

توسعه شاخص حفرپذیری توده سنگ درزه دار بر اساس شاخص شکست سنگ در حفاری با TBM

مرتضی خسروی^۱؛ احمد رمضانزاده^۲؛ شکراله زارع^۲

۱- دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه دار در حفاری با ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل یکی از مسائل مهم در ارزیابی فنی و اقتصادی یک پروژه تونل‌سازی می‌باشد. با توجه به تأثیر پارامترهای مختلف در حفرپذیری توده سنگ، تاکنون مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی این موضوع ارائه گردیده است. هدف این تحقیق ارائه مدلی جدید بر اساس توسعه شاخص شکست سنگ برای توده سنگ درزه دار به منظور پیش‌بینی حفرپذیری آن می‌باشد. برای این هدف در ابتدا بانک اطلاعاتی از پارامترهای ژئومکانیکی، مشخصات هندسی درزه‌ها (فاصله‌داری و زاویه) و عملیاتی ماشین حفار دو پروژه تونل انتقال آب کوئینز در آمریکا و تونل بلند زاگرس (قطعه ۲) در ایران تشکیل گردیده است. سپس فاکتور خردایش کل (ارائه شده توسط برولند در سال ۱۹۷۹) محاسبه و با استفاده از نرم‌افزار SPSS و روش‌های رگرسیون غیرخطی شاخص شکست بدست آمده در آزمایشگاه برای توده سنگ درزه دار توسعه داده شده است. در ادامه نیز شاخص حفرپذیری بر اساس شاخص شکست توده سنگ درزه دار توسعه داده که ضریب همبستگی این شاخص ۰/۸ می‌باشد. مدل جدید در قطعه شمالی تونل انتقال آب کرمان مورد ارزیابی قرار گرفته که نتایج بیانگر وجود مطابقت مناسب بین حفرپذیری پیش‌بینی شده با حفرپذیری واقعی می‌باشد.

واژگان کلیدی

توده سنگ درزه دار، شاخص حفرپذیری، شاخص شکست سنگ، ماشین حفاری مکانیزه

۱-مقدمه

یکی از تحولات بزرگ در صنعت تونل‌سازی، ابداع ماشین‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع تونل (Tunnel Boring Machine TBM)؛ می‌باشد. این ابداع نه تنها بر پیشرفت علم تونل‌سازی تأثیر زیادی داشته بلکه شاخص‌های توسعه کشورها را نیز تحت تأثیر قرار داده است. یکی از موضوعات کلیدی در استفاده از این ماشین‌ها، پیش‌بینی عملکرد آن‌ها به منظور تحقق اهداف استاندارد مدیریت پروژه (PMBOK: Project Management Body Of Knowledge) در یک پروژه تونل‌سازی می‌باشد. تاکنون مطالعات زیادی در خصوص پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل و شناسایی و کمی نمودن اثر پارامترهای توده سنگ در عملکرد آن‌ها شده است. محققین برای پیش‌بینی عملکرد TBM‌ها تاکنون شاخص‌های

مختلفی را تعریف و مورد استفاده قرار داده‌اند. خلاصه این شاخص‌ها در جدول ۱ آورده شده است [1]. یکی از این شاخص‌ها که بیشتر مورد توجه محققین قرار گرفته، نرخ نفوذ می‌باشد. محققان از سال ۱۹۶۰ تلاش کرده‌اند تا با بررسی تأثیر پارامترهای مختلف سنگ و ماشین در نرخ نفوذ، مدل‌هایی را برای پیش‌بینی این موضوع ارائه دهند. مدل‌های ارائه شده تاکنون بر دو مبنای تجربی و تئوری می‌باشند. مدل‌های تئوری بر اساس انجام آزمایش برش خطی (LCT^1) بر روی دیسک برشی در سنگ‌های مختلف و تخمین نیروهای نرمال و چرخشی دیسک برای انجام خردایش سنگ می‌باشد. از تخمین این نیروها برای برآورد نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و همچنین

¹ Liner Cutting Test

برآورد حداکثر نرخ نفوذ TBM استفاده می‌شود. یکی از معروف‌ترین مدل‌های تئوری، مدل توسعه داده شده توسط مدرسه معدن کلرادو (CSM¹) (نیلسن و اوزدمیر² (۱۹۹۳)، رستمی و اوزدمیر (۱۹۹۳)، رستمی و همکاران (۱۹۹۶)، رستمی (۱۹۹۷)) می‌باشد [2] و [3]. مدل‌های تجربی بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده از عملکرد TBM‌ها در پروژه‌های مختلف تونلی می‌باشد. این نوع مدل‌ها از همگرایی بین خصوصیات سنگ، پارامترهای ماشین و نرخ نفوذ واقعی بدست آمده‌اند. در میان مدل‌های تجربی، معروف‌ترین مدل، مدل توسعه‌یافته در دانشگاه علوم و تکنولوژی نروژ (NTNU³) (برولند و همکاران (۱۹۹۵)، برولند و نیلسن⁴ (۱۹۹۵)، پالمستروم⁵ (۱۹۹۵)، برولند (۱۹۹۸)) می‌باشد [4] و [5]. علاوه بر این مدل‌ها، مدل‌های مهم دیگری نیز همچون یانگیز⁶ (۲۰۰۸، ۲۰۰۲)، بارتن⁷ (۲۰۰۰)، رمضان‌زاده (۲۰۰۵، ۲۰۰۸)، بیناوسکی و همکاران⁸ (۲۰۰۶)، گانگ و ژائو⁹ (۲۰۰۹)، خادمی و همکاران (۲۰۱۰)، حسن‌پور و همکاران (۲۰۱۰، ۲۰۱۱)، فرخ و همکاران (۲۰۱۲)، زارع‌نقده و همکاران (۲۰۱۶)، مدل آلپین¹⁰ (۲۰۱۶)، بروز رسانی NTNU (۲۰۱۷) و مدل امتیاز سنگ درزه‌دار (RJR¹¹) (۲۰۱۸) ارائه گردیده است [6]، [7]، [8]، [9]، [10]، [11]، [12]، [13]، [14]، [15]، [16]، [17]، [18]، [19] و [20]. معایب این مدل‌ها معمولاً شامل عدم لحاظ کردن تأثیر پارامترهای درزه‌داری توده سنگ و یا عدم لحاظ کردن پارامترهای راهبری TBM می‌باشد. یکی دیگر از شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی عملکرد TBM‌ها، شاخص حفری توده سنگ می‌باشد. شاخص حفری توده سنگ، پارامتر جامعی است که منعکس‌کننده تعامل بین توده سنگ و ابزار برش می‌باشد. کمیسیون فنی و مهندسی سیستم‌های ایالات متحده آمریکا (۱۹۸۴) حفری توده سنگ را پارامتری که بیانگر خصوصیت سنگ از نظر ضریب نفوذ دیسک (با تعداد و نوعی مشخص) تحت اعمال مقدار معینی نیرو، تعریف کرده است [21]. همیلتون و دالینجر¹² در سال ۱۹۷۹ از شاخص نفوذ صحرایی (FPI¹³) برای توصیف حفری توده سنگ استفاده کرده که این شاخص، نسبت نیروی پیشران در کله‌حفار به مقدار نفوذ دیسک در هر دور چرخش کله‌حفار می‌باشد [22]. گانگ در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد استفاده از شاخص ویژه حفری توده سنگ (SRMBAI¹⁴) برای ارزیابی ویژگی حفری

توده سنگ را داد. این شاخص عبارت است از نیروی نرمال وارد بر کله‌حفار برای نفوذ به مقدار یک میلی‌متر در هر دور چرخش می‌باشد [23].

