



بررسی تأثیر برهم‌کنش ماشین TBM و زمین بر روی تغییرات نیروی پیشران و نرخ نفوذ ماشین-مطالعه‌ی موردی: تونل انتقال آب کرج-تهران (قطعه‌ی ۲)

محسن غلامی، رسول اجل لوئیان

دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۴ مهرماه ۱۳۹۶
بازنگری: ۲۹ آذرماه ۱۳۹۶
پذیرش: ۳۰ دی ماه ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۳ بهمن ماه ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)
شاخص سایش سرشار (CAI)
دستگاه حفاری مکانیزه (TBM)
نیروی پیشران
نرخ نفوذ

چکیده: در حفاری تونل به روش مکانیزه و با دستگاه TBM پارامترهایی از قبیل نیروی پیشران و نرخ نفوذ نقش اساسی را ایفا می‌کنند که امکان ثبت آنها وجود داشته و با مقادیر محاسبه شده توسط مدل‌های مختلف نیز قابل مقایسه هستند. پروژه‌ی تونل انتقال آب کرج-تهران در راستای تأمین آب شرب شهر تهران حفاری شده و اجرای آن با یک دستگاه TBM از نوع سنگ سخت در دو قطعه به اتمام رسیده‌است. با بررسی سینه‌ی کار در مقاطعی از تونل قطعه‌ی دوم از پروژه، مشخصات زمین‌شناسی و شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) در هر مقطع ثبت گردید و سپس پارامترهایی مانند مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (UCS) و نیز شاخص سایش سرشار (CAI) از نمونه سنگ‌های برداشتی اندازه‌گیری شد. با کمک این داده‌ها و مدل‌های رایج و کاربردی، مقدار نیروی پیشران برای حفاری هر مقطع از تونل محاسبه گردید. از سوی دیگر همزمان با حفاری تونل، داده‌های ماشین TBM نیز به طور پیوسته ثبت شده‌اند که نیروی پیشران و نرخ نفوذ مورد نیاز در این پژوهش از آن جمله هستند. مقایسه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری و محاسبه شده برای نیروی پیشران در پروژه نشان می‌دهد که اختلاف بین این مقادیر به صورت منطقی قابل تحلیل و توجیه خواهد بود. برای تحقق این هدف عواملی از قبیل نحوه‌ی انتخاب داده‌های مناسب، نمونه برداری و کنترل سینه‌ی کار تونل تأثیر بسزایی در نتایج تحلیل دارند. در پایان این مقاله مدل CSM و نیز داده‌های به دست آمده از سینه‌کار تونل برای ارزیابی نیروی پیشران انتخاب شده‌اند که نتایج آن در توصیف هشت رده‌ی توده سنگ ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

آگاهی از مشخصات زمین‌شناسی مهندسی سینه‌ی کار تونل در حفاری با ماشین تونل‌زنی مکانیزه (TBM) همواره یکی از دغدغه‌های اصلی نیروهای دست‌اندرکار در پروژه است تا بتوان به بررسی نحوه عملکرد ماشین در زمین‌های مختلف پرداخت. برای تونل‌زنی مکانیزه در سنگ، موقعیت و وسعت مناطق گسله و مرز لایه‌ها و در مورد تونل‌زنی در مناطق کارستی، موقعیت حفره‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از سوی دیگر در شرایط مختلط سینه‌ی کار تونل و تغییرات متوالی زمین در فواصل بسیار اندک، امکان بازرسی مداوم کله‌ی حفار^۲ بسیار دشوار و حتی در مواردی غیرممکن است. در برخی پروژه‌ها به دلیل در دسترس نبودن داده‌های حاصل از چالزنی پیشرو^۳ و یا روش‌های ژئوفیزیکی می‌توان با کمک داده‌های ماشین TBM از ارتباط بین پارامترهای حفاری و شرایط زمین بهره گرفت.

تحقیق‌های صورت گرفته برای اندازه‌گیری نیروی برش دیسک‌کاترها^۴ توسط انتاچر^۵ و همکاران نشان می‌دهد که حداکثر نیروها مضرری از نیروهای میانگین است و توزیع نیروهای اعمال شده بر سینه‌ی کار دارای بی‌نظمی بوده و خود بیانگرو وضعیت زمین‌شناسی از قبیل مناطق گسله و جهت‌گیری شیب‌توزینته خواهد بود [۱ و ۲].

آتس^۶ و همکاران با بررسی تعداد ۳۰ پروژه حفاری تونل با دستگاه TBM در کشور ترکیه سعی در تخمین گشتاور، نیروی پیشران و سایر پارامترهای طراحی و انتخاب ماشین TBM مناسب داشته‌اند و در نهایت با مقایسه مقادیر نیروی پیشران و گشتاور طراحی شده و واقعی به اهمیت مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل اشاره نموده‌اند که نتیجه‌ی آن ارائه‌ی مقادیری برای حد بالا و پایین پارامترهای حفاری بوده است [۳].

کی^۷ و همکاران (۲۰۱۶) با انجام پژوهش‌های تجربی بر روی فرایند

4 Disc Cutter

5 Entacher

6 Ugur Ates

7 Geng Qi

1 Tunneling Boring Machine(TBM)

2 Cutterhead

3 Probe Drilling

نویسنده عهده‌دار مکاتبات :: Ajalloeian@ui.ac.ir

TBM سنگ سخت طراحی و اجرا شده است. قطعه‌ی دوم این پروژه با توجه به وضعیت زمین‌شناسی متفاوت و غیریکنواخت‌تر نسبت به قطعه‌ی اول هدف این مطالعه قرار دارد. داده‌های بکار رفته شامل نتایج برداشت‌های زمین‌شناسی از سینه‌کار و ماشین TBM و سایر آزمون‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سنگ هستند که با کمک آنها مقادیر نیروی پیشران توسط مدل‌های CSM و رگسبرو-فیلیپس در مقاطع مشخصی از تونل محاسبه شده‌اند.

در این پژوهش مشخص شد که بر اساس پایداری رده‌های مختلف توده‌سنگ در مسیر تونل، اختلاف‌هایی بین نیروی پیشران اعمال شده و محاسبه شده وجود دارد و با ارائه‌ی تحلیل منطقی می‌توان این اختلاف‌ها را بررسی کرد. این متن بر آن است که قابلیت استفاده از سیستم‌های ثابت داده در ماشین‌های TBM و حضور یک متخصص و کارشناس را برای پروژه‌های مکانیزه و با ارائه‌ی یک مطالعه‌ی موردی، نشان داده و به عبارت دیگر نحوه‌ی برهم‌کنش واقعی ماشین TBM و زمین را توضیح دهد.

۲- معرفی پروژه و زمین‌شناسی مسیر تونل

قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه‌ی شماره ۶ تهران، بخشی از پروژه‌ای به طول حدود ۳۰ کیلومتر است که با هدف آبرسانی به غرب تهران حفاری شده است. دستگاه مورد استفاده برای حفاری تونل از ماشین‌های حفاری مکانیزه با سپر نگهدارنده دوگانه یا تلسکوپ‌ی^۱ با قطر حفاری ۴/۶۶۵ متر و با قابلیت همزمان حفاری و نصب پوشش نهایی تونل است. مسیر حفاری دارای چند قوس با شعاع‌های مختلف است که نیروهای پیشران برای پیشروی دستگاه TBM را تحت تأثیر خود قرار داده‌اند. شکل ۱ مشخصات هندسی مسیر تونل را در یک پروفیل نشان می‌دهد.

