

# ارزیابی نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین

ابراهیم فرخ<sup>۱</sup>

۱- گروه مکانیک سنگ و تونلسازی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، e.farrokhi@aut.ac.ir

## چکیده

نرخ نفوذ، یکی از پارامترهای اصلی در عملکرد ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین است که در ارزیابی زمان و هزینه تمام شده یک پروژه مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما تاکنون، مدلی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ در زمین‌های نرم ارائه نشده است و مهندسان از تخمین‌های تقریبی براساس پروژه‌های مشابه استفاده می‌کنند. این موضوع باعث می‌شود که ارزیابی زمان تمام شده پروژه با خطاهای زیادی همراه باشد. در این مقاله، با استفاده از ۳۳ رکورد داده از عملکرد ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین در سراسر جهان، تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته است تا همبستگی بین نرخ نفوذ و عوامل تأثیرگذار آن بررسی شود. پارامترهای مورد بحث شامل قطر تونل، فشار سینه‌کار، شاخص قوام، مقاومت برشی زه‌کش نشده، نسبت بازشدگی کله‌حفار و عدد نفوذ استاندارد است. بر اساس تحلیل داده‌ها، سه پارامتر نسبت بازشدگی کله‌حفار، مقاومت برشی زه‌کش نشده و عدد نفوذ استاندارد به عنوان عوامل مهم تأثیرگذار شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد هرچه مقادیر نفوذ استاندارد و شاخص قوام کمتر باشد و نسبت بازشدگی کله‌حفار بیشتر باشد، نرخ نفوذ بیشتر است. بیشترین مقادیر نرخ نفوذ در محدوده نفوذ استاندارد بین ۳۰ تا ۴۰، شاخص قوام بین ۰/۴ تا ۰/۵ و نسبت بازشدگی کله‌حفار ۴۰ تا ۴۵ درصد به دست می‌آید.

در این مقاله به منظور ارزیابی نرخ نفوذ ماشین متعادل‌کننده فشار زمین، تحلیل‌های مختلفی با روش رگرسیون چند متغیره بر روی داده‌های بانک اطلاعاتی انجام شده است. ضرایب تعیین روابط ارائه شده بین ۶۸ تا ۷۲ درصد است. با توجه به عدم وجود مدل پیش‌بینی عملکرد دقیق برای ماشین‌های حفار زمین نرم، نتایج این مقاله به مهندسان پروژه‌های تونل کمک می‌کند تا در مراحل اولیه پروژه، ارزیابی بهتری از پارامترهای عملکردی و زمان و هزینه مورد نیاز داشته باشند.

## کلمات کلیدی

ماشین حفار متعادل‌کننده فشار زمین، نرخ نفوذ، نسبت بازشدگی، مقاومت برشی زه‌کش نشده، عدد نفوذ استاندارد.

یک برنامه‌ریزی موفقیت آمیز برای اجرای یک تونل به پیش بینی دقیق پارامترهای عملکردی ماشین‌حفری از جمله نرخ نفوذ (PR)، ضریب بهره‌وری (U) و نرخ پیشروی (AR) بستگی دارد. پارامترهای عملکرد ماشین‌های حفاری سنگ سخت از سالهای اولیه معرفی آنها تا کنون مورد بررسی و تحلیل گسترده قرار گرفته‌اند. در این زمینه، محققان مختلف مدل‌های تجربی و نیمه تجربی متعددی ارائه کرده‌اند. در تحقیقات گراهام [۱]، یک مدل تجربی بر اساس تحلیل آماری و با استفاده از مقاومت فشاری تک محوری معرفی شده است. این مدل به عنوان یک مدل تجربی ساده تک پارامتری، پارامترهای توده سنگ را در نظر نمی‌گیرد. در مدل‌های تجربی چندپارامتری، تلاش شده است تا این ضعف برطرف شود و تأثیر پارامترهای ماده سنگ و توده سنگ در کنار هم در نظر گرفته شود. این دسته شامل مدل‌های تجربی نظیر Q<sub>TBM</sub> [۲]، NTNU [۳]، فرخ و همکاران [۴]، حسن پور و همکاران [۵-۷]، خادمی و همکاران [۸] و همچنین مدل‌های نیمه تجربی نظیر مدل CSM [۹ و ۱۰] می‌شود. در روش‌های نیمه تجربی، برخی از ویژگی‌های کلیدی در طراحی کله حفاری TBM مورد بررسی قرار گرفته‌اند، از جمله فاصله داری ابزار برشی و انرژی ویژه به دست آمده از آزمایشگاه با استفاده از ماشین برش خطی [۱۱-۱۳]، ماشین برش چرخشی [۱۴] و شبیه‌سازی‌های عددی [۱۵-۱۷]. خلاصه نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که برای دستیابی به عملکرد بهینه، نسبت فاصله داری ابزار برشی به مقدار نفوذ (S/p) باید به گونه‌ای باشد که انرژی ویژه مصرفی به حداقل برسد [۱۸]. در سال‌های اخیر، از روش‌های شبکه عصبی و منطق فازی (مانند روش الوارز [۱۹]) نیز برای افزایش دقت مدل‌های تجربی استفاده شده است.

ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفار زمین‌های نرم و به طور خاص ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین موضوعی است که فقط توسط چند محقق (مثلاً میدل و کومولادا، [۲۰]) مورد بررسی قرار گرفته است. این عمدتاً به دلیل وجود عوامل تأثیرگذار فراوان است که اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل آنها را دشوار کرده است. میدل و کومولادا [۲۰] با توجه به اطلاعات تجربی تونل‌های حفاری شده با ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین، یک دستورالعمل کلی برای یافتن محدوده‌ای از مقادیر مورد انتظار برای نرخ نفوذ با توجه به مهمترین و تأثیرگذارترین پارامترها (مانند نوع خاک، فشار سینه‌کار، حالت سایش ابزار و غیره) پیشنهاد کرده‌اند. تفاوت عمده بین ماشین‌های حفار سنگ سخت و زمین نرم اغلب مربوط به عملکرد سینه‌کار بسته و عوامل کنترل‌کننده مربوط به آن از جمله حداکثر نشست مجاز سطح زمین است. کنترل نشست سطحی در برخی شرایط از جمله در ارتفاع روباره کم و زیر ساختمانهای حساس از اهمیت بیشتری برخوردار است. همانگونه که توسط شهابا و همکاران اشاره شده است، این ممکن است باعث یک نفوذ و پیشروی بسیار محتاطانه با مقادیر کنترل شده کمتر از ۱۰ میلی‌متر در دقیقه شود. مناطق دیگری که عموماً به صورت کنترل شده حفاری می‌شوند، شامل مناطق گذار در شرایط سینه‌کار مختلط، در نزدیکی سایر تونل‌ها، در نزدیکی پایه شمع، و در نزدیکی سازه‌های زیرسطحی است [۲۱]. در این شرایط، برای کاهش نوسان فشار سینه‌کار، لرزش کله‌حفار و کاهش افت حجمی زمین، نرخ نفوذ کم می‌شود. از این منظر، تجزیه و تحلیل دقیق نرخ نفوذ ماشین‌حفری در زمین نرم نیاز به جزئیات زیادی از عملیات اجرایی، وضعیت زمین، معیارهای مورد نیاز کنترل نشست و عوامل طراحی ماشین‌حفری دارد. طبیعی است که این امر، روند ارزیابی را بسیار دشوار می‌کند. این مقاله مطالعه‌ی است برای ارائه یک راهنمای اساسی برای ارزیابی نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین در یک کاربرد کلی تر که در آن ماشین تحت عملکرد بسیار محتاطانه قرار ندارد.

بررسی مطالعات تحقیقاتی نشان می‌دهد که پارامترهای مختلفی در تجزیه و تحلیل نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین استفاده شده است که شامل نرخ نفوذ (PR)، نفوذ در هر دور کله‌حفار (P<sub>Rev</sub>)، نرخ نفوذ ویژه (SP)، شاخص نیرو (FI) و شاخص گشتاور (TI) است (جدول ۱). در مطالعه دالمن [۲۲]، یک سری تحلیل برای بررسی رابطه بین FI و TI بر اساس اطلاعات ۵ ماشین‌حفری متعادل‌کننده فشار زمین انجام شده است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، یافته‌هایی این مطالعه یک نمودار با یک رابطه توانی با ثابت متغیر است.

جدول ۱: شاخص‌های نرخ نفوذ

Table 1: Penetration rate indices

نماد	تعریف	واحد	رابطه
PR	نرخ نفوذ	mm/min	
PRev	نفوذ در هر دور چرخش	mm/rev	(1000 PR)/(60 RPM)
SP*	نفوذ ویژه	(mm/rev)/kN	PRev/Fcon
FI*	اندیس نیرو	(mm/rev)/(kN/m <sup>2</sup> )	PRev/SCF
TI*	اندیس گشتاور	MNm/(mm/rev)/m <sup>2</sup>	Msp/A

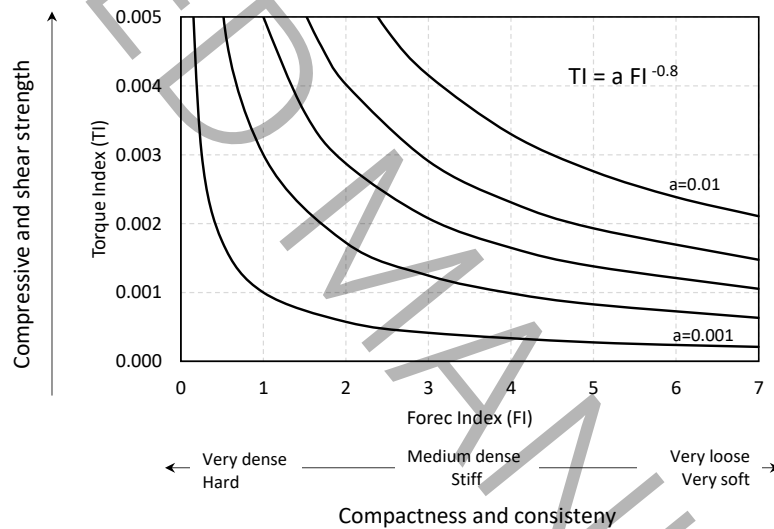
\* بر اساس توضیحات دالمن [۲۲]

Fcon: نیروی تماس (kN).

