

پیش‌بینی نرخ پیشروی TBM با استفاده از رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ

امید فروغ^{۱*}؛ سید رحمان ترابی^۲؛ فرهنگ سرشکی^۳؛ سید محمد اسماعیل جلالی^۴

۱- دکترای تخصصی مهندسی معدن؛ سرپرست بخش تونل مهندسی مشاور هندسه پارس

۲- استاد؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

۳ و ۴- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۱/۰۹/۰۱؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۰۳

واژگان کلیدی	چکیده
حفاری مکانیزه	یکی از مسایل مهم در حفاری مکانیزه، پیش‌بینی نرخ پیشروی (<i>Advance Rate</i>) است. شناخت عوامل
نرخ پیشروی	تاثیرگذار بر بهره‌وری از این نظر حایز اهمیت است که به وسیله آن می‌توان تخمین دقیق‌تری از زمان‌های
ضریب بهره‌وری	توقف و حفاری و در نتیجه هزینه‌های اجرایی به دست آورد. مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی عملکرد <i>TBM</i>
سیستم‌های مهندسی سنگ	توسعه یافته‌اند که بسیاری از آن‌ها تنها مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ بوده است. در این مقاله با استفاده از
تحلیل رگرسیون	رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (<i>RES: Rock Engineering Systems</i>)، تاثیر پارامترهای توده‌سنگ بر
ماتریس اندرکنش	نرخ پیشروی <i>TBM</i> مورد ارزیابی قرار گرفته و مدلی برای پیش‌بینی نرخ پیشروی با استفاده از توام از رویکرد
	سیستم‌های مهندسی سنگ و تحلیل رگرسیون ارائه شده است. برای این منظور تونل‌های انتقال آب کرج،
	قطعه‌ی اول و دوم و تونل انتقال آب قم‌رود، قطعه‌ی سوم و چهارم با مجموع طول ۴۵ کیلومتر، شامل ۲۲ واحد توده‌سنگ گوناگون که با
	استفاده از <i>DS-TBM</i> ، حفاری شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت یک گزاره‌ی درجه‌ی دو بر مبنای اندیس پیشروی حاصل از
	روش سیستمی با استفاده از تحلیل رگرسیون ارائه شده است.

۱- پیشگفتار

تا کنون پژوهشگران بسیاری در زمینه‌ی عملکرد *TBM* مطالعه کرده‌اند. برخی به بررسی نرخ نفوذ اکتفا و گزاره‌هایی را بر اساس پارامترهای *TBM* یا خصوصیات توده‌سنگ ارائه نموده‌اند. به عنوان مثال راکسبورو و فیلیپس (*Roxborough and Phillips*) بر اساس نیروی غلتشی دیسک کاترهای وی‌شکل (*V-Shape*) [1]، اسنودن (*Snowdon*) و همکاران بر اساس نیروی‌های قائم و غلتشی دیسک کاتر [2]، سانئو (*Sanio*) با بررسی تنش کششی مورد نیاز برای تشکیل تراشه [3]، تارکوی (*Tarkoy*) و سپس گراهام (*Graham*) بر اساس مقاومت فشاری تک محوری [4]، اینائورتو (*Innaurato*) و همکاران با بررسی

از آغاز حفاری تونل‌ها به روش مکانیزه، پیش‌بینی نرخ پیشروی یکی از مسایل مهندسی تونل بوده است. این فرآیند، مستلزم تخمین نرخ نفوذ (*Penetration Rate*) و ضریب بهره‌وری (*Utilization factor*) است. نرخ نفوذ نسبت طول حفاری شده به مدت زمان انجام حفاری به صورت پیوسته است. نرخ پیشروی نسبت طول واقعی حفاری شده به کل زمان حفاری، نگهداری و سایر توقفات است. نرخ پیشروی برابر با حاصل ضرب نرخ نفوذ در ضریب بهره‌وری است و یا به عبارتی دیگر، ضریب بهره‌وری نسبت زمان حفاری ماشین به کل زمان عملیات تونلسازی است.

* تهران؛ بزرگراه کردستان جنوب؛ نبش خیابان هفدهم؛ پلاک ۱؛ شرکت مهندسی مشاور هندسه پارس؛ کدپستی: ۱۴۳۸۸-۷۴۶۹۴؛ شماره‌ی تلفن:

۰۲۱-۸۸۳۳۷۴۵۵؛ دورنگار: ۰۲۱-۸۸۳۳۷۴۵۶؛ رایانامه: omid.frough@gmail.com

کشی سنگ بکر، شاخص عمر CLI و درصد کوارتز سنگ و پارامترهای موثر اندرکنش بین سنگ و ماشین در آن در نظر گرفته شده است [17].

۲- رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ

سیستم‌های مهندسی سنگ برای اولین بار توسط هادسون (*Hudson*) در سال ۱۹۹۲ معرفی شده است و از آن زمان به طور گسترده‌ای در حل مسایل مهندسی به کار رفته است. این روش در مطالعات زیست‌محیطی، مدیریت زباله‌ها و پسماندها، طراحی فاضلاب شهری، آلودگی هوا، پایداری شیب و طراحی سازه‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی میزان خطرات زیست‌محیطی، میزان آلودگی رودخانه‌ها و مدیریت زباله‌های هسته‌ای نمونه‌هایی از کاربرد این روش است [18].

این روش در مهندسی سنگ نیز کاربردهای گسترده‌ای داشته است. از آن جمله می‌توان به کاربرد آن در تحلیل پایداری شیب‌ها طراحی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی مانند گزینش محل ساخت نیروگاه زیرزمینی توسط شانگ (*Shang*) و همکاران در سال ۲۰۰۰ [19]، ارزیابی ریسک‌های ژئوتکنیکی در حفر تونل متروی آتن توسط بناردوس و کالیامپاکوس (*Benardos & Kaliampakos*) در سال ۲۰۰۴ [20]، ارزیابی ناپایداری تونل‌ها توسط شین (*Shin*) و همکاران در سال ۲۰۰۹ اشاره نمود [21]. این روش در ارزیابی پایداری شیب نیز توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته که می‌توان به تحقیقات کاکایی و زارع نقدهی در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ اشاره نمود [18] و [22]. فروغ و ترابی در سال ۲۰۱۳ با استفاده از سیستم‌های مهندسی سنگ گزاره‌ای برای تخمین توقفات TBM بر اثر پارامترهای توده‌سنگ ارائه نموده‌اند [23].

