



Optimization of TBM Performance using Force-Penetration Interaction Diagram for Hard Rock

F.E. Farrokh*

Mining Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT: In the phase of the design of a TBM, it is essential to optimize the cutter head characteristics concerning cut and cutter geometry parameters to maximize both cutter penetration and TBM advance rate. In this regard, valuable results have been achieved from numerical simulations and laboratory tests, however, due to the presence of some shortcomings for such methods (e.g. high difference between rolling force measured in the laboratory and actual field data), there is a high demand by the industry to conduct actual field data analyses. So far, very few efforts have been made to study the optimum cutter performance (e.g. penetration, normal force, and rolling force) based on the information of completed tunnel projects from around the world. To investigate the influence of various parameters on the cutter penetration and to provide basic guidelines for the evaluation of the optimum TBM performance in hard rock conditions, an extensive field database is compiled. Based on the data analysis of this database, it is found that the linear speed of the cutters has a direct correlation with two major parameters of normal force index (NFI) and rolling force index (RFI). In this regard, two formulas are generated using statistical analysis of the data from around 260 tunnel projects to evaluate both NFI and RFI. The corresponding formulas have a coefficient of determination of 77 and 68%, respectively. These formulas are used in an optimization process to maximize cutter penetration using the interaction of various operational constraints (cutter load capacity, cutter head torque limit, cutter geometry constraints, and cutter head penetration rate limits). The produced interaction diagram is called the force-penetration interaction diagram. The new findings of this study can provide a foundation to improve the design process of hard rock TBMs and to optimize their performance considering various project setting parameters.

Review History:

Received: Jul. 03, 2020

Revised: Jul.30, 2020

Accepted: Aug. 22, 2020

Available Online: Sep. 09, 2020

Keywords:

Optimization

TBM performance

Interaction diagram

Penetration

NFI

RFI.

1- Introduction

TBM performance optimization has been the subject of many research studies and field test trials. In this regard, some major TBM cutter head design characteristics including cut spacing and specific energy are studied in the laboratory using linear cutting machine tests, rotary cutting machine tests, and numerical simulations. The summary of the results of these studies shows that to reach an optimum excavation, the ratio of cutter spacing to penetration (S/p) shall be varied to reach minimum specific energy (SE). At this SE, the rolling force required to generate a unit volume of the excavated rock is comparably lower. One note is that in practice, rolling force is much lower than the normal force, hence it is not a major concern in performance optimization as long as its value falls within its permissible limit defined by the maximum cutter head torque. In this paper, an extensive database compiled by the author during the past 10 years is used to investigate the parameters maximizing the field TBM penetration and advance rate. In this regard,

two new formulas are derived from the actual field data of many projects to evaluate cutter normal force and rolling force. These new formulas are used to optimize the cutter penetration considering TBM operational constraints.

2- Methodology

To improve the strategies for the evaluation of the normal force and rolling force, an attempt is made to use the information of the database to generate practical formulas for the normal force and rolling force using regression analysis. To improve the prediction performance, the objective parameters are normalized with the cutter penetration. With this strategy, the normal force is transformed to a parameter called, normal force index (NFI) (Eq. (1)), and the rolling force is transformed to a parameter called, rolling force index (RFI) (Eq. (2)).

$$NFI = F_n/p \quad (1)$$

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



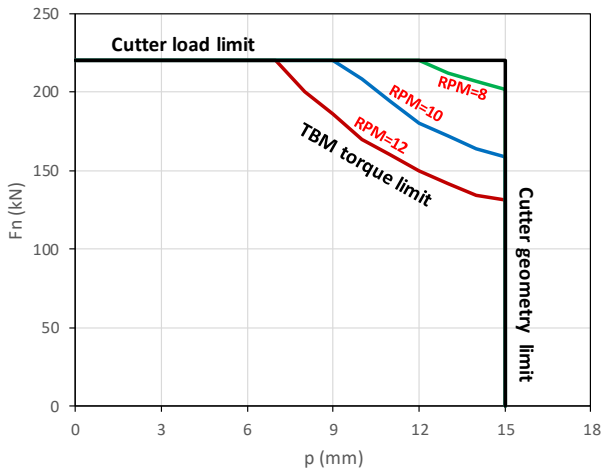


Fig. 1. Relationship among normal force, penetration, torque, and RPM.

$$RFI = F_r/p \tag{2}$$

Where NFI is normal force index in kN/mm/rev, F_n is cutter normal force in kN, p is cutter penetration in mm, RFI is rolling force index in kN/mm, and F_r is cutter rolling force in mm.

3- Results and Discussion

Eqs. (3) and (4) show the Minitab outputs for the best-fitted model for the evaluation of NFI and RFI based on different step forward regression analyses. It should be noted that a p-value of less than 0.05 represents the high significance of a parameter in a multiple regression analysis. VIF (variance inflation factor) of less than 10 guarantees low collinearity between dependent parameters.

$$NFI = 0.117 \cdot UCS^{0.5464} LS^{0.75} \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.379} \left(\frac{T}{19}\right)^{1.039} \left(\frac{d}{432}\right)^{1.3} \tag{3}$$

$$RFI = 0.00686 \cdot UCS^{0.3187} LS^{1.063} \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.158} \tag{4}$$

Where UCS is uniaxial compressive strength in MPa, S is cutter spacing in mm, LS is the average linear speed of the cutters in m/min, T is cutter tip width in mm, and d is cutter diameter in mm.

The cutter force-penetration interaction diagram is constructed on a chart with p on the x-axis and F_n on the y axis. In this chart, the upper boundary is defined by the maximum cutter load capacity, the farthest right-hand side boundary is determined by the cutter geometry limit, and the upper right-hand boundary is defined according to Eqs. (3) and (4). As seen in Fig. 1, the extent and location of the upper right-hand boundary are dependent on the level of RPM used. As the RPM becomes higher, the extent of this boundary becomes larger.

4- Conclusion

This study provides an extensive data analysis for the optimization of hard rock TBMs' performance using a compiled database of various information of many projects from around the world. To enhance the prediction of cutter forces (i.e. normal force and rolling force), two new formulas are developed using the cut and cutter geometry information (i.e., cutter penetration, cutter spacing, cutter diameter, tip width, etc.) and uniaxial compressive strength to evaluate the NFI and RFI. An interesting outcome of the analyses conducted for NFI and RFI is that both of these parameters are a function of the linear speed of the cutters.

Based on empirical formulas obtained for NFI and RFI, a procedure is offered to optimize the TBM operation to obtain maximum TBM penetration and maximum TBM advance rate considering the effect of RPM and the operational limits for cutter load capacity, rolling force limit, and cutter geometry constrains. The outcomes of this procedure can be used to define optimum RPM, penetration, and intervention interval length, maximize the TBM advance rate and minimize the TBM downtimes.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

E. Farrokh, Optimization of TBM Performance using Force-Penetration Interaction Diagram for Hard Rock, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 1075-1076.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18675.6919





بهینه‌سازی عملکرد TBM با معرفی نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی

ابراهیم فرخ*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۰۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی
عملکرد TBM
نمودار اندرکنش
شاخص نیروی عمودی
شاخص نیروی چرخشی

خلاصه: در مراحل طراحی و اجرای پروژه‌های حفاری تونل با TBM، بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد به منظور به حداکثر رساندن نفوذ ابزار برشی و سرعت پیشروی ضروری است. در این راستا، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی می‌تواند نتایج ارزشمندی به دست بدهد، اما به دلیل وجود برخی نواقص برای چنین آزمایش‌هایی (به عنوان مثال اختلاف زیاد بین نیروی چرخشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و داده‌های واقعی میدانی)، نیاز به اصلاح چنین روش‌هایی همچنان وجود دارد. تاکنون تلاش‌های بسیار کمی برای بررسی عملکرد بهینه ابزار برشی (به عنوان مثال نیروی عمودی و نیروی چرخشی) بر اساس اطلاعات پروژه‌های تونلی تکمیل شده از سراسر جهان انجام شده است. در این مقاله برای بررسی پارامترهای عملکرد TBM و بهینه‌سازی آنها، ابتدا یک بانک اطلاعاتی گسترده تهیه شده است و در ادامه روابط بین پارامترهای مختلف این بانک اطلاعاتی با دو شاخص نیروی عمودی و نیروی چرخشی مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج این تحلیل‌ها، مشخص شده است که سرعت خطی ابزار برشی با دو پارامتر شاخص نیروی عمودی (NFI) و شاخص نیروی چرخشی (RFI) ارتباط مستقیم دارد. در این راستا، دو رابطه با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری داده‌های بیش از ۲۶۰ پروژه تونلی برای ارزیابی هر دو شاخص NFI و RFI توسعه یافته است. روابط مربوطه به ترتیب دارای ضریب تعیین ۷۷ و ۶۸ درصد هستند. در ادامه بر مبنای این روابط، یک فرآیند بهینه‌سازی برای به حداکثر رساندن نفوذ ابزار برشی و سرعت پیشروی با استفاده از محدودیت‌های مختلفی عملیاتی (شامل ظرفیت نیروی ابزار برشی، محدودیت گشتاور کله حفار، محدودیت‌های هندسه برش و محدودیت نرخ نفوذ) ارائه شده است. در این فرآیند، نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی ابزار برشی با در نظر گرفتن سه محدودیت حداکثر ظرفیت باربری ابزار برشی، حداکثر مقدار نفوذ به دلیل محدودیت‌های هندسی ابزار برشی، و حداکثر گشتاور مجاز کله حفار در مقادیر مختلف سرعت چرخش آن محاسبه شده است. در مرحله دوم، با استفاده از رابطه ارائه شده برای شاخص نیروی عمودی و نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی، حداکثر مقدار نفوذ دیسک برشی محاسبه شده است. در نهایت، با استفاده از روابط ارائه شده برای محاسبه نرخ پیشروی و با در نظر گرفتن تأخیرات توقف برای تعویض دیسک‌های برشی، نحوه به حداکثر رساندن نرخ پیشروی توضیح داده شده است.