SCF: نیروی تماس در واحد سطح (kN/m<sup>2</sup>).

Msp: گشتاور ویژه که برابر با گشتاور اعمال شده به ازای نفوذ واحد در یک دور چرخش کله حفار است.

A: سطح مقطع تونل (متر مربع).



شکل ۱: رابطه بین اندیس نیرو و اندیس گشتاور [۲۲]

Figure 1: The relationship between force index and torque index [22]

از نرخ نفوذ مقیاس‌بندی شده به طور گسترده‌ای در کاربردهای ماشین‌های حفاری زمین سخت استفاده شده است ([۲۳]). مزیت پارامترهای مقیاس‌بندی شده در این است که آن‌ها اثر مقدار سرعت چرخش کله حفار و قطر ماشین حفاری را در نظر می‌گیرند. علی‌رغم این مزایا، در مراحل اولیه یک پروژه، تخمین سرعت چرخش کله حفار، نیروی نفوذ و گشتاور معمولاً بسیار دشوار است، به ویژه هنگامی که عوامل کنترل‌کننده دیگری همانند فشار سینه‌کار، سرعت نقاله مارپیچ، و افت حجمی نیز بر روی پارامترهای عملیاتی ماشین حفاری تأثیر بگذارند. به همین دلیل، در صنعت تونل‌سازی، نرخ نفوذ برای ماشین‌های متعادل‌کننده فشار زمین معمولاً بر حسب میلی‌متر در دقیقه توصیف می‌شود. بر اساس تجارب نویسنده در حفاری تونل متروی DTL3 سنگاپور با ماشین متعادل‌کننده فشار زمین [۲۴]، مهمترین فاکتورهای شناخته شده تأثیرگذار بر نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین را می‌توان در چند دسته کلی نشان داده شده در جدول ۲ تقسیم‌بندی کرد.

جدول ۲: دسته بندی پارامترهای موثر بر نرخ نفوذ

Table 2: Classification of parameters affecting the penetration rate

پارامترهای موثر	دسته بندی پارامترها
مقاومت خاک (به عنوان مثال عدد نفوذ استاندارد، مقاومت برشی زه کش نشده و غیره) شاخص قوام (موثر بر گل گرفتگی کله حفار) سایندگی خاک نوع کانی‌های رسی سطح آب زیرزمینی اندازه و نوع خاک وجود تخته سنگ و قلوه سنگ در سینه کار	پارامترهای ژئوتکنیکی
نسبت بازشدگی کله حفار و الگوی بازشوهای کله حفار به ویژه در ناحیه مرکز کله حفار نوع ابزار برشی نوع برش دهنده مرکزی چیدمان ابزارهای برشی چیدمان نازل های تزریق فوم بر روی کله حفار و درون محفظه حفاری نوع سیستم‌های مفصل بندی سپرها و محدودیت های فشارهای وارد شده توسط این سیستم‌ها محدودیت های نیروی رانش و گشتاور ماشین حفار محدودیت حجم تزریق فوم نوع سیستم تزریق فوم نوع فوم و پلیمر تزریق شده	پارامترهای طراحی ماشین
مقدار سایش ابزار حفاری فشار سینه کار سرعت چرخش کله حفار سرعت چرخش نقاله مارپیچ معیارهای مربوط به افت حجمی و کنترل نشست سطحی	پارامترهای عملیاتی
نزدیک بودن به پایه های شمع، سازه های حساس سطحی، سایر تونل ها و ...	سایر شرایط خاص

همانطور که ذکر شد، کمی سازی برآورد نرخ نفوذ برای ماشین‌های حفار زمین‌های نرم، به ویژه برای ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین، در مطالعات محققان مختلف تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. این در حالی است که در هر پروژه تونل سازی، مقدار نرخ نفوذ عاملی تعیین کننده در برآورد زمان اجرای تونل است. در این مقاله، با استفاده از داده‌های تعدادی از پروژه‌های تونلی از کشورهای مختلف دنیا، مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل کننده در شرایط عادی حفاری شناسایی شده و ارتباط این پارامترها با نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، ارائه یک رابطه اساسی برای مهندسان طراح است تا بتوانند تقریب‌های دقیق تری در مراحل اولیه یک پروژه ارائه دهند.

## ۲- شرح پایگاه داده‌ها

به منظور ارزیابی نرخ نفوذ ماشین متعادل کننده فشار زمین، ۳۳ رکورد داده از پروژه‌های سراسر جهان در یک پایگاه داده جمع آوری شد. این داده‌ها از گزارش‌های مختلف ژئوتکنیکی و نتایج تحقیقات مربوط به آن به دست آمده است. نوع داده‌های جمع آوری شده کاملاً وابسته به در دسترس بودن اطلاعات در گزارش‌های مورد استفاده است. جدول ۳ خلاصه پارامترها و داده‌ها را در این پایگاه

داده نشان می‌دهد. قطر حفاری به معنای قطر تونلی است که با استفاده از ماشین حفاری حفر می‌شود. فشار سینه‌کار به متوسط فشار مواد حفاری شده در محفظه حفاری ماشین حفر اشاره دارد. نرخ نفوذ بیانگر میزان نفوذ کله حفر به ازای یک دور چرخش آن می‌باشد. عدد نفوذ استاندارد بیانگر تعداد ضربه‌های لازم برای نفوذ نمونه‌گیر در خاک به اندازه ۳۰ سانتی‌متر در یک گمانه اکتشافی است. نسبت بازشدگی بیانگر نسبت سطح بازشوه‌های کله حفر به کل سطح کله حفر بر حسب درصد است. شاخص قوام کمیتی برای نمایش میزان سفتی خاک است. این کمیت از تقسیم اختلاف بین حد روانی و محتوای آب بر شاخص خمیری به دست می‌آید. مقاومت برشی زه‌کش نشده بیانگر مقاومت برشی خاک در حالت آزمایش زه‌کش نشده است. ارتفاع روباره بیانگر ارتفاع از سطح زمین تا تاج تونل است.

پروژه‌های یاد شده در جدول ۳ مربوط به ۱۰ سال اخیر هستند. لازم به ذکر است که با توجه به در دسترس بودن اطلاعات جزئی‌تر تعدادی از این پروژه‌ها، امکان بررسی اثر تعداد بیشتری از پارامترها نسبت به پارامترهای یاد شده در جدول وجود داشت که در ادامه به صورت مطالعه موردی به آنها اشاره می‌شود.

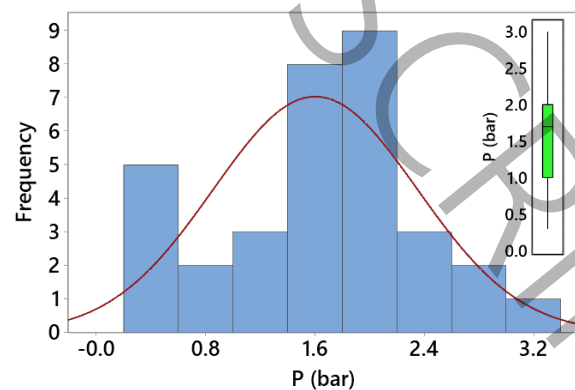
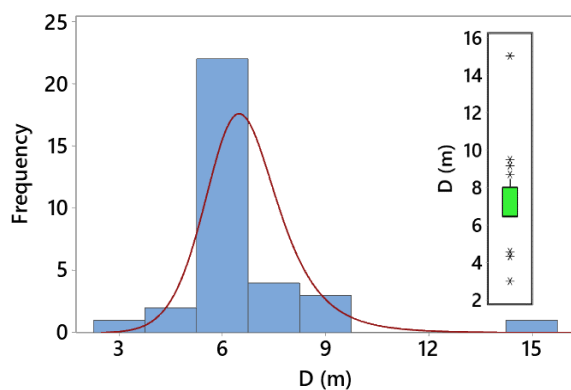
جدول ۳: داده‌های بانک اطلاعاتی