از دیدگاه زمین‌شناختی محدوده‌ی تونل در دامنه‌ی جنوبی البرز مرکزی قرار دارد که از نظر چینه‌شناسی دربرگیرنده‌ی مجموعه‌های رسوبی مختلفی از سازند کرج به سن ائوسن پسین تا میانی است. از نظر سنگ‌شناسی واحدهای سنگی مسیر تونل شامل تناوب‌هایی از توف، ماسه‌سنگ، سیلتستون، گدازه و آگلومرا است که در قالب طبقات رسوبی چین خورده دیده می‌شوند [۱۴]. معمولاً توده‌های نفوذی و دایک‌های آذرین از جنس دیوریت و گابرو در میان واحدهای رسوبی دیده می‌شوند (شکل ۲).

شکل ۲ مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل و ساختارهای زمین‌شناسی عمده‌ی آن را نشان می‌دهد. با نگاهی به این شکل می‌توان سنگ‌های مناطق مختلف مسیر تونل را به دو بخش توفی و آذرین نفوذی طبقه‌بندی کرد که با تأثیر از ساختارهای زمین‌شناسی، هریک به رده‌های مختلفی تقسیم می‌شوند.

خردایش سنگ در دیسک‌کاترهای پیرامونی یا گنج در کلیه حفار یک ماشین TBM به این نتیجه رسیدند که نیروهای عمودی برای خرد کردن سنگ در دیسک‌های گنج کوچک‌تر از دیسک‌های مرکزی است و این نیرو به طور تدریجی با افزایش زاویه تمایل دیسک‌ها کاهش می‌یابد [۴].

پیش از این محققین مختلف از قبیل گونگ^۱ و همکاران و بارتون^۲ و چیمما^۳ در خصوص نحوه‌ی تأثیر درزه‌ها و ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بر روی عملکرد ماشین TBM مطالعاتی را انجام داده‌اند. طبق نتایج به دست آمده از مطالعات این افراد، جهت‌گیری‌های نامساعد ساختارهای زمین‌شناسی و به ویژه ناپیوستگی‌ها باعث کاهش نرخ نفوذ ماشین TBM می‌شود که مقدار زاویه قرارگیری این ساختارها بسیار تعیین‌کننده است. [۵-۸].

استفاده از روش‌های نوین شبکه‌ی عصبی مصنوعی و منطق فازی نیز در تحلیل عملکرد ماشین‌های TBM جایگاه ویژه‌ای را در بین برخی محققین کسب کرده است که در این بین می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل پارامترهای نیروی پیشران^۴ و گشتاور با استفاده از شبکه‌ی عصبی و تأثیر آن بر نرخ نفوذ^۵ ماشین TBM در تونل بلند زاگرس توسط افتخاری و همکاران اشاره کرد. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نیروی محوری پیشران و گشتاور در یک محدوده‌ی بهینه، سبب افزایش نرخ نفوذ می‌شود و به منظور دستیابی به نرخ نفوذ حداکثر می‌توان از زوج نیروی محوری پیشران و گشتاور بهینه استفاده نمود [۹].

برای محاسبه‌ی نیروی برش دیسک‌کاترها مدل‌های مختلفی ارائه شده است که می‌توان مدل اصلاح شده‌ی CSM توسط رستمی [۱۰] یا مدل ارائه شده توسط رگسبرو و فیلیپس^۶ را نام برد که از مشخصات ژئومکانیکی سنگ و مشخصات ابزار برشی همراه با نتایج تست نفوذ، روابط معتبری را به دست آورده‌اند [۱۱]. مطالعه‌ی فستا^۷ و همکاران برای بررسی نیروهای مؤثر بر ماشین TBM با بکارگیری سیستم‌های ثابت داده در بیرون از تونل، اهمیت استفاده از این سیستم‌های کنترلی را نشان می‌دهد [۱۲].

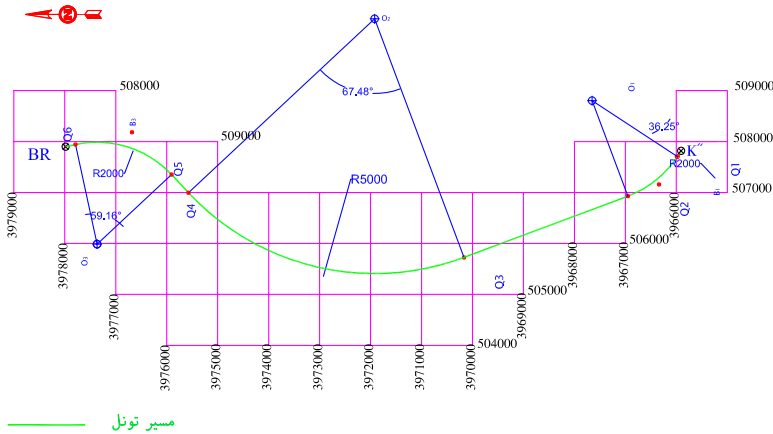
هدف از این متن ارائه‌ی هیچگونه مدل خاص برای پیش‌بینی عملکرد ماشین TBM نیست بلکه هدف اصلی از این نوشتار بررسی علت تغییر در پارامترهای حفاری و تحلیل سریع در حین فرایند تونل‌زنی است که در نهایت قدرت تصمیم‌گیری اپراتور ماشین TBM در سنگ سخت را افزایش خواهد داد. مبنای این مطالعه شرایط واقعی در حین حفاری و همچنین نحوه‌ی برهم‌کنش ماشین TBM و زمین است.

اجرای پروژه‌ی تونل انتقال آب کرج-تهران توسط یک دستگاه

- 1 Gong
- 2 Barton
- 3 Cheema
- 4 Thrust Force
- 5 Penetration Rate
- 6 Roxborough & Phillips
- 7 Festa

8 TBM Double Shield

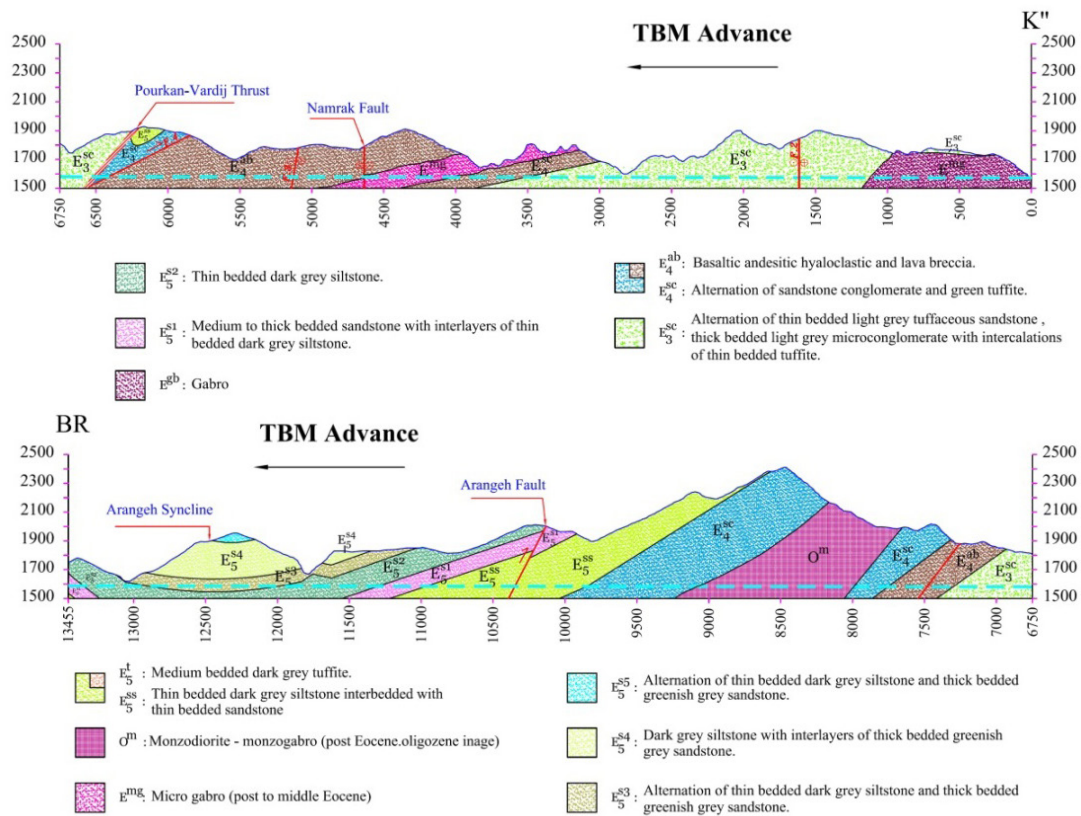
مشخصات هندسی مسیر تونلی قطعه دوم (K" - BR)