۱- مقدمه

باید به گونه‌ای باشد تا انرژی ویژه مصرفی به حداقل خود برسد. در این مقدار از انرژی ویژه، عموماً نیروی چرخشی ابزار برشی در کمترین مقدار خود قرار دارد، البته لازم به ذکر است که عواملی مثل فاصله‌داری دیسک‌ها و نرخ نفوذ نیز بر انرژی ویژه مؤثر هستند. نکته‌ای که وجود دارد این است که در عمل نیروی چرخشی بسیار کمتر از نیروی عمودی است (بر اساس [۲۶-۳۳] این مقدار عمدتاً کمتر از ۲۰٪ مقدار نیروی عمودی ذکر شده است)، از این رو در عمل، این پارامتر به عنوان عامل کنترل‌کننده اصلی عملکرد و همچنین عامل اساسی در بهینه‌سازی نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM در نظر گرفته نمی‌شود. به عنوان نمونه، در یک پروژه TBM

بهینه‌سازی عملکرد TBM موضوع بسیاری از مطالعات تحقیقاتی و آزمایش‌های میدانی بوده است. در این راستا، برخی از ویژگی‌های اصلی طراحی کله حفار TBM از جمله فاصله‌داری ابزار برشی و انرژی ویژه در آزمایشگاه با استفاده از آزمایش‌های ماشین برش خطی [۱-۱۶]، آزمایش‌های ماشین برش چرخشی [۱۷-۱۸]، و شبیه‌سازی‌های عددی [۱۹-۲۵] مورد بررسی قرار گرفته است. خلاصه نتایج این مطالعات نشان می‌دهد، برای دستیابی به یک حفاری بهینه، نسبت فاصله‌داری ابزار برشی به نفوذ (S/p)

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



سنگ سخت با قطر ۷۵/۸ متر در سنگ گرانیب و گرانودیوریت با مقاومت فشاری تک محوری ۲۵۰-۱۰۰ مگاپاسکال، نیروی عمودی در ابزار برشی ۱۷ اینچی حدود ۲۲۰ kN بوده است، که نزدیک به حداکثر ظرفیت باربری ابزار برشی است، در حالی که نیروی چرخشی فقط در حدود ۱۰ کیلونیوتن بوده است، که معادل با گشتاور کله حفار ۱۲۵۰ kN-m است. این مقدار برابر با حدود ۱۰٪ حداکثر گشتاور نصب شده بر روی این ماشین TBM است (گشتاور اسمی ۱۴۵۰۰ kN-m) در این زمینه، اپراتورها سعی می کنند تا نفوذ TBM را تا جایی افزایش دهند که در کل، نیروی رانش و/یا گشتاور به حداکثر مقادیر مجاز خود برسد. این مقادیر معمولاً توسط مدیران پروژه تعریف می شود تا از بروز هرگونه صدمه به ماشین حفار جلوگیری شود. از جمله مشکلات اساسی در ارتباط با آزمایش‌های آزمایشگاهی این است که تأمین بلوک‌های سنگی بزرگ بدون درزه بسیار مشکل است و همین امر موجب می شود که در بعضی مواقع، قطعات کوچکتر سنگی با بتن به هم متصل شوند [۳۴]. این خود می تواند در نتایج نهایی آزمایش‌ها تأثیرگذار باشد. علاوه بر این مشاهده رفتار واقعی ابزار برشی به دلیل محدودیت عمق بلوک‌های سنگی مورد استفاده، امکان پذیر نیست. همچنین این تجهیزات آزمایشگاهی به تعداد محدود در دنیا وجود دارد و در دسترس تعداد کمی از محققین است. از سوی دیگر، همان گونه که توسط فرخ و همکاران متذکر شده است [۱۷]، آزمون‌های برش خطی ممکن است روند برش واقعی را شبیه‌سازی نکنند. نتایج دستگاه برش چرخشی نیز محدود است و ممکن است در آینده نیاز به مطالعه بیشتری داشته باشد. از این رو لازم است تا پارامترهای عملکرد ابزار برشی، بر اساس داده‌های میدانی توسعه داده شوند. علاوه بر این می بایست در فرآیند بهینه‌سازی عملکرد TBM، محدودیت‌های عملیاتی را نیز در نظر گرفت و تنها کمینه کردن انرژی ویژه، که در بسیاری از تحقیقات همانند [۳۵-۳۶] [۲۹-۳۱] تنها بر آن متمرکز شده‌اند، کافی نیست. علت این امر، مغفول ماندن بررسی ارتباط با پارامترهای انرژی ویژه حداقل و حدود عملیاتی TBM است. در ارتباط با برآورد پارامترهای عملکرد TBM، مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی زیادی توسط محققین مختلف [۳۷-۴۰] ارائه شده است. در تحقیقات ارائه شده توسط [۲۹-۳۱] [۳۸] [۴۱] به این نکته اشاره شده است که تعدادی از این مدل‌ها از جمله مدل CSM [۴۲] و مدل‌های اصلاح شده CSM [۳۳-۳۴] در مقایسه با نتایج اعداد واقعی پارامترهای عملکرد TBM دارای خطاهای قابل توجه هستند که بررسی سایر پارامترهای تأثیرگذاری را که در این مدل‌ها در نظر گرفته نشده‌اند، ضروری می کند. در این رابطه، در

این مقاله با استفاده از یک بانک اطلاعاتی جامع، روش‌های جدیدی برای برآورد پارامترهای عملیاتی نیروهای عمودی و چرخشی ابزار برشی با در نظر گرفتن پارامترهای مهمی که تاکنون کمتر به آنها توجه شده است (همانند اثر سرعت چرخش کله حفار و اثرات محدودیت‌های طراحی و اجرایی برای به حداکثر رساندن میزان نفوذ ابزار برشی) ارائه شده است و نحوه به حداکثر رساندن پارامترهای نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM مورد بحث قرار گرفته است. در مجموع، بهینه‌سازی پارامترهای عملکرد TBM شامل نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی و طراحی TBM از مهم‌ترین نتایج بکارگیری روش‌ها و فرمول‌های ارائه شده در این مقاله است. نکته مهمی که در این تحقیق در نظر گرفته شده است، تعیین حدود حداکثری این پارامترها با توجه به اثر سرعت چرخش کاترهد و ترکیب محدودیت‌های مختلف طراحی و عملیاتی است. بکارگیری چنین روشی می تواند فرآیند بهینه‌سازی پارامترها را با جلوگیری از اعمال آسیب به ابزارهای برشی و یاتاقان اصلی TBM توأم نماید.

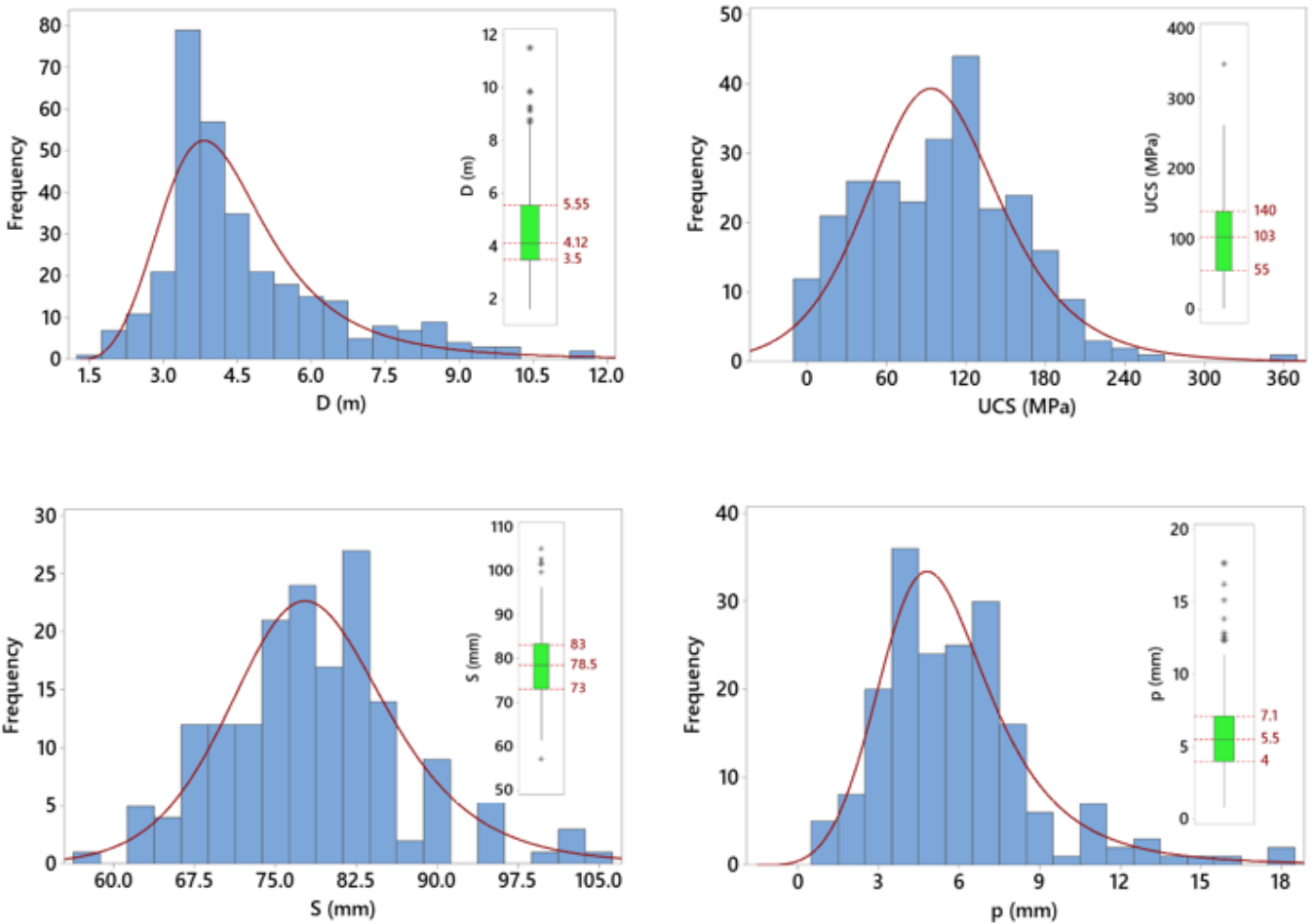
۲- بانک اطلاعاتی عملکرد TBM

نویسنده در طی ۱۰ سال گذشته با جمع‌آوری اطلاعات از پروژه‌های تونلی از منابع مختلف شامل مقالات و گزارشات کارگاهی، یک بانک اطلاعاتی در مورد پارامترهای عملکرد TBM‌های سنگ‌های سخت گردآوری کرده است. این بانک اطلاعاتی با هدف تهیه روابط جدید برای نیروهای عمودی و چرخشی ابزار برشی تهیه شده است. اطلاعات این بانک اطلاعاتی شامل پارامترهای مربوط به هندسه برش و هندسه ابزار برشی و پارامترهای تأثیرگذار بر این دو (به عنوان مثال مقاومت تک محوری سنگ (UCS)، درصد محتوای کوارتز و غیره) برای بیش از ۲۶۰ پروژه تونلی است. اطلاعات کلی این پروژه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. قطر TBM در این بانک اطلاعاتی از ۶۳/۱ تا ۵۲/۱۱ متر متغیر است. پروژه‌های TBM ای در بانک اطلاعاتی بین سال‌های ۱۹۸۰ و ۲۰۱۵ اجرا شده‌اند. طول این پروژه‌ها حدود ۱۵۰۰ کیلومتر است که توسط سه نوع TBM سنگ سخت (باز، تک سپره و سپر تلسکوپي) ساخته شده توسط ۸ شرکت مختلف، حفاری شده‌اند. شکل ۱ توزیع پارامترهای اصلی موجود در این بانک اطلاعاتی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، دامنه این پارامترها نشان می دهد که بانک اطلاعاتی، اکثر مقادیر موجود در پروژه‌های تونل سازی TBM را پوشش می دهد. از منحنی‌های توزیع نیز مشاهده می شود که اکثر داده‌ها در اطراف نقطه میانی متقارن هستند، به این معنی که اطلاعات

