

تأثیر تراشه شدن سنگ بر نرخ نفوذ ماشین حفاری تونل

سید سجادراری^۱؛ مجتبی حیدری^{۱*}؛ ابراهیم شریفی تشنیزی^۲

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹؛ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

(* نویسنده مسئول: heidarim-enggeol@yahoo.com)

چکیده

پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه حفاری تونل (TBM) به کمک ویژگی‌های زمین شناسی سنگ‌های مسیر تونل باعث توسعه مدل‌های تجربی نرخ نفوذ شده است. در این پژوهش ارتباط بین فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن سنگ‌ها شامل: کانی شناسی، اندازه دانه، فابریک دانه با نرخ نفوذ و سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این هدف از داده‌های واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب گلاس در نزدیکی شهرستان نقده استفاده شده است. ارزیابی فاکتورهای تراشه شدن سنگ‌ها با روش‌های آماری رگرسیون ساده، رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی انجام شده است. بهترین رابطه رگرسیونی چندگانه غیرخطی بین نرخ نفوذ با تراشه شدن (CP₁) و شاخص کیفیت توده‌سنگ (RQD)، با ضریب تعیین ۰/۸۱۶ و درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) برابر با ۸/۸۲۱ برقرار است. براساس حد و مرزهای ژئوتکنیکی پیشنهاد شده، بیشترین نرخ نفوذ (بیش از ۸ میلی متر بر دور) در فاکتور تراشه شدن کمتر از ۱۵۰۰ و کمترین نرخ نفوذ (کمتر از ۳ میلی‌متر بر دور) در فاکتور تراشه شدن بیشتر از ۴۰۰۰ رخ داده است. نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر نرخ نفوذ TBM و کاهش هزینه و زمان حفاری کمک کند.

ماشین حفاری تونل، تراشه شدن سنگ، کانی شناسی، اندازه دانه، فابریک دانه

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

استفاده شده است. برای بررسی ارتباط ویژگی‌های زمین شناسی با نرخ نفوذ TBM بررسی مکانیسم خرد شدن سنگ‌ها در زیر دیسک‌های برشی ضروری است. تحقیقات زیادی در مورد مکانیسم خرد شدن سنگ‌های سخت در زیر دیسک برشی انجام شده است [۷-۱]. همه نویسندگان بر روی این مسئله توافق دارند که خرد شدن سنگ در دو مرحله رخ می‌دهد. در مرحله اول زون خردشده در زیر دیسک برشی تشکیل می‌شود، سپس تراشه بین دو دیسک برشی مجاور ایجاد می‌شود. نیرویی

پیش‌بینی نرخ نفوذ دستگاه حفاری تونل به کمک ویژگی‌های زمین شناسی سنگ‌های مسیر تونل باعث توسعه مدل‌های تجربی نرخ نفوذ شده است. در این مدل‌ها اغلب از ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی از قبیل: پارامترهای مقاومتی و سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ استفاده شده است. در حالیکه در این پژوهش علاوه بر این ویژگی‌ها از فاکتورهای زمین شناسی سنگ‌ها مانند کانی‌شناسی، اندازه دانه و فابریک دانه

کششی سنگ کنترل می‌شود. از این رو در اکثر مدل‌های نرخ نفوذ، پارامترهای ورودی اصلی شامل مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ است. لازم به ذکر است که پارامتر مقاومت فشاری تک محوری نسبت به مقاومت کششی در مدل‌های پیش بینی نرخ نفوذ موثرتر است [۱۴]. ژونگ^۲ و همکاران بیان کردند که بین نیروی نرمال دیسک‌های برشی با مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و شاخص شکنندگی همبستگی خوبی وجود دارد. همچنین شکنندگی عامل موثری بر تراشه شدن سنگ‌ها در حفاری مکانیزه است. زیرا از طریق انتشار ترک به سمت مسیر حرکت دیسک‌های مجاور باعث تراشه شدن سنگ‌ها می‌شود. خرد شدن و تشکیل تراشه‌های سنگی متأثر از فاکتورهای زمین شناسی شامل کانی شناسی، اندازه دانه، بافت و مقاومت این سنگ‌ها است. ایجاد تراشه بیشترین اثر را در نرخ نفوذ دارد. زیرا هر چه ابعاد این تراشه‌ها بزرگتر (مکعب شکل) باشد، نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. بنابراین ایجاد تراشه برای نرخ نفوذ بهینه دستگاه حفاری تونل حیاتی است [۱۴]. اخیراً پورهاشمی^۴ و همکاران [۱۵] براساس یک پژوهش تجربی پیشنهاد کردند زمانیکه نرخ نفوذ کمتر از ۳ میلی‌متر بر دور کاهش یابد، شرایط خرد شدن و زمانیکه نرخ نفوذ بیش از ۳ میلی‌متر بر دور افزایش یابد، فرایند تراشه شدن رخ خواهد داد. مقدار نیروی نرمال مورد نیاز برای حفاری توده سنگ‌ها در شرایط تراشه‌شدن برای سنگ‌های با مقاومت فشاری تک محوری متوسط، بالا و بسیار بالا به ترتیب برابر با ۱۳۰، ۲۱۰ و ۲۲۵ کیلو نیوتن است. همچنین مرز بین تراشه شدن و خرد شدن برای سنگ‌های با مقاومت متوسط RQD برابر با ۷۵ درصد است [۱۶].

هدف از این پژوهش بررسی ارتباط بین فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن و خرد شدن سنگ‌های مسیر تونل گلاس با نرخ نفوذ TBM با استفاده از ویژگی‌های کانی شناسی، اندازه دانه‌ها و فابریک دانه‌ها است. همچنین حد و مرزهای ژئوتکنیکی جدید به کمک یافته‌های حاصل از این پژوهش

که توسط دیسک برشی به سنگ اعمال می‌شود باعث ایجاد فرورفتگی در سطح سنگ شده و ناحیه خرد شده در زیر دیسک برشی ایجاد می‌شود. نفوذ دیسک در سنگ زمانی رخ می‌دهد که نیروی اعمال شده توسط دیسک از مقاومت فشاری تک محوری سنگ بیشتر باشد [۱]. حفاری توسط دیسک برشی یک فرآیند پیوسته نیست، زیرا سطح سنگ نامنظم بوده و منجر به تغییر زیاد تنش در طول فرآیند حفاری می‌شود. فرو رفتگی در توده سنگ تحت پیک‌های تنش ناگهانی رخ می‌دهد. در این پیک‌ها نوک دیسک برشی تحت تنش‌های تماسی بسیار زیاد قرار می‌گیرد که باعث خرد شدن سنگ و تشکیل ناحیه‌ای با عنوان زون فشار زیاد و با خاصیت پلاستیک می‌شود [۳]. پودر سنگ ایجاد شده به طرفین جابه‌جا شده و زمانیکه سطح فشار از مقاومت برشی یا کششی سنگ بیشتر شود، ترک‌های جدید رشد می‌کنند [۸]. گانگ^۱ و همکاران [۹] اثبات کردند که علاوه بر ایجاد یک ترک مخروطی، ترک‌های شعاعی ناشی از دو دیسک برشی مجاور همدیگر را قطع کرده و تراشه تشکیل می‌شود. در مورد تشکیل تراشه دو نظریه وجود دارد. این نظریه‌ها بیان می‌کنند که تشکیل تراشه ناشی از نیروهای کششی، برشی یا هر دو آن‌ها است. امروزه محققان رویکرد نیروهای کششی را ترجیح می‌دهند؛ زیرا تنش ایجاد شده ناشی از دیسک برشی بسیار شبیه به تنش‌های کششی است [۷ و ۱۲-۱۰]. با توجه به ویژگی‌های ژئوتکنیکی سنگ و نیروی رانش اعمال شده، دیسک‌های برشی باید دو یا سه بار از همان موقعیت در جبهه کار تونل عبور کنند تا یک تراشه سنگی ایجاد شود [۱۳]. گرتش^۲ بیان کرد که نیروی رانش غلتشی باعث تشکیل زون خرد شده در زیر دیسک برشی و نیروی رانش نرمال باعث تشکیل تراشه می‌شود. بنابراین می‌توان گفت تشکیل یک ناحیه خرد شده عمدتاً توسط مقاومت فشاری تک محوری و تشکیل تراشه‌ها توسط مقاومت

³ Jeong⁴ Pourhashemi¹ Gong² Gertsch

بین تراشه شدن سنگ‌ها با پارامترهای دستگاه حفاری ارائه شده است.

۲- تراشه شدن سنگ در مدل ویلنو

در مدل ارائه شده توسط ویلنو^۵ [۱۴] در سال ۲۰۰۸ سه فاکتور کانی شناسی، اندازه دانه و فابریک (بافت) دانه باعث تشکیل تراشه می‌شوند. حد آستانه‌ای این فاکتورها از ۰/۷ تا ۲ متغیر است و عدد ۱ در این فاکتورها نشان دهنده اثر خنثی بر روی تراشه شدن است. فاکتور حساسیت تراشه شدن^۶ (FSSA) حاصل ضرب این سه فاکتور است. از طرفی نمی‌توان تاثیر مقاومت سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و بارنقطه‌ای را نادیده گرفت. در واقع از پارامترهای مقاومتی برای بهبود پیش بینی فرآیند تراشه شدن سنگ استفاده می‌شود. برای تخمین تراشه شدن سنگ هر کدام از این پارامترها به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۱- فاکتور کانی شناسی

این فاکتور شامل کانی‌های اصلی^۷ (F_{MM}) و کانی‌های فرعی^۸ (F_{MA}) است. کانی‌های اصلی شامل کوارتز، فلدسپات، پلاژیوکلاز، الیون، پیروکسن و آمفیبول است. کانی‌های فرعی شامل بیوتیت، مسکویت، کلریت، پیریت، گارنت و مگنتیت است [۱۴]. کانی‌های اصلی به عنوان کانی‌های پذیرنده ترک شناخته می‌شوند. کانی فلدسپات به دلیل داشتن کلیواژ و آنیزوتروپی در این دسته از کانی‌ها قرار می‌گیرد. سنگ‌های با محتوای کوارتز بین ۲۰ تا ۶۰ درصد به واسطه آشفته‌گی تنش زیاد و حضور کانی‌های فلدسپات آنیزوتروپ دچار شکست ناگهانی و رفتار شکننده می‌شوند. با توجه به اینکه نسبت کوارتز به فلدسپات (Qtz/Alk+Plg) در تراشه شدن سنگ اثر مستقیم دارد، این نسبت به عنوان محور افقی جدول ۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۷]. کانی‌های فرعی به عنوان کانی‌های شروع کننده ترک در سنگ می‌باشند. اما درصد معینی از این کانی‌ها بر روی شروع ترک موثرند. سنگ‌های با کمتر از ۲۱ درصد میکا رفتار شکننده داشته درحالی که با افزایش میکای

این سنگ‌ها بیش از ۲۸ درصد رفتار انعطاف پذیر خواهند داشت [۱۸]. در کانی‌های میکایی آنیزوتروپی به ترتیب از مسکویت به بیوتیت و کلریت افزایش می‌یابد، در حالیکه سختی آن‌ها کاهش می‌یابد. درصد کانی‌های میکایی به عنوان محور قائم جدول ۱ در نظر گرفته شده است. با بدست آوردن مقادیر محور افقی و قائم مقدار فاکتور کانی شناسی^۹ (F_M) بدست می‌آید. روش محاسبه این فاکتور در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- روش محاسبه فاکتور کانی شناسی [۱۴].

