

علمی - تخصصی

بررسی افزایش دوام ریپر در برخورد با بولدرهای سخت

سیدرضا حسنی زاوه<sup>۱\*</sup>، حسین میرمحرابی<sup>۲</sup>، غلامرضا معصومی<sup>۳</sup>، حسن شمسی فراشاه<sup>۴</sup>

۱- کارشناس خدمات مهندسی، شرکت ایمن سازان تدبیر پارس ۲- مدیر خدمات مهندسی، شرکت ایمن سازان تدبیر پارس

۳- مدیر کنترل و نظارت حفاری مکانیزه ۴- مدیر مهندسی، شرکت ایمن سازان تدبیر پارس

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹)

چکیده

در حفاری مکانیزه زمین‌های نرم دارای بولدرهای سنگی از چند نوع ابزار برش بر روی کله حفار دستگاه استفاده می‌شود؛ عمده ابزار برش مورد استفاده در این حالت ریپر، دیسک و یا ترکیبی از آن‌ها می‌باشد. توانایی قطعی انواع ابزار برای برش مؤثر بولدرها در زمین‌های مختلف، هنوز کاملاً مشخص نیست و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد. در تونل قطعه شرقی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد با توجه به ریزدانه بودن مقطع تونل، عمده ابزار مورد استفاده ریپر بوده است و از دیسک‌ها فقط در محیط کله حفار استفاده شده است. اضافه شدن لایه شنی حاوی بولدر در مقطع تونل باعث کاهش دوام ریپرها و افزایش ۲۵ درصدی انرژی ویژه حفاری شده است. به منظور افزایش دوام، ریپرهای طرح NFM با ریپرهای سنگین جایگزین گردید؛ بعلاوه آلیاژهای مختلفی مورد بررسی و آزمون و خطا قرار گرفته است. تغییر در ابعاد و آلیاژ، دوام ریپرها را تا میزان ۳۷ درصد افزایش داد. با جایگزینی ریپر طرح NFM با ریپر سنگین کارکرد ریپر از ۱۸۳ متر به ۲۵۰ متر افزایش یافته است. نتیجه بررسی تعویض ابزارهای انجام شده در قطعه شرقی خط ۳ قطار شهری مشهد (حدود ۱۰ کیلومتر از مسیر) نشان می‌دهد که مصرف ابزار برشی در محدوده بولدری ۱۰ برابر محدوده قبل از برخورد به بولدر بوده است. به طور کلی در محدوده بولدر دار مورد بررسی (حدود ۱,۷ کیلومتر) تعداد ۲۸۰ ابزار تعویض شده است که استفاده از ریپر سنگین به جای ریپر NFM در حدود ۶۰ میلیارد ریال صرفه جویی در پی داشته است.

کلیدواژه‌ها: حفاری مکانیزه، بولدر، ابزار برشی، ریپر

۱. مقدمه

تأخیر به پروژه‌های حفر تونل در زمین‌های نرم می‌شود. این مسئله در هنگام حفر تونل با سیستم کنترل فشار سینه کار (Method EPB) شدیدتر می‌شود زیرا در این حالت دسترسی به کاترهد دستگاه برای تغییرات و یا تعمیرات احتمالی با محدودیت زیادی همراه است. اثر قلو و تخته سنگ موجود در زمین بر روی تونل سازی بسته به حجم و خصوصیات سنگ و روش حفاری تونل می‌تواند بین ناچیز تا شدید متغیر باشد [۳].

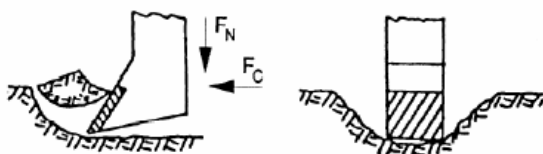
یکی از بحرانی‌ترین شرایط حفاری مکانیزه، رویارویی با خاک‌های ساینده و به دنبال آن ساییش بیش از اندازه ابزارهای برش و کله حفار ماشین است که در بسیاری از پروژه‌های تونل سازی با ماشین EPB در سراسر جهان گزارش شده است [۴]. خاک‌های ساینده و زمین‌های حاوی بولدر حتی در مسافت‌های

مطالعات ژئوتکنیکی یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی هر سازه می‌باشد [۱]. عدم شناسایی صحیح وجود قطعات سنگی بزرگ (بولدر) در خاک در دوره مطالعات باعث مشکلات فراوانی در زمان اجرای تونل‌ها می‌شود. بر اساس روش متحد (Unified) به قطعات سنگی که از الک با اندازه سوراخ‌های ۱۲ اینچ (۳۰۰ میلی‌متر) عبور نمی‌کنند، بولدر گفته می‌شود [۲]. بولدرهای سنگی یکی از مشکلات اساسی تونل سازی در زمین‌های نرم می‌باشند. در هنگام حفاری تونل نیاز به شکستن بولدرها چه به روش دستی و چه با روش‌های دیگر می‌باشد، در غیر این صورت باعث تأخیر در پروژه خواهد شد. عدم پیش‌بینی وجود بولدرهای سنگی در طول مسیر حفاری باعث تحمیل شدن هزینه اضافی و

