

تحلیل تأثیر پهنه‌های گسلی بر شاخص حفرپذیری و عملکرد TBM در پروژه‌های تونل‌سازی (مطالعه موردی تونل‌های انتقال آب کرج، قمروود، نوسود و کرمان)

فاطمه شایان^۱؛ علی ارومیه‌ای^۲؛ جعفر حسن‌پور^{۳*}

۱- دانش‌آموخته دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- عضو هیئت علمی گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳- عضو هیئت علمی گروه زمین‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۹

*نویسنده مسئول: hassanpour@ut.ac.ir

چکیده

عبور تونل‌های مکانیزه از پهنه‌های گسلی به دلیل تغییر ناگهانی ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ، همواره با چالش‌هایی نظیر ناپایداری، ریزش، هجوم آب، لهیدگی و کاهش قابلیت پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار تونل (TBM) همراه است. در این پژوهش، اثر پهنه‌های گسلی بر عملکرد TBM با استفاده از شاخص نفوذ صحرایی (FPI) و نسبت گشتاور به نیروی رانش (Tq/Th) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، داده‌های عملکردی چند پروژه بزرگ تونل‌سازی مکانیزه در ایران شامل تونل‌های انتقال آب کرج، قمروود، نوسود و کرمان گردآوری و تحلیل شد. مقادیر شاخص FPI به صورت تفکیک‌شده برای پهنه‌های گسلی و سایر بخش‌های مسیر تونل استخراج و با استفاده از تحلیل‌های آماری و هیستوگرام‌های توزیع نرمال مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که میانگین شاخص FPI در پهنه‌های گسلی به طور معناداری کمتر از بخش‌های غیرگسلی مسیر تونل بوده و اغلب در رده‌های حفرپذیری بسیار خوب ($7 < FPI < 157$) تا عالی قرار می‌گیرد ($FPI < 7$). با این حال، علی‌رغم افزایش حفرپذیری، در برخی پهنه‌های گسلی ناپایداری توده سنگ و مخاطرات زمین‌شناسی موجب کاهش کارایی عملیاتی TBM شده است. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که تحلیل هم‌زمان شاخص FPI و نسبت Tq/Th می‌تواند ابزار مناسبی برای شناسایی پهنه‌های گسلی و ارزیابی رفتار واقعی TBM در شرایط زمین‌شناسی پیچیده باشد.

شاخص FPI، عملکرد TBM، حفرپذیری، پهنه گسلی.

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

تمام مقطع تونل (TBM - Tunnel Boring Machines) بر جای گذارند؛ به گونه‌ای که برخی از آن‌ها از گسل‌های شناخته‌شده و برخی دیگر صرفاً در جریان مطالعات تفصیلی پروژه‌ها شناسایی شده‌اند.

بررسی مصالح کنده‌شده و خارج‌شده از نوار نقاله نیز یکی از روش‌های کسب اطلاعات زمین‌شناسی محسوب می‌شود؛ با این حال، به دلیل آن‌که اطلاعات حاصل از این مواد عمدتاً

در سال‌های اخیر، احداث تونل‌های طولانی و عمیق در ایران با هدف انتقال آب و توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این تونل‌ها اغلب از سازندهایی با شرایط زمین‌شناسی متنوع عبور کرده و در بسیاری از موارد با پهنه‌های گسلی متعددی تلاقی دارند. گسل‌ها، بسته به ویژگی‌های زمین‌ساختی و ژئومکانیکی خود، می‌توانند تأثیرات متفاوتی بر پایداری حفاری و عملکرد ماشین‌های حفاری

فراهم می‌کند و به‌صورت تئوری نرخ نفوذ افزایش می‌یابد. این امر موجب کاهش نیروی رانش مورد نیاز و در نتیجه کاهش شاخص *FPI* می‌شود.

با این حال، تجربه پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه نشان داده است که حفاری در پهنه‌های گسلی، مخاطرات زمین‌شناسی اصلی نظیر ریزش، ناپایداری سینه‌کار، لهیدگی و هجوم آب را به‌دنبال دارد [۷]. مطالعات پیشین نیز دشواری‌های حفاری در این نواحی و تأثیر آن‌ها بر پیشرفت پروژه را گزارش کرده‌اند [۱۷-۸]. همچنین، طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط شایان و همکاران [۱۸] بر اساس مطالعات و تجربیات حاصل از پروژه‌های حفاری مکانیزه ایران نشان می‌دهد که پهنه‌های گسلی، بسته به ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی، می‌توانند اثرات بسیار متفاوتی بر عملکرد ماشین حفاری و پایداری تونل داشته باشند. این رده‌بندی میزان شدت و پتانسیل بروز چالش‌ها و مشکلات زمین‌شناسی در طول مراحل ساخت و حتی پس از ساخت را پیش‌بینی می‌کند. بر این اساس، تحلیل هم‌زمان حفاری و پایداری توده‌سنگ در پهنه‌های گسلی، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر در تونل‌سازی مکانیزه محسوب می‌شود.

۲- معرفی پروژه‌های تونل‌سازی مورد مطالعه

در این پژوهش، به‌منظور بررسی اثر پهنه‌های گسلی بر پارامترهای عملکردی ماشین حفار تونل، از داده‌های عملیاتی چند پروژه تونل‌سازی مکانیزه در ایران استفاده شده است. پروژه‌های مورد مطالعه شامل تونل‌های انتقال آب کرج، قم‌رود، نوسود و کرمان بوده که بخش‌هایی از مسیر آن‌ها با پهنه‌های گسلی متعددی تلاقی دارد. مشخصات فنی و زمین‌شناسی تونل‌های مورد بررسی در جدول ۱ درج شده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در نقشه ایران در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، محدود به مقاطعی از تونل‌هاست که عملیات حفاری آن‌ها تکمیل شده و یا اطلاعات عملکردی *TBM* در دسترس بوده است. تنوع شرایط زمین‌شناسی و وجود پهنه‌های گسلی مختلف در مسیر این پروژه‌ها، بستر مناسبی برای تحلیل مقایسه‌ای رفتار *TBM* در این مطالعه را فراهم کرده است.

محدود به تغییرات لیتولوژی و ویژگی‌های ماده سنگ است، نمی‌توان آن را به‌صورت کامل و مطمئن برای تفسیرهای زمین‌شناسی استفاده کرد. از این رو، لازم است در بخش‌های حساس مسیر تونل به‌ویژه در پهنه‌های گسلی از روش‌های غیرمستقیم نیز برای ارزیابی ویژگی‌های زمین‌شناسی مسیر استفاده شود تا نتایج دقیق‌تر و قابل اتکاتری حاصل گردد. یکی از راهکارها، بررسی تغییرات پارامترهای اپراتوری و عملکرد واقعی ماشین و تفسیر این تغییرات بر اساس شرایط زمین‌شناسی منطقه می‌باشد.

با توجه به عبور گسترده تونل‌ها از پهنه‌های گسلی و رفتار مکانیکی پیچیده این نواحی، تحلیل اثر شرایط زمین‌شناسی بر عملکرد *TBM* از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، رده‌بندی حفاری توده‌سنگ به‌عنوان مفهومی وابسته به ویژگی‌های مقاومتی و ساختاری سنگ، مبنای مناسبی برای ارزیابی عملکرد ماشین حفار فراهم می‌سازد. به‌ویژه در پهنه‌های گسلی، که هم‌زمان افزایش حفاری و کاهش پایداری توده‌سنگ مشاهده می‌شود، استفاده از شاخص‌های کمی می‌تواند درک دقیق‌تری از رفتار واقعی *TBM* ارائه دهد. شاخص نفوذ صحرایی (*FPI-Field Penetration Index*) یکی از این شاخص‌هاست که علاوه بر رده‌بندی حفاری، قابلیت شناسایی نواحی خردشده و گسلی را نیز داراست [۱، ۲].

در این مطالعه، با بررسی پارامترهای مختلف ماشین حفار از مدل دانشگاه تهران ارائه شده توسط حسن پور و همکاران [۳] به‌عنوان چارچوب تحلیلی استفاده شده است. این مدل که بر پایه داده‌های میدانی پروژه‌های متعدد حفاری مکانیزه توسعه یافته و در سال‌های اخیر برای شرایط متنوع زمین‌شناسی به‌روزرسانی شده است [۴] و [۵]، با به‌کارگیری شاخص *FPI* در کنار پارامترهای زمین‌شناسی، امکان تحلیل جامع‌تری از حفاری توده‌سنگ، شرایط پایداری و عملکرد *TBM* در مواجهه با پهنه‌های گسلی را فراهم می‌سازد.

