

ارتباط علوم زمین شناسی و مهندسی مکانیک در افزایش بهره‌وری ماشین‌های حفار تمام مقطع

وحید جودکی^۱، جعفر حسن‌پور*^۲، رسول اجل‌لوییان^۳

دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۰۹ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۲/۲۳

چکیده

در محیط‌های دانشگاهی و صنعتی ایران، شناخت چندانی از ارتباط علم زمین‌شناسی با شاخه‌های فنی (مکانیک، الکترونیک و غیره) وجود ندارد. چنین مفاهیمی، در سرفصل‌های دروس آموزش عالی ایران (حتی در دوره‌های تحصیلات تکمیلی) تبیین نشده است و تقریباً هیچگونه منبع پژوهشی به زبان فارسی در این زمینه منتشر نشده است. پیشینه حوزه‌های مطالعاتی مشترک مابین مهندسی مکانیک با متخصصین علوم زمین را می‌توان در شروع مباحث ترامکانیک (Terramechanics) دانست. یکی از حوزه‌های صنعتی مشترک میان مهندسی مکانیک با زمین‌شناسان در کشور ما، فناوری تونلسازی مکانیزه است. در شرکت‌های سازنده ماشین‌های حفار تونل (TBM)، طراحی‌ها و ساخت ادوات، بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی ساختگاه طرح‌ها صورت می‌گیرد. بسیاری از نقص‌های فنی مکانیکی و الکترونیکی در دستگاه‌های حفار، در مواجهه با شرایط نامساعد زمین‌شناسی در مسیر حفاری رخ می‌دهد. عملکرد قطعات مختلف دستگاه و حتی میزان مواد مصرفی آنها (انواع روغن، گریس و غیره) نیز به‌طور مستقیم مرتبط با تغییرات شرایط زمین‌شناسی سازنده‌های مسیر پیشروی است. از این‌رو در حین حفاری گاهاً در مواجهه با برخی شرایط خاص زمین‌شناسی، اعمال تغییراتی در ساختار مکانیکی و الکترونیکی دستگاه جهت عبور از زون‌های مسئله‌دار اجتناب‌ناپذیر است. در این پژوهش با تشریح تجربیات حفاری مکانیزه در تونل بازی‌دراز، به ضرورت آغاز مطالعات بین‌رشته‌ای دانش‌آموختگان زمین‌شناسی با مهندسی مکانیک، در آموزش عالی و صنایع کشور پرداخته می‌شود. در مقاله حاضر با تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار و بررسی شرایط زمین‌شناسی در پروژه تونل بازی‌دراز، به چگونگی اعمال تغییرات در ساختار دستگاه حفار پرداخته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد در این پروژه جهت سازگار نمودن ویژگی‌های دستگاه با شرایط زمین‌شناسی مسیر، مجموعه‌ای از اصلاحات مکانیکی از جمله: حذف جک شماره ۲۶ تراست، تعبیه ۹ عدد چال گمانه پیشرو در نیمکره پایین سپر میانی دستگاه، حذف تمام جک‌های مفصلی پس‌بوی دستگاه (به تعداد ۱۶ جک)، تغییر آرایش ابزارهای برشی کله‌حفار و ساخت ۷ عدد مبدل گیربکس برای افزایش سرعت چرخش کله‌حفار، اجتناب‌ناپذیر بوده است.

کلید واژه‌ها: ماشین حفار تونل، ترامکانیک، مکانیک، مبدل گیربکس، جک مفصلی پس‌بوی.

۱. کارشناسی ارشد، واحد خدمات مهندسی پروژه بازی‌دراز، شرکت مهندسی مشاور ساحل امید ایرانیان، تهران، ایران. Joudaki_vahid@yahoo.com

۲. دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. Hassanpour@ut.ac.ir

۳. استاد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Rasajl@sci.ui.ac.ir

۱. مقدمه

در ایران صنایع مرتبط با حوزه فعالیت زمین‌شناسان، اغلب ماشین‌آلات و ادوات مورد نیاز خود را از خارج از کشور تأمین می‌کنند. صنایع غیر خودکفا و وابسته، به دلیل تهیه ماشین‌آلات از خارج، تفکری را در بخش‌های صنعتی و دانشگاهی ایجاد نموده‌اند که از بدو تأسیس رشته زمین‌شناسی در ایران تا کنون، هیچگونه همپوشانی و مطالعات بین‌رشته‌ای مابین زمین‌شناسان با گرایش‌های مهندسی مکانیک و الکترونیک برقرار نشده است. حتی در دانشکده‌های زمین‌شناسی کشور نیز آگاهی چندانی از ضرورت و امکان مشارکت زمین‌شناسان با متخصصین شاخه‌های فنی در طرح‌های صنعتی وجود ندارد. اما در کشورهای توسعه‌یافته، تولید ماشین‌آلات حفاری مکانیزه و بسیاری از صنایع دیگر (ساخت تجهیزات اکتشافاتی صنعت نفت و غیره)، بر پایه مطالعات زمین‌شناسی و به‌واسطه تلفیق دانش پژوهشگران حوزه علوم زمین با ابتکارات دانشگاهیان در رشته‌های مهندسی مکانیک، الکترونیک شکل گرفته است. در چنین فضایی، تکنولوژی‌های جدیدی (با کاربری‌های متفاوت نظامی، فضانوردی، کشاورزی، اکتشافات مواد معدنی زمین و غیره)، از تلفیق دانش متخصصین مکانیک و زمین‌شناسی (در قالب علوم نوین نظیر ترامکانیک) در حال توسعه هستند. یکی از حوزه‌های مطالعاتی مشترک میان زمین‌شناسان و شاخه‌های فنی (مکانیک و الکترونیک)، صنعت حفاری مکانیزه است. در سال‌های اخیر صنعت حفاری مکانیزه در زمینه تونل‌های مترو، انتقال آب، جاده‌ای و تأسیسات، گسترش قابل ملاحظه‌ای را در ایران تجربه کرده است. رخدادهای زمین‌شناسی در مسیر پیشروی ماشین‌های حفر تونل (تغییرات لیتولوژیکی، برخورد به نواحی گسلی، هجوم آب زیرزمینی، ورود گازهای سمی انفجاری و غیره)، به‌طور مستقیم بر عملکرد قطعات مکانیکی و الکترونیکی دستگاه‌های حفار تأثیر گذارند. از این‌رو می‌بایست پیش از انتخاب دستگاه، با انجام مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی 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 بروز مشکلات عدیده در حین عملیات حفاری شود. در برخی پروژه‌ها عدم پیش‌بینی دقیق مخاطرات زمین‌شناسی و در نتیجه عدم تناسب ساختار دستگاه‌های حفار با شرایط ژئوتکنیکی منطقه‌ی احداث تونل، موجب تشدید مخاطرات و تأخیر در برنامه‌ی زمان‌بندی اجرای طرح‌ها شده است. از این‌رو کاربرد ماشین‌آلات حفاری در پروژه‌ها با مشکلاتی همراه است و شرکت‌های فعال صنعت تونل‌کشور برای سازگاری هر چه بیشتر این ماشین‌آلات با شرایط پیچیده زمین‌شناسی، در مرحله حفاری نیز نیازمند همکاری چندجانبه متخصصین گرایش‌های مختلف (زمین‌شناسی، مکانیک، الکترونیک) در قالب یک تیم فنی (واحد راهبری) هستند. مهندسان مکانیک و الکترونیک در یک پروژه حفاری مکانیزه، می‌بایست از چگونگی تأثیرات شرایط مختلف زمین‌شناسی بر عملکرد دستگاه حفار آگاه باشند، 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 پرمخاطره، از توقف عملیات حفاری و نقص‌های فنی دستگاه جلوگیری نمایند (جودکی و همکاران، ۱۳۹۸- الف). 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. در این پژوهش با پرداختن به تجارب حفاری مکانیزه در تونل انتقال آب بازی‌دراز، به ضرورت آغاز پژوهش‌های بین‌رشته‌ای زمین‌شناسان با متخصصین شاخه‌های فنی مهندسی پرداخته شده است.

۲. پیشینه تحقیقات بین‌رشته‌ای (ترامکانیک)

در کشورهای صنعتی، شکوفایی علوم مهندسی موجب شده است که از همپوشانی دانش متخصصین علوم زمین در کنار ابتکارات متخصصین گرایش‌های فنی (مکانیک، الکترونیک، متالوژی و غیره)، برای ساخت تجهیزات و ماشین‌آلات مختلف بهره گرفته شود. به نحوی که طی چند دهه اخیر، پیشرفت‌های شگرف و ابداعات مختلفی نیز در طراحی ساختار ماشین‌های حفر تونل رخ داده است. این در حالی است که در ایران حتی تأمین قطعات یدکی و بهسازی دستگاه‌های وارداتی موجود در کشور با چالش‌های فراوانی مواجه است.

پیشینه حوزه‌های مطالعاتی مشترک مابین مهندسی مکانیک با متخصصین علوم زمین را می‌توان در شروع مباحث ترامکانیک (Terramechanics) دانست. مطالعات ترامکانیک در حیطه علوم زمین، بیشتر بر حوزه زمین‌شناسی نظامی (توسعه صنعت ماشین‌آلات جنگی بر پایه شناخت مورفولوژی عوارض زمین و نیز مباحث مکانیک خاک و سنگ) متمرکز بوده است (جودکی و همکاران، ۱۳۹۸-ب).

