سال ۲۹، شماره ۱۳۰، صفحات ۱۱–۲۴، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

لزوم بومی‌سازی دانش بهسازی ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام در شرایط متنوع زمین‌شناسی ایران

وحید جودکی[۱ و *]، جعفر حسن‌پور[۲]، رسول اجل‌لوئیان[۳]، مسعود مسیح‌طهرانی[۴]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه سازه‌های زیرزمینی، شرکت مهندسین مشاور ساحل امید ایرانیان

[۲] دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تهران

[۳] استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه اصفهان

[۴] استادیار، گروه مهندسی مکانیک خودرو، دانشگاه علم و صنعت

*مسئول مکاتبات: joudaki_vahid@yahoo.com

◄ چکیده

پیشینه حوزه‌های مطالعاتی مشترک مابین مهندسین مکانیک با متخصصین علوم زمین را می‌توان در شروع مباحث ترامکانیک دانست. مطالعات ترامکانیک در حیطه علوم زمین، بیشتر بر حوزه زمین‌شناسیِ نظامی (توسعه صنعت ماشین‌آلاتِ جنگی بر پایه شناخت مورفولوژی عوارض زمین و نیز مباحث مکانیک خاک و سنگ) متمرکز بوده است. اما یکی از حوزه‌های صنعتیِ مشترک میان مهندسین مکانیک و زمین‌شناسان در کشور ما، فناوری تونل‌سازی مکانیزه است. طراحی و ساخت ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام (در شرکت‌های سازنده خارجی)، بر اساس نتایج مطالعات زمین‌شناسی انجام می‌گیرد. شرایط خاص زمین‌شناسی ایران موجب شده استفاده از ماشین‌های حفار وارداتی، در پروژه‌های تونل‌سازی با چالش‌های فراوانی مواجه باشد. نقص‌های فنی و عملکرد قطعات مختلف دستگاه (و حتی میزان مواد مصرفی دستگاه: انواع روغن، گریس و...) نیز به‌طور مستقیم مرتبط با تغییرات شرایط زمین‌شناسی سازندهای مسیر پیشروی است. گاهی در حین حفاری، تغییرات ناگهانی شرایط زمین‌شناسی (وقوع مخاطراتِ پیش‌بینی نشده)، موجب می‌شود که اعضای تیم راهبری دستگاه برای ادامه روند پیشروی، ناگزیر به اِعمال تغییراتی در ساختار مکانیکی تی‌بی‌ام گردند. در این مقاله ضمن پرداختن به تجارب راهبری ماشین‌های تی‌بی‌ام در پروژه‌های «قمرود، چمشیر، بازی‌دراز و کرمان»، به ضرورت بومی‌سازی دانش در زمینه تأمین قطعات یدکی و بهسازی ماشین‌های تی‌بی‌ام پرداخته شده است.

◄ واژگان کلیدی

ترامکانیک
تی‌بی‌ام
زمین‌شناسی
مکانیک خاک
مکانیک سنگ

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۸/۲۳
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۶/۱۹

۱ مقدمه

سابقه حفاری مکانیزه در ایران به خریداری سه دستگاه تی‌بی‌ام[1] ساخت ژاپن در سال ۱۳۵۶ باز می‌گردد. تی‌بی‌ام‌ها تولید شرکت کاواساکی بود که توسط شرکت پیمانکار کومه‌گایی ژاپن در پروژه انتقال آب کوهرنگ به‌کار گرفته شد. اما تجربه نخست به دلیل ناسازگاری و عدم تناسب طراحی دستگاه‌ها با شرایط زمین‌شناسی ساختگاه طرح (زون زاگرس مرتفع)، با شکست مواجه شد. پس از آن، صنعت حفاری مکانیزه تا میانه دهه هفتاد، هیچگونه فعالیتی در کشور نداشته است. در حقیقت شکوفایی این صنعت مربوط به دو دهه اخیر است. در سال‌های اخیر صنعت حفاری مکانیزه در زمینه تونل‌های مترو، انتقال آب، جاده‌ای، تأسیسات و ... در کشور گسترش قابل ملاحظه‌ای را تجربه کرده است.

رخدادهای زمین‌شناسی در مسیر پیشروی تی‌بی‌ام (تغییرات لیتولوژیکی، برخورد به نواحی گسلی، هجوم آب زیرزمینی، انتشار گازهای سمی ـ انفجاری و ...)، به‌طور مستقیم بر عملکرد قطعات مکانیکی و الکترونیکی دستگاه‌های تی‌بی‌ام (و در نتیجه آن روند پیشروی عملیات حفاری) تأثیرگذارند. از این‌رو می‌بایست پیش از انتخاب دستگاه، با انجام مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکیِ دقیق، اطلاعات مورد نیاز به شرکت‌های سازنده ارائه شود. بحث پیرامون تعیین مشخصات فنی ماشین‌های حفار و انتخاب شرکت‌های سازنده از حوصله این مقاله خارج است؛ اما نکته مهم این است که هرگونه خطا در این مرحله می‌تواند منجر به عدم کارایی دستگاه و بُروز مشکلات عدیده در حین عملیات حفاری شود. در برخی پروژه‌ها عدم پیش‌بینی دقیق مخاطرات زمین‌شناسی و در نتیجه عدم تناسب ساختار دستگاه‌های تی‌بی‌ام با شرایط زمین‌شناسی منطقه احداث تونل، موجب تشدید مخاطرات و تأخیر در برنامه زمانبندی اجرای طرح‌ها شده است. از این‌رو کاربرد ماشین‌آلات حفاری در پروژه‌ها با مشکلاتی همراه است و شرکت‌های پیمانکار برای سازگاری هر چه بیشتر این ماشین‌آلات با شرایط پیچیده زمین‌شناسی، در مرحله حفاری نیز نیازمند همکاری چندجانبه متخصصین گرایش‌های مختلف (زمین‌شناسی، مکانیک، برق و...) در قالب یک تیم فنی هستند.

در این مقاله با پرداختن به تجارب حفاری مکانیزه تونل‌های انتقال آب قمرود، چمشیر، بازی‌دراز و کرمان (جدول ۱)، به ضرورت آغاز پژوهش‌های بین‌رشته‌ای (مابین مهندسین مکانیک با زمین‌شناسان) در صنعت تونل‌سازی

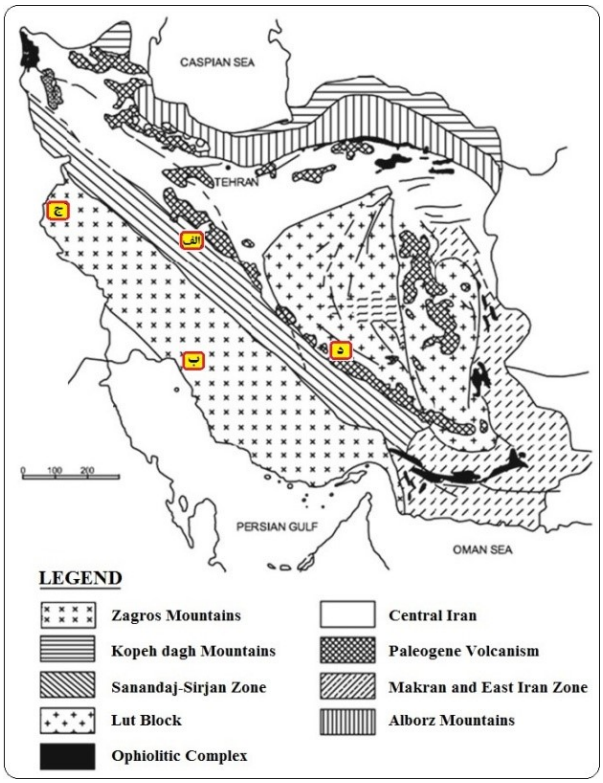
[1] TBM (Tunnel Boring Machine)

مکانیزه پرداخته شده است.

موقعیت تونل‌های مذکور در پهنه‌بندی زون‌های ساختاری زمین‌شناسی ایران، در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: معرفی تونل‌ها و تجارب زمین‌شناسی عملیات حفاری.

تونل	طول (کیلومتر)	پهنه‌های ساختاری و سازندهای زمین‌شناسی ساختگاه	مشخصات تی‌بی‌ام	مخاطرات زمین‌شناسی حین حفاری	منبع
قمرود (قطعه ۳ و ۴)	۱۸	زون سنندج سیرجان. آهک، دولومیت، شیست، اسلیت، فیلیت، گرافیت شیست، ماسه سنگ، کوارتزیت.	D.Sh/ Wirth. Φ : ۴/۷ m	لهیدگی در سنگ‌های فشارنده، ریزش در پهنه‌های گسلی و خردشده، سینه‌کار مختلط، ورود آب	[۱–۴]
چمشیر	۷/۵	زون زاگرس چین خورده سازندهای آغاجاری، بختیاری. کلی استون، سیلت استون، مارن استون، ماسه سنگ، کنگلومرا.	S.Sh/Herrenknecht. Φ : ۵/۳ m	کلاکینگ، ساینگی، ریزش و ناپایداری توده‌سنگ	[۵–۸]
بازی‌دراز	۸/۵	زون زاگرس چین‌خورده محور تونل در بخشی از یک تاقدیس بزرگ قرار گرفته و از میان تشکیلات سازندهای آغاجاری، گچساران، آسماری، تله‌زنگ، پابده و گورپی عبور می‌کند. عمده تشکیلات سنگی شامل آهک، شیل، مارن، کلی‌استون، ماسه سنگ و ... است.	EPB Hard rock/ Φ : ۶/۷ m Lovat.	کلاکینگ، مچاله شوندگی، ریزش در زون‌های گسلی، هجوم آب، انتشار گاز سمی سولفید هیدروژن، خطر انفجار گاز متان و ...	[۹، ۱۰]
کرمان (قطعه شمالی)	۱۹	کمربند ولکانیکی ارومیه دختر و زون ایران مرکزی سنگ‌های پیروکلاستیک و توده‌های ولکانیکی همراه با سنگ‌های آذرین نفوذی سخت و ساینده.	D.Sh/ H.K. Φ : ۴/۶۵ m	سنگ‌های سخت و ساینده، ریزش در پهنه‌های خردشده، هجوم آب و ...	[۱۱، ۱۲]



شکل ۱: پهنه‌بندی زون‌های ساختاری زمین‌شناسی ایران [۱۳]. موقعیت تونل‌ها: (الف) قمرود. (ب) چمشیر. (ج) بازی‌دراز. (د) کرمان.