نرخ نفوذ یک ماشین حفار با ویژگی‌های مشخص و ثابت که تحت شرایط عادی فعالیت می‌کند، به حفاری توده‌سنگ و پارامترهای راهبری ماشین وابسته است [۶]. در پهنه‌های گسلی، به دلیل خردشدگی شدید سنگ‌ها و کاهش قابل توجه مقاومت، توده‌سنگ شرایط مناسبی برای نفوذ تیغه‌های برشی

جدول ۱- فهرست پروژه‌های تونل‌سازی مورد مطالعه برای توسعه بانک اطلاعاتی

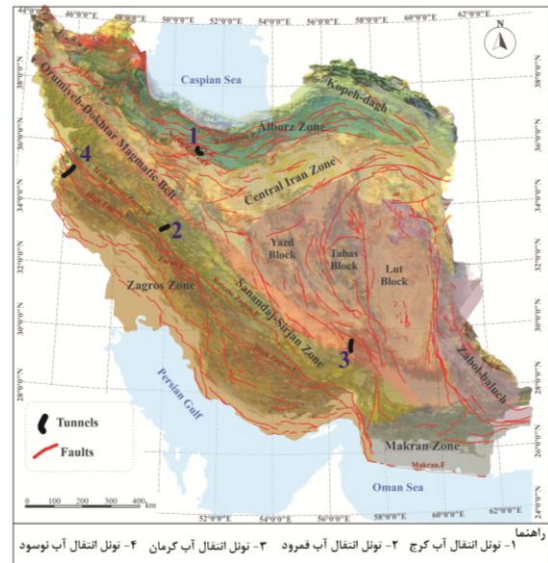
ردیف	پروژه تونلی		سازند	زون زمین‌شناسی	طول کل تونل (km)	طول دسترسی به داده‌های TBM (km)	نوع حفار	قطر ماشین حفار (m)	
	نام	نماد							
۱	تونل انتقال آب کرج (قطعه اول)	KWCT-L1	سازند کرج	البرز	۱۶	۱۶	سپر دوگانه (هرنکنشت)	۴/۶۵	
۲	تونل انتقال آب کرج (قطعه دوم)	KWCT-L2			۱۴	۱۴			
۳	تونل انتقال آب نوسود (قطعه ۱- الف)	NWCT-L1a	سازند ایلام، سورمه، پابده، گرو و آهک‌های کرتاسه	زاگرس مرتفع	۱۳/۷	۱۳/۷	سپر دوگانه (هرنکنشت)	۵/۲۷۵	
۴	تونل انتقال آب نوسود (قطعه ۲- الف)	NWCT-L2a		زاگرس چین‌خورده	۲۳	۵	سپر دوگانه (هرنکنشت)	۶/۷۳	
۵	تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳، ۴ و بخشی از ۲)	Gh.WCT-L4, L3 & part of L2	دگرگونی‌های ژوراسیک و آهک‌های کرتاسه	سنندج- سیرجان	۳۶	۲۴	سپر دوگانه (ویرت)	۴/۵۲۵	
۶	تونل انتقال آب کرمان (قطعه شمالی)	Kr.WCT-N	سازند رازک، هزار، گرانیتوئید کوه‌پنج، جبال بارز	ارومیه- دختر	۱۹/۱	۱۰	سپر دوگانه (هرنکنشت)	۴/۶۶۵	
۷	تونل انتقال آب کرمان (قطعه جنوبی)	Kr.WCT-S			۱۸/۷	۵/۵	سپر دوگانه (هرنکنشت)	۵/۲۷۵	
					مجموع	۱۴۰/۵	۸۸/۲		

در PLC دستگاه محاسبه شده است. همچنین نسبت گشتاور به نیروی رانش (Tq/Th) به‌عنوان یکی از پارامترهای مکمل عملکردی مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات این نسبت در طول مسیر حفاری استخراج و با مقاطع عبوری از پهنه‌های گسلی مقایسه شد. تحلیل هم‌زمان این دو شاخص، امکان شناسایی دقیق‌تر پهنه‌های گسلی و بررسی رفتار عملیاتی TBM در شرایط زمین‌شناسی متنوع را فراهم می‌سازد. انتخاب شاخص FPI از آن‌رو صورت گرفته است که این شاخص به‌صورت هم‌زمان نرخ نفوذ کله‌حفار و بار وارده بر تیغه‌های برشی را در نظر می‌گیرد و در نتیجه، یک پارامتر ترکیبی و مناسب برای ارزیابی عملکرد واقعی TBM محسوب می‌شود. شاخص FPI بر اساس نرخ نفوذ و پارامترهای راهبری دستگاه شامل نیروی پیشران و سرعت دوران کله‌حفار، مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۳، ۱۹، ۲۰]:

$$FPI = \frac{60 \times F_n(kN/cutter) \times RPM}{1000 \times PR(m/hr)} \quad (1)$$

$$FPI = \frac{F_n(kN/cutter)}{P_{rev}(mm/rev)} \quad (2)$$

که در روابط فوق، FPI ($kN/cutter/mm/rev$) شاخص نفوذ



شکل ۱- موقعیت تونل‌های مورد مطالعه در نقشه ایران

۳- بررسی عملکرد TBM در پهنه‌های گسلی

در این پژوهش، به‌منظور تحلیل عملکرد ماشین حفار تونل در پهنه‌های گسلی، شاخص نفوذ صحرایی (FPI) به‌عنوان معیار اصلی عملکرد انتخاب شده است. پارامتر FPI در هر یک از کورس‌های پیشروی، براساس اطلاعات ثبت شده

مزیت اصلی این مدل، لحاظ هم‌زمان ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ و پارامترهای عملکردی TBM است که امکان تحلیل دقیق‌تر حفرپذیری را فراهم می‌سازد. اصول رده‌بندی حفرپذیری توده‌سنگ بر اساس این مدل در جدول ۲ درج شده است. از آن‌جا که در پهنه‌های گسلی، افزایش حفرپذیری اغلب با کاهش پایداری توده‌سنگ همراه است، تحلیل هم‌زمان این دو عامل برای ارزیابی عملکرد TBM و مدیریت مخاطرات حفاری ضروری به نظر می‌رسد. رویکرد اتخاذ شده در این پژوهش می‌تواند مبنایی مناسب برای پیش‌بینی رفتار ماشین، انتخاب راهبردهای حفاری و کاهش ریسک‌های اجرایی در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه فراهم آورد.

صحرائی؛ F_n نیروی اعمالی بر تیغه‌برشی؛ RPM سرعت دوران کله‌حفار و PR نرخ نفوذ دستگاه می‌باشد. به‌منظور ارزیابی حفرپذیری پهنه‌های گسلی، از مدل دانشگاه تهران که توسط حسن پور و همکاران [۳] توسعه یافته، استفاده شده است. این مدل با تلفیق شاخص‌های ژئومکانیکی سنگ و شاخص‌های عملکردی TBM، دیدگاهی یکپارچه نسبت به فرآیند حفاری ارائه می‌دهد. در چارچوب این مدل، حفرپذیری توده‌سنگ تحت تأثیر سه مؤلفه اصلی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری (USC - $Unconfined$ $Compressive$ $Strength$)، شاخص کیفی سنگ (RQD - $Rock$ $Quality$ $Designation$) و شاخص نفوذ صحرائی (FPI) قرار دارد. در این میان، UCS بیانگر مقاومت ذاتی سنگ، RQD نشان‌دهنده کیفیت و میزان درزه‌داری توده‌سنگ و FPI منعکس‌کننده شرایط واقعی عملکرد ماشین حفار است.

جدول ۲- رده‌بندی حفرپذیری توده‌سنگ‌ها [۳].

رده حفرپذیری	FPI (kN/c/mm/rev)	توصیف حفرپذیری	شرایط پایداری	صعوبت نسبی کاربرد TBM	مثال
B-0	> 70	سخت	کاملاً پایدار	دشوار (نرخ نفوذ پایین) کوارتزیت‌ها	توده‌سنگ‌های بسیار مستحکم و توده‌ای و بدون درزه مانند
B-I	70-40	نسبتاً سخت	پایدار	متوسط	سنگ‌های آذرین و دگرگونی بسیار مستحکم و با درزه‌داری اندک (گنایس، گابرو، دیوریت و غیره)
B-II	40-25	متوسط تا خوب	ناپایداری‌های جزئی	خوب	سنگ‌های آواری و آذرآواری مستحکم و درزه‌دار (توف، توفیت، آگلومرا، آهک و دولومیت‌های متوسط تا ضخیم‌لایه)
B-III	25-15	خوب	ناپایداری‌های موضعی	بسیار خوب	توده‌سنگ‌های نیمه‌مستحکم تا مستحکم و شدیداً درزه‌دار (لایه‌های نازک تا متوسط از آهک‌های شیلی و ماسه‌سنگ)
B-IV	15-7	بسیار خوب	ناپایداری‌های عمده	خوب	توده‌سنگ‌های ضعیف درزه‌دار و خردشده یا توده‌سنگ‌های متورق (مانند تناوب‌های نازک شیل و ماسه‌سنگ)
B-V	< 7	عالی	ریزش کلی، لهیدگی زمین	همراه با مشکل	سنگ‌های بسیار ضعیف و شدیداً خردشده و توده‌سنگ‌های کاملاً متورق (مانند شیل، اسلیت، گرافیت شیبست و غیره)
B-VI	-	بسیار خوب	کلاگینگ، ناپایداری	خوب (بالتر از آب زیرزمینی)	سنگ‌های رسی (گل‌سنگ، سیلت‌استون)