نقطه	تراز کف تونل (متر)	طول (متر)	توضیحات	شیب طولی
K"	۱۵۸۲/۰۸۶	۱۳۳/۸۳۶	خط مستقیم	۰/۰۰۱۷۷۸۱۷
Q1	۱۵۸۲/۳۲۳۹	۱۲۶۵/۲۲۸۸	قرس به شعاع ۲۰۰۰ متر	
Q2	۱۵۸۴/۵۷۳۷	۳۴۳۲/۱۰۵۹	خط مستقیم	
Q3	۱۵۹۰/۶۷۶۶	۵۸۸۸/۵۳۲۹	قرس به شعاع ۵۰۰۰ متر	
Q4	۱۶۰۱/۱۴۷۴	۴۸۶/۰۶۷۳	خط مستقیم	
Q5	۱۶۰۲/۰۱۱۷	۲۰۶۴/۹۱۷	قرس به شعاع ۲۰۰۰ متر	
Q6	۱۶۰۵/۶۸۳۵	۲۰۰	خط مستقیم	
BR	۱۶۰۶/۰۳۹۱	۱۳۴۷۰/۶۸۸	طول کل	

شکل ۱: پروفیل مسیر تونل قطعه دوم کرج-تهران [۱۳]

Fig1 - Geometry properties of Karaj - Tehran Lot2 tunnel path



شکل ۲: مقطع زمین شناسی مسیر تونل [۱۴]

Fig2 - Geological cross section for tunnel path

اولیه و ثبت برخی اندازه‌گیری‌ها در سینه‌کار و در آزمایشگاه (بر روی نمونه‌های سنگ برداشت شده از سینه‌کار) ضروری است. برای این منظور اقدام به ثبت تغییرات زمین شناسی و برداشت نمونه سنگ شد

۳- برداشت‌ها و داده‌های حاصل از عملکرد ماشین TBM

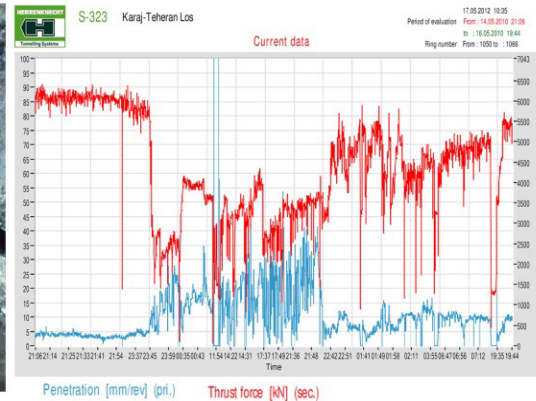
برای بررسی میزان انطباق بین پارامترهای اعمال شده بر ماشین حفاری و شرایط واقعی در سینه‌کار تونل، دسترسی به داده‌های خام

شکل ۳ تصویری از محدوده‌ی یک گسل در متر ۱۵۱۰ متر و پارامترهای حفاری ثبت شده در این منطقه را نشان می‌دهد.

چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود، همزمان با حفاری ماشین TBM، مقدار نیروی پیشران اعمالی (منحنی قرمز رنگ) و نرخ نفوذ (منحنی آبی رنگ) در هر زمان و مقطعی از تونل قابل برداشت است. کمیت این دو پارامتر بستگی به وضعیت توده‌سنگ دارد و با تغییر وضعیت توده‌سنگ در هر مقطع از تونل می‌توان نحوه‌ی برهم‌کنش ماشین TBM و توده‌سنگ را ارزیابی نمود.



(ب) فضای خالی در اطراف کله حفار و ریزش مصالح بر روی آن



(الف) تغییرات نیروی پیشران و نرخ نفوذ، ثبت شده توسط سیستم PDM

شکل ۳: نمونه‌ای از مناطق خردشده و گسله شناسایی شده در سینه‌ی کار تونل در متر ۱۵۱۰ متر
Fig3 - an example of recognized crush and fault zone in tunnel face at 1510m chainage

حاضر از نتایج آزمایش سایش سرشار بر روی نمونه‌های سنگ بهره گرفته می‌شود. با توجه به نمونه‌های سنگ و بررسی پارامترهای حفاری و نیز تعیین شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI^۲) و شاخص سایش سرشار (CAI^۳) می‌توان محدوده‌ی مورد مطالعه را طبق جدول ۱ به چند رده‌ی مختلف تقسیم کرد. لازم به توضیح است مقادیر ارائه شده در این جدول بیانگر میانگین داده‌ها بوده که تنها برای درک بهتر از شرایط توده‌سنگ ارائه شده‌اند ولی در محاسبات از مقادیر واقعی استفاده می‌شود.

برای تهیه‌ی داده‌ها، مشاهده‌ی سینه‌ی کار و ثبت اطلاعاتی از قبیل وضعیت کلی درزه‌ها (راستای تقریبی آنها، فاصله‌داری و پرتشدگی درزه‌ها، اثرات گسل و میزان اثر دیسک‌کاترها بر روی سینه‌ی کار) و تعیین جنس سنگ به طور منظم صورت گرفته‌است. در ادامه، آزمایش بارگذاری نقطه‌ای نیز بر روی نمونه‌ها انجام شده‌است. با توجه به اجرای این آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ابعاد نامنظم، برای کاهش خطا باید تعداد نمونه‌ها را تا حد امکان افزایش داد [۱۵]. برای تکمیل مطالعه‌ی

جدول ۱: داده‌های به دست آمده از توده‌سنگ مسیر تونل در حین حفاری

Table 1 - Obtained data from rock mass in boring time

متر ۱۵۱۰ سنگ شناسی	UCS (MPa)	شاخص سایش CAI	شاخص GSI	نیروی پیشران (kN)	نرخ نفوذ (mm/rev)
۱۱۰-۱۰۰	دیوریت-گابرو	۱۳۵-۱۲۵	۳/۳	۵۵-۶۰	۴۵۳۳
۲۰۰۰-۱۱۰۰	توف-آندزیت	۱۱۰-۱۰۰	۱/۵	۴۵-۴۰	۴۷۶۶
۳۴۰۰-۲۰۰۰	توف	۱۱۰-۱۰۰	۲/۵	۶۰-۵۰	۳۹۳۳
۶۰۵۰-۳۴۰۰	بازالت-توف	۱۰۰-۸۵	۲/۵	۵۰-۴۰	۴۱۰۰
۶۷۰۰-۶۰۵۰	توف	۷۵-۶۰	۱/۵	۳۵-۳۰	۳۷۵۰
۷۸۰۰-۶۷۰۰	توف-آندزیت و بازالت	۱۱۰-۹۵	۲/۵	۶۰-۵۰	۴۴۲۵
۹۲۰۰-۷۸۰۰	دیوریت-مونزودیوریت	۱۹۰-۱۶۰	۴	۸۰-۷۵	۶۵۰۰
۱۳۴۵۰-۹۲۰۰	توف	۹۵-۷۵	۱/۵	۶۰-۵۵	۵۵۵۰

