

(پژوهشی)

تاثیر تغییر نوع ابزار برشی بر عملکرد ماشین *TBM* در خط ۶ مترو تهرانسیدمصلح افتخاری^{۱*}، مهدی بستامی^۲

۱- استادیار، گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد معدن، شرکت مهندسی آهاب، تهران

(دریافت: اسفند ۱۳۹۸، پذیرش: مرداد ۱۳۹۹)

چکیده

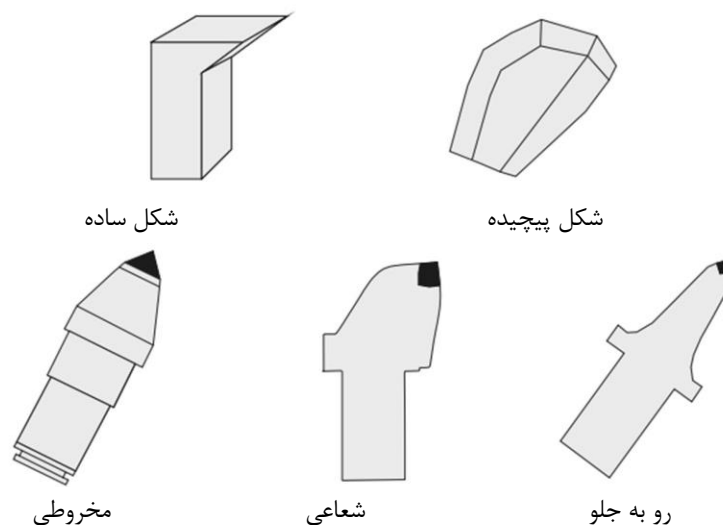
بهبود عملکرد ماشین حفار *TBM* در حفاری تونل همواره مورد توجه بوده است. در این مقاله به بررسی تاثیر تغییر تعدادی از دیسک‌های *TBM* با ابزار خراشی بر پارامترهای عملیاتی تراست، گشتاور و نرخ نفوذ در خط ۶ مترو تهران پرداخته شده است. بدین منظور مقادیر پارامترهای عملیاتی در بخش‌های مختلفی از خط ۶، قبل و بعد از تغییر ابزار برشی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد تغییر نوع ابزار برشی به طور میانگین مقدار تراست را ۴۴ درصد نسبت به حالت قبل از تغییر ابزار برشی کاهش می‌دهد و بازه کاهش میانگین تراست بین حداقل ۲۸ درصد تا حداکثر ۵۷ درصد بوده است. همچنین الگوی جدید، میانگین گشتاور را به اندازه حداقل ۹ درصد و حداکثر ۵۸ درصد و به طور میانگین ۴۰ درصد کاهش داده است. وجود بخش‌های ریزدانه در طول مسیر که موجب گل‌گرفتگی دیسک‌ها شده است، می‌تواند دلیل بالا رفتن مقادیر تراست و گشتاور در بخش‌های قبل از تغییر ابزار برشی باشد. در عین حالی که مقادیر میانگین تراست و گشتاور با تغییر ابزار برشی کاهش یافته است، مقادیر نرخ نفوذ نه تنها کاهش نیافته است، بلکه در بیشتر موارد بین ۵ تا ۲۳ درصد افزایش داشته است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر نوع ابزار برشی در شرایط آبرفت تهران موجب بهبود عملکرد ماشین *TBM* شده است.

کلمات کلیدی

عملکرد *TBM*، ابزار برشی، تراست، گشتاور، نرخ نفوذ، ابزار خراشی، خط ۶ مترو تهران*عهده‌دار مکاتبات: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir ; eftekhari_mosleh@yahoo.com

۱- مقدمه

آشنایی با آن و مکانیزم حفر آن از اهمیت زیادی برخوردار است. ابزار برش برای انتقال انرژی تولید شده توسط ماشین به سنگ استفاده می‌شود. به عنوان یک نتیجه، مشخصات هندسی و سایش دیسک (ابزار برش) اثر مهمی بر بازدهی انتقال انرژی به سنگ و رسیدن به نرخ نفوذ دست یافتنی دارد. ابزارهای خراشی یا رپرها در ماشین‌های اولیه حفاری سنگ به عنوان ابزار برش مورد استفاده قرار می‌گرفتند. از آنجا که آنها شکل هندسی ساده‌تری داشته، درک بهتری از مکانیزم برش سنگ فراهم شده و منجر به توسعه تئوری‌های برش سنگ شده‌اند [۱، ۲]. در شکل ۱ نمایی از چند نوع از این ابزارها نشان داده شده‌است.



شکل ۱: نمایی از چند نمونه ابزار خراش دهنده [۳]

پیشروی زیاد تهیه شد ولی به سرعت کارایی آنها کم می‌شد و سایش لبه گسترش پیدا می‌کرد و سطح تماس سنگ و دیسک بیشتر می‌شد. برای به دست آوردن یک کارایی ثابت با افزایش سایش لبه، دیسک‌های با مقطع عرضی ثابت CCS^1 (شکل ۲-ب) گسترش یافتند. این نوع دیسک‌ها به منظور کمابیش ثابت نگه‌داشتن پروفیل هنگامیکه سایش لبه رخ می‌دهد طراحی شدند که کارایی ماشین با سایش دیسک به سرعت کاهش نیابد. این مزیت باعث شد تا این نوع دیسک یک استاندارد صنعتی TBM شود [۴].

عملیات حفاری توسط هر ماشین حفاری همواره اندرکنشی بین زمین و ماشین است و از این رو پارامترهای مهم در عملکرد و پیشروی TBM به طور کلی به دو دسته شرایط زمین و مشخصات ماشین حفر تقسیم می‌شوند. شرایط زمین، شامل پارامترهای وابسته به مشخصات سنگ بکر و شرایط توده‌سنگ می‌باشد. ابزار برش TBM که روی کله حفار آن نصب می‌گردد به عنوان مهم‌ترین قسمت دستگاه که در تماس با توده سنگ سینه کار است در شرایط مختلف زمین‌شناسی رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهد که

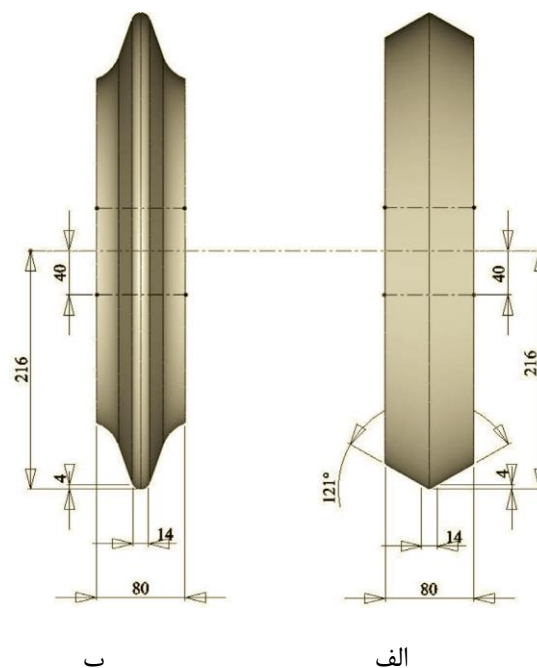
این ابزار برش در واقع تمام سطح صفحه کله‌حفار را تشکیل می‌دهند و وظیفه اصلی حفاری در زمین‌های نرم را بر عهده دارند. رپرها به صورت عمود بر جبهه کار تونل نصب شده و به خاطر موقعیت عمودیشان نسبت به جبهه کار تونل، مستقل از جهت چرخش کله‌حفار عمل می‌کنند و در جهت سست کردن ساختار سخت خاک از آنها استفاده می‌شود. در خاک‌های دانه‌ای مانند شن و ماسه، رپرها ساختار زمین را به هم می‌زنند و زمین را با عمل خراشیدن می‌شکافند.