مفهوم ترامکانیک برای اولین بار در مرکز تحقیقات خودروهای نظامی ارتش ایالات متحده آمریکا مطرح شد. این مفهوم در ابتدا برای مطالعه و بهبود عملکرد خودروها بر روی زمین (برهم‌کنش چرخ خودروها با خصوصیات زمین) ارائه شد (Daschand Gorsich, 2012). بکر (Bekker, 1956) از جمله پژوهشگران سرشناس در حوزه دانش ترامکانیک است و در تألیفات خود به تشریح مبانی این دانش پرداخته است. 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 (Wong, 2010). 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 زمین‌شناسی

نظامی 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- معدنکاری نیز مورد استفاده قرار گیرد. نیازمندی به توسعه دانش طراحی ماشین‌آلات مرتبط با زمین، فعالیت‌های اکتشافی در "زمین، بستر دریاها و در سایر سیارات منظومه شمسی" موجب توسعه دانش ترامکانیک می‌شود (Wong, 2010). در تحقیقات برخی پژوهشگران به تبیین ارتباط ترامکانیک با مبانی زمین‌شناسی پرداخته شده است. به‌طور مثال در یک مقاله توسط درچر و همبلتون (Drescher and Hambleton, 2010)، به تشریح ارتباط ترامکانیک با مبانی ژئوتکنیک و مکانیک خاک پرداخته شده است. در مقاله دیگری از مورلند و همکاران (Moreland et al, 2017)، به بررسی تأثیرات تشکیلات سطح کره مریخ (رگولیت، خاک‌های ریزدانه و غیره) بر عملکرد حرکتی کاوشگرهای فضایی پرداخته شده است.

در علوم زمین‌شناسی نظامی نیز شیوه مطالعه خاک‌ها فراتر از مفاهیم سنتی است و تأثیر پارامترهای بافت، مقاومت، رطوبت خاک، بر فعالیت‌های نظامی و طراحی ماشین‌آلات جنگی مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Harmon and McDonald, 2014). در مطالعات محققین ترامکانیک، ادغام اطلاعات پارامترهای مهندسی خاک و مورفولوژی زمین برای پیش‌بینی پوشش خاک و تأثیرات آنها بر تحرک خودروها (برهم‌کنش زمین و چرخ‌های خودرو) ضروری است (Bacon et al. 2008; Halvorson et al. 2001; Shoop, 1993).

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) اشاره کرد که در مقاله‌ای از هندرسون

همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، بخش ابتدایی تونل (که در این مطالعه بیشتر مد نظر است)، در سازند گچساران حفر شده است که از نظر لیتولوژیکی متشکل از تناوبی از مارن، گچ، انیدریت و ماسه‌سنگ‌های آهکی است. این واحدهای زمین‌شناسی از نظر ویژگی‌های مکانیکی از دوام و مقاومت بالایی برخوردار نیستند و در مقابل فرسایش و هوازگی بسیار حساس هستند. قابلیت تورم از دیگر ویژگی‌های بخش‌های دارای انیدریت و مارن می‌باشد که در تونلسازی بسیار حائز اهمیت است. این سنگ‌ها در رده ساینده‌گی اندک هستند و پدیده سایش مشکل مهمی در این تشکیلات محسوب نمی‌شود. همچنین این سنگ‌ها نفوذپذیری اندکی دارند و علی‌رغم حفاری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی، هیچگونه جریان آب قابل توجهی به داخل تونل در زمان حفاری وجود نداشته است.

۴. ویژگی‌های ماشین حفار

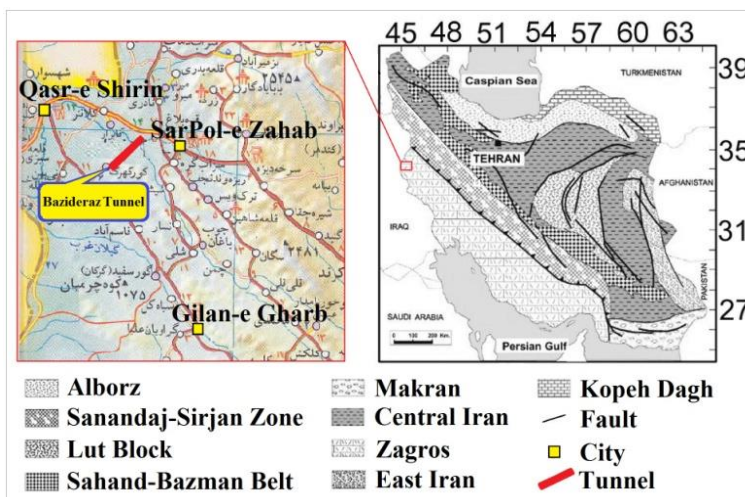
برای حفاری تونل بازی‌دراز از یک دستگاه حفار تمام مقطع از نوع EPB Hard Rock استفاده شده است (جدول ۲). ساختار ماشین حفار در این پروژه، در مواجهه با سنگ‌های نرم در برخی سازندها (جهت عمل‌آوری مصالح: جلوگیری از پدیده کلاکینگ در تشکیلات مارنی و گلسنگ) و همچنین به منظور کنترل مخاطراتی مانند انتشار گاز سمی سولفید هیدروژن (جلوگیری از تجارب ناگوار مشابه در تونل نوسود)، انتشار گاز انفجاری متان و هجوم آب‌های زیرزمینی، از عملکرد مناسبی برخوردار بوده است (شکل ۳). با این حال در این پروژه با توجه به اینکه ماشین حفار به صورت دست‌دو 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 کله‌حفار دستگاه مشکل‌ساز شده است و این مسئله موجب افزایش زمان‌بندی اجرای طرح شده است. حفاری این تونل در اسفندماه ۱۳۹۴ آغاز شده (شکل ۴) و در دی‌ماه ۱۳۹۷ پایان یافت.

(Henderson, 2014)، به شرح تأثیرات شرایط زمین‌شناسی (نقش ارتفاعات زاگرس در ایجاد ناپایداری جوی، تأثیر پوشش خاکی صحرای طبس و سایر عوامل) بر عملکرد هلیکوپترها در این عملیات پرداخته شده است. و اما در زمینه ماشین‌آلات معدنکاری، در یک تحقیق که توسط مورو (Muro, 1988) در مجله ترامکانیک ارائه شده، محقق به بررسی تأثیر پارامترهای مهندسی توده‌سنگ‌ها (نمونه‌های ماسه‌سنگ، ریولیت، شیل، آهک، گرانیت، کوارتزیت و آندزیت) بر سرعت حفاری مته‌های دستی، پرداخته است.

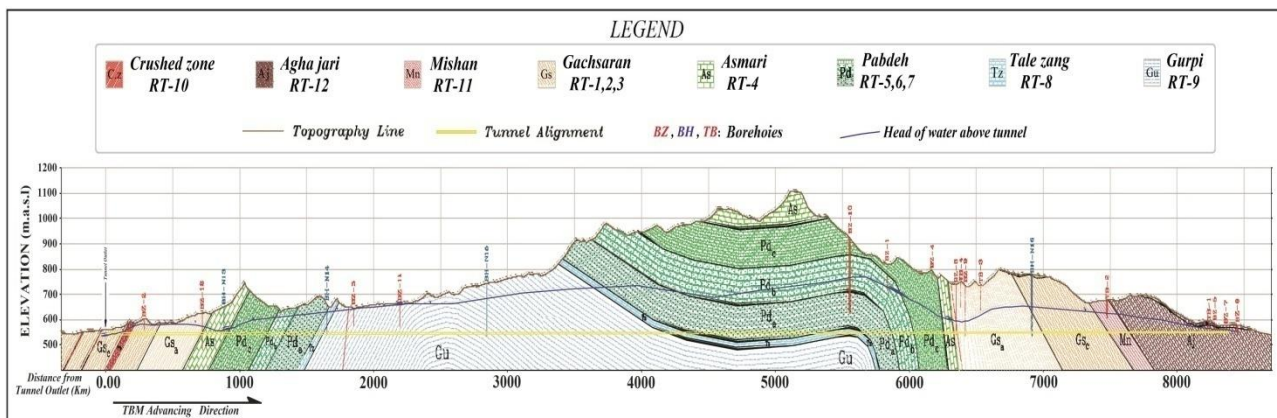
در زمینه ماشین‌های حفار تونل نیز مطالعه خصوصیات زمین‌شناسی خاک‌ها و سنگ‌ها، نقش مهمی در طراحی ساختار دستگاه‌ها و نیز روند حفاری آنها در مرحله اجرای تونل‌ها دارد. اگرچه طراحی همه اجزاء مکانیکی دستگاه حفار تونل، در حیطه موضوعات ترامکانیک قرار نمی‌گیرد، اما طراحی دستگاه در بخش کله‌حفار و اندرکنش ابزارهای برشی آن با زمین پیش‌رو، به‌طور مستقیم در قالب مفاهیم علم ترامکانیک می‌گنجد و قابلیت بحث دارد.

۳. زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی

ساختگاه مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران (آقائاتی، ۱۳۸۳) و با توجه به شکل ۱، در زون زاگرس چین‌خورده قرار دارد. مسیر تونل انتقال آب بازی‌دراز در بخشی از یک تاقدیس بزرگ قرار گرفته است. حضور چند گسل در محدوده مورد نظر و تکتونیزه شدن توده‌سنگ‌ها در این منطقه باعث ایجاد بخش‌های خرد شده‌ای در مسیر تونل شده است (SCE, 2015). بر اساس بررسی‌های انجام شده، در مجموع توده‌سنگ‌های رخنمون‌یافته در مسیر تونل به هفت گونه زمین‌شناسی مهندسی (مربوط به هر یک از سازندهای گچساران، آسماری، گورپی، پابده، تله‌زنگ، میشان و آغاچاری) تفکیک شده است. در شکل ۲، مقطع زمین‌شناسی مهندسی تونل و در جدول ۱ نیز معرفی تشکیلات سنگی و پارامترهای مهندسی آنها ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت زمین‌شناسی (برگرفته از Stocklin, 1977) و جغرافیایی تونل بازی دراز.