جدول ۱. توصیف کلی اطلاعات بانک اطلاعاتی

Table 1. General description of the database

نوع سنگ	نوع تونل	تعداد کشور	UCS (MPa)	قطر تونل (m)	تعداد پروژه	نوع TBM
رسوبی (گل سنگ، لای سنگ، ماسه سنگ، آهک)، آذرین (گرانیت، گابرو، گرانودیوریت، آندزیت، بازالت)، دگرگونی (گنایس، شیست)	دسترسی، انتقال آب، راه آهن، راه، فاضلاب، انتقال خدمات، اکتشافی	۲۶	۳۵۰-۲۲ ۲۶۳-۵ ۱۹۰-۳۰	۱/۹-۶۳/۹ ۲/۱۱-۶/۵۲ ۲/۱۱-۹	۲۰۷ ۲۶ ۳۰	باز تک سپری سپر تلسکوپی



شکل ۱. توزیع پارامترهای اصلی موجود در بانک اطلاعاتی (UCS: مقاومت فشاری تک محوری سنگ، D: قطر تونل، p: نفوذ ابزار برشی، S: فاصله‌داری ابزار برشی)

Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

$$RFI = F_r/p \quad (2)$$

در این روابط NFI شاخص نیروی عمودی بر حسب kN/mm/rev، RFI شاخص نیروی چرخشی بر حسب Fn kN/mm/rev نیروی عمودی ابزار برشی بر حسب Fr kN، نیروی چرخشی ابزار برشی بر حسب kN، و p نفوذ دیسک برشی بر حسب mm است.

۳-۱- تجزیه و تحلیل رگرسیون برای NFI و RFI

در صنعت تونل‌سازی، مدل‌های تجربی به دلیل سهولت در استفاده و به دلیل کاربرد عملی آنها به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مطالعه، به منظور ارزیابی NFI و RFI، تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره (با استفاده از روش بهترین زیرمجموعه‌ها و یا روش سعی و خطا برای یافتن یک رابطه با بیشترین ضریب تعیین ممکن) مورد استفاده قرار گرفته است. این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار ۱۶ Minitab انجام شده است. لازم به ذکر است که نوع و تعداد پارامترهای مورد استفاده در روابط به دست آمده، بر اساس در دسترس بودن مقادیر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی و پارامترهای عملیاتی TBM در تعداد قابل توجهی از پروژه‌های بانک اطلاعاتی و همچنین معیارهای آماری برای مناسب بودن رابطه یک پارامتر مستقل و پارامتر وابسته، انتخاب شده است.

۳-۱-۱- NFI

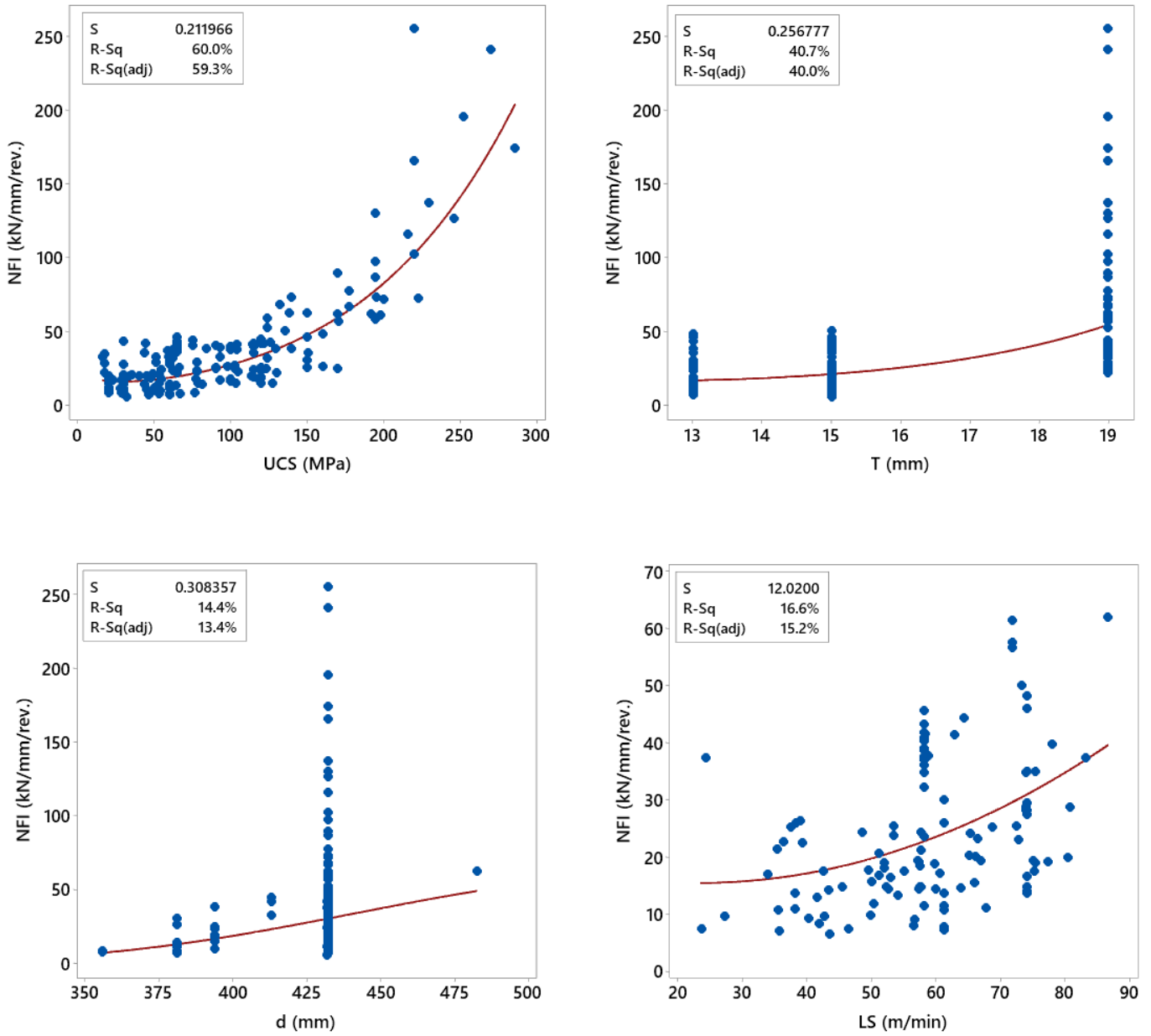
شکل ۲ خلاصه‌ای از بهترین روابط رگرسیون ساده (با بیشترین مقادیر برای ضرایب تعیین) به دست آمده برای NFI را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رود، UCS با NFI بهترین رابطه را دارد (ضریب تعیین ۶۰٪). در این میان، همبستگی بین NFI و میانگین سرعت برش خطی قابل توجه است. سرعت برش خطی (LS) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است، از آنجا که ابزار برشی از مرکز تا پیرامون کله حفار توزیع یافته‌اند و شعاع متوسط قرارگیری آنها به صورت تقریبی، نصف شعاع کله حفار است، حاصل ضرب تعداد دور کله حفار در دقیقه و محیط دایره‌ای که دارای قطری برابر با نصف قطر کله حفار است، طول متوسط پیمایش ابزارهای حفاری را در دقیقه (میانگین سرعت خطی ابزار برشی) نشان می‌دهد.

بانک اطلاعاتی به سمت محدوده خاصی از پارامترها تمایل ندارد. نمودارهای جعبه‌ای قطر حفاری، UCS، فاصله‌داری ابزار برشی، نفوذ ابزار برشی، دارای دامنه‌ای به ترتیب ۵۷-۱۰۵ میلی‌متر، و ۷/۱۷-۸/۰ میلی‌متر هستند. دامنه میان چارکی این نمودارها به ترتیب ۵/۵-۵/۳ متر، ۱۴۰-۵۵ مگاپاسکال، ۸۳-۷۳ میلی‌متر، و ۱/۷-۴ میلی‌متر با میانه ۱۲/۴ متر، ۱۰۳ مگاپاسکال، ۵/۷۸ میلی‌متر و ۵/۵ میلی‌متر است.

