مشخصات زمین‌شناسی و ژئومکانیکی واحدهای سنگی مسیر تونل

واحد زمین‌شناسی	Range	σ_0 (MPa)	UCS (MPa)	qu (%)	DRI	CLI	Q	RQD	γ (gr/ton ³)	Porosity (%)	BTS (MPa)	Thrust (kN)	RPM
Ekm	Min	۴٫۹۶	۱۲٫۱۶	۵	۴۵	۷۵	۰٫۱۵	۲۵	۲٫۲۹	۷٫۸	۲٫۹۹	۸۰٫۸۳	۱٫۴
	Max	۰٫۶۹	۴۵٫۷	۱۵	۵۵	۱۰۰	۱٫۶	۷۰	۲٫۷۷	۱۲٫۱	۱۰٫۷	۱۱۱٫۱۱	۴٫۶
	Ave	۳٫۷۲	۲۲٫۷۷	-	-	-	۰٫۴	۵۰	۲٫۴۸	۹٫۷	۵٫۵	-	-
Cr	Min	۱۳٫۰۲	-	۵	۴۵	۷۵	۰٫۰۲	-	۲٫۵۹	۷٫۸	-	۸۴٫۷۷	۱/۲
	Max	۰٫۷۴	-	۱۵	۵۵	۱۰۰	۰٫۱۵	-	۲٫۷۶	۱۲٫۱	-	۱۰۳٫۸۸	۳٫۲
	Ave	۷٫۷۴	۶٫۵	-	-	-	۰٫۰۵	۱۰	۲٫۷	۹٫۷	۰٫۵۵	-	-
M	Min	۶٫۷۵	۱۴٫۰۷	۱۰	۴۵	۵۰	۰٫۱	۲۰	۲٫۲۵	۴٫۷۶	۱٫۷۶	۶۱٫۱۱	۲٫۳
	Max	۶٫۱۸	۵۰٫۴۳	۲۰	۶۵	۸۰	۱٫۸	۶۵	۲٫۸۵	۸٫۸۸	۵٫۹	۹۱٫۳۳	۴٫۲
	Ave	۶٫۶۷	۲۰٫۹۹	-	-	-	۰٫۲۵	۳۵	۲٫۵۸	۶٫۰۵	۳٫۷	-	-
Tgb	Min	۹٫۳۲	۲۷٫۳۱	۰	۳۳	۱۱	۰٫۲۵	۲۵	۲٫۶	۲٫۴۸	۲٫۲۳	-	-
	Max	۹٫۶۸	۵۱٫۷۷	۵	۴۵	۲۲	۴	۸۵	۲٫۸۳	۳٫۸۸	۶٫۷۳	-	-
	Ave	۹٫۶۳	۳۴٫۵۶	-	-	-	۰٫۷	۵۵	۲٫۷۵	۳٫۱	۴٫۴	۱۳۰٫۸۶	۵
Ekt	Min	۲۰٫۰۸	۳۵	۵	۴۵	۷۵	۰٫۱	۲۰	۲٫۳۷	۱٫۳	۲٫۹۹	۷۹٫۵۵	۳٫۴
	Max	۷٫۷۳	۹۴٫۴	۱۵	۷۵	۱۰۰	۱٫۵	۷۰	۲٫۶۵	۱۰٫۷	۸٫۲	۹۵٫۲۸	۴
	Ave	۱۲٫۵۶	۶۲٫۰۶	-	-	-	۰٫۲۵	۴۰	۲٫۵۱	۶٫۷۳	۵٫۶	-	-

تحلیل حساسیت، براساس اطلاعات قطعه ۲ تونل انتقال آب لار-کلان است (جدول ۳). در این مطالعه به جای RQD، از RQD معمولی استفاده شد. تحلیل حساسیت شامل دو نوع نمودار گردبادی و عنکبوتی با این اطلاعات انجام شد. در شکل ۳، نتایج حاصل از نمودار گردبادی نمایش داده شده است. نمودار شاخص‌های مختلف در مدل QTBM، نشان می‌دهد که تغییرات شاخص Q، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارد. کاهش مقدار Q، $\sigma\theta$ ، محتوای کوارتز، مقاومت فشاری تک‌محوره و چگالی و افزایش نیروی پیشران و CLI، باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شود. بنابراین مهم‌ترین شاخص تاثیرگذار توده‌سنگ و ماشین به ترتیب Q و نیروی پیشران است. با توجه به تغییرات Q در این پروژه، کیفیت توده‌سنگ در محدوده بسیار ضعیف تا ضعیف قرار دارد که نشان‌دهنده شرایط آسان‌تر برای حفاری است. باید به این نکته توجه کرد که در این شرایط هر چند حفاری آسان‌تر و نرخ نفوذ افزایش می‌یابد، در مقابل پایداری توده‌سنگ، کم است و نرخ پیشروی تحت تاثیر زمان نصب سیستم نگهداری قرار می‌گیرد. این نتایج، با نمودار شکل ۵ که توسط بارتن ارائه شده است، مطابقت دارد. شکل ۴، نشان می‌دهد کاهش مقدار Q نسبت به افزایش آن، تاثیر بیشتری در نرخ نفوذ دارد. همان‌طور که بیان شد نمودار عنکبوتی نیز در تحلیل حساسیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نمودار، تاثیر

بین عوامل مختلف با QTBM و رابطه ۲، نرخ نفوذ را نشان می‌دهد [۲۲]:

$$Q_{TBM} = \frac{RQD_0}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \cdot \frac{SIGMA}{F^{10}/20^9} \cdot \frac{20}{CLI} \cdot \frac{q}{20} \cdot \frac{\sigma\theta}{5} \quad (1)$$

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

که در رابطه ۱:

ROD0: مقدار RQD در جهت موازی با محور تونل

Jn: معرف تعداد درزه‌ها

Jr: معرف زبری درزه

Ja: معرف هوازدگی درزه

Jw: معرف جریان آب در درزه

SRF: ضریب کاهش تنش

SIGMA: معادل مقاومت توده‌سنگ

F: شاخص F: متوسط بار کاتر (برحسب تن-نیرو)

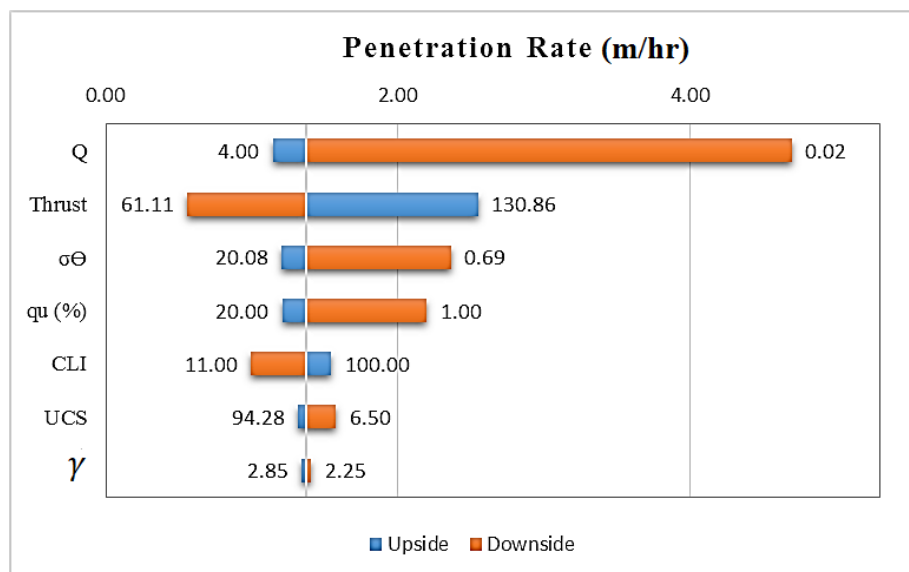
CLI: شاخص عمر کاتر

q: محتوای کوارتز به درصد

$\sigma\theta$: تنش مماسی ایجادشده در سینه‌کار تونل (برحسب

مگاپاسکال) است که نسبت به عمق ۱۰۰ متر، نرمالیزه شده است.