۲ پیشینه حوزه‌های مطالعاتی مشترک

پیشینه حوزه‌های مطالعاتی مشترک مابین مهندسین مکانیک با متخصصین علوم زمین را می‌توان در شروع مباحث ترامکانیک دانست. مفهوم ترامکانیک[2] برای اولین بار در مرکز تحقیقات خودروهای نظامی ارتش ایالات متحده آمریکا مطرح شد. این مفهوم برای مطالعه و بهبود عملکرد خودروها بر روی زمین (برهم‌کنش چرخ خودروها با خصوصیات زمین) ارائه شد [۱۴].

بکر[3] از جمله پژوهشگران سرشناس در حوزه دانش ترامکانیک است و در تألیفات خود به تشریح مبانی این دانش پرداخته است [۱۵–۱۷]. بکر بر پایه اصول ترامکانیک، چرخ‌های کاوشگرهای آپولو را با استفاده از تسمه‌هایی از جنس تیتانیوم، متناسب با شرایط تشکیلات خاکی و سنگی در سطح کره ماه (سازگار با خلأ و دمای سطح ماه) طراحی نمود [۱۸].

محققین ترامکانیک در حیطه مباحث زمین‌شناسی به کنکاش در پارامترهای مهندسی خاک‌ها و سنگ‌ها پرداخته‌اند. در این میان برای متخصصین حوزه علوم زمین (در کشورهای صنعتی)، مفاهیم ترامکانیک بیشتر در شاخه زمین‌شناسیِ نظامی[4] شناخته شده است. اما در ایران چنین مباحثی در آموزش‌های دانشکده‌های زمین‌شناسی مغفول مانده است و هیچگونه منبع آموزشی و شناختی پیرامون آن وجود ندارد.

توسعه تحقیقات در زمینه خودروهای نظامی (و نیز فضاپیماها) موجب شد با گذشت زمان نتایج مطالعات ترامکانیک در حوزه ادوات کشاورزی و ماشین‌آلات عمرانی ـ معدنکاری نیز مورد استفاده قرار گیرد.

نیازمندی به توسعه دانش طراحی ماشین‌آلات مرتبط با زمین، فعالیت‌های اکتشافی در «زمین، بستر دریاها، در سایر سیارات منظومه شمسی و...» موجب توسعه دانش ترامکانیک می‌شود [۱۸]. در تحقیقات برخی پژوهشگران به تبیین ارتباط ترامکانیک با مبانی زمین‌شناسی پرداخته شده است. به‌طور مثال در یک مقاله، به تشریح ارتباط ترامکانیک با مبانی ژئوتکنیک و مکانیک خاک پرداخته شده است [۱۹]. در مقاله دیگری به بررسی تأثیرات تشکیلات سطح کره مریخ (رگولیت[5]، خاک‌های ریزدانه و ...) بر عملکرد حرکتی کاوشگرهای فضایی پرداخته شده است [۲۰].

در علوم زمین‌شناسی نظامی، شیوه مطالعه خاک‌ها فراتر از مفاهیم سنتی است و تأثیر پارامترهای بافت، مقاومت، رطوبت خاک و ... بر فعالیت‌های نظامی و طراحی ماشین‌آلات جنگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۲۱]. در مطالعات محققین ترامکانیک، ادغام اطلاعات پارامترهای خاک و مورفولوژی زمین برای پیش‌بینی پوشش خاک و تأثیرات آنها بر تحرک

[2]terramechanics [3]M. G. Bekker [4]Military Geology [5]regolith

خودروها (برهم‌کنش زمین و چرخ‌های خودرو) ضروی است [۲۲–۲۴].

علاوه بر خودروهای جنگی، شرایط زمین‌شناسی حتی می‌تواند بر عملکرد جنگ‌افزارهای هوایی نیز تأثیرگذار باشد. پیرامون این موضوع می‌توان به شکست عملیات نیروی هوایی ارتش آمریکا در صحرای طبس ایران (عملیات پنجه عقاب در سال ۱۹۸۰ میلادی) اشاره کرد که در یک مقاله به شرح تأثیرات شرایط زمین‌شناسی (نقش ارتفاعات زاگرس در ایجاد ناپایداری جوی، تأثیر پوشش خاکی صحرای طبس و ...) بر عملکرد هلیکوپترها در این عملیات پرداخته شده است [۲۵].

در زمینه ماشین‌آلات معدنکاری، در یک تحقیق که در مجله ترامکانیک ارائه شده، محقق به بررسی تأثیر پارامترهای مهندسی سنگ‌ها (نمونه‌های ماسه‌سنگ، ریولیت، شیل، آهک، گرانیت، کوارتزیت و آندزیت) بر سرعت حفاری مته‌های دستی، پرداخته است [۲۶].

در زمینه ماشین‌های حفارِ تی‌بی‌ام نیز مطالعه خصوصیات زمین‌شناسیِ خاک‌ها و سنگ‌ها، نقش مهمی در طراحی ساختار دستگاه‌ها و نیز روند حفاری آنها در مرحله اجرای تونل‌ها دارد.

اگرچه طراحی همه اجزای مکانیکی دستگاه تی‌بی‌ام، در حیطه موضوعات ترامکانیک قرار نمی‌گیرد، اما طراحی دستگاه در بخش کله‌حفار و اندرکنش ابزارهای برشیِ آن با زمینِ پیش‌رو، به‌طور مستقیم در قالب مفاهیم علم ترامکانیک می‌گنجد و قابلیت بحث دارد.

در کشورهای صاحب سبک در صنعت تونل‌سازی مکانیزه، تکنولوژی ساخت ماشین‌آلات حفاری بر پایه مطالعات بین‌رشته‌ای مهندسین مکانیک با سایر رشته‌ها (زمین‌شناسی، الکترونیک، متالوژی و...) و به واسطه استفاده از نتایج مطالعات زمین‌شناسی، توسعه یافته‌اند. اما در کشور ما درک چندانی از ارتباط گرایش‌های مهندسی مکانیک با علومی نظیر زمین‌شناسی (حتی در محیط‌های دانشگاهی) وجود ندارد. در شرایط فعلی صنعت تونل‌سازی کشور در بحث تأمین لوازم و قطعات یدکی ماشین‌های وارداتی (و حتی گاهی در زمینه راهبری دستگاه‌ها در شرایط نامساعد زمین‌شناسی) با چالش‌هایی مواجه است. در پژوهشی از همین نویسندگان، نتایج حاکی از آن است که مابین پژوهشگران زمین‌شناس و دانش‌آموختگان مهندسی مکانیک در کشور هیچگونه مطالعات پژوهشی بین‌رشته‌ای (در حوزه‌های مشترک نظیر ترامکانیک و...)، صورت نمی‌گیرد [۲۷].

مؤلفین در این مقاله بر اساس تجارب صنعتی خود معتقدند که مهندسان مکانیک در یک پروژه حفاری مکانیزه، می‌بایست از چگونگی تأثیرات شرایط مختلف زمین‌شناسی بر عملکرد دستگاه تی‌بی‌ام آگاه باشد. در مقابل زمین‌شناس هم می‌بایست تا حدودی از خصوصیات دستگاه (تجهیزات مکانیکی، الکترونیکی و پارامترهای عملیاتی آن) آگاه باشد. در صورت تحقق این امر، اعضای تیم فنی راهبری می‌توانند با دریافت نظرات یکدیگر، در مواجهه با تغییرات ناگهانی و مخاطره‌آمیز شرایط زمین (ناشی از عدم تطابق پیش‌بینی‌های پیش از اجرا با واقعیت زمین‌شناسی هنگام اجرا)، تمهیدات لازم را چاره‌اندیشی کنند و ضمن عبور دادن دستگاه از نواحی پُرمخاطره، از توقف عملیات حفاری و نقص‌های فنی دستگاه جلوگیری نمایند. همکاری و درک متقابل مهندسین مکانیک و زمین‌شناسان در تیم راهبری دستگاه، می‌تواند روند بررسی مشکلات و اتخاذ تصمیمات اجرایی (حتی در زمینه تعمیرات مکانیکی دستگاه) را تسهیل نماید.

پیش از ورود به بحث می‌بایست یادآور شد گزارشات این تحقیق مربوط به حفاری ماشین‌ها در زمین‌های سنگی است. برهم‌کنش ماشین‌های حفار با چنین زمین‌هایی، متأثر از مقاومت فشاری [۶]، شاخص کیفی[۷] و سایر پارامترهای مهندسی سنگ است. لذا در این مقاله اشاره‌ای به خصوصیات محیط‌های خاکی نمی‌شود. توصیف امتیازات پارامترهای مهندسی در یکی از رایج‌ترین طبقه‌بندی‌های توده‌سنگ در جدول ۲ ارائه شده است. در ادامه به تشریح تجارب چهار پروژه مهم حفاری مکانیزه در کشور پرداخته می‌شود.

۳ پروژه قمرود (قطعه ۳ و ۴)

پروژه قمرود را می‌توان نخستین تجربه بزرگ و جدی در صنعت حفاری مکانیزه ایران دانست که در آن از تعداد سه دستگاه تی‌بی‌ام استفاده گردید. در مواجهه با شرایط نامساعد زمین‌شناسی در حین حفاری تغییراتی در ساختار کله‌حفار یکی از دستگاه‌ها اعمال گردید. در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود دستگاه حفار (دبل شیلد، هارد راک ساخت شرکت ویرث آلمان[۸]) به دلیل برخورد به شرایط نامساعد زمین‌شناسی (زمین‌های فشارنده[۹]، ریزش[۱۰]، سینه‌کار مختلط[۱۱])، با توقفات مکرر و طولانی‌مدتی (مجموعاً ۶۰۰ روز) مواجه شد.

اگر چه توقف‌های تی‌بی‌ام قمرود به دلیل شرایط نامساعد زمین‌شناسی منطقه (در پهنه ساختاری سنندج سیرجان) و عمدتاً متأثر از زون‌های گسلی[۱۲] (پایین بودن پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها) بوده است. ولی برخی ویژگی‌های دستگاه مانند طراحی کله‌حفار[۱۳]، در عبور دستگاه از پهنه‌های خردشده مسئله‌ساز بوده است.