ماشین حفار از جمله ظرفیت نوارنقاله و کنترل نفوذ در سنگ، حجم مصالح خروجی را نیز به‌طور مؤثری مدیریت کند. این کار به‌ویژه در پهنه‌های گسلی اهمیت دارد، زیرا تغییرات سریع گشتاور و دور دستگاه می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد ماشین حفار گردد. در این میان، افزایش گشتاور دستگاه در

۳-۱- تحلیل پارامترهای TBM پهنه‌های گسلی
در پهنه‌های گسلی اپراتور TBM تلاش می‌کند برای بهبود کارایی و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی، گشتاور و دور دستگاه را در یک محدوده خاص تقریباً ثابت نگه دارد. علاوه‌براین، اپراتور باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های

در بخش‌هایی از مسیر تونل قرار دارند که افت ناگهانی مقادیر FPI در آن‌ها ثبت شده است، که بیانگر قابلیت بالای این شاخص در شناسایی پهنه‌های گسلی است. استفاده از پارامتر ترکیبی FPI ، موجب کاهش اثرات متقابل پارامترهای منفرد ماشین حفار شده و امکان تحلیل واقع‌بینانه‌تری از رفتار دستگاه فراهم می‌سازد. به عبارت دیگر، با به‌کارگیری FPI ، سه پارامتر کلیدی شامل نرخ نفوذ، نیروی پیشران و سرعت دوران کله‌حفار به صورت هم‌زمان در فرآیند تحلیل لحاظ شده و ارتباط آن‌ها با شرایط زمین‌شناسی و عملکرد واقعی TBM مورد بررسی قرار می‌گیرد.

علاوه بر این، نسبت Tq/Th در پهنه‌های گسلی در مقایسه با سایر بخش‌های مسیر افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از کاهش مقاومت فشاری سنگ‌های خرد شده و درزه‌دار در پهنه‌های گسلی است که منجر به کاهش نیروی پیشران مورد نیاز و در عین حال افزایش حجم ماده‌کننده شده، نفوذ عمیق‌تر دیسک‌ها و افزایش گشتاور مصرفی می‌شود. در نتیجه، افزایش نسبت Tq/Th می‌تواند به عنوان یک نشانگر عملیاتی مناسب برای شناسایی پهنه‌های گسلی در حین حفاری مکانیزه تونل مورد استفاده قرار گیرد.

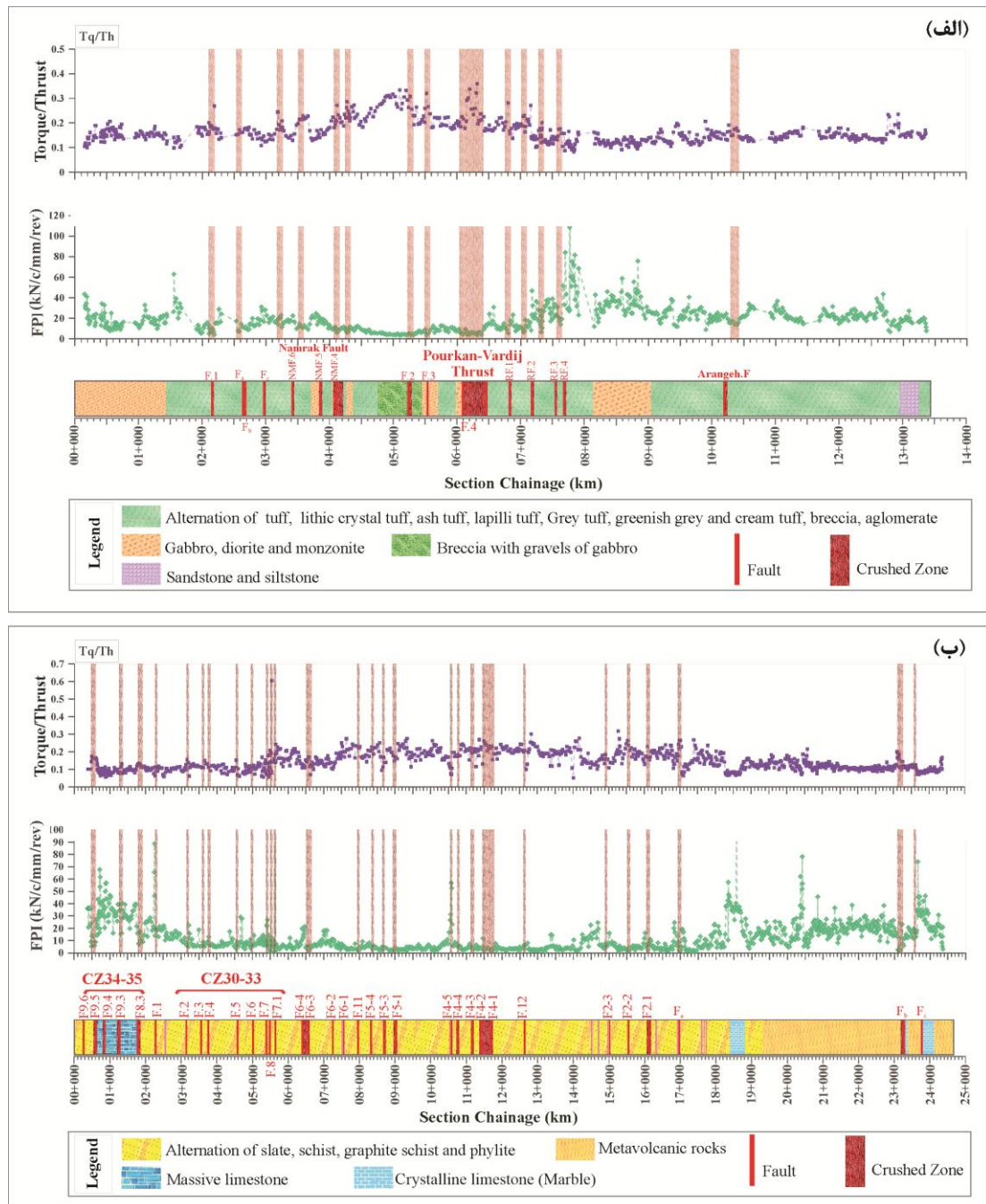
در عمل، اپراتور دستگاه به منظور جلوگیری از فشار بیش از حد به سیستم انتقال قدرت و کنترل شرایط حفاری در چنین زمین‌هایی، معمولاً اقدام به کاهش سرعت چرخشی کله‌حفار (RPM) می‌کند. کاهش سرعت چرخشی باعث می‌شود پارامتر گشتاور به صورت طبیعی افزایش یابد و در نتیجه شرایط حفاری پایدارتر گردد. از آنجایی که هر دو پارامتر توسط اپراتور به طور نسبی کنترل می‌شوند (برای مثال ثابت نگه داشتن گشتاور و دور برای جلوگیری از آسیب به سیستم یا تنظیم با نوار نقاله)، تحلیل صرف تغییرات عددی این پارامترها کافی نیست؛ اما نوسانات و روندهای غیرعادی در نسبت Tq/Th می‌تواند به عنوان یک شاخص ثانویه برای تشخیص ورود TBM به پهنه گسلی تلقی شود. به طور خاص، در این پژوهش مشاهده شده است که در بخش‌هایی از مسیر تونل که شاخص FPI کاهش ناگهانی داشته و گسل قطعی ثبت شده، مقدار Tq/Th نیز هم‌زمان جهش یافته است.

پهنه‌های گسلی و خرد شده، ناشی از عواملی مانند نفوذ بیشتر تیغه‌های برشی در سنگ، ناپایداری سینه‌کار و افزایش حجم مواد کنده شده در جلوی کله‌حفار است. نفوذ بیشتر تیغه‌های برشی در پهنه‌های گسلی، نیازمند اعمال گشتاور بالاتری است تا دستگاه بتواند پیشروی لازم را داشته باشد.

علاوه بر این، ناپایداری سینه‌کار در این مناطق که به دلیل خردشدگی و شکستگی سنگ‌ها ایجاد می‌شود، می‌تواند باعث اختلالاتی در پیشروی دستگاه شود و در نتیجه افزایش گشتاور را به دنبال داشته باشد. در نهایت، افزایش حجم مواد کنده شده در جلوی کله‌حفار، به ویژه در پهنه‌های گسلی، می‌تواند منجر به افزایش گشتاور دستگاه گردد. در این نواحی، اعمال گشتاور بالا حتی برای یک توقف کوچک ممکن است موجب تحریک ریزش توده سنگ‌ها بر روی کله‌حفار شود. به همین دلیل، در این نواحی، کنترل گشتاور ماشین برای جلوگیری از لرزش کله‌حفار و اعمال بارهای غیرمعمول بر سینه‌کار تونل ضروری است. این امر نشان می‌دهد که به دلیل دخالت مستقیم پارامترهای اپراتوری در تحلیل عملکرد TBM ، محدودیت‌هایی را به دنبال دارد. با بررسی تمامی پارامترهای اپراتوری و عملکردی ماشین حفار در طول مسیر پروژه‌های تونلی مورد مطالعه، هم‌پوشانی میان تغییرات شاخص FPI و نوسانات نسبت نیروی گشتاور (Tq - $Torque$) به نیروی رانشی (Th - $Thrust$) در پهنه‌های گسلی دیده شد.