تحقیقات انجام‌شده در خصوص ارتباط شاخص حفری توده سنگ بدست آمده از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی (به وسیله آزمایش برش خطی) با نرخ نفوذ در تونل کوزایتاگی-کادیکوی¹⁵ در ترکیه نشان‌دهنده افزایش نرخ نفوذ با کاهش شاخص حفری توده سنگ می‌باشد. همچنین این بررسی بیانگر وجود رابطه بین شاخص حفری توده سنگ با نرخ نفوذ می‌باشد. گانگ و ژائو در سال ۲۰۰۹ بر اساس مکانیزم خردایش سنگ به وسیله TBM و با تشکیل بانک اطلاعاتی از دو پروژه تونل‌سازی در سنگاپور، رابطه‌ای را برای بدست آوردن شاخص ویژه حفری توده سنگ ارائه دادند. در این رابطه تأثیر پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری (UCS¹⁶)، شاخص شکنندگی سنگ (BI¹⁷)، حجم درزه‌داری (Jv¹⁸) و زاویه بین محور تونل با صفحه درزه (α¹⁹) و نیروی پیشران کله‌حفار لحاظ شده است [12]. حسن‌پور و همکاران در سال ۲۰۱۰ رابطه‌ای تجربی برای پیش‌بینی حفری توده سنگ ارائه داده که در این رابطه پارامترهای UCS، فاصله‌داری درزه، نیروی پیشران و همچنین گشتاور کله‌حفار لحاظ شده است [14]. او همچنین در سال ۲۰۱۱ رابطه دیگری ارائه داد که در این رابطه شاخص کیفی سنگ (RQD²⁰) را جایگزین فاصله‌داری درزه در رابطه ارائه‌شده در سال ۲۰۱۰ کرد [15]. خادمی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۰ رابطه‌ای را برای اندازه‌گیری FPI ارائه کردند که این رابطه شامل پارامترهای UCS، RQD، زاویه صفحه درزه با محور تونل و Jc²¹ می‌باشد [13]. در سال ۲۰۱۲، فرخ رابطه‌ای برای پیش‌بینی حفری توده سنگ که در این رابطه پارامترهای UCS، RQD، CAI²² لحاظ شده است [16]. دلیسیو و همکاران²³ در سال ۲۰۱۳ نیز رابطه‌ای را برای اندازه‌گیری FPI در سنگ‌های بلوکی (FPI_{blocky}) ارائه نمود که این رابطه بر مبنای دو پارامتر UCS و Jv می‌باشد [24]. در سال ۲۰۱۵ رابطه‌ای نیز توسط سلیمی و همکاران ارائه شده که این رابطه متشکل از پارامترهای UCS و فاصله‌داری درزه می‌باشد [26]. زارع-نقده و همکاران در سال ۲۰۱۶، رابطه ارائه کردند که در این رابطه تأثیر پارامترهای زاویه صفحه درزه با محور تونل، فاصله‌داری درزه و DRI²⁴ لحاظ شد [17].

¹ Colorado School of Mines

² Nilsen & Ozdemir

³ Norwegian University of Science and Technology

⁴ Bruland and Nilsen

⁵ Palmstrom

⁶ Yagiz

⁷ Barton

⁸ Bieniawski et al.

⁹ Gong and Zhao

¹⁰ Alpine model

¹¹ Rock Joint Rate

¹² Hamilton and Dollinger

¹³ Filed Penetration Index

¹⁴ Special Rock Mass Boreability Index

¹⁵ Kozyatagi-Kadikoy

¹⁶ Uniaxial Compressive Strength

¹⁷ Brittleness Index

¹⁸ Joint Volume

¹⁹ Alpha

²⁰ Rock Quality Designation

²¹ Joint condition rating in RMR

²² Cerchar Abrasivity Index

²³ Delisio et al.

²⁴ Drilling Rate Index

جدول ۱- خلاصه شاخص‌های مورد استفاده در پیش‌بینی عملکرد TBM ها [1]

پارامتر	نماد	رابطه	واحد
نرخ نفوذ	PR	-	m/h, mm/min
نرخ نفوذ در دور	PRev	$(1000 \times PR) / (60 \times RPM)$	mm/rev
نرخ نفوذ ویژه	SP	$PRev / Fn$	(mm/rev)/(kN/cutter)
شاخص نفوذ صحرایی	FPI	$Fn / PRev$	(kN/cutter)/(mm/rev)
نرخ حفاری ویژه	SER	$A \times SP$	$(m^3/rev)/(kN/cutter)$
شاخص حفارپذیری	BI		$(kN/cutter)/(mm/rev)$
شاخص ویژه حفارپذیری توده سنگ	$BI_{(1)}$	$BI \approx BI_{(1)} * PR_{ev}^{-0.75}$	-
شاخص نفوذ صحرایی در سنگ‌های بلوکی	FPI_{blocky}	Fn / PR	kN/(mm/rev)

A: سطح مقطع تونل Fn: نیروی نرمال وارد بر دیسک RPM: سرعت چرخش کله حفار SP: انرژی ویژه BI: شاخص شکست

جدول ۲- مشخصات ماشین حفار هر پروژه [6] و [27]

پارامتر	تونل کوئینز	تونل زاگرس (قطعه ۲)
طول تونل (کیلومتر)	۷/۵	۲۶
نوع TBM	Hard rock Open	Hard rock Double shield
قطر TBM (متر)	۷/۰۵	۷/۷۳
قطر دیسک (میلی‌متر)	۴۸۲	۴۳۲
تعداد دیسک	۵۰	۴۳

در مدل‌هایی که تاکنون ارائه گردیده به اندیس شکست سنگ به عنوان یک پارامتر که میزان تمایل سنگ به توسعه ترک را نشان می‌دهد، کمتر توجه شده است. شاخص شکست، شاخصی در دسترس می‌باشد که می‌توان آن را بر اساس دو شاخص اصلی سنگ بکر (مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی) محاسبه و یا از طریق آزمایش شاخص نفوذ (Punch Penetration Test) بدست آورد.

در این مقاله در ابتدا بانک اطلاعاتی شامل پارامترهای ژئومکانیکی (مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی)، مشخصات هندسی درزه‌ها (فاصله‌داری و زاویه درزه)، شاخص شکست سنگ (بر اساس نتایج آزمایشگاه) و پارامترهای راهبری ماشین حفاری مکانیزه در سه پروژه مختلف تشکیل گردیده است. در ادامه به کمک نرم‌افزار SPSS با استفاده از روش‌های رگرسیون غیر خطی، شاخص شکست سنگ برای توده سنگ درزه‌دار ارائه و بر این اساس شاخص حفارپذیری نیز توسعه داده شده است.

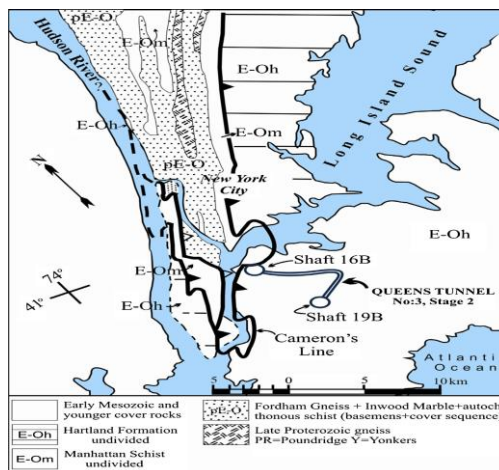
۲- بانک اطلاعاتی

برای توسعه شاخص حفارپذیری توده سنگ درزه‌دار در حفاری با ماشین‌های حفار تمام مقطع تونل، بانک اطلاعاتی از پارامترهای ژئومکانیکی مسیر تونل و پارامترهای عملیاتی ماشین در پروژه‌های تونل انتقال آب کوئینز در آمریکا و تونل بلند زاگرس (قطعه ۲) در ایران تشکیل شده است. مشخصات کلی TBM‌های این دو پروژه در جدول شماره ۲ آورده شده است.

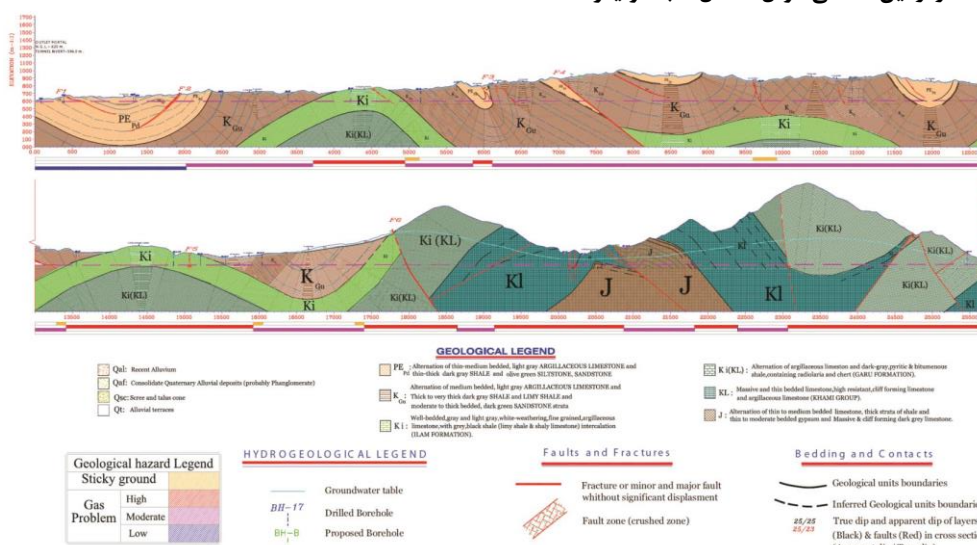
تونل انتقال آب کوئینز در جنوب غربی شهر نیویورک برای بهبود توزیع آب شیرین ساخته شده است. شهر نیویورک در انتهای جنوبی شیست‌های منهتن واقع شده است. در منطقه مورد مطالعه سازندهای زمین‌شناسی بسیار پیچیده و مرکبی از سنگ‌های آذرین دگرگون‌شده مشتمل بر زون‌های برشی، گسل و درزه وجود دارد. در این منطقه پنج ساختار زمین‌شناسی اصلی وجود دارد که در شکل قابل مشاهده می‌باشند. ساختار زمین‌شناسی مسیر تونل عمدتاً شامل گنیس، گرانیت- گنیس، پگماتیت و آمفیبولیت می‌باشد (شکل ۱) [6] [7] و [28].