- اندازه و شکل بولدر
- مقاومت تک‌محوری بولدر
- نوع خاک زمین، مقاومت برشی و ساینده‌گی
- فشار آب زیرزمینی (وجود عملیات هایپر باریک)
- امکان دسترسی به سینه کار برای تعویض ابزار
- زمان خود ایستایی سینه کار (حالت سینه کار باز یا تحت فشار)
- نوع سیستم حمل نخاله حفاری (به‌عنوان مثال: نقاله ماریپیچ، دوغابی و ...)
- قیمت ابزار برشی
- قطر تونل
- همچنین Hunt (2017) برای انتخاب ابزار برشی مناسب لحاظ مسائل زیر را پیشنهاد نموده است [۳]:

- میزان حجمی قلوه (CVR)
- میزان حجمی بولدر (BVR)
- ابعاد بولدرها
- مقاومت تک‌محوری سنگ‌ها
- ساینده‌گی قطعات سنگی
- نوع خاک دربرگیرنده سنگ‌ها
- مقاومت و ساینده‌گی خاک زمین
- هزینه تعویض ابزار برشی (قیمت ابزار و هزینه ناشی از مدت‌زمان موردنیاز برای تعویض)
- سرعت پیشروی مورد انتظار

در پروژه‌های حفر تونل به‌صورت مکانیزه انتخاب ابزار برش در عملکرد و کیفیت اجرایی ماشین‌آلات حفاری و در هزینه پروژه نقشی اساسی دارد. با ابداع کاربرد تنگستن، ابزار محدوده کاربرد وسیع‌تری پیدا کردند. به‌طور کلی نحوه عملکرد ابزار برش به دو دسته خراشی و غلطشی تقسیم می‌شوند. ابزار خراشی با خراشاندن سنگ آن را حفاری می‌کند ولی غلطش در کاهش نیرو مؤثر می‌باشد و لذا می‌توان ابزار غلطشی را در محدوده وسیع‌تری استفاده کرد [۸]. مهم‌ترین ابزار برش مورد استفاده در زمین‌های نرم و خاکی، ابزار گوه‌ای (ریپر) می‌باشد. این ابزار در داخل نگه‌دارنده‌هایی قرار می‌گیرند، شکل (۲).



شکل (۲). ابزار برنده گوه‌ای و نیروی وارد بر آن‌ها [۸].

کم حفاری می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی به ابزار برشی، کله حفار، نقاله ماریپیچ و... شود؛ برای حفاظت از کله حفار در مقابل سایش معمولاً سطح کله حفار با جوش‌های ضد سایش مسلح می‌گردد. البته در برخی موارد از صفحات ضد سایش مانند Hardox450 برای پوشاندن سطح کله حفار استفاده شده است [۵].

در صورت وجود فشار آب در مسیر تونل، تعبیه دریچه‌های مسدودکننده بازشوهای کله حفاری برای استفاده در زمان تعمیرات کله حفار مفید خواهد بود. در برخی پروژه‌ها کله حفار به‌وسیله ورق‌های کاربید کروم با ضخامت ۱۹ میلی‌متر مسلح شده‌اند. همچنین تعبیه سیستم هیدرولیکی آشکارساز سایش (Wear Detection) در ابزار برشی محیطی کله حفار، برای آگاهی بهنگام از استهلاک و سایش ابزار برشی، اقدامی لازم می‌باشد. در این سیستم خط روغن تا یک اینچی سر ابزار برشی ادامه دارد و در صورت آسیب‌دیدگی و نشت روغن هیدرولیک، افت فشار و عدم فشارگیری مجدد می‌تواند اپراتور را نسبت به خطر سایش و شکستگی ابزار آگاه سازد [۶].

شکل (۱) میزان عمر ابزار برشی در زمین بولدردار را نشان می‌دهد. البته باید در نظر داشت که در زمین دارای خاک‌های چسبنده دیسک کاترها ممکن است دارای دوام پایین‌تری باشند؛ زیرا با گل گرفتگی کله حفار و جلوگیری از چرخش دیسک کاترها، سایش یک‌طرفه این ابزار باعث کاهش شدید عمر دیسک‌ها و کاهش کارایی حفاری آن‌ها می‌گردد.

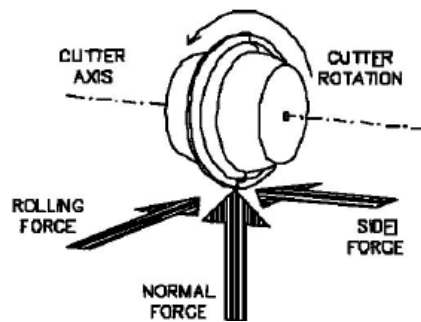
#### Cutters for TBMs in Cobbly-Bouldery Ground



شکل (۱). عمر نسبی ابزار برشی در زمین قلوه‌ای - بولدری [۳].

در یک مطالعه عوامل مؤثر بر انتخاب ابزار برشی در زمین بولدری را به‌صورت زیر برشمرده است [۷].