دیسک‌ها مرسوم‌ترین ابزارهای حفاری هستند که هم در ماشین‌های زمین نرم و هم در ماشین‌های زمین سخت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در دو دهه گذشته دیسک‌هایی با لبه V شکل استفاده می‌شدند با یک زاویه محدود ۶۰ تا ۱۲۰ درجه (شکل ۲-الف). اگرچه این پروفیل برای نرخ

و پیشروی ملاحظه می‌شوند. دیسک‌ها بدون شک ابزار برش اجتناب ناپذیر در TBM ها هستند. بیلگین [۲۳] و رگسبروگ و ریسپین [۲۴] گزارش داده‌اند که در سنگ‌های با مقاومت متوسط و غیرسایشی، برش با ابزار خراشی ۳-۴ برابر موثرتر از برش با دیسک است و این نتیجه با یافته‌های تئوری ایوانز [۲۵] نیز تایید شده است. این در حالی است که ابزارهای خراشی پس از برش طول کوتاهی در سنگ‌های سخت و سایشی به سرعت کارایی خود را از دست داده و باعث می‌شود که دیسک‌های برشی به عنوان محبوب‌ترین ابزار برش برای سنگ‌های مقاوم و ساییده قلمداد شوند. در تشکیلات رسوبی، دیسک‌ها نمی‌توانند آزادانه چرخش داشته و سبب سایش موضعی دیسک‌ها و در نتیجه حفاری ناکارآمد تونل می‌گردد و به همین دلیل در موارد خاص در زمین‌های نرم انتخاب ابزار خراشی ترجیح داده می‌شود.

مواجهه با شرایط زمین سخت و پیچیده در مسیر تونل تصمیم گیرندگان را مجبور به جایگزینی دیسک با ابزار خراشی می‌کند و قبل از هر جایگزینی، لازم است تا مقادیر گشتاور و تراست مورد نیاز TBM جهت حفاری با ابزار خراشی پیش‌بینی گردد. ارزیابی گشتاور و تراست مورد نیاز TBM منجر به پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد برش این ماشین‌ها و همچنین طراحی آنها می‌شود [۱۷، ۲۶، ۲۷]. مدل قطعی مبتنی بر تخمین نیروها با استفاده از تئوری برش ایوانز به عنوان یک ابزار اصلی برای این نوع برآوردها پیشنهاد می‌گردد.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در خصوص جنبه‌های مختلف عملکرد ماشین TBM از معرفی و استفاده از روش‌های تجربی [۲۸-۳۱]، تئوری [۳۲، ۳۳]، مدلسازی عددی [۲۲، ۳۴-۳۶] و روش‌های هوشمند [۳۷-۴۱] در پیش‌بینی عملکرد تا ارزیابی اثر پوشش ابزار برشی بر عملکرد ماشین در حفاری تونل‌ها در سنگ سخت [۴۲-۴۶] و همچنین تونلسازی در زمین‌های نرم [۴۷-۴۹] انجام شده است اما با این حال مطالعات اندکی در ارتباط با تأثیر تغییر نوع ابزار برشی بر عملکرد ماشین TBM گزارش شده است و میتوان به مطالعه بیلگین و همکاران [۵۰] اشاره نمود که عملکرد ماشینی با قطر ۳/۱۷۵ متر و دارای ۲۳ دیسک با مقطع ثابت را مورد بررسی قرار داده است. بررسی‌های آنها نشان می‌دهد که ابزار خراشی در حدود ۳/۵ برابر بار محوری کمتر از دیسک برای یک عمق برش



شکل ۲: انواع دیسک (الف) دیسک V شکل (ب) دیسک CCS [۴]

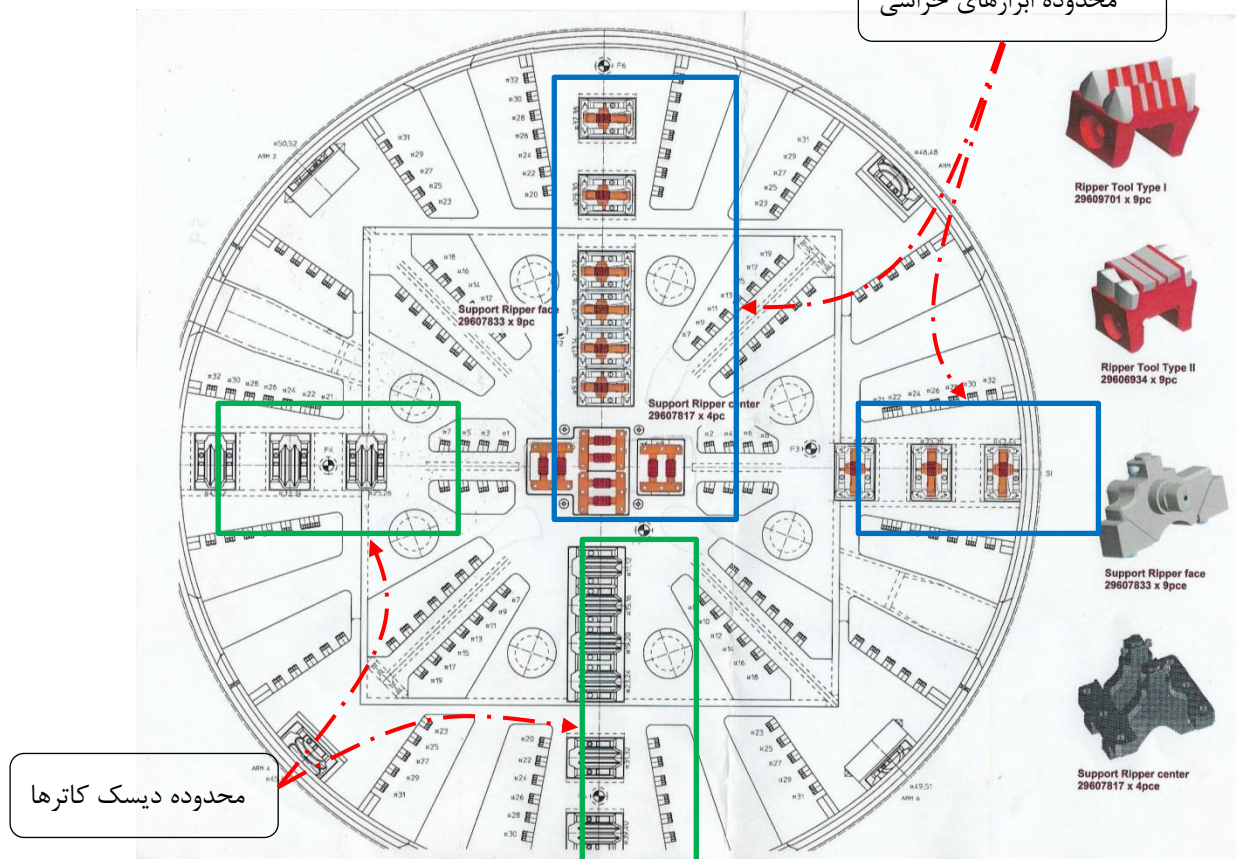
مکانیک برش سنگ علم جدیدی است که در دهه ۱۹۶۰ با پدیدار شدن تکنولوژی‌های جدید در صنعت معدن زغالسنگ برای ابزارهای خراشی شروع به توسعه کرد. مطالعات متعددی در خصوص عملکرد ابزار خراشی انجام شده است [۲، ۵-۱۳]. از سوی دیگر، برخی از مطالعات پیشرو در زمینه عملکرد دیسک‌های برش دهنده و ماشین‌های حفاری تونل در مطالعات [۱۴-۲۲] یافت می‌شود. مکانیزم برش سنگ توسط دیسک و ابزار خراشی متفاوت است هر چند که هر دو به عنوان یک نفوذکننده به سنگ عمل می‌کنند. دیسک برش، که یک نوع از برش دهنده غلتکی است، با عمل چرخش سنگ را می‌شکند در حالیکه، ابزار خراشی یک نوع خراش دهنده است و با عمل کشیدن و خراش دادن سنگ را می‌شکند. درک این مکانیزم‌ها به بهبود مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد کمک می‌کند. به طور کلی، فرآیند شکست سنگ وابسته به پارامترهای ماشین از قبیل قطر TBM، فاصله خطی دیسک‌ها، قطر دیسک، عرض نوک، تراست کلی (بار محوری کلی) و گشتاور است. طراحی ثابت‌های فاصله دیسک‌ها و قطر و عرض نوک دیسک، مستقیماً بر فرآیند شکست سنگ اثر می‌گذارند که باید به عنوان پارامترهای مهم ماشین مؤثر بر نرخ نفوذ در نظر گرفته شوند. نیروی تراست و گشتاور معمولاً با تغییر شرایط توده سنگ تغییر می‌کنند و به عنوان پارامترهای اجرایی TBM مؤثر بر نفوذ

حفاری در آن از فضای باز انجام شده و از اینرو ماشین حفاری در این ایستگاه مورد بازدید و بررسی قرار گرفت و به دلیل گل‌گرفتگی‌های متعدد در طول مسیر و مصرف بالای دیسک‌های برشی، در این ایستگاه به بررسی وضعیت و شرایط دیسک‌ها پرداخته شد. پس از بررسی‌های انجام شده مقرر گردید تا تعدادی از دیسک‌های کله حفار با ابزار خراشی جایگزین گردد. الگوهایی از جانمایی ابزارهای خراشی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت الگویی برای جانمایی ابزارها، همراه با نوع ابزارهایی که در شکل ۳ مشخص شده است جهت ادامه مسیر حفاری پیشنهاد گردید.