در طراحی تی‌بی‌ام تونل قمرود (شکل ۲)، استفاده از سپر تلسکوپی مناسب‌ترین انتخاب بوده چراکه این نوع سپر بهترین گزینه برای حفاری در مسیرهای با گوناگونی زیاد از لحاظ بافت و تنوع سنگ‌ها است. سپر تلسکوپی با امکان حفاری در حالت‌های تک‌سپری و دوسپری می‌تواند در زمین‌های گسلی از دیواره‌های تونل حفاظت و امکان پیشروی تی‌بی‌ام را فراهم کند. وجود جک‌های دیوارگیری[۱۴] در طراحی این دستگاه (شکل ۳)، امکان حفاری همزمان با نصب پوشش سگمنتال[۱۵] بتنی تونل را میسر می‌ساخت که در جهت افزایش سرعت پیشروی دستگاه عاملی مهم محسوب می‌شود. اما ویژگی‌های فنی پیشانی حفار مانند هندسه کاترهد، نوع و اندازه دیسک‌های برشی[۱۶]، دریچه‌های بارگیری[۱۷] و... در این تی‌بی‌ام، بیشتر با سنگ‌های سخت و توده‌ای (تشکیلات کرتاسه در مسیر حفاری: آهک‌ها و دولومیت‌های توده‌ای) هماهنگی داشته است. به‌خصوص دریچه‌های بارگیری در برخورد با سنگ‌های ضعیف در محدوده‌های گسلی (در تشکیلات ژوراسیک مسیر حفاری: شیست، اسلیت، گرافیت‌شیست، کوارتزیت و ماسه‌سنگ‌ها)، پایداری دیواره‌های تونل را تهدید می‌کرد و با ریزش حجم زیادی از توده‌سنگ‌ها بر کله‌حفار، دستگاه از حرکت باز می‌ایستاد (شکل ۴).

[6]UCS (Uniaxial Compressive Strength) [7]RQD (Rock Quality Designation) [8]Double Shield, Hard Rock TBM/Wirth [9]squeezing [10]collapse
[11]mixed face condition [12]fault zones [13]cutter head [14]gripper [15]segment lining [16]disc cutter [17]Mucking Gate of Cutter Head

جدول ۲: پارامترهای طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها [۲۸].

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	$4-10$ MPa	$2-4$ MPa	$1-2$ MPa	For this lowrange-uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	$100-250$ MPa	$50-100$ MPa	$25-50$ MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	<1 MPa
	Rating		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% – 100%	75% – 90%	50% – 75%	25% – 50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		>2 m	$0.6-2$ m	$200-600$ mm	$60-200$ mm	<60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wallrock	Slightly rough surfaces Separation <1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation <1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces Or Gouge <5 mm thick Or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation >5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	<10	$10-25$	$25-125$	>125		
		(Joint water press)/(Major principal σ)	0	<0.1	$0.1-0.2$	$0.2-0.5$	>0.5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)									
Strike and dip orientations			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Rating		Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12		
		Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
		Slopes	0	-5	-25	-50	–		
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS									
Rating			81 – 100	61 – 80	41 – 60	21 – 40	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock		
D. MEANING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10hrs for 2.5m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (kPa)			>400	$300-400$	$200-300$	$100-200$	<100		
Friction angle of rock mass (deg)			>45	$35-45$	$25-35$	$15-25$	<15		
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY CONDITIONS									
Discontinuity length (persistence) Rating			<1 m 6	1 – 3 m 4	3 – 10 m 2	10 – 20 m 1	>20 m 0		
Separation (aperture) Rating			None 6	<0.1 mm 5	0.1 – 1.0 mm 4	1 – 5 mm 1	>5 mm 0		
Roughness Rating			Very rough 6	rough 5	slightly rough 3	smooth 1	slickensided 0		
Infilling (gouge) Rating			None 6	Hard filling< 5 mm 4	Hard filling > 5 mm 2	Soft filling < 5 mm 2	Soft filling > 5 mm 0		
Weathering Ratings			Unweathered 6	Slightly weathered 5	Moderately weathered 3	Highly weathered 1	Decomposed 0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING									
Strike perpendicular to tunnel axis					Strike parallel to tunnel axis				
Drive with dip - Dip 45 – 90°			Drive with dip - Dip 20 – 45°		Dip 45 – 90°		Dip 20 – 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip - Dip 45 – 90°			Drive against dip - Dip 20 – 45°		Dip 0 – 20 - Irrespective of strike°				
Fair			Unfavourable		Fair				

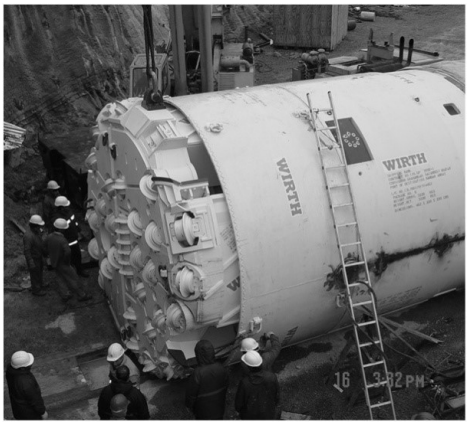
لذا پس از توقف‌های مکرر دستگاه در کیلومترهای ابتدایی، با انجام بُرشکاری و نصب صفحات فلزی روی دریچه‌های بارگیری (متناسب با انحنای سپر دستگاه)، اندازه دریچه‌های ورود مصالح، اصلاح شد (شکل ۵).

همچنین در این تونل جهت پیش‌بینی نواحی پُرمخاطره، پس از چند مرحله توقف دستگاه در شرایط نامساعد زمین‌شناسی، سیستم الکترونیکیِ «دیتا لاگر»[۱۸] بر روی دستگاه نصب گردید تا امکان تحلیل شرایط واقعی

[18] Data Logger System

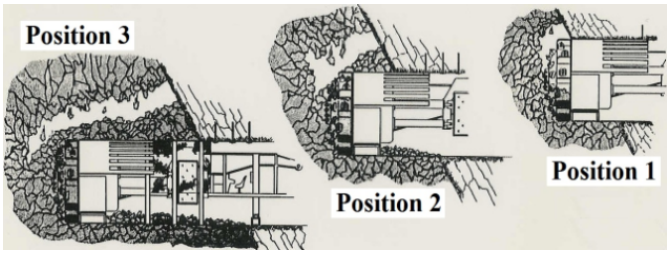
پارامترهای عملیاتی دستگاه جهت پیش‌بینی مقاطع بحرانی فراهم گردد.

شرح کامل مخاطرات زمین‌شناسی، توقفات تی‌بی‌ام و تجارب پروژه قمرود در پژوهشی از همین مؤلفین، ارائه شده است [۲].

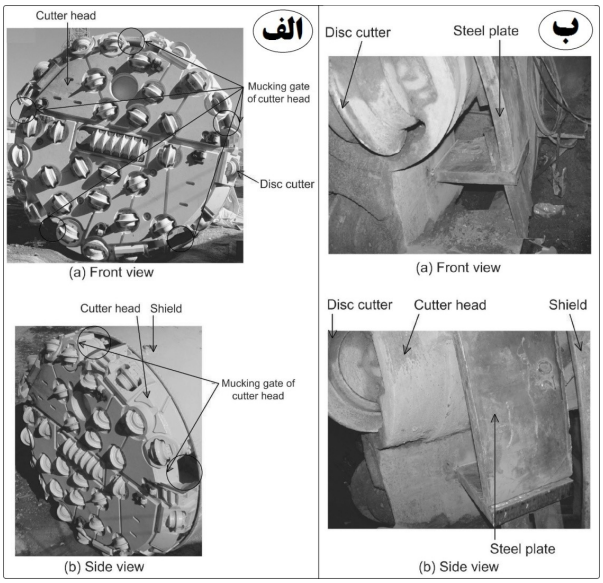


شکل ۲: ماشین حفار تلسکوپی در قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود.

شکل ۳: (الف) نمایی از صفحه فلزی دیوارگیرها. (ب) نمایی از جک‌های متصل به دیوارگیرها.



شکل ۴: طرحی شماتیک از توقف تی‌بی‌ام در یک زون گسلی.



شکل ۵: نمای کله حفار از مقابل و از پهلو. (الف) قبل از اصلاح. (ب)بعد از اصلاح [۴].

۴ پروژه چمشیر

در زمینه بازسازی دستگاه‌های دست دوم پیش از شروع عملیات حفاری می‌توان به دستگاه پروژه تونل چمشیر (تک شیلد، هارد راک ساخت شرکت هرنکنشت آلمان [۱۹]) اشاره کرد که اصلاحاتی در ساختار مکانیکی–الکتریکی آن و نیز تغییر آرایش ابزارهای برشی کاترهد دستگاه اعمال گردید تا دستگاه با شرایط زمین‌شناسی ساختگاه طرح در زون زاگرس چین‌خورده (جهت کنترل خطر پدیده کلاکینگ [۲۰] در سنگ‌های نرم، سایندگی در سنگ‌های سخت و ...) سازگار گردد [۵، ۶]. کاترهد و سپر این دستگاه پس از حفاری یک تونل در شهر حلب سوریه، دچار فرسایش و خوردگی شده بود و قطعات مکانیکی، هیدرومکانیکی و الکترونیکی آن نیز نیازمند کنترل و گاهی بازسازی بوده است (شکل ۶ و ۷). اقدامات عمده و اصلاحات انجام‌شده برای آماده‌سازی دستگاه در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

شکل ۶: (الف) فرسایش و خوردگی سپر و کاترهد پس از حفاری تونل انتقال آب حلب سوریه. (ب) دستگاه بازسازی‌شده برای پروژه چمشیر.

[19] single shield, Hard Rock TBM/Herrenknecht [20] clogging

شکل ۷: پرسنل فنی در حال بازسازی دستگاه برای حفاری تونل چمشیر.

جدول ۳: اصلاحات اصلی بر روی دستگاه حفار پروژه چمشیر [۶].

