



Evaluating the Penetration Rate of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines

Ebrahim Farrokh*

Faculty of Mining Engineering, Amirkabir university of technology (Tehran polytechnic), Tehran, Iran

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.

Review History:

Received: Dec. 15, 2023

Revised: May, 08, 2024

Accepted: Sep. 14, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

Keywords:

EPB

Penetration Rate

Head Opening Ratio

Unconfined Compressive Strength

Standard Penetration Number

1- Introduction

The penetration rate (PR) is a vital performance metric for earth pressure balanced (EPB) tunneling machines, influencing both the timeline and cost of tunneling projects. Accurate estimation of PR is crucial for effective project management; however, existing predictive models for soft soils are often lacking. As a result, engineers frequently depend on rough estimates derived from analogous projects, which can lead to significant inaccuracies and unexpected delays in project timelines [1-3]. This study aims to systematically analyze the correlation between PR and various influential factors using a comprehensive dataset, thereby providing a more reliable framework for estimating project performance in the context of tunneling.

2- Methodology

Data were collected from 33 records concerning the operational performance of EPB tunneling machines from various projects worldwide. The key parameters analyzed include tunnel diameter, face pressure, consistency index, undrained shear strength, the opening ratio of the cutter head, and standard penetration test (SPT) values. The analysis employed multiple linear regression techniques to identify significant relationships between penetration rates and the selected parameters.

The dataset was compiled from diverse geotechnical reports and research studies, ensuring a comprehensive representation of tunneling conditions. The methodology included the following steps:

- Data Collection: Gathering operational data from various geotechnical reports and scholarly articles related to tunneling projects.
- Parameter Selection: Identifying critical parameters that could impact the penetration rate, based on previous literature and expert recommendations (Table 1).
- Statistical Analysis: Utilizing multiple linear regression to analyze the relationships between penetration rates and selected parameters, determining the coefficients and significance of each factor.

Fig. 1 shows the variation of penetration rate values in the database.

3- Results and Discussion

The results of regression analysis reveal several important trends:

- Opening Ratio (OR): A higher opening ratio is positively associated with increased penetration rates. This indicates that as the opening ratio increases, the machine's ability to transfer soil from the face to the chamber improves, facilitating a more efficient excavation process.

*Corresponding author's email: e.farrokh@aut.ac.ir



Table 1. Summary of analyzed parameters

Parameter	Unit	Description
Tunnel Diameter	m	Diameter of the tunnel excavated
Face Pressure	kPa	Average pressure in the excavation chamber
Penetration Rate (PR)	mm/min	Rate of penetration of the cutter head per rotation
Standard Penetration Test (SPT)	-	Number of blows required to drive a sampler
Opening Ratio (OR)	%	Ratio of the total opening area to the cutter head area
Consistency Index	-	Measure of soil stiffness
Undrained Shear Strength	kPa	Shear strength of the soil in undrained conditions
Over Burden (OB)	m	Height above the tunnel crown to the ground surface

- Standard Penetration Test (SPT): Higher SPT values, indicative of stiffer soil, correlate with lower penetration rates. This finding aligns with the understanding that harder soils resist penetration, thus slowing down the excavation process.

- Consistency Index: Lower consistency indices, which indicate softer soils, are associated with increased penetration rates. This supports the notion that softer soils allow for easier movement of the cutter head, reducing the likelihood of clogging.

- Undrained Shear Strength: Higher undrained shear strength results in slower penetration rates. This finding is

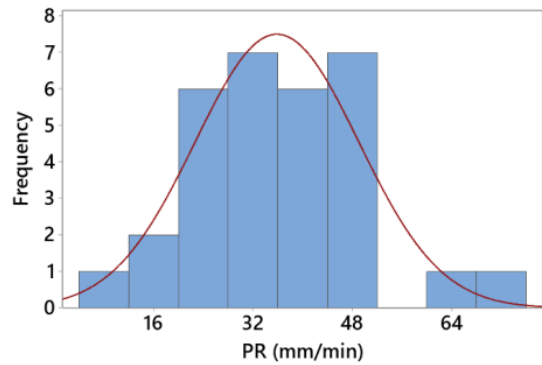


Fig. 1. PR values distribution histogram

crucial for understanding the challenges posed by varying soil conditions.

The multiple linear regression analysis yielded significant insights into the factors influencing penetration rates. The regression equation derived from the analysis is as follows:

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

The overall model explained 72% of the variance in penetration rates ($R^2 = 0.72$), indicating a strong relationship between the predictors and the outcome variable.

4- Conclusions

This paper highlights key factors influencing penetration rates based on global project experiences, including geotechnical parameters, machine design specifications, and operational data.

A database of EPB machine performance was created from various projects, allowing for statistical analyses that identified relationships for predicting penetration rates. The results indicate that parameters such as the opening ratio of the cutter head, overburden height, undrained shear strength, and consistency index account for over half of the variance in penetration rates. Notably, optimal penetration rates occur with opening ratios of 40% to 45% and SPT values between 30 and 40.

Multiple linear regression analysis yielded relationships for estimating penetration rates, with determination coefficients ranging from 68% to 72%. These relationships are essential for engineers in the early stages of projects where accurate evaluations are critical. However, the proposed model may have limitations under specific conditions, necessitating further data collection and consideration of additional influencing factors.

References

- [1] Graham, P.C. Rock exploration for machine manufacturers. In: Bieniawski, Z.T. (Ed.), *Exploration for Rock Engineering*. Balkema, Johannesburg, (1976) 173–180.
- [2] Farrokh, E., Rostami, J., Laughton, C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs. *Tunneling and Underground Space Technology* 30, 110–123, (2012).
- [3] 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).



ارزیابی نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل کننده فشار زمین

ابراهیم فرخ*

گروه مکانیک سنگ و تونلسازی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

ماشین حفار متعادل کننده فشار زمین
نرخ نفوذ
نسبت بازشدگی
مقاومت برشی زه کش نشده
عدد نفوذ استاندارد

خلاصه: نرخ نفوذ، یکی از پارامترهای اصلی در عملکرد ماشین‌های حفار متعادل کننده 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 متعادل کننده 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 زه کش نشده، نسبت بازشدگی کله حفار و عدد نفوذ استاندارد است. بر اساس تحلیل داده‌ها، سه پارامتر نسبت بازشدگی کله حفار، مقاومت برشی زه کش 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 کله حفار 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 کله حفار ۴۰ تا ۴۵ درصد به دست می‌آید. در این مقاله به منظور ارزیابی نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل کننده 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.