F_M	F_{MM}	<1	<10	>10
F_{MA}		Qtz/F	$1 <$	Qtz/F
$M > 12\%$		۰/۷	۰/۸۵	۱
$6\% < M < 12\%$		۱	۱/۱۵	۱/۳
$2\% < M < 6\%$		۰/۸۵	۱	۱/۱۵

۲-۲- فاکتور اندازه دانه

این فاکتور شامل اندازه دانه‌ها^{۱۰} (F_{GS}) و توزیع دانه‌ها^{۱۱} (F_{GD}) است. اندازه دانه در همه سنگها تاثیر بسزایی در مقاومت آن سنگها خواهد داشت. در حالت کلی با افزایش اندازه دانه‌ها، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد زیرا میکروساختارهای موجود در دانه‌های بزرگتر بیشتر بوده و نسبت به تنش‌های کششی حساسیت بیشتری نشان داده و شکستگی در دانه‌ها رخ می‌دهد. چندین روش زمین شناسی برای طبقه بندی اندازه دانه وجود دارد. یکی از این روشها توجه به جنبه‌های مهمی مانند تعیین منشا و تاریخچه سنگ است. بعضی از روش‌های مورد استفاده توسط زمین‌شناسان را می‌توان با در نظر گرفتن اینکه چگونه تغییرات در اندازه و توزیع دانه‌ها بر رفتار شکستگی سنگ تأثیر می‌گذارند، برای تعیین خصوصیات سنگ به کار برد. بنابراین برای بررسی تاثیر اندازه دانه بر شکست سنگها جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول محور افقی اندازه دانه‌ها و محور عمودی توزیع دانه‌ها را نشان می‌دهد. در محور افقی دسته‌بندی اندازه دانه‌ها از

⁹ Factor Mineralogy

¹⁰ grain size

¹¹ grain size distribution

⁵ Villeneuve

⁶ Spalling Sensitivity Anisotropic Factor

⁷ Major Mineral Factor

⁸ Accessory Mineral Factor

کمتر از ۰/۵ میلی‌متر تا بزرگتر از ۸ میلی‌متر متغیر است. در محور عمودی توزیع دانه‌ها در سه دسته طبقه بندی شده است [۱۴].

۱- ایزوتروپ: دامنه کوچکی از اندازه دانه‌ها را در بر می‌گیرد و کمتر از ۱۰ درصد پورفیروکلاست دارد.

۲- سری (دانه بندی): دامنه وسیعی از اندازه دانه‌ها را در بر می‌گیرد و بیش از ۱۰ درصد پورفیروکلاست دارد.

۳- بایمدال: از دو دسته کانی با اندازه متفاوت تشکیل شده است. می‌تواند کمتر و بیشتر از ۱۰ درصد پورفیروکلاست داشته باشد.

پورفیروکلاست‌ها قطعات بزرگ موجود در مقاطع نازک‌اند، که عمدتاً از فلدسپات‌ها تشکیل شده‌اند. در جدول ۲ دسته بندی فاکتور اندازه دانه نشان داده شده است [۱۴].

جدول ۲- روش محاسبه فاکتور اندازه دانه [۱۴].

F_G	F_{GS}	< 0.5	< 1	< 8	> 8
F_{GD}	(mm)	Grain	Grain	Grain	Grain
		$0.5 <$	$<$	$<$	
Isotropic		۱/۴۵	۱/۳	۱/۱۵	۰/۷
Seriate		۱/۳	۱/۱۵	۱	۰/۵۵
Bimodal		۱/۱۵	۱	۰/۸۵	۰/۴

۲-۳- فاکتور فابریک دانه

این فاکتور شامل نوع فابریک^{۱۲} (F_{AF}) و شدت فابریک^{۱۳} (F_{AD}) است. الگوهای شکست در سنگ‌های متورق بسته به وجود صفحات ضعف پیوسته می‌تواند بسیار متفاوت باشد. این صفحات ضعف منجر به مکانیزم‌های شکست مختلف در برابر تنش می‌شود. در زاویه بین ۳۰ تا ۴۵ درجه بین جهت بارگذاری و سطوح ضعف مقاومت فشاری تک محوری کمترین مقدار خواهد بود [۱۹]. اگر چه محتوای میکا را می‌توان با مقاومت سنگ و رفتار آن مرتبط دانست، اما تأثیر مستقیم وجود میکا در سطوح ضعف می‌تواند باعث شکست سنگ در آن امتداد شود [۱۸]. در محور افقی جدول ۳ شدت فابریک در سه دسته با فاصله داری کم (کمتر از ۰/۵ سانتی‌متر)، متوسط (۰/۵ تا ۵ سانتی‌متر) و زیاد (بیش از ۵ سانتی‌متر) طبقه بندی شده است. در محور عمودی آن نوع فابریک شامل:

کلیواژ، شیبستوزیته، گنیس بانددار، جهت داری ترجیحی کانی‌ها و بدون فابریک قرار گرفته است. نحوه دسته بندی این نوع از فابریک‌ها در ادامه توضیح داده شده است [۱۴].

۱- کلیواژ: فاصله داری سطوح کلیواژ از کمتر ۰/۵ میلی‌متر، ۰/۵ تا ۵ میلی‌متر و بزرگتر از ۵ میلی‌متر متغیر است.

۲- شیبستوزیته: شیبستوزیته نوع ۱ جهت داری ترجیحی کانی‌های ورقه‌ای درشت دانه به همراه خرده سنگ است. شیبستوزیته نوع ۲ جهت داری ترجیحی کانی‌های ورقه‌ای ریزدانه به صورت ناپیوسته است. شیبستوزیته نوع ۳ کانی‌های ورقه‌ای که اطراف کانی‌های غیر ورقه‌ای (مانند: کوارتز و فلدسپات) را احاطه کرده‌اند.

۳- گنیس بانددار: فاصله داری کمتر از ۳ سانتی‌متر، ۳ تا ۱۰ سانتی‌متر و بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر متغیر است.

۴- جهت‌داری ترجیحی کانی‌ها: فاصله داری کمتر از ۱۰ میلی‌متر و بزرگتر از ۱۰ میلی‌متر متغیر است.

۵- بدون فابریک: سنگ فابریک همگن دارد. در جدول ۳ دسته بندی فاکتور فابریک دانه نشان داده شده است [۱۴].

جدول ۳- روش محاسبه فاکتور فابریک دانه‌ها [۱۴].

F_A	F_{AD}	Close spacing	Intermediat	Domaina
F_{AF}		g	e	l
Cleavage		۱/۷	۲	۲
Schistosity		۱/۸	۱/۷	۱/۶
Gneissic Banding Mineral		۱/۶	۱/۸	۲
Preferred Orientation		۲	۲	۲
n				
No Fabric		۱/۸	۱/۸	۱/۸

۲-۴- فاکتور تراشه شدن

فاکتور تراشه شدن از حاصل ضرب فاکتورهای کانی شناسی، اندازه دانه و فابریک دانه در مقاومت آزمایشگاهی (مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بارنقطه‌ای) بدست می‌آید. ترکیب فاکتورهای کانی شناسی و اندازه دانه تراشه شدن ایزوتروپ را نشان می‌دهد. در حالی که ترکیب هر سه فاکتور کانی شناسی و اندازه دانه و فابریک دانه تراشه شدن غیرایزوتروپ (FSSA) را نشان می‌دهد (رابطه

¹³ Microlithon spacing factor

¹² Foliation type factor

همه گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها از امتداد زون زاگرس و زون سنندج-سیرجان پیروی می‌کنند، که راستای NW-SE دارند. از دیگر ویژگی‌های این منطقه گرانیتهایی در گستره بسیار پهناور در این زیر زون است که در نتیجه رویداد زمین‌ساختی لارامید انجام گرفته و سنگ‌های در برگیرنده از جمله کرتاسه و کهن‌تر را در سطحی بسیار گسترده دگرگون کرده است [۲۰].

تونل گلاس در جنوب غربی استان آذربایجان غربی قرار دارد. این تونل آب مورد نیاز دریاچه ارومیه را در شرایط خشکسالی فراهم می‌کند. قطر این تونل ۶/۳۲۵ متر و طول ۳۵۶۶۱ متر که ۱۵۰۰۰ متر آن در رسوبات و مابقی در سنگ حفاری می‌شود. شیب تونل ۰/۰۸۵ درصد از شمال شرق به سمت جنوب غرب است. حفاری در قسمت سنگی این تونل توسط TBM از نوع دابل شیلد انجام می‌شود. در قسمت رسوبی هم حفاری با TBM نوع تعادل فشار زمین یا EPB انجام شده است. تونل انتقال آب گلاس در زون سنندج-سیرجان در سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین حفاری شده است. در طول تونل زون‌های خرد شده مختلفی وجود دارد. مهم‌ترین گسل در طول این تونل گسل شاوله بیض آباد است. پهنای این گسل ۱۰۰ متر و عمق آن حدود ۳۰۰ متر دارد. زون‌های گسلی دیگر پهنای ۱۰ تا ۲۰ متر دارند. این گسل‌ها به دلیل پهنای عمق کم اثر زیادی بر روی حفاری تونل نخواهند داشت. سه دسته درزه اصلی که دو دسته موازی محور تونل و یک دسته عمود بر محور تونل قرار دارند. بیشتر گمانه‌های حفر شده در مسیر تونل زیر سطح ایستایی قرار دارند. میزان جریان آب در زون‌های خرد شده حدود ۱۸ لیتر بر ثانیه بر متر برآورد شده است [۲۱]. در این پژوهش از سنگ‌های آذرین (گرانیت، گرانودیوریت)، رسوبی (آهک و دولومیت) و دگرگونی (شیل، اسلیت، شیست و هورنفلس) نمونه برداری شده است. بطور کلی واحدهای سنگی این منطقه را می‌توان به واحدهای آذرین و کربناته تقسیم بندی کرد. در بخش‌هایی که واحدهای کربناته در مجاورت واحدهای آذرین قرار دارند، رخساره‌های دگرگونی مجاورتی (هورنفلس) توسعه یافته است [۲۱]. پروفیل زمین شناسی تونل گلاس در شکل ۱ نشان داده شده است.

۱). فاکتور تراشه شدن سنگ را می‌توان به کمک روابط ۲ و ۳ محاسبه کرد. در جدول ۴ طبقه بندی فاکتور تراشه شدن سنگ نشان داده شده است. فاکتورهای کانی‌شناسی و اندازه دانه جزء پارامترهای ایزوتروپ می‌باشند. این دو فاکتور در سنگ‌های آنیزوتروپ نیز کاربرد دارند [۱۴] لازم به ذکر است به دلیل عدم وجود شرایط با تنش بالا (کمتر از ۲۰ مگاپاسکال) در پروژه مورد مطالعه، ضریب روباره (SCP) عدد یک در نظر گرفته شده و در فرمول ذکر نشده است.

$$F_{SSA} = F_M \times F_G \times F_A \quad (1)$$

$$C_{P1} = F_M \times F_G \times F_A \times UCS \times BTS \quad (2)$$

$$C_{P2} = F_M \times F_G \times F_A \times PLT \times 750 \quad (3)$$

جدول ۴- طبقه بندی فاکتور تراشه شدن سنگ [۱۴].