تونل انتقال آب بلند زاگرس بخشی از طرح انتقال آب به دشت‌های گرمسیری غرب ایران می‌باشد. طول کل تونل حدود ۵۰ کیلومتر که قطعه دوم آن ۲۶ کیلومتر است. قطعه دوم تونل انتقال آب زاگرس از نظر زمین‌شناسی در ناحیه لرستان از زون کمربند چین‌خورده زاگرس قرار دارد. ساختار زمین‌شناسی مسیر تونل عمدتاً شامل شیل و آهک‌های رسی می‌باشد (شکل ۲) [27].

در جدول ۳ دامنه تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی موجود در بانک اطلاعاتی آورده شده است.



شکل ۱- ساختار زمین‌شناسی تونل انتقال آب کوئینز [28]



شکل ۲- نیم‌رخ طولی زمین‌شناسی تونل زاگرس (قطعه ۲) [13]

دارند که تأثیر زیادی در میزان حفری سنگ دارند. مهم‌ترین این پارامترها که تاکنون مورد توجه محققین بوده، مقاومت فشاری تک محوری سنگ، مقاومت کششی و شاخص شکنندگی سنگ می‌باشد.

۱-۳- مقاومت فشاری و کششی ماده سنگ

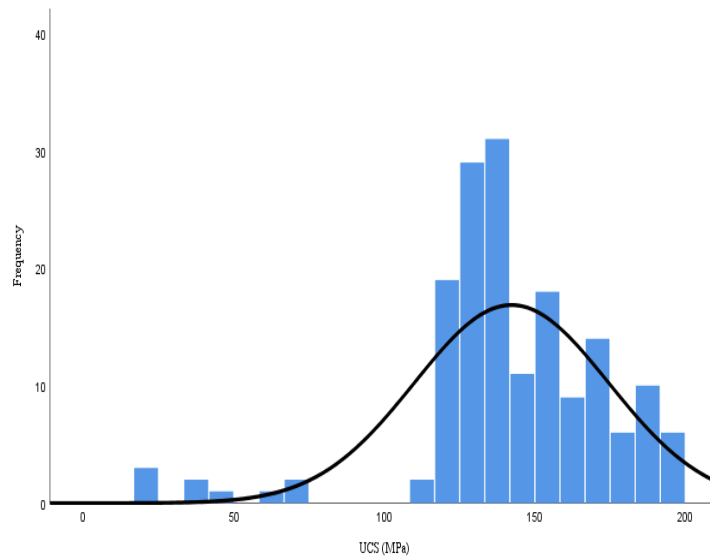
مقاومت فشاری تک محوری سنگ به عنوان یکی از شاخص‌های اصلی برای ارزیابی مقاومت سنگ در برابر نفوذ ابزار برشی می‌باشد [29]. در بسیاری از مدل‌های پیش‌بینی نرخ نفوذ TBM، مقاومت فشاری تک محوری سنگ یکی از پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. در شکل ۳ منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام مربوط به مقاومت فشاری تک محوری در بانک اطلاعاتی تشکیل شده، آورده شده است.

جدول ۳- پارامترهای ژئومکانیکی بانک اطلاعاتی

پارامتر	تعداد مقطع	حداقل	حداکثر
مقاومت فشاری تک محوری (مگاپاسکال)	۱۵	۲۲/۵	۱۹۶/۹
مقاومت کششی (مگاپاسکال)	۱۵	۲	۱۱/۳
زاویه صفحه درزه (درجه)	۱۵	۲	۸۵
فاصله‌داری درزه (سانتی‌متر)	۱۵	۵	۳۰۰

۳- پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ

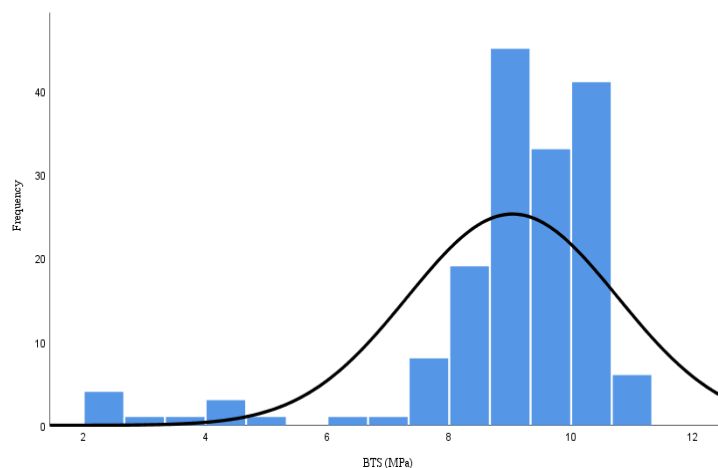
پارامترهایی از سنگ بکر مانند تخلخل، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، خواص الاستیک، چقرمگی، شکنندگی و ... وجود



شکل ۳- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام مقاومت فشاری تک محوری

سنگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودار هیستوگرام و منحنی توزیع مقاومت کششی در شکل ۴ قابل ملاحظه می‌باشد.

مقاومت کششی برزلی یکی دیگر از خواص سنگ بکر می‌باشد که در کنار مقاومت فشاری تک محوری برای پیش‌بینی حفر پذیری



شکل ۴- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام مقاومت کششی

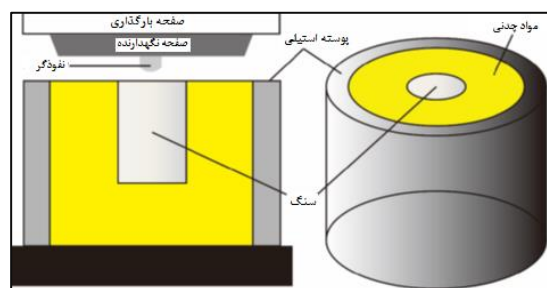
سنگ و ایجاد ارتباط بین شکنندگی سنگ و مسائل موردنظر در زمینه‌های مختلف انجام شده است. با این وجود، به دلیل نبود یک تعریف جامع و یکتا برای مفهوم شکنندگی، محققان روش‌های مختلفی را برای ارزیابی میزان شکنندگی سنگ به کار گرفته‌اند که به طور کلی این روش‌ها بر اساس پارامترهای مقاومتی سنگ، آزمایش نفوذ، تغییر شکل، انرژی، سختی، درصد ذرات ریز، آزمایش بار نقطه‌ای، ترکیب کانی‌شناسی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد [31].