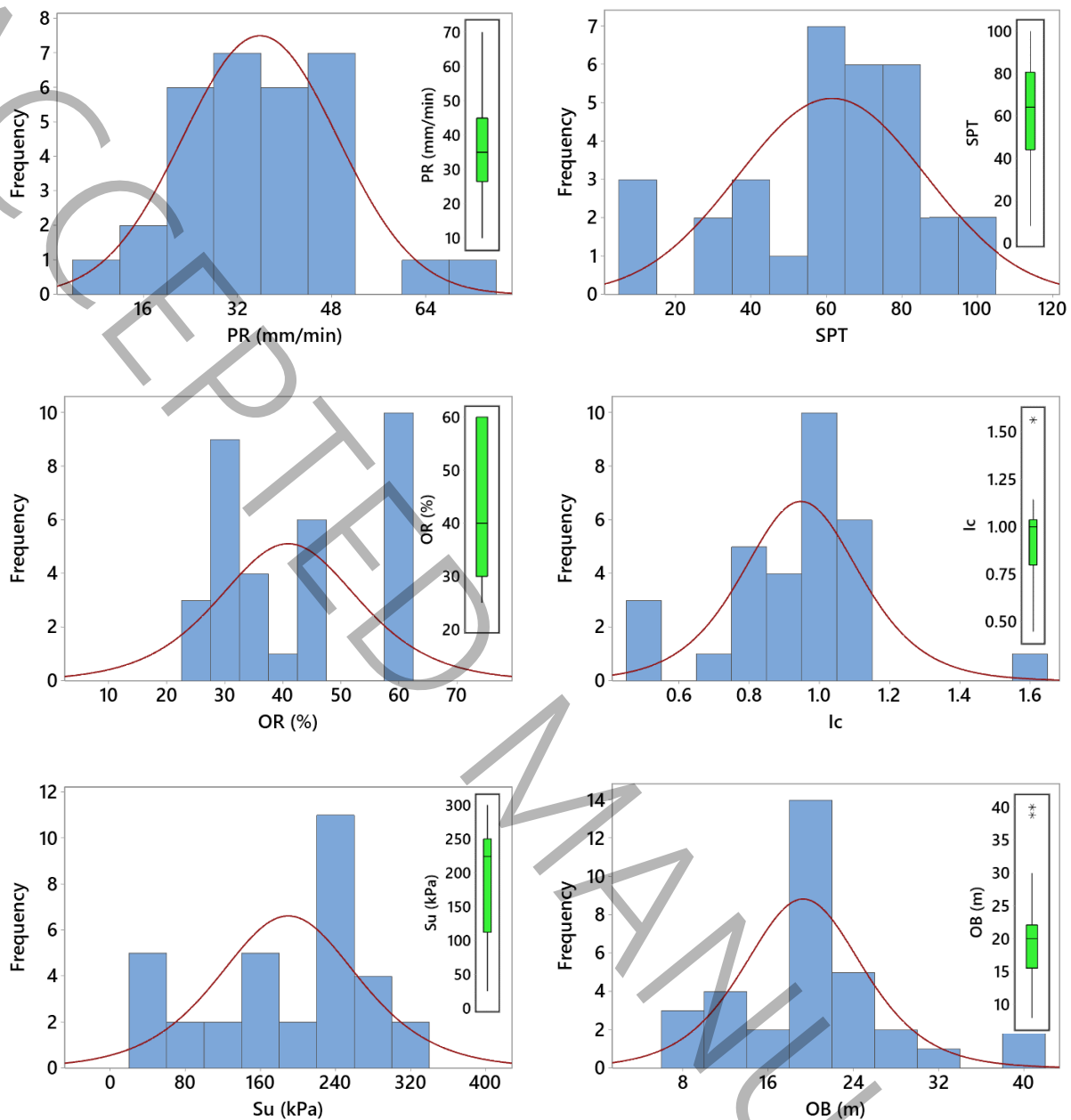
Table 3: Database data

منبع	ارتفاع	مقاومت برشی	شاخص	نسبت	عدد نفوذ	نرخ نفوذ	فشار	قطر	نام پروژه	شماره داده
	روباره	زه‌کش نشده	قوام	بازشدگی	استاندارد		سینه‌کار	حفاری		
	OB	Su	Ic	OR	SPT	PR	P	D		
	(m)	(kPa)		(%)		(mm/min)	(bar)	(m)		
[۲۵]	۸	۱۴۱		۲۸	۵۰	۲۶	۰/۳	۷/۷۷	تونل متروی تورین	۱
	۸	۵۶		۴۰	۷۰	۲۷	۱	۸/۰۳	تونل ریلی میلان	۲
	۱۷	۱۱۴	۰/۸	۲۵	۴۰	۳۰	۱/۵	۶/۷۶	تونل متروی بولوگنا	۳
	۱۳	۲۵۰		۲۵	۱۰۰	۱۶	۲	۸/۷	تونل متروی پورتو	۴
	۳۰	۷۵	۰/۵	۴۳	۳۰	۷۰	۲	۱۵	تونل جاده‌ای مادرید	۵
	۳۹	۸۸	۰/۷	۳۵	۳۰	۴۰	۱/۵	۶/۴۶	تونل متروی بانکوک	۶
داده‌های مولف	۲۰	۲۵۰	۱	۳۰	۱۰۰	۱۵	۲	۶/۶	تونل متروی DTL3C	۷
	۲۰	۲۵۰	۱	۳۰	۶۰	۲۳	۰/۵	۶/۶	تونل متروی DTL3C	۸
	۲۰	۳۰	۰/۵	۳۰	۱۰	۳۲	۲/۷	۶/۶	تونل متروی DTL3C	۹
	۲۰	۲۵۰	۱	۳۰	۶۰	۲۸	۲/۸	۶/۶	تونل متروی DTL3C	۱۰
	۲۰	۳۰	۰/۵	۳۰	۱۰	۳۰	۳	۶/۶	تونل متروی DTL3C	۱۱
	۴۰	۱۴۵	۱	۴۵	۶۵	۶۰	۲	۶/۵۶	تونل متروی U230	۱۲
[۲۵]	۱۳	۳۵	۰/۵	۳۰	۸	۴۶	۱	۳	تونل فاضلاب مبلواکی	۱۳
	۲۵	۱۱۰	۰/۸	۳۵	۴۲	۳۶	۲	۴/۳۱	تونل انتقال آب بوینس آیرس	۱۴
داده‌های مولف	۱۸	۱۶۸	۱	۳۵	۶۰	۳۶	۰/۴	۹/۱۶	تونل متروی تهران خط ۷	۱۵

	۱۰	۲۵	۰/۸	۳۰	۴۰	۴۳	۱	۶/۸۸	تونل متروی تبریز خط ۱	۱۶
[۲۵]	۱۲	۲۵۰	۱/۶	۳۵		۱۰	۰/۵	۴/۵۶	تونل انتقال آب آمبرالی	۱۷
	۸	۱۶۹	۰/۹	۲۵	۵۵	۳۳	۱/۵	۶/۱۶	تونل متروی چنای	۱۸
	۱۴	۱۶۳	۰/۹	۲۹	۵۶	۲۷	۲/۵	۹/۴۶	تونل متروی ساوپالو	۱۹
داده‌های مولف	۲۲	۲۶۳	۱/۱	۶۰	۸۳	۴۵	۰/۵	۶/۴۳	تونل A در سنگاپور	۲۰
	۲۲	۲۶۳	۱/۱	۶۰	۸۳	۴۵	۰/۷	۶/۴۳		۲۱
	۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۳۵	۰/۴	۶/۴۳		۲۲
	۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۳۵	۰/۸	۶/۴۳		۲۳
	۱۹	۱۹۰	۰/۹	۶۰	۶۳		۱/۴	۶/۴۳	تونل B در سنگاپور	۲۴
	۱۹	۱۹۰	۰/۹	۶۰	۶۳		۱/۷	۶/۴۳		۲۵
	۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۵۰	۱/۹	۶/۴۳	تونل C در سنگاپور	۲۶
	۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۵۰	۱/۷	۶/۴۳		۲۷
	۲۰	۲۳۵	۱	۶۰	۷۵	۵۰	۱/۹	۶/۴۳		۲۸
	۲۰	۲۳۵	۱	۶۰	۷۵	۵۰	۲	۶/۴۳		۲۹
	۲۲	۲۶۴	۱/۱	۴۳	۸۳	۲۵	۱/۸	۶/۴۶	تونل D در سنگاپور	۳۰
	۲۲	۲۶۴	۱/۱	۴۳	۸۳	۲۵	۱/۷	۶/۴۶		۳۱
۲۶	۳۰۰	۱/۱	۴۳	۹۲	۳۸	۲/۳	۶/۴۶	۳۲		
۲۶	۳۰۰	۱/۱	۴۳	۹۲	۳۸	۲/۵	۶/۴۶	۳۳		

شکل ۲ توزیع پارامترهای اصلی موجود در این بانک اطلاعاتی و نمودارهای جعبه‌ای آنها را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، دامنه این پارامترها نشان می‌دهد که بانک اطلاعاتی، اکثر مقادیر موجود در پروژه‌های تونل سازی TBM را پوشش می‌دهد. از منحنی‌های توزیع نیز مشاهده می‌شود که اکثر داده‌ها در اطراف نقطه میانی متقارن هستند، به این معنی که اطلاعات بانک اطلاعاتی به سمت محدوده خاصی از پارامترها تمایل ندارد. دامنه اطلاعات مربوط به قطر حفاری، فشار سینه کار، نرخ نفوذ، عدد نفوذ استاندارد، نسبت بازشدگی، شاخص قوام، مقاومت برشی زه کش نشده، و ارتفاع روباره به ترتیب ۱۵-۳ متر، ۳-۰/۳ بار، ۷۰-۱۰ mm/min و ۱۰۰-۱، ۶۰-۲۵ درصد، ۱/۶-۰/۵، ۳۰۰-۲۵ کیلوپاسکال، و ۴۰-۸ متر است. جدول ۴ ماتریس همبستگی بین نرخ نفوذ و سایر پارامترها را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین مقادیر ضریب همبستگی به ترتیب برای نسبت بازشدگی و فشار سینه کار با مقادیر ۰/۵۳ و ۰/۰۲ به دست آمده است.