۱- مقدمه

یک برنامه‌ریزی موفقیت آمیز برای اجرای یک تونل به پیش‌بینی دقیق پارامترهای عملکردی ماشین‌های حفاری از جمله نرخ نفوذ (PR)، ضریب بهره‌وری (U) و نرخ پیشروی (AR) بستگی دارد. پارامترهای عملکردی 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_{TBM} [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

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.farrokh@aut.ac.ir



جدول ۱. شاخص‌های نرخ نفوذ

Table 1. Penetration rate indices

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

* بر اساس توضیحات دالمن [۲۲]

Fcon: نیروی تماس (kN).

SCF: نیروی تماس در واحد سطح (kN/m²).

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

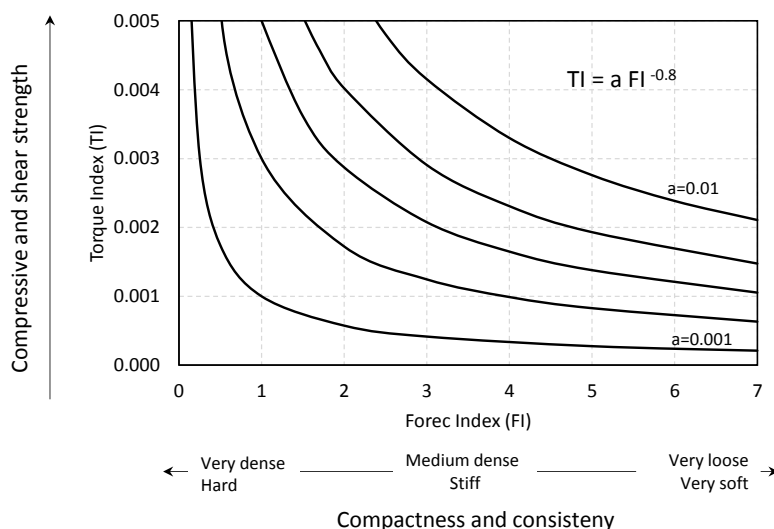
A: سطح مقطع تونل (متر مربع).

ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین نرم نیاز به جزئیات زیادی از عملیات اجرایی، وضعیت زمین، معیارهای مورد نیاز کنترل نشست و عوامل طراحی ماشین‌های حفاری 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 (PREV)، 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 ماشین‌های حفار متعادل‌کننده فشار زمین انجام شده است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، یافته‌های این مطالعه یک نمودار با یک رابطه توانی با ثابت متغیر است.

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 کله‌حفار و قطر ماشین‌های حفاری را در نظر می‌گیرند. علیرغم این مزایا، در مراحل اولیه یک پروژه، تخمین سرعت چرخش کله‌حفار، نیروی نفوذ و گشتاور معمولاً بسیار

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 شهاتا 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



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

Fig. 1. The relationship between force index and torque index [22]

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 حفار اشاره دارد. نرخ نفوذ بیانگر میزان نفوذ کله حفار 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 بازشوهای کله حفار به کل سطح کله حفار بر حسب درصد است. شاخص قوام کمیته 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 زه کش نشده بیانگر مقاومت برشی خاک در حالت آزمایش زه کش نشده است. ارتفاع روباره بیانگر ارتفاع از سطح زمین تا تاج تونل است.

دشوار است، به ویژه هنگامی که عوامل کنترل کننده دیگری همانند فشار سینه‌کار، سرعت نقاله ماریپیچ، و افت حجمی نیز بر روی پارامترهای عملیاتی ماشین حفاری تأثیر بگذارند. به همین دلیل، در صنعت تونل‌سازی، نرخ نفوذ برای ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین معمولاً بر حسب میلی‌متر در دقیقه توصیف می‌شود. بر اساس تجارب نویسنده در حفاری تونل متروی DTL3 سنگاپور با ماشین متعادل کننده فشار زمین [۲۴]، مهمترین فاکتورهای شناخته شده تأثیرگذار بر نرخ نفوذ ماشین‌های حفار متعادل کننده فشار زمین را می‌توان در چند دسته کلی نشان داده شده در جدول ۲ تقسیم بندی کرد. همانطور که ذکر شد، کمی‌سازی 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 تونل‌سازی، 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 تأثیرگذار 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 دقیق‌تری در مراحل اولیه یک پروژه ارائه دهند.

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) ساینده گی خاک نوع کانی های 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 بازشویهای 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 سیستم های مفصل بندی سپرها و محدودیت های فشارهای وارد شده توسط این سیستم ها 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

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 ۱۰۰-۸، 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 می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، 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.

پروژه های یاد شده در جدول ۳ مربوط به ۱۰ سال اخیر هستند. لازم به ذکر است که با توجه به در دسترس بودن اطلاعات جزئی تر تعدادی از این پروژه ها، 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 می شود. شکل ۲ توزیع پارامترهای اصلی موجود در این بانک اطلاعاتی و نمودارهای جعبه ای آنها را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود، دامنه این پارامترها نشان می دهد که بانک اطلاعاتی، اکثر مقادیر موجود در پروژه های تونل سازی TBM ای را پوشش می دهد. از منحنی های توزیع نیز مشاهده می شود که اکثر داده ها در اطراف نقطه میانی متقارن هستند، به

جدول ۳. داده‌های بانک اطلاعاتی (ادامه دارد)