محدوده تغییرات عوامل ورودی مدل QTBM برای انجام



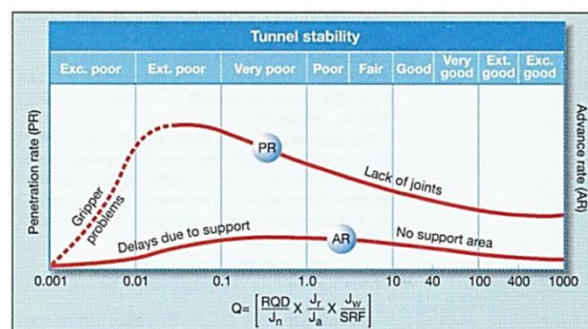
شکل ۳: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل QTBM

دیگر عوامل، تاثیر بیشتری بر روی تغییرات نرخ نفوذ دارد.

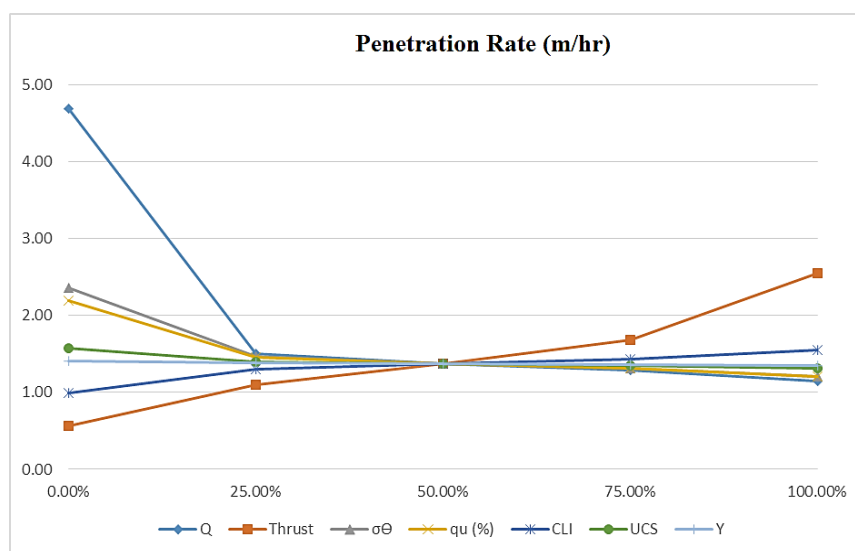
۵-۲- مدل NTNU

در میان مدل‌های تجربی، مدل NTNU کامل‌ترین و پرکاربردترین روش برای تخمین عملکرد ماشین‌های سنگ سخت محسوب می‌شود. اولین نگارش این مدل در سال ۱۹۷۹ در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ ارائه شد [۱۰] و با توجه به تکمیل شدن داده‌های بانک اطلاعاتی مربوطه توسط محققان مختلف تا سال ۱۹۹۸، مورد بازبینی و تصحیح قرار گرفت. آخرین به‌روزرسانی این مدل در سال ۲۰۱۶ توسط "ماسیاس" ارائه شد. فلسفه مدل NTNU، دستیابی به پیش‌بینی‌های قابل اعتماد با ترکیب ویژگی‌های توده سنگ مربوطه و عوامل دستگامی است. در این مدل، تمام شاخص‌های مربوط به توده سنگ در قالب یک شاخص با نام "معیار خردشدگی معادل" یا K_{ekv} و تمام عوامل مربوط به ماشین در قالب یک شاخص، تحت عنوان "نیروی رانش معادل" یا M_{ekv} باهم ترکیب می‌شوند. رابطه ۳، رابطه اصلی مدل NTNU است که از تحلیل تعداد زیادی آزمون نفوذ انجام شده در حین حفاری دستگام به دست آمده است و رابطه حاصل از آن (رابطه ۳) منحنی نفوذ نرمال شده نامیده می‌شود. شاخص خردشدگی معادل، با رابطه ۴ و نیروی پیشران معادل، با رابطه ۵ قابل محاسبه هستند. پس از محاسبه نرخ نفوذ پایه (I_0)، نرخ نفوذ خالص (I_0) برحسب متر بر ساعت نیز با رابطه ۶ قابل محاسبه است [۱۸]:

تغییرات شاخص‌ها برحسب درصد، روی تغییرات شاخص هدف بررسی می‌شود. به‌عنوان مثال بررسی می‌شود که در چه محدوده‌ای از تغییرات، شاخص‌ها تاثیر بیشتری دارند. نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل QTBM، شکل ۵، نشان می‌دهد وقتی تغییرات شاخص‌ها کمتر از ۲۵ درصد است، شیب خط Q نسبت به دیگر شاخص‌ها بیشتر است و تاثیر بیشتری بر نرخ نفوذ دارد؛ اما زمانی که تغییرات شاخص‌ها بیش از ۷۵ درصد است، تاثیر تغییرات نیروی پیشران، بیشترین بوده و عوامل دیگر، شیب بسیار کمی دارند. در کمتر از ۲۵ درصد تغییرات، شیب خط شاخص‌ها نسبت به زمانی که تغییرات بیش از ۲۵ درصد است، بیشتر بوده و بعد از ۲۵ درصد، شیب خط شاخص‌ها به‌جز نیروی پیشران - بسیار کم می‌شود؛ به این معنی که در این محدوده، تغییرات نیروی پیشران نسبت به



شکل ۴: رابطه بین PR و Q [۲۳]



شکل ۵: نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل QTBM

kpor : شاخص تصحیح تخلخل

kDRI : شاخص حفرپذیری سنگ است.

در روابط ۵ و ۶:

MB : نیروی پیشران متوسط اعمال شده بر روی هر کاتر

Kd : ضریب تصحیح برای قطر دیسک کاتر

Ka : ضریب تصحیح برای فاصله‌داری متوسط دیسک

کاترها است.

RPM: سرعت چرخش کله حفار بر حسب دور بر دقیقه

KRPM: ضریب تصحیح برای RPM است.