فاکتور تراشه شدن	تراشه شدن کم	تراشه شدن متوسط	خرد شدن
F_{SSA}	$< 1/3$	$1/3 - 1/5$	$> 1/5$
C_{P1}	< 1500	$1500 - 4000$	> 4000
C_{P2}	< 1500	$1500 - 4000$	> 4000

۳- مواد و روش‌ها

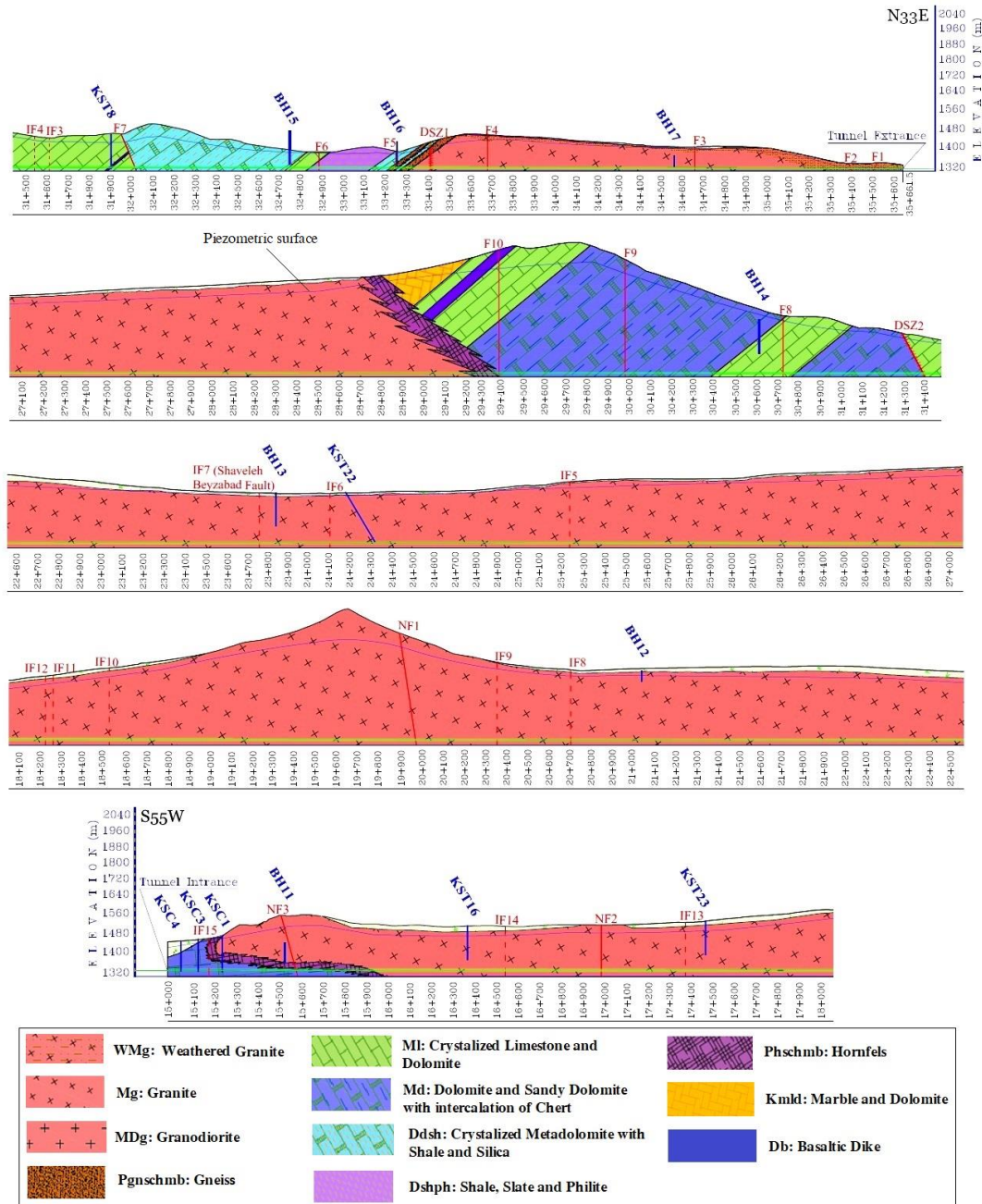
۳-۱- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

از دیدگاه تقسیمات واحدهای ساختمانی-رسوبی ایران تونل انتقال آب گلاس در محدوده کمر بند دگرگونی و افیولیتی زون سنندج-سیرجان قرار گرفته است. رخنمون‌های منطقه مورد مطالعه از نظر ترکیب و سن عمدتاً در برگیرنده سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی از زمان پرکامبرین تا عهد حاضر است. سنگ‌های ولکانیک و واحدهای کربناته به علت پایداری در برابر فرسایش بلندترین ارتفاعات منطقه را ساخته‌اند، درحالیکه واحدهای شیلی و ماسه‌ای نقاط پست منطقه را پدید آورده‌اند. از دیدگاه ساختاری منطقه اطراف تونل گلاس با توجه به تفاوت سنگ‌های کرتاسه به دو زیر زون پیرانشهر و نقده قابل تقسیم است. در محدوده قطعه دوم تونل گلاس سنگ‌های رسوبی، دگرگونی، آتشفشانی و آذرین نفوذی از پرکامبرین تا زمان حاضر با روند عمومی شمال غربی - جنوب شرقی رخنمون دارند. هم‌چنین پی سنگ پرکامبرین پسین-پالئوزوئیک در نتیجه عملکرد فازهای تکتونیکی گوناگون و گسل‌ها در این ناحیه رخنمون یافته است. روند

۳-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های صحرایی

بلوک‌های سنگی از سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین از ۱۱ نقطه از مسیر تونل انتقال آب گلاس برداشت شده است. نمونه‌های جمع آوری شده بدون هوازدگی و یا هوازدگی ناچیز، فاقد سطوح ضعف و شکستگی بوده‌اند. این نمونه‌ها پس

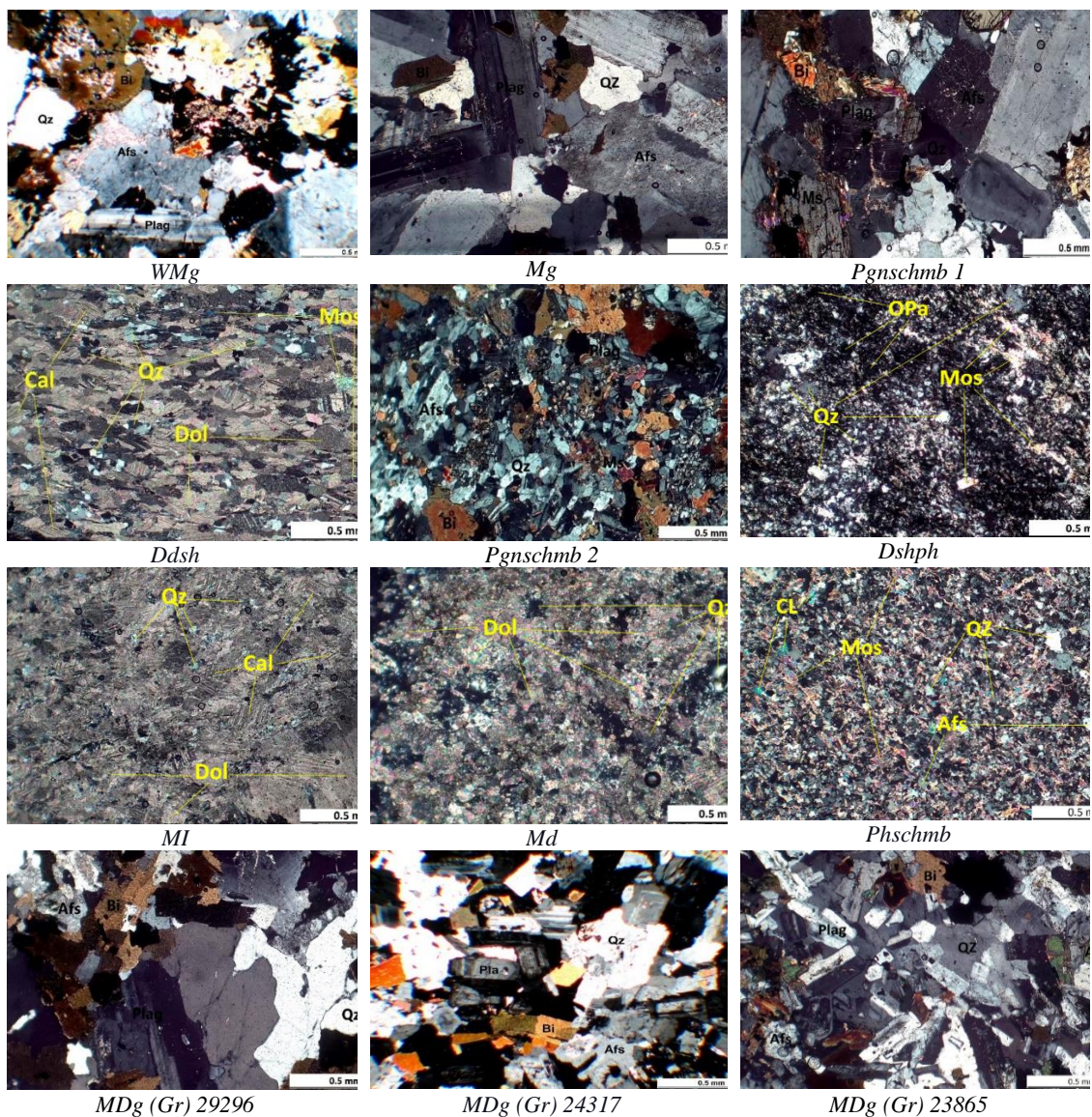
از جمع آوری به آزمایشگاه ژئوتکنیک منتقل شده است. مغزه گیری از نمونه‌ها با قطر استاندارد ۵۴ میلی‌متر انجام شده است. بعد از تهیه مقاطع نازک از نمونه‌ها، مطالعات سنگ-شناسی به کمک میکروسکوپ پلاریزان انجام شده است. در شکل ۲ تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل گلاس نشان داده شده است.

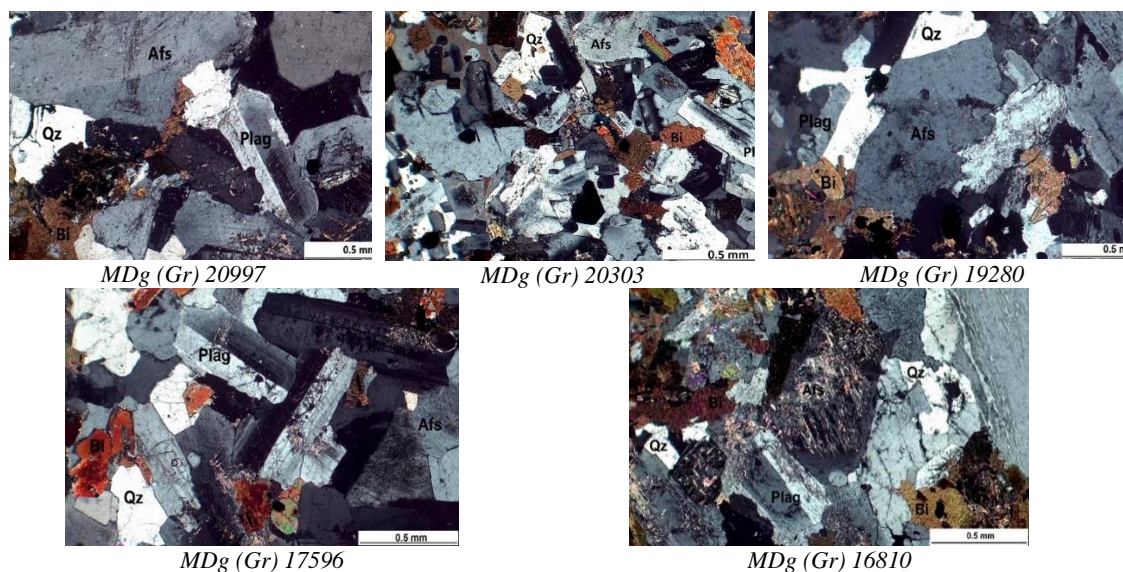


شکل ۱- پروفیل زمین شناسی منطقه مورد مطالعه [۲۱].

لیپیدوبلاستی و بدون جهت یافتگی ترجیحی است. شیل‌ها بدون جهت‌یافتگی ترجیحی‌اند. اسلیت و فیلیت در رخساره شیست سبز و حرارت پایین دگرگون شده‌اند. شیل، اسلیت و فیلیت دارای دارای منشأ رسی (گلسنگ) هستند. سنگ‌های دولومیتی و کلسیت دولومیتی کمتر از ۱۰ درصد کوارتز دارند. فضاهای خالی در دولومیت و کلسیت دولومیتی با اسپاریت پر شده است. سنگ‌های دولومیتی از ۵۰ تا ۹۰ درصد دولومیت تشکیل شده‌اند، که طی فرآیند دولومیتی شدن این سنگ‌ها ایجاد شده‌اند.