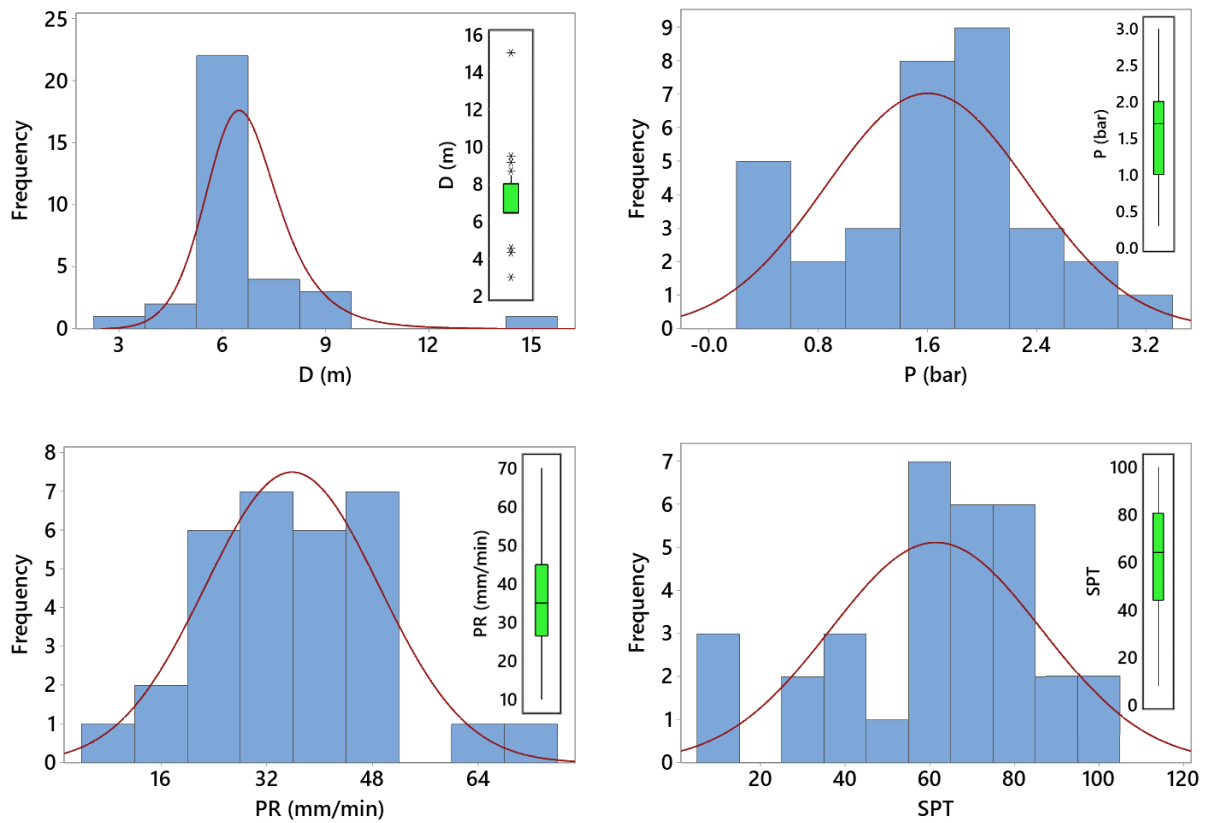
Table 3. Database data(Continued)

منبع	ارتفاع	مقاومت برشی	شاخص	نسبت	عدد نفوذ	نرخ نفوذ	فشار	قطر	نام پروژه	شماره داده
	روباره	زه کش نشده	قوام	بازشدگی	استاندارد	سینه کار	حفاری			
	OB (m)	Su (kPa)	Ic	OR (%)	SPT	PR (mm/min)	P (bar)	D (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 میلوآکی	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 آمبارلی	۱۷
	۸	۱۶۹	۰/۹	۲۵	۵۵	۳۳	۱/۵	۶/۶	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
	۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۳۵	۰/۴	۶/۴۳		۲۲

جدول ۳. داده‌های بانک اطلاعاتی

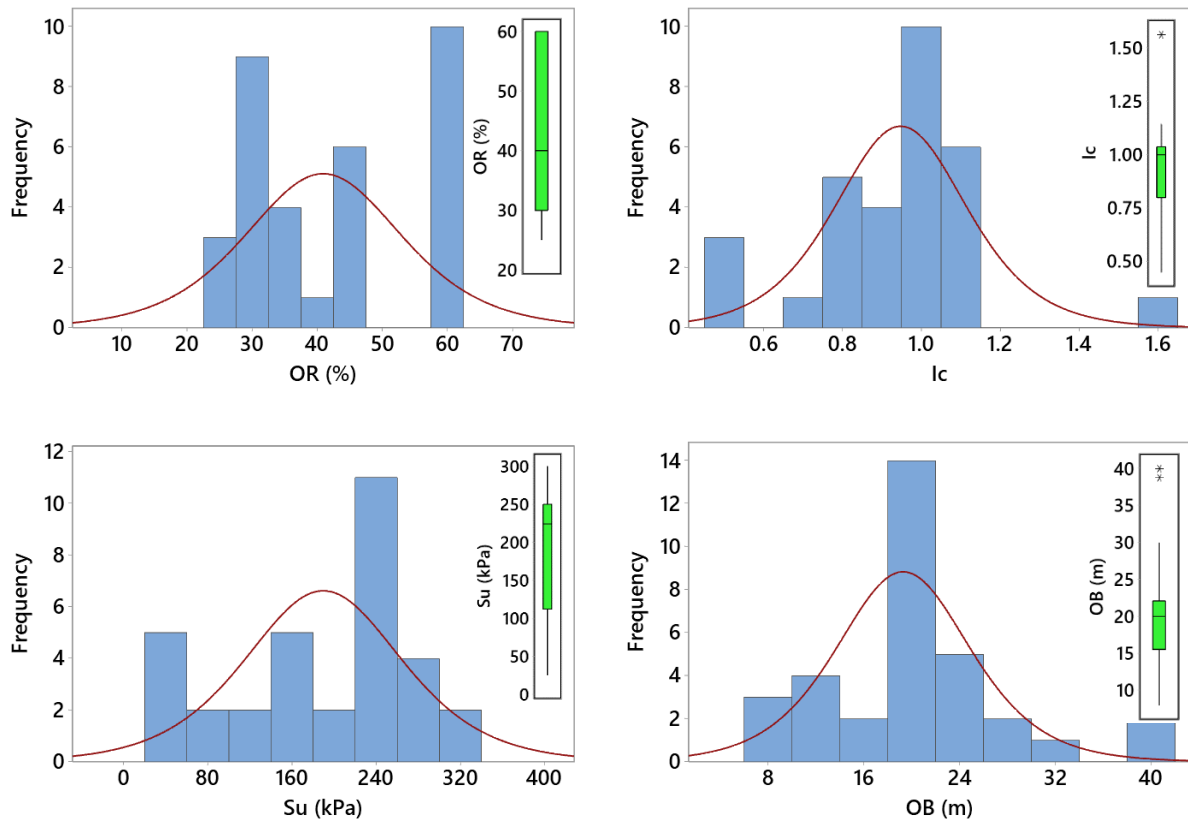
Table 3. Database data

۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۳۵	۰/۸	۶/۴۳	۲۳
۱۹	۱۹۰	۰/۹	۶۰	۶۳		۱/۴	۶/۴۳	تونل B در
۱۹	۱۹۰	۰/۹	۶۰	۶۳		۱/۷	۶/۴۳	سنگاپور
۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۵۰	۱/۹	۶/۴۳	۲۶
۱۹	۲۲۴	۱	۶۰	۷۲	۵۰	۱/۷	۶/۴۳	تونل C در
۲۰	۲۳۵	۱	۶۰	۷۵	۵۰	۱/۹	۶/۴۳	سنگاپور
۲۰	۲۳۵	۱	۶۰	۷۵	۵۰	۲	۶/۴۳	۲۹
۲۲	۲۶۴	۱/۱	۴۳	۸۳	۲۵	۱/۸	۶/۴۶	۳۰
۲۲	۲۶۴	۱/۱	۴۳	۸۳	۲۵	۱/۷	۶/۴۶	تونل D در
۲۶	۳۰۰	۱/۱	۴۳	۹۲	۳۸	۲/۳	۶/۴۶	سنگاپور
۲۶	۳۰۰	۱/۱	۴۳	۹۲	۳۸	۲/۵	۶/۴۶	۳۳