شکل ۲: توزیع پارامترهای اصلی موجود در بانک اطلاعاتی و نمودار جعبه‌ای آنها

Figure 2: Distribution of the main parameters in the database and their box plot

جدول ۴: ماتریس همبستگی پارامترهای بانک اطلاعاتی

Table 4: Correlation matrix of database parameters

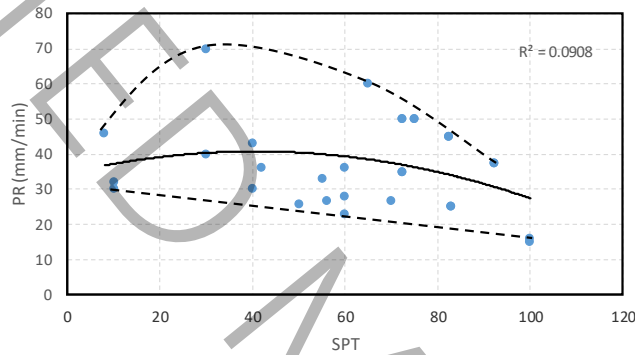
	PR (mm/min)	D (m)	P (bar)	SPT	OR (%)	Ic	Su (kPa)
D (m)	0.260						
P (bar)	0.020	0.105					
SPT	-0.207	-0.005	-0.106				
OR (%)	0.534	-0.079	-0.231	0.411			
Ic	-0.359	-0.351	-0.408	0.894	0.325		
Su (kPa)	-0.205	-0.134	-0.017	0.877	0.418	0.835	
OB (m)	0.480	0.096	0.327	0.019	0.249	-0.215	0.103

### ۳- بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر نرخ نفوذ بر اساس اطلاعات بانک اطلاعاتی

به منظور بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر نرخ نفوذ، روابط دومتغیره بین پارامترهای مختلف موجود در بانک اطلاعاتی و نرخ نفوذ مورد بررسی قرار گرفت که به صورت مفصل در بخشهای بعدی مورد بررسی قرار می گیرند.

#### ۳-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی

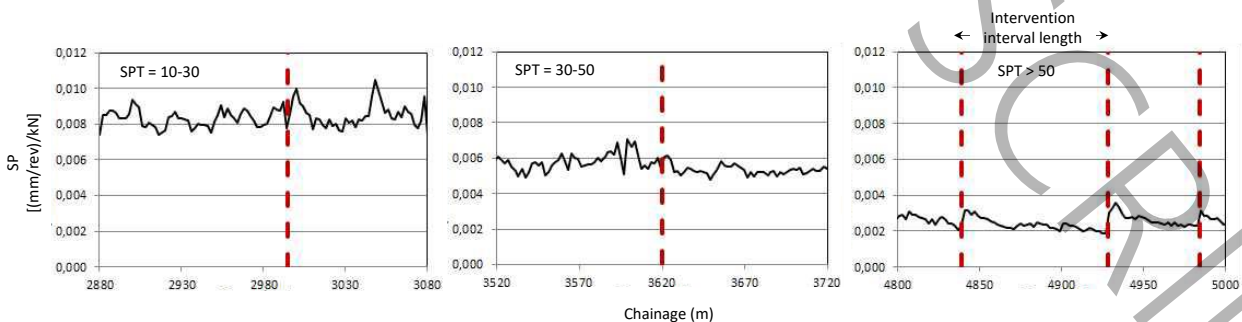
بررسی رابطه دو متغیره بین عدد نفوذ استاندارد و نرخ نفوذ (شکل ۳) نشان می دهد هرچه مقدار عدد نفوذ استاندارد بیشتر باشد، نرخ نفوذ کمتر است. دلیل این امر این است که خاک در مقادیر بیشتر عدد نفوذ استاندارد سفت تر شده و حفر آن مشکل تر می شود. نکته قابل توجه این است که نرخ نفوذ در مقادیر عدد نفوذ استاندارد حدود ۳۰-۴۰ به بیشترین مقدار خود می رسد. در مقادیر عدد نفوذ استاندارد کمتر از ۳۰-۴۰، به دلیل به وجود آمدن مشکلات پایداری در سینه کار، اپراتور ماشین برای اعمال فشار صحیح و جلوگیری از ریزش سینه کار، با احتیاط بیشتری عملیات حفاری را انجام می دهد که این خود باعث کاهش نرخ نفوذ می شود.



شکل ۳: تغییرات نرخ نفوذ در برابر عدد نفوذ استاندارد (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده ها را نشان می دهند)

Figure 3: Changes in penetration rate against the standard penetration number (dashed lines roughly represent the upper and lower bounds of the data)

نتایج این بررسی با نتایج مطالعه انجام شده توسط سایر محققین نیز مطابقت دارد. دالمن [۲۲] در مطالعه خود نشان داده است که افزایش مقدار عدد نفوذ استاندارد باعث کاهش نرخ نفوذ ویژه می شود (شکل ۴). علاوه بر این مشاهدات میدانی در یک پروژه مترو سنگاپور در آبرفت های بسیار سفت و سخت (با عدد نفوذ استاندارد بالای ۱۰۰) نشانگر نفوذ بسیار کم ماشین حفاری بوده است (کمتر از ۱۰ میلی متر در دقیقه) مطابقت دارد.

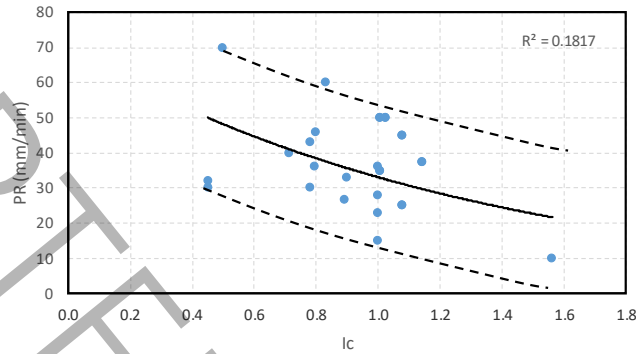


شکل ۴: تأثیر مقادیر عدد نفوذ استاندارد بر نرخ نفوذ [۲۲]

Figure 4: The influence of the values of the standard penetration number on the penetration rate [22]



بررسی رابطه دو متغیره بین شاخص قوام و نرخ نفوذ (شکل ۵) نشان می‌دهد هرچه شاخص قوام کمتر باشد، نرخ نفوذ بیشتر است. دلیل این امر آن است که در مقادیر شاخص قوام کم، جابجایی گل راحت‌تر انجام می‌شود و ماشین در معرض خطر گل‌گرفتگی کمتری است ([۲۷-۲۵]). در شاخص قوام حدود ۰/۴-۰/۵ نرخ نفوذ به حداکثر مقدار خود می‌رسد. این نتیجه موافق با یافته‌های [۲۴]، [۲۸] و [۲۹] است. همانگونه که این محققین اشاره کردند بهترین محدوده شاخص قوام برای کاربرد ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین با خطر احتمالی گل‌گرفتگی کم بین ۰/۴ تا ۰/۵ است.

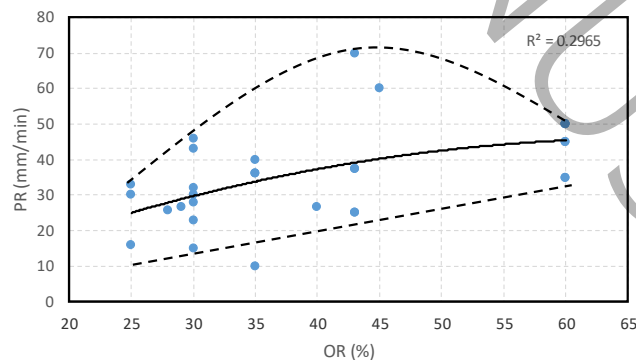


شکل ۵: تغییرات نرخ نفوذ در برابر شاخص قوام (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده‌ها را نشان می‌دهند)

Figure 5: Changes in penetration rate against the consistency index (the dashed lines roughly show the upper and lower limits of the data)

### ۳-۲- پارامترهای طراحی و عملیاتی ماشین

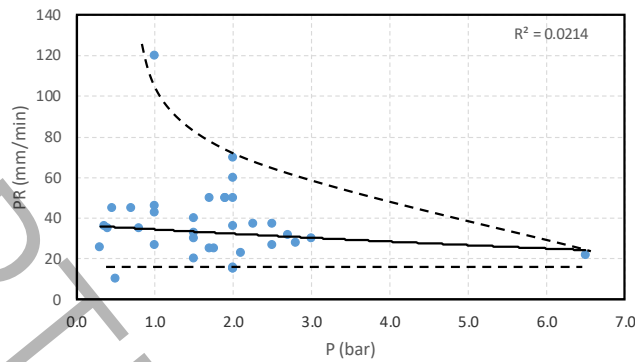
بررسی رابطه دو متغیره بین نسبت بازشدگی کله‌حفار و نرخ نفوذ (شکل ۶) نشان می‌دهد هرچه نسبت بازشدگی کله‌حفار بیشتر باشد، نرخ نفوذ نیز بیشتر است. این به دلیل انتقال بهتر خاک از سینه‌کار به داخل محفظه با خطر گل‌گرفتگی کمتر است. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، نسبت بازشدگی در حدود ۴۰-۴۵٪ شرایط بهینه را برای دستیابی به بهترین نرخ نفوذ فراهم می‌کند. نسبت بازشدگی بیشتر از ۴۵٪ در برخی شرایط خاص (مانند ناپایداری سینه‌کار) با کاهش نرخ نفوذ همراه است. ضرایب تعیین این تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نسبت بازشدگی کله‌حفار و نرخ نفوذ بهترین همبستگی را در بین سایر پارامترهای مورد بررسی دارند.