۳-۲- شاخص شکست

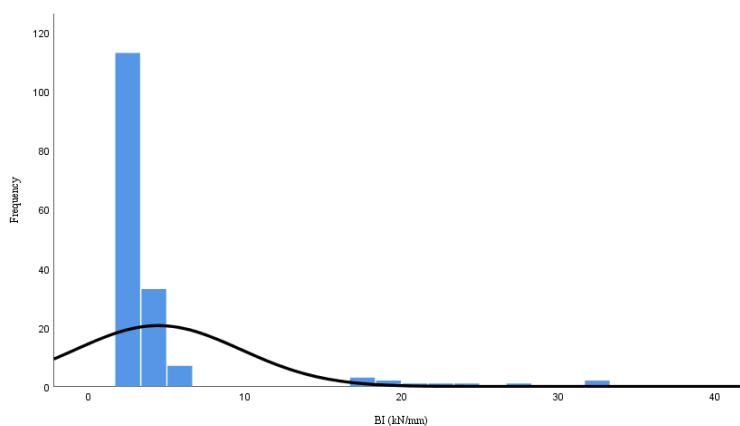
شکنندگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی ماده سنگ است که تأثیر قابل توجهی بر روی فرآیند شکست سنگ بکر و پاسخ توده سنگ به فعالیت‌های تونلی و عمرانی دارد. در واقع شکنندگی نه تنها به عنوان یک ویژگی بلکه ترکیبی از خصوصیات ماده سنگ مطرح است که نقش مهمی در کنترل فرآیند شکست سنگ ایفا می‌کند [30]. تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای توصیف شکنندگی

در این آزمایش، شکل و شیب منحنی بار-نفوذ نشان دهنده انرژی مورد نیاز برای تشکیل تراشه می باشد. یکی از نتایج اصلی این آزمایش بدست آوردن شاخص شکنندگی سنگ می باشد که با حداکثر نیروی اعمال شده برای نفوذ در سنگ، متناسب می باشد. همچنین شاخص شکنندگی برحسب kN/mm با استفاده از شیب منحنی نیرو- نفوذ (رسم خطی از مبدا به نقطه حداکثر نیروی جذب شده توسط سنگ) قابل محاسبه خواهد بود. در شکل ۶ منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام شاخص شکست داده های موجود در بانک اطلاعاتی آورده شده است.

استفاده از آزمایش نفوذ در اواخر سال ۱۹۶۰ برای اندازه گیری پارامترهایی همچون چقرمگی، سختی و شکنندگی سنگ آغاز و در حال توسعه می باشد. این آزمایش بیشتر در آمریکای شمالی برای بدست آوردن شکنندگی و قابلیت حفاری سنگ مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایش نفوذ، انعکاس دهنده فرآیند شکست سنگ در بارگذاری مانند دیسک و همچنین الگوی شکست یا تشکیل تراشه می باشد. در این آزمایش، یک ابزار استاندارد مخروطی شکل با زاویه رأس ۱۲۰ درجه بر روی سطح سنگی که در قالب فلزی ثابت شده است، فشرده شده و بار اعمالی و مقدار نفوذ توسط یک سیستم به طور خودکار ثبت می شود (شکل ۵) [32] و [6].



شکل ۵- نمای شماتیک آزمایش نفوذ پانچ [32]

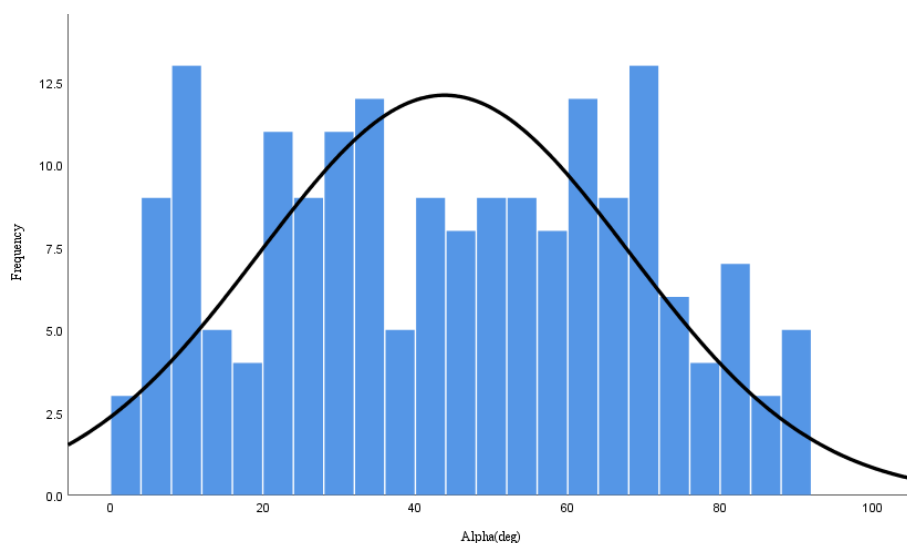


شکل ۶- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام شاخص شکست

که یک دسته ناپیوستگی غالب با ویژگی های منحصر به فرد در توده سنگ وجود دارد، مانند توده سنگ های شدیداً متورق و شیبستوز می-تواند پارامتری مؤثر بر حفزپذیری محسوب شود [33]. اثر جهت داری درزه ها به عنوان یک عامل مؤثر در نرخ نفوذ توسط محققان بیشتر با استفاده از روش های مدل سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار هیستوگرام و منحنی توزیع زاویه بین صفحه درزه با محور تونل در شکل ۷ آورده شده است.

۴- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

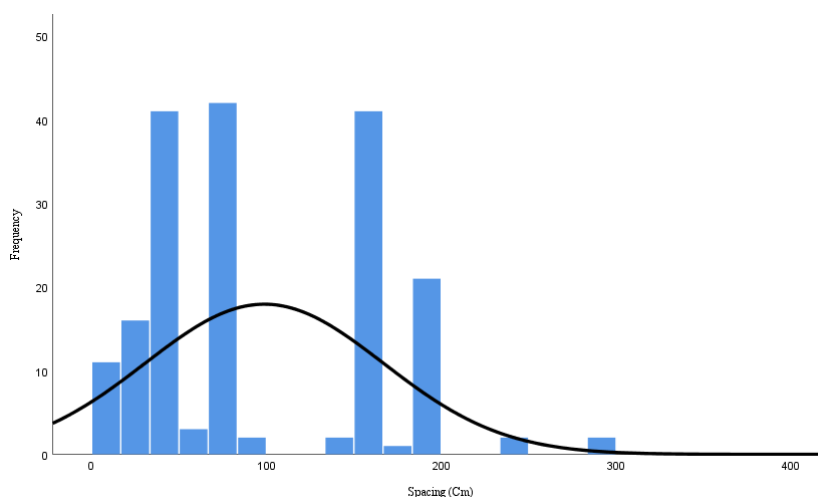
علاوه بر ویژگی های سنگ بکر، پارامترهای توده سنگ نیز در حفزپذیری آن مؤثر می باشند که مهم ترین این پارامترها مربوط به پارامترهای درزه داری است. تحقیقات انجام شده بیانگر این است که در بین پارامترهای درزه داری، فاصله داری و جهت داری ناپیوستگی ها بیشترین تأثیر را بر حفزپذیری توده سنگ دارند. در توده سنگ های بلوکی و با دو یا سه دسته درزه مشابه، اثر جهت داری درزه ها را می-توان بسیار ناچیز فرض کرد. جهت داری ناپیوستگی ها فقط در مواردی



شکل ۷- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام زاویه صفحه درزه با محور تونل

پرشدگی، بازشدگی و زبری در کنار فاصله و جهت گیری، بر نرخ نفوذ تأثیرگذار بوده اما تأثیرگذاری آن‌ها کمتر از فاصله‌داری و جهت‌داری درزه‌ها می‌باشد [23]. در شکل ۸ منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام مربوط به فاصله‌داری درزه‌ها در بانک اطلاعاتی تشکیل شده، آورده شده است.

خصوصیت دیگر درزه‌ها که بر نرخ نفوذ دیسک تأثیر دارد، فاصله‌داری می‌باشد. تحقیقات انجام شده بیان‌کننده این موضوع می‌باشند که تأثیر ناپیوستگی به شدت به نوع سنگ بستگی دارد [18]. از آنجایی که سنگ‌های متورق، بیشترین افزایش را در نرخ‌های نفوذ نشان دادند، می‌توان گفت این نوع سنگ‌ها بیشترین تأثیر را در نرخ نفوذ دارند. خصوصیات ژئوتکنیکی ناپیوستگی‌ها چون کیفیت سطح،