۳- توسعه روابط جدید تجربی برای تخمین نیروهای عمودی (Fn) و چرخشی (Fr)

به منظور انجام یک تحلیل بهینه‌سازی در مورد نفوذ ابزار برشی (p) با توجه به محدودیت‌های نفوذ (یعنی ظرفیت اعمال نیروی ابزار برشی، حد مجاز نیروی چرخشی و حداکثر نفوذ ممکن) که در بخش ۴ مورد بحث قرار می‌گیرد، از مدل‌های ارزیابی نیروی عمودی و نیروی چرخشی می‌توان استفاده کرد. در بین مدل‌های مختلفی که برای این منظور توسعه یافته، مدل CSM به صورت گسترده در صنعت مورد توجه قرار گرفته است [۶-۹]. این مدل بر اساس روش تحلیل آماری بر روی بیش از ۴۰۰ داده آزمایش برش خطی انجام شده بر روی انواع مختلف سنگ، تهیه شده است. با وجود مزایای بسیاری که این مدل فراهم می‌کند، تعدادی از مطالعات (به عنوان مثال فرخ و همکاران [۴۳]) به این نتیجه رسیدند که این مدل می‌بایست تصحیح شود، چون بین داده‌های میدانی و شاخص‌های عملکرد ارزیابی شده توسط این مدل (به عنوان مثال نفوذ) رابطه ضعیفی وجود دارد. از این رو در این مقاله، به منظور بهبود استراتژی‌های ارزیابی نیروی عمودی و نیروی چرخشی، از اطلاعات بانک اطلاعاتی شرح داده شده برای تولید روابط عملی استفاده می‌شود. به منظور بهبود عملکرد پیش‌بینی برای مدل‌ها، از پارامترهای هدف مقیاس‌بندی شده استفاده شده است. با استفاده از این استراتژی، نیروی عمودی به پارامتری به نام شاخص نیروی عمود (NFI) و نیروی چرخشی به پارامتری به نام شاخص نیروی چرخشی (RFI) تبدیل می‌شود. NFI و RFI به ترتیب حاصل تقسیم نیروی عمودی و نیروی چرخشی ابزار برشی به مقدار نفوذ آن است (روابط (۱) و (۲)).

$$NFI = F_n/p \quad (1)$$



شکل ۲. روابط بین NFI و پارامترهای تأثیرگذار بر آن. در این روابط T، عرض لبه ابزار برشی و d، قطر ابزار برشی است

Fig. 2. Correlation between NFI and its influential parameters

جدول ۲. ضرایب رگرسیون Minitab برای پیش‌بینی Ln(NFI)

Table 2. Minitab regression coefficients for Ln(NFI) evaluation

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-19.071	3.71	-4.31	0.000	
Ln(UCS)	0.5464	0.0430	12.72	0.000	1.09
Ln(S)	1.379	0.361	3.82	0.000	1.50
Ln(LS)	0.750	0.109	6.89	0.000	1.24
Ln(T)	1.039	0.340	3.06	0.003	1.96
Ln(d)	1.300	0.776	1.67	0.097	2.32

$$NFI = 0.117 \cdot UCS^{0.5464} LS^{0.75} \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.379} \left(\frac{T}{19}\right)^{1.039} \left(\frac{d}{432}\right)^{1.3} \quad (5)$$

[R²=77%]

$$LS = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot RPM \quad (3)$$

در این روابط NFI، شاخص نیروی عمودی برحسب kN/mm/rev، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب MPa، S فاصله‌داری ابزار برشی بر حسب mm، LS میانگین سرعت خطی ابزار برشی بر حسب m/min، T عرض لبه ابزار برشی بر حسب mm، و d قطر ابزار برشی بر حسب mm است.

شکل ۳ نتایج مقایسه ۱:۱ بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده Ln(NFI) را با استفاده از رابطه (۴) نشان می‌دهد. بر اساس معیار ارائه شده توسط [۴۵]، مقدار ضریب تعیین (R²) بیشتر از ۵۰ درصد یا ضریب همبستگی (R) بیشتر از ۷۱ درصد، بیانگر یک رابطه قوی بین پارامترها است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآورد شده Ln(NFI) برابر با ۸۸ درصد است که نشانگر یک رابطه قوی است.

۳-۱-۲ RFI

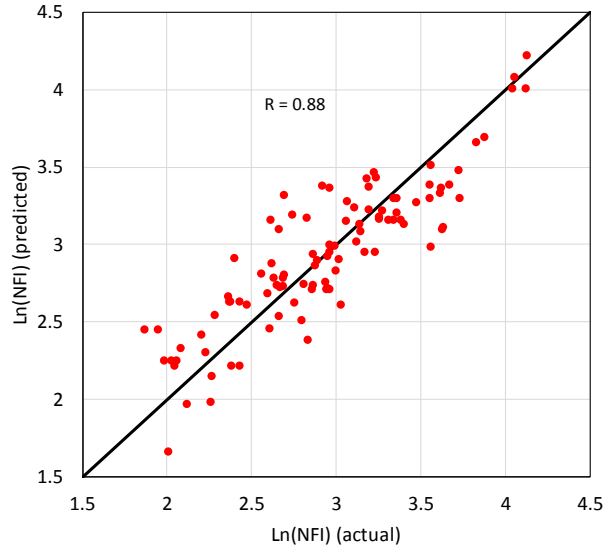
شکل ۴ خلاصه‌ای از بهترین روابط به دست آمده بین RFI و عوامل تأثیرگذار بر آن را ارائه می‌دهد. در بین این روابط، LS با RFI بهترین همبستگی را دارد. روابط (۶) و (۷) و جدول ۳، خروجی‌های Minitab را برای بهترین مدل به دست آمده برای ارزیابی RFI بر اساس روش تحلیل

که در آن LS میانگین سرعت خطی ابزار برشی بر حسب m/min، D قطر تونل بر حسب متر، و RPM سرعت چرخش کله حفار در هر دقیقه است.

همبستگی بین LS و NFI نشان می‌دهد، افزایش LS باعث افزایش NFI می‌شود. این ممکن است به این دلیل باشد که در LS و RPM بالاتر، نیروهای ضربه‌ای که بر روی ابزار برشی اعمال می‌شوند، بیشتر می‌شوند. روندهای مشابهی نیز توسط [۴۴] مورد مطالعه و بحث قرار گرفته است که در آن نتایج آزمایش‌های دستگاه برش چرخشی در هنگام اعمال مقادیر مختلف RPM بر روی یک سنگ گرانیتی مورد بحث قرار گرفته است.

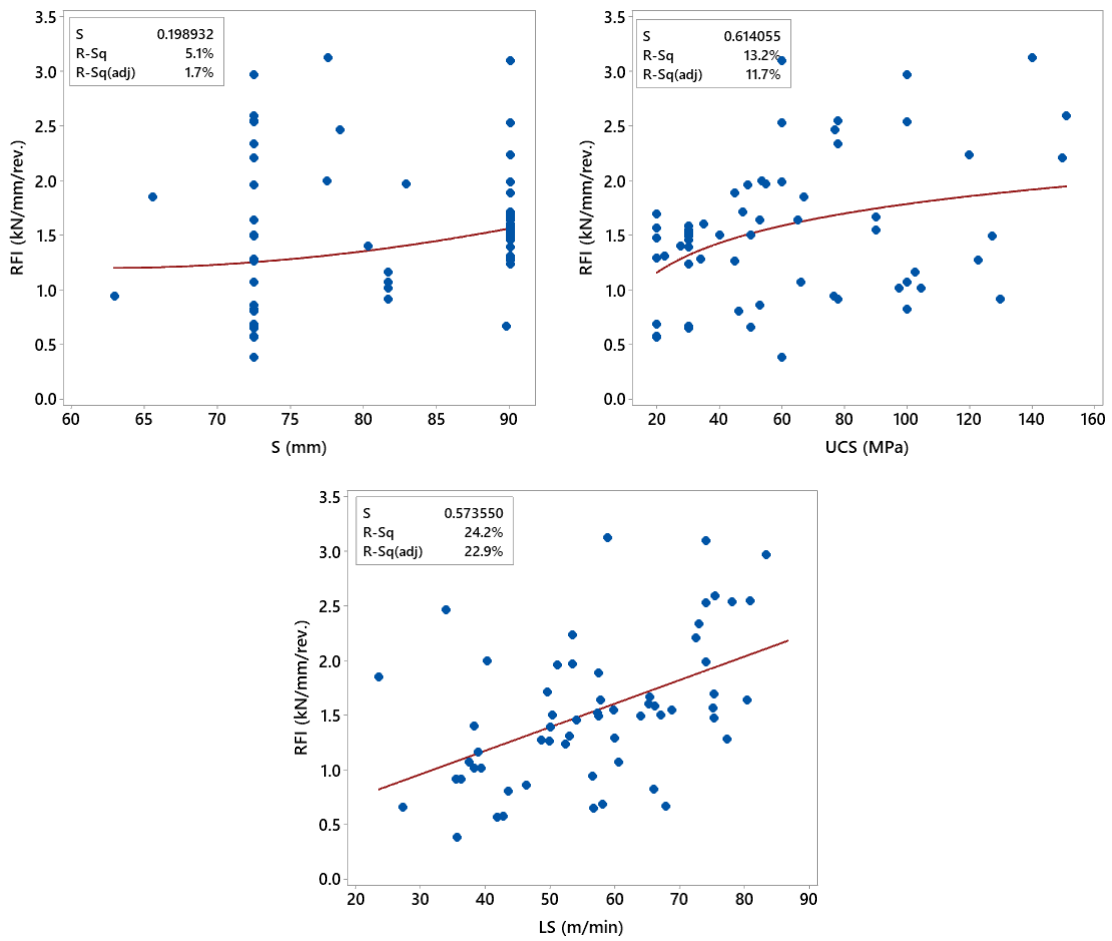
روابط (۴) و (۵) و جدول ۲، خروجی‌های Minitab را برای بهترین مدل به دست آمده برای ارزیابی NFI بر اساس روش تحلیل رگرسیون گام به گام نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار p کمتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده اهمیت بالای یک پارامتر در روش تحلیل رگرسیون چندگانه است. VIF (ضریب تورم واریانس) کمتر از ۱۰ بیانگر همبستگی کم بین پارامترهای وابسته است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در جدول ۲، مقادیر p و مقادیر VIF با حدود ذکر شده مطابقت دارند.

$$\ln(NFI) = -19.1 + 0.5464 \ln(UCS) + 1.379 \ln(S) + 0.75 \ln(LS) + 1.039 \ln(T) + 1.3 \ln(d) \quad (4)$$



شکل ۳. مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده $\ln(NFI)$

Fig. 3. Actual versus predicted $\ln(NFI)$



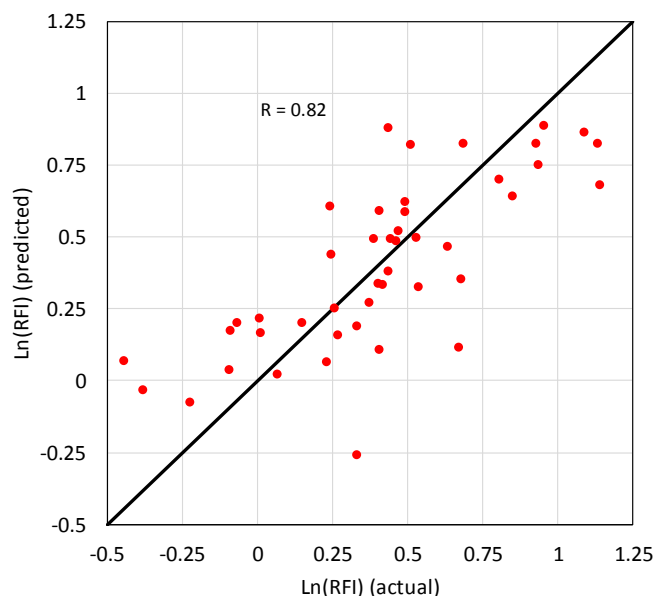
شکل ۴. روابط بین RFI و پارامترهای تأثیرگذار بر آن با استفاده از داده‌های بانک اطلاعاتی

Fig. 4. Correlation between RFI and its influential parameters

جدول ۳. ضرایب رگرسیون Minitab برای پیش‌بینی Ln(RFI)

Table 3. Minitab regression coefficients for Ln(RFI) evaluation

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-8.98	1.64	-3.60	0.001	
Ln(UCS)	0.3187	0.0608	5.24	0.000	1.03
Ln(S)	1.158	0.360	3.21	0.002	1.05
Ln(LS)	1.063	0.140	7.58	0.000	1.03



شکل ۵. مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده Ln(RFI)

Fig. 5. Actual versus predicted Ln(RFI)

ابزار برشی بر حسب mm، و LS میانگین سرعت خطی ابزار برشی بر حسب m/min است.