ردیف	تغییرات
۱	تغییر در Heat Exchanger مدار هیدرولیک و منطبق سازی آن با شرایط گرمسیری پروژه تونل چمشیر
۲	تغییر در سیستم محرک Erector Rotation
۳	اعمال تغییرات در نمونه Sealهای تولید داخلی در راستای بهبود عملکرد آن در Erector Slew Bearing
۴	اصلاح سیستم راه انداز الکتروموتورهای ۴۰۰ وات مدار کاترهد و استفاده از Soft Starter
۵	اصلاح سیستم Erector Beam و استفاده از پلیت‌های ضد سایش قابل تعویض در ریل حرکتی Traveling
۶	اصلاح سیستم کنترل Segment Crane
۷	اعمال تغییرات در آلیاژ یاتاقان‌های حرکتی Segment Feeder
۸	اصلاح سیستم روانکاری در Segment Crane Rotation Gear
۹	اعمال تغییرات اصلاحی در مکانیزم چرخ‌های بوژی Segment Feeder و Trailer در جهت بهبود Sealing
۱۰	تغییر سیستم کنترل Erector از سیستم کابلی به پروفی باس (با طراحی و ساخت ریموت کنترل جدید)
۱۱	اصلاح سیستم کنترل دبی روغن در سیستم روانکاری Main Drive و به روز رسانی آن
۱۲	اعمال تغییرات اصلاحی در کاترهد و آرایش ابزار برشی آن، در راستای منطبق سازی دستگاه با شرایط زمین شناسی تونل چمشیر

در پروژه چمشیر با توجه به طراحی دستگاه (از نوع تک سپری)، نیروی پیش‌برنده ماشین از جک‌هایی که به سگمنت (پوشش بتنی نصب شده بر دیواره تونل) تکیه می‌کنند تأمین شده است.

در این نوع دستگاه به دلیل عدم وجود کفشک، تصحیحات چرخش ماشین حول محور، از طریق چرخش عکس کله حفار در هر سیکل حفاری تأمین شده است. بدین ترتیب که در یک سیکل کله‌حفاری در جهت عقربه‌های ساعت و در سیکل بعدی در خلاف عقربه‌های ساعت چرخش می‌کند. لذا بیلچه‌های[۲۱] کله‌حفار به نحوی طراحی می‌شود که حرکت دو جهته کله حفار را ممکن سازد [۲۹]. علی‌رغم سرعت پایین پیشروی این دستگاه و طولانی بودن سیکل حفاری (به دلیل توقف حفاری در زمان نصب سگمنت‌ها)، اما بر اساس شرایط زمین‌شناسی و نیز طول تونل چمشیر (۷/۵ کیلومتر) این دستگاه گزینه مناسبی برای طرح بوده است.

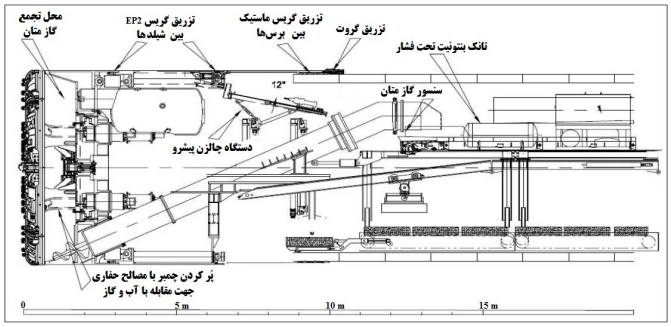
۵ پروژه بازی‌دراز

مسیر تونل انتقال آب بازی‌دراز در بخشی از یک تاقدیس بزرگ قرار گرفته است و از نظر لیتولوژیکی در واحدهای متنوعی قرار می‌گیرد که البته عمده تشکیلات مسیر شامل سنگ آهک، شیل، مارن و گلسنگ است. حضور چند گسل در محدوده مورد نظر و تکتونیزه شدن توده‌سنگ‌ها در این منطقه باعث ایجاد بخش‌های خردشده‌ای در اطراف گسل‌ها در مسیر تونل شده است. توده‌سنگ‌های رخنمون‌یافته در مسیر تونل به هفت گونه زمین‌شناسی مهندسی (مربوط به هر یک از سازندهای گچساران، آسماری، گورپی، پابده، تله‌زنگ، میشان و آغاجاری) تفکیک شده است [۹].

عملیات حفاری این تونل با تی‌بی‌ام ساخت کانادا (ای‌پی‌بی، هارد راک ساخت شرکت لُوَت[۲۲])، در اسفندماه ۱۳۹۴ آغاز شده (شکل ۸) و در دی‌ماه ۱۳۹۷ پایان یافت.

شکل ۸: مونتاژ کله حفار و سیستم پشتبان دستگاه بازی‌دراز.

ساختار تی‌بی‌ام پروژه بازی‌دراز، در مواجهه با سنگ‌های نرم در برخی سازندهای پیش‌رو (جهت عمل‌آوری مصالح حفاری[۲۳] و جلوگیری از پدیده کلاگینگ در تشکیلات مارنی، گِلسنگ و ...)، در مواجهه با کنترل مخاطرات انتشار گاز سمی سولفید هیدروژن[۲۴] (جلوگیری از تجارب ناگوار مشابه در تونل نوسود)، کنترل گاز انفجاری متان، کنترل آب‌های هجومی و... از عملکرد مناسبی برخوردار بوده است (شکل ۹).



شکل ۹: طرحی شماتیک از ساختار دستگاه پروژه بازی‌دراز برای کنترل گاز و آب.

[21] bucket [22] EPB (Earth Pressure Balance), Hard Rock TBM/Lovat [23] conditioning of excavation materials [24] H_2S

با این حال در این پروژه با توجه به اینکه تی‌بی‌ام به صورت دستِ دوم خریداری شده و در شرایط زمین‌شناسی جدید (متفاوت از شرایطی که برای آن طراحی شده) به‌کار گرفته شده است، برخی خصوصیات سازندهای پیش‌رو در تقابل با ویژگی‌های دستگاه مشکل‌ساز شده است.

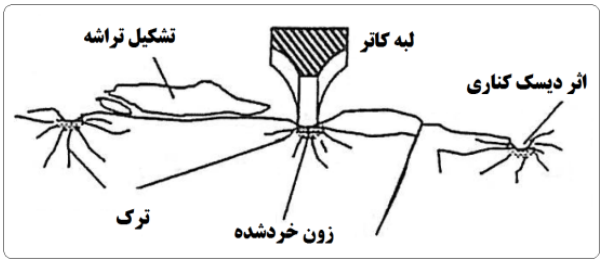
این دستگاه در مواجهه با سنگ‌های بکر یکپارچه[۲۵] (شاخص کیفی: ۹۰ الی ۱۰۰) و در سنگ‌های توده‌ای[۲۶] با درزه‌داریِ اندک، با چالش‌های فراوانی مواجه شده است. این چالش‌ها در مسیر حفاری سازند پابده نِمود بیشتری داشته است. کاهش نرخ نفوذ[۲۷]، افزایش شدید و پیش‌بینی‌نشده استهلاک دیسک‌های برشی، افزایش مواد مصرفی دستگاه (انواع روغن، گریس و فوم) و... از عمده‌ترین چالش‌ها بوده است.

قبل از آغاز پروژه، در مطالعاتِ صورت گرفته بر اساس مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار، نتایج حاکی از آن بود که در شرایط معمول (با فرض سازگاری دستگاه با شرایط زمین‌شناسی) تعداد ۹۱ دیسک برشی به دلیل سایشِ نُرمال (در کل مسیر ۸/۵ کیلومتری)، نیازمند تعویض خواهد بود [۹]. این در حالی است که تنها در همان یک کیلومتر ابتدایی تونل بیش از ۱۳۰ عدد دیسک به علت شکستگی تعویض شده است. بررسی شرایط نشان می‌دهد از شروع حفاری، هیچ یک از دیسک‌های برشی به دلیل سایشِ نُرمال، تعویض نشده است و تمامی موارد تعویضی به دلیل لب‌پر شدن و شکستگی گوه‌ای در دیسک‌ها رخ داده است (شکل ۱۰).

شکل ۱۰: شکستگی دیسک‌های برشی دوبل (دو تیغه).

عمده چالش‌ها مربوط به عدم تناسب ساختار مکانیکی و طراحی دستگاه با برخی ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه طرح (در سنگ‌های سخت یکپارچه و توده‌ای با درزه‌داری اندک) است. بررسی شرایط نشان می‌دهد ساختار دستگاه در زمینه سرعت چرخش کاترهد[۲۸] و نیز فواصل آرایش ابزارهای برشی کاترهد موجب شده است که مکانیسم بُرش در سنگ و فرآیند تشکیل تراشه[۲۹] در اثر عملکرد دیسک‌کاترها روی سنگ (شکل ۱۱) به درستی انجام نگیرد.

فواصل آرایش ابزارهای برشی در طراحی کاترهد برای محیط‌های سنگی بکر (یکپارچه) و توده‌ای (با شاخص کیفیِ بالا) مناسب نبوده و تنها برای مقابله با توده‌سنگ‌های درزه‌دار[۳۰] (با شاخص کیفیِ متوسط به پایین) مناسب است. از طرفی در مرحله مونتاژ دستگاه و آغاز حفاری، از دیسک‌های برشی دوبل (دو تیغه) استفاده شد که این عامل نیز موجب تشدید مشکلات کله‌حفار شده است.



شکل ۱۱: طرحی شماتیک از مکانیسم برش سنگ و تشکیل تراشه در زیر دیسک کاتر [۳۰].

پیشروی تی‌بی‌ام در سنگ‌های سخت یکپارچه، نیازمند افزایش نیروی فشاری یا محوری پشت هر دیسک برشی و در نتیجه افزایش کل نیروی فشاری یا محوری دستگاه است. در این شرایط می‌بایست مشخصات دستگاه از جنبه ظرفیت مکانیکی، هیدرولیکی و ساختاری ارتقا یابد.

در این میان یک عامل مهم، سرعت چرخش صفحه حفاری است. این مسئله به طور اساسی با ظرفیت تحمل بار ابزار برشی[۳۱] و شدت بارگذاری ضربه‌ای[۳۲] تحمل‌شده توسط دیسک‌های برشی مرتبط است. در پروژه بازی‌دراز نیز پایین بودن سرعت چرخش صفحه حفار (حداکثر ۲/۵ دور در دقیقه) از عوامل اصلی تأثیرگذار بر افزایش نرخ استهلاک ابزارهای برشی و کاهش نرخ نفوذ بوده است.