2 Geological Strength Index

3 Cerchar Abrasiveness Index

1 Data Logger

F_۳: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر نیروی محرک ایجاد شده در اثر تغییر جهت در مسیرهای قوسی (در مسیر مستقیم این مقدار برابر صفر در نظر گرفته می شود)،

F_۴: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر نیروی اصطکاک بین سگمنت ها و بخش آب بند انتهایی،

F_۵: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر نیروی کشش بخش پشتیبان^۴ دستگاه (در صورتی که سیستم بک آپ خودکشش باشد این مقدار برابر صفر در نظر گرفته می شود)

F_۶: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر نیروی نفوذ ابزارهای برشی. با توجه به نوع ماشین حفار در این مطالعه که یک ماشین TBM دوسپره برای سنگ سخت است، بایستی برخی ملاحظه ها را در بکارگیری رابطه ۱ مدنظر قرار داد. در ادامه به روند محاسبه ی هر یک از نیروهای مورد نظر در رابطه ی ۱ پرداخته می شود.

در این مطالعه هر سه نیروی پیشران F_۲، F_۴ و F_۵ دارای مقدار صفر هستند. دلیل آن نیز به عدم وجود فشار نگهدارنده در سینه ی کار برای ماشین سنگ سخت و نیز عدم وجود بخش آب بند در سپر انتهایی ماشین TBM و نبود اصطکاک در آن بخش است. از سوی دیگر برای این مطالعه از داده های مربوط به حفاری در حالت سپر دوتایی بهره گرفته شد که در آن جابجایی و کشش سیستم پشتیبان دستگاه بعد از فرایند حفاری انجام می گیرد.

نکته ی قابل ذکر این است که محاسبه ی نیروی پیشران کل در دستگاه های تک سپره^۵ و دوسپره^۶ مشابه با ماشین های TBM در خاک بوده و تنها تفاوت آن عدم وجود نیروی F_۲ در این دستگاه ها برای سنگ سخت و حذف آن از رابطه ی مذکور است [۳].
نیروی پیشران مورد نیاز برای غلبه بر اصطکاک زمین و سپر (F_۱) به صورت زیر محاسبه می شود [۱۶]:

$$F_1 = \mu_1 \cdot (\pi \cdot D \cdot L_s \cdot P_m + W_e) \quad (2)$$

که در آن:

μ_1 : ضریب اصطکاک بین پوسته ی سپر و توده سنگ،

D: قطر پوسته ی سپر ماشین،

L_s: طول پوسته ی سپر درگیر در زمان پیشروی،

P_m: فشار میانگین مؤثر بر روی سپر ماشین از طرف زمین،

W_e: وزن سپر ماشین.

برای جمع آوری اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق توجه به برخی از نکات ضروری است که در صورت عدم رعایت هر یک از این موارد نتایج به دست آمده را می توان به طور کلی غیر قابل قبول تلقی کرد:

- با توجه به وضعیت توده سنگ، نمونه برداری در صورت امکان در شرایط یکسان حفاری انجام می شود.

- در نظر گرفتن سایر پارامترهای حفاری از قبیل مقادیر نرخ نفوذ برای هر نیروی پیشران ماشین TBM مهم است. نمونه هایی که دارای مقادیر نیروی پیشران مشابه ولی با پارامترهای حفاری متفاوتی هستند را باید تفکیک کرده و در تحلیل ها و با کمک برداشت های قبلی، دلایل تناقض به وجود آمده را به درستی توصیف کرد.

- دیسک کاترهایی که در قسمت گیج^۱ یا پیرامونی کله ی حفار قرار دارند نیروی برش محوری آن ها کمتر از دیسک کاترهای با وضعیت عادی و عمود بر سینه کار خواهد بود. این امر به دلیل سطح تماس کمتر نوک تیغه ی دیسک کاترهای پیرامونی نسبت به انواع مرکزی است [۴]. با توجه به تفاوت پروفیل تیغه های دیسک کاتر، در این مطالعه از دیسک کاترهایی با تیغه ی نوع CCS^۲ استفاده شده است که مقطع عرضی نوک تیغه به جای حالت V شکل، ثابت است. بر این اساس و به منظور محاسبه ی نیروی برش محوری دیسک کاترهای نیاز به تعیین زاویه قرارگیری دیسک کاترهای پیرامونی نسبت به محور تونل و اندازه گیری سطح مقطع درگیر با سینه ی کار تونل در هر موقعیت از کله ی حفار خواهد بود.

۳- عوامل مؤثر در برهم کنش نیروی پیشران ماشین TBM و زمین

به دلیل برهم کنشی که بین اجزای مختلف ماشین TBM و زمین به وجود می آید، نیروی پیشران در بخش های مختلف ماشین در طی فرایند حفاری متغیر است. نیروی پیشران کل برای پیشروی در ماشین های TBM سپری، طبق پیشنهاد ارائه شده در مراجع [۱۶ و ۱۷] حاصل جمع ۶ مؤلفه به شرح زیر است:

$$F_{Total} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (1)$$

که در این رابطه:

F_۱: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر اصطکاک بین پوسته ی سپر

ماشین^۳ و زمین،

F_۲: نیروی پیشران لازم برای غلبه بر فشار مؤثر بر دیواره ی اتاقک فشار،

4 Back-up

5 Single Shield

6 Double Shield

1 Gauge Area

2 Constant Cross Section

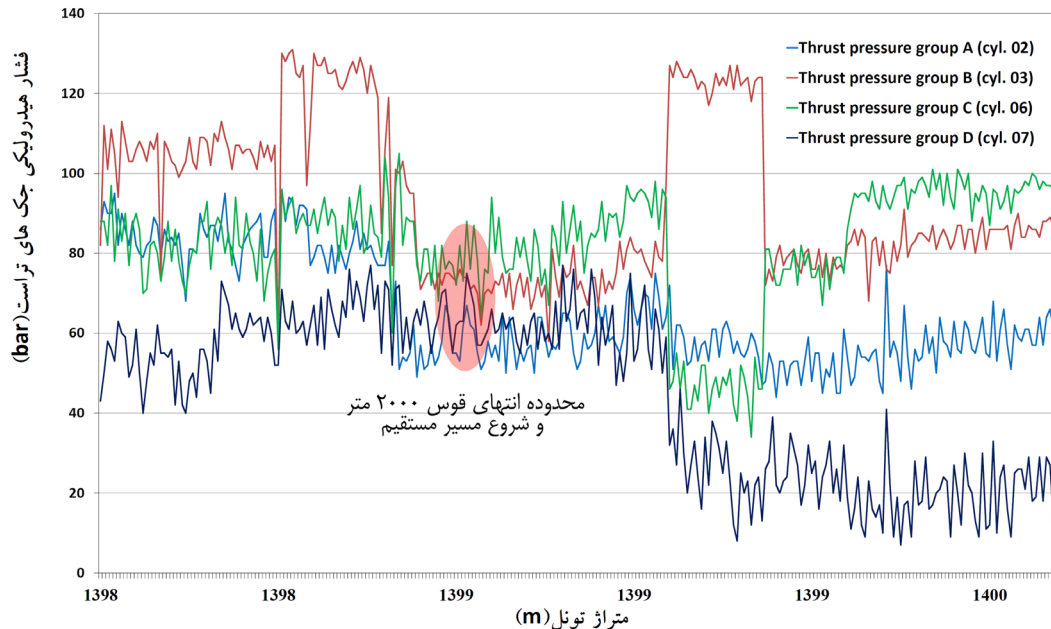
3 Shield

از رابطه‌ی زیرمقادیر F_3 در هر مقطع از تونل مشخص می‌گردد [۱۶]:

$$F_3 = \mu_1 \cdot D \cdot \frac{L_s}{2} \cdot \frac{q}{2} \quad (3)$$

که در آن q برابر است با فشار مازاد بر ماشین در مسیرهای قوسی، و در مسیرهای مستقیم این مقدار برابر با صفر است.