در این مطالعه، مرز پهنه‌های گسلی در بانک اطلاعاتی گسترش یافته با تلفیق نقشه‌های زمین‌شناسی، پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی ثبت شده در گزارش‌ها و تطبیق آن‌ها با پارامترهای اپراتوری و عملکردی ماشین حفار در کورس‌های پیشروی و همچنین تلفیق تجربیات موجود در حین حفاری تعیین شده است.

به منظور درک بهتر الگوی تغییرات شاخص FPI و نسبت Tq/Th در طول مسیر تونل انتقال آب کرج (قطعه دوم) و تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۴، ۳ و بخشی از ۲) در شکل ۲ ارائه شده است. در این نمودارها، موقعیت گسل‌های اصلی با تغییرات پارامترهای عملکردی TBM انطباق داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که اغلب گسل‌های شناسایی شده



شکل ۲- تغییرات شاخص FPI و نسبت Tq/Th؛ الف) تونل انتقال آب کرج (قطعه ۲)، تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳، ۴ و بخشی از ۲)

پهنه‌های گسلی و سایر بخش‌های مسیر تونل استخراج و تحلیل شد. بدین منظور، هیستوگرام‌ها و توابع توزیع نرمال برای مقایسه آماری این دو دسته داده ترسیم گردید (شکل‌های ۳ و ۴). در این نمودارها، داده‌های مربوط به

۲-۳- ارزیابی حفرپذیری پهنه‌های گسلی در این تحقیق به منظور ارزیابی حفرپذیری و بررسی عملکرد TBM، داده‌های شاخص نفوذ صحرایی (FPI) برای تونل‌های مورد مطالعه در بانک اطلاعاتی به صورت تفکیک شده در

ادامه می‌یابد. مسیر تونل عمدتاً شامل سنگ‌های کربناتی-آرژیلیتی است.

شاخص *FPI* برای قطعه ۱-الف (۱۴ کیلومتر) و ۵ کیلومتر ابتدایی قطعه دوم در شکل ۳-ب ارائه شده است. میانگین شاخص *FPI* برای توده‌سنگ‌ها ۱۸/۷۰ (رده *B-III*) و برای پهنه‌های گسلی ۷/۹۸ (رده *B-IV*) برآورد شده است. نمودارهای شکل‌های ۴-ج و ۴-د شرایط حفریذیری در قطعه ۱-الف و قطعه دوم را نشان می‌دهند. مهم‌ترین پهنه‌های گسلی مسیر شامل گسل‌های هیرتا و زی بوده که ورود آب و لهیدگی سنگ را به همراه داشته و چالش‌های حفاری قابل توجهی را ایجاد کرده‌اند.

۳-۲-۴- تونل انتقال آب کرمان (Kr.WCT)

تونل انتقال آب کرمان به طول تقریبی ۳۸ کیلومتر در دو قطعه شمالی و جنوبی با استفاده از ماشین‌های حفار سپر دوگانه اجرا می‌شود. مسیر تونل عمدتاً شامل سنگ‌های آذرین و آذرین-پیروکلاستیکی بوده و با گسل‌های کوچک و متعددی تقاطع دارد.

در این مطالعه، داده‌های شاخص *FPI* مربوط به ۱۰ کیلومتر ابتدایی قطعه شمالی و ۵ کیلومتر ابتدایی قطعه جنوبی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج آن در شکل ۳-ج ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد میانگین شاخص *FPI* برای توده‌سنگ‌های کل مسیر تونل برابر با ۲۶/۱۰ است که در رده حفریذیری متوسط (*B-II*) قرار می‌گیرد، در حالی که این مقدار در پهنه‌های گسلی به ۸/۹۸ کاهش یافته و بیانگر حفریذیری بسیار خوب (*B-IV*) در این نواحی است. علاوه بر این نمودارهای شکل ۴-ه و ۴-و به ترتیب شرایط حفریذیری در قطعات شمالی و جنوبی تونل را نشان می‌دهند. در قطعه شمالی، میانگین *FPI* برای توده‌سنگ‌ها ۱۹/۵۰ (رده *B-III*) و برای پهنه‌های گسلی ۷/۷۱ (رده *B-IV*) برآورد شده است. در قطعه جنوبی تونل کرمان، میانگین *FPI* توده‌سنگ‌ها به ۴۶/۲۳ افزایش یافته و در رده حفریذیری نسبتاً سخت (*B-I*) قرار می‌گیرد، در حالی که پهنه‌های گسلی این قطعه با میانگین *FPI* ۱۴/۰۱، در رده حفریذیری بسیار خوب (*B-IV*) طبقه‌بندی می‌شوند. با توجه به پهنای کم پهنه‌های گسلی و نفوذپذیری پایین سنگ‌ها، مشکلات زمین‌شناسی شاخصی در طول حفاری گزارش نشده است.

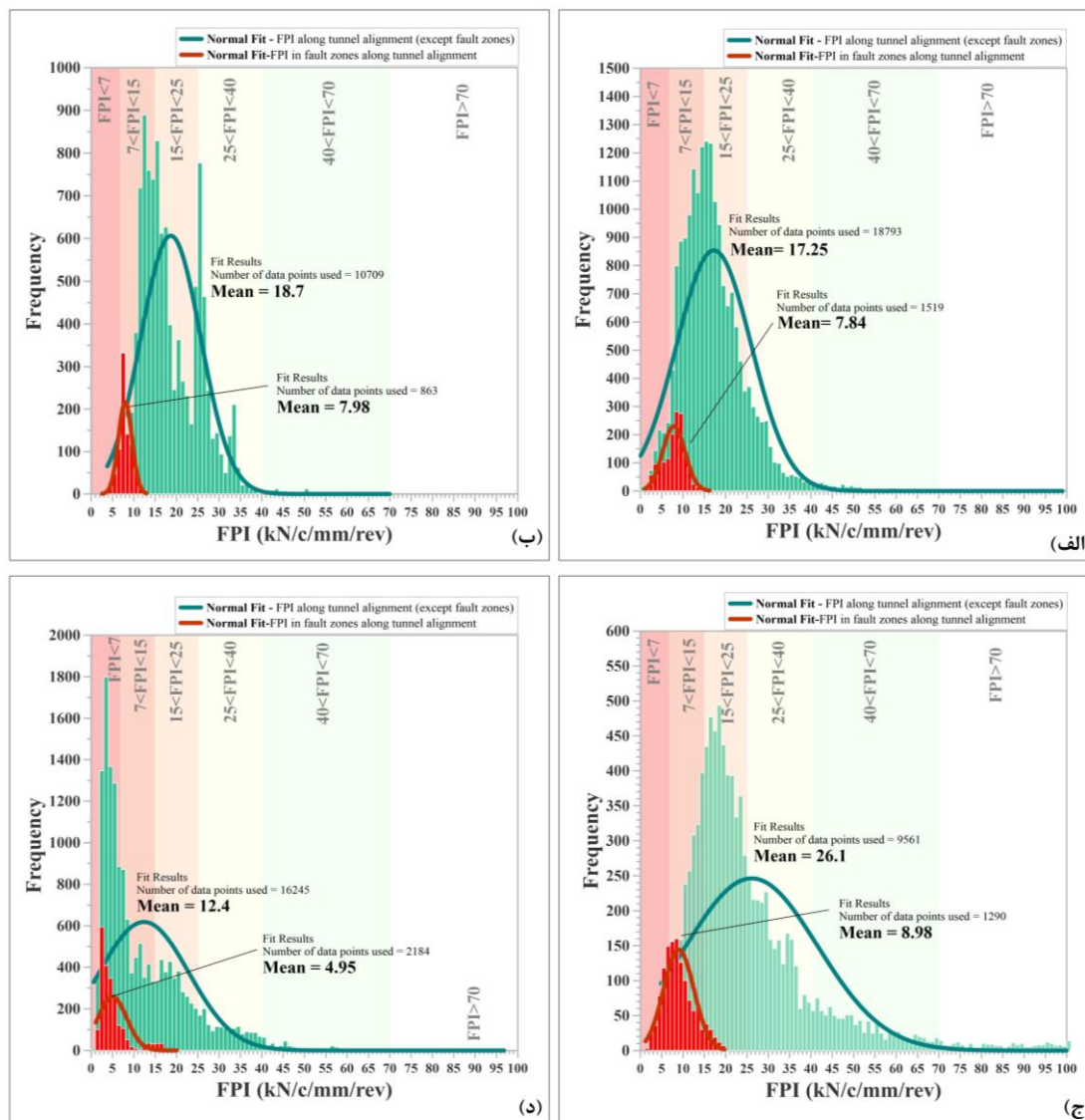
پهنه‌های گسلی با رنگ قرمز و سایر بخش‌های تونل با رنگ سبز مشخص شده‌اند. نتایج تحلیل آماری نشان می‌دهد که در تمامی تونل‌های مورد بررسی، میانگین شاخص *FPI* در پهنه‌های گسلی به‌طور معناداری کمتر از سایر بخش‌های مسیر تونل است ($P\text{-Value} < 0.001$) که بیانگر افزایش حفریذیری در این نواحی می‌باشد.