نیاز دارد. گشتاور مورد نیاز برای عمق واحد برش برای ابزار خراشی حدود $1/4$ برابر کمتر از دیسک برش است. داده‌های میدانی برای ابزارهای خراشی برای سنگ‌هایی با مقاومت فشاری بیش از ۷۵ مگاپاسکال وجود ندارد. این به این دلیل است که یک محدوده مقاومت برای ابزار خراشی تعیین شده است. با این حال ممکن است بهتر باشد تا از ابزارهای خراشی در سنگ‌های نسبتاً نرم‌تر به منظور کاهش گشتاور و تراست مورد نیاز TBM ها استفاده شود که در نتیجه نرخ تولید لحظه‌ای افزایش می‌یابد. مهم‌ترین نقیصه ابزار خراشی دوام و سایش محدود آنها در سنگ‌های نسبتاً سخت‌تر است [۵۰].

ایستگاه امیرکبیر که در موقعیت ۷۵۲۵ متری از مسیر خط ۶ مترو تهران قرار دارد، اولین ایستگاهی است که

محدوده ابزارهای خراشی



شکل ۳: الگوی جدید ابزارهای خراشی و دیسک‌ها در کله حفار بعد از ایستگاه امیرکبیر

گذشته [۵۰] متفاوت است. در ادامه ابتدا به معرفی خط ۶ مترو تهران پرداخته می‌شود و سپس پارامترهای عملیاتی ماشین TBM از جمله تراست و گشتاور که در مطالعات گذشته نیز به تاثیر نوع ابزار برشی بر مقادیر آنها تاکید شده است پرداخته می‌شود و همچنین تاثیر تغییر ابزار برشی بر

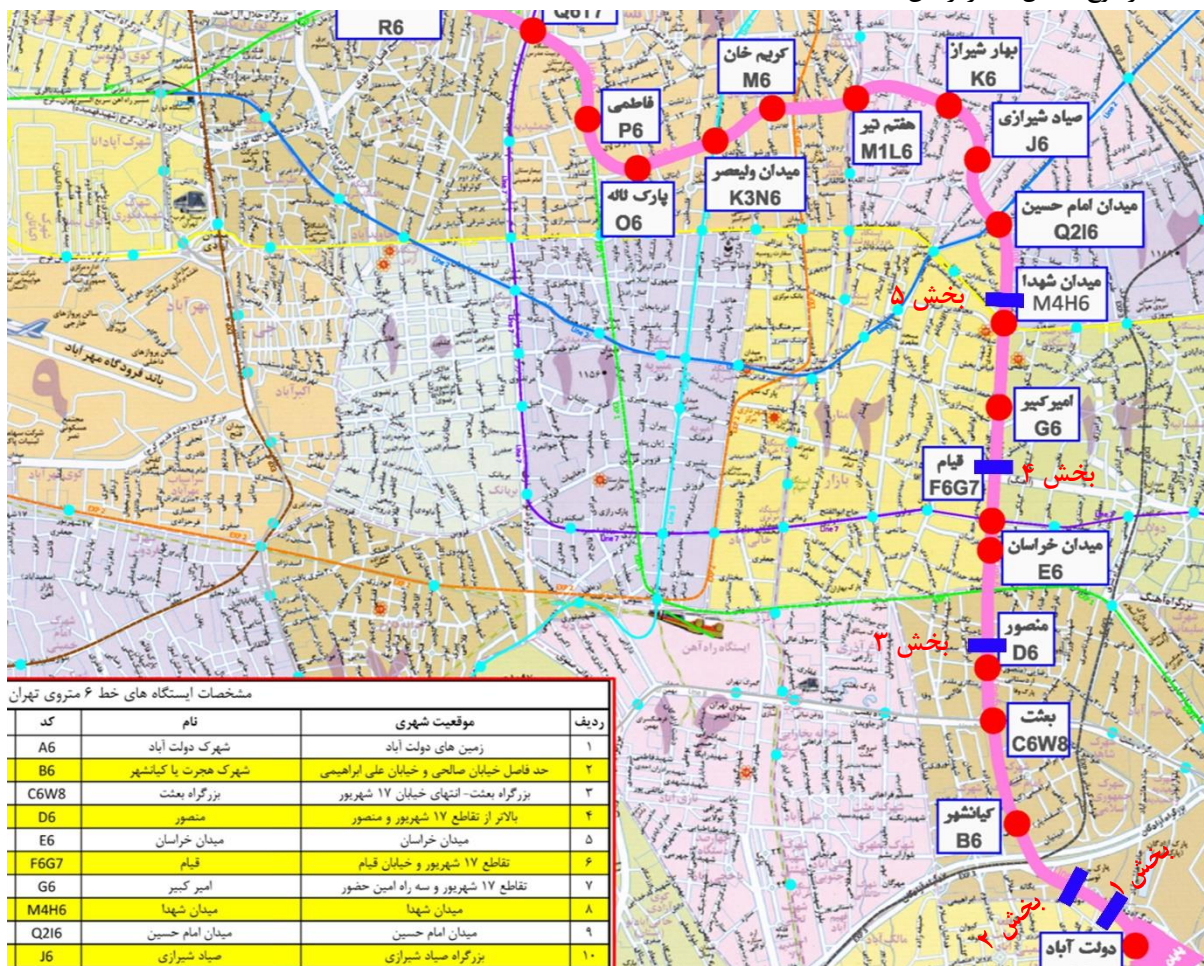
در این مقاله به ارزیابی کارایی الگوی جدید ابزارهای برشی کله حفار و تاثیر آن بر عملکرد ماشین TBM در خط ۶ مترو تهران پرداخته می‌شود که از نظر شرایط زمین‌شناسی، ابعاد مقطع حفاری و تعداد دیسک‌ها و همچنین آرایش و نوع ابزار خراشی مورد استفاده با مطالعه

(Balance) و با قطر ۹/۱۹ متر حفاری می‌شود. قطعه جنوبی خط ۶ متروی تهران پس از شروع از منطقه دولت آباد، از بزرگراه آزادگان عبور نموده و با گذر از منطقه کیناشهر و بزرگراه بعثت به خیابان ۱۷ شهریور می‌رسد. ادامه خط در امتداد خیابان ۱۷ شهریور به سمت شمال حرکت کرده و با گذر از تقاطع خیابان شوش، میدان خراسان، بزرگراه آیت الله محلاتی و میدان شهدا به میدان امام حسین (ع) خواهد رسید. مسیر پس از خروج از ایستگاه امام حسین (ع) در امتداد خیابان خواجه نصیر طوسی وارد میدان سپاه می‌شود. بخشی از مسیر خط ۶ متروی تهران در شکل ۴ نشان داده شده است.

پارامتر نرخ نفوذ که یکی از شاخص‌های عملکرد ماشین TBM است مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، مقادیر این پارامترها در مقاطعی قبل و بعد از تغییر ابزار برشی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند.