شکل ۴ نمونه‌ای از تغییرات فشار در طی حفاری ماشین TBM برای قوس ۲۰۰۰ متر تونل در متر ۱۳۹۹ متر را نشان می‌دهد. هر یک از نمودارها بیانگر فشار هیدرولیکی یک گروه از ۴ گروه اصلی جک‌های پیشران اصلی در این ماشین TBM هستند. همان طور که مشخص است، فشار هیدرولیکی جک‌های پیشران بعد از اتمام قوس مذکور در حدود ۳۰ bar افت داشته‌اند که این کاهش فشار بعد از مدت زمانی از پیشروی کلّه‌ی حفار و جایگیری کامل آن در سینه‌ی کار نمایان می‌گردد.



شکل ۴: نمونه‌ای از تغییرات فشار اعمالی بر ماشین در زمان حفاری در قوس ۲۰۰۰ متر و بعد از آن
Fig4 - Sample of applied pressure on TBM machine in boring time at 2000m curve and thereafter

$$F_6 = N_C \cdot F_N \cdot F_L \quad (4)$$

که در آن:

N_C : تعداد دیسک‌کاترهای نصب شده بر روی کلّه‌ی حفار
 F_N : میانگین نیروی عمودی دیسک‌کاتر که چنانچه تمام ابزارهای حفاری از نوع دیسکی باشند، نیروی برش قائم در تمام دیسک‌کاترها از جمع نیروی برش تک‌تک آنها به دست می‌آید [۱۹].

F_L : ثابتی برای بیان میزان افت حاصل از اصطکاک بین دیسک‌کاترها و سنگ است که برای دیسک‌کاتر این مقدار برابر ۱/۲ فرض می‌گردد [۱۷].
مدل‌های مختلفی برای تعیین نیروی پیشران عمودی دیسک‌کاترها ارائه شده‌اند که هر یک در جای خود دارای مزایا و کاستی‌هایی هستند. در

در این تحقیق به دلیل اضافه حفاری (65mm در قطر تونل) و سرعت بالای حفاری در مقاطع تونل، فشار مؤثری بر روی سپر از طرف زمین اعمال نگردیده و نیروی پیشران لازم برای غلبه بر اصطکاک زمین تنها از ضریب اصطکاک (μ_1) و وزن سپر ماشین (We) محاسبه شده است. با کمک داده‌های به دست آمده در زمان حفاری و همچنین تعیین مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و نیز تعیین شاخص GSI، می‌توان ضریب اصطکاک بین سپر ماشین TBM و زمین را محاسبه کرد. بدین ترتیب با کمک معیار هوک-براون [۱۸] مقادیر F_1 در هر مقطع از تونل محاسبه و با در نظر گرفتن $We = 172 \text{ ton}$ مقدار F_1 در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

همانطور که اشاره شد نیروی F_3 تابع شعاع قوس در هر مقطع از تونل خواهد بود که محاسبه‌ی آن با بررسی فشار جک‌های هیدرولیکی در قبل و بعد از یک مسیر قوسی انجام گرفته است. در نهایت با استفاده

بر اساس طراحی مسیر تونل، تعداد ۲ قوس با شعاع ۲۰۰۰ متر و یک قوس با شعاع ۵۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است که با توجه به مطالب فوق مقادیری بین ۳۵-۳۰ bar برای قوس‌های ۲۰۰۰ متر و ۲۰-۱۵ bar برای قوس ۵۰۰۰ متر به دست آمده است. با در نظر گرفتن این مقادیر و نیز $D = 4/6 \text{ m}$ برای قطر سپر و $L_s = 4/275 \text{ m}$ برای طول سپر، در نهایت نیروی F_3 در هر مقطع از تونل در جدول ۲ مشخص شده‌اند.
گام بعد، محاسبه‌ی نیروی F_6 است که همان نیروی پیشران برای غلبه بر نیروی نفوذ ابزارهای برشی یا همان دیسک‌کاترهاست. برای تعیین این نیرو رابطه‌ی زیر پیشنهاد شده است [۱۷]:

1 Hoek-Brown failure criterion

$t\sigma$: مقاومت کششی تک محوری سنگ بکر (با استفاده از معیار هوک و تناسبات بیشتر را از خود نشان داده‌اند [۱۰ و ۱۱]. در این مقاله از هر دو مدل استفاده شده است. رابطه‌ی اصلی رگسبرو و فیلیپس برابر است با [۱۱]:

این بین مدل Roxborough & Phillips و مدل اصلاح شده‌ی CSM کارایی و تناسبات بیشتر را از خود نشان داده‌اند [۱۰ و ۱۱]. در این مقاله از هر دو مدل استفاده شده است. رابطه‌ی اصلی رگسبرو و فیلیپس برابر است با [۱۱]:

$$F_N = 4 \cdot \sigma_c \cdot d \cdot \sqrt{(D \cdot d - d^2)} \cdot \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (5)$$

که در آن:

$C\sigma$: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (UCS)،

d : عمق نفوذ دیسک کاتر،

D : قطر دیسک کاتر،

δ : زاویه‌ی لبه‌ی دیسک کاتر،

و همچنین رابطه‌ی ۶ برای مدل CSM به صورت زیر ارائه شده است [۱۰]:

$$F_t = T \cdot R \cdot \phi \cdot P_r \quad (6)$$

که مقدار P_r برابر است با:

$$P_r = C \cdot \sqrt[3]{\frac{S \cdot \sigma_c \cdot \sigma_t}{\phi \cdot \sqrt{R \cdot T}}} \quad (1-6)$$

در این رابطه:

S : فاصله‌ی متوسط دیسک کاترها،

T : پهنای نوک تیغه‌ی دیسک کاتر،

R : شعاع تیغه‌ی دیسک کاتر،

ϕ : زاویه‌ی سطح تماس بین دیسک و زمین که برابر است با

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{p}\right)$$

p : میزان نفوذ دیسک کاتر یا میزان نرخ نفوذ دستگاه،

$C\sigma$: مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر،

مقدار C نیز برابر با $2/12$ در نظر گرفته می‌شود [۹]. برای محاسبه‌ی نیروی پیشران عمودی باید مؤلفه‌ی F_N از رابطه‌ی زیر محاسبه شده و در رابطه‌ی ۴ قرار داده شود:

$$F_N = F_t \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2-6)$$

در این مطالعه با توجه به مقادیر محاسبه شده برای نیروی عمودی دیسک کاترها در هر مقطع از تونل و نیز با مدنظر قرار دادن تعداد ۳۱ عدد دیسک کاتر برای ماشین TBM و نیز مقدار $F_L = 1/2$ (طبق مرجع [۱۷])، مقدار F_N محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. همانطور که قبل از این اشاره شد، در محاسبه‌ی نیروی برش دیسک کاترها بایستی زاویه‌ی قرارگیری آن‌ها نسبت به محور تونل را نیز لحاظ کرد که این مهم به طور دقیق در تمام محاسبات اعمال شده است.