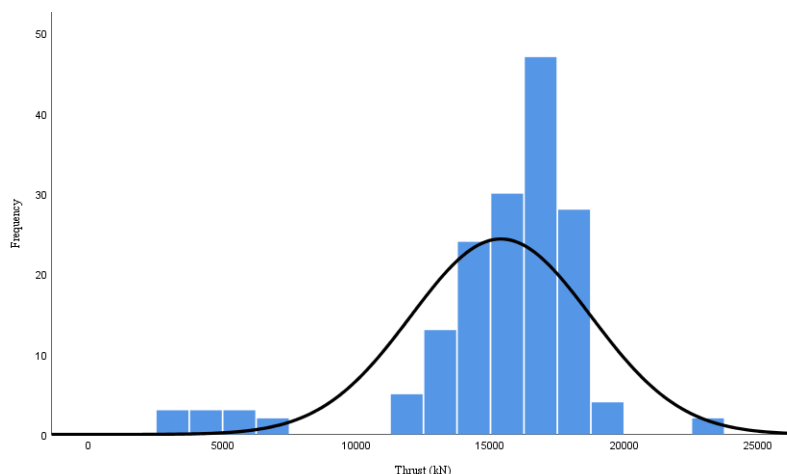


شکل ۸- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام فاصله‌داری درزه‌ها

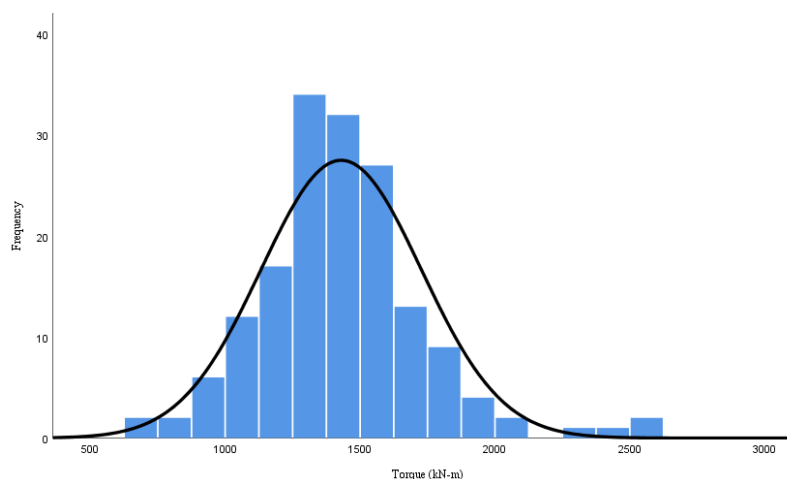
نیز نیروی لازم برای چرخش دیسک بر روی سطح سنگ را فراهم می‌کند. پارامتر جامعی که در آن نرخ نفوذ، نیروی پیشران به ازای هر دیسک در آن لحاظ شده است، شاخص حفرپذیری می‌باشد. در شکل‌های ۱۰، ۹ و ۱۱ نمودار هیستوگرام و منحنی تغییرات نیروی پیشران، گشتاور و نرخ نفوذ رسم شده است.

۵- پارامترهای عملیاتی ماشین

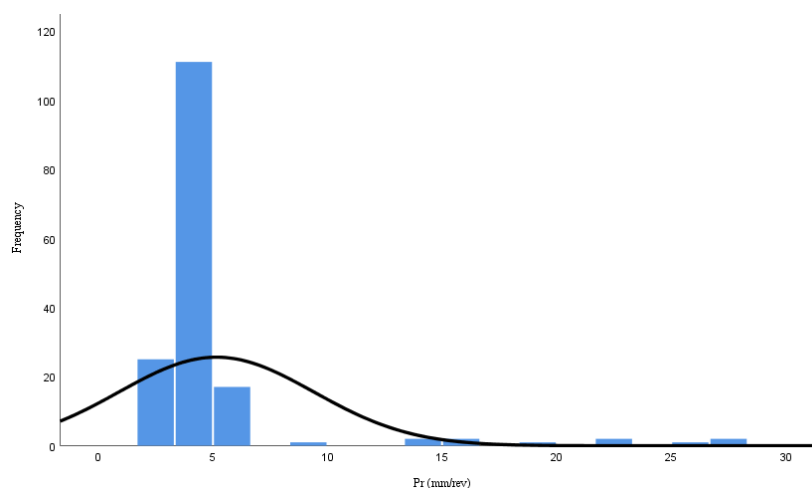
مهم‌ترین پارامترهای ماشین که بر حفرپذیری و نرخ نفوذ تأثیر دارد شامل نوع دیسک، شکل و قطر دیسک، تعداد و فاصله دیسک‌ها و قطر کله‌حفار و همچنین پارامترهای راهبری ماشین مانند نیروی پیشران و گشتاور و نرخ نفوذ می‌باشد. نیروی پیشران ماشین، نیروی لازم برای نفوذ ابزار برشی در سنگ را تأمین می‌کند. نیروی گشتاور



شکل ۹- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام نیروی پیشران



شکل ۱۰- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام گشتاور



شکل ۱۱- منحنی توزیع و نمودار هیستوگرام نرخ نفوذ

۶- توسعه شاخص شکست سنگ

یکی از مسائل مهم با توجه به تعریف شاخص شکنندگی سنگ، ارتباط این شاخص با قابلیت حفاری سنگ می‌باشد که تحقیقات

انجام شده تاکنون بیانگر این است که یک رابطه قوی بین نرخ نفوذ TBM و شاخص شکنندگی سنگ وجود دارد. یاگیز در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ اظهار داشت که آزمایش نفوذ می‌تواند برای بررسی رفتار

شکندگی سنگ در خردایش به وسیله دیسک مورد استفاده قرار گیرد [34]. مدل سازی عددی انجام شده توسط گونگ و ژائو (۲۰۰۷) بر مبنای داده های یک پروژۀ تونل بلند ۴۲ کیلومتری گرانیته، نشان داده که با افزایش شاخص شکندگی، قابلیت نفوذ نیز افزایش می یابد. این تأثیر برای سنگ های با مقاومت فشاری تک محوری کمتر، مشهودتر می باشد. همچنین در سنگ های سخت تر، با شاخص شکندگی کمتر، گسترش ناحیه خردشده کمتر و تعداد و طول ترک های اصلی در خارج از ناحیه خردشده نیز کاهش داشته است [35]. این مشاهدات مشابه با تحقیقات برولند در سال ۲۰۰۰ می باشد. برولند اظهار داشته است که شاخص شکندگی بیشتر، منجر به ایجاد ترک بیشتر و خرده های بیشتر در محل برش و شاخص شکندگی کمتر موجب ترک و خرد شدن کمتر سنگ می شود. قهرمان در سال ۲۰۰۲ یک رابطه بین نرخ نفوذ و شاخص شکندگی (حاصل از نسبت مقاومت فشاری تک محوری به مقاومت کششی سنگ) در *TBM* و مته های چرخشی به دست آورد که بیانگر نسبت معکوس این دو پارامتر است (با کاهش شکندگی، نرخ نفوذ افزایش می یابد). این نتیجه بر مبنای داده های جمع آوری شده عملکرد *TBM* در انواع مختلف سنگ می باشد [36]. علاوه بر

شکندگی، خصوصیات دیگر سنگ نیز ممکن است بر نرخ نفوذ تأثیرگذار باشند که این موضوع منجر به عدم اطمینان شده و گرایش معکوسی را در نتایج گونگ و ژائو (۲۰۰۷) و برولند (۲۰۰۰) نشان می دهد. جونگ و همکاران آزمایش نفوذ بر روی شش نوع سنگ مختلف انجام داده و نتایج را با آزمایش برش مقایسه نمودند. نتایج این بررسی نشان می دهد که ارتباط مناسبی بین نیروی متوسط عمودی حاصل از آزمایش برش خطی با نتایج حاصل از آزمایش نفوذ می باشد و می توان از آزمایش نفوذ برای پیش بینی نیروی متوسط عمودی برش سنگ استفاده کرد [37]. یکی از معایب شاخص شکست این است که این شاخص صرفاً برای ماده سنگ می باشد. در این بررسی به منظور توسعه شاخص شکست سنگ برای توده سنگ درزه دار به بررسی ارتباط بین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی، زاویه بین صفحه درزه با محور تونل و فاصله داری درزه به عنوان پارامترهای مستقل با شاخص شکست بدست آمده از آزمایش نفوذ پرداخته شده است. در جدول ۴ رابطه بین هر پارامتر مستقل با شاخص شکست و ضریب همبستگی آورده شده است.