- مقدار بولدر

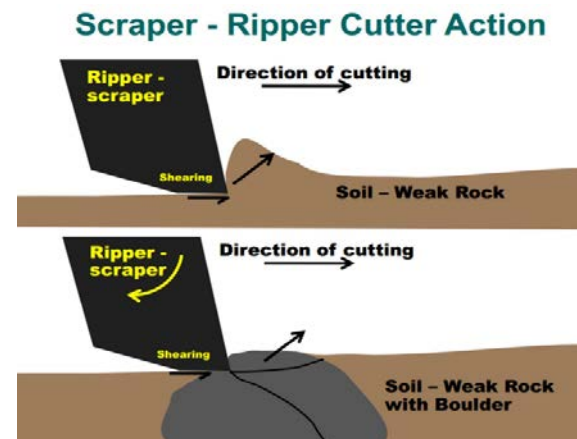


شکل (۴). ابزار برنده دیسکی و نیروهای مؤثر بر آن [۸].

در پکن دستگاه‌هایی که کله حفار آن‌ها علاوه بر اسکرپرها و دیسک کاتر دارای پیش‌برش دهنده‌ها (Pre-cutter) و گرده‌ماهی (Fish-tail) بوده‌اند، نسبت به انواع فاقد این دو ابزار، کمتر دچار استهلاک و سایش شده‌اند. به‌طور کلی پیش‌برش دهنده‌ها و اسکرپره‌های گرده‌ماهی در زمین قلو-ماسه‌ای اهمیت بیشتری از اسکرپرها دارند [۱۰]. با این وجود هنوز مباحثات فنی مربوط به تعیین کاراترین ابزار برشی برای مواجهه با بولدر در زمین‌های نرم، به نتیجه قطعی نرسیده است. ابزار استاندارد برای برش سنگ‌ها، دیسک کاتر است اما توانایی آن‌ها برای برش مؤثر بولدرها محل مناقشه است. برای عملکرد مناسب دیسک‌ها بر روی بولدرها لازم است که این قطعات سنگی بتوانند در جای خود محکم بایستند تا بار نقطه‌ای حاصل از دیسک بتواند ترک‌های کششی را بر روی سنگ ایجاد نماید. به‌منظور ایجاد امکان ترک خوردن سنگ سخت بجای کنده شدن آن در اثر برخورد با دیسک کاتر لازم است تا سرعت نفوذ در هر دور چرخش کله حفار به ۱۰ میلی‌متر محدود شود. ضربات ابزار برشی به بولدرها باعث ایجاد جهش در گشتاور می‌شود. تنش‌های ناشی از ضربات ممکن است باعث آسیب به ابزار برشی، نگه‌دارنده ابزار، گیربکس - پینیون‌ها و... شود [۷].

نتیجه برخی پژوهش‌ها حاکی از این است که چنانچه مقاومت برشی بولدر نسبت به خاک دربرگیرنده آن بیش از ۶۰۰ برابر باشد، دیسک‌ها نخواهند توانست سنگ را بشکنند، البته با توجه به وجود متغیرهای مختلف تأثیرگذار، در عمل همیشه عملکرد ابزار برشی به‌صورت دقیق تابع این تئوری نبوده است (شکل ۴). در این حالت (عدم ترک خوردن سنگ تحت فشار دیسک) آن‌قدر سنگ به درون زمین و اطراف جابجا می‌شود تا بالاخره از مقطع تونل خارج گردد یا توسط ضربات اجزای کله حفار شکسته شود [۱۱].

مته‌های گوه‌ای از نوع تیغه‌های برشی بوده و از نیروی برشی بجای نیروی فشاری برای عملیات برش سنگ‌ها استفاده می‌کنند، اما دوام کمی دارند. علت دوام کم آن‌ها بارگذاری برشی بر روی تیغه‌ها می‌باشد که باعث ایجاد ممان خمشی و تنش‌های کششی در تیغه‌ها شده و باعث فرسوده شدن این تیغه‌ها می‌شود. نوک این تیغه‌ها از جنس کاربید تنگستن بوده که مقداری کبالت به آن‌ها اضافه می‌شود. با افزایش میزان کبالت مقاومت ضربه‌ای این مته‌ها زیاد می‌شود [۸]. در خاک‌های دانه‌ای مانند شن و ماسه، ریبرها ساختار زمین را به هم می‌زنند و زمین را با عمل خراشیدن می‌شکافند و در خاک‌های چسبیده نیز تأثیر مالشی دارند. همچنین اسکرپرها معمولاً در قسمت‌های کناری هر بازوی کله حفار نصب می‌شوند و ابعاد کوچک‌تری نسبت به سایر ابزارهای برشی دارند و معمولاً جمع‌کننده مصالح حفاری شده، می‌باشند [۹]. نحوه عملکرد ریبِر در مواجهه با خاک و بولدر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳). نحوه عملکرد ریبِر در مواجهه با خاک و بولدر [۷].

یکی از ابزارهای برش دیگر ابزار دیسکی می‌باشد که قادر است حول محور خود به‌راحتی بچرخد. این دیسک‌ها برای حفر سنگ‌هایی تا مقاومت ۱۷۰ مگا پاسکال بسیار مناسب هستند، شکل (۳). دیسک‌ها مرسوم‌ترین ابزارهای حفاری هستند که هم در ماشین‌های زمین نرم و هم در ماشین‌های زمین سخت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. دیسک‌های نصب‌شده بر روی ماشین EPB در این پروژه فقط از نوع محیطی و گیج بوده است و در اطراف کله حفار تعبیه شده است.