در رویکرد سیستمی، ماتریس‌های اندرکنش ابزار قوی هستند که تاثیر متقابل پارامترهای موثر بر یکدیگر را در مقیاسی برابر می‌سنجد. در ماتریس اندرکنش پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر بر حسب آن با کدگذاری، در عناصر غیر قطری ماتریس مشخص می‌شود. در شناسایی پارامترهای بحرانی، مسیرهای تاثیرگذار، حلقه‌های برگشتی و ارزیابی تکنیک‌های انتخابی مهندسی از ماتریس اندرکنش استفاده

عدد طبقه‌بندی ویکهام (RSR) و مقاومت فشاری تک محوره‌ی سنگ بکر [5]، پالمستروم ($Palmstrom$) بر پایه‌ی شاخص توده‌سنگ (RMI) [6] و بینیاوسکی (*Bieniawski*) بر اساس قابلیت حفاری توده‌سنگ ($RME: Rock Mass Excavability$) [7] گزاره‌هایی را برای تخمین نرخ نفوذ پیشنهاد نموده‌اند. یاگیز (*Yagiz*) در سال ۲۰۰۷ با ارزیابی تاثیر خواص توده‌سنگ بر عملکرد TBM ، یک گزاره‌ی تجربی برای تخمین عملکرد TBM ارائه داده است [8]. مدل‌هایی نیز با در نظر گرفتن مقاومت فشاری تک محوره‌ی سنگ بکر و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و اندیس نفوذ میدانی TBM برای پیش‌بینی نرخ نفوذ توسعه داده شده است [9] و [10].

کیم (*Kim*) تاثیر RMR ، RQD و آب زیرزمینی بر ضریب بهره‌وری را با روش فازی مدل‌سازی نموده است [11]. بناردوس (*Benardos*) با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی تاثیر پارامترهایی مانند RMR ، UCS ، RQD و همچنین ضریب پایداری، شرایط آب زیرزمینی و عمق تونل بر نرخ پیشروی TBM را تخمین زده است [12]. فروغ و همکاران نیز با استفاده از روش‌های آماری، مدلی برای تخمین تاثیر شرایط توده‌سنگ با توجه به RMR بر بهره‌وری و توقفات TBM ارائه نموده‌اند [13].

مدل‌های CSM ، $NTNU$ و Q_{TBM} به عنوان مدل‌های اصلی پیش‌بینی عملکرد TBM شناخته شده‌اند. این مدل‌ها مبنای متفاوتی دارند و معمولاً در یک پروژه، هر دو روش در کنار هم به کار می‌روند. مدل CSM یک مدل تئوری-تجربی است که اولین نسخه‌ی آن توسط اوزدمیر (*Ozdemir*) و همکاران در سال ۱۹۷۷ ارائه شده است [14]. این مدل بر مبنای بانک اطلاعاتی حاصل از آزمایش بزرگ مقیاس برش خطی که می‌تواند نیروهای مورد نیاز برای برش سنگ و پارامترهای مربوط به آن را اندازه‌گیری کند، بنا شده است [15]. مدل $NTNU$ پس از شروع حفاری مکانیزه در نروژ با استفاده از اطلاعات جدید به روز شده است. این مدل بر مبنای اطلاعات سیستماتیک ۳۵ پروژه در بیش از ۲۵۰ کیلومتر تونل توسعه یافته است [16]. مدل Q_{TBM} توسط بارتن (*Barton*) به منظور تخمین نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM و بر اساس سیستم طبقه‌بندی توده‌سنگ Q بنا شده است. تاثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، مقاومت فشاری و

تعمیم‌یافته‌ای از روش دوتایی و دارای پنج کلاس کدگذاری از ۰ تا ۴ است (جدول ۱)، [۲۵].

جدول ۱- توصیف رتبه‌های قراردادی در ماتریس اندرکنش به روش EQS [24]

مقدار	پارامتر
۰	عدم وجود اندرکنش
۱	اندرکنش ضعیف
۲	اندرکنش متوسط
۳	اندرکنش قوی
۴	اندرکنش بحرانی

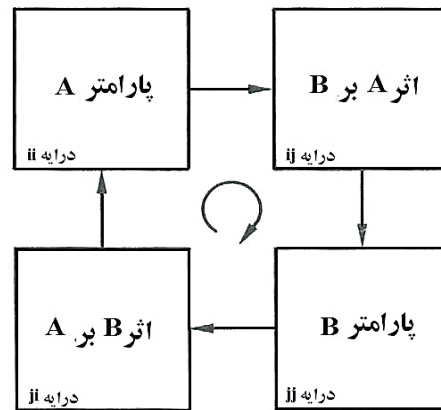
۳- مطالعات موردی

برای بررسی تاثیر شرایط توده‌سنگ بر نرخ پیشروی، سه پروژه‌ی تونل‌سازی مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفته است. داده‌های مورد نیاز از تونل‌های انتقال آب کرج قطعه‌ی ۱ و ۲ و تونل انتقال آب قمرود قطعات ۳ و ۴ با طول کلی ۴۵ کیلومتر، شامل ۲۲ واحد سنگی به دست آمده است.

تونل انتقال آب کرج، قطعه‌ی ۱ با طول ۱۶۰۴۲/۳۰۸ متر و شیب طولی ۰/۰۱۳۷ (۰/۱۳۷ درصد) با استفاده از *DS-TBM* با قطر تمام شده‌ی ۳/۹ متر اجرا شده است. این تونل در سازند البرز قرار دارد. سنگ‌های تشکیل دهنده‌ی منطقه، بیش‌تر از رسوبات آذرآواری شامل توف سبز، توف برشی، توف سیلتی ماسه‌سنگ‌های توفی و توده‌های نفوذی مونزودیوریت و مونزوگابرو، کنگلومرای ریزدانه، بخش‌های سیلت و گدازه و حتی آگلومرای است (شکل ۲)، [۲۶].

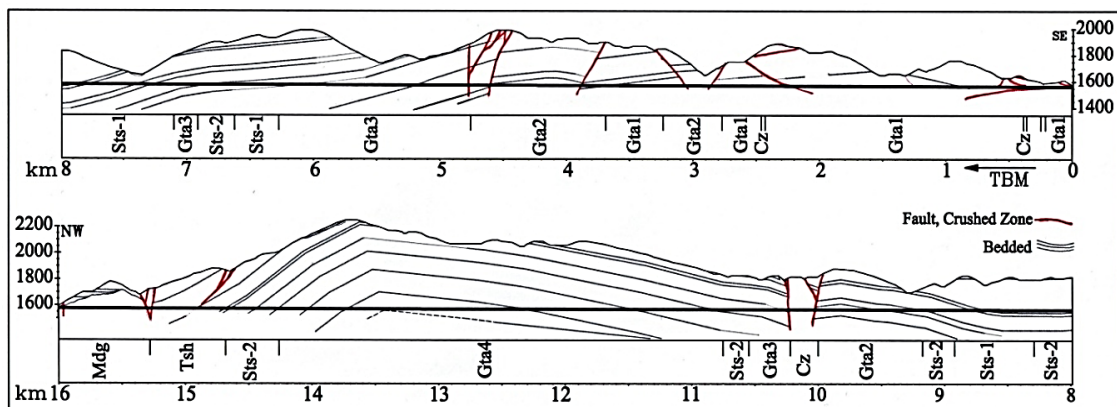
می‌شود [24].

در ماتریس‌های اندرکنش پارامترهای اصلی در قطر اصلی ماتریس قرار داده می‌شوند. شکل ۱ اندرکنش دو پارامتر *A* و *B* را نشان می‌دهد. ماتریس‌های اندرکنش ابزاری قوی برای استفاده در رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ و نمایش مکانیسم‌های تاثیر عوامل اصلی بر یکدیگر هستند.