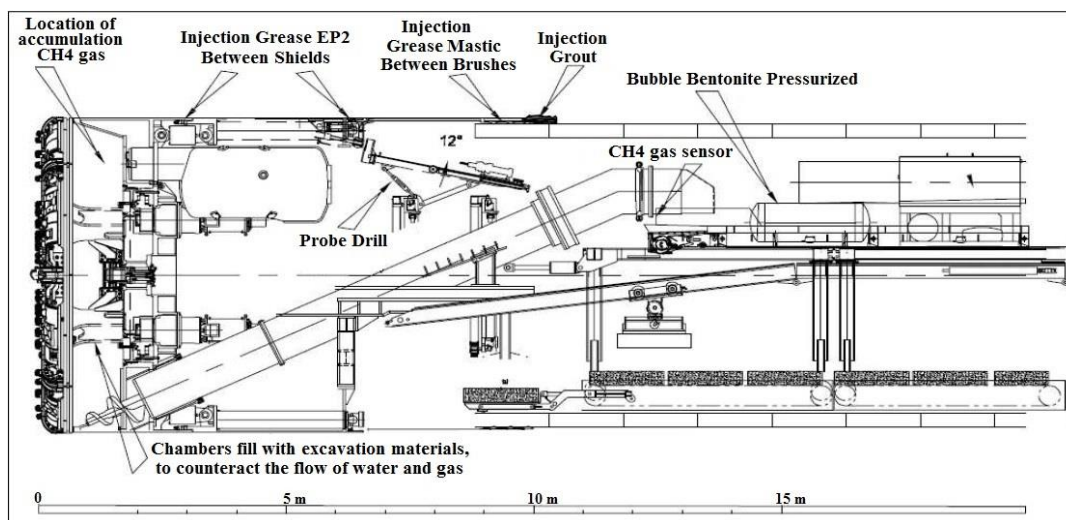
شکل ۲. مقطع زمین‌شناسی مهندسی تونل (SCE, 2015).

جدول ۱. تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها بر اساس اطلاعات گمانه‌های اکتشافی (SCE, 2015).

| Geological Types | Formation | Lithology | UCS (MP) | | RQD (%) | | RMR | |
|------------------|-----------|------------------------------------|----------|-----|---------|-----|-----|-----|
| | | | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| RT-1,2,3 | Gachsaran | Marl, Anhydrite, Limy Sandstone | 10 | 35 | 75 | 95 | 38 | 56 |
| RT-4 | Asmari | Limestone | 55 | 70 | 55 | 65 | 48 | 66 |
| RT-5,6,7 | Pabdeh | Shale, Shaly Limestone | 25 | 35 | 70 | 75 | 38 | 51 |
| RT-8 | Tale zang | Limestone | 65 | 75 | 55 | 60 | 46 | 64 |
| RT-9 | Gurpi | Shale, Limy Shale, Limy Marl, Marl | 7 | 25 | 80 | 95 | 39 | 52 |
| RT-10 | - | Crushed Zones | 5 | 10 | 20 | 25 | 5 | 20 |
| RT-11 | Mishan | Marl, Clayey Limestone, Sandstone | 40 | 50 | 45 | 55 | 38 | 51 |
| RT-12 | Agha jari | Marl, Siltstone, Sandstone | 35 | 45 | 45 | 60 | 36 | 51 |

جدول ۲. مشخصات ماشین حفار پروژه بازی دراز.

| Type of TBM | Manufacturer | | Model | Diameter of Cutterhead (m) | Shields length (m) | Operational Trust Force (KN) | Rotary speed of the Cutterhead (Rev/min) | Power Cutterhead (KW) |
|---------------|--------------|---------|----------|----------------------------|--------------------|------------------------------|--|-----------------------|
| | Company | Country | | | | | | |
| EPB Hard Rock | Lovat | Canada | RME270SE | 6.8 | 9.2 | 65000 | 2.5 | 1600 |



شکل ۳. طرحی شماتیک از ساختار ماشین برای کنترل گاز و آب.



شکل ۴. مونتاژ سیستم پشتیبان و کله‌حفار ماشین پروژه بازی‌دراز.

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار، نتایج حاکی از آن بود که در شرایط معمول (با فرض سازگاری دستگاه با شرایط زمین‌شناسی)، حدود ۹۰ عدد دیسک برشی به دلیل سایشِ نُرمال (در کل مسیر ۸/۵ کیلومتری)، نیازمند تعویض خواهد بود. این در حالی است که با شروع حفاری، 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 ۶).

۵. طرح پیشنهادی برای اصلاح ساختار مکانیکی دستگاه جهت عبور از سنگ‌های توده‌ای (Massive Rocks)
دستگاه حفار در پروژه بازی‌دراز، در مواجهه با سنگ‌های بکر یکپارچه (شاخص کیفی: ۱۰۰) و سنگ‌های توده‌ای با درزه‌داری اندک (شاخص کیفی: بیش از ۸۰) با چالش‌های فراوانی مواجه شده است. کاهش نرخ نفوذ، افزایش شدید و پیش‌بینی‌نشده استهلاک دیسک‌های برشی، افزایش نامتعارف زمان‌های حفاری و افزایش مواد مصرفی دستگاه (انواع روغن، گریس و فوم)، از عمده‌ترین این چالش‌ها بوده است. سنگ‌های یکپارچه، به تناوب در کل مسیر حفاری و در تمام سازندهای زمین‌شناسی تونل وجود داشته‌اند (شکل ۵). قبل از آغاز پروژه، در مطالعات انجام شده (SEC, 2015)، بر اساس



شکل ۵. دید از دریچه چمبر - نمایی از وضعیت ژئومکانیکی سینه‌کار حفاری، کیلومتر ۰+۴۹۰ در سنگ بکر انیدریت*.

*کاهش نفوذ دیسک‌های برشی (تا میزان ۲ میلی‌متر بر دور کله‌حفار). افزایش نامتعارف زمان حفاری به میزان ۲۱۵ دقیقه در این رینگ (طول هر رینگ: ۱۵۰ سانتیمتر). خط سایش دیسک‌های برشی و وضعیت یکپارچه سنگ (RQD=100) به وضوح قابل مشاهده است.

اندک) است. بررسی شرایط نشان می‌دهد ساختار مکانیکی دستگاه در زمینه سرعت چرخش کله‌حفار (Revolution Per Minute) و نیز فواصل آرایش ابزارهای برشی کله‌حفار موجب شده است که مکانیسم برش در سنگ و فرآیند تشکیل تراشه (Chipping) در اثر عملکرد دیسک‌های برشی روی سنگ به درستی انجام نگیرد.

فواصل آرایش دیسک‌های برشی در طراحی کله‌حفار برای محیط‌های سنگی یکپارچه (با شاخص کیفی نزدیک به ۱۰۰) و مقاوم، مناسب نبوده و تنها برای توده‌سنگ‌های نرم و درزه‌دار (با شاخص کیفی 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 به دلیل "توان انتقال بار (نیروی) کمتر به لبه دیسک‌های برشی"، موجب تشدید مشکلات کله‌حفار شده است.



شکل ۶. شکستگی دیسک‌های برشی دوبل (دو تیغه).

عمده چالش‌ها مربوط به ساختار مکانیکی و طراحی کله‌حفار دستگاه و عدم تناسب آن با ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختگاه طرح (وجود سنگ‌های سخت یکپارچه و توده‌ای با درزه‌داری

P: میزان نفوذ دیسک در سنگ در هر دور چرخش کله حفار، می باشد.

لازم به توضیح است که برای محاسبه نیروی پیشران خالص می بایست اثر نیروهای اتلاف کننده مانند نیروی اصطکاک بر سیر دستگاه و همچنین اثر مصالح موجود در محفظه چمبر (اتافک فشار) و وجود فشار سینه کار از کل نیروی پیشران کسر گردد. محاسبه نیروی اصطکاک با توجه به وزن دستگاه، سطح تماس دستگاه با زمین و ضریب اصطکاک بین سنگ و فلز قابل محاسبه است. همچنین با مشخص بودن حجم مصالح درون چمبر و میزان فشار سینه کار که توسط دستگاه ثبت می شود، میزان اتلاف نیروی پیشران برای غلبه بر آنها با استفاده از روابط موجود قابل محاسبه است. روابط تجربی و تئوریک در این زمینه مورد استفاده قرار می گیرند که تشریح آنها خارج از بحث این مقاله می باشد.

در شکل ۸ مکانیسم برش در سنگ و فرآیند تشکیل تراشه ها در اثر عملکرد دیسک های برشی روی سنگ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، وقتی دیسک برشی روی سطح سنگ می چرخد در زیر تیغه دیسک شیار ایجاد می شود و سپس ترک های شعاعی به مرکزیت شیار تشکیل می شوند. بنابراین برای تشکیل تراشه های سنگ با سایز بهینه و پیشروی مناسب ماشین در سنگ، بایستی شرایط زیر برقرار باشد است (Rostami, 1997):

- ۱- نسبت فاصله دیسک های برشی به مقدار نفوذ اولیه مناسب باشد.
- ۲- نیروی پیشران کافی برای تامین میزان نفوذ اولیه در سنگ فراهم باشد.
- ۳- در طراحی دستگاه سرعت بهینه چرخش کله حفار لحاظ شده باشد.

نفوذ دیسک های برشی و پیشروی ماشین در توده سنگ های یکپارچه و مقاوم، نیازمند تامین نیروی لازم وارد بر هر دیسک برشی و در نتیجه تامین نیروی رانش کل دستگاه است. در این شرایط می بایست مشخصات دستگاه از جنبه ظرفیت مکانیکی، هیدرولیکی و ساختاری ارتقا یابد (Thuro and Wilfing, 2017; Villeneuve, 2017).