۵- نتایج و بحث

پس از محاسبه‌ی نیروی پیشران کل توسط هریک از دو مدلی که بدان اشاره شد، مشخص گردید که این نیرو با مقدار نیروی پیشران واقعی که برای حفاری به ماشین TBM اعمال شده است تفاوت دارند. در جدول ۳ مقایسه‌ی بین نیروهای اعمالی (F) و نیروهای محاسبه شده (F) ارائه شده‌اند در این جدول مقادیر Δ دارای مقادیر مثبت و منفی هستند. مقادیر مثبت بیانگر بیشتر بودن نیروی F و منفی بیانگر کمتر بودن نیروی F است. لازم به ذکر است که مبنای تمام محاسبات با نرخ نفوذی 8 mm/rev برای محدوده‌های طبقه‌بندی انجام گرفته است.

جدول ۲: میانگین نیروهای پیشران محاسبه شده در هر رده از توده‌سنگ‌های مسیر تونل (با عمق نفوذ ۸ mm)

Table 2 - Calculated average thrust force at each classes of rock masses for tunnel path (with penetration depth of 8mm)

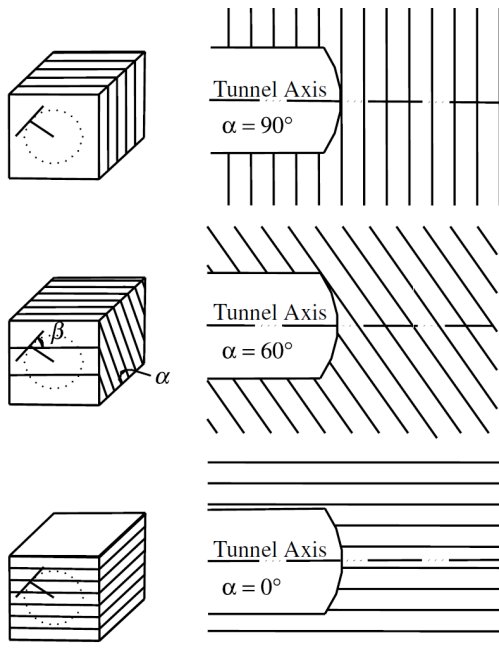
نیروی F6 Roxborough and Phillips (1975) (kN)	نیروی F6 Roštami(2013) (kN)	نیروی F3 (kN)	نیروی F1 (kN)	نیروی FN Roxborough and Phillips (1975) (kN)	نیروی FN Roštami(2013) (kN)	مترای
۲۸۶۱/۵	۵۵۰۵/۴	۳۱۸	۳۱۱۸/۹	۱۴۸	۷۷	۱۰۰-۱۱۰۰
۱۹۰۷/۷	۳۶۶۳/۷	۰	۲۱۳۵/۷	۹۸/۵	۵۱/۳	۱۱۰۰-۲۰۰۰
۱۹۰۷/۷	۳۳۱۱/۸	۰	۲۲۹۵/۷	۸۹	۵۱/۳	۲۰۰۰-۳۴۰۰
۱۶۲۱/۵	۳۱۰۰/۵	۱۳۲۰	۲۳۹۰/۶	۸۳/۳	۴۳/۶	۳۴۰۰-۶۰۵۰
۱۱۴۴/۶	۱۸۹۶/۸	۹۵	۱۶۳۵/۴	۵۱	۳۰/۸	۶۰۵۰-۶۷۰۰
۲۳۸۴/۶	۴۷۰۰/۷	۱۲۱	۲۰۸۹/۰	۱۲۶/۴	۶۴/۱	۶۷۰۰-۷۸۰۰
۳۸۱۵/۳	۶۴۱۹/۶	۱۷۵	۱۸۹۹/۸	۱۷۲/۶	۹۷/۴	۷۸۰۰-۹۲۰۰
۱۵۰۷/۱	۳۵۸۹/۶	۲۳۵ و ۱۱۰۰	۲۲۲۴/۳	۹۶/۵	۴۰/۵	۹۲۰۰-۱۳۴۵۰

جدول ۳: مقایسه‌ی نیروهای محاسبه شده و اعمال شده در طول پروژه

Table3 - Comparison between calculated and applied thrust forces along the project

$\Delta=F-F'$ Roxborough and Phillips(1975)	$\Delta=F-F'$ Roštami(2013)	نیروی پیشران اعمال شده F' (kN)	نیروی Roxborough and Phil- lips(1975) (kN)	نیروی F Roštami(2013) (kN)	متراز(رده)
-۶۳۳/۵	+۴۳۷۶	۴۵۳۳	۵۱۶۶/۸	۸۵۷۶	۱۰۰-۱۱۰۰
-۱۰۴۶/۷	+۱۱۸۲/۳	۴۷۶۶	۳۷۲۰	۵۸۴۹	۱۱۰۰-۲۰۰۰
-۸۷/۱	+۲۱۱۴/۳	۳۹۳۳	۳۸۴۶/۲	۵۷۶۴/۳	۲۰۰۰-۳۴۰۰
-۵۱۰/۱	+۱۵۴۶/۴	۴۱۰۰	۳۵۸۹/۸	۵۳۹۶/۴	۳۴۰۰-۶۰۵۰
-۱۶۳۷	-۵۷۹/۴	۳۷۵۰	۲۱۱۳	۳۲۷۰/۶	۶۰۵۰-۶۷۰۰
-۶۶۸/۴	+۱۷۴۶/۷	۴۴۲۵	۳۷۵۶/۶	۶۶۸۰	۶۷۰۰-۷۸۰۰
-۱۹۱۷/۵	+۳۵۳۸/۷	۶۵۰۰	۴۵۸۲/۵	۹۰۳۸/۷	۷۸۰۰-۹۲۰۰
-۲۰۷۳/۳	+۱۶۳/۸	۵۵۵۰	۳۴۷۶/۷	۵۷۱۳/۸	۹۲۰۰-۱۳۴۵۰

برشی (دیسک کاتر) و الگوی خردشدگی سنگ تابع جهت‌گیری درزه‌ها است که نرخ نفوذ ماشین TBM را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زاویه‌ای در حدود 60° بین محور تونل و جهت یافتگی صفحات ساختاری بیشترین تأثیر را بر روی نرخ نفوذ ماشین داشته و هم‌چنین میزان نرخ نفوذ با کاهش فاصله‌داری این ساختارها افزایش می‌یابد [۱۹]. از سوی دیگر بر اساس نظر گونگ مساعدترین شرایط برای حفاری و در نتیجه ایجاد حداکثر نفوذ، در سنگ‌هایی که درزه‌ها عمود بر جهت اعمال نیروی دیسک کاترها باشند ($\alpha=90^\circ$) به وجود خواهد آمد (شکل ۵) [۵ و ۶].



شکل ۵: تأثیر جهت‌گیری درزه‌ها بر روی نرخ نفوذ ماشین TBM [۱ و ۲]

Fig5 - Effect of joint orientation on penetration rate of TBM

نیروی پیشران محاسبه شده با کمک روش CSM مقادیر بسیار بیشتری را نسبت به روش رکسبرو و فیلیپس نشان می‌دهد. با توجه به مشاهدات مربوط به حفاری در این مطالعه، روش CSM با واقعیت سازگاری بهتری داشته و حاکی از لحاظ نمودن شرایط محافظه‌کارانه‌ای در اعمال پارامترهای حفاری است. به عبارت دیگر، محدوده‌ی مجاز برای نیروی پیشران را می‌توان به خوبی با این روش مشخص نمود و بنابراین تحلیل‌ها و نتیجه‌گیری نهایی در این تحقیق بر مبنای روش اخیر انجام می‌گیرد. در ادامه به بررسی دلایل ایجاد این اختلاف‌ها در رده‌های مختلف از مسیر تونل پرداخته می‌شود. بر اساس تجربه می‌توان میزان اختلاف حدود ± 500 kN را برای تحلیل‌ها و نتایج محاسبات قابل قبول دانست و از آن چشم‌پوشی کرد.