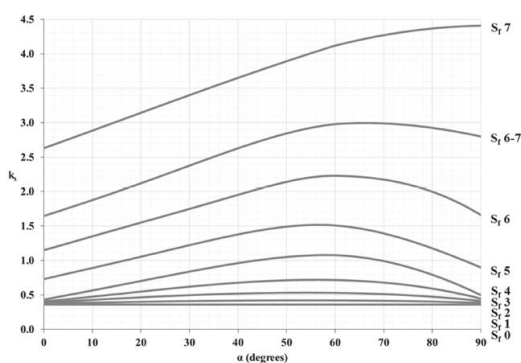
جدول ۴- رابطه بین پارامترهای مستقل با شاخص شکست سنگ

پارامتر وابسته	پارامتر مستقل	رابطه	ضریب همبستگی
	UCS (Mpa)	$BI = -9.112\ln(UCS) + 49.146$	0.36
	BTS (Mpa)	$BI = -13.4\ln(BTS) + 33.464$	0.58
	Alpha (deg)	$BI = 4.1135e^{-0.004\alpha}$	0.036
BI	Spacing (mm)	$BI = 3.8888e^{-0.001Sp}$	0.026

نوع رابطه بین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی سنگ با شاخص شکست، لگاریتمی با ضریب همبستگی پایین تر از حد معمول (حد معمول بالای ۰/۶ می باشد) است. در خصوص پارامترهای فاصله داری و زاویه بین صفحه درزه با محور تونل ملاحظه می شود که این رابطه از ضریب همگرایی بسیار ضعیفی برخوردار می باشد. به منظور بررسی بیشتر موضوع و با لحاظ این مسئله که دو پارامتر فاصله و زاویه درزه توأم با هم در شکست سنگ تأثیرگذار می باشند لذا فاکتور خردایش کل ($K_{s\ total}$) که توسط برولند در سال ۱۹۷۹ ارائه گردیده، برای این منظور استفاده گردیده است. برای بدست آوردن $K_{s\ total}$ در ابتدا با استفاده از سیستم طبقه بندی ناپیوستگی ها نیروی، درزه ها طبقه بندی شده اند.

این طبقه بندی اولین بار توسط بلیندهام^۱ در سال ۱۹۷۹ در دانشگاه NTNU ارائه و سپس توسط برولند در سال ۱۹۹۸ و در سال ۲۰۱۶ توسط مکاس^۲ تکمیل و به روز گردیده است [4] و [19]. در این طبقه بندی درجه خردشدگی و درزه داری توده سنگ بر اساس فاصله داری درزه ها (جدول ۵) مشخص می شود.

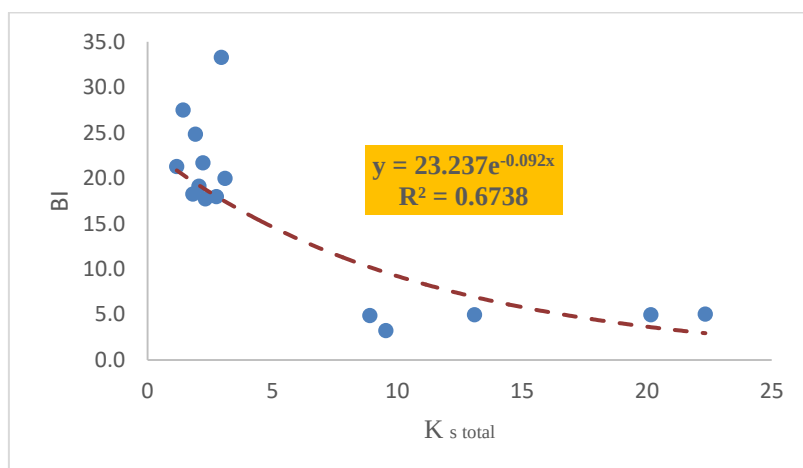
¹ Blindham² Macias

شکل ۱۲- گرافهای تعیین K_s [19]

در نهایت مطابق رابطه زیر فاکتور خردشدگی کل $(K_{s-total})$ بدست آمده است.

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

در شکل ۱۳ ارتباط بین شاخص شکست سنگ با $K_{s-total}$ آورده شده است.

شکل ۱۳- ارتباط شاخص شکست با $K_{s-total}$

$$BI_{jrm} = \frac{1.85 UCS}{BTS \sqrt{K_{s-total}}} \quad (2)$$

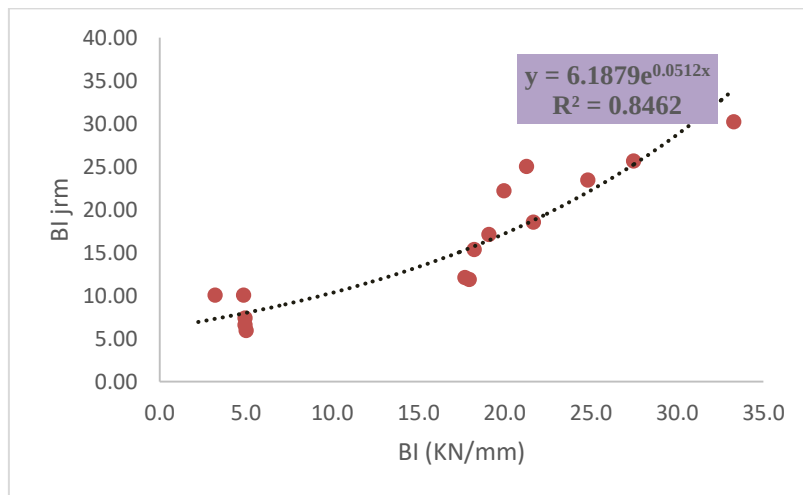
در این رابطه BI_{jrm} شاخص شکست توده سنگ درزه دار، UCS مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)، BTS مقاومت کششی (Mpa) و $K_{s-total}$ فاکتور خردایش کل می باشد. در شکل ۱۴ رابطه بین شاخص شکست سنگ با شاخص شکست توسعه داده شده برای توده سنگ درزه دار آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود شاخص شکست توده سنگ درزه دار همواره بیشتر از شاخص شکست سنگ می باشد.

جدول ۵- طبقه بندی درجه خردشدگی و درزه داری [19]

متوسط	فاصله داری درزه ها (سانتی متر)	طبقه بندی (Sf درزه ها)
درجه خردایش		
فقد خردشدگی	بی نهایت	۰
زیاد پایین	۳۲۰	۱
خیلی پایین	۱۶۰	۲
پایین	۸۰	۳
متوسط	۴۰	۴
بالا	۲۰	۵
خیلی بالا	۱۰	۶
زیاد	۵	۷

پس از مشخص شدن کلاس شکستگی، با استفاده از زاویه صفحه درزه و کلاس درزه مطابق شکل ۱۲، فاکتور خردشدگی (K_s) برای هر درزه بدست آمده است.

همان طور که در شکل ۱۳ ملاحظه می شود شاخص شکست سنگ با فاکتور خردایش کل ارتباط قابل قبولی دارد لذا می توان این فاکتور را جایگزین دو پارامتر اصلی درزه داری کرد. با توجه به نتایج بررسی ارتباط بین شاخص شکست سنگ با مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و فاکتور خردایش کل، در این مرحله برای ارائه یک رابطه غیر خطی بین شاخص شکست سنگ به عنوان یک پارامتر وابسته و مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و فاکتور خردایش کل به عنوان پارامترهای مستقل از نرم افزار SPSS استفاده شده است. رابطه بدست آمده دارای ضریب همبستگی ۰/۷۷ می باشد.



شکل ۱۴- ارتباط بین BI و BI_jrm

همچون زاویه صفحه درزه با محور تونل و فاصله‌داری درزه می‌باشد. در رابطه‌هایی که تاکنون ارائه شده است این موضوع نادیده گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده در بخش قبل، برای لحاظ کردن تأثیر تلفیقی پارامترهای اصلی درزه‌ها، به بررسی ارتباط شاخص شکست توده سنگ درزه‌دار با شاخص حفرپذیری پرداخته

شده که نتیجه این بررسی ارائه رابطه ذیل می‌باشد. ضریب همبستگی این رابطه ۰٫۸ می‌باشد.

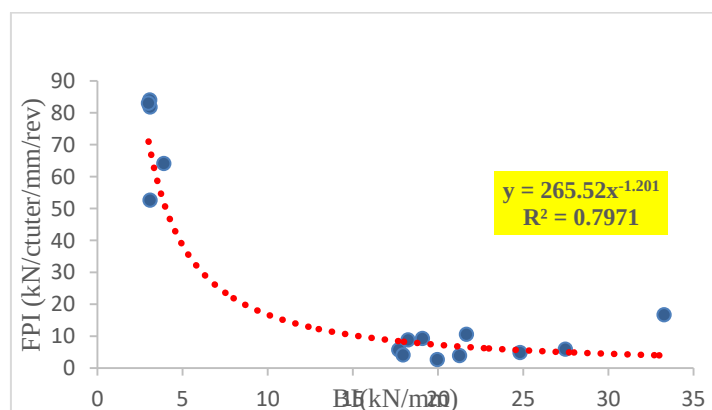
$$FPI_{jrm} = 6.187 e^{0.512 BI_{jrm}} \quad (3)$$

در این رابطه FPI_{jrm} شاخص حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار و BI_{jrm} شاخص شکست توده سنگ درزه‌دار می‌باشد.