۲- معرفی خط ۶ مترو تهران

خط ۶ مترو تهران به عنوان یکی از خطوط اصلی متروی شهر تهران با ۲۷ ایستگاه به صورت قطری شمال غرب پایتخت را به جنوب شرقی آن متصل می‌نماید. از کل طول ۳۸ کیلومتری، ۶ کیلومتر در طرح توسعه و نزدیک به ۱۱ کیلومتر با ماشین حفر انجام می‌شود. خط ۶ با ماشین TBM از نوع تعادل فشار زمین (EPB Earth Pressure)



شکل ۴: نمایش بخشی از مسیر خط ۶ مترو تهران و محل قرارگیری ایستگاه‌های مترو

تقاطع خط ۴ با ۶ و میدان امام حسین (ع) به صورت عبور از ایستگاه اجرا شده و فضای باز انجام شده است. با توجه به نقشه‌های توپوگرافی، محدوده پروژه حدوداً در تراز ارتفاعی ۱۰۸۵ تا ۱۳۹۱ متر از سطح دریای آزاد قرار می‌گیرد. رسوبات آبرفتی تهران اکثراً حاصل فعالیت

ماشین حفر در اجرای حفاری تونل در این ۱۱ کیلومتر از ایستگاه‌های کیناشهر، بعثت، قیام و میدان خراسان به صورت حفاری تونل و قبل از اجرای ایستگاه عبور کرده و در ادامه از ایستگاه‌های امیرکبیر، میدان شهدا، سه راهی و

درشت‌دانه و ریزدانه می‌توانند به سمت بالادست و پایین‌دست مهاجرت نمایند که حاصل این فرآیند می‌تواند به صورت تغییرات ویژگی‌های رسوبات از سطح به عمق نیز نمایان گردد [۵۱]. در طول مسیر خط ۶ گمانه‌های شناسایی حفاری شده که موقعیت تعدادی از آنها همراه با نوع خاک و سطح آب زیرزمینی در آنها در جدول ۱ گزارش شده‌است. با توجه به مقاطع گمانه‌ها و نتایج آزمایش‌ها و بررسی‌های آماری ملاحظه می‌گردد که خاک ساختگاه منطقه مورد بررسی به طور متناوب بین لایه‌های ریزدانه رسی و درشت‌دانه شن و ماسه تغییر می‌کند.

جدول ۱: نوع خاک و سطح آب زیرزمینی در تعدادی از گمانه‌های شناسایی در محدوده خط ۶ مترو تهران [۵۱]

نام گمانه	موقعیت	نوع خاک	سطح آب زیر زمینی
BH SL P02	محدوده ایستگاه دولت‌آباد	CL,GC,SC	۱۳/۵
BH SL P01	محدوده ایستگاه دولت‌آباد	CL,CH,SC,ML	-
BH SL 638	محدوده ایستگاه کیانشهر	CL,CH	۱۵/۵
BH SL 636	محدوده ایستگاه کیانشهر	CL	۱۱/۵
BH SL 631	کیانشهر، خ‌حدی	SC,CL,CH	۱۹
BH SL 627	محدوده بزرگراه بعثت	CL	۱۲
BH SL 622	خ ۱۷ شهرپور روبروی کوچه شهرابی	CL,SC	۴
BH SL 619	خ ۱۷ شهرپور پایین تر از میدان خراسان	CL,SC,SM	-
BH SL 617	بین میدان خراسان و تیر دوقلو	SC,GC,SW,SC,CL	۱۵/۷
BH SL 612	خ ۱۷ شهرپور بالاتر از میدان خراسان	CL,SC	۱۹
BH SL 607	خ ۱۷ شهرپور بعد از ابن سینا	SC,GC	۲۰
BH SL 603	خ ۱۷ شهرپور روبروی فیاض‌بخش	SC, GC	۲۱
BH SL 601	محدوده ایستگاه شهدا	SC	۱۶/۸

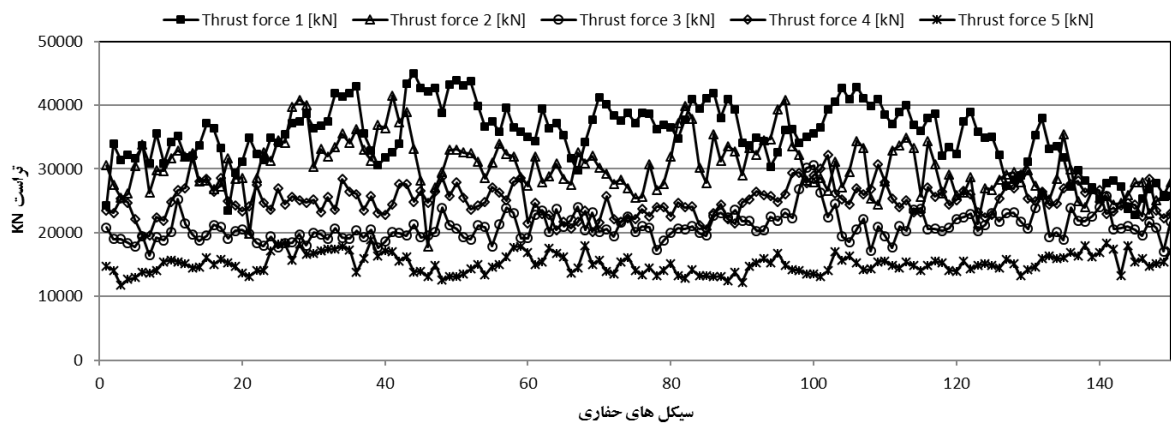
به طور کلی شرایط ژئوتکنیکی خاک در مسیر و محدوده حفاری مکانیزه را می‌توان به دو بخش درشت‌دانه و ریزدانه بدین شرح تقسیم نمود که از میدان شهدا تا حوالی میدان خراسان را در طبقه خاک‌های شن و ماسه‌ای همراه با لایه‌های سیلتی و رسی و گاهی قلوه‌سنگ قرار داد. در قسمت‌هایی لایه‌هایی از آهک با مقاومت بالا وجود دارد که در این محدوده لایه رسی به ضخامت حدود ۲ متر تا ۵ متری در عمق کمتر از ۱۰ متری سطح زمین دیده شده‌است. از حوالی میدان خراسان تا ابتدای مسیر در حوالی اتوبان آزادگان خاک‌های تحت‌الارضی در محدوده خاک‌های ریزدانه رسی و سیلتی به همراه لایه‌های ماسه‌ای و گاهی شنی متراکم تا بسیار متراکم قرار می‌گیرد [۵۱].

۳- تاثیر تغییر نوع ابزار برشی کله حفار در خط ۶ مترو تهران

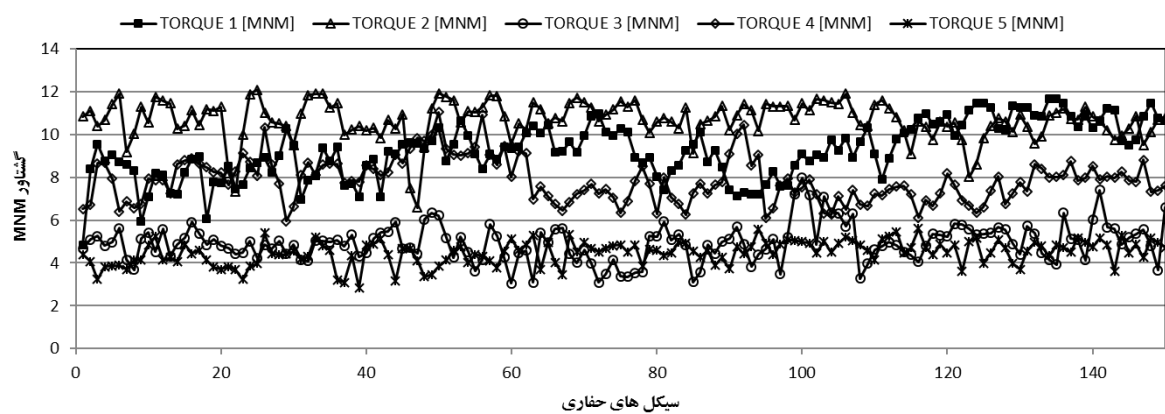
به منظور ارزیابی و مقایسه پارامترهای عملیاتی ماشین TBM مقادیر تراست و گشتاور و همچنین نرخ نفوذ در چهار بخش قبل از تغییر ابزار برشی (بخش ۱ شامل سیکل‌های حفاری در فاصله حدود ۴۰۰ متری از شروع حفاری و بخش ۲، ۳ و ۴ به ترتیب شامل سیکل‌های حفاری در موقعیت حدود ۱۰۰۰، ۴۵۰۰ و ۶۹۰۰ متری از مسیر حفاری است) و یک بخش پس از تغییر ابزار (بخش ۵ که شامل سیکل‌های حفاری در موقعیت حدود ۸۶۰۰ متری از مسیر حفاری است) ارائه می‌شوند که موقعیت

مدت زمانی از حفاری با ابزارهای جدید با هم مقایسه نمود. بدین منظور مقادیر پارامترهای نیروی پیشران یا تراست، گشتاور و نرخ نفوذ در بخش‌های مختلف مقایسه می‌شوند که روند تغییرات این پارامترها در شکل ۵ نشان داده شده‌است و محدوده بررسی در جدول ۲ مشخص شده‌است.