شکل ۱- ماتریس اندرکنش برای دو پارامتر *A* و *B* [24]

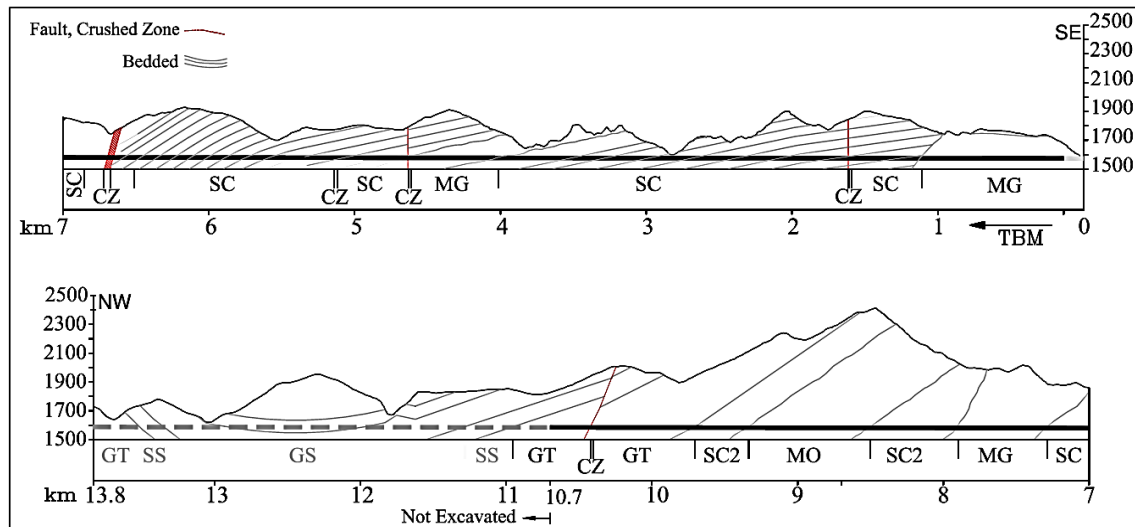
طبق نظر هادسون، پنج روش مختلف برای کدگذاری ماتریس اندرکنش وجود دارد. این روش‌ها شامل روش دوتایی، روش کدگذاری دوم به روش نیمه عددی خبره (*ESQ*)، روش استفاده از شیب نمودار پارامترها، روش تطبیقی از یک رویکرد سیستمی مستقیم و روش صریح است. روش *ESQ* در میان سایر روش‌ها، تا حد زیادی موفق بوده و تاکنون کاربرد گسترده‌ای داشته است. این روش، نوع



شکل ۲- مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب کرج قطعه‌ی ۱ [۲۶]

رسوبی مانند ماسه‌سنگ و سیلت‌استون، واحدهای دارای منشا آذرآواری مانند توف و ماسه‌سنگ توفی هستند. همچنین بخش بزرگی از مسیر از سنگ‌های آذرین شامل مونزودیوریت، مونزوگابرو، میکروگابرو و برش لاوایی آندزیتی تشکیل شده است [۲۷]. در شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی مهندسی مسیر قطعه‌ی دوم تونل کرج نشان داده شده است.

تونل انتقال آب کرج قطعه‌ی ۲ از حوالی روستای کندر با طول ۱۳۴۷۰/۸ متر و شیب طولی ۰/۰۰۱۳۷ با استفاده از همان TBM قطعه‌ی اول بعد از اورهال تا پایین‌دست سد تنظیمی کرج اجرا شده است. داده‌های مورد استفاده از مترآژ ۱۳۵ تا مترآژ ۱۰۶۳۹ به دست آمده است. واحدهای توده‌سنگی تشکیل‌دهنده‌ی مسیر تونل شامل سنگ‌های



شکل ۳- مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب کرج قطعه‌ی ۲ [۲۷]

این پارامترها در کاهش بهره‌وری یا نرخ نفوذ دستگاه حفاری یا هر دو تاثیرگذار هستند. به این ترتیب با در نظر گرفتن پارامترهای موثر، اندرکنش و تاثیر آن‌ها بر یکدیگر نیز در این مدل لحاظ شده است. امتیازدهی به این پارامترها بر اساس جدول ۲ انجام شده است.

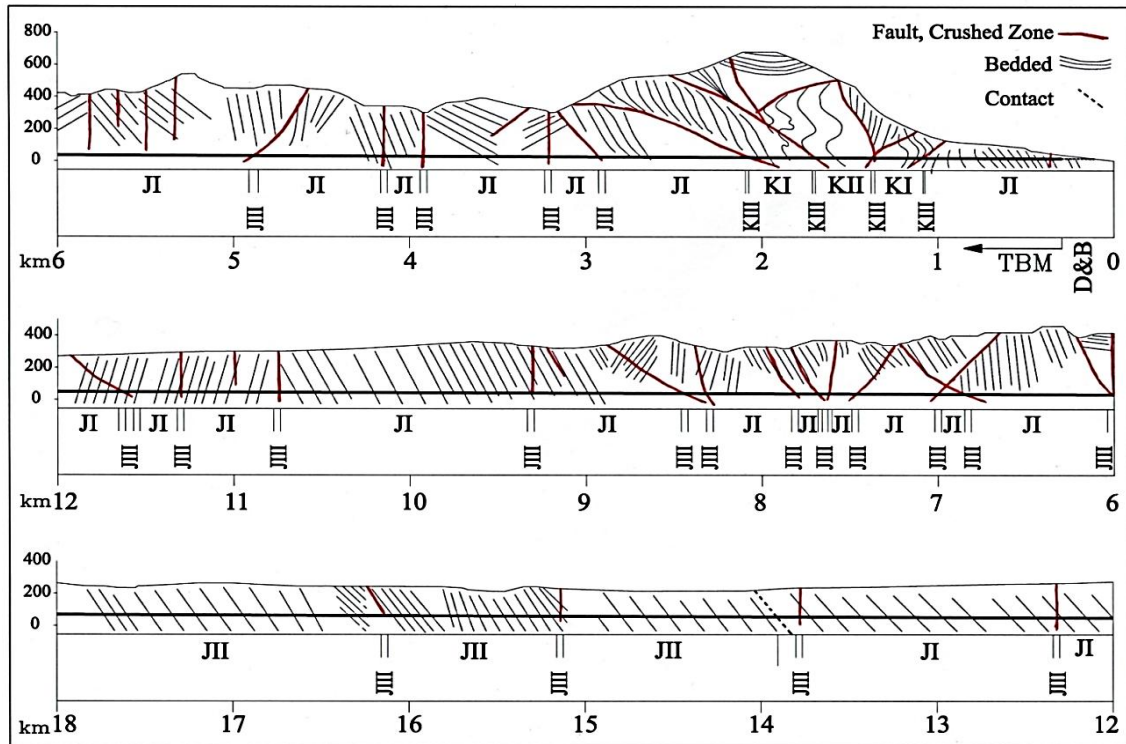
- **ناپایداری احتمالی:** یکی از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر توقفات دستگاه حفاری و کاهش ضریب بهره‌وری است و بر اساس زمان خودپایداری تونل تقسیم‌بندی شده است.
- **فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها:** این پارامتر علاوه بر تاثیر در شرایط پایداری یکی از عوامل مهم گیر افتادن کاترهد است. این پارامتر همچنین بر نرخ نفوذ میز تاثیرگذار است. فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها با توجه به تقسیم‌بندی RME و برحسب تعداد درزه در متر مکعب توده‌سنگ در نظر گرفته شده است.
- **جهت‌داری ناپیوستگی‌ها:** این پارامتر نیز تاثیر زیادی

قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود به طول ۱۸ کیلومتر، بخشی از تونل بلند قمرود با قطر تمام شده‌ی ۳/۸ متر و دبی طراحی ۲۳ متر مکعب بر ثانیه است. توده‌سنگ‌های درونگیر این تونل، شامل ماسه سنگ‌های ریزدانه کوارتزار با درجه‌ی دگرگونی اندک، شیل و اسلیت‌های متورق، شیست‌های گرافیتی، شیست‌های کوارتز کوارتز و میکادار و رگه‌های کوارتزیتی هستند. در انتهای این بخش از تونل آهک‌های متورق و نیمه‌متورق و آهک‌های رسی-ماسه‌ای نازک تا متوسط لایه قرار گرفته‌اند. در شکل ۴ مقطع زمین‌شناسی مهندسی مسیر قطعه‌ی ۳ و ۴ تونل قمرود نشان داده شده است [۲۸] و [۲۹].

۴- برآورد نرخ پیشروی با استفاده از RES

برای ارایه‌ی مدلی برای تخمین نرخ پیشروی با استفاده از RES علاوه بر شرایط کیفی زمین درونگیر تونل، پارامترهای توده‌سنگ نیز در ماتریس اندرکنش در نظر گرفته شده است.

در نرخ نفوذ و ضریب بهره‌وری *TBM* دارد و با توجه به تقسیم‌بندی *RME* در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- مقطع زمین‌شناسی مسیر قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود [۲۸]

جدول ۲- امتیازدهی پارامترهای موثر بر نرخ پیشروی

امتیازدهی					نشانه	پارامتر
۴	۳	۲	۱	صفر		
صفر	۵ >	۱۲ - ۵	۴۸ - ۱۲	>۴۸	P1	ناپایداری احتمالی ^{a*}
>۲۰	۲۰ - ۱۵	۱۵ - ۸	۸ - ۴	صفر - ۴	P2	فاصله‌داری ناپیوستگی ^{b*}
-	-	موازی	مایل	عمود	P3	جهت‌داری ناپیوستگی [*]
-	۳۰ >	۹۰ - ۳۰	۱۸۰ - ۹۰	>۱۸۰	P4	مقاومت فشاری ^{c*}
-	-	جریان	مرطوب	خشک	P5	شرایط آب زیرزمینی [*]
-	-	زیاد	کم	ندارد	P6	وجود رس
-	-	زیاد	متوسط	کم	P7	سایندگی سنگ
-	-	زیاد	کم	ندارد	P8	لهیدگی
-	-	-	دارد	ندارد	P9	سینه کار مختلط
-	-	زیاد	کم	ندارد	P10	تصادف گازهای سمی

* بر اساس طبقه‌بندی *RME*

a: ناپایداری احتمالی بر مبنای زمان خود ایستایی بر حسب ساعت

b: فاصله‌داری ناپیوستگی بر مبنای تعداد درزه در هر متر مکعب

c: مقاومت فشاری سنگ بکر بر حسب مگاپاسکال

انداختن کاتر هد، ممکن است باعث افزایش نرخ فرسایش ابزار حفاری و حتی آسیب دیدن آن شود. این موضوع کاهش نرخ نفوذ را نیز به همراه دارد.

• **تصادف گازهای سمی:** گازهای سمی علاوه بر خطرات جانی، با توجه به استفاده از تجهیزات مانند ماسک و کپسول هوا سبب کاهش بهره‌وری می‌شود. با توجه به نوع گاز در مواردی خردگی و آسیب تجهیزات الکترونیکی، سبب بروز تاخیرات و توقفات ناخواسته می‌شود. کاهش بازدهی تهویه نیز از دیگر اثرات آن است.

با توجه به جدول ۳، برای تشکیل ماتریس اندرکنش علاوه بر ۱۰ پارامتر بیان شده، پارامتر یازدهم یعنی نرخ پیشروی مورد انتظار نیز در قطر اصلی ماتریس گنجانده شده است. ستون اندرکنشی که از درایه‌ی آخر عبور می‌کند، نشان می‌دهد که چگونه توده‌سنگ درونگیر تونل، نرخ پیشروی مورد انتظار را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین شکل سطر عبوری از این درایه، نشان‌دهنده‌ی اثر نرخ پیشروی مورد انتظار بر سیستم است. این کاربرد در واقعیت وجود ندارد؛ زیرا نرخ پیشروی بالقوه است و دلیل صفر شدن تمامی درایه‌های سطر یازدهم نیز همین مسئله است. کدگذاری ماتریس نیز با روش *ESQ* انجام و مجموع تمام کدهای سطر با عنوان علت *C* و مجموع تمام کدهای ستون به عنوان اثر *E* برای هر پارامتر محاسبه شده است.

• **مقاومت فشاری تک محوره‌ی سنگ بکر:** مهم‌ترین پارامتر مقاومتی سنگ است و بر روی سایر عوامل در نظر گرفته شده نظیر پایداری و به خصوص میزان نفوذ دیسک کاتر به سنگ تاثیر دارد. این پارامتر نیز با توجه به تقسیم‌بندی *RME* در نظر گرفته شده است.

• **شرایط آب زیرزمینی:** آب زیرزمینی دلیل اصلی توقفات *TBM* و به طبع آن کاهش بهره‌وری در بسیاری از پروژه‌ها بوده است. تجربه‌ی به دست آمده در پروژه‌های مختلف نشان داده است که جریان آب می‌تواند مشکلات زیادی ایجاد نماید.

• **وجود رس و کانی‌های چسبنده:** وجود رس و کانی‌های چسبنده علاوه بر ایجاد پدیده‌ی کلاگینگ، بارگیری و حمل مصالح حاصل از حفاری را نیز دچار اختلال می‌نماید.

• **سایندگی سنگ:** کانی‌های ساینده مانند کوارتز در توده‌سنگ و همچنین وجود رگه‌های کوارتزی در بین لایه‌ی نرم از عوامل فرسایش و یا خرابی ابزار برشی است و علاوه بر کاهش ضریب بهره‌وری سبب کاهش نرخ نفوذ نیز می‌شود.