۳-۲-۱- تونل انتقال آب کرج (KWCT)

تونل انتقال آب کرج به طول تقریبی ۳۰ کیلومتر در دو قطعه مجزا (قطعه اول ۱۶ کیلومتر و قطعه دوم ۱۴ کیلومتر) اجرا شده است. مسیر تونل شامل سنگ‌های پیروکلاستیکی، آتشفشانی و رسوبی آواری بوده و تغییرات شاخص *FPI* برای کل مسیر و پهنه‌های گسلی در شکل ۳-الف نشان داده شده است. میانگین شاخص *FPI* برای توده‌سنگ‌ها ۱۷/۲۵ (رده حفریذیری *B-III*) و برای پهنه‌های گسلی ۷/۸۴ (رده *B-IV*) برآورد شده است. شرایط حفریذیری در قطعه اول و دوم تونل به ترتیب در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب ارائه شده است. در قطعه اول، میانگین *FPI* برای توده‌سنگ‌ها ۱۵/۹۹ (رده *B-III*) و برای پهنه‌های گسلی ۹/۰۹ (رده *B-IV*) برآورد شده است. در قطعه دوم، میانگین *FPI* توده‌سنگ‌ها ۱۹/۱ (رده *B-III*) و برای پهنه‌های گسلی ۶/۳۷ (رده *B-V*) محاسبه شده است. بخش‌های ابتدایی قطعه اول این تونل، به طول تقریبی یک کیلومتر، به‌صورت موازی با گسل شمال تهران امتداد یافته است. عملیات حفاری در این بخش، به دلیل بالاتر بودن تراز تونل نسبت به سطح آب زیرزمینی و قرارگیری در فاصله‌ای ایمن از هسته گسل، بدون بروز مشکل شاخصی پیشرفت کرده است. همچنین، مهم‌ترین پهنه گسلی در مسیر تونل انتقال آب کرج در قطعه دوم، راندگی پورکان-وردیج با پهنای تقریبی ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر است. در این پهنه گسلی، به دلیل حضور سنگ‌های پیروکلاستیک با نفوذپذیری پایین و عدم توسعه سفره‌های آب زیرزمینی پرفشار، پدیده‌ای با اثر منفی قابل توجه که منجر به توقف ماشین حفار شود گزارش نشده و حفاری تنها با وقوع چند ناپایداری موضعی همراه بوده است.

۳-۲-۲- تونل انتقال آب نوسود (NWCT)

تونل انتقال آب نوسود با طول تقریبی ۵۰ کیلومتر در دو قطعه مجزا اجرا شده است. قطعه اول (۲۳ کیلومتر) شامل دو بخش الف (۱۳/۷ کیلومتر، قطر ۵/۵ متر) و ب (۹ کیلومتر، قطر ۶/۱۲ متر) است و قطعه دوم با طول ۲۶ کیلومتر و قطر ۶/۷۳ متر



شکل ۳- هیستوگرام و توابع توزیع نرمال تونل‌های مورد مطالعه در پهنه‌های گسلی و سایر بخش‌های مسیر: (الف) تونل انتقال آب کرج (قطعه ۱ و ۲)، (ب) تونل انتقال آب نوسود (قطعه ۱-الف و قطعه ۲)، (ج) تونل انتقال آب کرمان (قطعه شمالی و جنوبی)، تونل انتقال آب قمرود (قطعه ۳، ۴ و بخشی از ۲)

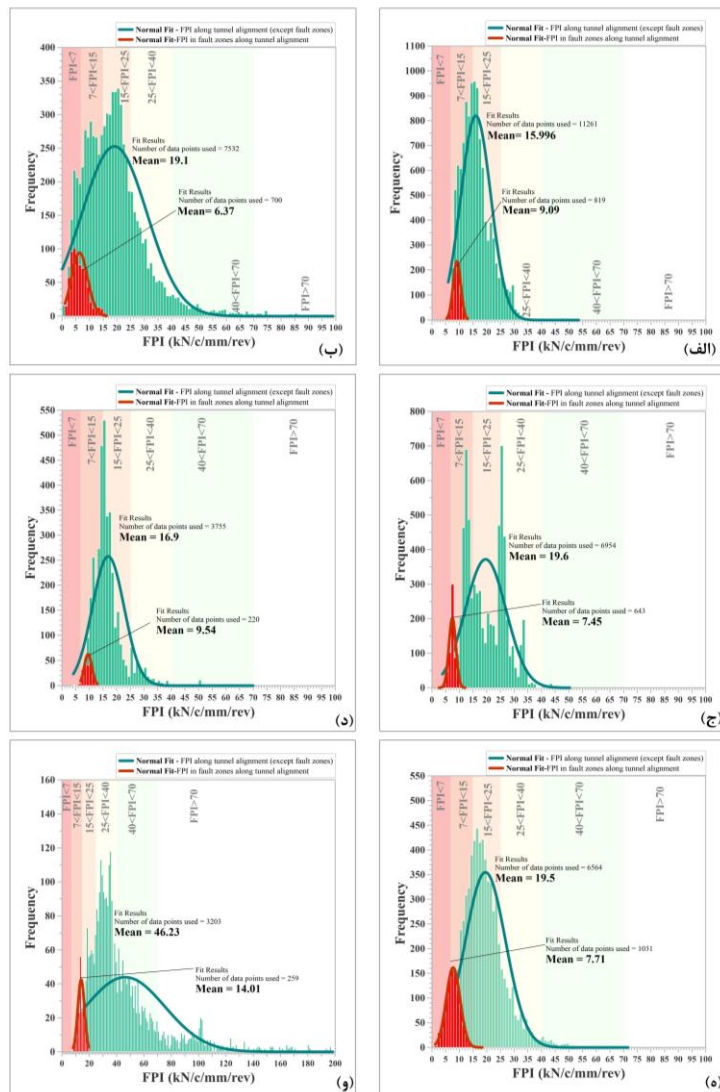
تغییرات شاخص نفوذ صحرایی (FPI) برای کل مسیر تونل و پهنه‌های گسلی متناظر در شکل ۳-د ارائه شده است. بر اساس نتایج تحلیل آماری، میانگین شاخص FPI برای توده‌سنگ‌های کل مسیر تونل برابر با ۱۲/۴ و برای پهنه‌های گسلی مسیر تونل ۴/۹۵ محاسبه شده است که نشان‌دهنده افزایش قابل توجه حفرپذیری در نواحی گسلی می‌باشد. بررسی تفکیکی بر اساس لیتولوژی نشان می‌دهد که میانگین

۳-۲-۳- تونل انتقال آب قمرود (Gh.WCT)

تونل انتقال آب قمرود (شامل قطعات ۳، ۴ و بخشی از قطعه ۲) با طول تقریبی ۲۴ کیلومتر، در مسیر خود از واحدهای سنگی متنوعی شامل سنگ‌های دگرگونی درجه پایین تا متوسط، سنگ‌های متاولکانیک و سنگ‌های کربناتی نظیر سنگ‌آهک توده‌ای و کریستالین و دولومیت عبور می‌کند.

حفریذیری بسیار خوب (*B-IV*) بوده و پهنه‌های گسلی دربرگیرنده آن‌ها در رده حفریذیری عالی (*B-V*) طبقه‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی ثبت‌شده در مسیر این تونل شامل لهیدگی و ریزش در سنگ‌های دگرگونی و ورود آب به داخل تونل در واحدهای کربناتی بوده است. وقوع پدیده لهیدگی در برخی مقاطع موجب بروز چالش‌های اجرایی قابل توجه شده و در چندین نوبت به توقف عملیات حفاری و گیر افتادن سپر ماشین حفار منجر شده است.

شاخص *FPI* برای سنگ‌های کربناتی مسیر تونل ۳۳/۱۰ و برای سنگ‌های دگرگونی ۱۰/۱۰ برآورد شده است. همچنین مقدار این شاخص برای پهنه‌های گسلی واقع در سنگ‌های کربناتی و دگرگونی به ترتیب ۱۴/۹۸ و ۴/۲۰ محاسبه شده است. بر این اساس، سنگ‌های کربناتی مسیر تونل از نظر حفریذیری در رده متوسط تا خوب (*B-II*) و پهنه‌های گسلی مرتبط با آن‌ها در رده بسیار خوب (*B-IV*) قرار می‌گیرند. سنگ‌های دگرگونی درجه پایین تا متوسط نیز دارای