۱-۵- رده‌ی اول (متراز ۱۱۰۰-۱۰۰)

توده سنگ در این محدوده یک توده سنگ یکپارچه و تقریباً پایدار است. مقدار $\Delta = +4376$ نشان می‌دهد که حفاری تونل در شرایطی کنترل شده و محافظه‌کارانه انجام گرفته است. به دلیل ساینده‌ی بالای توده سنگ ($CAI=3/3$) و جلوگیری از سایش کله حفار و پایین بردن نرخ مصرف دیسک کاتر، مقادیر نیروی پیشران اعمالی محافظه‌کارانه هستند. در عین حال به نظر می‌رسد این مقدار اختلاف تا رسیدن به مقدار بهینه‌ی خود فاصله‌ی زیادی داشته و انتظار اعمال نیروی بیشتر بر ماشین می‌رود.

۲-۵- رده‌ی دوم (متراز ۲۰۰۰-۱۱۰۰)

این رده را توده سنگی لایه‌ای و با ناپایداری موضعی تشکیل داده است که دارای $\Delta = +1182/3$ بوده و همین اختلاف، حاصل ناپایداری‌های اندک و موضعی است. نحوه‌ی انتشار ترک‌های ایجاد شده توسط ابزارهای

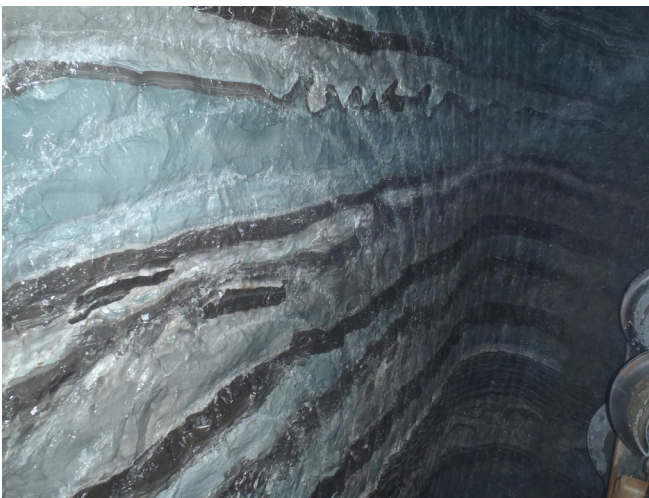
که با مقدار $\Delta = 7/1746+$ مشابه با رده‌ی چهارم توصیف می‌شود.

۵-۷- رده‌ی هفتم (متر ۹۲۰۰-۷۸۰۰)

این رده از مسیر تونل را توده‌سنگی یکپارچه و کاملاً پایدار و با مقدار ساینده‌گی بالا ($CAI=4$) تشکیل می‌دهد. رده‌ی هفتم برخلاف رده‌ی اول، دارای مقاومت فشاری و ساینده‌گی بسیار بیشتری است ولی در عین حال ضریب اصطکاک مصالح در اطراف سپر ماشین و نیروی F3 برای رده‌ی اول مقادیر بیشتری دارند. مقدار $\Delta = +3528/7$ برای این رده در شرایطی محاسبه شده است که نیروی اعمال شده‌ای برابر با 6500 kN ثبت گردیده است. غلبه بر مقاومت اصطکاکی اطراف سپر و نیز فشار مازاد در مسیر قوس ۵۰۰ متر از یک طرف و کنترل حفاری در توده‌سنگی بسیار مقاوم و ساینده از طرف دیگر مستلزم اعمال نیروی تراست بالا می‌باشد که با توجه به محدودیت اعمال نیرو به دستگاه این امر محقق نشده و باعث ایجاد اختلاف زیاد در Δ شده است.

۵-۸- رده‌ی هشتم (متر ۱۳۴۵-۹۲۰۰)

آخرین رده که بخش زیادی از مسیر تونل را تشکیل می‌دهد، تناوبی از توده‌سنگ لایه‌ای و متراکم با شرایط درزه‌داری متعدد و بازشدگی کم است. علی‌رغم وضعیت لایه‌ای توده‌سنگ و جهت‌گیری نامساعد لایه‌بندی، مقدار $\Delta = +163/8$ نشان می‌دهد که نیروی پیشران اعمالی متناسب با شرایط زمین بوده و وضعیت لایه‌بندی تأثیری در نرخ نفوذ ماشین نداشته است. این شرایط به خاطر لایه‌بندی متراکم و فشرده و فاصله‌داری زیاد درزه‌ها رخ می‌دهد و مقادیر $GSI > 55$ نیز مؤید این وضعیت است. نمونه‌ای از وضعیت توده‌سنگ را در این محدوده می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد.



شکل ۶: وضعیت لایه‌ای توده‌سنگ در متر ۱۲۷۱۷
Fig6 - Rock mass bedding condition at 12717m chainage

در رده‌ی دوم به دلیل وضعیت لایه‌ای توده‌سنگ، نیروی پیشران اعمال شده کمتر از مقدار پیش‌بینی شده بوده است که جهت‌گیری درزه‌ها شرایط مساعدی را برای نفوذ دیسک کاترها فراهم نموده‌اند به گونه‌ای که $\alpha > 60^\circ$ به دست آمده است.

۵-۳- رده‌ی سوم (متر ۳۴۰۰-۲۰۰۰)

رده‌ی سوم را توده‌سنگی بلوکه و با پتانسیل سقوط گوه‌های سنگی بزرگ در سینه کار تشکیل می‌دهد. به دلیل ایجاد مصالح ریزدانه در اطراف کلّه‌ی حفار و با پتانسیل ساینده‌گی تقریباً بالا ($CAI=2/5$)، حفاری و پیشروی با کنترل بیشتری نسبت به رده‌ی دوم انجام گرفته و به همین دلیل مقدار $\Delta = +2114/3$ بیانگر کمتر بودن نیروی پیشران اعمالی است.

۵-۴- رده‌ی چهارم (متر ۶۰۵۰-۳۴۰۰)

این رده نیز مشابه با رده‌ی سوم از توده‌سنگی بلوکه ولی با گوه‌های سنگی در اندازه‌های کوچک‌تر در سینه کار تشکیل شده و دارای مقدار $\Delta = +1546/4$ است. اختلاف موجود نیز به خاطر کنترل حفاری و سایش در شرایط این توده‌سنگ منطقی به نظر می‌رسد. در این رده به دلیل تأثیر گسل‌های موازی با امتداد تونل و نیز جهت‌گیری مساعد ناپیوستگی‌ها برای نفوذ بیشتر کله‌حفار TBM (با شیب نزدیک به قائم)، سرعت‌های پیشروی بیشتری (با نیروی پیشران کمتر) نسبت به رده‌ی سوم ثبت شده است.