شکل ۵ نتایج مقایسه ۱:۱ بین مقادیر واقعی و پیش‌بینی شده Ln(RFI) را با استفاده از رابطه (۶) نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده، ۸۲ درصد است که طبق معیار [۴۵]، نشانگر یک رابطه قوی بین پارامترها است.

۴- بهینه‌سازی عملکرد TBM

منظور از بهینه‌سازی عملکرد TBM، استفاده حداکثری از نیروی پیشران و گشتاور TBM برای حفاری در یک حداکثر نفوذ ممکن با حداقل

رگرسیون چندجمله‌ای، نشان می‌دهد.

$$\text{Ln}(RFI) = -10 + 0.3187 \text{Ln}(UCS) + 1.158 \text{Ln}(S) + 1.063 \text{Ln}(LS) \quad (6)$$

$$RFI = 0.00686 \cdot UCS^{0.3187} LS^{1.063} \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.158} \quad (7)$$

در این روابط RFI شاخص نیروی چرخشی بر حسب kN/mm/، UCS مقاومت فشاری تک محوری بر حسب S، MPa فاصله‌داری

که به عنوان نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی نامیده می‌شود، لازم است ابتدا، حداکثر نیروی چرخشی مجاز محاسبه شود. این پارامتر را می‌توان از حداکثر گشتاور کله حفار، با استفاده از روابط (۸) و (۹) محاسبه کرد. در این روابط، حداکثر نیروی چرخشی مجاز برای تمام دیسک‌های برشی یکسان است. مجموع شعاع قرارگیری ابزار برشی از مرکز تا پیرامون کله حفار نیز برابر با حاصل ضرب شعاع متوسط قرارگیری ابزار برشی و تعداد آنها است. شعاع متوسط قرارگیری ابزار برشی بر اساس اطلاعات تجربی طراحی موقعیت ابزار برشی، حدوداً برابر با نصف شعاع کله حفار است.

$$M_{max} = \sum F_{r-max} r_i \approx \frac{1}{2} \cdot r \cdot N \cdot F_{r-max} \quad (۸)$$

$$F_{r-max} = 2 \cdot M_{max} / (N \cdot r) \quad (۹)$$

در این روابط M_{max} حداکثر گشتاور کله حفار بر حسب kNm ، r_i موقعیت شعاعی یک ابزار برشی بر روی کله حفار بر حسب m ، Γ شعاع کله حفار بر حسب m ، F_{r-max} حداکثر نیروی چرخشی مجاز است. پس از تعیین حداکثر نیروی چرخشی مجاز، حداکثر نفوذ ابزار برشی با استفاده از رابطه RFI قابل محاسبه است (رابطه (۷)). برای انجام چنین تحلیلی، می‌توان با استفاده از رابطه RFI، p_{max-r} (حداکثر نفوذ به دلیل محدودیت نیروی چرخشی) را به دست آورد (روابط (۱۰) تا (۱۲)).

$$LS = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot D \cdot RPM \quad (۱۰)$$

$$RFI = F_r / p \quad (۱۱)$$

$$p_{max-r} = 91 F_{r-max} / (UCS^{0.3187} D^{1.063} RPM^{1.063} (\frac{S}{76.2})^{1.158}) \quad (۱۲)$$

نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی ابزار برشی بر روی یک نمودار با نفوذ ابزار برشی (p) به عنوان محور X و نیروی عمودی ابزار برشی (F_n) به عنوان محور Y ساخته می‌شود (شکل ۶). در این نمودار، مرز فوقانی با یک خط افقی که برابر با حداکثر ظرفیت باربری ابزار برشی است (به عنوان مثال ۲۲۰ کیلو نیوتن برای یک دیسک برشی ۱۷ اینچ) ترسیم می‌شود. مرز سمت

مقدار سرعت چرخش (RPM) است. این امر به این دلیل است که در مقادیر بالاتر RPM، طول حرکت ابزار برشی افزایش می‌یابد که این خود می‌تواند منجر به کاهش عمر ابزار برشی شود. کاهش عمر ابزار برشی منجر به افزایش تأخیرات مورد نیاز برای تعویض آنها می‌شود که در نهایت باعث کاهش نرخ پیشروی که یکی از مهم‌ترین پارامترهای عملکرد TBM است، می‌شود.

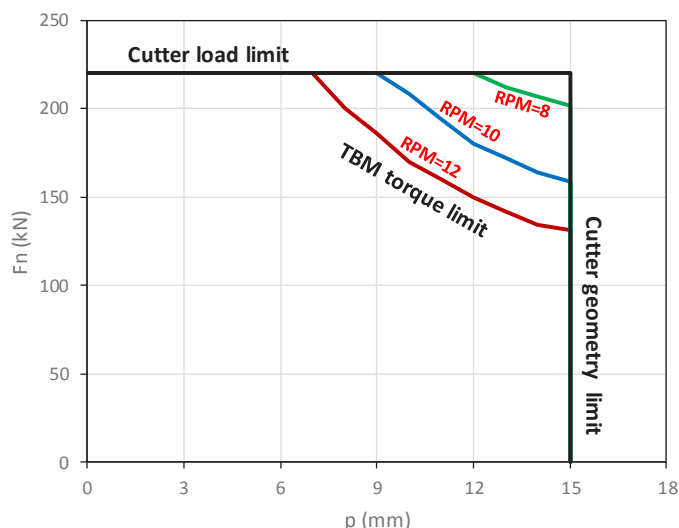
در بخش‌های بعدی، مراحل اساسی بهینه‌سازی عملکرد TBM بر پایه استفاده از روابط جدید NFI و RFI ارائه می‌شود. برای تشریح این مراحل از داده‌های واقعی قطعات ۳ و ۴ پروژه تونل انتقال آب قمرود استفاده شده است. این قسمت از تونل قمرود طولی برابر با ۱۸ کیلومتر دارد که با یک ماشین TBM سپر تلسکوپ‌ی با قطر ۵/۴ متر حفاری شده است. عمده طول این قسمت از تونل در واحدهای دگرگون یافته دوره ژوراسیک (شامل ماسه سنگ‌های ریزدانه کوارتزار با درجه دگرگونی اندک، شیل و اسلیت‌های متورق، شیست‌های گرافیتی، شیست‌های کوارتز و میکادار و رگه‌های کوارتزی) قرار گرفته است. یک قسمت کمتر از ۲ کیلومتر مسیر تونل نیز در واحدهای آهکی و دولومیتی متورق و نیمه متورق دوره کرتاسه قرار دارد. به لحاظ طبقه‌بندی امتیاز توده سنگ (RMR)، عمده توده سنگ‌های مسیر تونل در طبقات ضعیف تا متوسط قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که داده‌های عملیاتی TBM برای این تونل به صورت متوسط روزانه برای ۱۳۰ روز در دسترس بود که برای تحلیل‌های مقایسه‌ای مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۱- ایجاد رابطه بین نیروی ابزار برشی، نفوذ، گشتاور و RPM

این رابطه به ما این امکان را می‌دهد تا نفوذ محاسبه شده را در برابر محدودیت‌های عملیاتی ابزار برشی مورد بررسی قرار دهیم. این محدودیت‌ها شامل موارد زیر است:

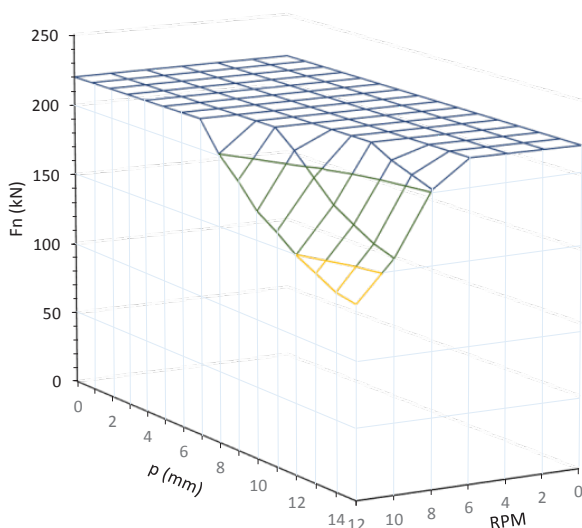
- حداکثر ظرفیت باربری ابزار برشی،
- حداکثر ظرفیت نیروی چرخشی ابزار برشی (که وابسته به حداکثر گشتاور کله حفار است)،

- حداکثر نفوذ ابزار برشی به دلیل محدودیت‌های هندسی آن (شکل خاص جانب‌های تیغه ابزار برشی، امکان حداکثر نفوذ معینی را می‌دهد، به گونه‌ای که در بیش از این مقدار نفوذ، بین سطح سنگ و اطراف حلقه ابزار برشی تماس ایجاد می‌شود که این خود مانع نفوذ بیشتر می‌شود). به منظور ایجاد یک رابطه بین نیروی ابزار برشی، نفوذ، گشتاور و RPM