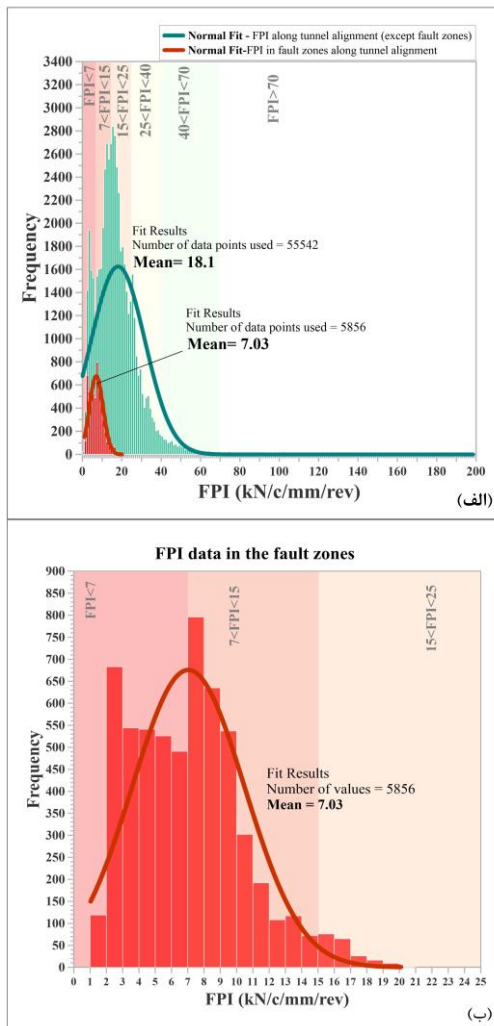


شکل ۴- هیستوگرام و توابع توزیع نرمال بخش‌های مختلف تونل‌های مورد مطالعه در پهنه‌های گسلی و سایر بخش‌های مسیر: الف) تونل انتقال آب کرج (قطعه ۱)، ب) تونل انتقال آب کرج (قطعه ۲)، ج) تونل انتقال آب نوسود (قطعه ۱-الف)، د) تونل انتقال آب نوسود (قطعه ۲)، ه) تونل انتقال آب کرمان (قطعه شمالی)، و) تونل انتقال آب کرمان (قطعه جنوبی)

۳-۳- تحلیل آماری شاخص FPI

به منظور بررسی رفتار کلی حفرپذیری، تمامی داده‌های شاخص FPI در تونل‌های مورد مطالعه جمع و به صورت هیستوگرام و تابع توزیع نرمال در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود، توزیع مقادیر شاخص FPI در طول مسیر حفاری تمامی تونل‌های مورد مطالعه، شامل بخش‌های غیرگسلی و گسلی، متفاوت است؛ بخش‌های غیرگسلی دامنه تغییرات وسیع‌تری نسبت به پهنه‌های گسلی دارند که نشان‌دهنده ناهمگنی شرایط حفاری در این نواحی است. در مقابل، شکل ۵-ب توزیع آماری شاخص FPI را صرفاً برای پهنه‌های گسلی نشان می‌دهد که تمرکز داده‌ها در مقادیر پایین‌تر این شاخص را برجسته می‌کند. بر اساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۵ و جدول ۳، رفتار زمین در پهنه‌های گسلی از نظر شاخص FPI به‌طور معناداری با سایر بخش‌های مسیر تونل متفاوت است. میانگین شاخص FPI در بخش‌های غیرگسلی برابر با ۱۸/۱۰، با انحراف معیار ۱۳/۸۵ و ضریب تغییرات ۰/۷۶ برآورد شده است که بیانگر دامنه تغییرات گسترده و ناهمگنی شرایط حفاری در این نواحی است. در مقابل، در پهنه‌های گسلی میانگین FPI به ۷/۰۳ کاهش یافته و انحراف معیار ۳/۴۵ با ضریب تغییرات ۰/۴۹ به دست آمده است که نشان‌دهنده تمرکز بیشتر داده‌ها در اطراف میانگین و مناسب بودن شرایط حفرپذیری در این نواحی است. نتایج آزمون t مستقل نشان داد این اختلاف از نظر آماری معنادار است ($p < 0.001$) و اندازه اثر محاسبه‌شده ($d = 0.92$) بیانگر شدت بسیار بالای این تفاوت می‌باشد. این مقدار اندازه اثر نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه حضور پهنه‌های گسلی بر کاهش شاخص FPI و افزایش حفرپذیری در این نواحی است.

همان‌گونه که از مقایسه شکل‌های ۵-الف و ۵-ب قابل مشاهده است، مقادیر شاخص FPI در بخش‌های غیرگسلی دامنه وسیعی داشته و تا بیش از ۷۰ نیز گسترش می‌یابد، در حالی که در پهنه‌های گسلی مقادیر این شاخص عمدتاً کمتر از ۱۵ بوده و در رده‌های حفرپذیری بسیار خوب تا عالی (B-IV و B-V) قرار می‌گیرند. این تفاوت آماری بیانگر کاهش قابل توجه مقاومت زمین در نواحی گسلی بوده و نقش سایر شرایط زمین‌شناسی را در تغییر رفتار حفاری، عملکرد TBM و شدت وقوع مخاطرات زمین‌شناسی را برجسته می‌سازد.



شکل ۵- هیستوگرام و تابع توزیع نرمال کلی شاخص FPI در بانک اطلاعاتی؛ الف) مقایسه تغییرات FPI در طول مسیر حفاری تمامی تونل‌های مورد مطالعه (شامل بخش‌های گسلی و غیرگسلی)؛ ب) شاخص FPI در پهنه‌های گسلی

جدول ۳- شاخص‌های آماری FPI در مسیر تونل‌ها.

شاخص‌های آماری FPI	پهنه‌های گسلی	سایر بخش‌های تونل
تعداد داده‌ها (n)	۵۸۵۶	۵۵۵۵۲
میانگین (Mean)	۷/۰۲	۱۸/۱۰
میانه (Median)	۷/۰۳	۱۵/۹۰
مد (Mode)	۷/۳۵	۱۶/۱۲
انحراف معیار (SD)	۳/۴۵	۱۳/۸۵
ضریب تغییرات (CV)	۰/۴۹	۰/۷۶
چارک اول-سوم (Q1-Q3)	۴/۲۰-۹/۰۷	۱۰/۵۶-۲۲/۶۰

می‌شود. در مقابل، تونل‌های عبوری از سنگ‌های کربناته آرژیلیتی و شیلی با مقاومت متوسط تا ضعیف مانند سازندهای ایلام، سورمه، پابده و گرو (تونل‌های نوسود)، و سنگ‌های دگرگونی درجه پایین در تونل قمرود کاهش ۳۵ تا ۶۵ را نشان داده‌اند.

تحلیل جامع داده‌های میانگین و پراکندگی ($Q1$ و $Q3$) شاخص FPI در شرایط گسلی و غیرگسلی برای هشت پروژه نشان داد که کاهش FPI در پهنه‌های گسلی در بازه‌ای بین ۳۰ تا ۷۰ درصد قرار می‌گیرد. علاوه بر این، با توجه به تکرار الگوی رفتاری در پروژه‌های مختلف و هم‌پوشانی نتایج، بازه غالب کاهش عملکرد یا MFR (Most Frequent Reduction) نیز در محدوده ۴۵ تا ۶۵ درصد مشخص شد.

با در نظر گرفتن نوسان داده‌های FPI با استفاده از چارک اول ($Q1$) و چارک سوم ($Q3$)، ضریب کاهش ناشی از حضور پهنه گسلی و درصد کاهش عملکرد TBM در پهنه گسلی محاسبه گردید. نتایج نشان داد درصد کاهش شاخص FPI در پهنه‌های گسلی بین تونل‌ها یکنواخت نبوده و به‌طور مستقیم با لیتولوژی و وضعیت ژئومکانیکی واحدهای سنگی مرتبط است. در تونل‌های عبوری از سنگ‌های پیروکلاستیکی، سنگ‌های آذرین و سنگ‌های آهکی خالص کاهش FPI ۶۰ تا ۷۰ درصد به‌دست آمد. دلیل این امر RQD و UCS بالای توده‌سنگ غیرگسلی است که با ورود به پهنه گسلی دچار افت شدید شده و به‌واسطه ماهیت نمایی مدل حسن‌پور و همکاران ($Hassanpour et al., 2011$)، باعث کاهش چشمگیر FPI

جدول ۴- تعیین درصد کاهش شاخص FPI در پهنه‌های گسلی

پروژه	$FPI_{Faulted}$		$FPI_{Non-Faulted}$		ضریب کاهش R_{FPI}	درصد کاهش	درصد کاهش MFR
	$Q1$	$Q3$	$Q1$	$Q3$			
کرج قطعه ۱	۸/۱۴	۹/۹۷	۱۲/۰۹	۱۸/۷۲	۰/۵۳-۰/۶۷	۳۲/۷۱-۴۶/۷۶	۳۰-۵۰
کرج قطعه ۲	۴/۰۶	۸/۱۵	۱۰/۸۹	۲۴/۰۳	۰/۳۴-۰/۳۷	۶۲/۷۰-۶۶/۰۹	۶۰-۷۰
قمرود قطعه ۳، ۴ (سنگ‌های دگرگونی)	۲/۷۲	۵/۲۹	۱۵/۰۷	۴/۱۰	۰/۳۵-۰/۶۶	۳۳/۸۱-۶۴/۹۱	۳۰-۶۵
قمرود قطعه ۳، ۴ (سنگ‌های کربناتی)	۱۳/۸۷	۱۶/۰۸	۲۷/۵۰	۳۸/۳۴	۰/۴۲-۰/۵۰	۴۹/۵۶-۵۸/۰۵	۵۰-۶۰
کرمان قطعه شمالی	۵/۹۵	۹/۴۱	۱۴/۵۲	۲۳/۱۲	۰/۳۹-۰/۴۱	۵۹/۳۰-۶۱/۰۰	۶۰-۶۵
کرمان قطعه جنوبی	۱۲/۱۲	۱۶/۰۱	۱۴/۵۲	۲۳/۱۲	۰/۳۰-۰/۴۳	۵۷/۱۲-۷۰/۳۱	۶۰-۷۰
نوسود قطعه ۱-الف	۶/۹۷	۸/۰۸	۱۲/۴۹۲	۲۵/۵۴	۰/۳۲-۰/۵۴	۴۶/۰۴-۶۸/۳۵	۴۵-۶۵
نوسود قطعه ۲-الف	۵/۹۵	۹/۴۱	۱۸/۳۶	۱۳/۷۹	۰/۵۷-۰/۶۱	۳۸/۷۹-۴۲/۷۶	۳۵-۴۵

MFR : بازه غالب درصد کاهش FPI که از حد پایین ($Q1$) تا حد بالای ($Q3$) درصد کاهش هر پروژه استخراج شده است.