برای تحلیل حساسیت مدل NTNU، ابتدا مقدار فاکتور خردشدگی کل، براساس مقادیر و جهت شیب ناپیوستگی‌ها در واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل محاسبه شد. مقدار این شاخص برای واحدهای زمین‌شناسی مختلف در جدول ۴ ارائه شده است. شاخص‌های ارائه شده برای ناپیوستگی‌ها در این جدول، معرف چهار دسته درزه (J1، J2، J3 و J4) و همچنین یک لایه‌بندی (B) است که در حین مطالعات زمین‌شناسی مهندسی با استفاده از روش خط برداشت^۱ برداشت شده‌اند. در زون شکسته (Cr) نیز برای معیارخردشدگی کل، مقدار ۳/۵

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

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

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

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

در رابطه ۳ که "منحنی نفوذ نرمال شده" نیز نامیده می‌شود:

i_0 : نرخ نفوذ پایه برحسب میلی‌متر بر دور کله حفار

Mekv: نیروی رانش معادل بر حسب کیلونیوتن بر کاتر

M1: نیروی پیشران بحرانی است، که طبق تعریف، نیرویی

است که برای ایجاد یک میلی‌متر نفوذ در سنگ لازم است.

این شاخص و ضریب ثابت نفوذ (b) به معیار خردشدگی معادل وابسته هستند.

در رابطه ۴:

ks-tot: معیار خردشدگی کل

جدول ۴: وضعیت ناپیوستگی‌ها و شاخص خردشدگی در هر دسته برای واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل

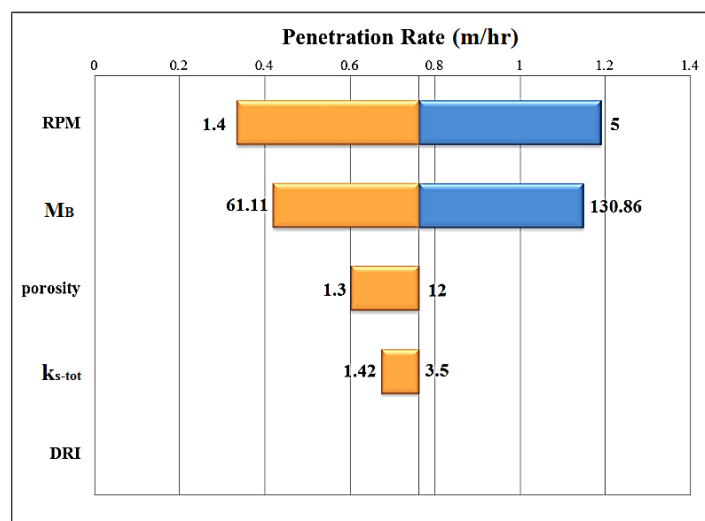
فاکتور خرد شدگی ks-total	فاکتور خرد شدگی ks	کلاس شکستگی	فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (سانتی‌متر)	α (درجه)	آزیموت تونل (درجه)	ناپیوستگی‌ها	واحد زمین‌شناسی
۲,۸۸	۰,۸۸	۵	۲۵,۶	۹,۳۹	۲۰۴	B	Ekm
	۱,۴	۵	۲۹,۲	۴۳,۹۵		J1	
	۰,۶۴	۴	۳۴,۶	۱۶,۶۴		J2	
	۰,۹۲	۴	۴۹	۵۱,۹۴		J3	
	۰,۴۸	۳	۱۰۷,۵	۴,۵		J4	
۱,۸	۰,۹۶	۴	۳۴,۶	۳۹,۸۸	۲۰۴	B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

در سنگ‌های رسوبی است. افزایش تخلخل، باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ و در نتیجه، افزایش نرخ نفوذ می‌شود. ولی این‌که چرا تخلخل نسبت به معیار خردشدگی، تاثیر بیشتری در نرخ نفوذ دارد، بیشتر به بازه تغییرات این شاخص‌ها مربوط می‌شود. در مدل NTNU و در رابطه شاخص خردشدگی معادل، هر دو عامل خردشدگی کل و تصحیح تخلخل به یک نسبت نقش دارند؛ در این پروژه، بازه تغییرات تخلخل نسبت به شاخص خردشدگی، بیشتر بوده و به همین دلیل در تحلیل حساسیت، بالاتر از شاخص خردشدگی قرار گرفته است. در حالی‌که طبق مطالعات انجام شده [۱۷] در سنگ‌های آذرین که تخلخل کمتر است، مقدار خردشدگی کل تاثیر بیشتری نسبت به تخلخل در نرخ نفوذ دارد.

همان‌طور که نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل NTNU (شکل ۷) نشان می‌دهد، وقتی تغییرات شاخص‌ها کمتر از ۲۵ درصد است، تمامی شاخص‌ها دارای شیب بوده، یعنی تغییرات آنها روی تغییرات نرخ نفوذ تاثیر دارد؛ اما زمانی‌که تغییرات شاخص‌ها بیش از ۲۵ درصد می‌شود، شیب سه عامل DRI ، $Porosity$ ، $ks-tot$ ، تقریباً صفر می‌شود و به دلیل این است که مقدار شاخص خردشدگی معادل بیش از ۳/۵ شده و تغییرات این سه عامل، دیگر موثر نیست. دو شاخص RPM و نیروی پیشران، بیشترین شیب را داشته و تغییرات آنها، تاثیر زیادی روی تغییرات نرخ نفوذ دارد. هم‌چنین شیب این دو شاخص نیز تقریباً در طول کل تغییرات، ثابت است.

در نظر گرفته شد. محدوده تغییرات عوامل ورودی مدل NTNU نیز در جدول ۳ ارایه شده است. تحلیل حساسیت برای مدل انجام شده و نمودار گردبادی تحلیل حساسیت را در شکل ۶ می‌توان دید. براساس نمودار گردباد، افزایش تمامی شاخص‌ها، باعث افزایش نرخ نفوذ شده و تغییرات دو شاخص RPM و نیروی پیشران، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارند. از آنجایی‌که در محاسبه "شاخص خردشدگی معادل" بر اساس مقدار حداقل و حداکثر DRI ، حاصل ضرب مقادیر میانگین تخلخل و شاخص خردشدگی منتج به یک شاخص معادل بیشتر از ۳/۵ می‌شد و این شاخص نمی‌تواند بیشتر از مقدار مذکور باشد، شاخص خردشدگی معادل مستقل از تغییرات DRI در نظر گرفته شد. از این‌رو، تاثیر تغییرات تخلخل در مدل NTNU به صورت کلی و فارغ از تاثیر DRI بررسی شد. مطابق با نتایج به دست آمده، در این مدل وقتی مقدار تخلخل زیاد است، چون شاخص خردشدگی معادل، خارج از محدوده مدل می‌شود، نمی‌تواند نرخ نفوذ را به صورت دقیق محاسبه کند.

نیروهای مورد نیاز برای حفاری، به وسیله چرخش کله حفاری و نیروی پیشران تامین می‌شود؛ بنابراین هرچقدر دور دستگاه بیشتر باشد، نرخ نفوذ بیشتری حاصل می‌شود، ولی با توجه به وجود محدودیت‌هایی مانند 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 شاخص مهم در میزان حفرپذیری سنگ‌ها به‌ویژه



شکل ۶: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل NTNU

CSM مدل ۳-۵

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{R-P}{R}\right) \quad (8)$$

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

که در این روابط:

R: شعاع برش‌دهنده

T: عرض لبه برش‌دهنده

Ψ : ثابت توزیع فشار (متغیر بین ۰٫۲ تا ۰٫۲-) است.