شکل ۶: تغییرات نرخ نفوذ در برابر نسبت بازشدگی کله‌حفار (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده‌ها را نشان می‌دهند)

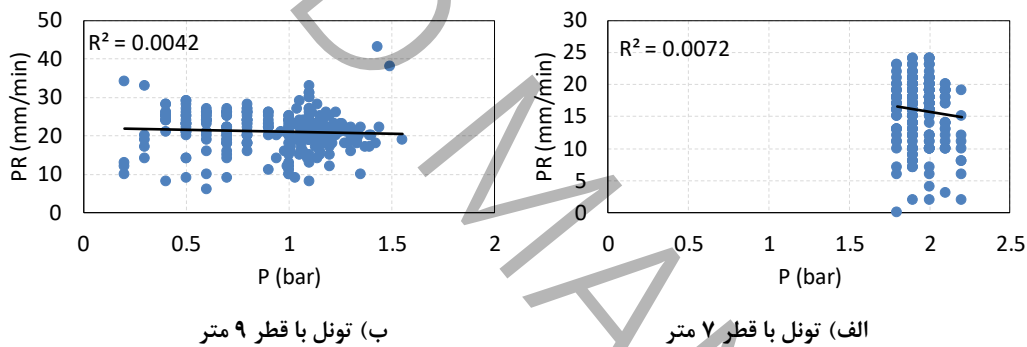
Figure 6: The changes of penetration rate against the opening ratio of the cutterhead (dashed lines roughly show the upper and lower limits of the data)

بررسی رابطه دو متغیره بین فشار سینه کار و نرخ نفوذ (شکل ۷) بیانگر هیچ ارتباط معنی داری نیست. بررسی دقیق تر این موضوع در دو پروژه مترو با قطر ۷ و ۹ متر نیز این موضوع را تایید می کند (شکل ۸). از طرفی دیگر سرعت چرخش نقاله مارپیچ رابطه نسبتا خوبی با نرخ نفوذ دارد (شکل ۹). دلیل این موضوع این است که تخلیه گل حفاری عمدتا توسط سرعت نقاله مارپیچ کنترل می شود.



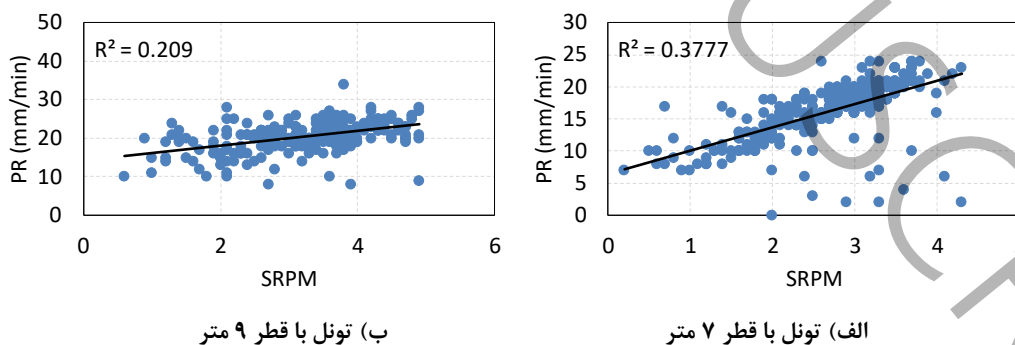
شکل ۷: تغییرات نرخ نفوذ در برابر فشار سینه کار (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده ها را نشان می دهند)

Figure 7: Changes in penetration rate versus face pressure (the dashed lines roughly represent the upper and lower limits of the data)



شکل ۸: بررسی رابطه بین فشار سینه کار و نرخ نفوذ

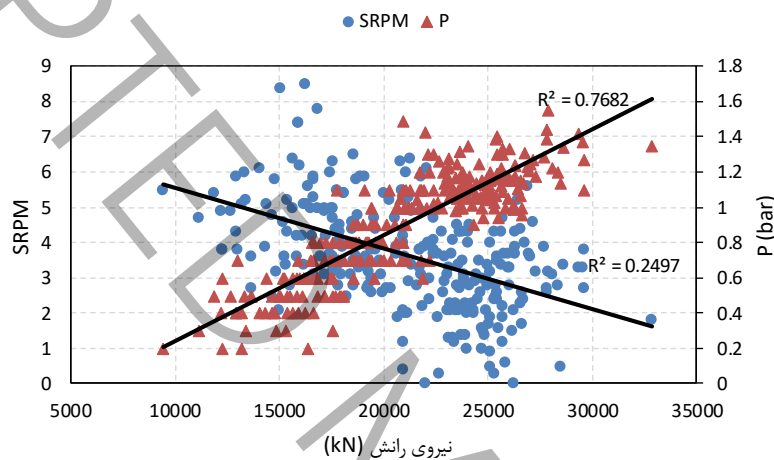
Figure 8: Examining the relationship between face pressure and penetration rate



شکل ۹: بررسی رابطه بین سرعت چرخش نقاله مارپیچ و نرخ نفوذ

Figure 9: Investigating the relationship between the rotation speed of the screw conveyor and the penetration rate

نکته قابل توجه این است که برای کنترل فشار سینه‌کار، استراتژی‌های مختلفی وجود دارد که شامل تغییر در سرعت چرخش نقاله مارپیچ، تغییر در سرعت چرخش کله‌حفار، و تغییر در مقدار نیروی رانش کل می‌شود. تغییر همزمان این پارامترها باعث یک تعامل پیچیده می‌شود که تفسیر رابطه بین فشار سینه‌کار و نرخ نفوذ را بسیار مشکل می‌کند. از این رو در بیشتر حالات رابطه مستقیمی بین فشار سینه‌کار و نرخ نفوذ وجود ندارد. به عنوان مثال، همبستگی معکوس نیروی رانش و نرخ نفوذ در پروژه خط ۶ متروی تهران (شکل ۱۰) را می‌توان با تغییر همزمان مقدار نیروی رانش و سرعت چرخش نقاله مارپیچ برای کنترل فشار سینه‌کار توضیح داد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به منظور افزایش فشار سینه‌کار، مقدار نیروی رانش افزایش یافته است و در همان زمان سرعت چرخش نقاله مارپیچ کاهش یافته است. این بدان معنی است که در مقادیر نیروی رانش بیشتر، میزان تخلیه گل از نقاله مارپیچ کم شده است که این خود منجر به کاهش نرخ نفوذ می‌شود. این به وضوح نشان می‌دهد، استراتژی اپراتور بر روابط عمومی پارامترهای عملیاتی موثر است و این به آسانی قابل تفسیر نیست.

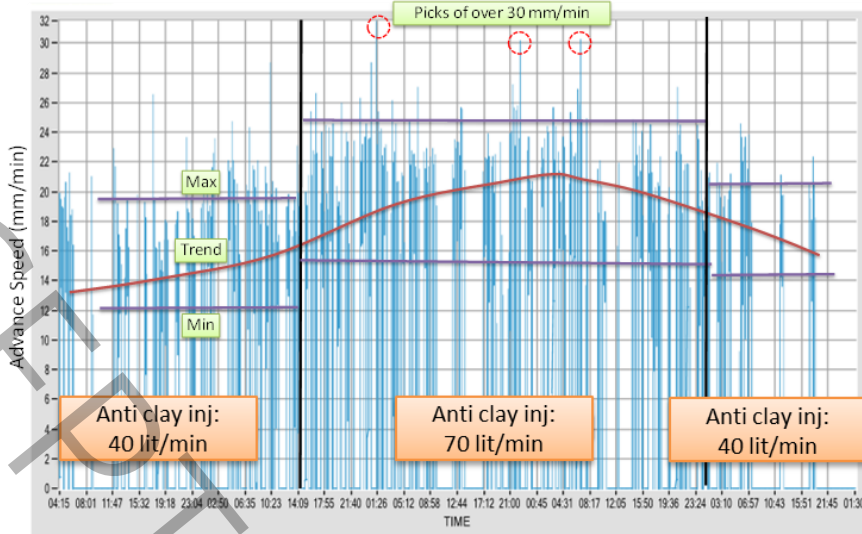


شکل ۱۰: تغییر مقدار نیروی رانش و سرعت چرخش نقاله مارپیچ برای کنترل فشار سینه‌کار.

Figure 10: Changing the amount of thrust force and rotation speed of the screw conveyor to control the face pressure