۴- موقعیت پهنه‌های گسلی در مدل تجربی

دانشگاه تهران

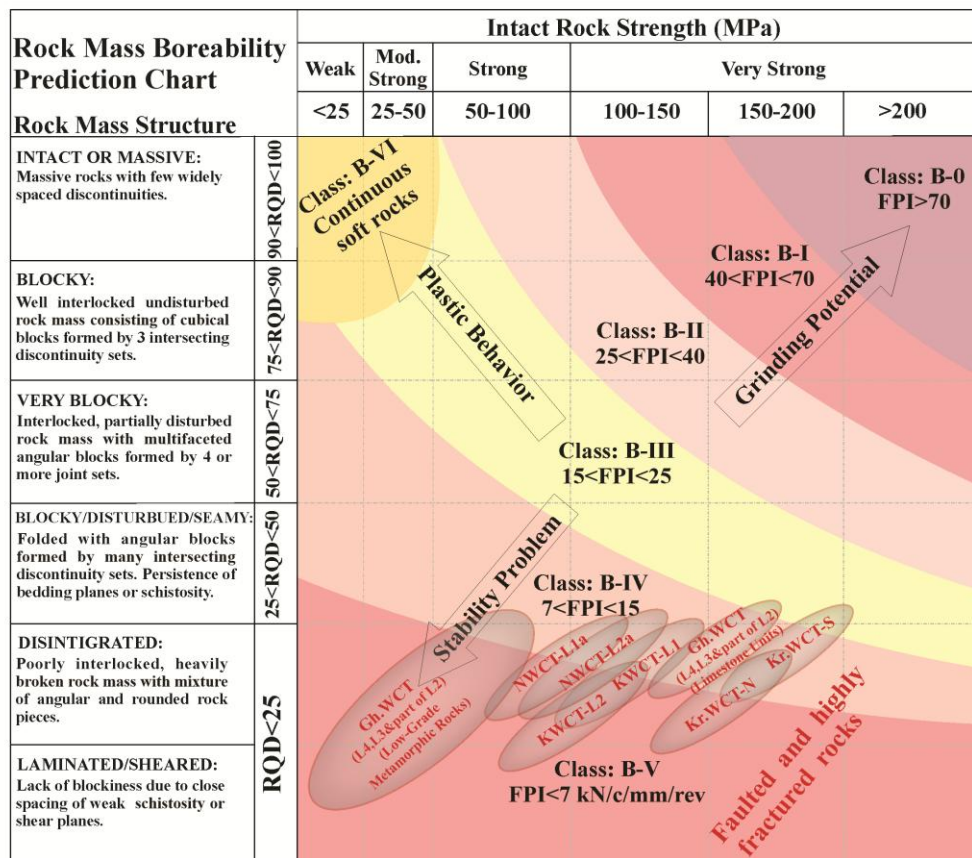
در این مطالعه، آخرین نسخه مدل دانشگاه تهران توسعه یافته توسط حسن‌پور و همکاران [۳] برای برآورد نرخ نفوذ در پهنه‌های گسلی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۶). مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های موجود بانک اطلاعاتی تکمیل شده و بخش‌های متعلق به پهنه‌های گسلی در نمودار جدید اضافه گردیده است. مطابق با نظر حسن‌پور و همکاران [۳]، توده‌سنگ‌هایی با RQD کمتر از ۲۵ درصد در رده‌های

حفریذیری بسیار خوب تا عالی (رده‌های $B-V$ و بخش‌هایی از $B-IV$ در شکل ۶) طبقه‌بندی می‌شوند. مقادیر پایین RQD بیانگر تراکم بالای شکستگی‌ها و کاهش یکپارچگی توده‌سنگ است که شرایط را برای حفاری مکانیزه با نیروی پیشران کمتر و نرخ نفوذ بالاتر فراهم می‌سازد.

بر اساس نتایج این مطالعه، موقعیت پهنه‌های گسلی در پروژه‌های بانک اطلاعاتی با اتکا بر داده‌ها و تحلیل‌های آماری، در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، این پهنه‌ها تطابق قابل‌توجهی با

موارد دیگر، حضور پهنه گسلی نه تنها مشکلات زمین‌شناسی ایجاد نکرده، بلکه تا حدی موجب بهبود نرخ پیشروی ماشین حفار نیز شده است. در این زمینه نتایج مطالعات پالترینیری نیز نشان داده است که حفاری مکانیزه در پهنه‌های گسلی ممکن است به دلیل وجود شکستگی‌های فراوان و مقاومت پایین‌تر سنگ، با نرخ نفوذ بالاتری همراه باشد با این حال، چالش‌هایی نظیر ناپایداری سینه کار، ورود آب، سینه کار مختلط یا مضرس، سایش غیرنرمال تیغه‌های برشی و انسداد (کلاگینگ) مصالح می‌توانند مشکلات جدی ایجاد کرده و منجر به توقف‌های طولانی مدت در عملیات حفاری شوند. این عوامل در مجموع منجر به کاهش بهره‌وری ماشین حفار و کند شدن پیشرفت عملیات تونل‌سازی می‌شوند؛ به طوری که شدت تأثیر آن‌ها وابسته به نوع و میزان مخاطرات زمین‌شناسی موجود در مسیر تونل است [۱۲، ۱۳].

محدوده‌های حفرپذیری تعیین‌شده بر مبنای شاخص FPI دارند. نواحی مذکور با توجه به مقاومت سنگ میزبان و کاهش شاخص RQD در پهنه‌های گسلی شناسایی و تفکیک شده‌اند؛ به گونه‌ای که کاهش این پارامترها به روشنی بیانگر تأثیر حضور گسل‌ها بر کیفیت توده سنگ و افزایش قابلیت حفاری در این بخش‌ها است. ویژگی‌های توده سنگ‌های گسلی بسته به لیتولوژی، فاصله از هسته گسلی و سایر عوامل می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال، با فاصله گرفتن از هسته گسلی، خردشدگی کاهش یافته و سنگ‌ها با لیتولوژی و مقاومت متفاوت تغییرات قابل توجهی در شاخص FPI نشان می‌دهند. اگرچه مقادیر شاخص FPI در پهنه‌های گسلی و غیرگسلی در لیتولوژی‌های مختلف تفاوت معناداری نشان می‌دهد، مطالعات موردی و تجربیات واقعی بیانگر آن است که شدت چالش‌ها و تأثیر آن بر عملکرد TBM در پروژه‌های مختلف متفاوت بوده است. در برخی پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه، پهنه‌های گسلی بسیار چالش‌برانگیز بوده‌اند، در حالی که در



شکل ۶- قابلیت حفرپذیری و موقعیت پهنه‌های گسلی در مدل تجربی دانشگاه تهران

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص نفوذ صحرایی (FPI)، به‌ویژه در ترکیب با پارامتر راهبری نسبت گشتاور به نیروی رانش (Tq/Th)، ابزاری مؤثر و قابل اعتماد برای تحلیل حفریذیری و ارزیابی عملکرد ماشین حفار تونل در پهنه‌های گسلی است. نتایج تحلیل داده‌های میدانی بیانگر آن است که مقادیر شاخص FPI در پهنه‌های گسلی به‌طور معناداری کمتر از سایر بخش‌های مسیر تونل است؛ به‌گونه‌ای که میانگین این شاخص در پهنه‌های گسلی برابر با $7/03$ محاسبه شده است که در ۷۵ درصد داده‌ها مقدار آن کمتر از $9/08$ برآورد شده است. این الگو بیانگر قرارگیری این پهنه‌ها در رده‌های حفریذیری عالی (B-V) تا بسیار خوب (B-IV) را تأیید می‌کند. علاوه‌براین، درصد کاهش FPI در پهنه‌های گسلی بین ۳۰ تا ۷۰ درصد برآورد شده است که بازه غالب کاهش عملکرد در محدوده ۴۵ تا ۶۵ درصد قرار دارد. افزون بر این، تغییرات شاخص FPI در لیتولوژی‌های مختلف و پهنه‌های گسلی دربرگیرنده آن‌ها به‌وضوح قابل مشاهده بوده و بازتابی از میزان خردشدگی، تراکم ناپیوستگی‌ها و کاهش مقاومت توده‌سنگ در این نواحی است.