براساس آنالیز مدال (درصد حجمی) کانی‌های مختلف در سنگ تعیین شده است. کانی‌های اصلی سنگ شامل: کوارتز، فلدسپات‌های الکالن، پلاژیوکلاز، کلسیت و دولومیت و کانی‌های فرعی شامل: مسکویت، بیوتیت و کلریت است. تمامی سنگ‌ها براساس استاندارد اتحادیه بین‌المللی علوم زمین (IUGS) طبقه‌بندی شده‌اند (جدول ۵). سنگ‌های گرانیتی دارای بافت دانه‌ای و محتوی کوارتز از ۶/۹۷ تا ۳۰ درصد، پلاژیوکلازها از ۶ تا ۴۵ درصد و فلدسپات‌های الکالن از ۱۰ تا ۵۲/۷۵ درصد متغیراند. هورنفلس دارای بافت





شکل ۲- تصاویر مقاطع نازک میکروسکوپی واحدهای زمین شناسی مهندسی مسیر تونل گلاس

جدول ۵- ویژگی‌های کانی شناسی سنگ‌های واحدهای زمین‌شناسی مهندسی

Size(mm)	Cal%	Dol%	Mo%	Cl%	Am%	Bio%	Pl%	Alf%	QZ%	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۰/۳۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۲/۰۰	۱/۰۰	۹/۸۲	۲۶/۷۵	۵۳/۲۰	۶/۹۶	Granite	WMg
۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۲۹	۲/۰۰	۲/۵۰	۱۲/۹۵	۱۳/۸۷	۴۲/۸۵	۱۵/۰۲	Granite	Mg
۰/۳۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۸/۱۲	۱/۰۰	۰/۵۰	۳۲/۴۱	۱۴/۳۰	۳۰/۵۲	۱۲/۶۹	Gneiss	Pgnschmb
۰/۱۱	۱۰/۸۲	۸۷/۱۹	۱/۶۷	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	Dolomite, Shale	Ddsh
۰/۱۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۸/۱۲	۱/۰۰	۰/۵۰	۳۲/۴۱	۱۴/۳۰	۳۰/۵۲	۱۲/۶۹	Gneiss	Pgnschmb
۰/۱۱	۱۰/۸۲	۸۷/۱۹	۱/۶۷	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	Dolomite, Shale	Ddsh
۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۲/۶۵	۴/۰۰	-	۰/۹۱	۰/۰۰	۵/۱۰	۵۷/۰۷	Shale, Slate, Philite	Dshph
۰/۱۱	۰/۰۰	۹۵/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Limestone, Dolomite	MI
۰/۱۱	۱۰/۸۲	۸۷/۱۹	۱/۶۷	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۲	Dolomite, Shale	Ddsh
۰/۱۱	۰/۰۰	۹۵/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Limestone, Dolomite	MI
۰/۰۴	۱۰/۷۲	۸۷/۱۹	۱/۶۷	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۳	Dolomite	Md
۰/۱۱	۰/۰۰	۹۵/۶۱	۰/۰۰	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	Limestone, Dolomite	MI
۰/۰۴	۱۰/۷۲	۸۷/۱۹	۱/۶۷	۰/۰۰	-	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۳	Dolomite	Md
۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۳۲/۶۵	۴/۰۰	-	۰/۹۱	۰/۰۰	۵/۱۰	۵۷/۰۷	Hornfelse	Phschmb
۰/۳۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۴/۰۰	-	۱۱/۲۰	۱۴/۳۶	۴۲/۷۶	۲۶/۱۸۸	Granite	MDg (Gr) 29296
۰/۶۸	-	-	۰/۰۰	۴/۰۰	۳/۰۰	۲۲/۲۸	۳۶/۹۴	۱۹/۳۷	۲۲/۲۸	Granite	MDg (Gr) 24317
۰/۲۲	-	-	۰/۰۰	۳/۰۰	۱/۰۰	۱۸/۴۳	۴۲/۶۵	۲۸/۴۶	۱۸/۴۲	Granite	MDg (Gr) 23865

۰/۴۲	-	-	۰/۰۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۱۲/۸۰	۴۲/۸۵	۱۵/۳۶	۱۲/۸۰	Granite	MDg (Gr) 20997
۰/۲۰	-	-	۰/۰۰	۳/۰۰	۱/۰۰	۶/۳۳	۲۸/۴۶	۴۲/۶۵	۱۸/۴۲	Granite	MDg (Gr) 20303
۰/۲۰	-	-	۰/۰۰	۱/۰۰	۲/۰۰	۱۵/۶۸	۱۵/۳۶	۴۲/۸۵	۱۲/۸۰	Granite	MDg (Gr) 19280
۰/۳۴	-	-	۰/۱۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۳/۲۲	۳۱/۲۵	۳۸/۳۹	۱۵/۸۸	Granite	MDg (Gr) 17596
۰/۳۶	-	-	۰/۰۰	۱/۵۰	۱/۵۰	۱۵/۱۰	۳۰/۷۵	۳۸/۳۶	۱۲/۷۳	Granite	MDg (Gr) 16810

مهندسی حفاری شده‌اند، موقعیت هر کدام از این گمانه‌ها بر روی واحدهای زمین شناسی مهندسی مشخص شده است (شکل ۱). برداشت ویژگی‌های مختلف درزه‌ها با استفاده از استاندارد ISRM در سال ۱۹۸۱ به صورت خطی، پنجره‌ای و پراکنده در راستای محور تونل انجام شده است [۲۳] (جدول ۷). بیشترین هوازگی مربوط به واحد گرانیتی WMg است. بقیه واحدهای زمین شناسی مهندسی هوازگی کم تا ناچیزی دارند. طبقه بندی مهندسی توده سنگ‌ها به روش‌های RQD، RMI، GSI، RMR89 و Q انجام شده است (جدول ۸). براساس طبقه بندی‌های انجام شده کیفیت توده سنگ‌های مسیر تونل از کم تا زیاد متغیر است. میانگین داده‌های عملکردی دستگاه حفاری در جدول ۹ برای هر واحد زمین شناسی مهندسی براساس پروفیل زمین شناسی تخمین زده شده است. برای انجام تجزیه و تحلیل نتایج و بدست آوردن مدل‌های معتبر از نرم افزار SPSS ورژن ۲۳ استفاده شده است.

آزمایش‌های فیزیکی شامل دانسیته و تخلخل و آزمایشات مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت بار نقطه‌ای براساس استاندارد ISRM در سال ۲۰۰۷ انجام [۲۲] (جدول ۶). خصوصیات فیزیکی سنگ‌های مسیر تونل شامل: تخلخل و دانسیته به ترتیب از ۰/۲۳ تا ۱/۳۷ درصد و از ۲۶ تا ۲۸/۰۵ کیلونیوتن بر مترمکعب متغیراند. به طور کلی سنگ‌های مسیر تونل دارای تخلخل کم تا بسیار کم و دانسیته زیاد تا بسیار زیاد هستند. خصوصیات مکانیکی شامل: مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی برزیلی و مقاومت کششی بار نقطه‌ای به ترتیب از ۴۰/۵۵ تا ۱۴۹/۵۵ مگاپاسکال، از ۲/۴۵ تا ۹/۲۹ مگاپاسکال و از ۳/۷۷ تا ۱۸/۶۳ مگاپاسکال متغیراند. مقاومت سنگ‌های مسیر تونل از کم تا زیاد متغیر است.

با توجه به برداشت‌های صورت گرفته در مطالعات صحرایی، زمین شناسی قطعه دوم تونل گلاس، شامل ۹ واحد زمین شناسی مهندسی است. با توجه به اینکه گمانه‌ها با هدف تعیین ویژگی‌های ژئوتکنیکی واحدهای زمین شناسی

جدول ۶- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی واحدهای زمین شناسی مهندسی

<i>I_{ss}</i> (MPa)	<i>B_T</i> (MPa)	<i>U_C</i> (MPa)	<i>Density</i> (gr/cm ³)	<i>Porosity</i> (%)	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۵/۵۱	۹/۸۰	۴۱/۰۰	۲/۶۷	۱/۳۱	Granite	WMg
۵/۵۰	۱۰/۷۶	۵۹/۵۰	۲/۷۲	۱/۰۰	Granite	Mg
۹/۲۹	۱۴/۴۷	۱۱۷/۲۰	۲/۸۲	۰/۲۳	Gneiss	Pgnschmb
۶/۰۰	۹/۱۲	۱۰۰/۰۰	۲/۷۵	۱/۱۱	Dolomite, Shale	Ddsh
۷/۱۵	۱۵/۳۴	۸۰/۰۰	۲/۷۹	۰/۴۷	Gneiss	Pgnschmb
۶/۰۰	۹/۱۲	۱۰۰/۰۰	۲/۷۵	۱/۱۱	Dolomite, Shale	Ddsh
۴/۸۵	۳/۷۷	۳۴/۰۰	۲/۷۰	۱/۵۷	Shale, Slate, Philite	Dshph
۵/۷۸	۶/۱۳۳	۵۹/۰۰	۲/۷۳	۱/۰۸۸	Limestone, Dolomite	MI
۶/۰۰	۹/۱۲	۱۰۰/۰۰	۲/۷۵	۱/۱۱	Dolomite, Shale	Ddsh

۶/۴۰	۱۲/۹۵	۱۰۷/۹۰	۲/۷۸	۰/۴۵	Limestone, Dolomite	MI
۶/۴۰	۱۰/۱۲	۹۰/۰۰	۲/۷۴	۰/۹۰	Dolomite	Md
۶/۴۰	۱۲/۹۵	۱۰۷/۹۰	۲/۷۸	۰/۴۵	Limestone, Dolomite	MI
۶/۴۰	۱۰/۱۲	۹۰/۰۰	۲/۷۷	۰/۹۰	Dolomite	Md
۸/۷۱	۱۶/۸۸	۱۵۲/۴۰	۲/۸۶	۰/۲۲	Hornfelse	Phschmb
۸/۲۶	۱۲/۸۱	۹۷/۲۴	۲/۷۸	۰/۶۲	Granite	MDg (Gr) 29296
۵/۱۸	۸/۳۱	۴۰/۵۵	۲/۶۵	۱/۶۷	Granite	MDg (Gr) 24317
۶/۰۰	۱۳/۷۲	۱۰۱/۰۰	۲/۷۸	۰/۸۰	Granite	MDg (Gr) 23865
۶/۸۶	۱۶/۵۲	۱۰۷/۱۰	۲/۷۶	۰/۷۵	Granite	MDg (Gr) 20997
۸/۹۶	۱۸/۶۳	۱۴۹/۵۵	۲/۸۶	۰/۴۹	Granite	MDg (Gr) 20303
۸/۹۶	۱۶/۳۵	۱۴۹/۵۵	۲/۸۶	۰/۴۹	Granite	MDg (Gr) 19280
۹/۲۹	۱۷/۷۰	۱۱۷/۲۰	۲/۸۶	۰/۲۳	Granite	MDg (Gr) 17596
۶/۳۶	۱۲/۶۱	۱۱۹	۲/۷۶	۰/۷۶	Granite	MDg (Gr) 16810

جدول ۷- ویژگی سطح درزه‌ها در واحدهای زمین شناسی مهندسی [۲۱].

Spacing (m)	Weathering	Aperture (mm)	JL (m)	Jr	Ja	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۰/۲ - ۰/۶	Highly	۲/۵ - ۱۰	>۱۰	۱/۵ - ۲	۴ - ۳	Granite	WMg
۰/۲ - ۰/۶	Slightly	۰/۱ - ۰/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Granite	Mg
۰/۲ - ۰/۶	Lowly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۴ - ۲	Gneiss	Pgnschmb
۰/۲ - ۰/۶	Lowly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Dolomite, Shale	Ddsh
۰/۲ - ۰/۶	Lowly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Shale, Slate, Philitite	Dshph
۰/۲ - ۰/۶	Lowly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Limestone, Dolomite	MI
۰/۶ - ۲/۱۰	Lowly	۰/۱ - ۰/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Dolomite	Md
۰/۲ - ۰/۶	Slightly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Hornfelse	Phschmb
۰/۶ - ۲/۱۰	Slightly	۰/۵ - ۲/۵	>۱۰	۳ - ۲	۳ - ۲	Granodiorite	MDg

جدول ۸- سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ در واحدهای زمین شناسی مهندسی [۲۱].