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

Fig. 2. Distribution of the main parameters in the database and their box plot



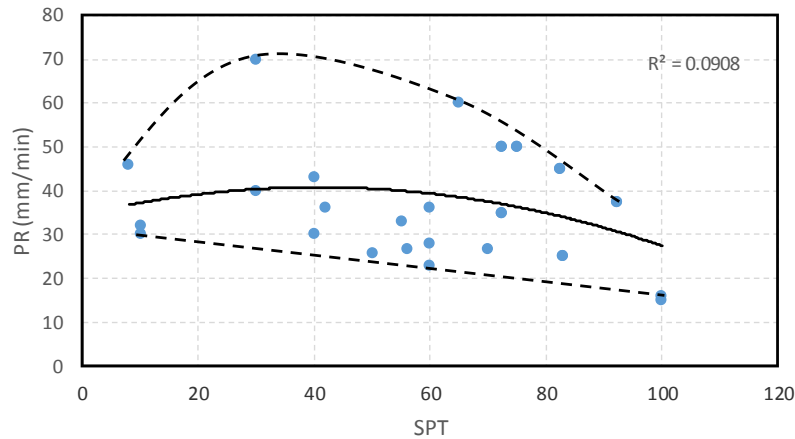
شکل ۲. توزیع پارامترهای اصلی موجود در بانک اطلاعاتی و نمودار جعبه‌ای آنها

Fig. 2. Distribution of the main parameters in the database and their box plot

جدول ۴. ماتریس همبستگی پارامترهای بانک اطلاعاتی

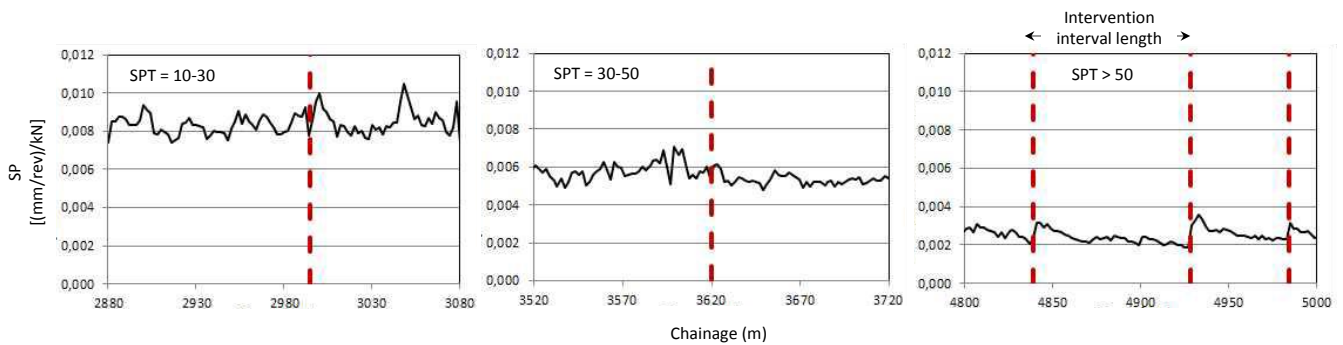
Table 4. Correlation matrix of database parameters

	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



شکل ۳. تغییرات نرخ نفوذ در برابر عدد نفوذ استاندارد (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده‌ها را نشان می‌دهند)

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



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

Fig. 4. The influence of the values of the standard penetration number on the penetration rate [22]

سفت‌تر شده و حفر آن مشکل‌تر می‌شود. نکته قابل توجه این است که نرخ نفوذ در مقادیر عدد نفوذ استاندارد حدود ۳۰-۴۰ به بیشترین مقدار خود می‌رسد. در مقادیر عدد نفوذ استاندارد کمتر از ۳۰-۴۰، به دلیل به وجود آمدن مشکلات پایداری در سینه‌کار، اپراتور ماشین برای اعمال فشار صحیح و جلوگیری از ریزش سینه‌کار، با احتیاط بیشتری عملیات حفاری را انجام می‌دهد که این خود باعث کاهش نرخ نفوذ می‌شود.

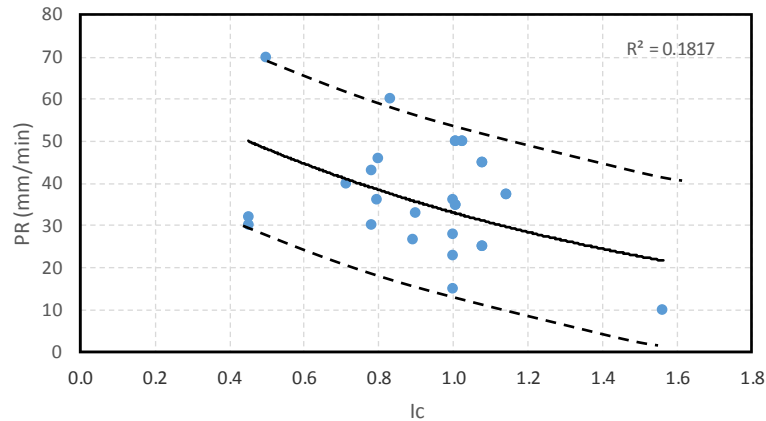
نتایج این بررسی با نتایج مطالعه انجام شده توسط سایر محققین نیز مطابقت دارد. دالمن [۲۲] در مطالعه خود نشان داده است که افزایش مقدار عدد نفوذ استاندارد باعث کاهش نرخ نفوذ ویژه می‌شود (شکل ۴). علاوه بر این مشاهدات میدانی در یک پروژه مترو سنگاپور در آبرفت های بسیار

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 می‌گیرند.