۷- توسعه شاخص حفرپذیری

مقایسه شاخص ویژه حفرپذیری توده سنگ بدست آمده از داده‌های میدانی در تونل کوزایتاگی- کادیکوی در ترکیه با نتایج آزمایش برش خطی نتایج نشان‌دهنده اختلاف زیاد مقدار این شاخص با نتایج آزمایشگاهی می‌باشد [38]. این موضوع بیانگر این است که پارامترهای درزه‌داری توده سنگ تأثیر زیادی در شاخص حفرپذیری آن دارند. برای بررسی بیشتر موضوع در این تحقیق در ابتدا در بانک اطلاعاتی ارتباط بین شاخص شکست حاصل از آزمایشگاه با شاخص حفرپذیری واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۵ رابطه بین شاخص شکست و شاخص حفرپذیری قابل

مشاهده است. یکی از مسائل مهم در پیش‌بینی شاخص حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار لحاظ کردن اثر تلفیقی پارامترهای هندسی درزه



شکل ۱۵- رابطه بین شاخص شکست با شاخص حفرپذیری

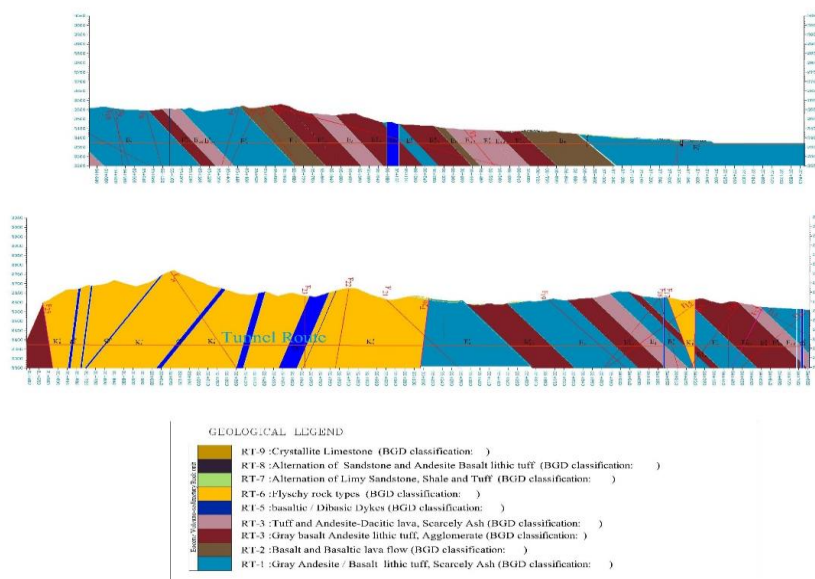
شده است [39]. در شکل ۱۶ نیمرخ طولی زمین شناسی محدوده مورد مطالعه و در جدول ۴ دامنه تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی محدوده مورد بررسی آورده شده است.

جدول ۴- دامنه تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی [39]

پارامتر	حداقل	حداکثر
مقاومت فشاری تک محوری (مگا پاسکال)	۹۰	۱۸۰
مقاومت کششی (مگا پاسکال)	۶/۵	۲۰
زاویه صفحه درزه (درجه)	۰	۸۳
فاصله داری (سانتی متر)	۱۰	۳۰۰

۸- ارزیابی شاخص حفری توده سنگ درزه دار

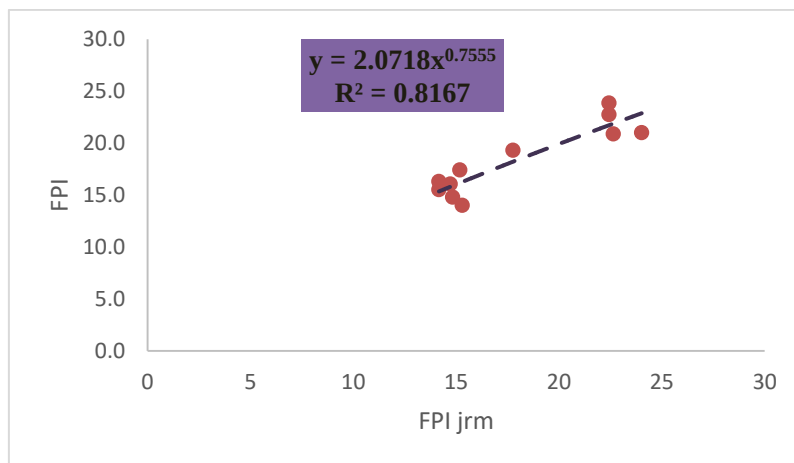
برای ارزیابی شاخص حفری توده سنگ درزه دار از اطلاعات جمع آوری شده در ۷ کیلومتر از تونل انتقال آب کرمان در ایران استفاده شده است. تونل انتقال آب کرمان به منظور انتقال آب از سد صفا به شهر کرمان طراحی شده است. این تونل در راستای شمال-جنوب طراحی گردیده و عرض کوه های بلند واقع بین قله های هزار و لاله زار را طی می کند. تونل شامل دو قطعه شمالی و قطعه جنوبی که هر یک به طول ۱۹ کیلومتر می باشد. برای حفاری قطعه شمالی تونل از یک دستگاه TBM از نوع هارد راک دابل شیلد به قطر ۴/۶ متر با تعداد ۲۷ دیسک به قطر ۴۸۲ متر (۱۹ اینچ) استفاده شده است. ساختار زمین شناسی مسیر تونل شامل مجموعه های رسوبی و آتشفشانی می باشد. زمین شناسی محدوده مورد مطالعه از سنگ های آندزیت، آندزیت بازالت، دیاباز که با ساختار بلوکی و فلیش ها که با ساختار لایه ای می باشند، تشکیل



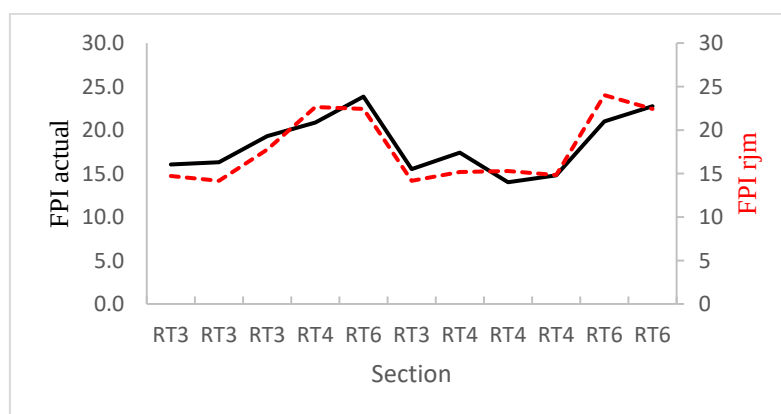
شکل ۱۶- نیمرخ طولی زمین شناسی محدوده مورد بررسی [39]

بالایی برخوردار می باشد. همچنین در شکل ۱۸ نمودار خطی برای مقایسه بین FPI واقعی و FPI_{jrm} در مقاطع مختلف تونل آورده شده است.

در شکل ۱۷ میزان همبستگی بین FPI واقعی و FPI_{jrm} نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود همگرایی بین شاخص حفری واقعی و شاخص حفری پیش بینی شده بر اساس رابطه جدید ارائه شده در این تحقیق از ضریب همگرایی



شکل ۱۷- همگرایی بین FPI و FPI jrm

شکل ۱۸- مقایسه FPI واقعی با FPI_{jrm}

۹- نتیجه گیری

پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار در حفاری با ماشین‌های حفاری تمام مقطع تونل یکی از موضوعات مهم در پیش‌بینی هزینه و زمان ساخت تونل برای ذینفعان یک پروژه تونل‌سازی می‌باشد. هر چه دقت مدل مورد استفاده برای پیش‌بینی حفرپذیری در یک پروژه تونل‌سازی بیشتر باشد انحراف از هزینه و زمان در دوره ساخت نیز کمتر خواهد بود. تاکنون مدل‌های مختلفی برای این موضوع ارائه شده اما هر کدام دارای محدودیت‌هایی از جمله در دسترس بودن پارامترهای ورودی مدل می‌باشد. در این تحقیق شاخص شکست به عنوان یک پارامتر اصلی مبنای ارائه مدل جدید برای پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار مورد بررسی قرار گرفته که نتایج بیانگر ارتباط قابل قبول بین این دو پارامتر می‌باشد. شاخص شکست سنگ حاصل از آزمایش نفوذ با پارامترهای اصلی سنگ بکر (مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی) رابطه بسیار قوی‌تری نسبت

به پارامترهای اصلی درزه‌داری توده سنگ (فاصله‌داری و زاویه درزه) دارد.