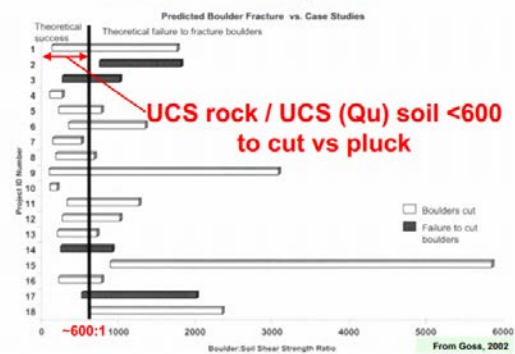
در حال حاضر برای زمین‌های مختلط، از جمله خاک‌های بولدردار، معمولاً کله حفار و ابزار برشی به‌گونه‌ای طراحی می‌گردند که همواره قابلیت جایگزینی دیسک کاتر بجای ریپر و برعکس، وجود داشته باشد. پیشنهادات جمع‌بندی شده توسط Hunt (2017) برای انتخاب ابزار برشی به‌قرار زیر می‌باشد [۳]:

در شرایطی که سینه کار پایدار است و دسترسی به سینه کار تحت فشار اتمسفر امکان‌پذیر است، ابزارهای نوع اسکرپیپر و ریپرهای سنگین (type block heavy)، که به‌وسیله نوک‌های از جنس کاربید محافظت می‌شوند، می‌تواند مقرون به‌صرفه‌ترین ابزار برای افزایش سرعت پیشروی و کاهش هزینه‌های تعویض ابزار باشند. چنانچه نسبت حجمی بولدردار زیر ۲٪ و سستی زمین خاک اجازه جابجایی به سنگ بدهد، نیز این ابزار کارایی دارند. در حالتی که نسبت حجمی بولدردار بالای ۲٪ باشد یا بولدردارهای با اندازه بیش از ۱/۵ متر فراوان باشد، بخصوص در زمین خاک‌های سخت و متراکم، احتمالاً کارایی ریپر و اسکرپیپر از بین می‌رود و ممکن است برای دسترسی به بولدردار نیاز به ورود به داخل چمبر باشد.

برای میکروتونلینگ و یا شرایط حفاری با بالای ۲ تا ۳ بار فشار آب زمین، به‌ویژه در شرایطی که برای دسترسی به سینه کار نیاز به عملیات هایپرباریک باشد، کله حفار ترکیبی شامل ریپر، اسکرپیپر و دیسک‌های برشی یا با غلبه دیسک‌ها، ممکن است مقرون به‌صرفه‌تر باشد. نظر Hunt (2016) در مورد ابزار برشی مناسب زمین‌های قلوهای- بولدردار به شرح زیر ارائه شده است [۹]:

غالباً برای ماشین‌های EPB با قطر بیش از ۳ متر و زمین‌های دارای زمین نرم و سست که دارای BVR کمتر از ۱۰ درصد باشند و همچنین فشار آب زیرزمینی پایین و شرایط زمین اجازه دسترسی به سینه کار تحت فشار هوای آزاد (برای رفع انسدادها و تعویض ابزار) را فراهم نموده باشد، ریپرهای بلوک سنگین یا دارای کاربید ممکن است مقرون به‌صرفه‌تر باشد. درحالی‌که غالباً برای تمام میکروتونلینگ‌ها و TBM های واقع در زمین‌های دارای زمین مستحکم و متراکم که دارای BVR بیش از ۱۰ درصد باشند و جاهایی که جریان شدید احتمالی نیازمند عملیات هایپرباریک و یا تزریق (جهت رفع انسداد و تعویض ابزار) باشد، دیسک کاترها می‌توانند مقرون به‌صرفه‌تر باشند. یکی از فاکتورهای مهم در اقتصاد پروژه‌های حفاری مکانیزه میزان ساینده‌گی و عمر ابزار می‌باشد. به‌عنوان مثال یکی از عوامل مهم در ساینده‌گی ابزار نسبت سختی ابزار به سختی سنگ است که در نسبت‌های بالاتر از ۰/۸۵ ساینده‌گی جدی نیست. البته بایستی در نظر داشت که سختی با دما قابل تغییر می‌باشد و

### Soil matrix strength required for disc cutters to be effective from Goss, 2002



شکل (۵). محدوده عملکرد مؤثر دیسک کاتر برای حفاری بولدردار؛ مرز تئوری شکست و موفقیت در مطالعات موردی [۱۱].

موارد استفاده فراوانی از دیسک کاتر در زمین نرم برای ماشین‌های دوغابی وجود دارد با این حال استفاده از آن‌ها در ماشین‌های EPB مناقشه برانگیز است. هرچند در مورد استفاده از دیسک در محدوده محیطی (Gauge) کله حفار این ماشین‌ها، اتفاق نظر بیشتری وجود دارد. عدم کارایی دیسک‌ها عمدتاً به خاطر قفل شدگی آن‌ها در زمین‌های حاوی رس نیز می‌باشد که منجر به سایش یک‌طرفه و در نتیجه کاهش شدید عمر آن‌ها می‌شود. از طرف دیگر محدوده کاربرد ماشین‌های EPB به‌گونه‌ای است که معمولاً لایه‌های ریزدانه در آن‌ها غالب است و یا لایه‌های درشت‌دانه احتمالی نیز دارای مقداری محتوای ریزدانه و رسی هستند. همچنین در ماشین‌های EPB برخلاف ماشین‌های سینه کار باز (Faced Open) و دوغابی، به خاطر وجود مصالح خمیری شده در پشت دیسک‌ها، مقاومت غلطشی بسیار زیاد می‌باشد و در نتیجه چرخش و عملکرد عادی آن‌ها با مشکل روبرو می‌شود. بعلاوه هزینه، زمان و انرژی موردنیاز برای تعویض دیسک‌ها نسبت به ریپر (Ripper) بیشتر است؛ بنابراین به‌جز در موارد برخورد به سینه کار یکدست سنگی، استفاده از دیسک کاتر در ماشین‌های EPB توصیه نمی‌گردد. برخی تحقیقات نشان داده است که هرچند مؤثرترین ابزار برشی در سنگ‌های سخت (Rock Hard) دیسک‌های منفرد هستند اما در زمین‌های بولدردار دیسک‌های دو و سه ردیفه حاوی کاربید مؤثرتر بوده‌اند (شکل ۵).