RMi (MPa)	Q	GSI	RMR ₈₉	RQD (%)	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۰/۱۴ - ۳/۱۷	۰/۱۰ - ۰/۹۱	۴۷ - ۲۳	۵۲ - ۳۸	۹۰ - ۲۵	Granite	WMg
۰/۷۸ - ۹/۱۴	۱/۲۴ - ۳/۴۷	۶۵ - ۵۳	۷۰ - ۵۸	۹۴ - ۳۳	Granite	Mg
۱/۹۶ - ۲۳/۵	۰/۱۷ - ۶/۶۷	۶۹ - ۴۳	۷۴ - ۴۸	۱۰۰ - ۱۰	Gneiss	Pgnschmb
۱/۰۳ - ۱۳/۱۶	۰/۷۸ - ۶/۲۵	۶۸ - ۴۹	۷۳ - ۵۴	۱۰۰ - ۴۷	Dolomite, Shale	Ddsh
۰/۱۰ - ۱/۵۰	۰/۰۴ - ۰/۸	۴۲ - ۳۰	۴۷ - ۳۵	۷۵ - ۱۷	Shale, Slate, Philitite	Dshph
۰/۹۱ - ۱۰/۶۰	۰/۷۱ - ۵/۲۸	۶۵ - ۵۱	۶۸ - ۴۸	۹۵ - ۳۸	Limestone, Dolomite	MI
۱/۲۲ - ۹/۰۵	۱/۱۰ - ۵/۳۲	۶۰ - ۴۹	۶۵ - ۵۴	۹۶ - ۵۹	Dolomite	Md

۵/۷۱-۱۵/۱۴	۱/۴۱-۵/۱۲	۶۶-۶۰	۷۱-۶۵	۹۲-۷۵	Hornfelse	Phschmb
۱/۲۵-۲۰/۹۴	۱/۲۲-۷/۹۸	۷۵-۶۵	۸۰-۷۰	۱۰۰-۴۶	Granodiorite	MDg

جدول ۹- ویژگی‌های عملکردی دستگاه حفاری تونل در واحدهای زمین شناسی مهندسی [۲۱].

Torque (KN.m)	RPM	Thrust (Ton)	PRev (mm/rev)	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۱۳۲۴	۳/۵۵	۵۵۰	۸/۵۰	Granite	WMg
۱۰۷۸	۴/۱۵	۵۹۵	۸/۳۰	Granite	Mg
۱۱۶۹	۵/۱۵	۶۳۰	۷/۲۰	Gneiss	Pgnschmb
۱۱۳۶	۵/۱۰	۶۲۷	۶/۷۰	Dolomite, Shale	Ddsh
۱۱۷۸	۵/۳۵	۵۲۰	۸/۵۰	Gneiss	Pgnschmb
۱۰۸۲	۳/۷۵	۵۰۰	۹/۴۰	Dolomite, Shale	Ddsh
۱۰۸۰	۳/۹۰	۵۰۵	۱۰/۳۰	Shale, Slate, Philite	Dshph
۱۱۵۰	۳/۹۵	۵۸۱	۸/۷۰	Limestone, Dolomite	MI
۱۳۷۱	۳/۸۵	۵۴۱	۸/۲۰	Dolomite, Shale	Ddsh
۱۱۲۶	۵/۹۰	۵۷۷	۷/۲۰	Limestone, Dolomite	MI
۱۰۵۶	۳/۵۵	۵۳۳	۹/۲۰	Dolomite	Md
۱۲۲۷	۴/۴۵	۶۷۴	۶/۰۰	Limestone, Dolomite	MI
۱۱۵۶	۴/۲۰	۵۸۵	۷/۹۰	Dolomite	Md
۱۲۴۰	۴/۷۰	۶۶۲	۵/۷۰	Hornfelse	Phschmb
۱۱۶۷	۵/۱۰	۷۹۴	۶/۷۰	Granite	MDg (Gr) 29296
۹۰۱	۳/۳۰	۴۷۸	۱۱/۰۰	Granite	MDg (Gr) 24317
۱۲۲۴	۴/۷۰	۷۵۷	۶/۰۰	Granite	MDg (Gr) 23865
۱۰۴۸	۳/۵۵	۶۵۹	۶/۴۰	Granite	MDg (Gr) 20997
۱۰۷۱	۳/۷۰	۹۱۲	۳/۷۰	Granite	MDg (Gr) 20303
۱۰۷۰	۳/۴۵	۷۲۲	۴/۸۰	Granite	MDg (Gr) 19280
۱۱۱۳	۱/۷۰	۷۹۸	۶/۵۰	Granite	MDg (Gr) 17596
۱۰۸۰	۳/۲۸	۵۸۷	۶/۷۰	Granite	MDg (Gr) 16810

۴- نتایج و بحث

نیروی پیشران (Thrust)، سرعت گردش کاترهد (RPM) و گشتاور (Torque) دستگاه حفاری تونل مقایسه گردید. هم-چنین ارتباط تراشه شدن با سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ و پارامترهای دستگاه‌های حفاری از قبیل نرخ نفوذ و نیروی پیشران مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی آماری نرمال بودن داده‌ها از دو پارامتر چولگی و کشیدگی استفاده شده است. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع

با توجه به اینکه تکرار واحدهای زمین شناسی در طول مسیر تونل رخ می‌دهد، ۲۲ واحد زمین شناسی مهندسی با مقادیر فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. پس از بدست آوردن فاکتورهای مربوط به تراشه شدن سنگ‌ها ارتباط این فاکتورها با مقدار نرخ نفوذ (PRev)،

نرمال است. با توجه به اینکه در آزمون چولگی و کشیدگی مقادیر پارامترهای ورودی در بازه (۲ و -۲) قرار گرفته‌اند، توزیع آماری پارامترهای ورودی نرمال می‌باشند (جدول ۱۰). برای انجام برآزش‌های آماری از روش رگرسیون استفاده شده است. این روش شامل رگرسیون ساده و رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی است، که در ادامه تشریح خواهند شد. در جدول ۱۱ فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن سنگها در واحدهای مختلف زمین شناسی محاسبه شده است.

توزیع می‌باشد. برای یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن با کشیدگی منحنی به سمت مقادیر بالاتر چولگی مثبت و برای توزیع نامتقارن با کشیدگی منحنی به سمت مقادیر کوچکتر مقدار چولگی منفی است. کشیدگی نشان دهنده ارتفاع یک توزیع است. به عبارتی کشیدگی معیاری از بلندی منحنی در نقطه ماکزیمم است و مقدار کشیدگی برای توزیع نرمال برابر با عدد ۳ می‌باشد. کشیدگی مثبت یعنی قله منحنی توزیع مورد نظر از توزیع نرمال بالاتر و کشیدگی منفی نشانه پایین‌تر بودن از قله منحنی توزیع

جدول ۱۰- نتایج آزمون چولگی و کشیدگی

چولگی	کشیدگی	تعداد داده	پارامتر زمین شناسی	داده مورد بررسی
-۱/۶۹۶	۲/۰۷۸	۲۲	<i>RQD</i>	سیستم طبقه بندی توده سنگ
-۱/۱۸۷	۱/۲۸۸	۲۲	<i>RMR 89</i>	
۰/۳۲۷	۰/۳۳۲	۲۲	<i>RMi (MPa)</i>	
-۰/۲۰۹	۰/۳۰۹	۲۲	<i>GSI</i>	
-۰/۴۸۱	۰/۱۳۰	۲۲	<i>Q</i>	
-۰/۲۵۰	-۰/۲۹۳	۲۲	<i>UCS (Mpa)</i>	پارامترهای ژئو مکانیکی
-۰/۱۹۹	-۰/۴۶۰	۲۲	<i>BTS(Mpa)</i>	
-۰/۶۵۴	-۰/۸۸۹	۲۲	<i>I_{ss0} (Mpa)</i>	
-۰/۵۲۰	-۰/۴۸۰	۲۲	<i>Porosity (%)</i>	
-۰/۰۹۸	۰/۰۵۳	۲۲	<i>Density (gr/cm³)</i>	
۰/۰۲۷	-۰/۰۲۷	۲۲	<i>PRev (mm/rev)</i>	
۰/۹۴۷	۰/۴۸۵	۲۲	<i>Thrust (KN)</i>	
۰/۲۷۱	۱/۲۸۵	۲۲	<i>Torque (KN.m)</i>	
-۰/۳۲۱	۱/۱۴۵	۲۲	<i>RPM</i>	
-۰/۰۸۴	-۱/۰۶۶	۲۲	<i>FSSA</i>	پارامترهای تراشه شدن
۰/۳۰۴	-۰/۴۷۴	۲۲	<i>CP₁</i>	
-۰/۴۵۵	۰/۲۳۲	۲۲	<i>CP₂</i>	

جدول ۱۱- نتایج ارزیابی فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن سنگها

<i>CP2</i>	<i>CP1</i>	<i>FSSA</i>	<i>FA</i>	<i>FG</i>	<i>FM</i>	نوع سنگ	واحد زمین شناسی
۱۰۷۸۵/۸۲	۱۰۴۸/۶۹	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	Granite	WMg
۶۱۴۲/۵۰	۱۰۴۸/۶۸	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۳۰	۱/۶۳	Granite	Mg
۱۲۷۲۹/۶۲	۳۰۹۸/۳۸	۰/۸۵	۱/۷۰	۱/۳۰	۱/۸۷	Gneiss	Pgnschmb
۹۹۸۳/۲۵	۲۰۲۳/۲۷	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۳۰	۲/۲۱	Dolomite, Shale	Ddsh
۸۲۹۵/۷۸	۱۸۹۸/۴۷	۰/۷۰	۱/۷۰	۱/۳۰	۱/۵۴	Gneiss	Pgnschmb
۹۹۸۳/۲۵	۲۰۲۳/۲۷	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۳۰	۲/۲۱	Dolomite, Shale	Ddsh

۹۴۹۳/۸۷	۳۳۴/۵۵	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	Shale, Slate, Philite	Dshph
۹۶۱۷/۱۹	۷۹۶/۶۵	۰/۸۵	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۲۱	Limestone, Dolomite	MI
۹۹۸۳/۳۵	۲۰۲۳/۲۷	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۳۰	۲/۲۱	Dolomite, Shale	Ddsh
۱۲۵۲۸/۰۰	۳۶۴۶/۹۶	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	Limestone, Dolomite	MI
۱۱۵۶۸/۰۰	۲۱۹۵/۰۲	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۳۰	۲/۲۱	Dolomite	Md
۱۲۵۲۸/۰۰	۳۶۴۶/۹۶	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	Limestone, Dolomite	MI
۱۱۵۶۸/۰۰	۲۱۹۵/۰۲	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۳۰	۲/۲۱	Dolomite	Md
۱۳۷۱۸/۲۵	۵۴۰۲/۶۳	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۱۵	۲/۱۰۰	Hornfelse	Phschmb
۱۳۷۴۰/۵۱	۲۷۶۲/۸۴	۰/۸۵	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۲۱	Granite	MDg (Gr) 29296
۱۰۱۳۹/۸۵	۸۷۹/۴۹	۱/۰۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۶۱	Granite	MDg (Gr) 24317
۹۵۷۱/۵۰	۲۹۴۷/۴۲	۰/۸۵	۱/۸۰	۱/۴۵	۲/۲۱	Granite	MDg (Gr) 23865
۹۸۲۶/۹۵	۳۳۷۹/۳۴	۰/۸۵	۲/۰۰	۱/۱۵	۱/۹۵۰	Granite	MDg (Gr) 20997
۱۲۲۷۷/۴۴	۵۰۹۰/۲۳	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۱/۸۲	Granite	MDg (Gr) 20303
۱۲۲۷۷/۴۴	۴۴۶۷/۲۷	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۱/۸۲	Granite	MDg (Gr) 19280
۱۲۷۲۹/۶۲	۳۷۹۰/۰۰	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۱/۸۲	Granite	MDg (Gr) 17596
۹۱۹۱/۷۹	۲۸۹۱/۱۵	۰/۷۰	۱/۸۰	۱/۴۵	۱/۸۲	Granite	MDg (Gr) 16810

۴-۱- رگرسیون ساده

P-value کمتر از ۰/۰۵ باشد، مدل معنادار خواهد بود. بنابراین می‌توان از آن مدل برای ارزیابی پارامتر مستقل و وابسته استفاده کرد. هم چنین هر چقدر مقدار آزمون F بزرگتر باشد، معتبر بودن مدل را تایید می‌کند. زمانی که R^2 و $Adj.R^2$ برابر با یک باشند، نشان دهنده بهترین مدل‌ها هستند. اما با توجه به اینکه این دو پارامتر برای ارزیابی یک مدل به تنهایی کافی نیستند، بنابراین روش‌های آماری خطاگیری برای ارزیابی این مدل‌ها ارائه شده است. یکی از این پارامترها درصد میانگین خطای مطلق (MAPE) است، که برای محاسبه کارایی مدل‌های پیش بینی کننده، بسیار مفید است، این پارامتر توسط محققین مختلف مانند گریما و بابوشکا^{۱۴} [۲۴] و کیانپور و همکاران [۲۵] مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه محاسبه این پارامتر در رابطه ۴ نشان داده شده است. در جدول ۱۲ طبقه بندی این پارامتر و نحوه ارزیابی آن توصیف شده است. در این رابطه A_i مقدار واقعی، F_i مقدار پیش بینی شده و n تعداد داده‌های استفاده شده در مدل است.