این موضوع بیانگر این است که شاخص شکست حاصل از آزمایش نفوذ انعکاس دهنده خصوصیات سنگ بکر می‌باشد. لذا برای استفاده از این شاخص برای توده سنگ بایستی تأثیر پارامترهای اصلی درزه‌داری (فاصله‌داری و زاویه درزه) در این شاخص لحاظ گردد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که شاخص شکست با فاکتور خردشدگی کل به عنوان پارامتری که تأثیر تلفیقی زاویه و فاصله‌داری درزه در آن لحاظ شده است، دارای ضریب همگرایی ۰/۶۷ می‌باشد. با توجه به بالاتر بودن ضریب همگرایی بین فاکتور خردشدگی کل با شاخص شکست نسبت به مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت کششی می‌توان نتیجه گرفت لحاظ کردن تأثیر تلفیقی فاصله‌داری و زاویه درزه در شاخص شکست از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. مدل پیش‌بینی حفرپذیری توده سنگ درزه‌دار ارائه‌شده در این تحقیق بر مبنای توسعه شاخص شکست برای توده سنگ، دارای ضریب همگرایی ۰/۸ می‌باشد که بیانگر دقت بالای مدل است.

- [1] Fatemi, S. A., & Ahmadi, M., & Rostami, J. (2016). Evaluation of TBM performance prediction models and sensitivity analysis of input parameters. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* DOI 10.1007/s10064-016-0967-2.
- [2] Rostami, J., & Ozdemir, L. (1993). A new model for performance prediction of hard rock TBMs. *Proceedings of rapid excavation and tunneling conference*, Boston, 13–17 June, p. 793–809.
- [3] Rostami, J., & Ozdemir, L., & Nilsen, B. (1996). Methods for predicting mechanical excavation performance and costs. *Proceedings of annual technical meeting of the institute of shaft drilling technology*, lasvegas, 1–3 May.
- [4] Bruland, A. (1998). Hard Rock Tunnel Boring. *Doctoral Thesis.*, Norwegian University of Science and Technology.
- [5] Bruland, A., & Dahlo, T., & Nilsen, B. (1995). Tunneling Performance Estimation Based on Drillability Testing. *Proceedings of 8 th International Congress of Rock Mechanics*, Sep. 25-30, Tokyo, Japan.
- [6] Yagiz, S. (2002). Dewelopment of rock fracture and brittleness indices to Quantify the effects of rock mass features and toughnessn the CMS model basic penetration for hardrock tunnel machines. *Thesis Doctor of Philosophy*, CSM.
- [7] Yagiz, S. (2008). Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. *Tunnelingl Underground Space Technology*, 23(3), 326–39.
- [8] Barton, N. (2000). TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. *Balkema*, Rotterdam.
- [9] Ramezanzadeh, A., & Rostami, J., & Richard, K. (2005). Influence of rock mass properties on performance of hard rock TBMS. *Retc Proceedigs*, Chapter 56.
- [10] Ramezanzadeh, A., & Rostami, J., & Tadic, D. (2008). Impact of Rock Mass Characteristics on Hard Rock Tunnel Boring Machine Performance. *13th Australian Tunneling Conference*, Melbourne, VIC, 4 - 7 May.
- [11] Bieniawski, Z.T., & Celada, B., & Galera, J. M., & Alvarez, M. (2006). Rock masse excavability indicator: new way to selecting the optimum tunnel construction method. *Tunnelling Underground Space Technolgy*, 21, 237, 3–4.
- [12] Gong, Q., Zhao, J. (2009). Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(1), 8–18.
- [13] Khademi, 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, 333–345.
- [14] Hassanpour, J. (2010). Analysis of actual TBM performance in Ghomrood project. *Bulletin of Iranian Tunneling Association*. 9, (article in Persian).
- [15] Hassanpour, J., & Rostami, J., & Zhao, J. (2011) A new hard rock TBM performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 595–603.
- [16] Farrokh, E. (2012). Study of utilization feactor and advance rate of hard rock TBMS. *Doctor of Philosophy*, Pennsylvania State University.
- [17] Zare Naghadehi, M., & Ramezanzadeh, A. (2016). Models for estimation of TBM performance in granitic and mica gneiss hard rocks in a hydropower tunnel. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.
- [18] Wilfing, L. (2016). The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunnelingin Hard Rock. *Tehnische chnische university MÜNCHEN*.
- [19] Macias, F. (2016). Hard Rock Tunnel Boring Performance Predictions and Cutter Life Assessments. *Thesis for the degree of Philosophiae Doctor*, Norwegian University of Science and Technology.
- [20] Maleki, M. R. (2018). Rock Joint Rate (RJR); a new method for performance prediction of tunnel boring machines (TBMs) in hard rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 261-286.
- [21] Yin, L.J., & Gong, Q.M., & Zhao, J. (2014) Study on rock mass boreability by TBM penetration test under different in situ stress conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 413-425.
- [22] Hamilton, W., & Dollinger, G. (1979). Optimizing tunnel boring machine and cutter design for greater boreability. *RETc Proc Atlanta*, 1, 280–296.
- [23] Gong, Q.M., & Zhao, J., & Jiao. Y.Y. (2005). Numerical modelling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunnel Underground Space Technology*, 20(2), 183–91.
- [24] Delisio, A., & Zhao, J., & Einstein, H. (2013). Analysis and prediction of TBM performance in blocky rock conditions at the Lötshberg Base Tunnel. *Tunnelling and Underground SpaceTechnology*, (33), 131-142.

- [26] Salimi, A., & Moormann, C., & Singh, T., & Jain, P. (2015). TBM performance prediction in rock tunneling using various artificial intelligence algorithms. *11th Iranian and 2nd Regional Tunnelling Conference "Tunnels and the Future"*.
- [27] Mohammadi, S., & Torabi Kaveh, M., & Bayati, M. (2014). Prediction of TBM penetration rate using intact and mass rock properties (case study: Zagros long tunnel, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, DOI 10.1007/s12517-014-1465-0.
- [28] Yagiz, S. (2017). New equations for predicting the field penetration index of tunnel boring machines in fractured rock mass. *Arab J Geosci*, 10,33, DOI 10.1007/s12517-016-2811-1.
- [29] Balci, C. (2009). Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: A case study in Kozyatagi-Kadikoy Metro Tunnel,
- [30] Yagiz, S. (2015). The Punch Penetration Test for Estimating Machine Performance. *33rd International Conference and Exhibition*. Istanbul.
- [31] Meng, F., & Zhou, H., & Zhang, Ch. (2015). Evaluation Methodology of Brittleness of Rock Based on Post-Peak Stress-Strain Curves. *Journal of Rock Mechanic and Rock Engineering*, 48, 1787-1805.
- [32] Yagiz, S. (2006). A model for the prediction of tunnel boring machine performance. *Geological Society of London*, Paper number 383.
- [33] Paltrinieri, E. (2015). Analysis of TBM tunnelling performance in faulted and highly fractured rocks. *Doctor of philosophy thesis*.
- [34] Yagiz, S., & Yazitova, A. (2015) Using Intact Rock Brittleness for Assessing TBM Penetration. *Proceedings of the 4th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'19)*, Paper No. ICGRE 122.
- [35] Gong, Q. M., & Zhao, Q.M., & Jiang, J. (2007). In situ TBM penetration tests and rock mass bore ability analysis in hard rock tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 3, 303-316.
- [36] Kahraman, S. (2002). Correlation of TBM and drilling machine performance with rock brittleness. *Journal of engineering geology*, (65)4, 269-283.
- [37] Jeong, H.Y., & Woo.Cho, J., & Jeon, S., & Rostami, J. (2015). Performance Assessment of Hard Rock TBM and Rock Boreability Using Punch Penetration Test. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, DOI 10.1007/s00603-015-0834-7.
- [38] Bilgin, N., & Copur, H., & Balci, C. (2016). TBM Excavation in Difficult Ground Conditions Case Studies from Turkey. 1rdEdition, Istanbul Technical University Faculty of Mines, Mining Engineering Department.
- [39] SOI Company. (2016). Engineering geological report of Kerman water conveyance tunnel. unpublished report.