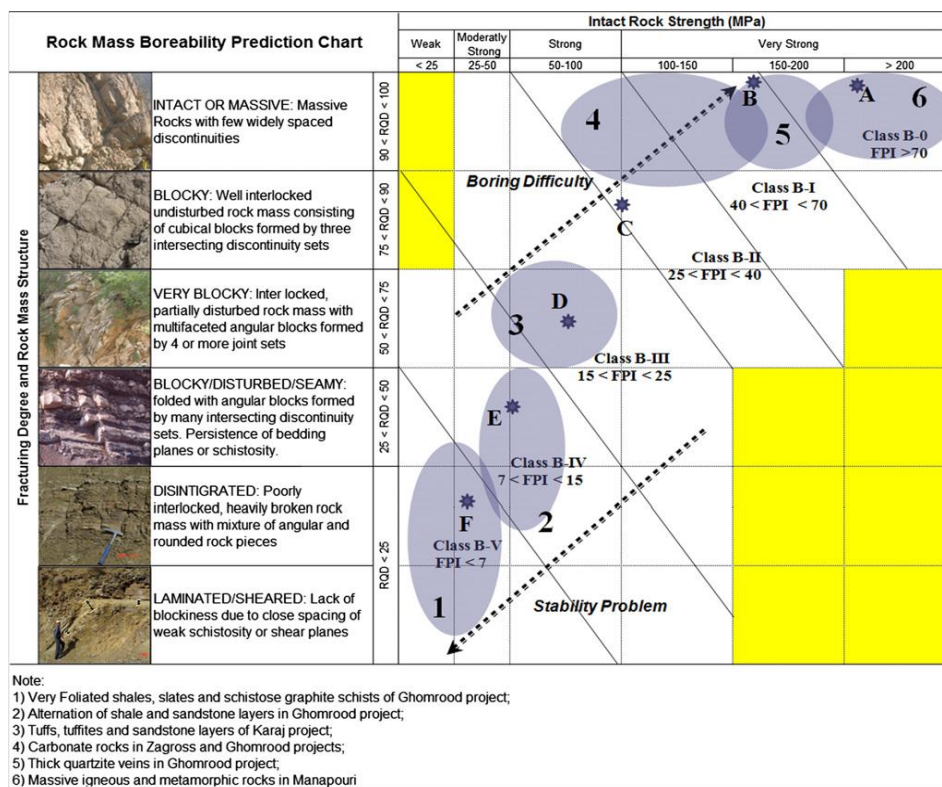
یک عامل مهم دیگر، سرعت چرخش کله حفار است. این مسئله به طور اساسی با نرخ نفوذ ماشین و شدت بارگذاری ضربه ای (Shock loading) تحمل شده توسط دیسک های برشی مرتبط است (Rostami, 1997). در پروژه مورد مطالعه، پایین بودن سرعت چرخش کله حفار (حداکثر ۲/۵ دور در دقیقه) از عوامل اصلی تأثیر گذار بر افزایش نرخ استهلاک ابزارهای برشی و کاهش نرخ نفوذ بوده است.

در این تحقیق برای بررسی شرایط حفاری، پارامترهای عملیاتی دستگاه در ۷۵۰ متر ابتدایی تونل (در محدوده سازند گچساران و بخش کوچکی از سازند آسماری) مورد تحلیل قرار می گیرد. بررسی ویژگی های لیتولوژیکی و زمین شناسی مهندسی در این محدوده (درجه استحکام و میزان خردشدگی) نشان می دهد که می توان عمده تشکیلات این محدوده را از نظر حفر پذیری (مطابق با نمودار ارائه شده در شکل ۷ و جدول ۳)، در رده B-III قرار داد. بنابراین دامنه تغییرات پارامتر شاخص نفوذ در محل (FPI: Field Penetration Index)، برای این تشکیلات بین ۱۵ تا ۲۵ پیش بینی می گردد. پارامتر شاخص نفوذ در محل با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$FPI = \frac{F_N (KN)}{P(mm/rew)} \quad (1)$$

که در آن؛

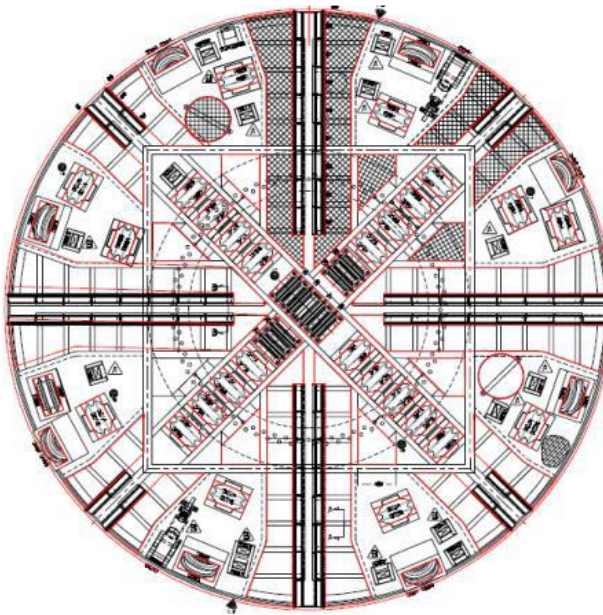
F_N : نیروی اعمالی به هر دیسک است که از تقسیم نیروی پیشران کل دستگاه (بعد از کم کردن اثر اصطکاک سیر دستگاه بر زمین) بر تعداد کل دیسک های برشی، محاسبه می شود.



شکل ۷. طبقه بندی حفرپذیری زمین (Hassanpour et al, 2011).

جدول ۳. تشریح طبقه بندی حفرپذیری زمین (Hassanpour et al, 2011).

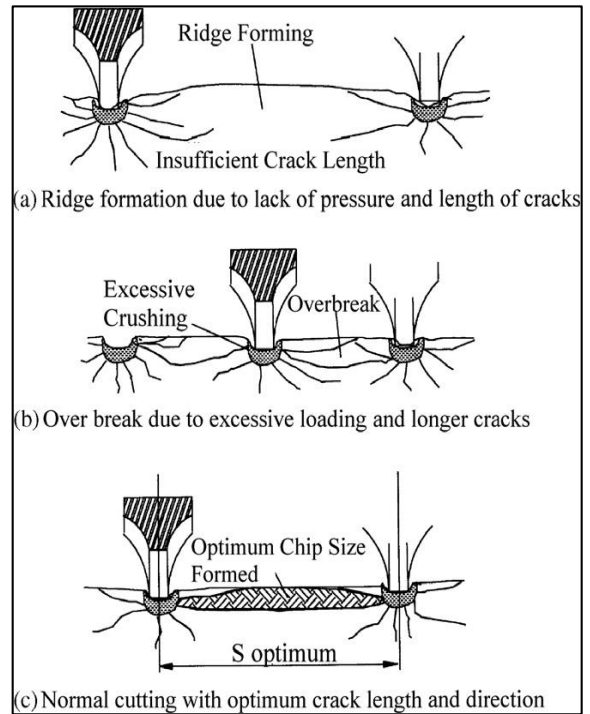
| Boreability class | FPI range (kN/mm/rev) | Rock mass boreability | Stability condition | TBM excavatability (relative difficulty of ground for TBM use) | Example |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|---|--|---|
| B-0 | >70 | Tough | Completely stable | Tough | Very strong and massive quartzitic veins, intrusive and metamorphic rocks |
| B-I | 40-70 | Fair-tough | Stable | Fair | Massive igneous and metamorphic rocks |
| B-II | 25-40 | Good-fair | Minor instabilities | Good | Blocky and jointed Tuffs, Tuffites, Limestones |
| B-III | 15-25 | Good | Only local structural instabilities | Very good | Alternations of Sandstones, limestones and Shales |
| B-IV | 7-15 | Very good | Some major instabilities | Good | Alternations of thin bedded Shale and Sandstone layers |
| B-V | <7 | Excellent | Collapse, gripper problems, squeeze, etc. | May be problematic | Highly foliated and schistose metamorphic rocks (Slate, Phyllite, Graphite schist), Shale, Marlstone, thick fault zones |



شکل ۹. نمایی شماتیک از طراحی کله حفار و آرایش دیسک‌های برشی.

جهت تحلیل عملکرد دستگاه در زمان پیشروی، می‌بایست در گام نخست نوسانات شاخص نفوذ (FPI) در مسیر حفاری شده را با استفاده از داده‌های واقعی در هر کورس محاسبه کرد.