شکل ۶. رابطه بین نیروی عمودی، نفوذ، گشتاور و RPM

Fig. 6. Relationship among normal force, penetration, torque, and RPM

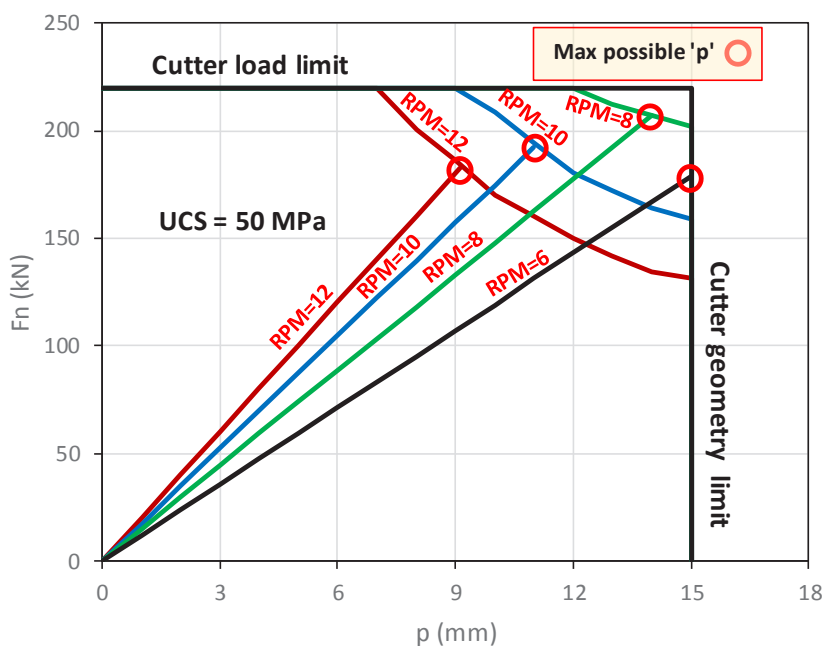


شکل ۷. نمودار اندرکنش سه بعدی نفوذ-نیروی عمودی و سرعت چرخش کله حفار

Fig. 7. 3D interaction diagram of cutter force-penetration

محاسبه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، میزان توسعه و موقعیت مرز گوشه سمت راست، به مقدار RPM مورد استفاده بستگی دارد. با افزایش RPM، گستره این مرز بیشتر می‌شود. شکل ۷، نمودار اندرکنش سه بعدی نفوذ، نیروی عمودی، و RPM کله حفار را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مقادیر پایین تر RPM، اثر حداکثر نیروی چرخشی مجاز به عنوان یک عامل محدود کننده در نمودار

راست با یک خط عمودی که از حداکثر نفوذ مجاز ابزار برشی (به عنوان مثال ۱۵ میلی‌متر برای دیسک‌های برشی ۱۷ اینچ با توجه به Turtcher و همکاران [۴۶]) عبور می‌کند، ترسیم می‌شود. برای ترسیم مرز گوشه سمت راست، دو مرحله در نظر گرفته می‌شود. در مرحله اول، با استفاده از رابطه (۱۲) و با استفاده از مقدار F_{r-max} و مقادیر مختلف RPM، محاسبه p_{max-r} می‌شود. در مرحله دوم با استفاده از مقدار p_{max-r} و رابطه (۵)، مقدار F_n



شکل ۸. فرآیند دستیابی به حداکثر نفوذ عملیاتی ابزار برشی

Fig. 8. Process of obtaining maximum possible cutter penetration

اندرکنش حذف می‌شود.

$$NFI = F_n / p \quad (13)$$

$$F_n = 0.164 \cdot p \cdot UCS^{0.5464} D^{0.75} RPM^{0.75} \times$$

$$\left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.379} \left(\frac{T}{19}\right)^{1.039} \left(\frac{d}{432}\right)^{1.3} \quad (14)$$

۴-۲- ترسیم خطوط نیروی عمودی عملیاتی

پس از ساخت نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی، خطوط نیروی عمودی عملیاتی همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است به نمودار اندرکنش اضافه می‌شود. برای ترسیم چنین خطوطی، لازم است رابطه NFI (رابطه ۵) به رابطه نیروی عمودی تبدیل شود (روابط ۱۳) و (۱۴). همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، با استفاده از رابطه (۱۴) و با توجه به مقاومت فشاری تک محوری سنگ و مقادیر RPM، می‌توان خطوط نیروی عمودی عملیاتی را ترسیم کرد. بر اساس محل تقاطع این خطوط و مرزهای نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی که قبلاً توضیح داده شد، حداکثر نفوذ عملیاتی ابزار برشی را می‌توان تعیین کرد. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه، تمامی پارامترهای طراحی دیسک‌های برشی ثابت هستند، بر اساس رابطه (۱۴) در مقادیر ثابت برای RPM، UCS و D، مقدار نیروی عمودی به صورت خطی با افزایش میزان نفوذ دیسک برشی، افزایش می‌یابد.

۴-۳- بررسی محدودیت ظرفیت سیستم انتقال مواد حفاری شده

در بعضی از موارد استفاده از TBM‌های سنگ‌های سخت، ظرفیت سیستم انتقال مواد حفاری شده دارای محدودیت است که می‌تواند منجر به کاهش نرخ نفوذ و نرخ پیشروی TBM شود. به عنوان مثال در مورد سپرهای دوغابی که در سنگ سخت مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای انتقال سنگ حفاری شده از طریق لوله‌های انتقال مصالح، می‌بایست ابعاد آن با استفاده از یک سنگ شکن کاهش یابد. ظرفیت محدود این سنگ شکن (به عنوان مثال $45 \text{ m}^3/\text{hr}$ که معادل ۳ متر پیشروی تونل در یک ساعت برای

جدول ۵. محاسبه نرخ پیشروی عادی و اصلاح شده برای مقادیر مختلف RPM

Table 5. Calculation results of ARm in various RPM values

p (mm)	RPM	UCS (Mpa)	D (m)	S (mm)	T (mm)	d (mm)	Fn kN	Fr kN	PR (m/hr)	IL m	AR (m/day)	ARm (m/day)
15	1	250	4.5	72	15	432	112	4	0.9	106	10.5	7.0
15	2	250	4.5	72	15	432	189	9	1.8	106	16.5	9.3
12.9	3	250	4.5	72	15	432	220	12	2.3	91	18.9	9.3
10.4	4	250	4.5	72	15	432	220	13	2.5	74	19.6	8.4
8.8	5	250	4.5	72	15	432	220	14	3	62	20.1	7.7
7.7	6	250	4.5	72	15	432	221	15	3	54	20.6	7.1
6.8	7	250	4.5	72	15	432	219	16	3	48	20.9	6.6
6.2	8	250	4.5	72	15	432	221	17	3	44	21.3	6.2
5.5	9	250	4.5	72	15	432	214	17	3	39	21.2	5.7
5	10	250	4.5	72	15	432	211	17	3	35	21.3	5.3
4.5	11	250	4.5	72	15	432	204	17	3	32	21.2	4.9
4.1	12	250	4.5	72	15	432	198	17	3	29	21.2	4.6

جدول ۴. پارامترهای ورودی برای استفاده از روابط (۱۵) تا (۱۹) برای یک تونل با قطر ۴/۵ متر

Table 4. Basic information of a hard rock slurry TBM tunneling

T _{sb} (hr/day)	t _s (hr)	L _s (m)	T _s (hr/m)
16	0.5	1.2	0.42

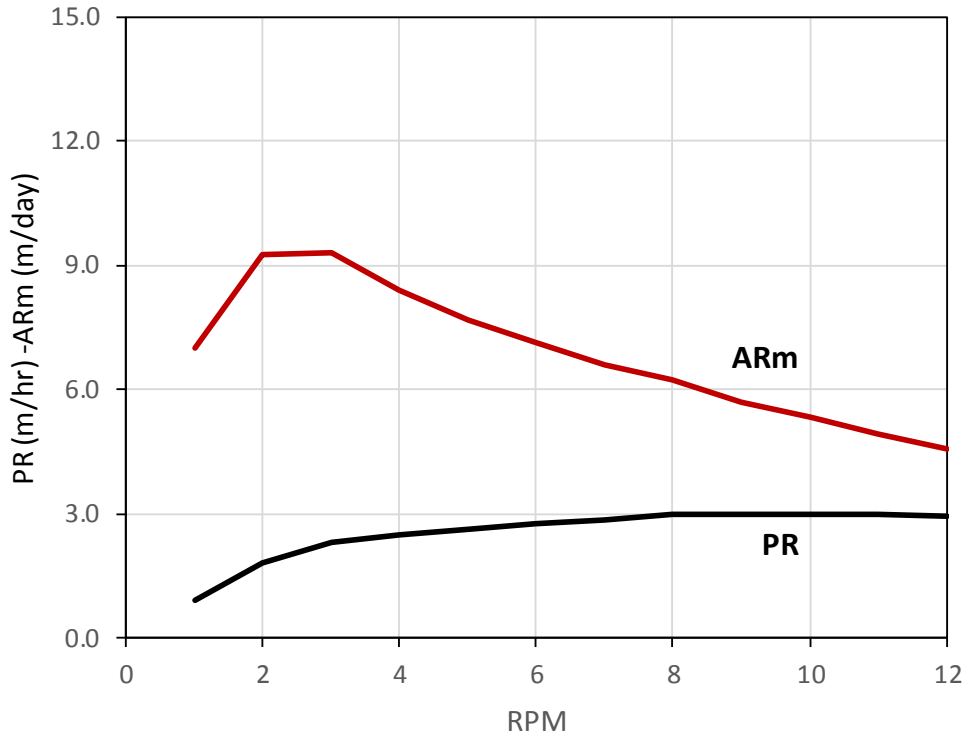
سپرهای دوغابی از اهمیت زیادی برخوردار است. با توجه به اینکه، در اجرای تونل انتقال آب قمرود از سپر دوغابی استفاده نشده است، برای این قسمت از اطلاعات مربوط به یک تونل زیردریایی در کره جنوبی استفاده شده است. در این مثال، TBM در یک محدوده سنگی بسیار سخت از نوع گرانودیوریت با مقاومت تک محوری ۲۵۰ مگاپاسکال عملیات حفاری را انجام داده است. به منظور انتقال مواد خرد شده از طریق سیستم لوله‌های دوغابی، یک سنگ‌شکن در سیستم پشتیبان TBM با حداکثر ظرفیت خردایش ۴۸ متر مکعب در ساعت که معادل حداکثر نرخ نفوذ ۳ متر بر ساعت است، نصب شده است. با فرض نیاز ۵ روز در هر توقف (توقف به منظور تعویض ابزار برشی سایش یافته در شرایط هوای فشرده)، میزان نرخ پیشروی عادی بین دو موقعیت مداخله متوالی را می‌توان با استفاده از روابط (۱۵) تا (۱۹) اصلاح کرد تا اثر زمان توقف را نیز در پارامترهای عملکرد TBM در نظر گرفت.