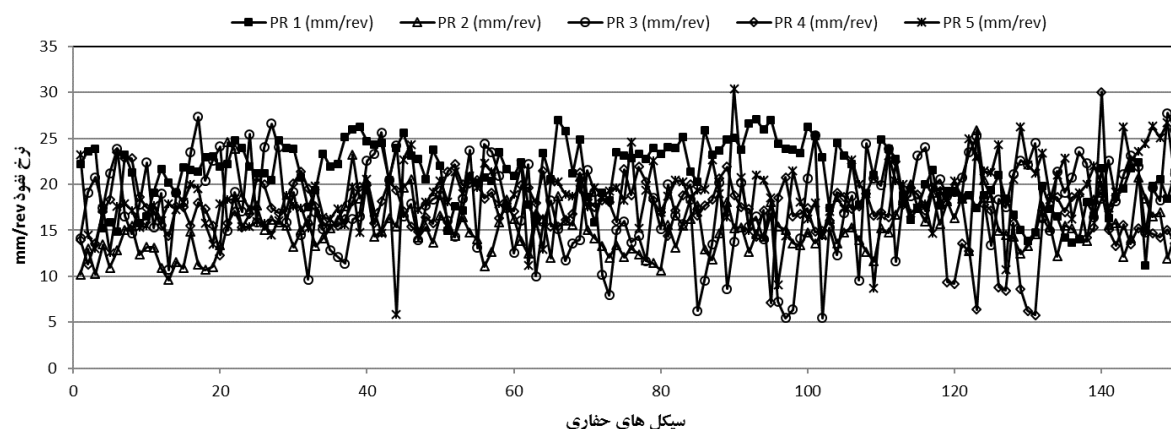
تقریبی آنها در شکل ۴ نشان داده شده‌است. هر یک از بخش‌ها شامل ۱۵۰ سیکل حفاری است که هر سیکل برابر ۱.۵ متر پیشروی است از این رو هر بخش از اطلاعات مربوط به ۲۲۵ متر حفاری مسیر تونل است. انتخاب این بخش‌ها به گونه‌ای بوده‌است که پارامترهای عملیاتی ماشین حفار در قبل از تغییر ابزار برشی در بخش‌هایی با فواصل زیاد را با مقادیر این پارامترها پس از تغییر ابزار و با گذشت



الف) تراست



ب) گشتاور



ج) نرخ نفوذ

شکل ۵: روند تغییرات مقادیر پارامترهای عملیاتی TBM در بخش‌های مختلف مسیر خط ۶ (الف) تراست (ب) گشتاور (ج) نرخ نفوذ

جدول ۲: محدوده تغییرات مقادیر تراست، گشتاور و نرخ نفوذ در بخش‌های مختلف

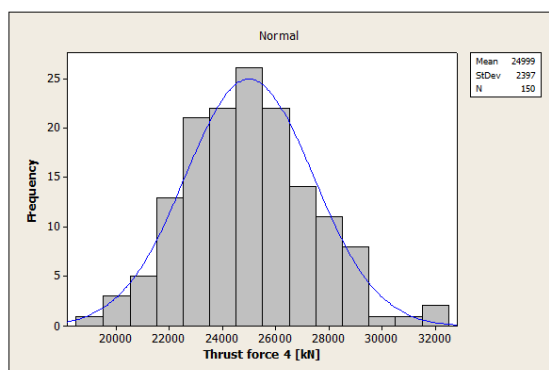
شماره محدوده	محدوده تغییرات تراست (KN) (Min-Max)	محدوده تغییرات گشتاور (NM) (Min-Max)	محدوده تغییرات نرخ نفوذ (mm/rev) (Min-Max)
بخش ۱	(۴۵۰۱۵-۲۲۸۲۹)	(۴/۸۴-۱۱/۶۵)	(۱۱/۲-۲۷/۱)
بخش ۲	(۴۱۵۱۹-۱۷۷۶۱)	(۶/۵۹-۱۲/۰۸)	(۹/۶-۲۵/۹)
بخش ۳	(۳۰۵۹۱-۱۶۴۳۷)	(۳/۰۵-۷/۹۷)	(۵/۵-۲۷/۷)
بخش ۴	(۳۳۱۸۶-۱۹۴۹۳)	(۵/۹۵-۱۱/۰۴)	(۵/۸-۳۰/۰)
بخش ۵	(۱۸۸۷۱-۱۱۷۵۸)	(۲/۸۵-۵/۶۱)	(۵/۸-۳۰/۴)

ملاحظه می‌شود که به طور کلی تفاوت چندانی میان محدوده تغییرات مقادیر نرخ نفوذ در بخش‌های مختلف وجود ندارد در حالی که اختلافات قابل ملاحظه‌ای میان مقادیر تراست و گشتاور در بخش‌های مختلف در مسیر حفاری ثبت شده‌است که به منظور بررسی دقیق‌تر، هر یک از پارامترهای اجرایی به طور جداگانه تحلیل و بررسی می‌گردد.

۳-۱- تاثیر تغییر ابزار برشی بر نیروی تراست

به منظور بررسی تاثیر تغییر ابزار برشی بر مقادیر تراست به عنوان یک پارامتر عملیاتی مهم و تاثیرگذار، مقادیر نیروی تراست در هر بخش ارائه می‌گردد و از آنجا که این مقادیر در هر سیکل حفاری تغییر می‌کند بنابراین جهت درک بهتر تغییرات، مقادیر پارامترها به صورت آماری و توابع توزیع آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد که بدین منظور از نرم‌افزار Minitab استفاده شده است. به عنوان نمونه، هیستوگرام توزیع نیروی تراست در بخش ۴ در شکل ۶ نشان داده شده است و مشاهده می‌شود که نیروی تراست در این بخش از توزیعی با میانگین ۲۴۹۹۹ کیلونیوتن و با انحراف معیار ۲۳۹۷ کیلونیوتن تبعیت می‌کند.

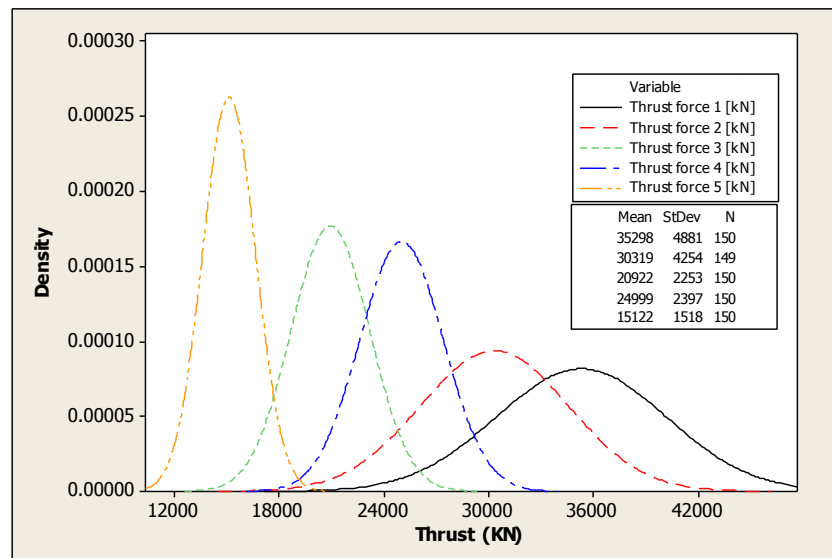
مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوط به سایر بخش‌ها نیز در جدول ۳ ارائه شده‌است و همچنین درصد کاهش میانگین تراست هر بخش نسبت به میانگین تراست بخش ۵ در ستون سوم جدول ۳ آمده‌است. این مقادیر در شکل ۷ به صورت مقایسه‌ای ارائه شده‌است که مشاهده می‌گردد که الگوی جدید ابزار برشی که با تغییر تعدادی از ابزارهای برشی از نوع دیسک به خراش دهنده در کله حفار حاصل شده‌است، علاوه بر کاهش مقدار میانگین نیروی تراست بازه تغییرات آن نیز کاهش یافته‌است و به عبارتی پیروی با تراست تقریباً یکنواخت‌تری صورت پذیرفته‌است.