ϕ : زاویه تماس بین سنگ و برش‌دهنده

P^0 : فشار پایه در زون خردشده و نقطه‌ای دقیقاً در زیر کاتر

p: میزان نفوذ کاتر در سنگ برحسب میلی‌متر بر دور

کله حفار

σ_c : مقاومت فشاری

σ_t : مقاومت کششی سنگ

S: فاصله‌داری برش‌دهنده هستند.

پس از محاسبه ϕ و Ft، ثابت کاتر با رابطه ۱۰، نیروی

عمودی با رابطه ۱۱ و غلتشی با رابطه ۱۲ قابل محاسبه هستند:

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

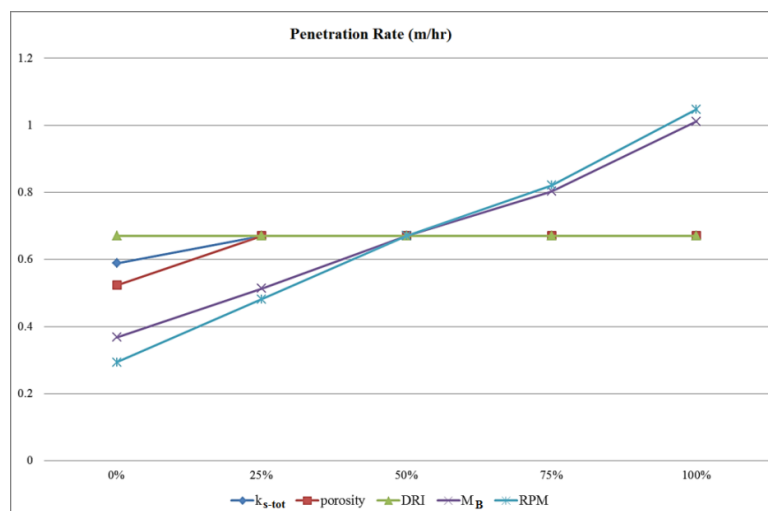
$$F_n = F_t \cos \beta \quad (11)$$

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

نگارش اولیه این مدل توسط "ازدمیر" در سال ۱۹۷۷ [۶] و "ازدمیر و میلر" در سال ۱۹۷۸ [۲۳] در مدرسه معدن کلرادو ارائه شد. این محققان با در نظر گرفتن اثر فاصله‌داری دیسک کاترها و میزان نفوذ دیسک کاتر در سنگ و با فرض تشکیل تراشه‌ها بر اثر گسیختگی برشی در مجاورت دیسک کاترها، مدلی نظری را برای پیش‌بینی نیروهای برش در دیسک کاترهای V شکل، توسعه دادند. در واقع این مدل، روابطی را برای تخمین نیروی مورد نیاز برای نرخ نفوذ ثابت دیسک کاتر (با ویژگی‌های هندسی مشخص) در سنگ ارائه می‌دهد. این مدل در دهه ۹۰ توسط "رستمی و ازدمیر" به‌روز شد [۲۴]. روابط ارائه شده، در سال ۱۹۹۷ توسط "رستمی" با فرض استفاده از کاترهای با سطح مقطع ثابت و براساس وقوع گسیختگی کششی در سنگ توسعه داده شدند [۲۵].

در این مدل برای تعیین حداکثر نرخ نفوذ ماشین در سنگی با ویژگی‌های مشخص، از یک روش آزمون و خطا استفاده می‌شود که در آن شاخص‌های ماشین (گشتاور، نیروی پیشران و غیره) برای یک مقدار مشخص از نرخ نفوذ در سنگ، تخمین زده می‌شود و آن‌قدر مقدار این نرخ نفوذ در روابط، تغییر داده می‌شود تا ظرفیت توان و نیروی پیشران ماشین، کامل استفاده شود. در این مدل، نیروی کل یا برآیند نیروهای عمودی و غلتشی از رابطه ۷ به‌دست می‌آید [۲۴]:

$$F_t = \frac{T \cdot R \cdot P^0 \cdot \phi}{1 + \psi} \quad (7)$$



شکل ۷: نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل NTNU

V_{max} : محدوده سرعت خطی دیسک کاترها هستند
هم‌چنین η : ضریب راندمان مکانیکی ماشین
 K : ضریب تبدیل گشتاور به اسب بخار یا کیلووات است.
مهم‌ترین محدودیت این مدل، عدم در نظر گرفتن
ویژگی‌های درزه‌داری توده‌سنگ در روابط توسعه‌یافته است.
این محدودیت توسط برخی محققان دیگر نظیر "شیما" [۲۷]،
"یاگیز" [۲۸] و "رمضان‌زاده" [۱۱] نیز مطالعه و تصحیحاتی بر
روی آن اعمال شده است.

محدوده تغییرات شاخص‌های ورودی مدل CSM در
جدول ۳ آورده شده است. این مدل برای محاسبه نرخ نفوذ در
زون شکسته، کاربرد ندارد؛ به‌همین دلیل حداقل مقدار مقاومت
فشاری تک‌محوره ۱۲٫۶ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.
نمودار گردباد آمده از تحلیل حساسیت را در شکل ۸
می‌توان دید. کاهش دو شاخص مقاومت فشاری تک‌محوره و
مقاومت کششی سنگ همراه با افزایش RPM ماشین، باعث
افزایش نرخ نفوذ می‌شود. براساس نمودار گردباد، در این مدل
تغییرات شاخص UCS، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ
دارد.

با مشاهده نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل CSM
(شکل ۹)، می‌توان گفت وقتی تغییرات شاخص‌ها کمتر از ۲۵
درصد است، نمودار مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ دارای
بیشترین شیب و بعد از ۲۵ درصد شیب خط شاخص‌ها کمتر
می‌شود. بعد از ۵۰ درصد تغییرات در مقدار شاخص‌ها، شیب
خط RPM نسبت به دو شاخص دیگر و تاثیر آن بر نرخ نفوذ
افزایش می‌یابد.