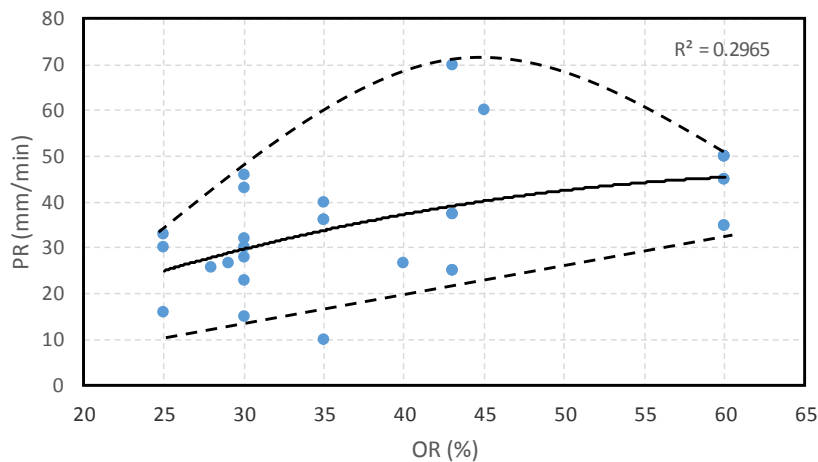
۳-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی

بررسی رابطه دو متغیره بین عدد نفوذ استاندارد و نرخ نفوذ (شکل ۳) نشان می‌دهد هرچه مقدار عدد نفوذ استاندارد بیشتر باشد، نرخ نفوذ کمتر است. دلیل این امر این است که خاک در مقادیر بیشتر عدد نفوذ استاندارد



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

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



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

Fig. 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)

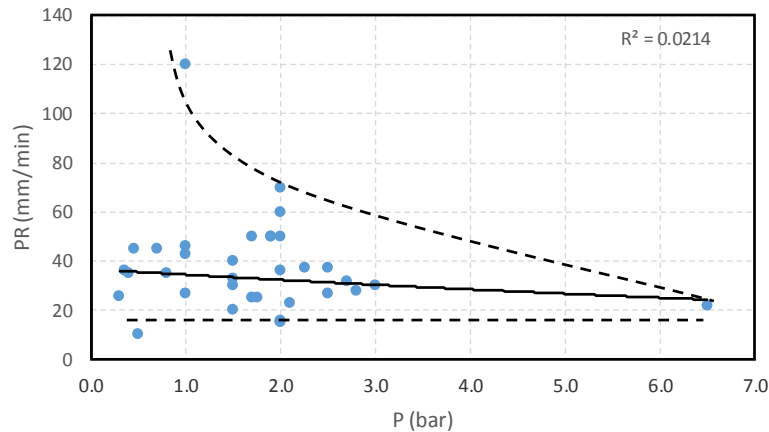
کردند بهترین محدوده شاخص قوام برای کاربرد ماشین‌های حفار متعادل کننده فشار زمین با خطر احتمالی گل‌گرفتگی کم بین ۰/۴ تا ۰/۵ است.

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

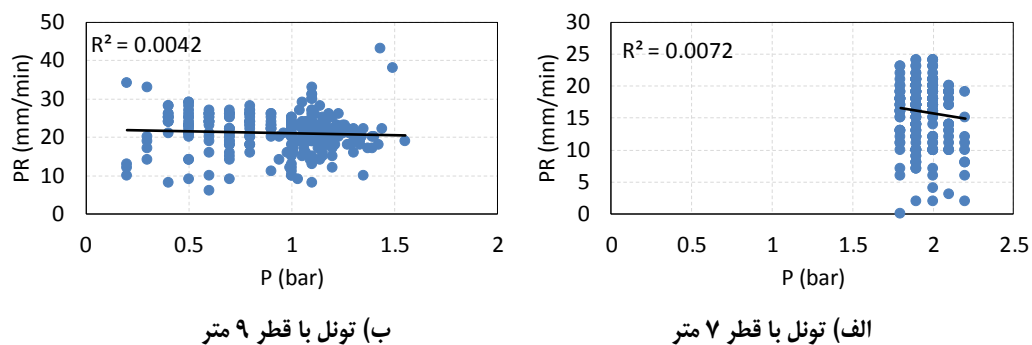
سفت و سخت (با عدد نفوذ استاندارد بالای ۱۰۰) نشانگر نفوذ بسیار کم ماشین‌حفاری بوده است (کمتر از ۱۰ میلی‌متر در دقیقه) مطابقت دارد.

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 ([۲۵-۲۷]). 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



شکل ۷. تغییرات نرخ نفوذ در برابر فشار سینه کار (خطوط خط چین به صورت تقریبی مرزهای بالایی و پایینی داده‌ها را نشان می‌دهند)

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



ب) تونل با قطر ۹ متر

الف) تونل با قطر ۷ متر

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

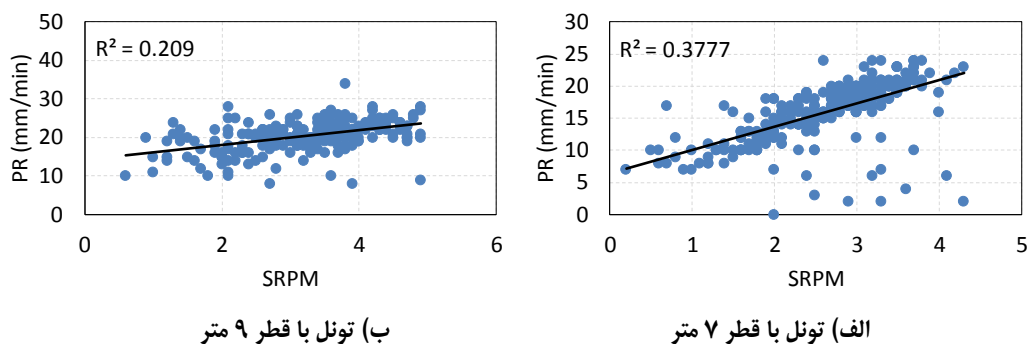
Fig. 8. Examining the relationship between face pressure and penetration rate

دلیل این موضوع این است که تخلیه گل حفاری عمدتاً توسط سرعت نقاله ماریپیج کنترل می‌شود.