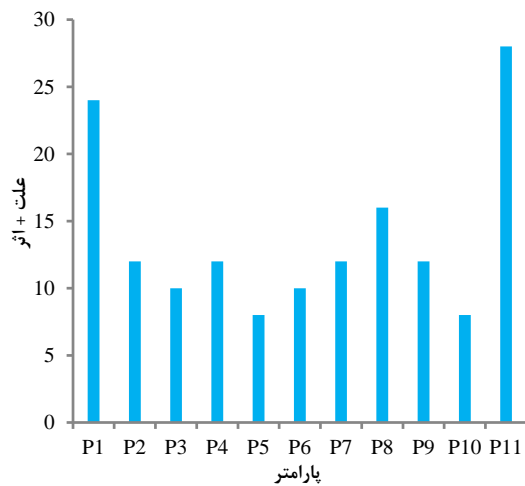
• **لهیدگی:** پدیده‌ی لهیدگی سبب گیر افتادن سپر و کاتر هد شده و ممکن است زمان زیادی صرف آزادسازی آن شود.

• **جبهه‌کار مختلط:** جبهه‌کار مختلط علاوه بر گیر

جدول ۳- ماتریس اندرکنش

$\sum C$	اثر										عنوان	
۴	۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰		<i>P1</i>
۱۱	۳	۲	۰	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	<i>P2</i>	۴
۱۰	۳	۱	۰	۱	۱	۰	۱	۰	<i>P3</i>	۰	۰	۳
۷	۲	۰	۱	۰	۲	۰	۰	<i>P4</i>	۰	۰	۰	۳
۳	۳	۰	۰	۰	۰	۰	<i>P5</i>	۰	۰	۰	۰	۰
۹	۲	۰	۰	۱	۰	<i>P6</i>	۲	۰	۰	۱	۰	۲
۶	۳	۰	۰	۰	<i>P7</i>	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳
۱۲	۳	۲	۰	<i>P8</i>	۱	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۳
۱۱	۲	۰	<i>P9</i>	۰	۲	۱	۱	۳	۰	۰	۰	۲
۳	۳	<i>P10</i>	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰	<i>P11</i>	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲۸	۵	۱	۴	۶	۱	۵	۵	۰	۱	۲۰	$\sum E$

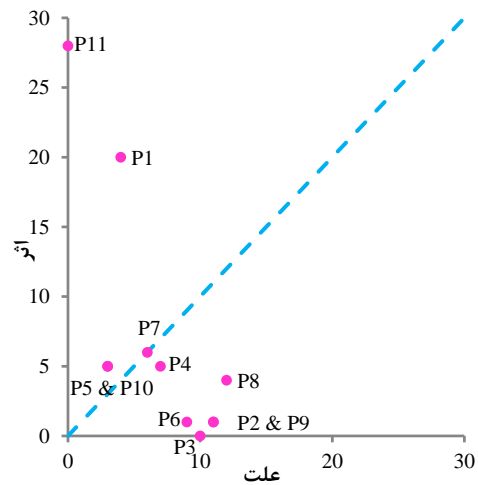
همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، پارامتر ۱۱ (نرخ پیشروی) کاملاً تحت اثر سیستم قرار دارد. از طرف دیگر پارامترهای ۲، ۳، ۶، ۸ و ۹ بیش‌ترین تاثیر را بر سیستم دارند. با محاسبه‌ی مجموع علت و اثر (C+E) برای هر پارامتر می‌توان هیستوگرام شدت اندرکنش را رسم نمود. شکل ۶ نیز نشان می‌دهد ناپایداری بالقوه و لهیدگی بیش‌ترین اندرکنش را در سیستم دارند بطوری‌که تغییری اندک در آن‌ها تاثیر زیادی بر سیستم می‌گذارد. توقفات بلند حفاری در تونل‌های مکانیزه بر اثر این دو عامل نیز نشان‌دهنده‌ی این امر است.



شکل ۶- هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها

زمانی که مجموع مقادیر عددی هر سطر (علت) و مجموع مقادیر هر ستون (اثر) به محورهای مختصات منتقل شوند، نمودار علت-اثر را پدید می‌آورند. در این نمودار پارامترهایی که در بخش پایین-راست نمودار قرار می‌گیرند، بر روی سیستم تسلط دارند و پارامترهای واقع در بالا سمت-چپ تحت اثر سیستم قرار دارند. هیستوگرام شدت اندرکنش‌ها نیز نشان می‌دهد کدام پارامترها بیش‌ترین اندرکنش را در سیستم دارند.

در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نمودار علت-اثر و هیستوگرام شدت اندرکنش پارامترها نشان داده شده است.



شکل ۵- نمودار علت-اثر

گزاره‌های مختلف با تحلیل رگرسیون، ارزیابی و در جدول ۵ آورده شده است. شکل ۷ نیز نمودار این گزاره‌ها را نشان می‌دهد. تنها گزاره‌ی معنادار، گزاره‌ی (۳) است که یک معادله‌ی درجه‌ی ۲ بر اساس اندیس پیشروی است. واحد نرخ پیشروی متر بر روز و R^2 گزاره برابر با ۰/۴۳۸ است.

$$AR = -0.012AR_i^2 + 0.81AR_i + 5.53 \quad (۳)$$

در شکل ۸ نتایج به دست آمده از گزاره‌ی (۳) با مقادیر واقعی نرخ پیشروی مقایسه شده‌اند. در تمامی شکل‌ها، خط برازش شده بسیار نزدیک به خط ۱:۱ است. این موضوع نشان می‌دهد اگر چه گزاره‌ی (۳) به سبب تاثیر پارامترهای دستگاه در نرخ پیشروی که در این مدل لحاظ نشده، از ضریب رگرسیون بالایی برخوردار نیست، نقاط به دست آمده به فواصل متناسبی در دو طرف این خط پراکنده

برای محاسبه‌ی اندیس پیشروی که از این پس ARI_i نامیده می‌شود، برای هر واحد توده‌سنگ، از گزاره‌ی (۱) استفاده می‌شود. بطوری‌که i مربوط به پارامترهای ۱ تا ۱۰ و j واحد توده‌سنگ مورد نظر را نشان می‌دهد. همچنین a_i ضریب وزنی هر کدام از پارامترها است که با استفاده از گزاره‌ی (۲) محاسبه می‌شود [24]. در این گزاره M بیش‌ترین مقدار P_{ij} و P_{ij} امتیاز اختصاص داده شده به هر پارامتر است. جدول ۴ نحوه‌ی محاسبه‌ی ARI_i را نشان می‌دهد.