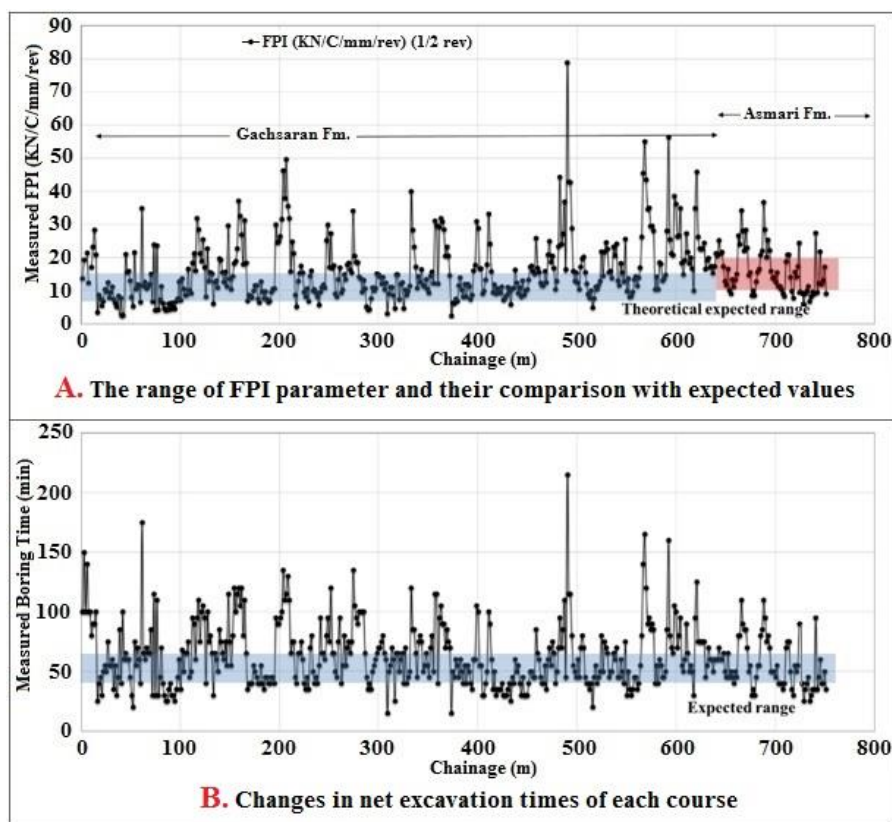
با مشخص بودن دو پارامتر F_n (KN) و P (mm/rev)، پارامتر FPI در ۷۵۰ متر ابتدایی تونل برای هر کورس حفاری محاسبه شده و تغییرات قابل بررسی است. مقایسه نتایج محاسبات واقعی (شکل ۱۰. بخش A) با مقادیر مورد انتظار (شکل ۷) نشان می‌دهد که همخوانی مناسبی میان آنها وجود ندارد و در بسیاری از مقاطع حفاری، مقادیر واقعی بسیار بالاتر از مقادیر مورد انتظار می‌باشد. این بدان معنی است که به ازای نیروی قائم اعمال شده به سینه‌کار از سوی دیسک‌های برشی، مقدار نفوذ کمی در هر دور کله‌حفار حاصل می‌گردد. بنابراین، متناسب با وضعیت شاخص نفوذ، زمان‌های حفاری نیز به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است (شکل ۱۰. بخش B).



شکل ۸. مکانیسم برش در سنگ با توجه به فاصله دیسک‌های برشی و میزان نفوذ و نیروی قائم اعمال شده به سینه‌کار از سوی دیسک‌ها (Rostami, 1997).

از آنجا که فاصله دیسک‌ها بر روی کله‌حفار ثابت و معمولاً قابل تغییر نمی‌باشد، برای رسیدن به شرایط بهینه برش و برآورده کردن شرط اول، لازم است مقدار نفوذ در سنگ (P) را تغییر داد. مقدار نفوذ در سنگ نیز رابطه مستقیم با نیروی رانش دستگاه یا همان متوسط نیروی اعمال شده به دیسک‌ها (F_n) دارد (Macias, 2016).

لازم به توضیح است که از ابتدای عملیات حفاری پروژه بازی‌دراز، تعداد ۴۲ دیسک برشی دوپل (دو تیغه) و ۴ دیسک برشی سینگل (تک تیغه) بر روی کله‌حفار نصب شده است که به این معنی است که در مجموع ۸۸ تیغه (با قطر ۱۷ اینچ: ۴۳۲ میلی‌متر) بر روی سطح سنگ به‌طور همزمان مشغول چرخش بوده‌اند (شکل ۹). لذا برای محاسبه F_n بایستی نیروی پیشران خالص بر عدد ۸۸ تقسیم گردد.



شکل ۱۰. تغییرات شاخص نفوذ و زمان‌های حفاری در ۷۵۰ متر ابتدایی تونل.

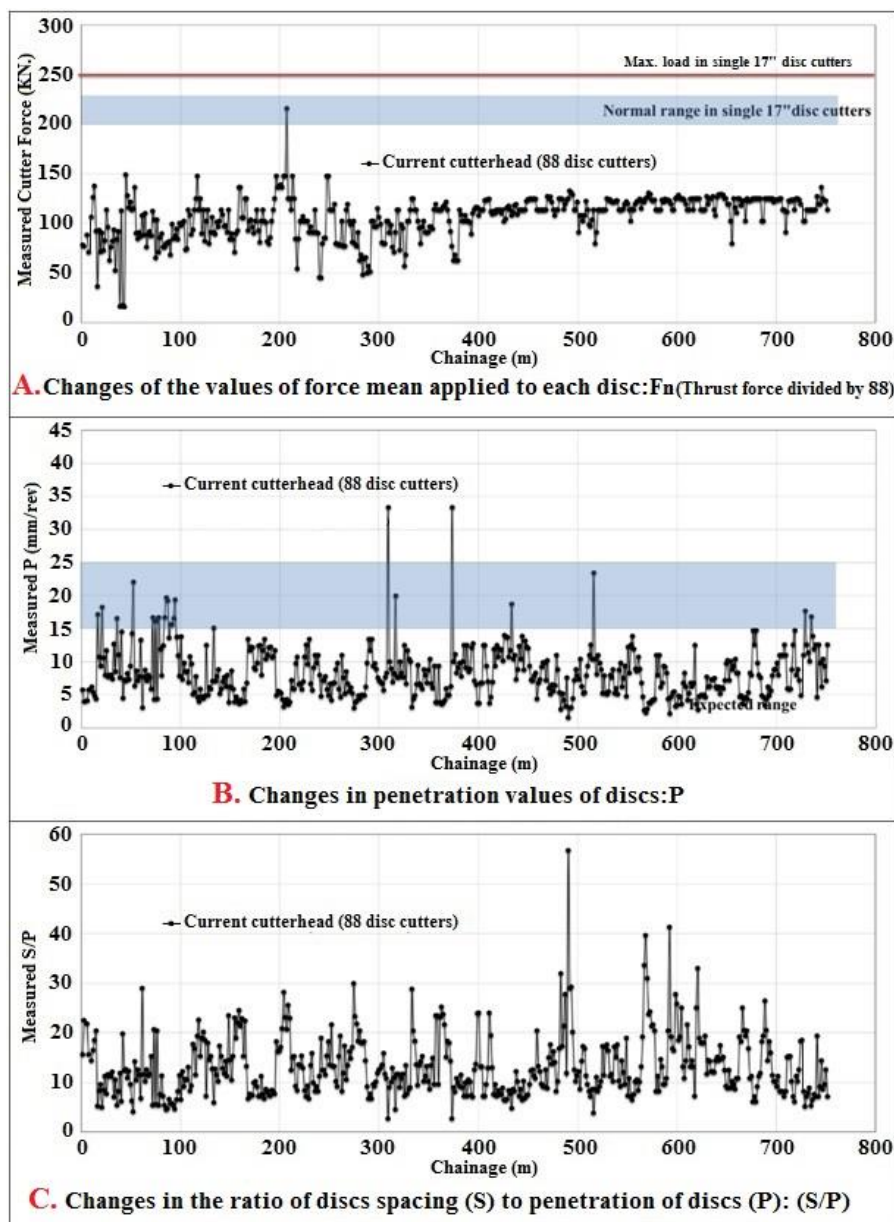
شعاعی مجاور به هم نمی‌رسند و تراشه‌های با سایز مناسب تشکیل نمی‌شوند.

با توجه به توضیحات بالا، همواره لازم است که نسبت فاصله دیسک‌های برشی (S) به میزان نفوذ دیسک در سنگ (P) با توجه به لیتولوژی سنگ‌ها و خواص مکانیکی آنها در حالت بهینه باشد. این نسبت (S/P) برای سنگ‌های ضعیف و درزه‌دار (با شاخص کیفی متوسط به پایین: که ترک‌های شعاعی در آنها به راحتی گسترش می‌یابند) می‌تواند بیشتر از "سنگ‌های یکپارچه و توده‌ای با درزه‌داری اندک" باشد که به دلیل شاخص کیفی بالا ($RQD > 80$) توسعه ترک‌ها در آنها به راحتی صورت نمی‌گیرد (Macias, 2016). در شکل ۱۱ (بخش‌های B و C)، تغییرات پارامترهای P و S/P برای مسیر حفاری شده ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر P بسیار پایین‌تر از حد انتظار و مقادیر S/P در برخی موارد بزرگ‌تر از حد انتظار (۱۰ تا ۱۵) می‌باشند. محدوده تغییرات ۱۰ تا ۱۵ برای S/P، بر اساس تجربه از پروژه‌های

در این پروژه به دلیل شرایط خاص دستگاه از نظر آرایش دیسک‌های برشی و پارامترهای اپراتوری، فرآیند برش سنگ کامل نبوده و از حالت بهینه فاصله دارد. برای بررسی این موضوع، تغییرات پارامترهای اپراتوری دستگاه در مسیر حفاری مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهم‌ترین پارامتر اپراتوری دستگاه، نیروی پیشران دستگاه به منظور تأمین نفوذ اولیه در سنگ است. مقادیر نیروی قائم محاسبه شده در هر دیسک (نیروی پیشران دستگاه تقسیم بر ۸۸) برای کورس‌های مختلف حفاری شده در شکل ۱۱ (بخش A)، ارائه شده است. همانطور که در شکل ۱۱ (بخش A)، ملاحظه می‌شود به دلیل وجود ۸۸ تیغه بر روی سطح سینه‌کار و تقسیم نیروی پیشران کل (بعد از حذف اثر اصطکاک سپر دستگاه با زمین) بر عدد ۸۸، در مجموع بار هر تیغه نسبت به محدوده نرمال بار اعمالی به دیسک‌های سینگل پایین می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود عمق شیار زیر دیسک‌ها یا میزان نفوذ اولیه (P) برای تشکیل ترک‌های شعاعی کافی نباشد و عملاً ترک‌های

پارامترهای اپراتوری بستگی تنگاتنگی با طراحی ماشین دارند. بنابر این در این پروژه برای بهبود شرایط حفاری می‌بایست طراحی ماشین را به گونه‌ای اصلاح نمود که دستیابی به این پارامترها توسط اپراتور میسر باشد.