$$AR = T_{sb} / (T_s + T_b) \quad (15)$$

$$T_s = t_s / L_s \quad (16)$$

$$T_b = 1 / PR \quad (17)$$

یک TBM با قطر ۵/۴ متر است) می‌تواند بر پارامترهای عملکرد TBM (نرخ نفوذ و نرخ پیشروی) تأثیر بگذارد. به منظور به حداکثر رساندن سرعت پیشروی TBM، معمولاً بهتر است پارامتر نفوذ ابزار برشی بیشینه و پارامتر RPM کمینه شود. این امر به این دلیل است که در حفاری با RPM بیشتر، تعداد توقف TBM برای تعویض ابزار برشی سایش یافته، افزایش می‌یابد. برای محاسبه طول فاصله بین دو توقف متوالی TBM می‌توان از روابط پیشنهادی فرخ و کیم (۲۰۱۸) [۴۷] استفاده کرد. جداول ۳ و ۴ و شکل ۹، نمونه‌ای از تجزیه و تحلیل اثر RPM بر میزان نرخ پیشروی کلی سپر دوغابی تحت فشار با قطر ۵/۴ متر را نشان می‌دهد. البته لازم به ذکر است که بررسی محدودیت ظرفیت سیستم انتقال مواد حفاری شده عمدتاً برای



شکل ۹. فرآیند بهینه‌سازی نرخ نفوذ و نرخ پیشروی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف RPM

Fig. 9. Optimization process for RPM and advance rate

و نصب حلقه سگمندی، ۱۶ ساعت فرض شده است. با فرض ۳۰ دقیقه برای نصب یک حلقه سگمندی، می‌توان نرخ پیشروی عادی را با داشتن مقادیر مختلف RPM (از حداقل مقدار آن (به عنوان مثال ۱) تا حداکثر مقدار آن (به عنوان مثال ۱۲)) محاسبه کرد. در جدول ۵، حداکثر نفوذ ابزار برشی بر اساس چهار محدودیت حداکثر ظرفیت باربری ابزار برشی (به عنوان مثال $F_n = 220 \text{ kN}$)، حداکثر نیروی چرخشی مجاز، حداکثر نفوذ ابزار برشی (به عنوان مثال $p = 15 \text{ mm}$)، و حداکثر حد مجاز نرخ نفوذ (به عنوان مثال ۳ متر در ساعت) تعیین شده است. پس از محاسبه p ، می‌توان PR ، AR و AR_m را از روابط (۱۵) تا (۱۹) محاسبه کرد.

شکل ۹، تغییرات PR و AR_m را در مقابل مقادیر مختلف RPM نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در یک محدوده معینی از PR و RPM (به عنوان مثال RPM بین ۲ تا ۳ و PR بین $1/8 \text{ m/hr}$ تا $3/2$)، AR_m بیشینه می‌شود.

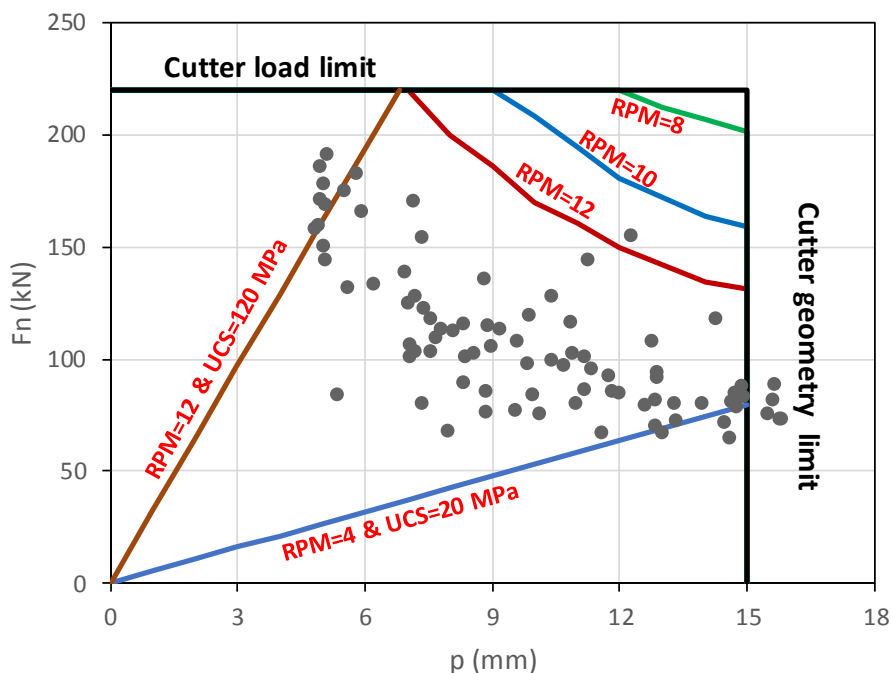
به طور خلاصه، روش ارائه شده می‌تواند به مهندسان صنعت تونل‌سازی کمک کند تا در حین کار با TBM‌های سنگ‌های سخت (حتی در شرایط حفاری در حالت سینه کار تحت فشار)، مقادیر نفوذ، سرعت پیشروی، و

$$PR = \frac{60}{1000} \cdot p \cdot RPM \quad (18)$$

$$AR_m = IL / \left(\frac{IL}{AR} + t_{in} \right) \quad (19)$$

در این روابط، AR نرخ پیشروی عادی (بدون در نظر گرفتن زمان مداخله)، T_{sb} زمان لازم برای حفاری و نصب حلقه پوشش بر حسب hr ، T_s زمان واحد برای نصب حلقه پوشش سگمندی بر حسب hr/m ، t_s زمان نصب یک حلقه بر حسب hr ، L_s طول یک حلقه سگمندی بر حسب m ، T_b زمان واحد برای حفاری بر حسب hr/m ، PR نرخ نفوذ بر حسب m/hr ، p میزان نفوذ ابزار برشی بر حسب mm ، RPM سرعت چرخش کله حفار در هر دقیقه، AR_m نرخ پیشروی اصلاح شده با در نظر گرفتن زمان توقف در هنگام مداخله، IL فاصله بین دو مداخله متوالی بر حسب m ، و t_{in} زمان توقف در هر مداخله بر حسب روز است.

در مثال جدول ۴، برای محاسبه AR ، زمان تولید در روز برای حفاری



شکل ۱۰. مقایسه بین محدوده مجاز عملیاتی و محدوده واقعی عملیاتی TBM برای یک ماشین سبر تلسکوپی با قطر ۴/۵ متر در سنگ‌های دگرگونی

Fig. 10. Examples of comparison between the TBM operational limits and the actual achieved performance for a 4.5 m diameter TBM

$$M = 0.275 \cdot N_{tbm} \cdot D \cdot F_r \quad (22)$$

$$P = M \cdot \text{RPM} / 9.55 \quad (23)$$

در این روابط، F_r نیروی چرخشی بر حسب kN ، M گشتاور کله حفار TBM بر حسب kNm ، N_{tbm} تعداد ابزار برشی، D قطر TBM بر حسب m ، و P توان کله حفار بر حسب kW است.

در شکل ۱۰، نمونه‌ای از مقایسه بین محدوده مجاز عملیاتی و محدوده واقعی عملیاتی TBM برای پروژه تونل انتقال آب قمرود نشان داده شده است. این تونل دارای قطر ۵/۴ متر است و در سنگ‌های دگرگون شده نرم با مقاومت فشاری تک محوری ۲۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال حفاری شده است. محدوده مقادیر واقعی RPM در این پروژه بین ۴ تا ۱۲ دور در دقیقه بوده است. با ترسیم داده‌های واقعی نفوذ در مقابل نیروی عمودی ابزار برشی بر روی نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی می‌توان مشاهده که اکثر نقاط به حداکثر مقادیر مجاز خود نرسیده‌اند. از این رو یک محدوده نسبتاً کم برای بهبود نفوذ ابزار برشی در زمان اجرای تونل وجود داشته است.

RPM بهینه را تعیین کنند. نکته اصلی در چنین بهینه‌سازی، به دست آوردن حداکثر سرعت پیشروی TBM با کمترین توقف ممکن برای تعویض ابزار برشی است. هنگامی که مقدار نفوذ تعریف می‌شود، نیروی ابزار برشی اعمال شده و نیروی چرخشی با استفاده از روابط (۲۰) و (۲۱) محاسبه می‌شود. سپس توان و گشتاور کله حفار TBM را نیز می‌توان با استفاده از روابط (۲۲) و (۲۳) محاسبه کرد.

$$F_r = 0.011 \cdot p \cdot \text{UCS}^{0.3187} D^{1.063} \text{RPM}^{1.063} \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.158} \quad (20)$$

$$F_n = 0.164 \cdot p \cdot \text{UCS}^{0.5464} D^{0.75} \text{RPM}^{0.75} \times \left(\frac{S}{76.2}\right)^{1.379} \left(\frac{T}{19}\right)^{1.039} \left(\frac{d}{432}\right)^{1.3} \quad (21)$$

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به تجزیه و تحلیل اطلاعات عملکرد ابزار برشی با استفاده از یک بانک اطلاعاتی جمع‌آوری شده از اطلاعات مختلف تعداد زیادی از پروژه‌های مختلف از سراسر جهان پرداخته شده است. هدف از این تحلیل‌ها، بهینه‌سازی طراحی و عملکرد TBM با به حداکثر رساندن نفوذ ابزار برشی و سرعت پیشروی است. در این راستا، دو رابطه جدید برای ارزیابی شاخص نیروی عمودی (NFI) و شاخص نیروی چرخشی (RFI) با استفاده از اطلاعات هندسه برش و هندسه ابزار برشی (یعنی نفوذ ابزار برشی، فاصله‌داری ابزار برشی، قطر ابزار برشی، عرض لبه، و غیره) و مقاومت فشاری تک محوری سنگ توسعه داده شده است. یکی از مهم‌ترین نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل‌های انجام شده برای NFI و RFI این است که هر دوی این پارامترها با سرعت خطی ابزار برشی رابطه مستقیم دارند، به گونه‌ای که با افزایش سرعت خطی ابزار برشی، NFI و RFI افزایش می‌یابند. این امر بیشتر به این دلیل است که در سرعت‌های بالاتر، ضربات اعمال شده به ابزار برشی دارای انرژی دینامیکی بیشتری است که این خود منجر به سطح بالاتری از نیروهای عمودی و چرخشی می‌شود. بر اساس روابط تجربی به دست آمده برای NFI و RFI، روشی برای بهینه‌سازی عملکرد TBM به منظور دستیابی به حداکثر نفوذ TBM و حداکثر سرعت پیشروی TBM با توجه به تأثیر RPM و حدود عملیاتی برای ظرفیت نیروی ابزار برشی، محدودیت نیروی چرخشی، و محدودیت‌های هندسی ابزار برشی ارائه شده است.