شکل ۶: هیستوگرام نیروی تراست در سیکل‌های حفاری در بخش ۴

جدول ۳: مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر تراست در بخش‌های مختلف

شماره محدوده	میانگین تراست (F_i) (KN)	انحراف معیار (KN)	درصد کاهش تراست با الگوی جدید $(F_i - F_5) / F_i$
بخش ۱	۳۵۲۹۸	۴۸۸۱	۵۷
بخش ۲	۳۰۳۱۹	۴۲۵۴	۵۰
بخش ۳	۲۰۹۲۲	۲۲۵۳	۲۸
بخش ۴	۲۴۹۹۹	۲۳۹۷	۴۰
بخش ۵	۱۵۱۲۲	۱۵۱۸	-



شکل ۷: مقایسه توزیع نیروی تراست در سیکل‌های حفاری در بخش‌های ۱ تا ۵

است. مقادیر میانگین و انحراف معیار مربوط به بخش‌های مختلف در جدول ۴ ارائه شده‌است. همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، میانگین مقادیر گشتاور نیز با تغییر ابزار برشی کاهش و بازه تغییرات آن نیز محدودتر شده است و پیشروی با مقدار گشتاور تقریباً ثابتی صورت پذیرفته است. نتایج نشان می‌دهد که الگوی جدید ابزار برشی، میانگین گشتاور را به اندازه حداقل ۹ درصد و حداکثر ۵۸ درصد کاهش داده و به طور میانگین میزان گشتاور ۴۰ درصد کاهش یافته است. همچنان می‌توان ملاحظه کرد که مقادیر بالای گشتاور در بخش‌های ۱ و ۲ نیز نشانگر پدیده گل‌گرفتگی بیشتر در بخش‌های جنوبی‌تر مسیر که وضعیت دانه‌بندی ریزتری داشته، است.

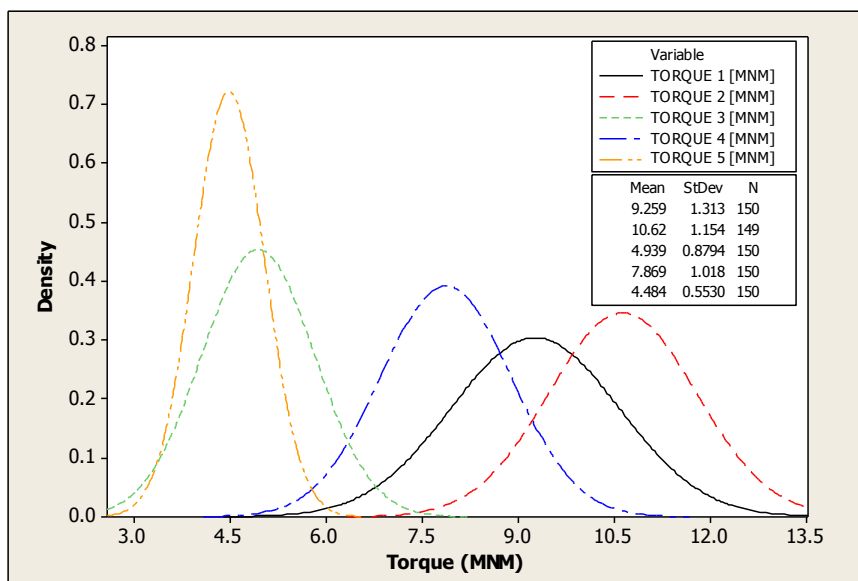
همان طور که در جدول ۳ آمده است، میانگین تراست الگوی جدید ابزار برشی به اندازه حداقل ۲۸ درصد و حداکثر ۵۷ درصد کمتر از حالتی است که تنها از دیسک استفاده شده‌است. به طور میانگین میزان تراست ۴۴ درصد کاهش یافته‌است. شاید بتوان دلیل مقدار زیاد تراست به همراه بازه تغییرات گسترده آن در بخش ۱ را وجود مواد ریزدانه‌ی بیشتر عنوان کرد که باعث بروز پدیده گل‌گرفتگی بیشتر بوده‌است و در چنین شرایطی نیز مطلوب‌تر بود که از ترکیب ابزار برشی استفاده می‌شد.

۳-۲- تأثیر تغییر ابزار برشی بر گشتاور

مقادیر گشتاور نیز همانند نیروی تراست در بخش‌های مختلف و به صورت توزیع آماری مورد بررسی قرار گرفته

جدول ۴: مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر گشتاور در بخش‌های مختلف

شماره محدوده	میانگین گشتاور (T_i) (MNm)	انحراف معیار (MNm)	درصد کاهش گشتاور با الگوی جدید $(T_i - T_5) / T_i$
بخش ۱	۹/۲۵۹	۱/۳۱	۵۲
بخش ۲	۱۰/۶۲	۱/۱۵	۵۸
بخش ۳	۴/۹۳۹	۰/۸۸	۹
بخش ۴	۷/۸۶۹	۱/۰۱۸	۴۳
بخش ۵	۴/۴۸	۰/۵۵۳	-

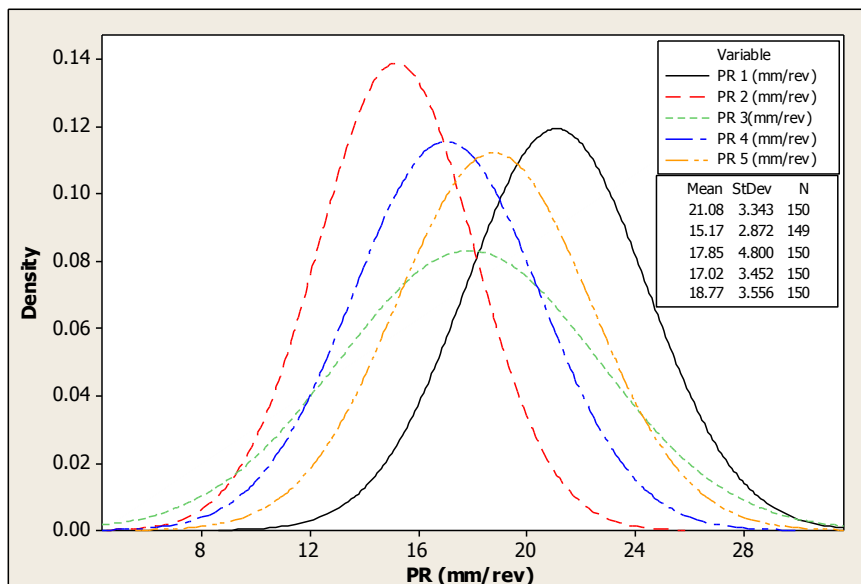


شکل ۸: مقایسه توزیع گشتاور در سیکل‌های حفاری در بخش‌های ۱ تا ۵

۳-۳- تاثیر تغییر ابزار برشی بر نرخ نفوذ

در این بخش به شیوه‌ای مشابه با دو بخش قبل به بررسی اثر تغییر ابزار برشی بر پارامتر مهم نرخ نفوذ پرداخته می‌شود. در شکل ۹ توزیع مربوط به مقادیر نرخ نفوذ در بخش ۱ تا ۵ نمایش داده شده‌است که دارای مقادیر میانگین و انحراف معیار $21/08$ و $3/34$ (mm/rev) در بخش ۱، $15/17$ و $2/87$ (mm/rev) در بخش ۲، $17/85$ و $4/8$ (mm/rev) در بخش ۳، $17/02$ و $3/45$ (mm/rev) در بخش ۴، و $18/77$ و $3/556$ (mm/rev) در بخش ۵ است.