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

در این مدل، گام‌های زیر برای پیش‌بینی عملکرد TBM
دنبال می‌شود [۲۶]:
محاسبه نیروی پیشران مورد نیاز

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

محاسبه گشتاور کل

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

محاسبه سرعت دوران کله حفاری

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

محاسبه توان مورد نیاز

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

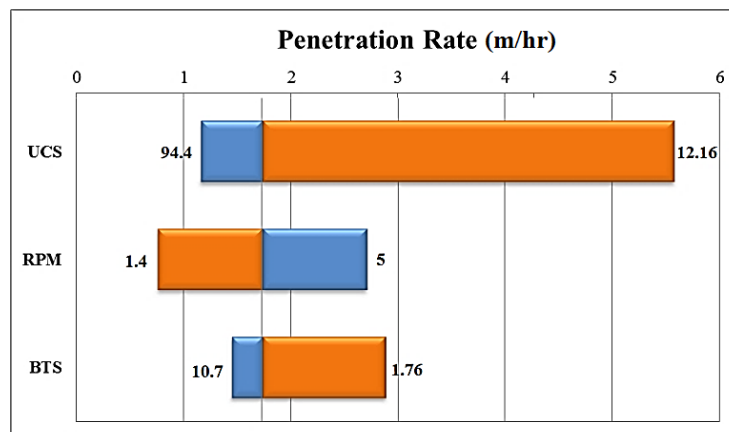
گشتاور و توان نهایی نصب‌شده با مشخص‌بودن راندمان
مکانیکی ماشین (η) به‌دست می‌آید:

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

که در آن:

DTBM: قطر ماشین

NTBM: تعداد دیسک کاترها



شکل ۸: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل CSM

۵-۴- مدل حسن پور و همکاران

"حسن پور و همکاران" در سال ۲۰۱۱ براساس اطلاعات ۱۵۸ مقطع از تونل انتقال آب در ایران و تونل تایلر دوم ماناپوری، با استفاده از روش رگرسیون چندمتغیره، مدلی را برای پیش بینی 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 (FPI) با رابطه ۱۹ قابل محاسبه است [۱۲]:

$$FPI = e^{((0.008 UCS)+(0.015 RQD)+1.384)} \quad (19)$$

که در آن:

FPI: برحسب یکای فشار نرمال هر یک از ابزار برش در نرخ پیشروی دستگاه به ازای یک چرخش کله حفار^۲
 UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بر حسب مگاپاسکال

RQD: شاخص کیفیت سنگ برحسب درصد است.

میزان نرخ نفوذ را نیز می‌توان با رابطه ۲۰ محاسبه کرد:

$$ROP(m/hr) = \frac{0.06 \times F_N \times RPM}{FPI} \quad (20)$$

که در آن:

ROP: نرخ نفوذ بر حسب متر بر ساعت

FN: متوسط نیروی دیسک کاتر بر حسب کیلونیوتن

RPM: سرعت چرخش کله حفاری بر حسب دور بر دقیقه

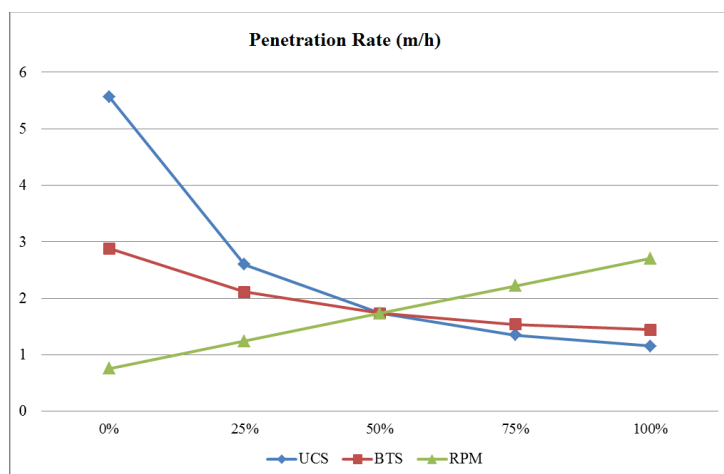
است.

محدوده تغییرات شاخص‌های ورودی مدل حسن پور نیز در شکل ۳ آورده شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. برپایه نمودار گردباد، در این مدل از شاخص‌های توده سنگ تغییرات RQD و از شاخص‌های مربوط به ماشین، تغییرات RPM، بیشترین تاثیر را در تغییرات نرخ نفوذ دارند. کاهش RQD و مقاومت فشاری و افزایش نیروی پیشران و RPM، باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شوند. همچنین، اختلاف بین نمودار گردباد شاخص‌های ورودی بسیار کم است.

علاوه بر آن با توجه به نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل حسن پور و همکاران (شکل ۱۱)، وقتی تغییرات شاخص‌ها کمتر از ۲۵ درصد است، شیب خط آنها نسبت به زمانی که تغییرات بیش از ۲۵ درصد است، بیشتر می‌شود، بدان معنی که در این محدوده، تغییرات شاخص‌ها بیشتر روی تغییرات نرخ نفوذ، تاثیر داشته است.

۵-۵- مدل فرخ و همکاران

"فرخ و همکاران" در سال ۲۰۱۲ برای ارائه مدل جدید پیش‌بینی عملکرد TBM با سطح دقت بیشتر، اطلاعات بیش از ۳۰۰ پروژه تونل‌سازی ثبت‌شده را تجزیه و تحلیل کردند و پایگاه داده جامعی را تشکیل دادند. تحلیل اطلاعات این پایگاه داده، مدلی ساده‌تر را با تاکید بر اندازه‌گیری شاخص‌های اصلی مانند قطر تونل، کیفیت سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، سرعت چرخش کله حفاری و نوع سنگ فراهم کرد. با انجام رگرسیون چندمتغیره، رابطه ۲۱ برای نرخ نفوذ ارائه شده است [۱۳]:



شکل ۹: نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل CSM

RPM: سرعت چرخش کله حفاری برحسب دور بر دقیقه

(۲۱)

است.

$$PR = \frac{Fn^{0.186} \cdot RQDc^{0.133} \cdot RTc^{0.183} \cdot RPM^{0.363} \cdot D^{4.47} \cdot e^{(0.046 \cdot D^2)}}{5.64 \cdot UCS^{0.248} \cdot e^{(1.58 \cdot D)}}$$

محدوده تغییرات شاخص‌های ورودی مدل فرخ را در جدول ۷ و نمودار گردبادی تحلیل حساسیت را در شکل ۱۲ می‌توان دید. در این مدل، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارد. کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره و افزایش شاخص‌های دیگر، باعث افزایش نرخ نفوذ می‌شود. از شاخص‌های مربوط به سنگ، تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره و از شاخص‌های مربوط به ماشین، تغییرات دور دستگاه، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارند.

که در آن:

D: قطر تونل برحسب متر

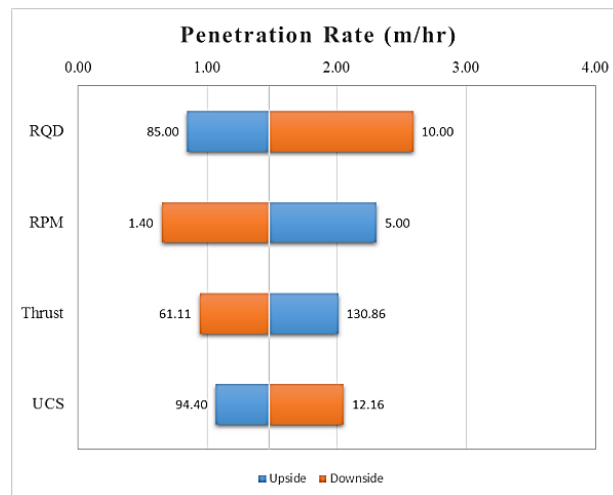
RTc: کد عددی مربوط به نوع سنگ (جدول ۵)