از سوی دیگر، تجربیات میدانی پروژه‌های تونل‌سازی نشان می‌دهد که با وجود حفریذیری بالا در این پهنه‌ها، سایر عوامل زمین‌شناسی مؤثر در برخی موارد منجر به بروز مخاطراتی نظیر هجوم آب و نشست گاز، ریزش، لهیدگی و ناپایداری سینه‌کار شده است که عملکرد ماشین حفار را به‌شدت محدود کرده و عملیات حفاری را با تأخیر و چالش‌های اجرایی مواجه ساخته است. در مقابل، در برخی پهنه‌های گسلی، کاهش مقاومت سنگ بدون بروز ناپایداری‌های عمده، نه‌تنها مشکل‌ساز نبوده بلکه در مواردی موجب بهبود نرخ پیشروی ماشین حفار شده است. این تفاوت رفتار، نقش تعیین‌کننده سایر پارامترهای زمین‌شناسی از جمله لیتولوژی، شاخص کیفی سنگ، ارتفاع پیژومتریک، ارتفاع روباره، اهمیت گسل و جهت‌گیری نسبی آن نسبت به امتداد تونل و قطر تونل را در کنترل عملکرد TBM برجسته می‌سازد.

در مجموع، تحلیل هم‌زمان حفریذیری و پایداری توده‌سنگ در پهنه‌های گسلی ضرورتی اساسی در تونل‌سازی مکانیزه به شمار می‌رود و شاخص FPI می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی پهنه‌های مخاطره‌آمیز، بهینه‌سازی پارامترهای حفاری، کاهش ریسک و ارتقای ایمنی و بهره‌وری پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه مورد استفاده قرار گیرد.

۶- منابع

- Hassanpour, J. and J. Rostami. *Predicting TBM performance in second lot of karaj water conveyance tunnel (KWCT)*. in *ISRM EUROCK*. 2009. ISRM.
- Hassanpour, J., et al., *TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel*. Rock mechanics and rock engineering, 2010. **43**: p. 427-445.
- Hassanpour, J., J. Rostami, and J. Zhao, *A new hard rock TBM performance prediction model for project planning*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011. **26**(5): p. 595-603.
- Goodarzi, S., et al., *Predicting TBM performance in soft sedimentary rocks, case study of Zagros mountains water tunnel projects*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021. **109**: p. 103705.
- Pourhashemi, S.M., et al., *TBM performance analysis in very strong and massive rocks; case study: Kerman water conveyance tunnel project, Iran*. Geomechanics and Geoengineering, 2022. **17**(4): p. 1110-1122.
- Hassanpour, J., et al., *Investigating the relationships between rock mass classification systems based on data from mechanized tunneling projects in Iran*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022. **81**(4): p. 147.
- Alp, M. and A. Apaydin, *Assessment of the factors affecting the advance rate of the Tunnel Gerede, the longest and one of the most problematic water transmission tunnels of Turkey*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019. **89**: p. 157-169.
- Bilgin, N. and M. Algan, *The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat, Turkey*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012. **32**: p. 58-65.
- Dalgiç, S., *Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003. **18**(5): p. 453-465.



10. Diwakar, K., et al., *Challenges in tunneling in the Himalayas: A survey of several prominent excavation projects in the Himalayan Mountain Range of South Asia*. Geotechnics, 2022. **2**(4): p. 802-824.
11. Goel, R., *Experiences and lessons from the use of TBM in the Himalaya—A review*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016. **57**: p. 277-283.
12. Paltrinieri, E., *Analysis of TBM tunnelling performance in faulted and highly fractured rocks*. 2015, EPFL.
13. Paltrinieri, E., et al., *Probabilistic simulations of TBM tunnelling in highly fractured and faulted rocks*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016a. **57**: p. 183-194.
14. Paltrinieri, E., F. Sandrone, and J. Zhao, *Analysis and estimation of gripper TBM performances in highly fractured and faulted rocks*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016b. **52**: p. 44-61.
15. Panthi, K. *Appropriateness of open TBM tunnelling in the Himalaya—A case study*. in *ISRM EUROCK*. 2009. ISRM.
16. Taherian, A., *TBM tunneling hazards identification and mitigation methods through subterranean rivers: an evaluation of nowsud tunnel in the Iran*. Geotechnical and Geological Engineering, 2023. **41**(2): p. 1673-1687.
17. Shayan, F., A. Uromeie, and J. Hassanpour, *Classification of fault zones in mechanized tunneling projects*, in *Expanding Underground-Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World*. 2023, CRC Press. p. 2245-2252.
18. Shayan, F., A. Uromeihy, and J. Hassanpour, *Classification framework for engineering geological challenges in fault zones during TBM tunneling: Insights from mechanized projects in Iran*. Engineering Geology, 2025. **358**: p. 108382.
19. Barton, N., *TBM tunnelling in jointed and fractured rock*. AA Balkema, Rotterdam, Netherlands, 2000.
20. Klein, S., M. Schmoll, and T. Avery. *TBM performance at four hard rock tunnels in California*. in *Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference*. 1995. SOCIETY FOR MINING, METALLOGY & EXPLORATION, INC.



Analysis of the Effects of Fault Zones on the Boreability Index and TBM Performance in Tunneling Projects (Case Study: Karaj, Ghmroud, Nowsoud, and Kerman Water Conveyance Tunnels)

Fatemeh Shayan¹; Ali Uromeihy²; Jafar Hassanpour^{3*}

1- Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Science, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

Received: 04. October. 2025 Accepted: 20. December. 2025

(*Corresponding author: hassanpour@ut.ac.ir)

Keywords

FPI Index

TBM performance

Boreability

Fault zone

Final English Extended Abstract

Summary

This study investigates the impact of fault zones on tunnel boring machine (TBM) performance using the Field Penetration Index (FPI) and the torque-to-thrust ratio (Tq/Th). Operational data from several mechanized tunnel projects in Iran, including Karaj, Ghomroud, Nowsoud, and Kerman tunnels, were collected and organized into a unified database. Fault zones along the tunnel alignments were identified and delineated based on detailed geological interpretations and project documentation.

Boreability was assessed using the Tehran University TBM performance model, in which FPI is derived from TBM operating parameters. FPI values were calculated along the tunnel drives and statistically analyzed using histograms, normal distribution functions, and descriptive measures such as mean, median, standard deviation, and coefficient of variation. The relationship between FPI and Tq/Th was also examined to improve interpretation of TBM responses in faulted sections.

Results show clear differences between faulted and non-faulted ground. Fault zones generally have lower FPI values, reflecting higher rock mass fragmentation, increased discontinuity density, and reduced rock strength. Despite favorable boreability, some fault zones were associated with operational challenges including instability, groundwater inflow, and squeezing, while others improved TBM advance rates without major geotechnical issues. These findings indicate that FPI, when considered alongside other geological and operational parameters, provides a reliable measure of TBM performance in faulted ground.

Overall, the combined analysis of FPI and ground stability offers a robust framework for performance assessment, risk management, and optimization of tunneling operations in fault zones. Quantitative evaluation of faulted sections enables safer planning, enhanced efficiency, and informed decision-making in mechanized tunneling projects.

Introduction

Mechanized tunneling in complex geological conditions remains a major challenge in underground construction. Fault zones, characterized by intense fracturing, reduced rock strength, and variable hydrogeological conditions, can significantly affect TBM performance. While such zones often provide favorable conditions for cutter penetration, they may simultaneously introduce serious geotechnical risks such as face instability, squeezing, and water ingress. Therefore, a reliable and simple index capable of reflecting both penetration



behavior and ground conditions is essential. The Field Penetration Index (FPI), derived from thrust force and penetration rate, has been widely used to evaluate rock boreability. However, its behavior in fault zones and its integration with operational parameters require further investigation. This study aims to analyze the variation of FPI in faulted and non-faulted tunnel sections and assess its effectiveness for performance evaluation in mechanized tunneling.

Methodology and Approaches

In this research, operational and geological data from several TBM-driven tunnel projects were collected and compiled into a unified database. Fault zones along the tunnel alignments were identified and delineated based on detailed geological interpretations and project documentation.

Boreability was evaluated using the Tehran University TBM performance model, in which the Field Penetration Index (FPI) is derived from TBM operating parameters. FPI values were calculated along the tunnel drives and statistically analyzed using histograms and normal distribution functions. Descriptive statistical measures were employed to compare boreability characteristics under faulted and non-faulted ground conditions. In addition, the relationship between FPI and the torque-to-thrust ratio (T_q/T_h) was analyzed to improve the interpretation of TBM operational behavior in fault zones.

Results and Conclusions

The results indicate a clear distinction between faulted and non-faulted sections in terms of FPI behavior. Fault zones generally exhibit significantly lower FPI values, with mean values mostly below 10, corresponding to very good to excellent boreability classes. These low values reflect high degrees of rock mass fragmentation, increased discontinuity density, and reduced rock strength. However, despite favorable boreability conditions, several fault zones were associated with operational difficulties due to instability, groundwater inflow, and squeezing behavior. Conversely, in some cases, fault zones contributed to improved TBM penetration rates without inducing major geotechnical problems. These observations emphasize that boreability, when evaluated alongside other geological and operational parameters, provides a more reliable interpretation of TBM performance in faulted ground. Overall, the study demonstrates that a combined analysis of FPI and ground stability offers a robust framework for TBM performance assessment, risk management, and operational optimization in fault zones.