۵-۵- رده‌ی پنجم (متر ۶۷۰۰-۶۰۵۰)

این رده در محدوده‌ی خردشده و شکسته شده از یک منطقه‌ی گسله به نام گسل پورکان-وردیج قرار می‌گیرد که توده‌سنگ لایه‌ای و بسیار ناپایدار را شامل می‌شود (شکل ۲). اختلاف $\Delta = -579/4$ ناشی از حضور در همین منطقه‌ی گسله می‌باشد. در محدوده‌ی فوق، به دلیل وجود درزه‌های فراوان و نیز وجود ذرات درشت (به جای مصالح ریز و رسی)، حداقل مقدار ضریب اصطکاک ($\mu_1 = 0/97$) در اطراف سپر ماشین و در مقایسه با سایر رده‌ها به دست آمده است. بدین ترتیب امکان پراکنده‌گی گوه‌های سنگی بر روی سپر وجود داشته و باعث ایجاد اصطکاک مضاعفی می‌شود که با نیروی پیشران بیشتر همراه شده است. بنابراین می‌توان گفت که برای محاسبه‌ی نیروی F1 در رابطه‌ی ۲ نه تنها اصطکاک در پیرامون سپر همانند محیط‌های خاکی باید لحاظ گردد بلکه در مواردی نیز نیروی حاصل از تنش‌های اطراف سپر (Pm) نیز بایستی مورد توجه قرار گیرند.

۵-۶- رده‌ی ششم (متر ۷۸۰۰-۶۷۰۰)

رده‌ی ششم متشکل از توده‌سنگ بلوکی و با ناپایداری جزئی بوده

مراجع

- [1] M. Entacher, G. Winter, T. Bumberger, K. Decker, I. Godor, R. Galler, Cutter force measurement on tunnel boring machines – System design, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31 (2012): 97-106.
- [2] M. Entacher, G. Winter, R. Galler, Cutter force measurement on tunnel boring machines – Implementation at Koralm tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38 (2013): 487-496.
- [3] U. Ates, N. Bilgin, H. Copur, Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40 (2014): 46-63.
- [4] Q. Geng, Z. Wei, H. Meng, An experimental research on the rock cutting process of the gage cutters for rock tunnel boring machine (TBM), 2016.
- [5] Q.-M. Gong, J. Zhao, Y.-Y. Jiao, Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(2) (2005): 183-191.
- [6] Q.M. Gong, Y.Y. Jiao, J. Zhao, Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(1) (2006): 46-55.
- [7] N. Barton, *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*, Balkema, Rotterdam; Brookfield, VT, 2000.
- [8] S. Cheema, Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines, 1999.
- [9] B.A. Eftekhari M., Bagherpour R., The Effect Of Operational Parameters On Penetration Rate Of A Tbm Using Artificial Neural Networks- A Case Study: Zagros Tunnel, *Tunneling & Underground Space Engineering*, 1(1) (2013) :29-98.
- [10] J. Roštami, Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 57 (2013): 172-186.
- [11] F.F. Roxborough, H.R. Phillips, Rock excavation by disc cutter, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 12(12) (1975): 361-366.
- [12] D. Festa, W. Broere, J.W. Bosch, An investigation into the forces acting on a TBM during driving – Mining the TBM logged data, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32

همانطور که پیش از این نیز در مقدمه‌ی نوشتار اشاره شد، پژوهش‌های مختلف در راستای ارزیابی نیروی پیشران واقعی انجام گرفته‌است که نمونه‌ای از آن توسط آتس و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی تعداد ۳۰ پروژه حفاری تونل با دستگاه TBM در کشور ترکیه بوده است. ایشان با مقایسه‌ی مقادیر نیروی پیشران و گشتاور طراحی شده و واقعی به اهمیت مشخصات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر تونل اشاره نموده‌اند که نتیجه‌ی آن ارائه‌ی مقادیری برای حد بالا و پایین پارامترهای حفاری بوده‌است [۳]. نکاتی که در این پژوهش نیز بیان شد همگی دلالت بر اهمیت خاص مطالعات زمین‌شناسی در پروژه‌های مکانیزه دارند و با مطالب مورد اشاره در این بخش نیز مطابقت کامل دارند.

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به سهولت دسترسی به مصالح حفاری و نیز ثبت پارامترهای حفاری توسط دستگاه TBM، استفاده از شاخص مقاومتی زمین (GSI) به منظور ارزیابی مشخصات مکانیکی توده سنگ همزمان با پیشروی دستگاه بسیار مفید خواهد بود. در مواردی که اعمال نیروی پیشران TBM با اندازه مصالح حفاری و ابعاد آنها متناسب نباشد، می‌توان نامساعد بودن شرایط درزه‌داری زمین را علت آن دانست. برای بررسی صحت نتایج این تحقیق، در نظر داشتن تمام پارامترهای حفاری حائز اهمیت است. در شرایط اعمال نیروی پیشران زیاد و تخلیه‌ی مصالح خرد شده (با نرخ نفوذ پایین)، ممکن است نامساعد بودن جهت‌گیری درزه‌ها عامل اصلی در بالا بودن این نیروی پیشران باشد. از سوی دیگر باید به نقش شعاع قوس در هر مقطع از مسیر تونل و هم‌چنین قابلیت انواع ماشین‌های TBM بر اساس طراحی در شرایط زمین‌شناسی مختلف نیز اشاره کرد که خود عامل بسیار مهم در تغییرات گسترده‌ی نیروی پیشران اعمالی بر سینه‌ی کار است. به عنوان نتیجه‌ی دیگر باید به کارایی مدل اصلاح شده‌ی CSM نیز اشاره کرد که می‌توان از آن برای تعیین مقادیر مجاز در اعمال نیروی پیشران ماشین‌های TBM استفاده کرد. هم‌چنین در اختیار داشتن شاخص‌هایی از قبیل میزان پتانسیل ساینده‌ی توده سنگ از قبیل شاخص سایش سرشار (CAI)، مقاومت‌های فشاری و کششی تک محوری سنگ بکر، در توضیح مدل فوق بسیار کارآمد هستند.

در نهایت ذکر این نکته ضروری است که به کارگیری مدل‌های مختلف در بررسی عملکرد ماشین‌های TBM به تنهایی قادر به توصیف شرایط واقعی حفاری نبوده و نیازمند به کارگیری صحیح سایر پارامترهای واقعی ماشین خواهد بود. به عبارت دیگر استفاده از یک مدل در حفاری مکانیزه نیازمند ارائه‌ی توصیف کیفی مناسب همراه با توصیف کمی آن مدل است.

neling, 2006, Tunnel Engineering Committee, Tokyo, 2007.

[17] N. Bilgin, H. Copur, C. Balci, D. Tumac, M. Akgul, A. Yuksel, The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in İstanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels, 2019.

[18] C. T. Carranza-Torres, B. Corkum, E. Hoek, C. Carranza-Torres, Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition, 2002.

[19] W. Wittke, R. Druffel, C. Erichsen, J. Gattermann, J. Kiehl, D. Schmitt, M. Tegelkamp, M. Wittke, P. Wittke-Gattermann, B. Wittke-Schmitt, Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling, Aachen: WBI GmbH, WBI GmbH, Aachen, 2006.

(2012): 143-157.

[13] SCC, "Geometric Map of Amirkabir Water Conveyance Tunnel Project," Sahel Consulting Company, Tehran, 2011 (in Persian).

[14] SCC, "Geology Report and Asbuilt Maps of Amirkabir Water Conveyance Tunnel Project," Sahel Consulting Company, Tehran, 2011-2013 (in Persian).

[15] J.A. Franklin, Suggested method for determining point load strength, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 22(2) (1985): 51-60.

[16] E. Japan Society of Civil, Standard specifications for tun-

Please cite this article using:

M. Gholami , R. Ajalloeian, Influence of Interaction between Tunnel Boring Machine and Ground on Thrust Force and Penetration Rates-Case study: Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lot-2) ,Amirkabir J. Civil Eng., 51(2)(2019)315-325.

DOI:10.22060/ceej.2018.13477.5418

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