$$ARI(ij) = \sum_{i=1}^{10} a_i \times P_{ij} \quad (۱)$$

$$a_i = \frac{1}{MP_{ij}} \times \frac{(C+E)}{\sum_i (C+E)} \% \quad (۲)$$

برای بررسی ارتباط بین نرخ و اندیس پیشروی،

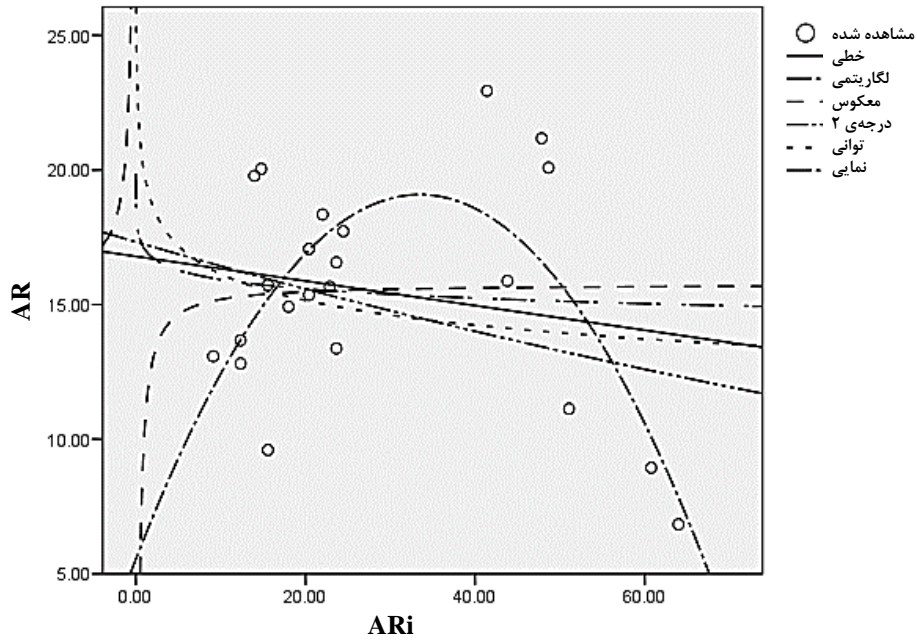
شده‌اند. برای بررسی و تحلیل باقی مانده برای هر متغیر، سه حاصل از این نمودارها، نرمال بودن خطا، میانگین خطا برابر نمودار ترسیم و در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج با صفر و ثابت بودن واریانس خطا را تایید می‌نماید.

جدول ۴- محاسبه‌ی اندیس پیشروی (ARi)

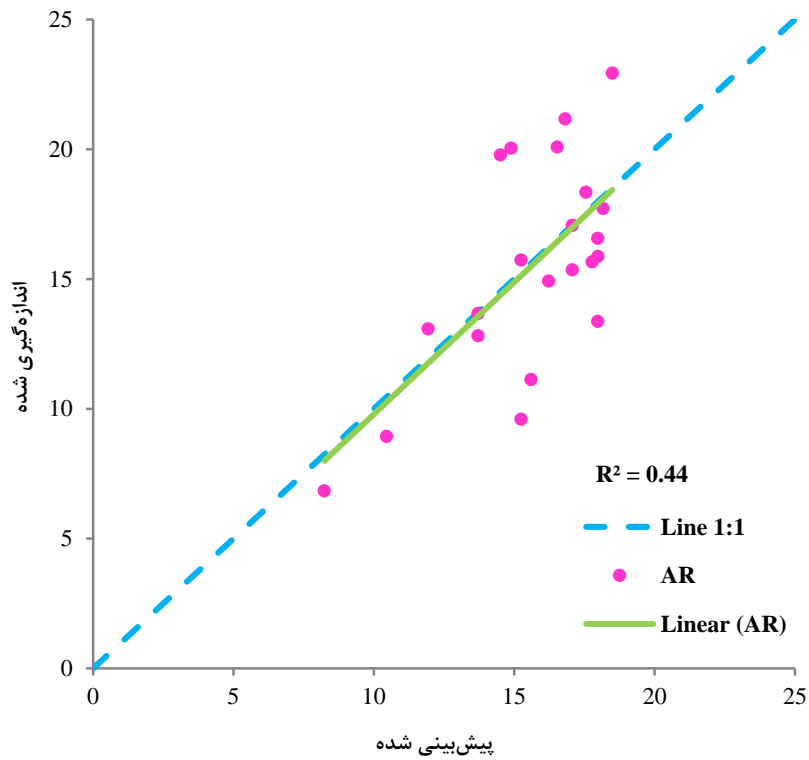
ردیف	واحد	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	ARi
۱	Cz	۴	۴	۱	۳	۰	۱	۱	۰	۲	۰	۶۳,۹۸
۲	Gta-1-1	۲	۳	۱	۲	۰	۱	۰	۰	۲	۰	۴۳,۸۲
۳	Tsh	۰	۲	۱	۲	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۲۳,۶۶
۴	Gta-2	۰	۲	۱	۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۳,۹۸
۵	Gta-1-2	۰	۲	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰	۲۳,۶۶
۶	Sts-1	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۲	۰	۰	۲۴,۴۶
۷	Mdg	۰	۱	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۸,۰۱
۸	Gta-3	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۴,۷۹
۹	Sts-2	۰	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱۵,۵۹
۱۰	Gta-4	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۲,۳۷
۱۱	MG	۰	۰	۱	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۲,۳۷
۱۲	SC	۱	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۰,۴۳
۱۳	SC2	۱	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۰,۴۳
۱۴	MO	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۹,۱۴
۱۵	CZ2	۴	۴	۱	۳	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۴۷,۸۵
۱۶	GT	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۲۲,۰۴
۱۷	K1	۰	۰	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۱۵,۵۹
۱۸	K2	۱	۱	۱	۲	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۲۲,۸۵
۱۹	K3	۴	۴	۱	۲	۰	۰	۰	۲	۰	۰	۵۱,۰۸
۲۰	J1	۱	۳	۱	۲	۱	۱	۲	۱	۰	۰	۴۸,۶۶
۲۱	J2	۱	۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۰	۰	۴۱,۴۰
۲۲	J3	۴	۴	۱	۲	۰	۰	۲	۲	۰	۰	۶۰,۷۵
	Max Pij	۴	۴	۳	۳	۲	۱	۲	۲	۲	۲	-
	$\frac{C + E}{\sum_i C + \sum_i E} \%$	۱۹,۳۵	۹,۶۸	۸,۰۶	۹,۶۸	۶,۴۵	۸,۰۶	۹,۶۸	۱۲,۹۰	۹,۶۸	۶,۴۵	۱۰۰
	ai	۴,۸۴	۲,۴۲	۲,۶۹	۳,۲۳	۳,۲۳	۸,۰۶	۴,۸۴	۶,۴۵	۴,۸۴	۳,۲۳	-