UCS: مقاومت فشاری تک‌محوره برحسب مگاپاسکال

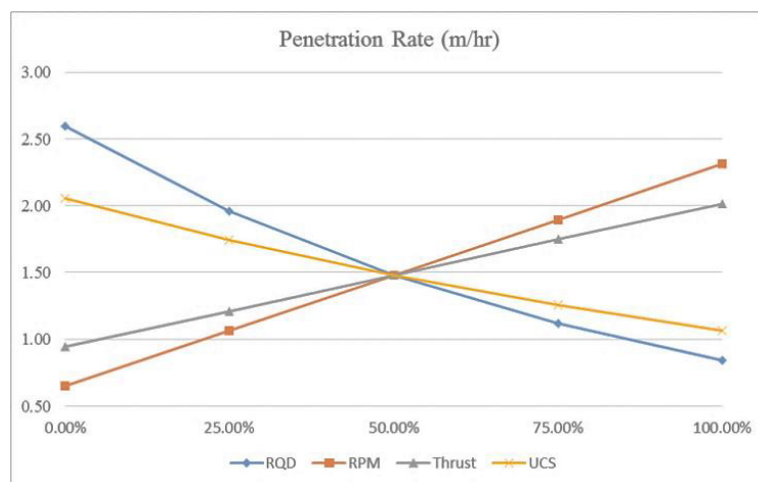
RQDc: کد عددی شاخص کیفیت سنگ یا RQD

(جدول ۶)

Fn: نیروی عمودی دیسک کاتر برحسب کیلونیوتن



شکل ۱۰: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل حسن‌پور و همکاران



شکل ۱۱: نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل حسن‌پور و همکاران

جدول ۷: محدوده تغییرات شاخص‌های ورودی مدل فرخ

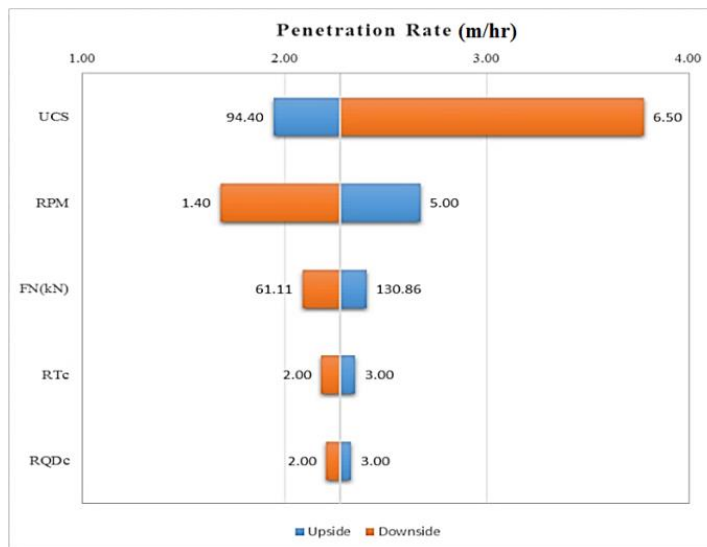
پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین
UCS (MPa)	۶٫۵	۹۴٫۴	۵۰٫۵۴
Thrust (KN/Cutter)	۶۱٫۱۱	۱۳۰٫۸۶	۹۵٫۹۸۵
RQDc	۲	۳	۲٫۵
RPM	۱٫۴	۵	۳٫۲
RTc	۲	۳	۲٫۵

جدول ۵: طبقه‌بندی سنگ در پایگاه داده‌های فرخ و همکاران [۱۳]

نوع سنگ	کد	(RTc)
رس، مادستون، مارن، اسلیت، فیلیت، آرزیلیت	C	۵
ماسه‌سنگ، سیلتستون، کنگلومرا، کوارتزیت	S	۳
لای‌سنگ، گچ، دولومیت، ماربل	L	۳
لاسنگ 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 ۶: طبقه‌بندی RQD در پایگاه داده فرخ و همکاران [۱۳]

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



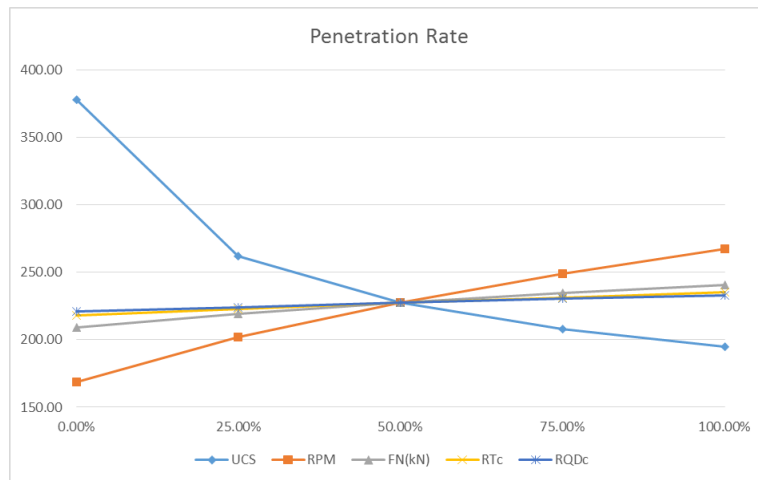
شکل ۱۲: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل فرخ و همکاران

دیگر عوامل از مقدار حداقل تا حداکثر، تقریباً ثابت است.

۶- نتیجه‌گیری

تحلیل حساسیت به منظور ارزیابی تاثیرپذیری شاخص هدف از شاخص‌های ورودی در یک مدل ریاضی انجام می‌شود. در این مطالعه، تحلیل حساسیت بر روی سه مدل اصلی QTBم، NTNU و CSM و دو مدل حسن‌پور و همکاران و

نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل فرخ و همکاران (شکل ۱۳) نشان می‌دهد، وقتی تغییرات شاخص‌ها کمتر از ۲۵ درصد باشد، شیب خط مقاومت فشاری تک‌محوره نسبت به دیگر شاخص‌ها بیشتر بوده و بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ داشته است. بعد از ۲۵ درصد، شیب خط مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش تاثیر تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی تغییرات نرخ نفوذ است. شیب خط



شکل ۱۴: نمودار گردباد تحلیل حساسیت مدل فرخ و همکاران

در حالت کلی از معیارهای توده‌سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوره، RQD و Q و از شاخص‌های ماشین نیروی پیشران و دور دستگاه، بیشترین تاثیر را بر نرخ نفوذ در شرایط پروژه لار-کلان دارند.