نکته قابل توجه این است که برای کنترل فشار سینه کار، استراتژی‌های مختلفی وجود دارد که شامل تغییر در سرعت چرخش نقاله ماریپیج، 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 سینه کار و نرخ نفوذ را بسیار مشکل می‌کند. از این رو در بیشتر حالات رابطه مستقیمی بین فشار سینه کار و نرخ نفوذ وجود ندارد. به عنوان مثال، همبستگی معکوس نیروی رانش و نرخ نفوذ در پروژه خط ۶ متروی تهران

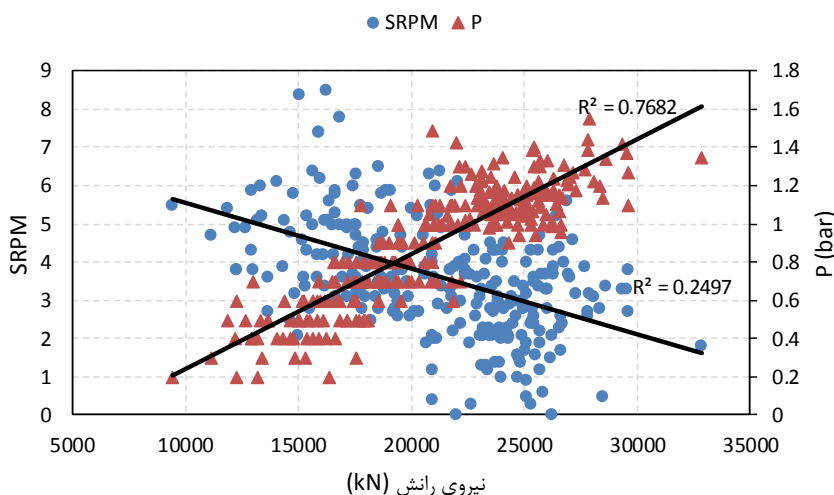
بازشدگی در حدود ۴۰-۴۵٪ شرایط بهینه را برای دستیابی به بهترین نرخ نفوذ فراهم می‌کند. نسبت بازشدگی بیشتر از ۴۵٪ در برخی شرایط خاص (مانند ناپایداری سینه کار) با کاهش نرخ نفوذ همراه است. ضرایب تعیین این تجزیه و تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نسبت بازشدگی کله‌حفار و نرخ نفوذ بهترین همبستگی را در بین سایر پارامترهای مورد بررسی دارند.

بررسی رابطه دو متغیره بین فشار سینه کار و نرخ نفوذ (شکل ۷) بیانگر هیچ ارتباط معنی‌داری نیست. بررسی دقیق‌تر این موضوع در دو پروژه مترو با قطر ۷ و ۹ متر نیز این موضوع را تایید می‌کند (شکل ۸). از طرفی دیگر سرعت چرخش نقاله ماریپیج رابطه نسبتاً خوبی با نرخ نفوذ دارد (شکل ۹).



شکل ۹. بررسی رابطه بین سرعت چرخش نقاله ماریچج و نرخ نفوذ

Fig. 9. Investigating the relationship between the rotation speed of the screw conveyor and the penetration rate



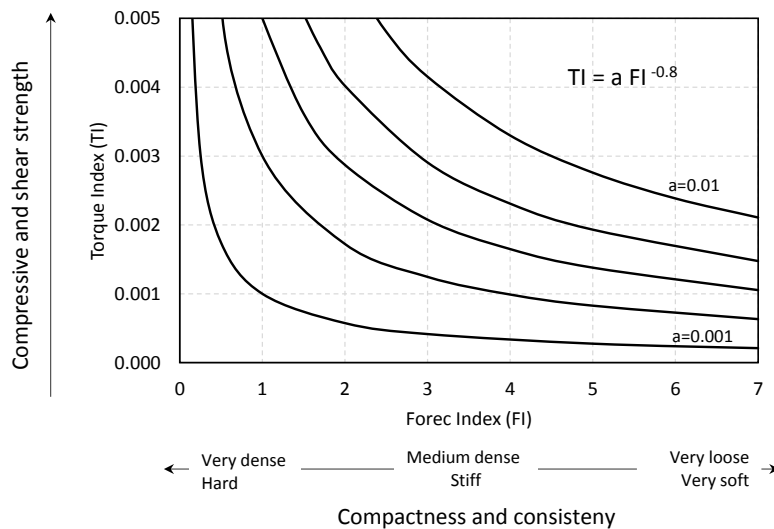
شکل ۱۰. تغییر مقدار نیروی رانش و سرعت چرخش نقاله ماریچج برای کنترل فشار سینه کار.

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

۳-۳- گل گرفتگی

بررسی اطلاعات یک تونل متروی سنگاپور با قطر ۶/۶ متر بیانگر نرخ نفوذ بسیار پایین کله حفار در خاکهای ریزدانه سیلتی با عدد نفوذ استاندارد نزدیک به ۱۰۰ است. بررسی وضعیت کله حفار در مجاورت سینه کار نشان داد که وجود اثر گل گرفتگی شدید باعث ایجاد یک محدوده برآمده در ناحیه نزدیک به مرکز کله حفار شده است. سرعت حرکت خطی این ناحیه در مقایسه با نواحی دیگر کله حفار به شدت کمتر است که این خود می تواند باعث تجمع خاکهای چسبنده در این ناحیه شود. تجمع بیش از حد خاکهای چسبنده و

(شکل ۱۰) را می توان با تغییر همزمان مقدار نیروی رانش و سرعت چرخش نقاله ماریچج برای کنترل فشار سینه کار توضیح داد. همانگونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود، به منظور افزایش فشار سینه کار، مقدار نیروی رانش افزایش یافته است و در همان زمان سرعت چرخش نقاله ماریچج کاهش یافته است. این بدان معنی است که در مقادیر نیروی رانش بیشتر، میزان تخلیه گل از نقاله ماریچج کم شده است که این خود منجر به کاهش نرخ نفوذ می شود. این به وضوح نشان می دهد، استراتژی اپراتور بر روابط عمومی پارامترهای عملیاتی موثر است و این به آسانی قابل تفسیر نیست.