بحث درباره روابط و تئوری‌های حاکم در مورد شرایط حفاری دستگاه در پروژه بازی‌دراز از حوصله این بحث خارج است و یک کار پژوهشی مستقل دیگری را می‌طلبد. لذا به‌طور خلاصه می‌توان گفت: بررسی شرایط زمین‌شناسی حین حفاری و تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه، نتایجی را ارائه می‌داد که بر اساس آنها، راهکار مناسب برای حل مشکلات: افزایش سرعت چرخش کاترهد و نیز تغییر ابزارهای بُرشی (تعویض دیسک‌های دوبل و جایگزینی دیسک‌های سینگل) است.

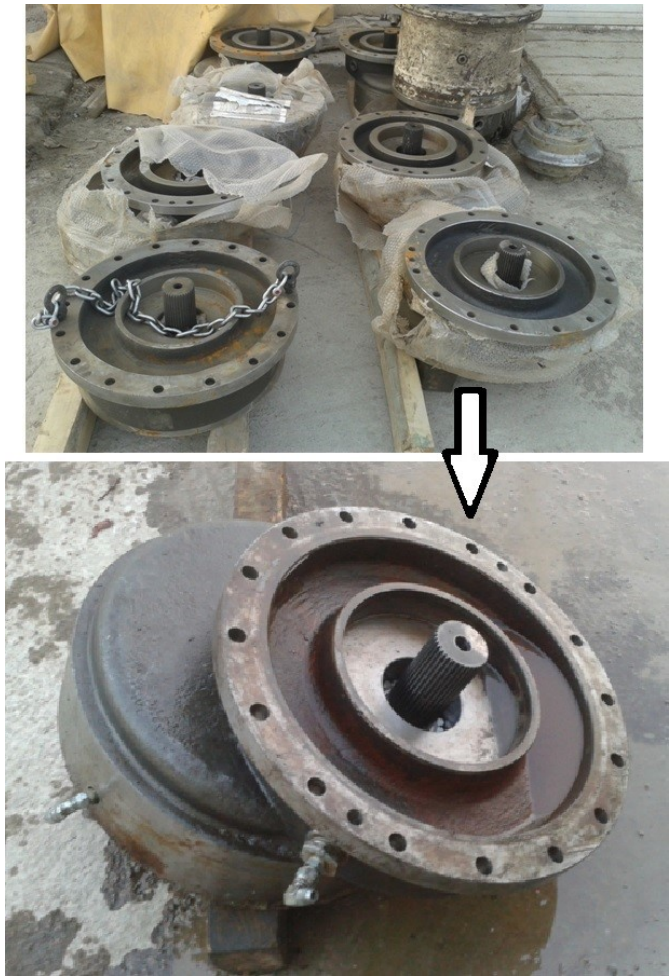
در این پروژه تغییر ابزارهای برشی کاترهد (استفاده از دیسک‌های سینگل) و نیز توجیه اپراتورهای دستگاه (در زمینه کنترل نیروی تراست[۳۳] دستگاه متناسب با پارامترهای ژئومکانیکی سنگ‌ها در مسیر حفاری) توانسته تا حدودی از نرخ بالا و نامتعارف استهلاک دیسک‌های برشی بکاهد.

اما بهبود مکانیسم بُرش در سنگ (فرآیند تشکیل تراشه‌ها) و افزایش نرخ نفوذ دستگاه نیازمند افزایش سرعت چرخش کاترهد است. بررسی کلیه جوانب امر و محدودیت‌های پروژه (خریداری تی‌بی‌ام به‌صورت دست دوم، عدم مشارکت شرکت سازنده دستگاه در پروژه و ...) حاکی از آن بود که تغییرات بنیادین در ساختار دستگاه (تهیه گیربکس‌های جدید و تعویض تمامی الکتروموتورها و ....) با هزینه‌ها و دشواری‌های پیش‌بینی‌نشده‌ای همراه خواهد بود. از این‌رو تصمیم گرفته شد که مبدل‌هایی برای گیربکس‌های

[25] intact rocks [26] massive rocks [27] rate of penetration (mm/rev) [28] RPM (rev/min) [29] chipping [30] jointed rock mass [31] cutter bearing capacity [32] shock loading [33] thrust force

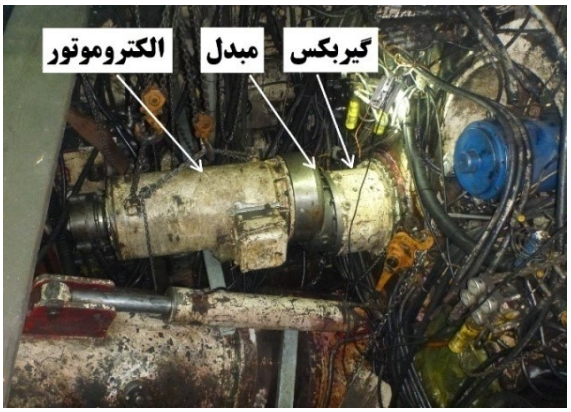
دستگاه ساخته شود (به تعداد ۷ عدد) و با نصب مبدل‌ها مابین الکتروموتورها و گیربکس‌های اصلی دستگاه، سرعت چرخش کاترهد را از ۲ به ۵ دور در دقیقه افزایش داد.

جهت بررسی امکان‌سنجی این ایده، طراحی و ساخت مبدل‌های گیربگس[۳۴] با استفاده از توان متخصصین صنایع داخلی انجام گرفت (شکل ۱۲). طراحی چرخ‌دنده‌های داخل مبدل‌ها به نحوی انجام شد که سرعت چرخش خروجی گیربکس‌ها (در محل اتصال به یاتاقان اصلی[۳۵]) نسبت به چرخش ورودی (از سمت الکتروموتورها) افزایش یابد.



شکل ۱۲: مبدل‌های گیربکس.

پس از نصب مبدل‌ها (قرارگیری آنها در مابین الکتروموتورها و گیربکس‌ها)، مهندسین برق دستگاه نیز مقدمات لازم (تنظیم PLC دستگاه و هماهنگ‌سازی الکتروموتورها) را فراهم کردند و سرانجام الکتروموتورها برای اجرای طرح استارت شد (شکل ۱۳). اگرچه در این تست، سرعت چرخش کاترهد برای لحظاتی افزایش یافت اما به فاصله‌ای کمتر از ده دقیقه دمای مبدل‌های گیربکس تا بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. بُروز اِشکال در سیستم آب‌بندی (بین مبدل‌ها و پوسته گیربکس‌ها) موجب شد که آب و روغن در گیربکس‌ها با هم مخلوط شود. علاوه بر این مشکلات، بلبرینگ انتهایی پوسته دو عدد از گیربکس‌ها در مدت زمان کوتاه انجام تست، دچار خردشدگی شد.



شکل ۱۳: قرارگیری مبدل‌ها مابین گیربکس‌ها و الکتروموتورها.

برای رفع عیوب، مبدل‌ها به شرکت سازنده عودت داده شد و حفاری با حالت قبلی از سر گرفته شد. اما علی‌رغم انجام بررسی و کار بر روی مبدل‌ها در شرکت مذکور، چند ماه بعد در تست مرحله دوم نیز مجدداً همان عیوب مانع از کارآیی مبدل‌ها شد. لذا سرانجام با جدا کردن و حذف مبدل‌ها، الکتروموتورها بدونِ واسطه به گیربکس‌ها متصل شدند و عملیات حفاری با همان ساختار اولیه دستگاه (شکل ۱۴)، آغاز گردید.

شکل ۱۴: اتصال الکتروموتورها به گیربکس‌ها (بدون مبدل).

از دیگر تجربیات این طرح، توقف دستگاه در یک زون گسلی و حذف جک‌های مفصلی پسیو[۳۶] (جک‌های متصل کننده دو سپر انتهایی و میانی دستگاه) بوده است. در کیلومتراژ ۴ + ۹۹۷ وضعیت درزه‌داری توده‌سنگ (پایین بودن میزان شاخص کیفی توده‌سنگ) و حضور آب زیرزمینی موجب خزش توده‌سنگ‌ها و گیر کردن سپر انتهایی دستگاه شده بود. اپراتور دستگاه به ناچار برای آزادسازی سپر، نیروی تراست را افزایش (تا حدود ۵۰۰۰۰ کیلونیوتن) می‌دهد اما در اثر این نیرو تعداد ۱۲ عدد از مجموع ۱۶ جک‌های مفصلی پسیو به‌طور پیاپی دچار شکستگی (از محل پایه اتصال جک‌ها و نیز خارج شدن میله پیستون جک‌ها از داخل سیلندر آنها) شدند و در نتیجه سپر میانی[۳۷] از سپر انتهایی[۳۸] دستگاه حدود ۴۰ سانتی‌متر فاصله گرفت. در این وضعیت، رخنمون توده‌سنگ از فضای ایجادشده مابین دو سپر، قابل ملاحظه بود (شکل ۱۵).

[34] gearbox converters [35] main bearing [36] Passive Articulation Cylinders [37] middle shield [38] tail shield

شکل ۱۵: شکستگی جک‌های پسیو و فاصله ایجادشده بین دو سپر میانی و انتهایی.

با جدایش دو سپر، سیستم آب‌بندی سپر دستگاه نیز آسیب دیده بود و هجوم آب به همراه انتشار گاز سولفید هیدروژن (از فضای بین دو سپر میانی و انتهایی) شرایط آزادسازی دستگاه را برای پرسنل دشوار کرده بود. اگرچه در اثر اِعمال نیروی بالای تراست، سپرهای میانی و جلویی آزاد شده و به سمت جلو حرکت کرده بودند، اما سپر انتهایی همچنان به‌طور کامل در زمین گیر بود. در نتیجه در زمان پیشروی دستگاه، سپر انتهایی بدون هیچگونه جابجایی در محل قبلی خود، ثابت باقی ماند.