شکل (۶). دیسک‌های تک و چند ردیفه

جدول (۱). زمین‌شناسی عمومی در دو مسیر شرقی و غربی

قطعه غربی	قطعه شرقی	قطعه تونل
ماسه‌ای همراه با سیلت و شن	سیلتي همراه با رس	توصیف خاک

نوع لایه‌های زمین‌شناسی در ابتدای قطعه شرقی تناوبی از لایه‌های سیلتي - ماسه‌ای و رسی - سیلتي است که در ادامه مسیر عمدتاً شامل لایه‌های رسی و سیلتي همراه با لایه‌های شنی که گاهی حاوی بولدر هستند، می‌باشد. بر اساس اطلاعات موجود لایه‌های حاوی بولدر از کیلومتر ۶+۲۷۰ گزارش شده است. در شکل (۷) نمونه‌ای از بولدرهای موجود در مقطع تونل نشان داده شده است.

بر اساس نتایج تحلیل‌های مقطع نازک و آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره که بر روی مغزه‌های تهیه‌شده از بولدرها صورت پذیرفته است (شکل ۸)، مشخص گردید که جنس این بولدرها از خانواده سنگ‌های آذرین به نام سرپانتینیت با مقاومت فشاری تک‌محوره بیشتر از ۱۰۰ مگا پاسکال می‌باشد. شایان‌ذکر است متأسفانه هیچ‌گونه ابزار شناسایی زمین‌شناسی پیش‌رو مانند بیم، تی اس پی و ... در اختیار تیم اجرا نبوده است.



شکل (۸). نمونه‌ای از بولدرها (ایستگاه پانزده خرداد)



شکل (۹). آزمایش‌های مقاومت فشاری (الف وب) (ج) مقطع نازک

در دمای بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد سختی کوارتز بیشتر از کاربید است [۸]. توجه به این موضوع شناسایی نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ از روی مقاطع میکروسکوپی و در نهایت شناسایی نوع سنگ تشکیل‌دهنده بولدر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. در قطعه شرقی تونل پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد با توجه به برخورد به محدوده بولدردی سایش ابزار (شکستگی) به‌طور معناداری افزایش یافته است؛ به همین منظور در این پژوهش تأثیر تغییر شکل هندسی و نوع آلیاژ ریپر مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه نتایج آن ارائه می‌شود.

## ۲. معرفی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد

پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد به طول حدود ۲۸ کیلومتر حداقل انتهای بلوار امیریه در غرب و شهرک ابودر در جنوب شرق شهر مقدس مشهد در حال احداث می‌باشد. احداث تونل این پروژه به‌وسیله دو دستگاه TBM از دو جبهه شرقی و غربی از محل شفت پشتیبان میدان فردوسی، در مرکز خط، آغاز شده است. شکل (۶) نمایی از مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد را نشان می‌دهد. هر دو مسیر با دو دستگاه ماشین حفار فشار تعادلی زمین با قطر ۹/۴۳ متر ساخت شرکت NFM (برای خط ۲ قطار شهری مشهد قبلاً طراحی و ساخته شده است) حفاری می‌شود.



شکل (۷). نمایی کلی از مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد

## ۳. زمین‌شناسی پروژه خط ۳ قطار شهری مشهد

مطالعات ژئوتکنیکی مسیر خط ۳ قطار شهری مشهد در سه فاز یک، دو و تکمیلی حین اجرا انجام شده است؛ به‌طوری‌که در فاز یک حدوداً هر یک کیلومتر یک گمانه و در فاز دو هر پانصد متر یک گمانه حفاری شده است و در فاز تکمیلی با توجه به نیازهای اجرایی و شرایط خاص اقدام به حفر گمانه شده است. به‌طورکلی در این پروژه دو واحد زمین‌شناسی متفاوت در قطعه شرقی و غربی وجود دارد که در جدول (۱) نشان شده است.