شکل ۱۱. بررسی ارتباط بین مقدار تزریق پلیمر ضد گل‌گرفتگی و نرخ نفوذ در یک تونل مترو در سنگاپور

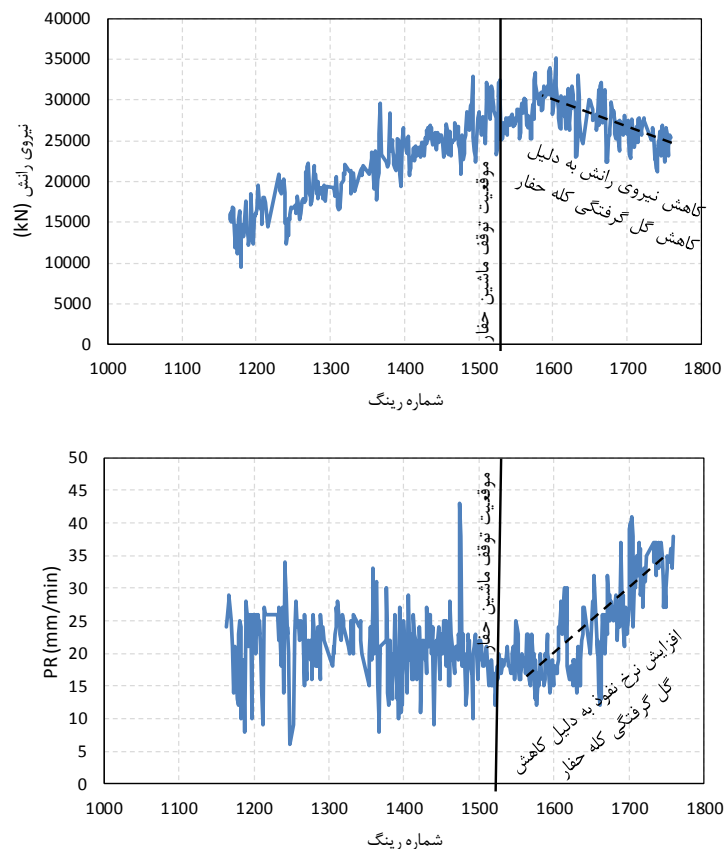
Fig. 11. Investigating the relationship between the injection amount of anticlay polymer and the penetration rate in a subway tunnel in Singapore

دلیل تمیزکاری کله‌حفار در موقعیت توقف بوده است. همانگونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، با کاهش گل‌گرفتگی در چپه‌های کله‌حفار، نیروی رانش کم شده و نرخ نفوذ افزایش پیدا کرده است. 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 کله‌حفار به دلیل کاهش گل‌گرفتگی 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 میلی‌متر در دقیقه به بیش از ۲۵ میلی‌متر در دقیقه افزایش یافت.

۳-۴- محدودیت تجهیزات

ویژگیهای خاص موجود در طراحی تجهیزات ماشین می‌تواند 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

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 ۳۳ 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. 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 گل‌گرفتگی مواد حفاری شده بر روی عملکرد ماشین حفاری به



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

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

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 تاثیرگذار 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.

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 روباره، 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

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

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.

$$PR = e^{(2.780 - 0.01175 \cdot ABS(SPT-40) + 0.01940 \cdot OR + 0.01445 \cdot OB)} \quad (1)$$

$$[R^2 = 72\%]$$

PR : نرخ نفوذ (mm/min)،

SPT : عدد نفوذ استاندارد،

OR : نسبت بازشدگی کله‌حفار به درصد،

OB : ارتفاع روباره به متر.

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

همانگونه که مشاهده می‌شود، مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی مطابقت خوبی دارند. توسعه بیشتر این روابط مستلزم استفاده از پارامترهای بیشتری از طراحی ماشین‌حفاری (به عنوان مثال طرح بازشوی‌های کله‌حفار، طرح چینش و نوع ابزار برشی، و غیره) و برخی دیگر از اطلاعات ژئوتکنیکی مانند کوارتز محتوای خاک و d60 (اندازه دهانه سرند متناظر با ۶۰ درصد عبوری نمونه خاک) است. شکل ۱۴ همبستگی بین d60 و نرخ نفوذ را برای ماشین‌حفاری متعادل‌کننده فشار زمین در خط ۷ متروی تهران نشان می‌دهد.

۴- توسعه روابط جدید تجربی برای تخمین نرخ نفوذ با روش رگرسیون چندمتغیره

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 می‌شود. این ارتباط به صورت یک معادله بین متغیرهای ورودی و متغیر هدف نشان داده می‌شود. با استفاده از این معادله، با داشتن مقادیر متغیرهای ورودی، می‌توان مقدار متغیر هدف را پیش‌بینی کرد. در اینجا، از تحلیل بهترین زیرمجموعه استفاده شده است، که همه زیرمجموعه‌های ممکن از متغیرهای مستقل مورد بررسی قرار گرفته و بهترین زیرمجموعه به عنوان متغیرهای تأثیرگذار انتخاب شدند و در نهایت پارامترهای غیرمعنی‌دار (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 متعادل‌کننده فشار زمین به عنوان متغیر وابسته (متغیر هدف) و سایر داده‌های جدول ۳ به عنوان متغیرهای مستقل (متغیرهای ورودی) در نظر گرفته شدند. سپس، با استفاده از نرم افزار مینی‌تب [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.

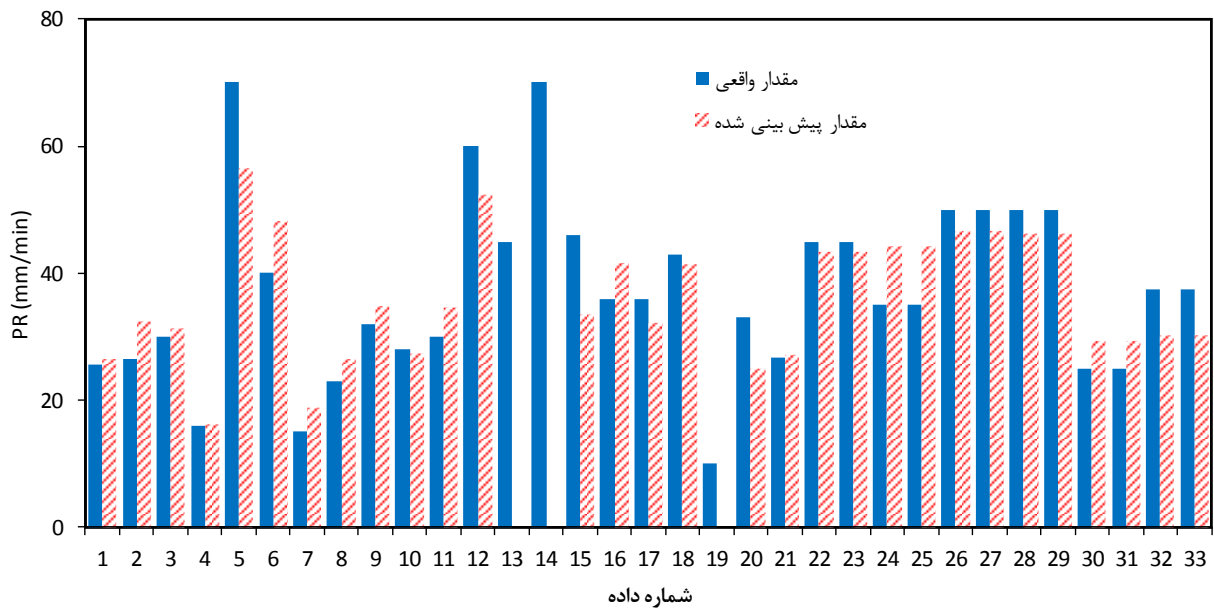
جدول ۵ و رابطه ۱ خروجی مینی‌تب را برای بهترین مدل به دست آمده بر اساس تجزیه و تحلیل رگرسیون نشان می‌دهد. بر اساس این نتایج، در میان متغیرهای ورودی، برخی از پارامترها مانند فشار سینه‌کار و قطر ماشین‌حفاری از نظر آماری برای مدل معنی‌دار نبودند ($p\text{-value} > 0.05$).