جدول ۵- نتایج تحلیل رگرسیون

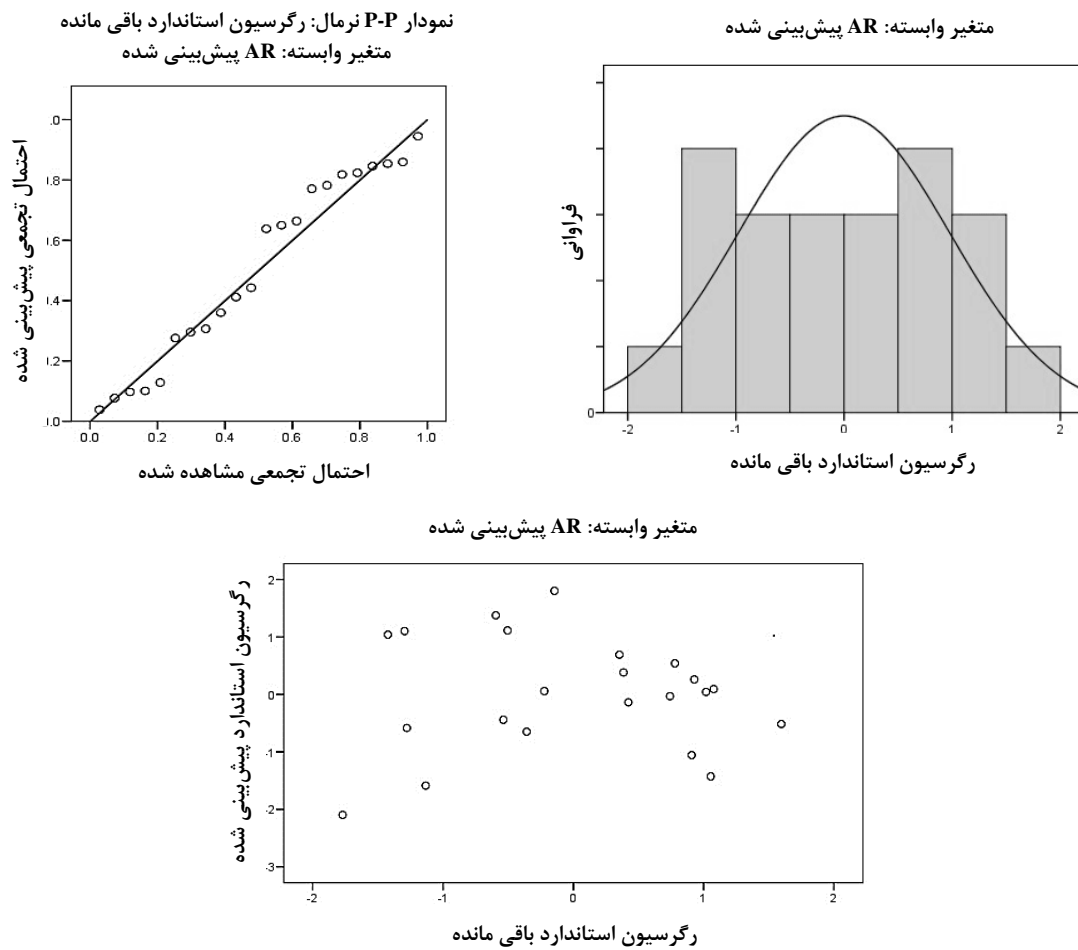
متغیر مستقل	متغیر وابسته	تابع	R ²	F	Sig f.
		خطی	۰,۰۳۵	۰,۷۲۶	۰,۴۰۴
		لگاریتمی	۰,۰۰۵	۰,۰۹۷	۰,۷۵۹
		معکوس	۰,۰۰۱	۰,۰۲۴	۰,۸۷۹
ARi	AR (m/d)	درجه‌ی ۲	۰,۴۳۸	۷,۴۰	۰,۰۰۴
		توانی	۰,۰۳۰	۰,۶۲	۰,۴۴۱
		نمایی	۰,۰۹۰	۱,۹۸	۰,۱۷۵



شکل ۷- نمودارهای گزاره‌های به دست آمده از تحلیل رگرسیون



شکل ۸- مقایسه‌ی نرخ پیشروی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده



شکل ۹- تحلیل باقی مانده‌ها برای رابطه‌ی AR با Ari

۵- نتیجه‌گیری

شرایط نامساعد توده‌سنگ علاوه بر کاهش ضریب بهره‌وری سبب کاهش نرخ نفوذ نیز می‌شود. به این ترتیب، این عوامل می‌توانند کاهش شدید نرخ پیشروی TBM را به همراه داشته باشند. با توجه به نمودار علت-اثر، ناپایداری بالقوه و لهیدگی دارای بیش‌ترین اندرکنش در این سیستم هستند. از طرف دیگر فاصله‌داری و جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و سایندگی نیز بیش‌ترین تاثیر را بر سیستم دارند. البته باید در نظر داشت زمان‌های توقف ماشین شامل زمان تعویض دیسک‌ها، تعمیرات زمان‌بندی شده و موردی، دیوارگیری مجدد، توقف به سبب نصب نگهداری یا مشکلات ترابری، قطع برق و تعویض شیفت نیز تاثیر زیادی در کاهش نرخ پیشروی دارند. در این پژوهش برای به دست آوردن گزاره‌ای بین پارامترهای توده‌سنگ و نرخ پیشروی از رویکرد

سیستم‌های مهندسی سنگ استفاده و اندیس پیشروی محاسبه شده است. برای بررسی رابطه‌ی بین نرخ و اندیس پیشروی، گزاره‌های مختلف با تحلیل رگرسیون بررسی شده است. بهترین نتیجه مربوط به یک گزاره‌ی درجه‌ی ۲ است ($R^2=0.44$). این گزاره نشان می‌دهد برای تخمین دقیق‌تر لازم است پارامترهای دستگاه حفاری نیز در نظر گرفته شوند. این امر مستلزم مطالعات بیش‌تری است به طوری که بتوان تاثیر آن‌ها را در ماتریس اندرکنش لحاظ نمود.

۶- سپاس‌گزاری

از موسسه‌ی مهندسی مشاور ساحل به سبب همکاری و مساعدت‌های بی‌دریغ و راهنمایی‌های جناب آقای دکتر مسعود زارع نقدهی در تهیه و آماده‌سازی این مقاله تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
C	-	علت	E	-	اثر
AR	m/d	نرخ پیشروی	ARi	-	اندیس پیشروی
a	-	ضریب وزنی	P	-	امتیاز هر پارامتر
M	-	بیش‌ترین مقدار P	F	-	عدد فیشر (Fisher)

۸- منابع‌ها

- [1] Roxborough, F. F., & Phillips, H. R. (1975). Rock Excavation by Disc Cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(12), 361-366. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90547-1](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(75)90547-1).
- [2] Snowdon, A. R., Ryley M. D., Temporal, J. (1982). Study of Disc Cutting in Selected British Rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 19(3), 107-121. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(82\)91151-2](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(82)91151-2).
- [3] Sanio, H. (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. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(85\)93229-2](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(85)93229-2).
- [4] Tarkoy, P. J. (1974). Prediction TBM Penetration Rate in Selected Rock Types. *Proceeding of the Ninth Canadian Rock Mechanics symposium* (pp. 257-269). Montreal: Mines Branch, Department of Energy, Mines and Resources.
- [5] Innaurato, N., Mancini, A., Rondena, E., & Zaninetti, A. (1991). Forecasting and Effective TBM Performances in a Rapid Excavation of a Tunnel In Italy. *7th ISRM Congress* (pp. 1009-1014). Aachen: International Society for Rock Mechanics.
- [6] Palmstrom, A. (1995). Rmi Parameters Applied in Prediction of Tunnel Boring Penetration. *A Rock Mass Characterization for Rock Engineering*. Oslo: Doctoral Thesis, Oslo University. <http://www.rockmass.net/phd/chapter7.pdf>.
- [7] Bieniawski, Z. T., Celada, B., & Galera, J. M. (2007). TBM Excavability: Prediction and Machine-Rock Interaction. In M. T. Traylor, & J. W. Townsend (Eds.), *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings* (pp. 1118-1130). Toronto: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc. ISBN: 9780873352567.
- [8] Yagiz, S. (2008). Utilizing Rock Mass Properties for Predicting TBM Performance in Hard Rock Condition. *Tunneling and Underground Space Technology*, 23(3), 326-339. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.011>.
- [9] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A., & Tavakoli, H. R. (2010). TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(4), 427-445. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-009-0060-2>.
- [10] Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., & Rostami, J. (2010). Performance Prediction of Hard Rock TBM Using Rock Mass Rating (RMR) System. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 333-345. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.01.008>.
- [11] Kim, T., (2004). *Development of a Fuzzy Logic Based Utilization Predictor Model for Hard Rock Tunnel Boring Machines*. Golden: Doctoral Thesis, Colorado School of Mines.