### ۳-۳- گل‌گرفتگی

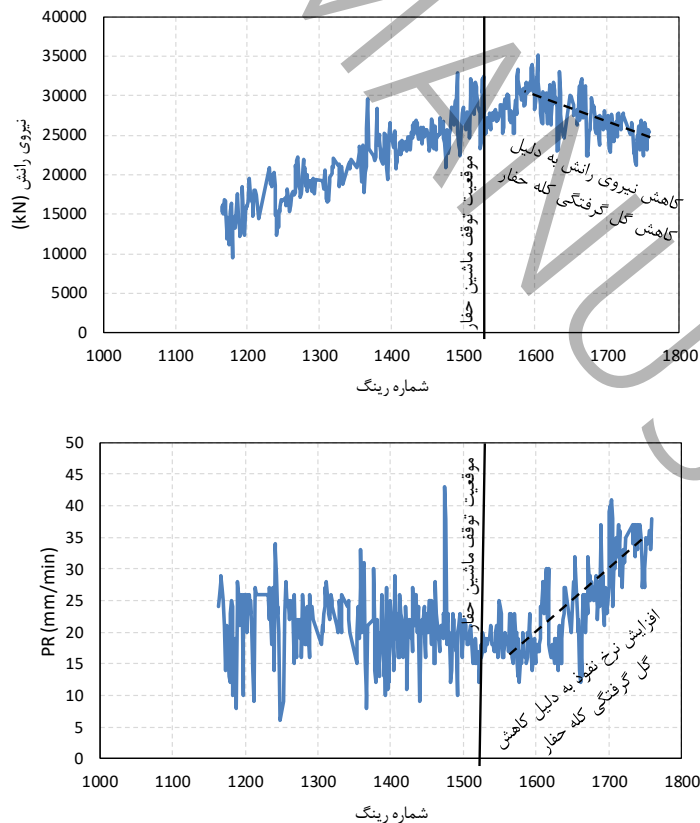
بررسی اطلاعات یک تونل متروی سنگاپور با قطر ۶/۶ متر بیانگر نرخ نفوذ بسیار پایین کله‌حفار در خاکهای ریزدانه سیلتی با عدد نفوذ استاندارد نزدیک به ۱۰۰ است. بررسی وضعیت کله‌حفار در مجاورت سینه‌کار نشان داد که وجود اثر گل‌گرفتگی شدید باعث ایجاد یک محدوده برآمده در ناحیه نزدیک به مرکز کله‌حفار شده است. سرعت حرکت خطی این ناحیه در مقایسه با نواحی دیگر کله‌حفار به شدت کمتر است که این خود می‌تواند باعث تجمع خاک‌های چسبنده در این ناحیه شود. تجمع بیش از حد خاک‌های چسبنده و افزایش حرارت آنها باعث سخت شدن گل و پوشانده شدن ابزارهای برشی در ناحیه مرکزی کله‌حفار می‌شود. در این شرایط، تماس کله‌حفار و ابزارهای برشی با سینه‌کار به شدت کاهش می‌یابد و این خود منجر به کاهش شدید نرخ نفوذ می‌شود (کمتر از ۱۰ mm/rev. در پروژه یاد شده). برای کاهش اثر گل‌گرفتگی بر نرخ نفوذ، در این پروژه از تزریق پلیمرهای ضد گل‌گرفتگی استفاده شد. افزودن ۴۰ لیتر در دقیقه از این پلیمر به فوم تزریق شده به سینه‌کار باعث افزایش نرخ نفوذ تا مقادیر نزدیک به ۱۰ mm/rev. شد (شکل ۱۱). افزایش مقدار تزریق پلیمر تا مقادیر نزدیک به ۷۰ لیتر در دقیقه، به وضوح مقدار نرخ نفوذ را افزایش داد (تا مقادیر حدود ۳۲ mm/rev.). برای اطمینان از اثر تزریق پلیمر بر روی نرخ نفوذ، مقدار تزریق پلیمر دوباره کاهش یافت که این خود کاهش نرخ نفوذ را به همراه داشت. تاثیر استفاده از تزریق پلیمر ضد گل‌گرفتگی بر افزایش نرخ نفوذ در سایر مطالعات انجام شده توسط محققان دیگر نیز تایید شده است. به عنوان مثال در مترو تولوز، استفاده از یک پلیمر ضد گل‌گرفتگی مناسب باعث کاهش خطر گل‌گرفتگی در محفظه ماشین و نرخ نفوذ نسبتاً بالایی در حدود ۴۰-۵۰ mm/min شد.



شکل ۱۱: بررسی ارتباط بین مقدار تزریق پلیمر ضد گل گرفتگی و نرخ نفوذ در یک تونل مترو در سنگاپور

Figure 11: Investigating the relationship between the injection amount of anticlay polymer and the penetration rate in a subway tunnel in Singapore

در مطالعه دیگری بر روی اطلاعات ماشین حفاری پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران نیز مشاهده شد که موقعیت توقف ماشین حفاری با تغییر روند مقادیر نیروی رانش و نرخ نفوذ همراه بوده است. علت این امر به دلیل کاهش اثر گل گرفتگی مواد حفاری شده بر روی عملکرد ماشین حفاری به دلیل تمیزکاری کله حفار در موقعیت توقف بوده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، با کاهش گل گرفتگی در پیچه های کله حفار، نیروی رانش کم شده و نرخ نفوذ افزایش پیدا کرده است.



شکل ۱۲: اثر کاهش گل گرفتگی بر نیروی رانش و نرخ نفوذ در پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران

Figure 12: The effect of reducing clogging on the thrust force and penetration rate in the southern expansion project of Tehran Metro Line 6

مطالعه عملکرد ماشین حفاری در تونل متروی خط ۷ تهران نیز نشان داده است که افزودن یک نازل تزریق اضافی در ناحیه مرکز محفظه حفاری باعث کاهش چشمگیر گشتاور و نیروی رانش کله حفار به دلیل کاهش گل گرفتگی محفظه شده است. این امر باعث بهبود نرخ نفوذ ماشین نیز شده است. علاوه بر این بر اساس نتایج مطالعات پاتریارچی [۳۰] در تونل اسپروو، به دلیل عدم تزریق آب در قسمت مرکزی محفظه ماشین، یک گل سخت شده (بر اثر حرارت) ایجاد شد، که باعث مسدود شدن مجاری انتقال مصالح و توقف ماشین شد. با استفاده از شش خط تزریق اضافی آب برای ناحیه مرکزی محفظه حفاری، شرایط انتقال گل درون محفظه بهبود یافت و در نتیجه نفوذ ماشین از حدود ۱۸ میلی متر در دقیقه به بیش از ۲۵ میلی متر در دقیقه افزایش یافت.

#### ۳-۴- محدودیت تجهیزات

ویژگیهای خاص موجود در طراحی تجهیزات ماشین می تواند باعث ایجاد محدودیت در نرخ نفوذ به دست آمده شود. به عنوان مثال، در یک پروژه تونلی در سنگاپور، یک سیستم مفصل بندی ویژه فعال معروف به سیلندرهای جابجایی که در سازه کله حفار استفاده می شود، دارای ظرفیت نیروی رانش کمتری نسبت به سیستم های مفصل بندی فعال سپر جلو (به دلیل تعداد محدود جک های هیدرولیکی) بوده است. این تونل از یک خاک بسیار سفت (با مقادیر عدد نفوذ استاندارد بیشتر از ۱۰۰) عبور کرده است، از این رو نفوذ ماشین حفاری عموماً توسط حداکثر مقدار نیروی رانش مجاز سیلندرهای جابجایی کنترل شده است. این موضوعی است که در صورت طراحی بهینه ماشین می توان از آن جلوگیری کرد.

در مجموع بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل روابط دو متغیره برای داده های بانک اطلاعاتی، پنج پارامتر مهم شامل عدد نفوذ استاندارد، نسبت بازشدگی کله حفار، ارتفاع روبراه، مقاومت برشی زه کش نشده و شاخص قوام به عنوان مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر نرخ نفوذ شناسایی شده اند. در این میان، نتایج مربوط به روابط عدد نفوذ استاندارد، نسبت بازشدگی کله و شاخص قوام با نرخ نفوذ دارای ضرایب تعیین بیشتری هستند. لازم به ذکر است که بر اساس دسته بندی ارائه شده توسط یاکوبسن [۳۱] برای مقدار ضریب تعیین، روابط دو متغیره ارائه شده در این بخش برای عدد نفوذ استاندارد، شاخص قوام، و نسبت بازشدگی کله حفار به ترتیب ضعیف، ضعیف تا متوسط، و متوسط تا قوی است. مقدار ضریب تعیین به دست آمده برای رابطه دو متغیره پارامتر فشار سینه کار بسیار ناچیز است و بیانگر عدم وجود رابطه است. البته لازم به ذکر است که پارامترهای دیگری همچون سایش ابزار حفاری نیز بر نرخ نفوذ می تواند تأثیرگذار باشد [۲۴] که با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی، از بررسی آنها صرف نظر می شود. کم بودن مقادیر ضریب تعیین در روابط دو متغیره مورد بررسی به دلیل اثرگذاری پارامترهای چندگانه بر روی نرخ نفوذ و همچنین کم بودن نسبی داده های بانک اطلاعاتی است. برای افزایش ضریب تعیین روابط مرتبط با نرخ نفوذ لازم است از روش رگرسیون چند متغیره استفاده نمود که در بخش بعدی مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین لازم است تعداد داده های بانک اطلاعاتی در مطالعات آتی افزایش یابد.

#### ۴- توسعه روابط جدید تجربی برای تخمین نرخ نفوذ با روش رگرسیون چند متغیره

رگرسیون چندمتغیره یک روش آماری است که برای بررسی ارتباط بین یک متغیر وابسته (متغیر هدف) و یک یا چند متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) استفاده می شود. این ارتباط به صورت یک معادله بین متغیرهای ورودی و متغیر هدف نشان داده می شود. با استفاده از این معادله، با داشتن مقادیر متغیرهای ورودی، می توان مقدار متغیر هدف را پیش بینی کرد. در اینجا، از تحلیل بهترین زیرمجموعه استفاده شده است، که همه زیرمجموعه های ممکن از متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفته و بهترین زیرمجموعه به عنوان متغیرهای تأثیرگذار انتخاب شدند و در نهایت پارامترهای غیرمعنی دار (با  $p\text{-value} > 0.05$ ) حذف شدند. همچنین، برای بهبود توزیع نرمال پارامترها، از تبدیل باکس-کاکس استفاده شد. در این تحلیل، نرخ نفوذ ماشین متعادل کننده فشار زمین به عنوان متغیر وابسته (متغیر هدف) و سایر داده های جدول ۳ به عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای ورودی) در نظر گرفته شدند. سپس، با استفاده از نرم افزار مینی تب [۳۲]، تبدیل باکس-کاکس برای پارامترهای مورد بررسی جهت بهبود توزیع نرمال مقادیر پارامترها انجام شد و

تحلیل بهترین زیرمجموعه انجام گرفت. بر اساس این تحلیل، بهترین روابط رگرسیون شناسایی شدند. در این روابط، به منظور تطابق با شرایط رگرسیون، پارامتر هدف با استفاده از تابع لگاریتم طبیعی مقیاس‌بندی شده است، بنابراین روابط به دست آمده به صورت غیرخطی بودند.