تونلسازی مختلف (Rostami, 1997; Bruland 1998;) بدیهی است. حاصل شده است. برای دستیابی به عملکرد مناسب ماشین لازم است از پارامترهای اپراتوری مناسب با توجه به شرایط زمین‌شناسی استفاده نمود.



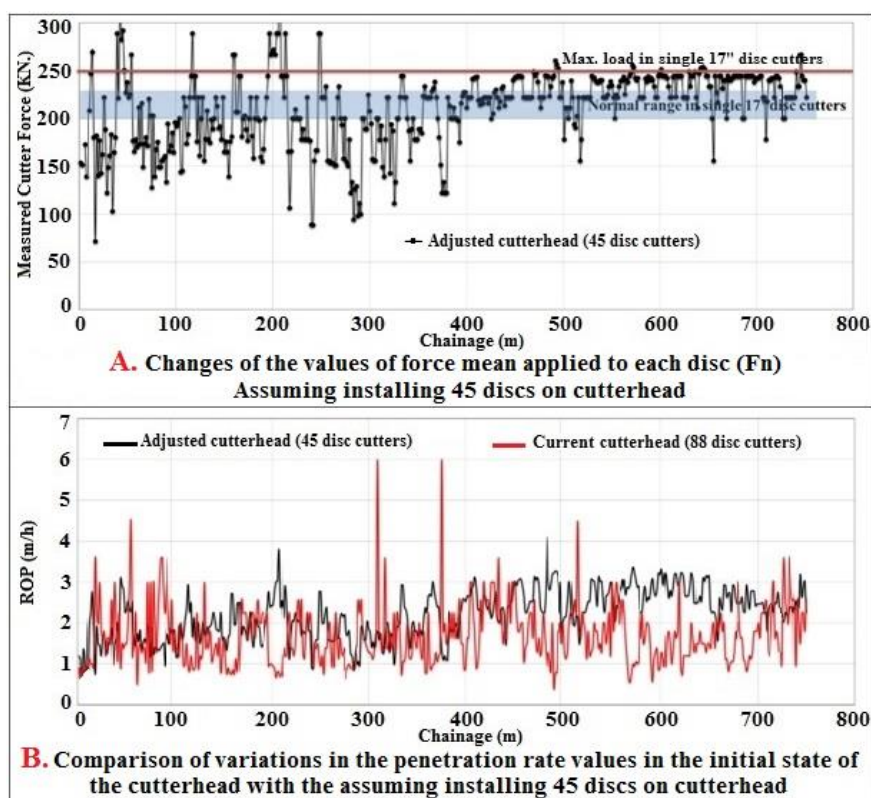
شکل ۱۱. تغییرات پارامترهای F_n ، P و S/P در مسیر حفاری.

برشی سینگل (در مجموع ۸۸ تیغه) بر روی کله‌حفار نصب شده است، حتی با اعمال تراست بالا، امکان بالا بردن بار دیسک و در نتیجه نفوذ دیسک در سنگ وجود ندارد. بنابراین

همانطور که اشاره شد، نیروی اعمالی به هر دیسک (F_n) یکی از عوامل مهمی است که لازم است مورد توجه جدی قرار گیرد. با توجه به اینکه ۴۲ دیسک برشی دابل و ۴ دیسک

مدل‌های تجربی موجود به دست آورد. در شکل ۱۲ (بخش B)، نرخ نفوذ (ROP) در حالت فرضی (۴۵ دیسک برشی) با مقادیر این پارامتر در شرایط اولیه (با ۸۸ دیسک برشی) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با وجود کاهش حلقه‌های دیسک‌ها، نرخ نفوذ تا حدودی افزایش داشته است. اگرچه این افزایش در برخی مقاطع قابل توجه است، ولی کافی نیست.

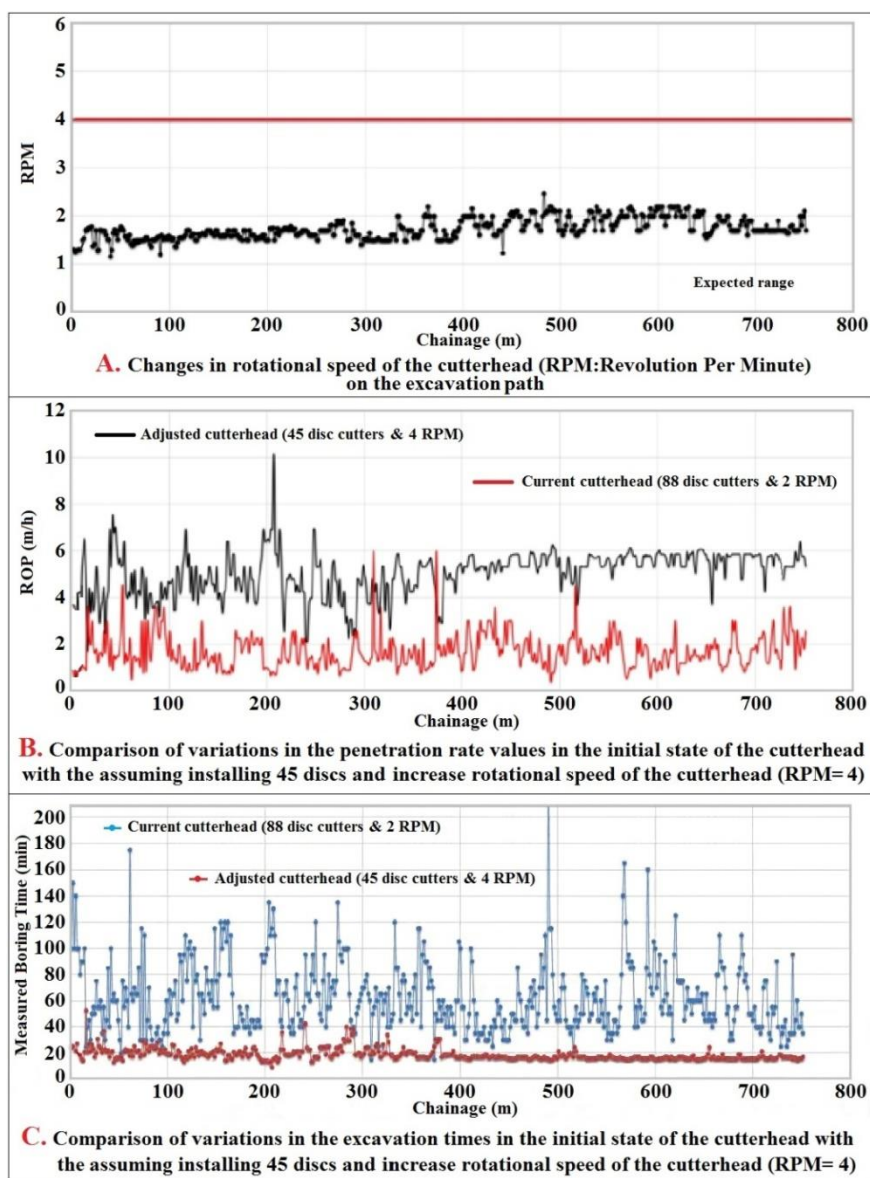
یک راهکار مناسب، تعویض دیسک‌های دوبل و استفاده از دیسک‌های سینگل می‌باشد. در این صورت با فرض چرخش ۴۵ تیغه بر روی سینه‌کار تونل و فرض ثابت بودن نیروی تراست کل، متوسط بار اعمالی به هر دیسک (Fn)، افزایش قابل توجهی خواهد یافت (شکل ۱۲. بخش A). در ادامه می‌توان با فرض منطقی برای حفارپذیری توده‌سنگ و مقادیر FPI (در اینجا بین ۱۰ تا ۱۵ kN/cutter/mm/rev) و با مشخص بودن Fn (شکل ۱۲. بخش A)، نرخ نفوذ را از طریق



شکل ۱۲. تغییرات نیروی اعمالی به هر دیسک و نرخ نفوذ در صورت تغییر آرایش دیسک‌های برشی.

چنانچه با اعمال تغییر در ساختار گیربکس دستگاه، سرعت چرخش کله‌حفار را فقط تا ۴ دور در دقیقه (RPM=4) افزایش دهیم، افزایش قابل ملاحظه‌ای در نرخ نفوذ (شکل ۱۳. بخش B) و کاهش قابل توجهی در زمان‌های حفاری (شکل ۱۳. بخش C) ایجاد خواهد شد که در عمل، پارامترهای عملکردی ماشین را بسیار بهبود خواهد بخشید. با کاهش زمان حفاری، مقدار مواد مصرفی دستگاه نیز به حد نرمال خواهد رسید (جدول ۴).

دومین پارامتر مهم تأثیرگذار بر نرخ نفوذ، سرعت چرخش کله‌حفار (RPM: Revolution Per Minute) می‌باشد. در شکل ۱۳ (بخش A)، تغییرات سرعت چرخش کله‌حفار در هر کورس مسیر حفاری نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت چرخش کله‌حفار در محدوده حداقل ۱/۵ تا حداکثر ۲/۵ دور در دقیقه، در نوسان بوده است که به دلیل ساختار مکانیکی و نوع طراحی گیربکس دستگاه، امکان چرخش بالاتر از ۲/۵ دور در دقیقه وجود نداشته است.



شکل ۱۳. وضعیت سرعت چرخش کله حفار. تأثیر تغییر ساختار گیربکس دستگاه (افزایش سرعت چرخش کله حفار) بر نرخ نفوذ و زمان حفاری.