در این بخش به شیوه‌ای مشابه با دو بخش قبل به بررسی اثر تغییر ابزار برشی بر پارامتر مهم نرخ نفوذ پرداخته می‌شود. در شکل ۹ توزیع مربوط به مقادیر نرخ نفوذ در بخش ۱ تا ۵ نمایش داده شده‌است که دارای مقادیر میانگین و انحراف معیار $21/08$ و $3/34$ (mm/rev) در بخش ۱، $15/17$ و $2/87$ (mm/rev) در بخش ۲، $17/85$ و $4/8$ (mm/rev) در بخش ۳، $17/02$ و $3/45$ (mm/rev) در بخش ۴، و $18/77$ و $3/556$ (mm/rev) در بخش ۵ است.



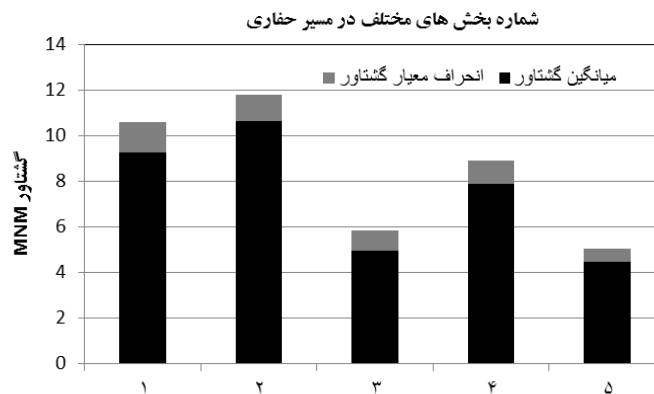
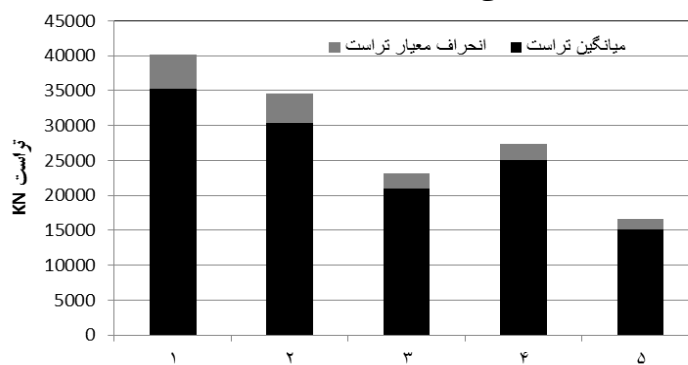
شکل ۹: مقایسه توزیع نرخ نفوذ در سیکل‌های حفاری در بخش‌های ۱ تا ۵

جدول ۵: مقادیر میانگین و انحراف معیار مقادیر نرخ نفوذ در بخش‌های مختلف

شماره محدوده	میانگین نرخ نفوذ (PR_i) (mm/rev)	انحراف معیار (mm/rev)	درصد تغییر گشتاور با الگوی جدید $(PR_i - PR_5) / PR_i$
بخش ۱	۲۱/۰۸	۳/۳۴	۱۱
بخش ۲	۱۵/۱۷	۲/۸۷	-۲۴
بخش ۳	۱۷/۸۳	۴/۸	-۵
بخش ۴	۱۷/۰۲	۳/۴۵	-۱۰
بخش ۵	۱۸/۷۷	۳/۵۶	-

که مقدار نرخ نفوذ پس از تغییر ابزار افزایش یافته در عین حالی که مقادیر تراست و گشتاور کاهش یافته است. تغییرات میانگین و انحراف معیار مقادیر تراست، گشتاور و نرخ نفوذ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

مقایسه مقادیر نرخ نفوذ در بخش‌های مختلف نشان می‌دهد که با پیشروی در مسیر تونل تا قبل از تغییر ابزار مقدار نرخ نفوذ کاهش یافته است که با بررسی مقادیر تراست و گشتاور مشخص است که این کاهش ناشی از کاهش مقادیر تراست و گشتاور است اما مشاهده می‌شود



شکل ۱۰: میانگین و انحراف معیار مقادیر پارامترهای عملیاتی در بخش‌های مختلف در مسیر خط ۶ (الف) تراست (ب) گشتاور (ج) نرخ نفوذ

این صورت که با تغییر نوع تعدادی از ابزارهای برشی، مقدار نرخ نفوذ نسبت به بخش ۱، ۱۱ درصد کاهش داشته اما نسبت به بخش‌های ۲ تا ۴ بین ۵ تا ۲۳ درصد افزایش داشته است، که علت مقدار نرخ نفوذ بیشتر در بخش ۱ نسبت به بخش ۵ می‌تواند به دلیل مقادیر تراست و گشتاور بیش از ۲ برابری آن باشد. بنابراین با بررسی هم‌زمان این پارامترها می‌توان به کارایی مناسب تغییر نوع ابزار برشی در شرایط زمین‌شناسی خط ۶ مترو تهران پی برد.

مراجع

- [1] Evans, I. (1958). Theoretical aspects of coal ploughing. [In:] WH Watton, Editor, Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials. Butterworths, London.
- [2] Potts, E., Shuttleworth, P. (1958). A study of ploughability of coal with special reference to the effects of blade shape, direction of planning to the cleat, planning speed and influence of water infusion. Trans Inst Min Eng. 117, 519-53.
- [3] Yasar, S., Yilmaz, A.O. (2017). Rock cutting tests with a simple-shaped chisel pick to provide some useful data. Rock Mechanics and Rock Engineering. 50, 3261-9.
- [4] Cho, J.-W., Jeon, S., Yu, S.-H., Chang, S.-H. (2010). Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method. Tunnelling and Underground Space Technology. 25, 230-44.
- [5] Evans, I. (1982). Optimum line spacing for cutting picks. Mining Engineer. 141, 433-4.
- [6] Evans, I. (1984). A theory of the cutting force for point-attack picks. International Journal of Mining Engineering. 2, 63-71.
- [7] Pomeroy, C. (1963). The breakage of coal by wedge action. Colliery Guardian. 207, 672-7.
- [8] Dalziel, J., Davies, E. (1964). Initiation of cracks in coal specimens by blunted wedges. The Engineer. 217, 217-20.
- [9] Hughes, H. (1972). Some aspects of rock machining. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, Vol. 9, pp. 205-11.
- [10] Nishimatsu, Y. (1972). The mechanics of rock cutting. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Elsevier, Vol. 9, pp. 261-70.

مشاهده می‌شود که مقادیر تراست و گشتاور در ابتدای مسیر مقادیر بسیار بالاتری را تجربه نموده اند بیش از ۲ برابر حالت استفاده از ترکیب ابزار خراشی و دیسک که شاید به دلیل وضعیت زمین‌شناسی و دانه‌بندی محدوده بوده است که با توجه به قرار گرفتن شهر تهران بر بستر آبرفتی، در بخش جنوبی آبرفت که ابتدای مسیر حفاری بوده است شرایط گل‌گرفتگی باعث این پدیده بوده است اما ملاحظه می‌شود که با وجود مقادیر تراست و گشتاور بالا نسبت به سایر بخش‌ها مقادیر نرخ نفوذ به مراتب زیادتری حاصل نشده است و نسبت به بخش ۵ تنها ۱۱ درصد بیشتر است. با ادامه مسیر و با تغییر ابزار برشی مقادیر گشتاور و تراست کاهش یافته است و با این وجود مقادیر نرخ نفوذ مطلوب‌تری حاصل شده است که به طور نسبی بین ۵ تا ۲۴ درصد افزایش را نشان می‌دهد. بنابراین با بررسی هم‌زمان این پارامترها می‌توان به کارایی مناسب تغییر ابزار برشی در شرایط زمین‌شناسی خط ۶ مترو تهران پی برد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تاثیر تغییر نوع تعدادی از ابزارهای برشی از دیسک به ابزار خراشی بر پارامترهای عملیاتی ماشین TBM در خط ۶ مترو تهران مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پارامترهای عملیاتی و نرخ نفوذ در بخش‌هایی قبل از تغییر نوع ابزار برشی و همچنین بعد از تغییر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط آبرفت تهران، تغییر تعدادی از دیسک‌ها با ابزار خراشی موجب کاهش میانگین تراست به اندازه حداقل ۲۸ درصد و حداکثر ۵۷ درصد و به طور میانگین ۴۴ درصد کاهش یافته است. همچنین الگوی جدید، میانگین گشتاور را به اندازه حداقل ۹ درصد و حداکثر ۵۸ درصد و به طور میانگین ۴۰ درصد کاهش داده است که می‌تواند به دلیل وجود بخش‌های ریزدانه در طول مسیر باشد که موجب گل‌گرفتگی دیسک‌ها و افزایش مقادیر تراست و گشتاور شده است. کاهش بازه تغییرات آنها نیز نشان‌دهنده دستیابی به مقادیری تقریباً ثابت از این پارامترها است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با این شیوه تغییر ابزار برشی، در عین حالی که مقادیر تراست و گشتاور کاهش یافته است، به موجب دستیابی به مقدار مطلوب نرخ نفوذ گشته است. به