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

Table 6. Regression relationships obtained to estimate penetration rate

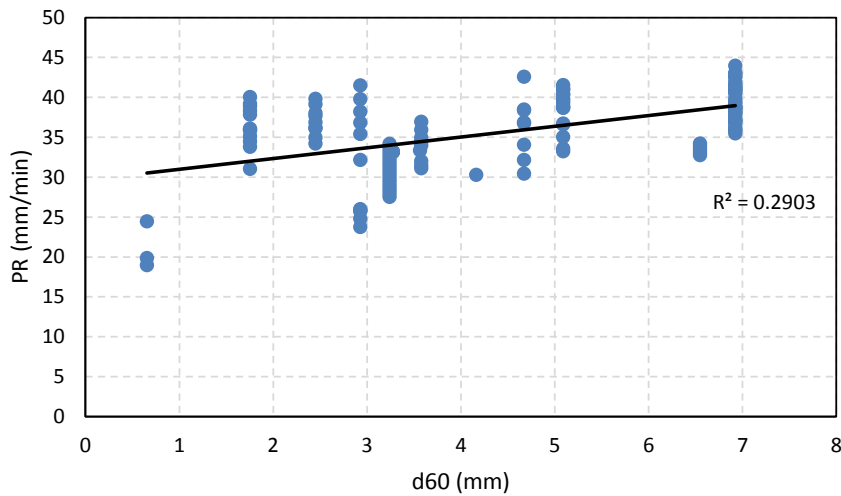
R ²	رابطه رگرسیون
72	$PR = e^{(2.780 - 0.01175 ABS(SPT-40) + 0.01940 OR + 0.01445 OB)}$
69	$PR = e^{(2.934 - 0.00887 ABS[(SPT-40)] + 0.02174 OR + 0.0456 OB/D - 0.000966 Su)}$
68	$PR = e^{(3.079 - 0.01003 ABS[(SPT-40)] + 0.02119 OR + 0.01091 OB - 0.376 Ic)}$

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. نرخ نفوذ واقعی در برابر نرخ نفوذ پیش بینی شده

Fig. 13. Actual penetration rate versus predicted penetration rate



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

Fig. 14. Correlation between d_{60} and PR for EPB TBM in line 7 of Tehran Metro

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 محدودیت های خاص سایت است. بر اساس اطلاعات موجود از این پروژه ها، یک پایگاه داده ای 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 می دهد که مجموعه خاصی از پارامترها، از جمله، نسبت بازشدگی کله حفار، ارتفاع روباره، مقاومت برشی زه کش نشده و شاخص قوام بیش از نیمی از تغییرات نرخ نفوذ را توصیف می کنند. همچنین این تجزیه و تحلیل ها نشان می دهند که نسبت بازشدگی کله حفار یکی از مهمترین عوامل کنترل نرخ نفوذ است. تجزیه و تحلیل دو متغیره بین نرخ نفوذ و عوامل تأثیرگذار آن نشان می دهد 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 می رسد. نسبت بازشدگی حدود ۴۰ تا ۴۵٪ عموماً شرایط بهینه را برای دستیابی به بهترین نرخ نفوذ فراهم می کند. نسبت بازشدگی نسبتاً کم (به عنوان مثال کمتر از ۲۵٪) عملکرد ماشین را به دلیل محدودیت در انتقال مواد حفاری شده از سینه کار به محفظه حفاری و نقاله ماریپیچ کاهش می دهد. در شاخص قوام حدود ۰،۴ تا ۰،۵، نرخ نفوذ به

همانگونه که مشاهده می شود، مقدار ضریب تعیین نشان می دهد 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 می دهند که در ارزیابی زمان اجرای تونل در مراحل اولیه قابل استفاده است. علاوه بر این، برای ارزیابی الگوی پیچیده داده های واقعی، ممکن است نیاز به استفاده از شاخص های مقیاس بندی شده باشد. با این حال باید این نکته را مورد توجه قرار داد که در ارزیابی نرخ نفوذ ماشین های 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 گسترده تری از تعداد قابل توجهی از پروژه های تونل زنی در دسترس باشد، مورد توجه قرار گیرد.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

بررسی نتایج مطالعات انجام شده در مورد ارزیابی عملکرد ماشین های حفاری زمین نرم، به ویژه ماشین متعادل کننده فشار زمین، نشان می دهد 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 پروژه های مختلف

- modifications to existing prediction models. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, (2009).
- [6] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, M., Bruland, A. Development of new equations for performance prediction. *Int. J. Geo Mech. Geoenng.* (2009a) 4 (4), 287–297.
- [7] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamehchiyan, 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

حداکثر مقادیر خود می‌رسد، این به دلیل احتمال کمتر گل‌گرفتگی بازشوهای 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 ماشین‌حفاری را به دست آورد. لازم به ذکر است که به دلیل وجود بسیاری از محدودیت‌ها در کنترل نرخ نفوذ ماشین‌حفاری 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 جنبه‌های 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.

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. *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

- 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).
- 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Farrokh, Evaluating the Penetration Rate of Earth Pressure Balance Tunnel Boring Machines, Amirkabir J. Civil Eng., 56(11) (2025) 1431-1452.

DOI: [10.22060/ceej.2024.22916.8074](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.22916.8074)