در این شرایط تیم راهبری برای عبور از شرایط نامساعد زمین‌شناسی می‌بایست تصمیم علاج‌بخشی می‌گرفت. عملکرد مکانیکی جک‌های مفصلی پسیو برای جهت‌دهی به حرکت دستگاه در مسیرهای قوس‌دار است. از این‌رو با توجه به مستقیم بودن مسیر حفاری در پروژه بازی‌دراز، حذف جک‌های پسیو خللی در ادامه مسیر ایجاد نمی‌کرد. لذا تصمیم بر آن شد که مابقی جک‌های پسیو (که معیوب نبودند) نیز حذف شوند و در محل اتصالات به‌جای جک‌ها از قطعات فلزی ساده (با مقاومت بالا) به عنوان رابط برای سپر میانی و سپر انتهایی استفاده شود.

پس از عقب کشیدن کله‌حفار (از طریق جمع کردن جک‌های مفصلیِ اکتیو[39] سپس پُر کردن فضای خالی سینه‌کار با الوار چوبی و در نهایت اِعمال فشار به جک‌های مفصلی اکتیو) و اتصال مجدد دو سپر به یکدیگر، سیستم آب‌بندی در محل اتصال سپرها (سیل[40]: متشکل از نوار لاستیکی، زه‌های فلزی و پیچ‌های اتصالی) تعمیر شد، سپس پایه اتصالات جک‌ها جوشکاری شد و به‌جای جک‌های پسیو از قطعات فلزی جدید استفاده شد اما در تلاش مجدد برای آزاد سازی دستگاه با بالا رفتن نیروی تراست (تا حدود ۴۵۰۰۰ کیلونیوتن)، مجدداً اتصالات جدید نیز دچار شکستگی شد و برای بار دوم سپر میانی و انتهایی از یکدیگر فاصله گرفتند.

طولانی شدنِ مدت زمان توقف دستگاه، تیم راهبری را ناگزیر می‌ساخت که راهکاری با ضریب اطمینان بالا (اگرچه زمان‌بر) انتخاب نماید. لذا تصمیم بر آن شد که متناسب با مشخصات فنی و جنس آلیاژ سپرهای دستگاه، برای اتصال دو سپر از طریق جوشکاری (بر روی خط اتصال دو سپر) اقدام گردد.

پس از جوشکاری سپرها و اتصالِ کاملِ آن دو به یکدیگر، نیروی تراست دستگاه تا میزان ۵۴۰۰۰ کیلونیوتن افزایش داده شد و این بار دستگاه از محدوده بحران عبور نمود. زمان توقف دستگاه در زون گسلی (و زمان‌های صرف‌شده برای آزادسازی و نیز جوشکاری سپرها) مجموعاً ۲۳ روز را شامل شد.

تجربه دیگری در زمینه ایجاد تغییرات در ساختار دستگاه مربوط به شرایط زمین‌شناسی در زون‌های آبدار است. در زون‌های آبدار هجوم آب و ریزش مصالح در محدوده ارکتور[41] (قطعه مکانیکی: نصب کننده پوشش بتنیِ سگمنتال بر دیواره تونل) موجب تأخیر در نصب سگمنتِ موقعیت کَف تونل می‌شد. با توجه به ساختار دستگاه (توقف حفاری در زمان نصب سگمنت‌ها)، در نتیجه با تأخیر در نصب سگمنت کف، روند پیشرویِ حفاری نیز کُند می‌گردید. از این رو تیم راهبری می‌بایست با نصب یک پمپ آبکش در این ناحیه مشکل تجمع آب و مصالح را بر طرف می‌نمود. اما وجود جک تراست شماره ۲۶ مانع نصب پمپ آبکش در موقعیت مذکور بود. از این رو با تصمیم تیم راهبری جک شماره ۲۶ تراست از مدار خارج شد (شکل ۱۶). ادامه روند حفاری و بررسی نوسانات پارامترهای عملیاتی دستگاه نشان می‌داد که حذف این جک هیچگونه تأثیر منفی بر انتقال نیروی رانشی دستگاه به کله‌حفار نداشته است.

شکل ۱۶: موقعیت جک تراست شماره ۲۶. هجوم آب زیرزمینی و ریزش مصالح از روی نوار نقاله.

در زمینه گمانه‌های پیشاهنگ[42] نیز تغییراتی در ساختار دستگاه اعمال شد. در طراحی اولیه دستگاه، نقاط تعبیه شده برای حفاری گمانه‌های پیشاهنگ (به تعداد ۷ حفره) تنها در نیمکره بالایی سپر (موقعیت ساعت ۱۰

[39] Active Articulation Cylinders [40] Seal Endless Articulation [41] erector [42] probe drilling

تا ۲ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) ایجاد شده بود لذا امکان حفاری گمانه پیشاهنگ در نیمکره پایین سپر (ساعت ۲ تا ۱۰ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) وجود نداشت. از این رو با تصمیم اعضاء تیم فنی، جهت پیش‌بینی و مقابله با جریان‌های محتمل آب زیرزمینی در نیمکره پایینی سپر میانی تعداد ۹ حفره تعبیه شد (شکل ۱۷ الف) و با نصب لوله هادی بر روی این حفرات (شکل ۱۷ ب)، همانند موقعیت‌های نیمکره بالایی سپر برای حفاری گمانه‌های اکتشافی (با هدف انجام تزریق[۴۳] و بهسازی زمین[۴۴]) آماده شدند.

از طرفی تجهیزات مربوط به حفاری گمانه پیشاهنگ دستگاه از مدل‌های قدیمی است لذا مقرر شد که این دستگاه تعویض شود و یک دستگاه جدید بر روی شاسی ارکتور دستگاه نصب شود که هم قدرت مانور بیشتری (به‌ویژه در موقعیت‌های نیمکره پایین سپر) نسبت به دستگاه قبلی داشته باشد و هم در مدت زمان کمتری امکان حفاری گمانه‌های با طول بیشتر را مهیا سازد (شکل ۱۷ ج).

لازم به ذکر است که استفاده از گمانه‌های پیشرو برای عملیات تزریق، در بهبود شرایطِ حفاری (برهم‌کُنش کله‌حفار با زمین‌های گسلی و آبدار) حائز اهمیت است.

شکل ۱۷: (الف) تعبیه حفره در نیمکره پایین سپر. (ب) نصب لوله‌های هادی بر روی حفره‌ها. (ج) دستگاه حفاری گمانه پیشرو.

در پروژه بازی‌دراز به دلیل دست دوم بودن دستگاه و وجود مخاطرات زمین‌شناسی گوناگون در مسیر حفاری، تعمیرات و فعالیت‌های مکانیکی و الکترونیکی متنوع دیگری نیز بر روی قطعات دستگاه صورت گرفته است که شرح کلیه وقایع در این گزارش مقدور نیست. برخی از این تصمیمات به‌طور مستقیم به دلیل ملاحظات زمین‌شناسی انجام می‌گرفت که در اینجا به طور مختصر به دو مورد از آنها اشاره می‌شود.

تمامی پمپ‌های هیدرولیک به همراه مخزن اصلی روغن دستگاه از محدوده سپر جلویی دستگاه جابجا و به نقطه‌ای در حدود ۵۰ متر عقب‌تر بر روی گنتری شماره ۷ (۲۰ متر عقب‌تر از اتاق اپراتوری دستگاه)، انتقال داده شد تا تجهیزات آنها از مشکلات و تأثیرات مخرب مخاطرات احتمالی (هجوم آب و انفجار گاز متان)، محافظت گردند.

در مثال دیگر می‌توان به هجوم گازهای سمی در برخی متراژها در دو سازند پابده و گورپی اشاره کرد. در این شرایط علاوه بر رعایت نکات ایمنی برای سلامت پرسنل (استفاده از ماسک‌های تنفسی شیمیایی و تجهیز اتاق گاز برای مواقع بحرانی) می‌بایست در زمینه حفاظت از تجهیزات الکترونیکی دستگاه نیز تمهیداتی اندیشیده می‌شد. در اولین گام سیستم تهویه هوای تونل با اعمال تغییراتی تقویت شد. انتشار گاز سولفید هیدروژن می‌توانست بر تجهیزات الکترونیکی دستگاه اثرات مخربی را (به دلیل خاصیت خورندگی این گاز بر روی فلز مس) وارد نماید. لذا مهندسین برق و الکترونیک (در تیم راهبری) جهت جلوگیری از وقوع مخاطرات احتمالی، یکسری تغییرات (تغییر مدارات فرمان، تغییر در برنامه‌های نرم‌افزاری دستگاه، ایجاد پوشش عایق با استفاده از اسپری‌های مخصوص بر روی بردهای حساس نظیر کارت‌های PLC، ایجاد لاین‌های هوای فشرده در تابلوهای تجهیزات الکترونیکی، رگلاژ کردن درب تابلوها و استفاده از نوارهای آب‌بند، جابجایی محل تابلوها به محل مناسب‌تر و...) بر روی دستگاه اعمال نمودند.

۶ پروژه کرمان (قطعه شمالی)

در این پروژه از یک دستگاهِ «دبل شیلد هارد راک ساخت شرکت هرنکنشت آلمان[۴۵]» استفاده شده است (جدول ۴).

جدول ۴: مشخصات اولیه ماشین حفار در قطعه شمالی پروژه کرمان.

مدل	دبل شیلد هارد راک
شرکت سازنده	هرنکنشت آلمان
قطر ماشین (متر)	۴/۶۵
قطر دیسک‌های برشی (میلی‌متر)	۴۳۲
تعداد دیسک‌های برشی	۳۱
حداکثر تراست عملیاتی (کیلونیوتن)	۱۶۹۱۳
سرعت چرخش کاترهد (دور در دقیقه)	۰ ـ ۱۱
گشتاور (کیلونیوتن متر)	۱۰۲۹

با وجود سنگ‌های سختِ ساینده (با پارامترهای ژئومکانیکی بسیار بالا) و با توجه به استفاده از دستگاه دست دوم در این پروژه، ضرورت ایجاد تغییراتی در ساختار ماشین حفار برای دستیابی به شرایطی مناسب در روند حفاری، اجتناب‌ناپذیر بوده است.