#### ۴. سایش ابزار

بر اساس طراحی شرکت سازنده (NFM)، کله حفار ماشین دارای شش بازو (اسپوک) باقابلیت حفاری در جبهه کار مختلط است که با ابزارهای مختلف حفاری شامل دیسک کاتر، ریپر و درگ بیت (Drag bit) مجهز شده است. در شکل (۹) ماشین EPB قطعه شرقی خط ۳ قطار شهری مشهد نشان داده شده است. با توجه به نوع زمین شناسی قطعه شرقی (سیلیتی همراه رس) بر روی کاترهد ۴۶ عدد ریپر و ۷ عدد دیسک کاتر نصب شده است. همان طور که از شکل (۹) مشخص است دیسک فقط در محیط کاترهد نصب شده است. علت استفاده نکردن از دیسک به جای ریپر، وجود بخش ریزدانه قابل توجه در مقطع تونل بوده است که به دلیل ایجاد گل گرفتگی مانع از چرخش دیسک می گردد و نتیجه آن سایش زود هنگام و یک طرفه دیسکها می باشد.

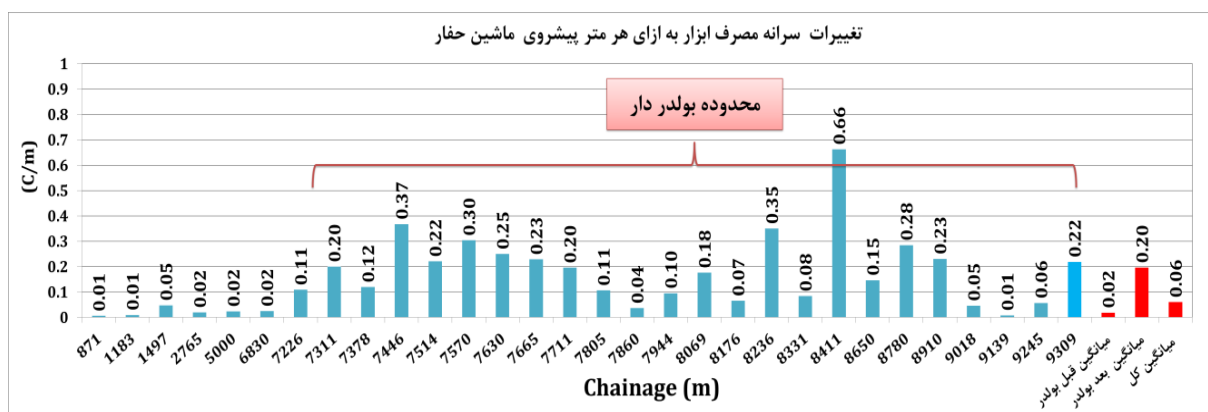
با توجه به آشکار شدن تأثیر بولدر و مخاطرات آن بازدید چمبر و تعویض ابزار برشی در محدوده بعد از کیلومتر ۶+۲۷۰ به طور منظم انجام شده است. شکل (۱۰) نمونه‌ای از سایش ابزار در محیط بولدردی را نشان می دهد. شکل (۱۱) تغییرات سرانه مصرف ابزار برشی برای دو محدوده دارای بولدر و فاقد بولدر در خط ۳ قطار شهری مشهد را نشان می دهد. سرانه مصرف ابزار از تقسیم تعداد ابزار تعویض شده به فاصله بین دو ایستگاه تعویض ابزار به دست می آید؛ همان طور که مشخص است در محدوده بولدردی سرانه مصرف ابزار برشی ۱۰ برابر محدوده فاقد بولدر بوده است.



شکل (۱۱). نمونه‌ای سایش ابزار در محدوده بولدردی



شکل (۱۰). نمای کلی از دستگاه EPB-TBM قطعه شرقی خط ۳ قطار شهری مشهد



شکل (۱۲). تغییرات سرانه مصرف ابزار برشی در قطعه شرقی خط ۳ قطار شهری مشهد

میلیون ریال) به مراتب ارزان تر از ریپرهای NFM (۲۰۰ میلیون ریال) بوده است؛ لذا از دو جهت افزایش عمر و کمتر بودن هزینه خرید برای پروژه، ارزش افزوده ایجاد گردیده است و همچنان ادامه دارد. به طور کلی در محدوده بولدری مورد بررسی (حدود ۱,۷ کیلومتر) تعداد ۲۸۰ ابزار تعویض شده است که استفاده از ریپر سنگین به جای ریپر NFM در حدود ۶ میلیارد تومان صرفه جویی در پی داشته است (مبنا محاسبه قیمت‌ها: سال ۱۳۹۹).



شکل (۱۳). ریپرهای اولیه ماشین حفار (طرح NFM - راست) و ریپرهای سنگین ایرانی (سمت چپ)



شکل (۱۴). نمونه‌ای از ریپر سنگین نو و سایش یافته

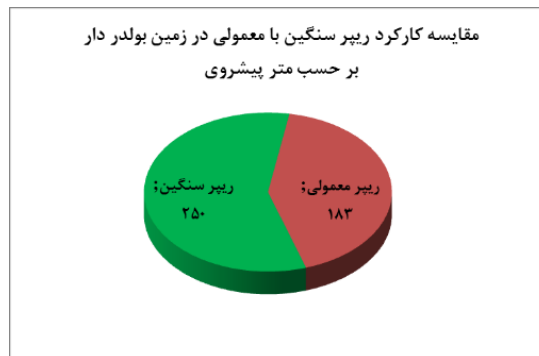
#### ۴-۱. استفاده از ریپر سنگین به جای ریپر اولیه در زمین بولدردار