جدول ۴. مواد مصرفی دستگاه برای حفاری یک رینگ (۱/۵ متر) در شرایط معمولی (زمان حفاری: ۱۵ تا ۲۰ دقیقه)*.

| Name of the material | Consumption volume under normal conditions | Unit | usage |
|----------------------|--|------|--|
| Foam | 122 | lit | Conditioning of excavation materials, Avoid wearing the components of the cutterhead and and screw conveyor, Decreasing the torque of the cutterhead by reducing friction and thus reducing the power required by the machine, Avoid clogging , etc. |
| Grease Mastic | 54 | Kg | Sealing the ends of the shield (Injection through brushes). |
| Grease EP2 | 5 | Kg | Rotary fluid joint, Gate and seal of screw, Sealing floods in the middle shield, Erector bearings , etc. |
| Grease HBW | 11 | Kg | Sealing and preventing the entry of excavation materials to the main drive. |

*در مسیر حفاری شده با افزایش نامتعارف زمان های حفاری (بطور متوسط ۴۰ تا ۱۲۰ دقیقه)، مقادیر مواد مصرفی نیز افزایش چندبرابری (به ویژه در سنگ های یکپارچه) داشته اند. در این پروژه تغییر ابزارهای برشی کله حفار (استفاده از دیسک های سینگل) و نیز توجیه اپراتورهای دستگاه (در زمینه

تصمیم گرفته شد که مبدل‌هایی برای گیربکس‌های دستگاه ساخته شود (به تعداد ۷ عدد) و با نصب مبدل‌ها مابین الکتروموتورها و گیربکس‌های اصلی دستگاه، سرعت چرخش کله‌حفار را از ۲ به ۵ دور در دقیقه افزایش داد.

جهت بررسی امکان‌سنجی این ایده، طراحی و ساخت مبدل‌ها با استفاده از توان متخصصین صنایع داخلی انجام گرفت (شکل ۱۴). طراحی چرخ‌دنده‌های داخل مبدل‌ها (شکل ۱۵) به نحوی انجام شد که، "سرعت چرخش خروجی گیربکس‌ها (پینیون) در محل اتصال به چرخ‌دنده پاناقان اصلی (شکل ۱۶)"، نسبت به چرخش ورودی (از سمت الکتروموتورها) افزایش یابد.

کنترل نیروی تراست 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 کله‌حفار است. بررسی کلیه جوانب امر و محدودیت‌های پروژه (خریداری ماشین حفار به صورت دست دوم، عدم مشارکت شرکت سازنده دستگاه در پروژه) حاکی از آن بود که تغییرات بنیادین در ساختار دستگاه (تهیه گیربکس‌های جدید و تعویض تمامی الکتروموتورها) با هزینه‌ها و دشواری‌های پیش‌بینی‌نشده‌ای همراه خواهد بود. از این‌رو



شکل ۱۴. مبدل‌های گیربکس.



شکل ۱۵. چرخ‌دنده‌ها و اجزای داخلی مبدل‌ها.

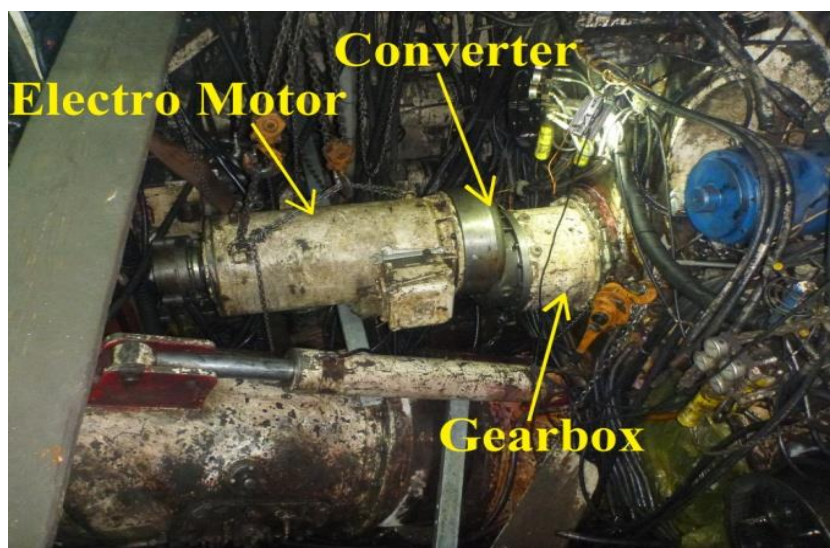


شکل ۱۶. محل اتصال چرخ‌دنده خروجی گیربکس‌ها به چرخ‌دنده یاتاقان اصلی*.

* نیروی محرک الکتروموتورها از طریق چرخ‌دنده خروجی گیربکس‌ها به چرخ‌دنده یاتاقان اصلی منتقل می‌شود. یاتاقان اصلی نیز که متصل به کله‌حفار است با چرخش خود موجب چرخش کله‌حفار می‌شود.

بیش از ۶۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش یافت. بروز اشکال 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.

پس از آماده‌سازی و 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 ۱۷). اگرچه در این تست، سرعت چرخش کله‌حفار برای لحظاتی افزایش یافت اما به فاصله‌ای کمتر از ده دقیقه دمای مبدل‌های گیربکس تا



شکل ۱۷. قرارگیری مبدل‌ها مابین گیربکس‌ها و الکتروموتورها.

مبدل‌ها شد. لذا سرانجام با جدا کردن و حذف مبدل‌ها، الکتروموتورها بدون واسطه به گیربکس‌ها متصل شدند و عملیات حفاری با همان ساختار اولیه دستگاه (شکل ۱۸)، آغاز گردید.

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 کارایی

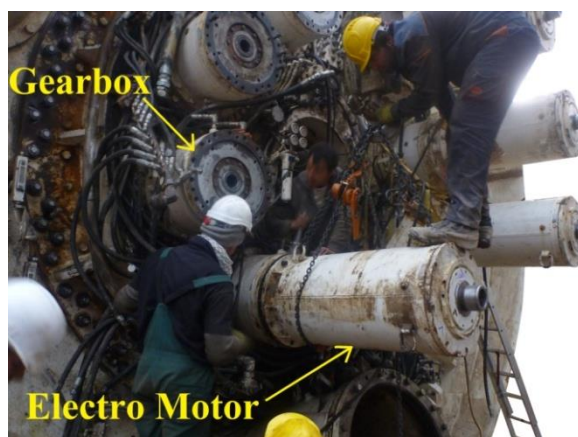
مقاطع با شیب ۷۰ الی ۸۵ درجه (به‌ویژه در لایه‌های آهک شیلی) موجب حرکت و لغزش قطعات گوه‌ای شکل سنگی بر روی سپر دستگاه شده بود. درزه‌ها با بازشدگی بیش از ۵ میلی‌متر و در فواصل نزدیک به هم (کمتر از ۲۰ سانتی‌متر) قرار داشتند. علی‌رغم ناخالصی‌های توده‌سنگ به لحاظ خواص پترولوژیکی (وجود کانی‌های رسی که سبب محدودیت توسعه آب زیرزمینی می‌گردد) اما سطوح برشی و شکستگی‌ها در زون گسلی، امکان هدایت جریان‌های آب زیرزمینی به داخل عملیات حفاری را مقدور ساخته بود، از این‌رو جریان آب نیز موجب کاهش هرچه بیشتر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ شده بود.

پیش از توقف دستگاه، در حین پیشروی مجموعه‌ای از شواهد نظیر وجود رگه‌های کانی‌های ثانویه (کلسیت) و مواد آلی قیری در مصالح، اندازه بزرگ مصالح حفاری (شکل ۱۹)، افزایش سطح انتشار گازهای سولفید هیدروژن (تا حد ۹۰۰ PPM) و متان (تا حد ۱۰۰ LEL)، تغییرات پارامترهای عملیاتی دستگاه (تراست، گشتاور و نرخ نفوذ) و غیره، عبور دستگاه از یک ناحیه گسلی و احتمال وقوع مخاطرات ناشی از آن را تأیید می‌نمود.



شکل ۱۹. اندازه مصالح حفاری در موقعیت توقف دستگاه.

در موقعیت توقف دستگاه در قسمت سمت چپ سینه‌کار حفاری، آثاری از مواد آلی (قبر طبیعی: گیلسونایت) و وجود رگه‌های ثانویه کلسیت در میان درزه‌ها دیده می‌شد. مواد



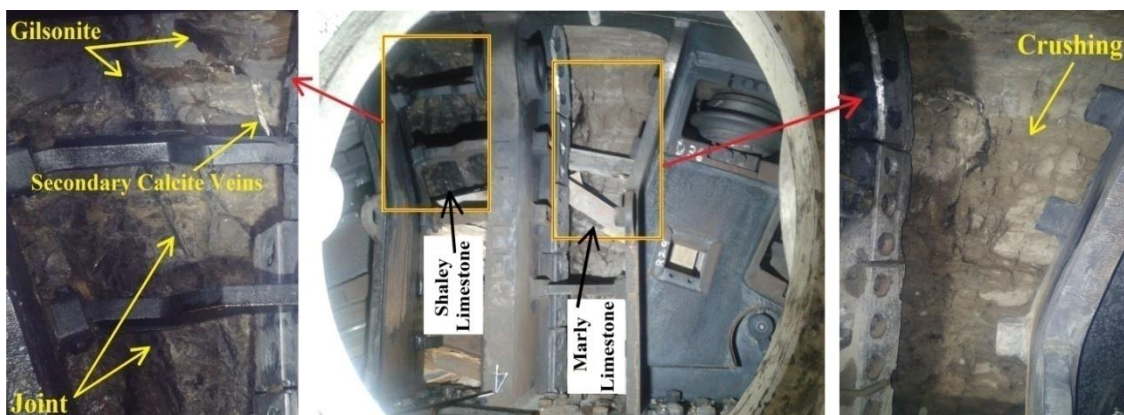
شکل ۱۸. ساختار اولیه: اتصال الکتروموتورها به گیربکس‌ها (بدون مبدل).