در مطالعات زمین‌شناسی مشخص شد که عمده سنگ‌های مسیر تونل در رده مقاوم و خیلی مقاوم قرار می‌گیرند. نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی نظیر تست مقاوت فشاری تک محوری و تست سایش سورشار[۴۶] نیز مؤید این

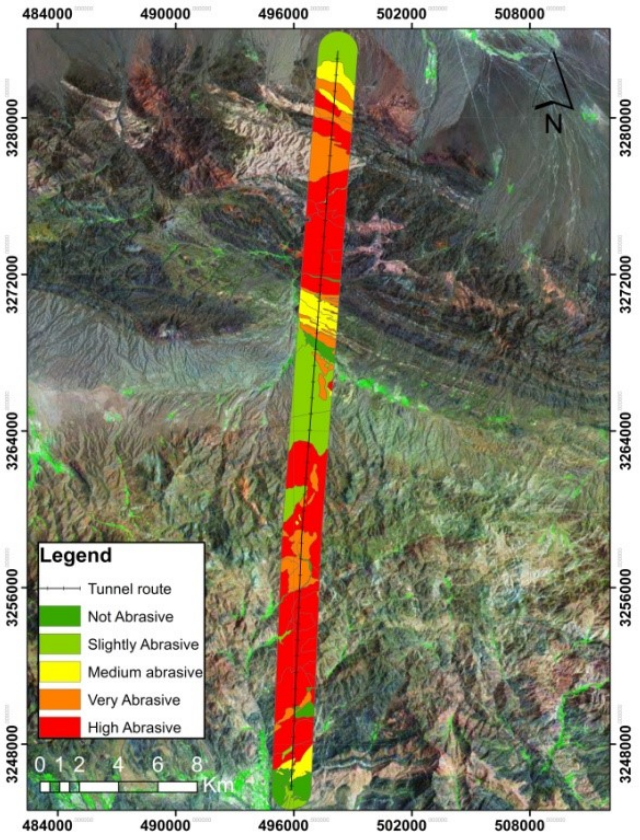
[43] grouting [44] ground improvement [45] Double Shield, Hard Rock TBM/ Herrenknecht [46] Cerchar

مطلب است. این دو آزمون از جمله آزمون‌های پایه‌ای هستند که عمدتاً جهت ارزیابی قابلیت حفرپذیری سنگ توسط دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نتایج مطالعات نشان می‌داد که مقاومت برخی سنگ‌ها در مسیر حفاری تا ۳۵۰ مگاپاسکال نیز می‌باشد. مقادیر اندیس سایش سورشار نیز به‌طور متوسط بین ۳ تا ۴ متغیر بوده است و بالاترین مقدار آن تا ۴/۵ است که مربوط به گرانیت‌ها بوده است (جدول ۵). در شکل ۱۸، میزان ساینده‌گی سنگ‌های مسیر تونل با توزیع رنگی نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود بخش عمده‌ای از مسیر تونل در سنگ‌های پُر مقاومت و ساینده قرار گرفته است.

جدول ۵: رده بندی ساینده‌گی سنگ‌ها بر پایه آزمایش سورشار [۳۱].

رده	اندیس سایش سورشار (CAI)	توصیف ساینده‌گی
۱	۶ <	بسیار بسیار ساینده
۲	۴ – ۶	بسیار ساینده
۳	۲ – ۴	ساینده
۴	۱ – ۲	نیمه ساینده
۵	۰/۵ – ۱	کمی ساینده
۶	۰/۵ >	غیر ساینده



شکل ۱۸: مقادیر سایش واحدهای مختلف زمین‌شناسی در مسیر تونل بر اساس نتایج آزمایشگاهی و تجربی.

دستگاه حفار در پروژه کرمان پیش از آن برای حفاری تونل انتقال آب کرج استفاده شده بود و برای پروژه جدید با توجه به شرایط زمین‌شناسی ساختگاه طرح، نیازمند بازسازی و اِعمال تغییراتی بوده است. در راستا در مهم‌ترین اقدام، طراحی و تعویض کاترهد در دستور کار قرار گرفت.

در راستای سازگار نمودن کاترهد دستگاه با شرایط زمین‌شناسی جدید، چند سناریو مورد مطاله قرار گرفت (جدول ۶) که بحث درباره روابط و تئوری‌های حاکم در هر سناریو از حوصله این مقاله خارج است و این موضوع یک کار پژوهشی مستقل دیگری را می‌طلبد.

در هر یک از این سناریوها با فرض برخی خصوصیات برای ماشین و کله‌حفار، «نرخ نفوذ و نرخ پیشروی و در نتیجه زمانبندی تکمیل پروژه» با استفاده از مدلهای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار [۳۲، ۳۳] محاسبه گردید. سر انجام با انتخاب سناریو شماره ۴ (جدول ۶) که کمترین زمان حفاری را داشت، طراحی و ساخت کاترهد سفارشی توسط شرکت ایبرگ ترکیه انجام شد.

ملاحظات زمانبندی طرح موجب شد عملیات حفاری تونل با همان کله‌حفار و ساختار اولیه دستگاه آغاز شود و با این تدبیر تا آماده شدن کاترهد جدید از اتلاف وقت جلوگیری شود. در این راستا در کیلومتراژ ۰ + ۶۰۰ با حفاری یک شفتِ ۳۰ متری بر روی محور تونل، امکان خارج ساختن کاترهد قدیمی و تعویض آن با کاترهد جدید فراهم گردید (شکل ۱۹).

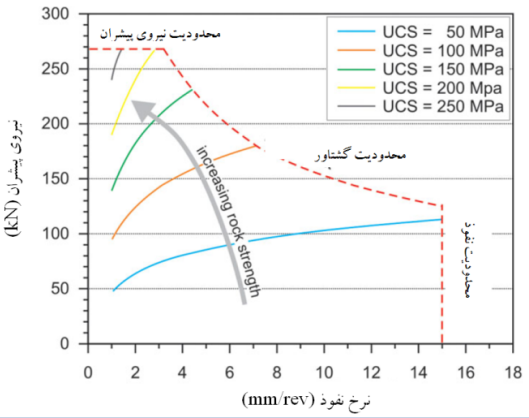
پس از نصب کاترهد جدید (شکل ۲۰) حفاری آغاز گردید. در کاترهد جدید نسبت به کاترهد قدیمی، تعداد دیسک‌های برشی از ۳۱ عدد به ۲۸ عدد کاهش یافته بود. همچنین به دلیل محدودیت‌های دیسک‌های برشیِ ۱۷ اینچی (۴۳۲ میلی‌متر) در سنگ‌های مقاوم (شکل ۲۱)، بر روی کاترهد جدید از دیسک‌های برشی با قطر ۱۹ اینچی (۴۸۳ میلی‌متر) استفاده شد که ظرفیت انتقال نیروی رانشِ بیشتری دارند (شکل ۲۲). با استفاده از دیسک‌های برشی جدید (با قطر ۴۸۳ میلی‌متر) توان کله حفار (که تابعی از قطر ماشین و قطر دیسک‌های برشی نصب شده است) نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲۳).

شکل ۱۹: جابجایی و انتقال کاترهد جدید از طریق شفت به تونل.

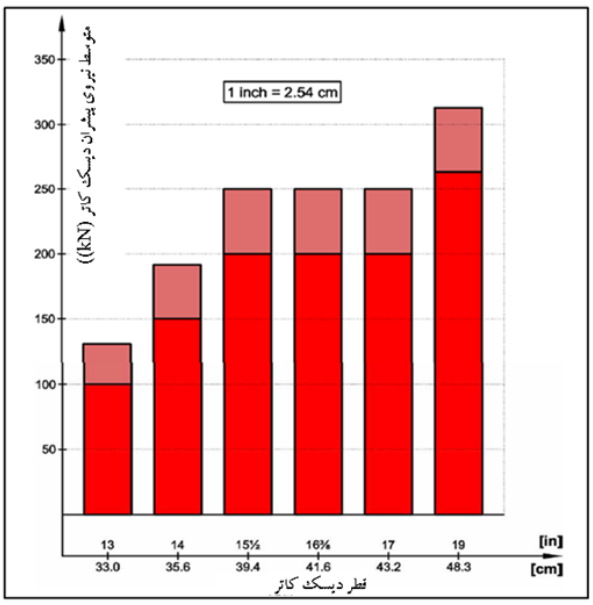
جدول ۶: سناریوهای مختلف عملکرد دستگاه جهت انتخاب و طراحی کاترهد جدید.

سناریو	قطر کله حفار (متر)	تعداد دیسک برشی	قطر دیسک برشی (اینچ)	بار وارده بر هر دیسک (کیلونیوتن)	چرخش کاترهد (دور بر دقیقه)	تراست (کیلونیوتن)	گشتاور (کیلونیوتن متر)	متوسط پیشروی ماهانه (متر)	دوره زمانی ساخت تونل (ماه)
۱	۴/۶۷	۳۱	۱۷	۲۰۰	۵/۵	۶۸۰۰	۱۱۷۶	۳۵۲	۵۴
۲	۴/۶۷	۳۱	۱۷	۲۰۰	۶/۵	۶۸۰۰	۱۱۷۶	۴۱۳	۴۶
۳	۴/۶۷	۳۱	۱۹	۲۵۰	۶/۵	۸۳۵۰	۱۴۷۰	۵۵۷	۳۴
۴	۴/۶۷	۲۸	۱۹	۲۵۰	۶/۵	۷۶۰۰	۱۳۲۳	۵۰۰	۳۷
۵	۴/۶۷	۲۶	۱۹	۲۵۰	۶/۵	۷۱۰۰	۱۱۱۵	۴۷۶	۴۰
۶	۴/۶۷	۳۴	۱۷	۲۰۰	۶/۵	۷۴۰۰	۱۴۱۹	۴۴۲	۴۳

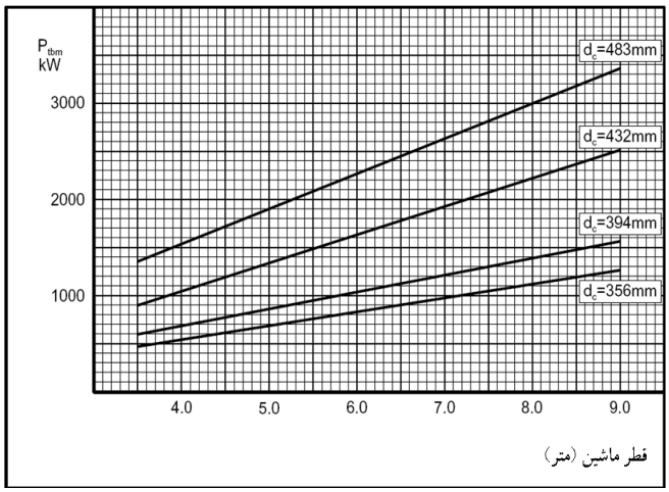
شکل ۲۰: تعویض و نصب کاترهد بر روی دستگاه در محیط تونل.