یکی از عوامل مهم و مؤثر در موفقیت و راندمان مناسب حفاری با TBM، طراحی کله حفار متناسب با شرایط زمین و انتخاب مناسب ابزار برشی می‌باشد. شرکت سازنده ماشین حفار برای حفاری تونل‌های خط ۲ قطار شهری مشهد از نوع ریپر NFM استفاده نموده است (شکل ۱۲- راست). این ریپرها تا رسیدن ماشین حفار قطعه شرقی خط ۳ به محدوده لایه‌های بولدردار مناسب بوده است؛ اما با شروع برخورد ماشین به قطعات سنگی بزرگ و محکم به دلیل شکننده بودن الماسه‌های ابزار، این ریپرها دچار سایش‌های بی‌سابقه و شدید شده است. با توجه به بررسی تجارب جهانی در برخورد با زمین‌های دارای قطعات سنگی، یکی از پیشنهادات اجرایی، استفاده از ریپر سنگین بجای ریپرهای اولیه می‌باشد. منظور از ریپرهای سنگین، ریپر با ابعاد بزرگ‌تر است. در جدول (۲) مقایسه ابعادی ریپر سنگین با ریپر نوع NFM ارائه شده است.

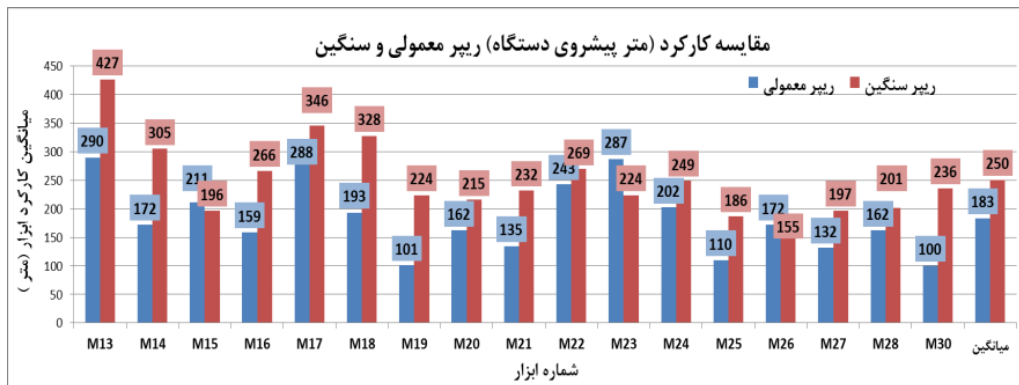
جدول (۲). مقایسه ابعادی ریپر سنگین با ریپر NFM

پارامتر	ریپر NFM	ریپر سنگین
ارتفاع کل (cm)	۳۳	۳۶
ارتفاع تاج (cm)	۱۰	۱۶
عرض تاج (cm)	۸	۱۰,۵
طول تاج (cm)	۱۶	۱۹

با جایگزینی ریپرهای سنگین (شکل ۱۲- چپ و شکل ۱۳) عمر این ابزار به میزان حدود ۳۷٪ افزایش یافته است (شکل ۱۴). شکل (۱۵) کارکرد ریپر معمولی (NFM) و سنگین در موقعیت‌های مختلف کاترهد (زمین بولدردار) را نشان می‌دهد. نکته قابل توجه اینکه از لحاظ قیمتی نیز ریپرهای سنگین (۳۵

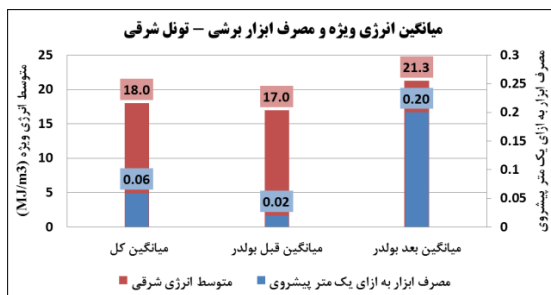


شکل (۱۵). تفاوت کارکرد ریپر سنگین با ریپر معمولی (NFM) در زمین بولدردار



شکل (۱۶). مقایسه کارکرد ریپر معمولی (NFM) و سنگین در موقعیت‌های مختلف کاترهد (زمین بولدردار)

عبارتی انرژی ویژه در محدوده بولدردی ۲۵ درصد بیشتر شده است در حالی که مصرف ابزار ۱۰ برابر شده است.



شکل (۱۷). مقایسه متوسط انرژی ویژه و میانگین مصرف ابزار به ازای یک متر پیشروی در محدوده بولدردی و فاقد بولدرد - قطعه شرقی خط ۳

## ۶. نتیجه‌گیری

حضور لایه شنی حاوی بولدرد در مقطع تونل باعث کاهش دوام ریپرها و افزایش ۲۵ درصدی انرژی ویژه حفاری شده است. به منظور افزایش دوام، ریپرهای طرح NFM با ریپرهای سنگین جایگزین و همچنین آلیاژهای مختلفی مورد بررسی و آزمون و خطا قرار گرفته است. تغییر در ابعاد و آلیاژ، دوام ریپرها را تا میزان ۳۷ درصد افزایش داده است. با جایگزینی ریپر سنگین به جای ریپر طرح NFM، کارکرد ریپر از ۱۸۳ متر به ۲۵۰ متر افزایش یافت. نتیجه بررسی تعویض ابزارهای انجام شده (حدود ۱۰ کیلومتر از مسیر) نشان می‌دهد که مصرف ابزار برشی در محدوده بولدردی ۱۰ برابر محدوده قبل بولدرد بوده است. قابل ذکر است از بین آلیاژهای استفاده شده در تولید ریپر، آلیاژ نیکل کروم عملکرد بهتری داشته است. به‌طور کلی در محدوده بولدردی مورد بررسی (حدود ۱,۷ کیلومتر) تعداد ۲۸۰ ابزار تعویض شده است؛ در نتیجه استفاده از ریپر سنگین به جای ریپر NFM در حدود ۶ میلیارد تومان صرفه‌جویی در پی داشته است.