- [25] Evans, I. (1972). Relative efficiency of picks and discs for cutting rock. MRDE Report No. 41, National Coal Board, UK, p. 6.
- [26] Bilgin, N., Balci, C., Tuncdemir, H., Eskikaya, S., Akgul, M., Algan, M. (1999). The performance prediction of a TBM in difficult ground condition. AFTES, Journées d'Etudes Internationales de Paris. 25-8.
- [27] Bilgin, N., Copur, H., Balci, C., Tumac, D., Akgul, M., Yuksel, A. (2008). The selection of a TBM using full scale laboratory tests and comparison of measured and predicted performance values in Istanbul Kozyatagi-Kadikoy metro tunnels. In: World Tunnel Congress, Akra, India, pp. 1509-17.
- [28] Goh, A.T.C., Zhang, W., Zhang, Y., Xiao, Y., Xiang, Y. (2018). Determination of earth pressure balance tunnel-related maximum surface settlement: a multivariate adaptive regression splines approach. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 77, 489-500.
- [29] Yagiz, S. (2008). Utilizing rock mass properties for predicting TBM performance in hard rock condition. Tunnelling and Underground Space Technology. 23, 326-39.
- [30] Hassanpour, J., Rostami, J., Khamsehchiyan, M., Bruland, A., Tavakoli, H. (2010). TBM performance analysis in pyroclastic rocks: a case history of Karaj water conveyance tunnel. Rock Mechanics and Rock Engineering. 43, 427-45.
- [31] Jain, P., Naithani, A., Singh, T. (2014). Performance characteristics of tunnel boring machine in basalt and pyroclastic rocks of Deccan traps—A case study. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 6, 36-47.
- [32] Ozdemir, L. (1977). Development of theoretical equations for predicting tunnel boreability Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library.
- [33] Yagiz, S. (2003). Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines
- [34] Gong, Q.-M., Zhao, J., Hefny, A. (2006). Numerical simulation of rock fragmentation process induced by two TBM cutters and cutter spacing optimization. Tunnelling and Underground Space Technology. 21.
- [35] Gong, Q., Jiao, Y., Zhao, J. (2006). Numerical modelling of the effects of joint spacing on rock fragmentation by TBM cutters. Tunnelling and Underground Space Technology. 21, 46-55.
- [11] Wang, F., Ozdemir, L. (1978). Tunnel-boring penetration rate and machine design. Transportation Research Record.
- [12] Fowell, R., Johnson, S. (1991). Cuttability assessment applied to drag tool tunnelling machines. In: 7th ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [13] Roxborough, F., Liu, Z. (1995). Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting. In: Proceedings of the sixth underground operator's conference, Kalgoorlie, pp. 189-93.
- [14] Lislerud, A. (1988). Hard rock tunnel boring: prognosis and costs. Tunnelling and Underground Space Technology. 3, 9-17.
- [15] Bruland, A. (1998). Prediction model for performance and costs. Norwegian TBM Tunnelling, Publication. 11.
- [16] Rostami, J. (1993). a new model for performance prediction of hard rock tbms. In: proceedings/1993 rapid excavation and tunneling conference.
- [17] Bilgin, N., Feridunoglu, C., Tumac, D., Cinar, M., Özyol, L. (2006). TBM cutting performance in Istanbul. T & T international. 17-9.
- [18] Barton, N., Gammelsaeter, B. (2010). Predicting TBM advance using the Q-system and QTBM. Tunnelling Journal (October/November). 32-6.
- [19] Gong, Q., Zhao, J., Jiang, Y. (2007). In situ TBM penetration tests and rock mass boreability analysis in hard rock tunnels. Tunnelling and underground space technology. 22, 303-16.
- [20] Shahriar, K., Sharifzadeh, M., Hamidi, J.K. (2008). Geotechnical risk assessment based approach for rock TBM selection in difficult ground conditions. Tunnelling and Underground Space Technology. 23, 318-25.
- [21] Yagiz, S., Karahan, H. (2011). Prediction of hard rock TBM penetration rate using particle swarm optimization. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 48, 427-33.
- [22] Eftekhari, M., Baghbanan, A., Bagherpour, R. (2014). The effect of fracture patterns on penetration rate of TBM in fractured rock mass using probabilistic numerical approach. Arabian Journal of Geosciences. 7, 5321-31.
- [23] Bilgin, N. (1977). Investigations into the mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks Newcastle University.
- [24] Roxborough, F., Rispin, A. (1973). Mechanical cutting characteristics of lower chalk. Tunnels & Tunnelling International. 5.

- wear prediction model for pyroclastic and mafic igneous rocks; a case history of Karaj water conveyance tunnel, Iran. *Tunnelling and underground space technology*. 43, 222-31.
- [48] Barzegari, G., Uromeihy, A., Zhao, J. (2015). Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 48, 43-57.
- [49] Tang, S.-H., Zhang, X.-P., Liu, Q.-S., Chen, P., Sun, X.-T., Sun, L., et al. (2020). Prediction and analysis of replaceable scraper wear of slurry shield TBM in dense sandy ground: A case study of Sutong GIL Yangtze River Crossing Cable Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 95, 103090.
- [50] Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. (2012). Effect of replacing disc cutters with chisel tools on performance of a TBM in difficult ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 27, 41-51.
- [51] Darya Khak Pey Consulting Engineers. (2011). Geotechnical Report of Line 6 of Tehran Metro Tunnel (In Persian).
- [36] Afrasiabi, N., Rafiee, R., Noroozi, M. (2019). Investigating the effect of discontinuity geometrical parameters on the TBM performance in hard rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 84, 326-33.
- [37] Eftekhari, M., Baghbanan, A., Bayati, M. (2010). Predicting penetration rate of a tunnel boring machine using artificial neural network. In: ISRM International Symposium-6th Asian Rock Mechanics Symposium, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [38] Ge, Y., Wang, J., Li, K. (2013). Prediction of hard rock TBM penetration rate using least square support vector machine. *IFAC Proceedings Volumes*. 46, 347-52.
- [39] Gao, L., Li, X.-b. (2015). Utilizing partial least square and support vector machine for TBM penetration rate prediction in hard rock conditions. *Journal of Central South University*. 22, 290-5.
- [40] Gao, X., Shi, M., Song, X., Zhang, C., Zhang, H. (2019). Recurrent neural networks for real-time prediction of TBM operating parameters. *Automation in Construction*. 98, 225-35.
- [41] Li, J., Li, P., Guo, D., Li, X., Chen, Z. (2020). Advanced prediction of tunnel boring machine performance based on big data. *Geoscience Frontiers*.
- [42] Zhang, Z., Meng, L., Sun, F. (2014). Wear analysis of disc cutters of full face rock tunnel boring machine. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 27, 1294-300.
- [43] Wang, L., Kang, Y., Zhao, X., Zhang, Q. (2015). Disc cutter wear prediction for a hard rock TBM cutterhead based on energy analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 50, 324-33.
- [44] Xia, Y., Guo, B., Cong, G., Zhang, X., Zeng, G. (2017). Numerical simulation of rock fragmentation induced by a single TBM disc cutter close to a side free surface. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 91, 40-8.
- [45] Pan, Y., Liu, Q., Liu, J., Liu, Q., Kong, X. (2018). Full-scale linear cutting tests in Chongqing Sandstone to study the influence of confining stress on rock cutting efficiency by TBM disc cutter. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 80, 197-210.
- [46] Yang, Y., Hong, K., Sun, Z., Chen, K., Li, F., Zhou, J., et al. (2018). The derivation and validation of TBM disc cutter wear prediction model. *Geotechnical and Geological Engineering*. 36, 3391-8.
- [47] Hassanpour, J., Rostami, J., Azali, S.T., Zhao, J. (2014). Introduction of an empirical TBM cutter

¹ Constant Cross Section