تابعی که ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را بیان می‌کند، به تابع رگرسیون موسوم است. رگرسیون ساده شامل رگرسیون‌های خطی، لگاریتمی، معکوس، توانی، نمایی و درجه دوم است. روابط مربوط به این رگرسیون‌ها در زیر نشان داده شده است.

۱- رگرسیون خطی $(Y = b_1 \cdot X + c)$ ، ۲- رگرسیون لگاریتمی $(Y = b_1 \cdot \ln X + c)$ ، ۳- رگرسیون معکوس $(Y = b_1 / X + c)$ ، ۴- رگرسیون توانی $(Y = b_1 \cdot X^c)$ ، ۵- رگرسیون نمایی $(Y = b_1 \cdot \exp^{c \cdot X})$ ، ۶- رگرسیون درجه دوم $(Y = (b_1 \cdot X) + (b_2 \cdot X^2 + c))$

در این روابط Y متغیر وابسته، X متغیر مستقل، b_1 و b_2 ضرایب رگرسیونی و c مقدار ثابت است.

از پارامترهای آماری برای ارزیابی عملکرد مدل‌های رگرسیونی استفاده می‌شود. این پارامترها به ترتیب شامل: ضریب تعیین (R^2)، ضریب تعیین تعدیل شده ($Adj. R^2$)، آنالیز واریانس (ANOVA)، آزمون معنی داری یا (P value)، تخمین خطای استاندارد (Std. Er) و آزمون F است. زمانی که مقدار

تعیین ($R^2 = 0.754$) را داشته و مقدار خطای ($MAPE = 33.332$) آن در محدوده قابل قبول قرار گرفته است. هم‌چنین لازم به ذکر است رابطه بین نرخ نفوذ با تراشه شدن سنگ با توجه به ضریب CP_1 عکس است. بنابراین برای یافتن رابطه رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی مناسب از نرخ نفوذ به جای نیروی پیشران استفاده خواهد شد.

۴-۲- رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی

رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی به ترتیب به کمک روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند. این روابط از ۲ متغیر مستقل تشکیل شده‌اند. یکی از متغیرها پارامتر RQD و متغیر دیگر پارامتر فاکتور تراشه شدن (CP_1) است. برای اینکه اثر تمام پارامترها اعم از ماده سنگ و توده سنگ را بر روی نرخ نفوذ اندازه‌گیری شود، این روابط ارائه شده‌اند. در جدول ۱۵ بهترین روابط رگرسیونی چند گانه خطی و غیر خطی بین نرخ نفوذ با پارامترهای CP_1 و RQD ارائه شده است.

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_n \cdot X_n \quad (5)$$

$$Y = b_0 + b_1 \cdot X_1^{b_2} + \dots + b_n \cdot X_n^{b_n} \quad (6)$$

در این رابطه X متغیر مستقل، Y متغیر وابسته، b_1 و b_2 ضرایب رگرسیونی و c مقدار ثابت است. در جدول ۱۵ بهترین روابط رگرسیونی چندگانه خطی و غیرخطی بین نرخ نفوذ با CP_1 و RQD نشان داده شده است. در رابطه ۱ جدول ۱۵ مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.807$) و مقدار خطا ($MAPE = 8.986$) نشان دهنده رابطه قوی بین نرخ نفوذ با تراشه شدن و توصیف کیفی توده سنگ است. در رابطه ۲ جدول ۱۵ مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.816$) و مقدار خطا ($MAPE = 8.821$) نشان دهنده رابطه قوی‌تر با نرخ نفوذ است. این رابطه در زمان فاز اول مطالعاتی می‌تواند به طراحان تونل برای پیش بینی نرخ نفوذ کمک کند. نرخ نفوذ تعیین کننده بخش عمده هزینه و زمان حفاری تونل است.

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|A_i - F_i|}{A_i}}{n} \times 100 \quad (4)$$

جدول ۱۲- روش ارزیابی درصد میانگین خطای مطلق]-۲۶-
[۲۷]

ارزیابی	MAPE (%)
Excellent	MAPE < 10 %
Good	10% < MAPE < 20%
Reasonable	20% < MAPE < 50%
Poor	MAPE > 50%

در جدول ۱۳ بهترین روابط رگرسیونی ساده بین CP_1 و سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ نشان داده شده است. در بین روابط جدول ۱۳ روابط ۱ و ۵ به ترتیب بیشترین ضریب تعیین ($R^2 = 0.711$) و ($R^2 = 0.712$) و کمترین خطا ($MAPE = 31.185$) و ($MAPE = 28.921$) را دارند. هر دو رابطه براساس طبقه بندی درصد میانگین خطای مطلق در محدوده قابل قبول قرار می‌گیرند. به نظر می‌رسد، مقدار خطای رابطه ۵ کمتر و مناسب‌تر می‌باشد. در حالی که برای محاسبه RMi از پارامتر مقاومت فشاری ماده سنگ همانند پارامتر CP_1 استفاده می‌شود. اما RQD به عنوان یک پارامتر مستقل با تراشه شدن رابطه قابل قبولی دارد. این پارامتر شرایط توده سنگ را بیان می‌کند. بنابراین از این دو سیستم طبقه بندی توده سنگ برای بدست آوردن روابط چندگانه استفاده خواهد شد. به دلیل عدم وجود رابطه معنادار بین CP_2 با سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ این پارامتر از محاسبات حذف گردید. در واقع می‌توان ادعا نمود که پارامتر CP_1 به دلیل شباهت بسیار زیاد با رابطه شکنندگی ($UCS \times BTS/2$) و اثر مثبت شکنندگی بر روی نرخ نفوذ باعث ارتباط مطلوب بین نرخ نفوذ و CP_1 شده است. مطالعات گذشته نیز وجود رابطه بین شاخص شکنندگی و نرخ نفوذ را تایید می‌کنند. جمشیدی^{۱۵} [۲۸]، یاقیز و یازیتووا^{۱۶} [۶] و کراری و همکاران [۲۹] بیان کردند که بین شاخص‌های شکنندگی (B_3 و B_4) مقدار نرخ نفوذ TBM و قابلیت حفاری سنگ‌ها روابط معناداری وجود دارد. در جدول ۱۴ ارتباط بین نرخ نفوذ و نیروی پیشران با فاکتور تراشه شدن سنگ (CP_1) نشان داده شده است. در این جدول رابطه ۱ بهترین ضریب

¹⁶ Yagiz and Yazitova

¹⁵ Jamshidi

جدول ۱۳- بهترین روابط رگرسیونی ساده بین CP_1 و سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ

Mode l No	Equation	R	R ²	Adjusted R ²	F	P value	Standard error	MAPE %
1	$CP_1 = 43.076 EXP^{1.328}_{RQD}$	0.843	0.711	0.696	49.166	0.000	0.378	31.185
2	$CP_1 = 64.788 EXP^{0.059}_{RMR}$	0.795	0.632	0.614	34.366	0.000	0.427	34.940
3	$CP_1 = 1208.73 Q^{0.723}$	0.769	0.592	0.571	29.005	0.000	0.449	35.618
4	$CP_1 = 0.018 GSI^{2.868}$	0.685	0.470	0.442	17.634	0.000	0.513	41.242
5	$CP_1 = 460.956 + 405.87RMI$	0.844	0.712	0.698	49.523	0.000	0.348	28.921
6	$FSSA = 3.380 - 0.016 RQD$	0.535	0.287	0.251	8.032	0.010	0.291	50.454

جدول ۱۴- بهترین روابط رگرسیونی ساده بین CP_1 با نرخ نفوذ و نیروی پیشران

Mode l No	Equation	R	R ²	Adjusted R ²	F	P value	Standard error	MAPE %
1	$PRev = 10.32 - 0.001 CP_1$	0.868	0.754	0.742	61.296	0.000	0.895	33.332
2	$Thrust = 476.27 + 0.057 CP_1$	0.709	0.502	0.477	20.164	0.000	81.154	50.818

جدول ۱۵- بهترین روابط رگرسیونی چندگانه خطی و غیرخطی بین نرخ نفوذ با CP_1 و RQD

Mode l No	Equation	R	R ²	Adjusted R ²	F	P value	Standard error	MAPE %
1	$PRev = 13.489 - 0.052RQD - 0.001CP_1$	0.898	0.807	0.786	39.629	0.000	0.813	8.986
2	$CP_1^{1.74} - 113.876 RQD^{0.045}$	0.903	0.816	0.807	88.677	0.000	0.773	8.821

۴-۳- ارتباط بین نرخ نفوذ و طبقه بندی تراشه شدن

برای بررسی ارتباط بین نرخ نفوذ و طبقه بندی تراشه شدن از حدود آستانه موجود در جدول ۴ استفاده شده است. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، سه وضعیت تراشه شدن زیاد (High chipping)، تراشه شدن متوسط (Moderate chipping) و خرد شدن (Grinding) سنگ در محور افقی شکل ۳ نشان داده شده است. بین نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ ضریب تعیین قابل قبول $0.754/0$ بدست آمده است. با توجه به طبقه بندی تراشه شدن سه وضعیت بر روی شکل قابل مشاهده است. ۱- تراشه شدن زیاد: که مقدار آن کمتر از ۱۵۰۰ و بیشترین نرخ نفوذ در آن اتفاق افتاده است. ۲- تراشه شدن متوسط: که مقدار آن بین ۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ و به تدریج نرخ نفوذ در حال کاهش است. ۳- خرد شدن: که مقدار

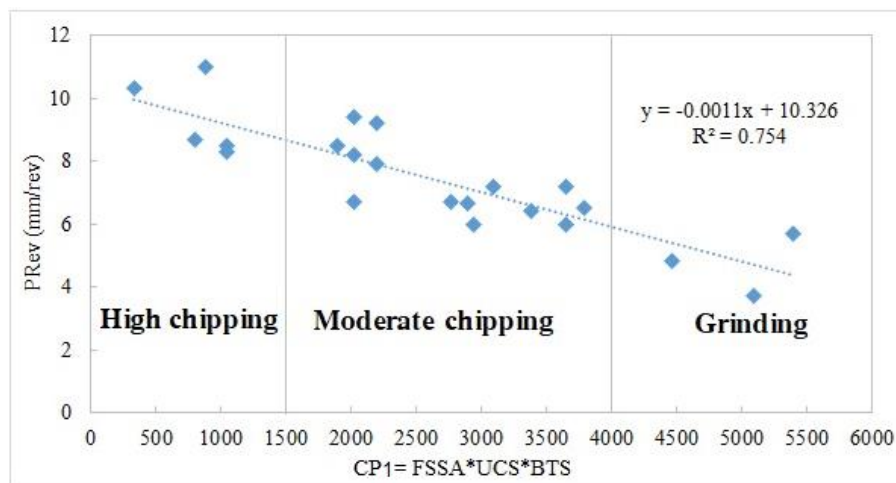
آن بیش از ۴۰۰۰ و کمترین نرخ نفوذ در این مقاطع رخ داده است. بنابراین بیشترین نرخ نفوذ در فاکتور تراشه شدن کمتر از ۱۵۰۰ و کمترین نرخ نفوذ در فاکتور تراشه شدن بیشتر از ۴۰۰۰ رخ می‌دهد. این نتیجه با جدول ۴ پیشنهادی توسط ویلنو در سال ۲۰۰۸ تطابق بسیار خوبی نشان می‌دهد. همچنین ویلنو [۳۰] پیشنهاد کرد که با قرار دادن نرخ نفوذ در برابر نیروی پیشران می‌توان شرایط تراشه شدن و خرد شدن سنگ‌ها را مشاهده کرد، که در شکل ۴ به این موضوع پرداخته خواهد شد. در ادامه در مورد تراشه شدن زیاد، تراشه شدن متوسط و خرد شدن واحدهای زمین شناسی مهندسی به کمک شکل ۴ پرداخته می‌شود. همچنین برای ارزیابی نرخ نفوذ و نیروی پیشران مرزهای ژئوتکنیکی به کمک فرآیند تراشه شدن سنگ‌ها ارائه خواهد شد. در شکل ۴ ارتباط بین نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ‌ها در واحدهای زمین شناسی