در این راستا نمودار اندرکنش نفوذ-نیروی عمودی ابزار برشی بر روی یک نمودار با نفوذ ابزار برشی (p) به عنوان محور X و نیروی عمودی ابزار برشی (Fn) به عنوان محور Y ارائه شده است. بر این اساس مشاهده می‌شود که مرز گوشه سمت راست این نمودار به مقدار RPM مورد استفاده در TBM وابسته است و با افزایش RPM، گستره این مرز بیشتر می‌شود. در ادامه برای بهینه‌سازی نرخ پیشروی TBM با توجه به توقف‌ها و تأخیرات مورد نیاز برای تعویض ابزار برشی، روشی برای بهینه‌سازی نرخ پیشروی ارائه شده است. در این روش مینا، به حداکثر رساندن عمر ابزار برشی با توجه به سرعت چرخش کله حفار و مقدار نفوذ ابزار برشی است. از نتایج مهم بکارگیری این روش، تعریف مقادیر بهینه RPM، نفوذ، و طول فاصله بین دو توقف متوالی TBM، به منظور به حداکثر رساندن سرعت پیشروی TBM و به حداقل رساندن توقف‌ها و تأخیرات است. در این راستا روابط لازم برای محاسبه نرخ پیشروی اصلاح شده (با در نظر گرفتن تأخیرات

توقفات TBM برای تعویض ابزار برشی) و نرخ پیشروی عادی ارائه شده و با استفاده از اطلاعات یک پروژه تونلی، توضیح داده شده است. در مجموع، براساس مطالعه گسترده داده‌های میدانی تعداد قابل توجهی از پروژه‌های تونلی دنیا و روابط توسعه یافته برای NFI و RFI، این مقاله یک راهنمایی را برای مهندسان صنعت تونل برای به حداکثر رساندن عملکرد TBM با توجه به تأثیرات RPM و محدودیت‌های عملیاتی ارائه کرده است که می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] Abu Bakar, M.Z., 2012. "Saturation effects on mechanical excavatability of sandstone under selected rock cutting tools". Ph.D. Thesis, Missouri University of Science and Technology, USA, p. 245.
- [2] Cho, J.W., Jeon, S., Jeong H.Y., Chang, S.H., 2013. "Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear-cutting-machine testing and photogrammetric measurement". Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 35, pp. 37-54.
- [3] Choi, SW., Chang, SH., Park, YT., Lee, GP., Bae, GJ., 2014. "Comparative analysis of cutter acting forces and axial stresses of single and double disc cutters by linear cutting tests". J. Korean Tunn. Undergr. Space Assoc., 16(2), pp. 181-191.
- [4] Eskikaya, S., Bilgin, N., Balci, C., Tuncdemir, H. 2005. "From research to practice: Development of Rapid Excavation Technologies, Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future". Erdem & Solak (Eds.), Taylor & Francis Group, London, pp. 435-441.
- [5] Gertsch, R., Gertsch L., Rostami, J., 2007. "Disc cutting tests in Colorado Red Granite: Implications for TBM performance prediction". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 44 (2), pp. 238-246.
- [6] Lislrud, A., 1997. Principles of Mechanical Excavation. Tamrock Corp, POSIVA 97-12.
- [7] Ma, HS., Gong, QM., Wang, J., Yin, LJ., Zhao, XB.,

- Dubrovnik, Croatia.
- [18] Qi, G., Zhengying, W., Hao, M., 2016. "An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 52, pp. 182-191.
- [19] Choi, SO., Lee, SJ., 2015. "Numerical study to estimate the cutting power on a disc cutter in jointed rock mass". *KSCE J. Civil Eng.*, 1-12.
- [20] Gong, QM., Jiao, YY., Zhao, J., 2006a. "Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 21(1), pp. 46-55.
- [21] Gong, QM., Zhao, J., Hefny AM., 2006b. "Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutting space optimization". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 21(3-4).
- [22] Innaurato, N., Oggeri, C., Oreste, PP., Vinai, R., 2007. "Experimental and numerical studies on rock breaking with TBM tools under high stress confinement. *Rock Mech. Rock Eng.*, 40(5), pp. 429-451.
- [23] Labra, C., Rojek, J., Oñate, E., 2016. "Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter". *Rock Mech. Rock Eng.*, 50(3), pp. 621-638.
- [24] Liu, HY., Kou, SQ., Lindqvist, P., Tang, CA., 2002. "Numerical simulation of the rock fragmentation process induced by indenters". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 39, pp. 491-505.
- [25] Ma, HS., Yin, LJ., Ji, HG., 2011. "Numerical study of the effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutters". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 48(6), pp. 1021-1033.
- [26] Abu, Bakar, MZ., Gertsch, L., Rostami, J., 2014. "Evaluation of fragments from disc cutting of dry and saturated sandstone". *Rock Mech. Rock Eng.*, 47(5), pp. 1891-1903.
- [27] Balci, C., 2009. "Correlation of rock cutting tests with field performance of a TBM in a highly fractured rock formation: a case study in Kozyatagi-Kadikoy metro tunnel, Turkey". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 24(4), 2016a. "Study on the influence of confining stress on TBM performance in granite rock by linear cutting test". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 57, pp. 145-150.
- [8] Ma, HS., Gong, QM., Wang, J., Zhao, XB., Yin, LJ., Miao, CT., He, GW., 2016b. "Linear cutting tests on effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutter". *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 35(2), pp. 346-355.
- [9] Ozdemir, L., Miller, R., Wang, F.D., 1978. "Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design". NSF APR73-07776-A03. Colorado School of Mines. Golden, Colorado, USA.
- [10] Rostami, J., 1993. "Design optimization, performance prediction and economic analysis of tunnel boring machine for the construction of the proposed Yucca Mountain nuclear waste repository". Ms. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- [11] Rostami, J., 1997. "Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure". Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, p. 249.
- [12] Rostami, J., 2008. "Hard Rock TBM cutterhead modeling for design and performance". *Geomechanics and Tunneling*, 1 (1), pp. 18-28.
- [13] Roxborough, FF., Phillips, HR., 1975. "Rock excavation by disc cutter". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 12(12), pp. 361-366.
- [14] Sanio, H.P., 1985. "Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 22 (3), pp. 152-163.
- [15] Snowdon, RA., Ryley, MD., Temporal, J., 1982. "A study of disc cutting in selected British rocks". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 19 (3), pp. 107-121.
- [16] Tuncdemir, H., Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., 2008. "Control of rock cutting efficiency by muck size". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 45 (2), pp. 278-288.
- [17] Farrokh, E., Kim, D.Y., Kyung, S.B., 2015. "Rotary Cutting Test for Hard Rock TBM Performance Evaluation". World tunneling conference 2016,

- “Prediction of specific cutting energy in natural stone cutting processes using the neurofuzzy methodology”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 67, pp. 127–135.
- [37] Bilgin, N., Demircin, M.A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., Akcin, N., 2006. “Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 43, pp. 139–156.
- [38] Cardu, M., Iabichino, G., Oreste, P., Rispoli, A., 2017. “Experimental and analytical studies of the parameters influencing the action of TBM disc tools in tunnelling”. *Acta Geotech.*, Vol. 12(2), pp. 293–304.
- [39] Gong, Q.M., Du, X.L., Li, Z., Wang, Q.X., 2016. “Development of a mechanical rock breakage experimental platform”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Vol. 57, pp. 129–136.
- [40] Labra, C., Rojek, J., Oñate, E., 2016. “Discrete/finite element modelling of rock cutting with a TBM disc cutter”. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 50(3), pp. 621–638.
- [41] Xia, Y.M., Guo, B., Tan, Q., Zhang, X.H., Lan, H., Ji, Z.Y., 2018. “Comparison between experimental and semi-theoretical cutting forces of CCS disc cutters”. *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 51, pp. 1583–1597.
- [42] Rostami, J., 2013. “Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 57(1), pp. 172–186.
- [43] Farrokh, Ebrahim; Rostami, Jamal; Laughton, Chris. 2012. “Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs”. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology*, vol. 30, pp. 110-123.
- [44] Farrokh, E., 2014. “Disc cutting tests with a rotary cutting machine in a Korean granite, Technical forum”. *Hyundai engineering and construction*, Seoul.
- [45] Jakobsen, P.D., 2014. “Estimation of soft ground tool life in TBM tunnelling”. PhD Dissertation, NTNU University, Norway.
- pp. 423–435.
- [28] Cho, JW., Jeon, S., Yu, SH., Chang, SH., 2010. “Optimum spacing of TBM disc cutters: a numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 25(3), pp. 230–244.
- [29] Pan, YC., Liu, QS., Liu, JP., Huang, X., Liu, Q., Peng, XX., 2018a. “Comparison between experimental and semi-theoretical disc cutter cutting forces: Implications for frame stiffness of the linear cutting machine”. *Arab J. Geosci.*
- [30] Pan, YC., Liu, QS., Liu, JP., Liu, Q., Kong, XX., 2018b. “Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting efficiency by TBM disc cutter”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 80, pp. 197–210.
- [31] Pan, YC., Liu, QS., Peng, XX., Liu, Q., Liu, JP., Huang, X., Cui, X., Cai, T., 2019. “Fullscale linear cutting tests to propose some empirical formulas for tbm disc cutter performance prediction”. *Rock Mech. Rock Eng.*
- [32] Thyagarajan, MV., 2018. “The comparison of cutting forces on disc cutters in constant vs variable penetration modes”. MS thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
- [33] Tumac, D., Balci, C., 2015. “Investigations into the cutting characteristics of CCS type disc cutters and the comparison between experimental, theoretical and empirical force estimations”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 45, pp. 84–98.
- [34] Geng, Q., Wei, Z.Y., Meng, H., 2016. “An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM)”. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, Vol. 52, pp. 182–191.
- [35] Dogruoz, C., Rostami, J., Keles, S., 2018. “Study of correlation between specific energy of cutting and physical properties of rock and prediction of excavation rate for lignite mines in Çayırhan area”. *Geol. Environ.*, Vol. 77, pp. 533–539.
- [36] Yurdakul, M., Gopalakrishnan, K., Akdas, H., 2014.

TBM cutter wear and cutterhead intervention interval length evaluation". *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 81, pp. 336-357.

[46] Turtcher, M., Spiegl, M., Purner, M., 2013. "SIM TUNNEL PRO 2.0 user manual. Version: STP 2.0_2013_08_15".

[47] Farrokh, E., Kim, DY., 2018. "A discussion on hard rock

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Farrokh, Optimization of TBM Performance using Force-Penetration Interaction Diagram for Hard Rock, Amirkabir J. Civil Eng., 53(11) (2022) 4951-4968.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18675.6919