۷- مراجع

- [1] Roxborough, F., and Phillips, H. (1975). "Rock excavation by disc cutter". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 12(12): 361-366.
- [2] Sanio, H. P. (1985). "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 22(3): 153-161.
- [3] Sato, K. (1991). "Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting rig". In Proceedings of the First International symposium on Mine Mechanization, Golden, Colorado, 1: pp. 1-31.
- [4] Snowdon, R. A., Ryley, M. D., and Temporal, J. (1982). "A study of disc cutting in selected British rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 19(3): 107-121.
- [5] Boyd, R. J. (1986). "Hard rock continuous mining machine: Mobile Miner MM-120". In Rock Excavation Engineering Seminar, Department of Mining and Metallurgical Engineering, University of Queensland.
- [6] Ozdemir, L. (1977). "Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability". PhD Thesis, Colorado School of mines, Golden, Colorado,

فرخ و همکاران براساس اطلاعات پروژه تونل لار-کلان انجام شد. CSM، NTNU، QTBM و فرخ، مدل‌هایی با پایگاه داده جامع هستند. مدل حسن‌پور نیز جزیی از مدل‌های تجربی بوده و پایگاه داده مدل شامل سه پروژه تونل‌سازی در ایران و یک پروژه در ماناپوری است. نتایج تحلیل حساسیت شامل دو نمودار گردبادی و عنکبوتی بود. در نمودار گردبادی تاثیر پذیری نرخ نفوذ از میزان حداکثر و حداقل شاخص‌های ورودی هر یک از مدل‌ها و در نمودار عنکبوتی تاثیر پذیری نرخ نفوذ از میزان تغییرات شاخص‌های ورودی مدل‌ها بررسی شد.

نتایج به‌دست‌آمده از نمودار گردباد نشان داد که در مدل QTBM، تغییرات شاخص Q و نیروی پیشران، در مدل NTNU تغییرات دو شاخص RPM و نیروی پیشران، در مدل CSM و فرخ، مقاومت فشاری تک‌محوره و در مدل حسن‌پور، تغییرات RQD و RPM، بیشترین تاثیر را بر تغییرات نرخ نفوذ دارند. نمودار عنکبوتی تحلیل حساسیت مدل‌ها نشان داد، وقتی مقدار Q بین ۰٫۲ تا ۰٫۱ قرار دارد، تاثیرپذیری نرخ نفوذ از این شاخص نسبت به دیگر شاخص‌ها بسیار زیاد است. در مدل NTNU، تخلخل بالای سنگ‌های مسیر تونل باعث شد تا مقدار شاخص خردشدگی معادل بیش از حد مجاز (۳٫۵) مدل شود، و زمانی که تغییرات شاخص خردشدگی کل، تخلخل و DRI بیش از ۲۵ درصد است، نرخ نفوذ ثابت محاسبه شود. در مدل CSM و فرخ نیز زمانی که تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره کمتر از ۲۵ درصد است، تاثیر این شاخص بر نرخ نفوذ نسبت به دیگر شاخص‌ها، بیشتر از زمانی است که تغییرات شاخص‌ها بیشتر از ۲۵ درصد است.

- [19] Fatemi, A., Ahmadi, M., and Rostami, J. (2018). "Evaluation of TBM performance prediction models and sensitivity analysis of input parameters". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 77(2): 501-513.
- [20] Ko, T. Y., Son, S. M., and Kim, T. K. (2017). "Comparative study of TBM performance prediction models". Advances In Structural Engineering and Mechanics (ASEM17), IIsan (Seoul), Korea, 17: 1-11.
- [۲۱] فاطمی، س. ا. ا.؛ ۱۳۹۵؛ "پیش‌بینی نرخ نفوذ ماشین حفر تمام مقطع حفر تونل با استفاده از سیستم رده‌بندی توده‌سنگ". رساله دکتری تخصصی، دانشگاه تربیت مدرس.
- [22] Barton, N. (1999). "TBM performance estimation in rock using Q_{TBM} ". Tunnels Tunneling International, 31(9): 30-34.
- [23] Ozdemir, L., Miller, R., and Wang, F. D. (1978). Mechanical tunnel boring prediction and machine design. Final project to NSF APR73-07776-A03, Colorado School of Mines, Golden, Colorado. See also URL <http://ui.adsabs.harvard.edu>.
- [24] Rostami, J., and Ozdemir, L. (1993). "A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs". In Rapid Excavation & Tunneling Conference, 793-809.
- [25] Rostami, J. (1997). "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modelling and physical measurement of crushed zone pressure". PhD thesis, Colorado School of Mines.
- [26] Yagiz, S., Rostami, J., and Ozdemir, L. (2012). "colorado school of mines approach for predicting TBM performance". In ISRM International Symposium, EuROCK 2012, pp. 1-9.
- [27] Cheema, S. N. (1999). "Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines". PhD Thesis, Colorado School of Mine.
- [28] Yagiz, S. (2002). "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". PhD Thesis, Colorado School of Mine.
- pp. 14-87.
- [7] Grima, M., Alvarez, M., Bruines, P. A., and Verhoef, P. (2000). "Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods". Tunnelling and Underground Space Technology, 15(3): 259-269.
- [8] Armaghan, D. J., Mohamad, E. T., Narayansamy, M. S., Narita, N., and Yagiz, S. (2017). "Development of hybrid intelligent models for predicting TBM penetration rate in hard rock condition". Tunnelling and Underground Space Technology, 63: 29-43.
- [9] Mikaeil, R., Naghadehi, M., and Sereshki, F. (2009). "Multifactorial fuzzy approach to the penetrability classification of TBM in hard rock conditions". Tunnelling and Underground Space Technology, 24(5): 500-505.
- [10] Blindheim, O. T. (1979). "Boreability predictions for tunneling". Ph.D Thesis, Department of Geological Engineering, The Norwegian Institute of Technology.
- [11] Ramezanzadeh, A. (2005). "Perforamnce analysis and development of new models for performance prediction of hard rock TBM in rock mass". PhD Thesis, INSA, Lyon.
- [12] Hassanpour, J., Rostami, J., and Zhao, J. (2011). "A new hard rock TBM performance prediction model for project planning". Tunnelling and Underground Space Technology, 26(5): 595-603.
- [13] Farrokh, E., Rostami, J., and Laughton, C. (2012). "Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs". Tunneling and. Underground Spaces Technology, 30: 110-123.
- [14] Palmström, A. (1995). "RMI-Arockmass characterization system for rock engineering purposes". chapter 7, PhD thesis, Oslo University, Norway.
- [15] Barton, N. (2000). "TBM tunnelling in jointed and faulted rock". CRC Press, 1: pp. 39-99.
- [16] Bieniawski, Z. T. (2006). "Rock Mass Excavability (RME) index". In Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress, Seoul, 1: pp. 1118-1130.
- [17] Zoorabadi, M., S., Saydam, S., and Hebblewhite, B. (2013). "Parameter Study on Prediction Methods for TBM Penetration Rate". Geotechnical and Geological Engineering, 31(2):783-791.
- [18] Macias, F. (2016). "Hard rock tunnel boring: performance predictions and cutter life assessments". PhD Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology.