۲۵۰ تا ۶۷۰ کیلونیوتن متغیر است (شکل ۵). تراشه شدن زیاد در نرخ نفوذ بیش از ۸ میلی متر و مقدار نیروی پیشران کمتر از ۲۵۰ کیلونیوتن بدست آمده است (شکل ۵). خرد شدن سنگ های آذرین گرانیتی (MDg 20303, MDg 19280) و دگرگونی هورنفلس (Phschmb 29297) با افزایش نیروی پیشران (بیش از ۶۷۰ کیلونیوتن) و کاهش مقدار نرخ نفوذ (۳/۵ تا ۶ میلی متر بر دور) همراه بوده است (شکل ۵). بنابراین بین نرخ نفوذ و نیروی پیشران رابطه عکس و همچنین بین نیروی پیشران و تراشه شدن سنگ رابطه عکس وجود دارد. می توان نتیجه گرفت بین نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ ها هم رابطه عکس وجود دارد. زیرا با افزایش مقاومت فشاری و کششی سنگ ها میزان نرخ نفوذ کاهش می یابد. در ادامه به بررسی ارتباط بین شاخص شکنندگی (UCS×BTS/2) با تراشه شدن سنگ ها پرداخته می شود. در شکل ۶ ارتباط بین شاخص شکنندگی با تراشه شدن سنگ ها در واحدهای زمین شناسی مهندسی مختلف نشان داده شده است. اختلاف بین دو منحنی شکنندگی و تراشه شدن ناشی از ترکیب سه فاکتور کانی شناسی، اندازه دانه و فابریک دانه (FSSA) است. این فاکتورها در همه واحدهای زمین شناسی مهندسی متفاوت می باشد. اما این اختلاف (منحنی شکنندگی و تراشه شدن) در واحدهای آذرین کمتر و در واحدهای کربناته و شیلی (MI, Md, D (dsch)) بیشتر است. علت این پدیده را می توان به تاثیر بیشتر پارامترهای بافتی نسبت به پارامترهای کانی شناسی در سنگ های کربناته دانست. زمانیکه مقدار این شاخص به کمتر از ۴۰۰ مگاپاسکال به توان ۲ برسد، مقدار تراشه شدن (کمتر از ۱۵۰۰ مگاپاسکال به توان ۲) افزایش پیدا می کند. زمانیکه مقدار شاخص شکنندگی به بیشتر از ۱۰۵۰ مگاپاسکال به توان ۲ برسد، مقدار تراشه شدن (بیش از ۱۵۰۰ مگاپاسکال به توان ۲) کاهش یافته و خرد شدن سنگ بیشتر خواهد شد. در محدوده بین ۴۰۰ تا ۱۰۵۰ مگاپاسکال به توان ۲ تراشه شدن متوسط (۱۵۰۰ تا ۴۰۰۰ مگاپاسکال به توان ۲) اتفاق افتاده است. تشابه روند شاخص شکنندگی و تراشه شدن سنگ ها را می توان به دلیل مبنای مشترک این دو شاخص یعنی انرژی ذخیره شده در سنگ دانست. زمانیکه سنگ تحت تنش ناشی از نیروی پیشران قرار می گیرد، زون خرد شده که بیانگر مقاومت فشاری تک محوری سنگ است، ایجاد می شود. سپس رشد ترک ناشی از ترک های

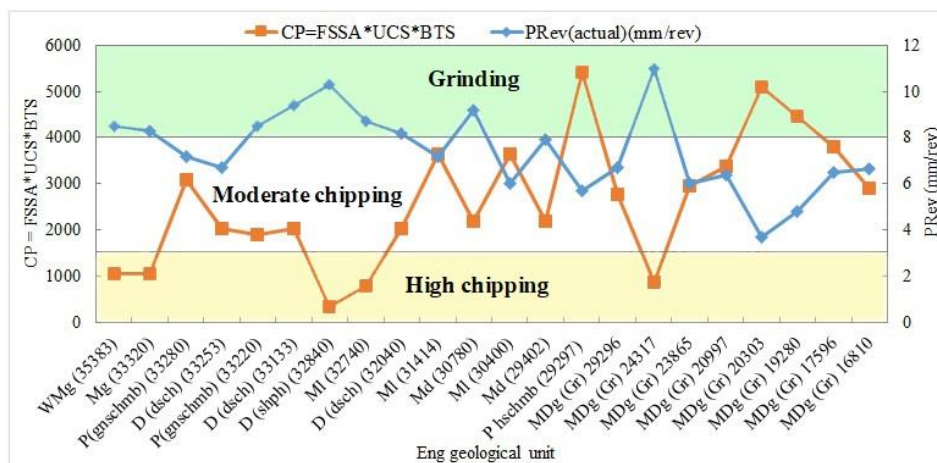
مهندسی مختلف نشان داده شده است. منحنی آبی رنگ نرخ نفوذ واقعی و منحنی نارنجی رنگ مقدار تراشه شدن سنگ ها را نشان می دهد. به عنوان مثال واحد گرانیتی (MDg 24317) بیشترین نرخ نفوذ (نقطه لوزی شکل و آبی رنگ) در حدود ۱۱ میلی متر بر دور و تراشه شدن زیاد (نقطه مربع شکل و نارنجی رنگ) در حدود ۱۰۰۰ مگاپاسکال به توان ۲ را دارد. بیشترین تراشه به ترتیب در واحد شیلی (Dshph 3240)، واحد کلسیت دولومیتی (MI 32740) و واحدهای گرانیتی (WMg 35383, Mg 33320, MDg 24317) ایجاد شده است (نقاط مربع نارنجی رنگ در محدوده نارنجی رنگ High chipping). در واحدهای گرانیتی (WMg 35383, Mg 33320) فاصله داری ۲۰ تا ۶۰ سانتی متری (جدول ۷) به همراه هواز دگی باعث افزایش نرخ نفوذ و تراشه شدن در این واحدهای زمین شناسی مهندسی شده است. واحد گرانیتی (MDg 24317) به دلیل عملکرد گسل شاوله بیض آباد در این کیلومتر از چهار هواز دگی شده و نرخ نفوذ تا ۱۱ میلی متر بر دور افزایش یافته است. کمترین تراشه یا به عبارتی بیشترین خرد شدگی (Grinding) در واحد هورنفلس (Phschmb 29297) و گرانیت های (MDg 20303, MDg 19280) اتفاق افتاده است. در واحد هورنفلسی به دلیل عدم وجود تورق و مقاومت فشاری تک محوری بیش از ۱۵۲ مگاپاسکال نرخ نفوذ کاهش یافته و خرد شدگی سنگ رخ داده است. در واحدهای گرانیتی به دلیل فاصله داری درزه ها بیش از ۲ متر نرخ نفوذ کاهش یافته است. در حالت کلی می توان گفت فاصله داری درزه ها تاثیر بیشتری بر مقاومت ماده سنگ دارد. زیرا زمانیکه با افزایش درزه های انقباضی ناشی از سرد شدن ماگمای گرانیتی فاصله داری درزه ها کم می شود، توده سنگ باعث افزایش نرخ نفوذ و زمانیکه فاصله داری درزه ها ناشی از تکتونیک منطقه افزایش می یابد، ماده سنگ باعث کاهش نرخ نفوذ می شود. بیشتر واحدهای زمین شناسی مهندسی دچار تراشه شدن متوسط شده اند، که اکثر نقاط نرخ نفوذ ۳ تا ۸ میلی متر بر دور دارند. این دامنه نرخ نفوذ را می توان به عنوان تراشه شدن متوسط سنگ ها پیشنهاد کرد. هم چنین نرخ نفوذ کمتر از ۳ میلی متر بر دور را به عنوان حالت خرد شدن و نرخ نفوذ بیش از ۸ میلی متر بر دور را به عنوان تراشه شدن زیاد در نظر گرفت. مقدار نیروی پیشران در محدوده تراشه متوسط در محدوده

روی تونل‌های حفاری شده دیگر حد و مرزهای ژئوتکنیکی ارائه شده را تدقیق و برای پیش بینی و بهبود حفاری در پروژه‌های دیگر مورد استفاده قرار داد.

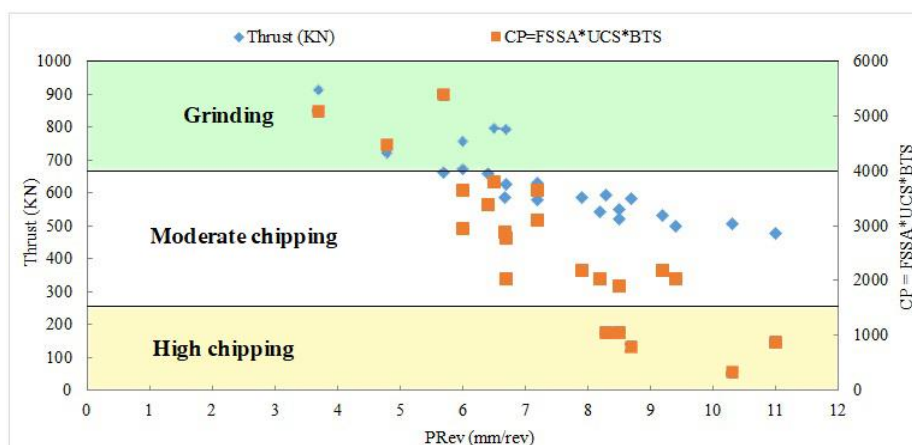
کششی ایجاد و منجر به آزاد شدن انرژی و پرتاب تراشه‌های سنگی می‌شود. در پایان خلاصه حد و مرزهای ژئوتکنیکی و حفاری جدید تونل بدست آمده در این پژوهش در جدول ۱۶ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در این جدول نتایج پژوهش‌های گذشته از جمله پورهاشمی و همکاران [۱۶-۱۵] را که در پیش گفتار این مقاله اشاره شده است، تایید می‌کند. پیشنهاد می‌شود با انجام مطالعات بیشتر بر



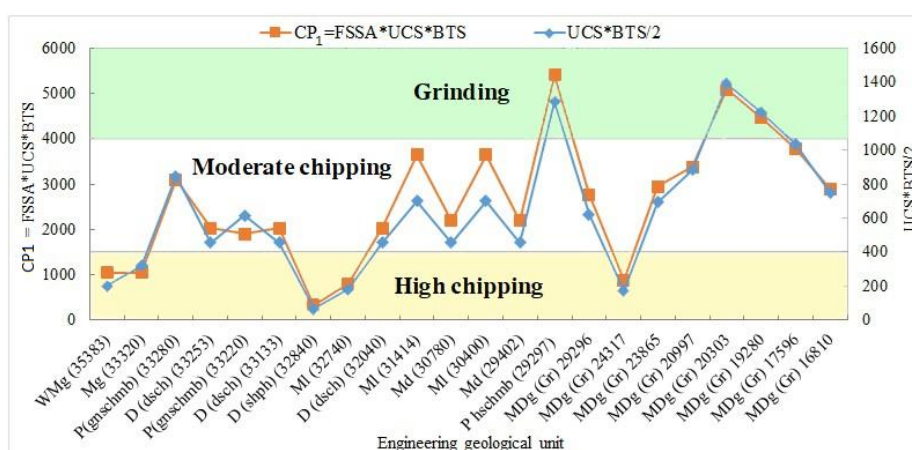
شکل ۳- ارتباط بین نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ‌ها



شکل ۴- ارتباط بین نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ‌ها در واحدهای زمین شناسی مهندسی مختلف