شکل ۲۱: محدودیت‌های عملکرد یک تی‌بی‌ام با دیسک‌های برشی به قطر ۱۷ اینچ در سنگ‌هایی با مقاومت مختلف [۳۴].



شکل ۲۲: نیروی رانش دیسک‌های برشی بر اساس قطر آنها [۳۵].



شکل ۲۳: رابطه میان توان نصب‌شده کله حفاری با قطر ماشین و قطر دیسک‌های برشی [۳۶].

۷ نتیجه گیری

بررسی تجارب پروژه‌های قمرود، چمشیر، بازی‌دراز و کرمان بیانگر این حقیقت است که تونل‌سازی مکانیزه یکی از زمینه‌های مستعد برای انجام تحقیقات بین‌رشته‌ای در گرایش‌های مختلف دانشگاهی کشور (مکانیک،

الکترونیک، زمین‌شناسی و ...) است. در حال حاضر پژوهش‌های دانشگاهی در زمینه حفاری مکانیزه به‌طور غالب مختص متخصصین علوم زمین و معدن (و در موارد کمتر دانشجویان مهندسی عمران) است. اگرچه گرایش‌های مهندسی مکانیک نیز از رشته‌های مرتبط به صنعت تونل‌سازی مکانیزه هستند اما کمتر مشاهده می‌شود که دانشجویانِ این گرایش‌ها، زمینه مطالعاتیِ پایان‌نامه خود را در موضوعاتِ پیرامونِ این صنعت دنبال کنند. از این‌رو در حوزه صنعت حفاری مکانیزه، مابین دانش‌آموختگان مکانیک با گرایش‌هایی نظیر زمین‌شناسی، تحقیقات بین‌رشته‌ای وجود ندارد. بومی‌سازی و رشد دانش حفاری مکانیزه در ایران (تأمین قطعات یدکی و بهسازی تی‌بی‌ام‌های وارداتی، راهبری دستگاه‌ها در شرایط متنوع زمین‌شناسی ایران) نیازمند همکاری و مطالعات بین‌رشته‌ای مابین دانش‌آموختگان رشته‌های مذکور است.

مراجع

[1] Hassanpour, Jafar. Development of an empirical model to estimate disc cutter wear for sedimentary and low to medium grade metamorphic rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 75:90 – 99, 2018.

[۲] جودکی، وحید و اجل‌لوئیان، رسول. نقش شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمرود). *فصلنامه علمی– پژوهشی علوم زمین*، ۲۵(۹۷):۱۵۱–۱۶۲، ۱۳۹۴.

[۳] جودکی، وحید، اجل‌لوئیان، رسول، و یزدخواستی، نرگس. مقایسهٔ نتایج برگردان دوبُعدی داده‌های مقاومت‌سنجی با شرایط زمینشناسی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود. *مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۱۱(۱):۴۹–۶۴، ۱۳۹۷.

[4] Sharifzadeh, Mostafa and Shaabani, A. Hemmati. Tbm tunneling in adverse rock mass with emphasis on the tbm jamming accident in ghomrud water transfer tunnel. 2006.

[۵] حسن‌پور، جعفر. پیشنهاد بهینه‌سازی کله حفاری ماشین S-124 پروژه چمشیر، ۱۳۹۱. طرح پژوهشی.

[۶] خسروتاش، محمد. امکان‌سنجی بهره‌گیری از دستگاه‌های TBM موجود در کشور با تکیه بر توان بازسازی داخلی در شرایط تحریم (مطالعه موردی: بازسازی و بهسازی TBM S124 برای پروژه تونل چمشیر، ۱۳۹۳. سمینار علمی کاربردی کارگروه حفاری مکانیزه انجمن تونل ایران، شرکت سابیر.

[7] Esmaeili Vardanjani, s, Hassanpour, j, Cheshomi, a, and Khosrotash, m. Predicting clogging potential of aghajari formation along chamshir water conveyance tunnel. in *11th Iranian and 2nd Regional Tunnelling Conference*, Iran, 2015.

[8] Nikkhah, M., Mousavi, Seyed S., Zare, Sh., and Khademhosseini, O. Evaluation of structural analysis of tunnel segmental lining using beam-spring method and force-method (case study: Chamshir water conveyance tunnel). *Journal of Mining and Environment*, 8(1):111–130, 2017.

[9] SCE (Sahel Consultant Engineers). Geological and engineering geological review of bazideraz water conveyance tunnel, 2015. SCE 4120 UNG TUN EG RP 001 D0.

[۱۰] جودکی، وحید، سهرابی بیدار، عبدالله، اجل‌لوئیان، رسول، امینی، نوید، و دیکمن، توماس. ارزیابی نتایج آزمایش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (TSP) بر اساس شواهد زمین‌شناسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاهِ EPB Hard Rock. *مجله علمی– پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران*، ۱۱(۲):۱۵–۳۱، ۱۳۹۷.

[11] Hassanpour, J, Rostami, J, Firouzei, Y, and Tavakoli, HR. Optimizing tbm cutterhead design for application in very strong and abrasive rocks, case study of kerman water tunnel. in *Tunnels and Underground Cities. Engineering and Innovation Meet Archaeology, Architecture and Art*, pp. 3803–3813. CRC Press, 2019.

[12] Saberinasr, Amir, Morsali, Massoud, Hashemnejad, Arash, and Hassanpour, Jafar. Determining the origin of groundwater elements using hydrochemical data (case study: Kerman water conveyance tunnel). *Environmental earth sciences*, 78(6):198, 2019.

[13] Stocklin, Jovan. Structural History and Tectonics of Iran1: A Review. *AAPG Bulletin*, 52(7):1229–1258, 07 1968.

[14] Dasch, Jean M and Gorish, David J. *The TARDEC Story: Sixty-five Years of Innovation 1946-2010*. US Army Research, Development and Engineering Command, 2012.

[15] Bekker, Mieczyslaw Gregory. Theory of land locomotion. 1956.

[16] Bekker, Mieczyslaw Gregory. Off-the-road locomotion. *Research and development in terramechanics*, 1960.

[17] Bekker, Mieczyslaw Gregory. *Introduction to terrain-vehicle systems*. University of Michigan Press, 1969.

[18] Wong, J. W. *Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering*. Elsevier, 2 ed. , 2009.

[19] Drescher, Andrew and Hambleton, James. Geotechnics and terramechanics. in *58th Annual Geotechnical Engineering Conference*, pp. 7–19. University of Minnesota, 02 2010.

[20] Arvidson, R.E., DeGrosse, P., Grotzinger, J.P., Heverly, M.C., Shechet, J., Moreland, S.J., Newby, M.A., Stein, N., Steffy, A.C., Zhou, F., Zastrow, A.M., Vasavada, A.R., Fraeman, A.A., and Stilly, E.K. Relating geologic units and mobility system kinematics contributing to curiosity wheel damage at gale crater, mars. *Journal of Terramechanics*, 73:73 – 93, 2017. Manned/Unmanned Ground Vehicles: Off-Road Dynamics and Mobility.

[21] Harmon, Russell S., Baker, Sophie E., and McDonald, Eric V. *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America, 01 2014.

[22] Bacon, Steven N., McDonald, Eric V., Baker, Sophie E., Caldwell, Todd G., and Stullenbarger, Graham. Desert terrain characterization of landforms and surface materials within vehicle test courses at u.s. army yuma proving ground, usa. *Journal of Terramechanics*, 45(5):167 – 183, 2008.

[23] Halvorson, Jonathan J, McCool, Donald K, King, Larry G, and Gatto, Lawrence W. Soil compaction and over-winter changes to tracked-vehicle ruts, yakima training center, washington. *Journal of Terramechanics*, 38(3):133 – 151, 2001.

[24] Shoop, S.A. Thawing soil strength measurements for predicting vehicle performance. *Journal of Terramechanics*, 30(6):405 – 418, 1993.

[25] Henderson, Joseph P. Dust storms and the 1980 Iran hostage rescue attempt. in *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America, 01 2014.

[26] Muro, Tatsuro. Drilling rate of rotary percussion drill bits and rock characteristics. *Journal of Terramechanics*, 25(3):191 – 199, 1988.

[۲۷] جودکی، وحید، اجل‌لوئیان، رسول، و حسن‌پور، جعفر. ضرورت بازنگری سرفصل‌های آموزشی و پژوهشی دانشکده‌های زمین‌شناسی جهت رویکرد به کاربردهای تکنولوژیکی در صنایع (با نگرش ویژه به فناوری تونل‌سازی مکانیزه). *فصلنامه علمی- پژوهشی علوم زمین*، ۲۸ (۱۱۲):۳–۱۲، ۱۳۹۸.

[28] Bieniawski, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Wiley, 1989.

[۲۹] حسن‌پور، جعفر و رستمی، جمال. *عملکرد ماشین‌های تونل‌بُری در سنگ سخت*. نشر خرم- نشر فن، ۱۳۸۹.

[30] Rostami, Jamal and Ozdemir, Levent. A new model for performance prediction of hard rock tbms. in *Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference*, p. 793, Boston, 1997.

[31] Cerchar. Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks. *Centre Study Research, French Coal Industry, Document 59-73*, pp. 1–10, 1973.

[32] Hassanpour, J., Rostami, J., and Zhao, J. A new hard rock tbm performance prediction model for project planning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(5):595 – 603, 2011.

[33] Hassanpour, Jafar, Rostami, Jamal, Zhao, Jian, and Azali, Sadegh Tarigh. Tbm performance and disc cutter wear prediction based on ten years experience of tbm tunnelling in iran. *Geomechanics and Tunnelling*, 8(3):239–247, 2015.

[34] Frenzel, Christian, Käsling, Heiko, and Thuro, Kurosch. Factors influencing disc cutter wear. *Geomechanics and Tunnelling*, 1(1):55–60, 2008.

[35] Wittke, Walter, Erichsen, C, and Gattermann, J. Stability analysis and design for mechanized tunnelling. *WBI, Felsbau GmbH, Aachen*, 2006.

[36] Bruland, A. *Hard rock Tunnel Boring*. Ph.D. thesis, The Norwegian university of Science and Technology (NTNU), Trondhein, Norway, 1998.