¹ Scanline

² (kN/cutter/mm/rev)



Imam Khomeini International University
Vol. 5, No. 2, Summer 2021, pp. 15-17



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2020.11452.1314

Research Paper

Sensitivity Analysis of Tbm Performance Prediction Models in Lar-Kalan Water Conveyance Tunnel

Sardari M.¹, Zare Sh.^{2*}, Mazraeli M.³

1- M.Sc, Dept. of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

msardari@shahroodut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

zare@shahroodut.ac.ir

3- Ph.D Student, Dept. of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

mazraehli.m@shahroodut.ac.ir

(Received: 27 Aug. 2019, Accepted: 02 Mar. 2020)

Abstract: Evaluation of TBM performance is very important in estimating the cost and time of a tunnel project. Sensitivity analysis of a model is performed to examine the influence of the input variables on the output variables. In this study, results variability of main models of TBM penetration rate (PR) prediction have been investigated based on the geological and field performance data at Lar-Kalan water conveyance tunnel. The overall results indicate that increase of thrust force, CLI, RPM, porosity, and fracturing factor and the decrease of Q value, quartz content, unconfined compressive strength, tensile strength, induced biaxial stress on tunnel face, and RQD increases the PR. Sensitivity analysis has been evaluated on the basis of the two Tornado and Spider charts for different models, and the effect of the input parameters variation on the variation of the PR have been investigated and the parameters that have the greatest influence on the PR were specified. Among the geological conditions, the variation of the Q value, porosity, UCS, RQD and among the machine parameters, variation of the thrust force and RPM have the greatest impact on the variation of the penetration rate in the project.

Keywords: TBM, Sensitivity analysis, Tornado chart, Spider chart.

INTRODUCTION

TBM performance might be evaluated using different prediction models which have their own specific characteristics and have been presented based on different environmental and service parameters [1-5]. Uncertainties due to geomechanical properties of rocks intersecting tunnel trajectory must be considered in design stage. Penetration rate (PR) is one of the most important parameters affected by rock properties variability in mechanized tunneling. This issue necessitates application of sensitivity analysis to capture the



effect of variation in input model parameters on its output.

METHODS

In this paper, sensitivity of different well-established penetration rate models such as NTNU, QTBM and CSM were analyzed using tornado and spider charts. The research procedure might be summarized as follows:

1. According to data of 2nd lot of Lar-Kalan water conveyance tunnel, proper prediction models were considered for sensitivity analysis.
2. Penetration rates were obtained for different geotechnical units of the tunnel using aforementioned methods.
3. Sensitivity of the methods was checked using tornado and spider charts on variation range of their input parameters.

FINDINGS

As it can be seen in Figures 1, 2 and 3, QTBM model is mainly affected by Q number of rock unit while NTNU and CSM models results are mostly governed by cutter head torque (RPM) and uniaxial compressive strength of rock, respectively.

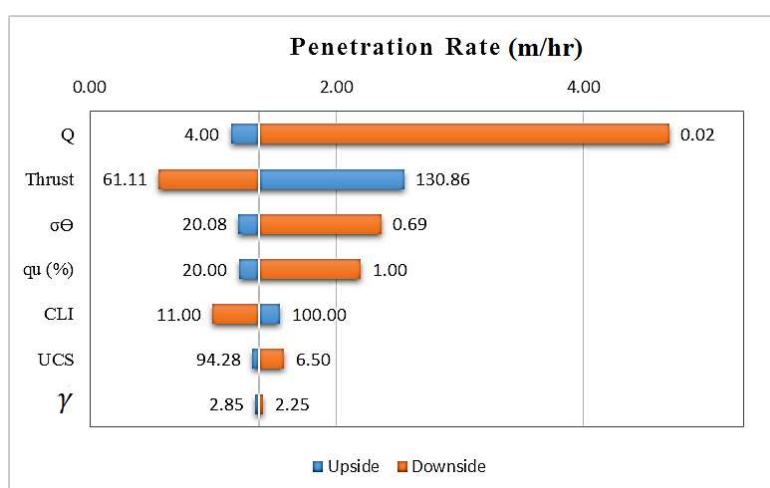


Figure 1. Tornado chart of QTBM model sensitivity analysis

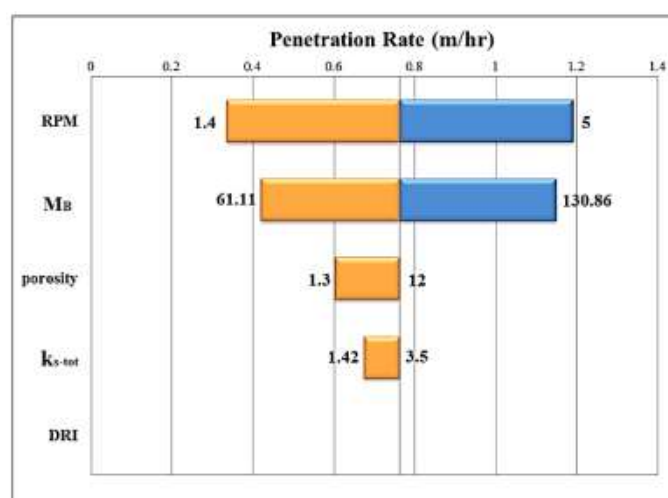


Figure 2. Tornado chart of NTNU model sensitivity analysis

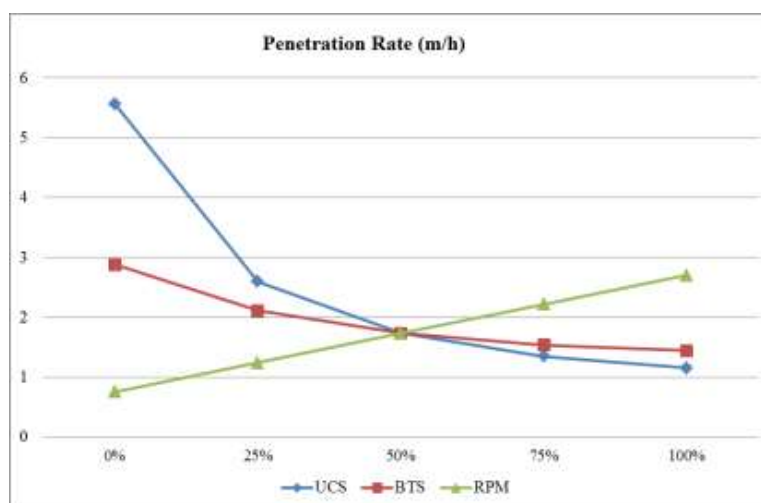


Figure 3. Spider chart of CSM model sensitivity analysis

CONCLUSIONS

The followings are the main remarks which are obtained during the research:

- Average advance rates calculated by QTBM and CSM models were closer to the average value of the actual advance rates.
- Use of sensitivity analysis methods in combination with TBM prediction models helps to evaluate the most influencing parameters on TBM performance.
- QTBM model is mainly affected by Q number of rock unit while NTNU and CSM models results are mostly governed by cutter head torque (RPM) and uniaxial compressive strength of rock, respectively.
- In contrast to QTBM and CSM models, operational parameters have more influences on predictions made by using NTNU model.

REFERENCES

- [1] Roxborough, F., and Phillips H. (1975). "Rock excavation by disc cutter". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 12: 361-366.
- [2] Sanio, H. P. (1985). "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 22(3): 153-161.
- [3] Sato, K. (1991). "Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting rig". In the first International symposium on Mine Mechanization, Golden, Colorado.
- [4] Snowdon, R. A., Ryley, M. D., and Temporal, J. (1982). "A study of disc cutting in selected British rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 19(3): 107-121.
- [5] Ozdemir, L. (1977). "Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability". Colorado School of mines, Golden, Colorado.