جدول ۵ و رابطه ۱ خروجی مینی‌تب را برای بهترین مدل به دست آمده بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، در میان متغیرهای ورودی، برخی از پارامترها مانند فشار سینه‌کار و قطر ماشین حفاری از نظر آماری برای مدل معنی دار نبودند ( $p\text{-value} > 0.05$ ) و حذف شدند. همانگونه که مشاهده می‌شود، ضریب تعیین مدل نسبتاً زیاد است (۰.۷۲٪)، و می‌توان از آن به عنوان یک ابزار مقدماتی برای پیش‌بینی نرخ نفوذ به خصوص در مراحل اولیه یک پروژه استفاده کرد. جدول ۶ برخی از روابط جایگزین را ارائه می‌دهد که شامل سایر پارامترهای تأثیرگذار است. با وجود دقت کمتر، این روابط برای انجام یک مطالعه مقایسه‌ای بسیار سودمند هستند.

جدول ۵: ضرایب رگرسیون مینی‌تب برای پیش‌بینی نرخ نفوذ ( $\ln(PR)$  پارامتر هدف است)

Table 5: Minitab regression coefficients for prediction of penetration rate ( $\ln(PR)$  is the target parameter)

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2.780	0.146	19.03	0.000	
-40-عدد نفوذ استاندارد	-0.01175	0.00237	-4.96	0.000	1.14
OR	0.01940	0.00314	6.19	0.000	1.21
OB	0.01445	0.00515	2.80	0.010	1.07

$$PR = e^{(2.780 - 0.01175 \text{ ABS}(SPT-40) + 0.01940 \text{ OR} + 0.01445 \text{ OB})} \quad [R^2 = 72\%] \quad (1)$$

PR : نرخ نفوذ (mm/min).

SPT : عدد نفوذ استاندارد،

OR : نسبت بازشدگی کله‌حفار به درصد،

OB : ارتفاع روباره به متر.

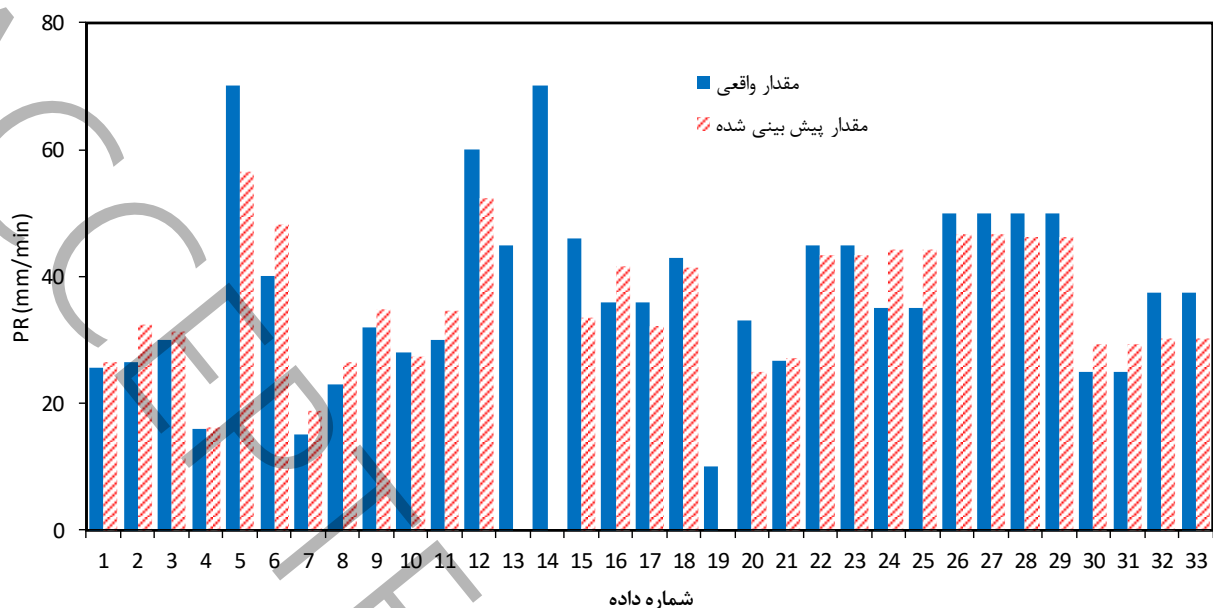
جدول ۶: روابط رگرسیون به دست آمده برای برآورد نرخ نفوذ

Table 6: Regression relationships obtained to estimate penetration rate

$R^2$	رابطه رگرسیون
72	$PR = e^{(2.780 - 0.01175 \text{ ABS}(SPT-40) + 0.01940 \text{ OR} + 0.01445 \text{ OB})}$
69	$PR = e^{(2.934 - 0.00887 \text{ ABS}[(SPT-40)] + 0.02174 \text{ OR} + 0.0456 \text{ OB}/D - 0.000966 \text{ Su})}$
68	$PR = e^{(3.079 - 0.01003 \text{ ABS}[(SPT-40)] + 0.02119 \text{ OR} + 0.01091 \text{ OB} - 0.376 \text{ Ic})}$

PR : نرخ نفوذ (mm/min).  
 SPT : عدد نفوذ استاندارد،  
 OR : نسبت بازشدگی کله‌حفار به درصد،  
 Ic : شاخص قوام،  
 OB : ارتفاع روباره به متر،  
 D : قطر تونل به متر،  
 Su : مقاومت برشی زه کش نشده (kPa).

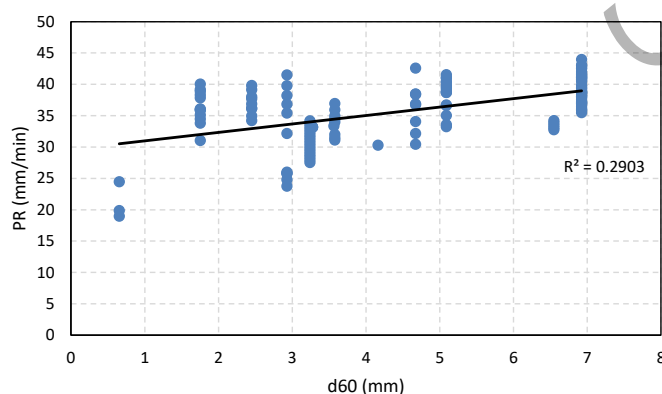
شکل ۱۳ نتایج مقایسه بین نرخ نفوذ واقعی و پیش‌بینی شده را با استفاده از رابطه ۱ نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: نرخ نفوذ واقعی در برابر نرخ نفوذ پیش بینی شده

Figure 13: Actual penetration rate versus predicted penetration rate

همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش بینی شده با مقادیر واقعی مطابقت خوبی دارند. توسعه بیشتر این روابط مستلزم استفاده از پارامترهای بیشتری از طراحی ماشین حفاری (به عنوان مثال طرح بازشوهای کله‌حفار، طرح چینش و نوع ابزار برشی، و غیره) و برخی دیگر از اطلاعات ژئوتکنیکی مانند کوارتز محتوای خاک و  $d_{60}$  (اندازه دهانه سرنده متناظر با ۶۰ درصد عبوری نمونه خاک) است. شکل ۱۴ همبستگی بین  $d_{60}$  و نرخ نفوذ را برای ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین در خط ۷ متروی تهران نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین نشان می‌دهد که  $d_{60}$  پارامتر مناسبی است که در توسعه آینده روابط باید مورد توجه قرار گیرد. نکته کلیدی که باید در مورد استفاده از روابط پیشنهادی در این مقاله مورد توجه قرار گیرد این است که این روابط میانگین تقریبی نرخ نفوذ را به دست می‌دهند که در ارزیابی زمان اجرای تونل در مراحل اولیه قابل استفاده است. علاوه بر این، برای ارزیابی الگوی پیچیده داده‌های واقعی، ممکن است نیاز به استفاده از شاخص‌های مقیاس‌بندی شده باشد. با این حال باید این نکته را مورد توجه قرار داد که در ارزیابی نرخ نفوذ ماشین‌های حفاری، پارامترهای پیچیده ممکن است نتایج بهتری نسبت به پارامترهای ساده تر ارائه ندهند. این موضوعی است که باید در مطالعات آینده، زمانی که اطلاعات دقیق و گسترده‌تری از تعداد قابل توجهی از پروژه‌های تونل زنی در دسترس باشد، مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱۴: همبستگی بین  $d_{60}$  و PR برای ماشین حفار متعادل کننده فشار زمین در خط ۷ متروی تهران