- [12] Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2004). Modelling TBM Performance with Artificial Neural Networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19(6), 597-605. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2004.02.128>.
- [13] Frough, O., Torabi, S. R., Yagiz, S., & Tajik, M. (2012). Effect of Rockmass Conditions on TBM Utilization Factor in Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel. *ITA-AITES World Tunnel Congress 2012: Tunneling and Underground Space for a Global Society & 38th ITA-AITES General Assembly*. Bangkok: Thailand Underground and Tunnelling Group.
- [14] Ozdemir, L. (1977). *Development of Theoretical Equations for Predicting Tunnel Borability*. Golden: Doctoral Thesis, Colorado School of Mines.
- [15] Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993). A New Model for Performance Prediction of Hard Rock TBMs. *Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings* (pp. 793-809). Boston: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc. ISBN: 0873351274.
- [16] Bruland, A. (1998). Advance Rate and Cutter Wear. *Hard Rock Tunnel Boring Machine*. Trondheim: Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology. <http://tunnel.no/article.php?id=199>.
- [17] Barton, N. R. (2000). *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. Rotterdam: A A Balkema. ISBN:9058093417.
- [18] KhaloKakaie, R., & Zare Naghadehi, M. (2012). The Assessment of Rock Slope Instability Along The Khosh-Yeylagh Main Road (Iran) Using A Systems Approach. *Environment Earth Science*, 67(3), 665-682. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1510-1>.
- [19] Shang, Y. J., Wang, S. J., Li, G. C., & Yang, Z. F. (2000). Retrospective Case Example Using A Comprehensive Suitability Index (CSI) for Siting The Shisan-Ling Power Station. China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(5), 839-853. [http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609\(00\)00021-6](http://dx.doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00021-6).
- [20] Benardos, A. G., & Kaliampakos, D. C. (2004). A Methodology for Assessing Geotechnical Hazards for TBM Tunneling-Illustrated by The Athens Metro, Greece. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6), pp 987-999. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.007>.
- [21] Shin, H. S., Kwon, Y. C., Jung, Y. S., Bae, G. J., & Kim, Y. G. (2009). Methodology for Quantitative Hazard Assessment for Tunnel Collapses Based on Case Histories in Korea. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(6), 1072-1087. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.02.009>.
- [22] Zare Naghadehi, M., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. M. E., (2011). A Probabilistic Systems Methodology to Analyze The Importance of Factors Affecting The Stability of Rock Slopes. *Engineering Geology*, 118(3-4), 82-92. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.003>.
- [23] Frough, O., & Torabi, S. R. (2013). An Application of Rock Engineering Systems for Estimating TBM Downtimes. *Engineering Geology*, 157, 112-123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.02.003>.
- [24] Hudson, J. A. (1992). *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. Chichester: Ellis Horwood Ltd., ISBN: 0137826249.

[۲۵] زارع نقدهی، م. (۱۳۹۱). بهبود رویکرد سیستم‌های مهندسی سنگ (RES) به منظور ارزیابی پتانسیل ناپایداری شیب‌های سنگی معادن روباز. رساله‌ی دکتری، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۲۶] موسسه‌ی مهندسیین مشاور ساحل. (۱۳۸۳). گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل. پروژه‌ی تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه‌ی شماره‌ی ۶ تهران - قطعه‌ی ET-K.

[۲۷] موسسه‌ی مهندسیین مشاور ساحل. (۱۳۸۸). گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل. پروژه‌ی تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به

تصفیه‌خانه‌ی شماره‌ی ۶ تهران - قطعه‌ی K`-BR.

[۲۸] موسسه‌ی مهندسیین مشاور ساحل. (۱۳۸۱). گزارش زمین‌شناسی مهندسی تونل انتقال آب قمرود، قطعات سوم و چهارم. پروژه‌ی انتقال آب از سرشاخه‌های دز به قمرود.

[۲۹] فروغ، ا.، باسلیقه، ف.، و آراسته، م. (۱۳۸۴). بازنگری طراحی پوشش بتنی ۳۷۶ متر تونل ابتدایی قطعات سوم و چهارم تونل انتقال آب قمرود. دومین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران. تهران: دانشگاه علم و صنعت ایران. http://www.civilica.com/Paper-NCCE02-NCCE02_1015.html

Prediction of TBM Advance Rate Using Rock Engineering Systems

O. Frough¹; S. R. Torabi²; F. Sereshki³; S. E. Jalali⁴

1- Ph.D. in Mining Engineering; Head of Tunneling Discipline; Pars Geometry Consultants

2- Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

3 & 4- Associate Professor; Faculty of Mining Eng., Petroleum, and Geophysics; University of Shahrood

Received: 21 Nov 2012; Accepted: 25 Aug 2013

Keywords

Mechanized tunneling
Advance rate
Utilization factor
Rock Engineering Systems (RES)
Regression analysis
Interaction matrix

Extended Abstract

Prediction of TBM performance is a crucial issue in mechanized tunneling projects, since machine performance has an influence on duration and costs of the projects. Rock mass parameters have significant effects on TBM advance rate as well as influence of these parameters on each other. In order to model the effect of geological conditions on TBM downtimes using Rock Engineering Systems (RES), a thorough database based

on three long water conveyance tunnels in Iran has been developed. Advance Rate index (ARi) has been calculated using Rock Engineering Systems method and the predicting relationship between the ARi and advance rate has also been obtained using regression analysis in quadratic equation form.

Introduction

RES is a valuable analytical tool for characterizing the important parameters and the interaction mechanisms in rock engineering problems. Application of RES for calculating TBM advance rate based on predominant rock mass properties is the main objective of this research.

Methodology and Approaches

Different rock mass parameters affect advance rate of TBM. In addition, These parameters influence each other. The interaction of rock mass parameters has been modeled using the RES approach in order to estimate AR. To achieve this purpose, 22 main rock mass units (total length of 45 km of bored tunnels) of three long water conveyance tunnels bored by DS-TBMs have been studied. Each rock mass unit should be rated to calculate the ARi by the RES method. In order to develop the most reliable and accurate empirical equations, linear and non-linear regression analysis have been performed and relationships between ARi and measured AR have been examined. The maximum coefficient of determination has been obtained in quadratic equation.

Results and Conclusions

Findings of this research have showed that interaction matrix methodology could be used to analyze the interactivity of numerous parameters, which have considerable role on AR. ARi has been calculated by the RES method for all rock mass units. The relationship between the ARi and measured AR has been examined using regression analysis. The maximum coefficient of determination equal to 0.44 has been obtained in quadratic equation method.