با بررسی پژوهش‌های قبلی مشخص می‌شود که استفاده از آلیاژهای شکل‌پذیر در برخورد با بولدرد عملکرد بهتری دارد و در مقابل در اثر سایش عملکرد ضعیف‌تری را نشان می‌دهد. در طی بررسی ریپر سنگین در این پروژه، ریپرهای سنگین با آلیاژهای مختلف از جمله نیکل-کروم، مولیبدن دار، منگنز دار و ... مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۳) متراژ کارکرد ریپرهای سنگین با آلیاژهای مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ریپر سنگین با آلیاژ نیکل - کروم سرانه مصرف کمتری به ازای یک متر پیشروی در محدوده بولدردی خط ۳ قطار شهری مشهد داشته است.

جدول (۳). کارکرد ریپرهای سنگین با آلیاژ مختلف

نوع آلیاژ ریپر سنگین	پیشروی (متر)	تعداد ابزار تعویض شده	سرانه مصرف ریپر به ازای هر متر پیشروی
نیکل کروم	۵۲۶	۷۸	۰,۱۵
منگنز دار	۶۵	۲۲	۰,۳۴
مولیبدن دار	۴۹۹	۱۳۷	۰,۲۷

## ۵. تأثیر بولدرد بر انرژی ویژه حفاری

بهینه کردن مصرف انرژی در حین حفاری به دلایل تخریب زیست‌محیطی و مسائل اقتصادی ناشی از توان مصرفی بالای دستگاه TBM، سال‌هاست که مورد توجه قرار گرفته است. در همین راستا، مفهوم انرژی ویژه به‌عنوان معیاری برای بیان مصرف انرژی، تعریف شده است. انرژی لازم برای حفاری یک متر مکعب از زمین را انرژی ویژه گویند [۱۲]. در این بخش به مقایسه متوسط انرژی ویژه و میانگین مصرف ابزار به ازای یک متر پیشروی در قبل از محدوده بولدردی و بعد از برخورد به محدوده بولدردی پرداخته شده است. همان‌طور که از شکل (۱۶) مشخص است متوسط انرژی ویژه در محدوده قبل از برخورد به بولدرد MJ/m<sup>3</sup> ۱۷/۰ و بعد از برخورد به بولدرد MJ/m<sup>3</sup> ۲۱/۳ شده است؛ به



## ۷. مراجع

- [1] M. Nasiri, "Validation of the results of soil strength parameters at the Imam Khomeini Mosalla of Tehran," *Construction Science and Technology* vol. 1, no. 4, pp. 1-12, 2021. (In Persian)
- [2] D. ASTM, "2488," Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure). ASTM west conshohocken, 2000.
- [3] S. W. Hunt, "Tunneling in cobbles and boulders," *Breakthroughs in Tunneling, Short Course, Chicago IL, August*, pp. 14-16, 2017.
- [4] H. Moammeri and S. Tarigh Azali, "Abrasive effects on TBMs used to bore current or recently completed projects in Iran," *World Tunnelling* (December 2010), pp. 24-27, 2010.
- [5] E. Comis and D. Chastka, "Design and Implementation of a Large-Diameter, Dual-Mode "Crossover" TBM for the Akron Ohio Canal Interceptor Tunnel," *Proc. RETC 2017*, pp. 488-497, 2017.
- [6] M. DiPonio, D. Chapman, and C. Bournes, "EPB tunnel boring machine design for boulder conditions," in *Proceedings of 2007 Rapid Excavation and Tunneling Conference, Traylor MT & Townsend JW (Eds), SME, Littleton, Colorado, 2007*, pp. 215-228.
- [7] S. W. Hunt, "Tunneling in cobbles and boulders," *The 8th annual breakthroughs in Tunneling short course. University of Colorado Boulder, September 12-14, 2016*.
- [8] J. Rostami, "Rock cutting tools for mechanical mining," in *SME annual Meeting, Denver, Colorado, Society of Mining Metallurgy and Exploration Inc, 2001*.
- [9] J. B. O'Carroll, *A Guide to planning, constructing, and supervising earth pressure balance TBM tunneling*. Parsons Brinckerhoff, 2005.
- [10] D. Yuan, J. Peng, and H. Q, "Case Study of Cutterhead Selection and Cutting Tools Configuration of Shield Machines in Sandy Cobble Stratum," in *Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions. Bergen, Norway., 2017*, pp. 1089-1098.
- [11] C. Goss, "Predicting boulder cutting in soft ground tunneling," in *North American Tunneling 2002: CRC Press, 2002*, pp. 37-46.
- [12] R. Teale, "The concept of specific energy in rock drilling," in *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 1965, vol. 2, no. 1: Elsevier, pp. 57-73*.