Figure 14: Correlation between d60 and PR for EPB TBM in line 7 of Tehran Metro

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

بررسی نتایج مطالعات انجام شده در مورد ارزیابی عملکرد ماشین‌های حفاری زمین نرم، به ویژه ماشین متعادل کننده فشار زمین، نشان می‌دهد که هیچ مدل کمی برای پیش بینی نرخ نفوذ در صنعت وجود ندارد. این پارامتر برای پیش بینی زمان و هزینه تکمیل یک تونل ضروری است. در همین راستا، در این مقاله با اشاره به تجربیات به دست آمده در پروژه‌های مختلف اجرا شده در سراسر جهان، مروری بر مهمترین عوامل تأثیرگذار بر نرخ نفوذ شده است. این عوامل شامل پارامترهای مربوط به جنبه های ژئوتکنیکی، مشخصات طراحی ماشین، اطلاعات عملکرد ماشین و محدودیت‌های خاص سایت است. بر اساس اطلاعات موجود از این پروژه‌ها، یک پایگاه داده‌ای از عملکرد میدانی تعدادی ماشین حفاری متعادل کننده فشار زمین ایجاد شد و بر اساس تجزیه و تحلیل های آماری انجام شده بر روی اطلاعات این پایگاه اطلاعاتی، روابطی برای پیش بینی نرخ نفوذ به دست آورده شد. نتایج نشان می‌دهد که مجموعه خاصی از پارامترها، از جمله، نسبت بازشدگی کله‌حفار، ارتفاع روباره، مقاومت برشی زه کش نشده و شاخص قوام بیش از نیمی از تغییرات نرخ نفوذ را توصیف می‌کنند. همچنین این تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نسبت بازشدگی کله‌حفار یکی از مهمترین عوامل کنترل نرخ نفوذ است. تجزیه و تحلیل دو متغیره بین نرخ نفوذ و عوامل تأثیرگذار آن نشان می‌دهد که مقدار عدد نفوذ استاندارد بیشتر، نرخ نفوذ کمتری را برای ماشین حفاری به همراه دارد. برای مقادیر عدد نفوذ استاندارد بین ۳۰ تا ۴۰، نرخ نفوذ معمولاً به حداکثر مقدار خود می‌رسد. نسبت بازشدگی حدود ۴۰ تا ۴۵٪ عموماً شرایط بهینه را برای دستیابی به بهترین نرخ نفوذ فراهم می‌کند. نسبت بازشدگی نسبتاً کم (به عنوان مثال کمتر از ۲۵٪) عملکرد ماشین را به دلیل محدودیت در انتقال مواد حفاری شده از سینه‌کار به محفظه حفاری و نقاله ماریپچ کاهش می‌دهد. در شاخص قوام حدود ۰٫۴ تا ۰٫۵، نرخ نفوذ به حداکثر مقادیر خود می‌رسد، این به دلیل احتمال کمتر گل‌گرفتگی بازشوه‌های کله‌حفار است.

بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی چندگانه بر روی داده‌ها، تعدادی رابطه برای ارزیابی نرخ نفوذ ارائه شده است. دامنه ضرایب تعیین این روابط بین ۶۸ تا ۷۲ درصد است. به دلیل فقدان مدل کمی برای پیش بینی عملکرد ماشین‌های حفاری در خاک نرم، این روابط ابزارهایی اساسی را برای مهندسان پروژه در مراحل اولیه یک پروژه هنگامی که ارزیابی زمان و هزینه بسیار مهم است، فراهم می‌کنند. در این راستا، می‌توان با پیش‌بینی نرخ نفوذ و ترکیب آن با نرخ بهره‌وری مقدار نرخ پیشروی ماشین حفاری را به دست آورد. لازم به ذکر است که به دلیل وجود بسیاری از محدودیت‌ها در کنترل نرخ نفوذ ماشین حفاری در حالت سینه‌کار بسته، مدل پیشنهادی ممکن است در شرایط خاص نتایج دقیقی ارائه ندهد. فاکتورهای تأثیرگذار بیشتری (که برای نویسنده در دسترس نبودند) باید لحاظ شوند و پایگاه داده فعلی باید با جزئیات بیشتر از جمله محدودیت‌های اجرایی و جنبه های مختلف طراحی و عملکرد ماشین گسترش یابد.

## ۶- تقدیر و تشکر

مولف از حمایت مدیریت محترم عامل شرکت تونل‌ساز ماشین و همچنین هر گونه کمک از طرف همکاران محترم شرکت تونل‌ساز برای تهیه و تنظیم این مقاله کمال تقدیر و تشکر را دارد.

## ۷- منابع

- [1] Graham, P.C. Rock exploration for machine manufacturers. In: Bieniawski, Z.T. (Ed.), Exploration for Rock Engineering. Balkema, Johannesburg, (1976) 173–180.
- [2] Barton, N. TBM performance in rock using QTBM. Tunnels Tunnell. Int. (1999) 31, 41–48.
- [3] Bruland, A. Hard Rock Tunnel Boring. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, (1998).
- [4] Farrokh, E., Rostami, J., Laughton, C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. Tunnell. Undergr. Space Technol. (2012) 30, 110–123.



- [5] Hassanpour, J. Investigation of the effect of engineering geological parameters on TBM performance and modifications to existing prediction models. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (2009).
- [6] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A. Development of new equations for performance prediction. *Int. J. Geo Mech. Geoen.* (2009a) 4 (4), 287–297.
- [7] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., Tavakoli, H.R. TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A Case History of Karaj Water Conveyance Tunnel. *Rock Mech. Rock Eng.* (2009b).
- [8] Khademi Hamidi, J., Shahriar, K., Rezai, B., Rostami, J. Performance prediction of hard rock TBM using rock mass rating (RMR) system. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* (2010) 25 (4), 333–345.
- [9] Gertsch, R., Gertsch, L., Rostami, J. Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* (2007) 44(2), 238-246.
- [10] Rostami, J. Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure. Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, (1997) p. 249.
- [11] Abu Bakar, M.Z., Gertsch, L., Rostami, J. Evaluation of fragments from disc cutting of dry and saturated sandstone. *Rock Mech. Rock Eng.* (2014) 47(5), 1891–1903.
- [12] Ozdemir, L., Miller, R., Wang, F.D. Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design. Final Project Report to NSF APR73-07776-A03. Colorado School of Mines, Golden, Co, (1978).
- [13] Rostami, J., Ozdemir, L. A new model for performance prediction of hard rock TBM. In: Bowerman, L.D., et al. (Eds.), *RETC*, (1993) 793–809.
- [14] Farrokh, E., Kim, D.Y., Kyung, S.B. Rotary cutting test for hard rock TBM performance evaluation. World tunneling conference, Dubrovnik, Croatia, (2015).
- [15] Gong, Q.M., Jiao, Y.Y., Zhao, J. Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunn. Undergr. Space Technol.* (2006) 21(1), 46–55.
- [16] Labra, C., Rojek, J., Oñate, E. Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter. *Rock Mech. Rock Eng.* (2016) 50(3), 621–638.
- [17] Liu, H.Y., Kou, S.Q., Lindqvist, P., Tang, C.A. Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* (2002) 39, 491–505.
- [18] Rostami, J. Hard rock TBM cutterhead modeling for design and performance prediction. *Geomechanik und Tunnelbau, Ernst & Sohn, (Austrian Journal of Geotechnical Eng.)*, (2008) January.
- [19] Alvarez Grima, M.P.A., Bruines, P.A., Verhoef, P.N.W. Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* (2000) 15 (3), 259–269.
- [20] Maidl, U., Comulada, M. Prediction of EPB shield performance in soils. *RETC*, (2011) 1083-1091.
- [21] Shehata, A.S., El-Kelesh, A.M., El-kasaby, A.E., Mansour, M. Rates of soft ground tunneling in vicinity of existing structures. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*, (2018) 4 (1), 35-45.
- [22] Dullmann, J. Performance optimization and wear forecast in hydro-shield tunneling in soft ground. Ph.D. Thesis, Ruhr-University Bochum, Faculty of Civil and Environmental Engineering, (2014).
- [23] Alber, M. Advance rates of hard rock TBMs and their effects on project economics. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* (2000) 15 (1), 55–84.
- [24] Farrokh, E., Kim, D.Y., Sim, B.K., Lee, J.W. TBM challenges at DTL3 C931 project in Singapore. ITA tunnel congress, San Francisco, California, USA, (2016).
- [25] Herrenknecht AG. (2023). Retrieved from <https://www.herrenknecht.com/en/references>.
- [26] Hollmann, F.S., Thewes, M. Assessment method for clay clogging and disintegration of fines in mechanized tunneling. *Tunnell. Undergr. Space Technol.* (2013) 37, 96-106.
- [27] Hollmann, F.S., Thewes, M. Clogging and accumulation of fine contents in shield tunneling in soils. In: 18th Proc. Engineering Geology, Berlin, (2011) 237–244.

- [28] Thewes, M. Adhesion of clay soils during tunneling with liquid shields. Reports from Soil Mechanics and Foundation Engineering of the University of Wuppertal, Department of Civil Engineering, (1999).
- [29] Martinotto, A., Langmaack, L. Toulouse Metro Lot 2: soil conditioning in difficult ground conditions. ITA tunnel congress, Prague, (2007).
- [30] Patriarchi, V. Relationship between large diameter EPB TBM performance and mechanical parameters. Master's Thesis, University of Bologna, College of Engineering, (2011).
- [31] Jakobsen, P.D. Estimation of soft ground tool life in TBM tunneling. PhD dissertation, Norwegian University of Science and Technology, (2014).
- [32] Minitab Inc. Minitab 16 Software, (2010).

# Evaluating the Penetration Rate of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines

Ebrahim Farrokh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mining engineering faculty, Amirkabir university of technology (Tehran polytechnic)

## ABSTRACT

The penetration rate is a crucial parameter in the performance of Earth Pressure Balance (EPB) Tunnel Boring Machines (TBMs), which is used to assess the time and cost of completing a project. However, so far, no model has been presented to predict the penetration rate in soft soils, leading engineers to rely on approximate estimations based on similar projects. This results in significant inaccuracies in project completion time. In this article, statistical analysis has been conducted using performance data from EPB TBMs worldwide to examine the correlation between the penetration rate and its influencing factors. The parameters discussed include tunnel diameter, face pressure, undrained shear strength, unconfined compressive strength, head opening ratio, and standard penetration number. Based on the data analysis, three parameters, namely head opening ratio, unconfined compressive strength, and standard penetration number, have been identified as significant influencing factors. This article provides useful relationships for estimating the penetration rate with determination coefficients ranging from 68% to 72%. Considering the absence of an accurate performance prediction model for soft ground TBMs, the results of this study assist tunnel project engineers in the initial stages of the project by enabling better evaluation of performance parameters, time, and cost requirements.

## KEYWORDS

EPB, Penetration rate, head opening ratio, unconfined compressive strength, standard penetration number.