شکل ۵- ارتباط بین نیروی پیشران، نرخ نفوذ و تراشه شدن سنگ‌ها در واحدهای زمین شناسی مهندسی مختلف



شکل ۶- ارتباط بین شاخص شکنندگی با تراشه شدن سنگ‌ها در واحدهای زمین شناسی مهندسی مختلف

جدول ۱۶- خلاصه حد و مرزهای ژئوتکنیکی و پارامترهای حفاری تونل

Chipping type	Chipping (CP_1) (Mpa^2)	Brittleness index (Mpa^2)	Penetration rate (mm/rev)	Thrust (Ton)
High chipping	$1500 <$	$400 <$	$8 >$	$250 <$
Moderate chipping	$1500 - 4000$	$400 - 1050$	$3 - 8$	$250 - 670$
Grinding	$4000 >$	$1050 >$	$3 <$	$670 >$

ارزیابی فاکتورهای تراشه شدن سنگ‌ها از روش‌های آماری رگرسیون ساده، رگرسیون چندگانه خطی و غیرخطی استفاده شده است. بهترین رابطه رگرسیونی ساده بین CP_1 و سیستم طبقه بندی توده سنگ RQD به عنوان یک پارامتر مستقل وجود دارد. این رابطه دارای ضریب تعیین ($R^2 = 0.711$) و خطای ($MAPE = 31.185$) است. ارتباط بین نرخ نفوذ با فاکتور تراشه شدن سنگ نشان دهنده بهترین ضریب تعیین

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش ارتباط بین فاکتورهای زمین شناسی تراشه شدن سنگ‌ها با نرخ نفوذ و سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار از داده‌های واحدهای زمین شناسی مسیر تونل انتقال آب گلاس در نزدیکی شهرستان نقده از توابع استان آذربایجان غربی استفاده شده است. برای

نفوذ و CP_1 شده است. روابط جدید ارائه شده به همراه حد و مرزهای ژئوتکنیکی پیشنهاد شده در فاز اول مطالعاتی می‌تواند به طراحان تونل برای پیش بینی نرخ نفوذ و در فاز حفاری به بهبود حفاری تونل کمک کنند. زیرا نرخ نفوذ تعیین‌کننده بخش عمده هزینه و زمان حفاری تونل است.

سیاس‌گذاری

نگارندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از شرکت مهندسی ایمن سازان به دلیل کمک به جمع‌آوری داده‌های صحرائی ابراز می‌دارند.

($R^2 = 0.754$) و کمترین مقدار خطا ($MAPE = 33.332$) در بین تمامی پارامترهای عملکردی دستگاه حفاری است. بهترین روابط رگرسیونی چندگانه غیرخطی بین نرخ نفوذ با CP_1 و RQD است. مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.816$) و مقدار خطا ($MAPE = 8.821$) نشان دهنده رابطه قوی با نرخ نفوذ است. بیشترین نرخ نفوذ در فاکتور تراشه شدن کمتر از ۱۵۰۰ و کمترین نرخ نفوذ در فاکتور تراشه شدن بیشتر از ۴۰۰۰ رخ داده است. همچنین بیشترین نیروی پیشران بیش از ۶۷۰ تن در فاکتور تراشه شدن بیش از ۴۰۰۰ و کمترین نیروی پیشران کمتر از ۲۵۰ تن در فاکتور تراشه شدن کمتر از ۱۵۰۰ رخ داده است. پارامتر CP_1 به دلیل ارتباط قوی با رابطه شکنندگی و اثر مثبت شکنندگی بر روی نرخ نفوذ باعث ارتباط مطلوب بین نرخ

۶- منابع‌ها

- [1] Roxborough, F. & Phillips, H. (1975). Rock excavation by disc cutter. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 12 (12), 361-366. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(75\)90547-1](https://doi.org/10.1016/0148-9062(75)90547-1).
- [2] Ozdemir, L., Miller, R. & Wang, F. (1977). *Mechanical tunnel boring prediction and machine design*. Annual report: Colorado School of Mines, Excavation Engineering and Earth mechanics Inst report, Washington, 332p. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91060-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91060-4).
- [3] Buchi, E. (1984). *Einfluss geologischer Parameter auf die Vortriebsleistung einer Tunnelbohrmaschine*. Dissertation Thesis, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, Bern, 136 p.
- [4] Rostami, J. (1997). *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*. Dissertation Thesis, Colorado School of Mines, 384 p.
- [5] Gehring, K. (1997). Classification of drillability, cuttability, boreability and abrasivity in tunneling. *Felsbau Magazine*, 15(3), 183-191.
- [6] Yagiz, S., & Yazitova, A. (2019). Using intact rock brittleness for assessing TBM penetration. *Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*. Rome, Italy, (122), 1-9. <https://doi.org/10.11159/icgre19.122>.
- [7] Jeong, H, Choi, S., Lee, S. & Jeon, S. (2019). Relationship between brittleness of rock, CAI and cutting performance of a TBM disc cutter. *The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19) Jeju Island, Korea, 17-21, 1-15*. http://www.iasem.org/publication_conf/asem19/7.TS/XH5D.6.TS1401_5704F1.pdf
- [8] Lindqvist, P.A. & Lai, H.H. (1983). Behavior of the crushed zone in rock indentation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 16, 199-207. <https://doi.org/10.1007/BF01033280>
- [9] Gong, Q., Zhao, J. & Jiao, Y. (2005). Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20 (2), 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.006>.
- [10] Barton, N. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. Rotterdam (Balkema), ISBN 9789058093417
- [11] Gertsch, R. (2000). *Rock toughness and disc cutting*. Dissertation Thesis, Univ. of Missouri-Rolla, Missouri.
- [12] Kasling, H. (2009). *Bestimmung der Gesteinsabrasivität - Grundlagen, Anwendung und Einsatzgrenzen bei maschinellen Tunnelvortrieben*. Dissertation Thesis, Technische Universität München, München.

- [13] Lislerud, A. (1997). *Principles of mechanical excavation*, Helsinki (Finland), 186 p. ISBN-13: 978-9516520370
- [14] Villeneuve, M.C. (2008). *Examination of geological influence on machine excavation of highly stressed tunnels in massive hard rock*. Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 832p. <http://hdl.handle.net/1974/1517>.
- [15] Pourhashemi, S.M, Ahangari, K., Hassanpour, J., & Eftekhari, S.M. (2021). Analysis of Grinding and Chipping Processes beneath Disc Cutters of Hard Rock Tunnel Boring Machines (Case study: Uma-Oya water Conveyance Tunnel, SriLanka), *Journal of Mining and Environment*, 12 (1), 281-297, <https://doi.org/10.22044/jme.2021.10425.1993>.
- [16] Pourhashemi, S.M, Ahangari, K., Hassanpour, J., & Eftekhari, S.M. (2021). Penetration rate analysis for tunnel boring machine in grinding conditions. *Journal of Mining Engineering*. 16 (52), 79-88. [In Persian]. Doi:10.22034/IJME.2021.136708.1831.
- [17] Villeneuve, M.C., Diederichs, M.S. & Kaiser, P.K. (2012). Effects of Grain Scale Heterogeneity on Rock Strength and the Chipping Process. *International Journal of Geomechanics*, 12, 632-647. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000194)
- [18] Shea, W.T. & Kronenberg, A.K. (1993). Strength and anisotropy of foliated rocks with varied mica contents. *Journal of Structural Geology*, 15(9-10), 1097-1121, [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90158-7](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90158-7).
- [19] Nasser, M.H., Rao, K.S., & Ramamurthy, T. (1997). Failure Mechanism in Schistose Rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 34(3-4), 219e1-219e15, [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)00099-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)00099-3)
- [20] Aghanabati, A. (2010). *Geology of Iran*. 3rd Edition, Geological Survey of Iran, 586 p. [In Persian]
- [21] Imensazan Consulting Engineers Company, (2014). *Engineering geology report*. Gelas conveyor tunnel part 2, 218p. [In Persian]
- [22] ISRM, (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization. Testing and Monitoring (1974-2006) Suggested Methods Prepared by The Commission Testing Methods, International Society for Rock Mechanics*, R Ulusay and J A Hudson (Eds.) Compilation Arranged by The ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey. ISBN: 978-3-319-07713-0.
- [23] ISRM, (1981). *Rock characterization testing and monitoring ISRM suggested methods, suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*, Part 3, 21, 101-103. ISBN: 978-3-319-07712-3
- [24] Grima, M.A. & Babuska, R. (1999). Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, 36 (3), 339-349, [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00007-8](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00007-8).
- [25] Kianpour, M., Sayari, M. and Oromiea, A. (2010). A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of Shemshak formation shales. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*. 21(83), 103-110. [In Persian with English Abstract]. <https://doi.org/10.22071/gsj.2012.54525>.
- [26] Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P. & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49 (4), 764-766. DOI:10.1016/J.JESP.2013.03.013.
- [27] McKenzie, J. (2011). Mean absolute percentage error and bias in economic forecasting. *Economics Letters*, 113(3), 259-262. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2011.08.010>.
- [28] Jamshidi, A. (2018). Prediction of TBM penetration rate from brittleness indexes using multiple regression analysis, *Modeling Earth Systems and Environment*, 4, 383-394, <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0432-2>.
- [29] Karrari, S.S., Haidari, M., Khademi Hamidi, J. and Sharifi Teshnizi, E. (2022). The assessment of rock brittleness effect on drillability. *Advanced applied geology*. 11 (4), 671-689. [In Persian with English Abstract]. Doi: 10.22055/AAG.2020.31787.2063.
- [30] Villeneuve, M.C. (2017). Hard rock tunnel boring machine penetration test as an indicator of chipping process efficiency, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9, 611- 622. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.008>



The effect of rock chipping on the penetration rate of tunnel boring machine

Seyed Sajjad Karrari¹; Mojtaba Heidari^{1*}; Ebrahim Sharifi Teshnizi²

1. Department of Geology, Faculty of Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Received: 2023. February.08; Accepted: 2023.June.11

(* Corresponding author: heidarim-enggeol@yahoo.com)

Keywords

Tunnel boring machine
Rock chipping
Mineralogy
Grain size
Grain fabric

Final English Extended Abstract

Predicting the penetration rate of tunnel boring machine (TBM) with rock geological features of tunnel route has led to the development of experimental models. In this research, the relationship between rock-chipping geological factors such as mineralogy, grain size, and grain fabric has been investigated with penetration rate and rock mass classification systems. For this purpose, the data of engineering geological units of the Gelas water conveyor tunnel route near Naqdeh city have been used. Evaluating the rock chipping factors have been used Simple regression, linear and non-linear multiple regression statistical methods. The best non-linear multiple regression relationship exists between penetration rate with chipping (CP_1) and the RQD. The coefficient of

determination value ($R^2 = 0.816$) and the error value ($MAPE = 8.821$) indicated a strong relationship with the penetration rate. Based on the new suggested geotechnical boundaries, the highest penetration rate of more than 8 mm/rev has occurred in the chipping factor of less than 1500, and the lowest penetration rate of less than 3 mm/rev in the chipping factor of more than 4000.

Summary

The purpose of this research is to investigate the relationship between the rock chipping of the Gelas tunnel route with the penetration rate of TBM by using mineralogy, grain size grain fabric, and the geotechnical threshold presented between rock chipping and excavation parameters.

Introduction

Predicting the penetration rate of TBM with rock geological features of the tunnel route has led to the development of experimental models. In these models, engineering geological features such as strength parameters and rock mass classification systems are often used. However, in this research, these features mentioned above and rock geological factors such as mineralogy, grain size, and grain fabric have been applied.

Methodology and Approaches

In this research, igneous, sedimentary, and metamorphic rocks were sampled and tested. Thin sections from rock samples were prepared. Physical tests and mechanical tests have been performed based on ISRM (2007). The rock joint properties are based on ISRM (1981) performed. The rock mass classification systems such as RQD, RMR89, GSI, Q, and RMI were performed.

Results and Conclusions

The highest penetration rate occurred in a chipping factor less than 1500 and the lowest penetration rate occurred in a chipping factor more than 4000. In addition, the highest thrust force of more than 670 Tons occurred in chipping factor more than 4000 and the lowest thrust force of less than 250 Tons occurred in the chipping factor less than 1500.