۶. اصلاحات ساختاری دستگاه در عبور از زون‌های گسلی از دیگر تجربیات این طرح، توقف دستگاه در دو موقعیت در زون‌های گسلی سازند پاینده بوده است. در این دو موقعیت با خزش توده‌سنگ‌ها در امتداد سطوح ناپیوستگی، سپر دستگاه توسط سنگ‌ها محصور شد و دستگاه از پیشروی باز ایستاد. در توقف نخست در متر ۴۹۲۱ با اعمال نیروی تراست بالا (تا میزان ۵۲۳۰۰ کیلو نیوتن) و تزریق بتونیت در پشت سپر (جهت کاهش اصطکاک زمین با سپر) پس از یک توقف کوتاه مدت (حدود ۱۴ ساعت) دستگاه آزاد و پیشروی از سر گرفته شد. در این مرحله، پایه اتصال یکی از جک‌های مفصلی پسیو دستگاه (Passive Articulation Cylinders)، آسیب دید که تعمیر گردید. جک‌های پسیو (به تعداد ۱۶ عدد)، متصل کننده و رابط سپر انتهایی و سپر میانی دستگاه هستند.

در توقف دوم در متر ۴۹۹۷ شدت درزه‌داری توده‌سنگ (پایین بودن میزان شاخص کیفی توده‌سنگ)، حضور آب زیرزمینی، خواص کانی‌شناسی سنگ (افزایش درصد کانی‌های رسی) و تنش‌های همه‌جانبه ناشی از روباره زیاد تونل در این مقطع (بیش از ۵۰۰ متر روباره) موجب شد خزش توده‌سنگ‌ها و درگیری سپر دستگاه با زمین، شدت بسیار بیشتری داشته باشد. شرایط زمین‌شناسی در این مقطع شامل تناوبی از آهک مارنی و آهک شیلی است. دسته‌های درزه‌های

شاهدی برای شدت خرد شدگی توده سنگ و تاریخچه فعالیت‌های شدید تکتونیکی منطقه نیز هستند (شکل ۲۰).

قیری و کانی‌های ثانویه در حقیقت بعد از ایجاد زون گسلی در فضاهای خالی درز و شکاف‌ها شکل گرفته‌اند، از این‌رو



شکل ۲۰. دید از دریچه چمبر - سینه کار حفاری کیلومتر ۹۹۷+۴، تناوب آهک مارنی و آهک شیلی.

توده سنگ از فضای ایجاد شده مابین دو سپر، قابل ملاحظه بود. 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 اعمال 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 موقعیت توقف، تمام نواحی سپر دستگاه (شامل سه بخش: سپر جلویی، سپر میانی و سپر انتهایی) به‌طور کامل با زمین درگیر بود. اپراتور دستگاه به ناچار برای آزادسازی دستگاه، نیروی تراست را تا حدود ۵۰۰۰۰ کیلو نیوتن، افزایش می‌دهد، اما در اثر این نیرو تعداد ۱۲ عدد از مجموع ۱۶ جک‌های مفصلی پسیو (Passive Articulation Cylinders)، 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 از سپر انتهایی دستگاه حدود ۴۰ سانتی‌متر فاصله گرفت (شکل ۲۱). در این وضعیت، رخنمون



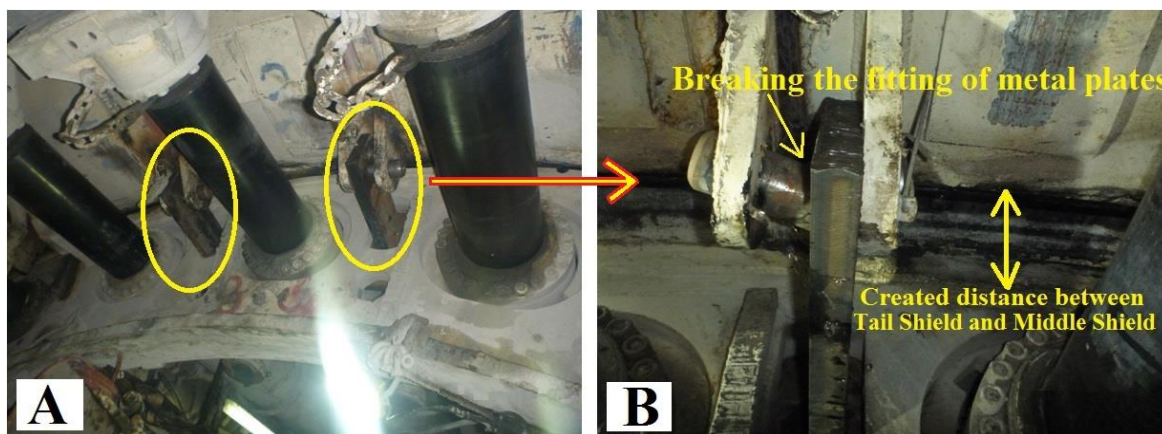
شکل ۲۱. A- نمایی از شکستگی جک مفصلی پسیو، فاصله ایجاد شده بین دو سپر میانی و انتهایی، رخنمون توده سنگ.

B- قطعات آسیب دیده جک‌های پسیو.

کردن فضای خالی سینه‌کار با الوار چوبی و در نهایت اعمال فشار به جک‌های مفصلی اکتیو) و اتصال مجدد دو سپر به یکدیگر، سیستم آب‌بندی در محل اتصال سپرها (سیل: متشکل از نوار لاستیکی، زه‌های فلزی و پیچ‌های اتصالی) تعمیر شد، سپس پایه اتصالات جک‌ها جوشکاری شد و به جای جک‌های پسیو از قطعات فلزی جدید استفاده شد (شکل ۲۲. بخش A)، 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 (شکل ۲۲. بخش B).

در این شرایط مهندسین مکانیک تیم راهبری برای عبور از شرایط نامساعد زمین‌شناسی، می‌بایست تصمیم علاج‌بخشی می‌گرفتند. 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 به جای جک‌ها از قطعات فلزی ساده (با مقاومت بالا) به عنوان رابط برای سپر میانی و سپر انتهایی استفاده شود.

پس از عقب کشیدن کله‌حفار (طی چند مرحله تکرار عملیات Pull back: جمع کردن جک‌های مفصلی اکتیو، سپس پُر

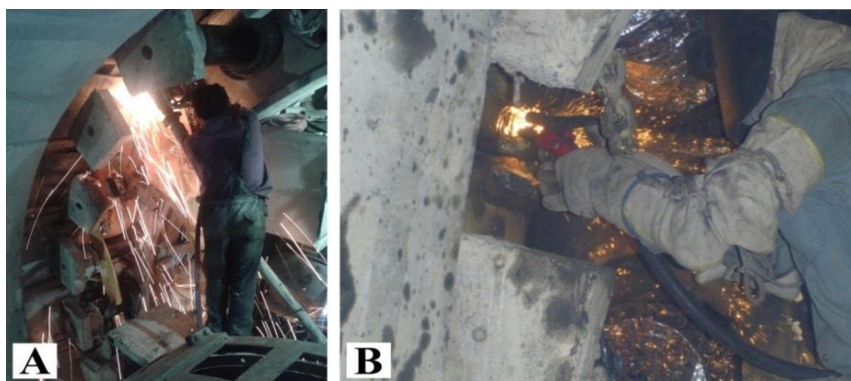


شکل ۲۲. A- جایگزینی قطعات فلزی به جای جک‌های پسیو. B- شکسته شدن مجدد اتصالات فلزی و جدا شدن مجدد سپر میانی از سپر انتهایی.

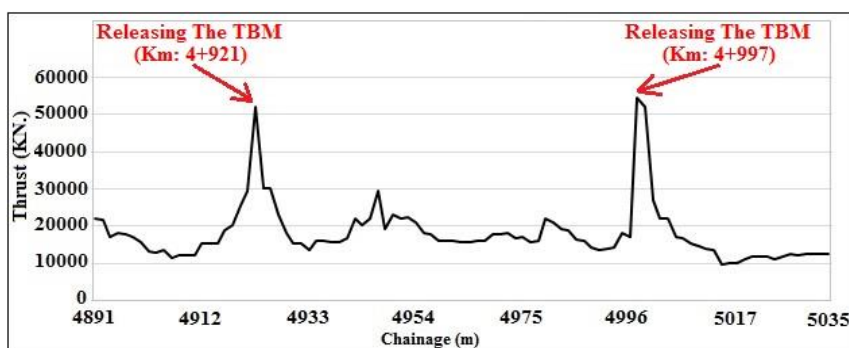
جوشکاری، بُرشکاری‌های لازم بر روی سپرها انجام شد (شکل ۲۳. بخش A). در نهایت پس از جوشکاری سرتاسری سپرها و اتصال کامل آن دو به یکدیگر (شکل ۲۳. بخش B)، نیروی تراست دستگاه تا میزان ۵۴۰۰۰ کیلونیوتن افزایش داده شد (شکل ۲۴) و این بار دستگاه از محدوده بحرانی عبور نمود. زمان توقف دستگاه در زون گسلی (زمان‌های صرف شده برای اقدامات مختلف جهت آزادسازی و جوشکاری سپرها) مجموعاً ۲۳ روز را شامل شد.

طولانی شدن 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 کامل دو سپر از طریق جوشکاری سرتاسری (بر روی خط اتصال دو سپر در ۳۶۰ درجه) اقدام گردد.

مجدداً کله‌حفار به عقب رانده شد و دو سپر بر هم متصل شدند. در این مرحله برای آماده‌سازی دو سپر برای عملیات

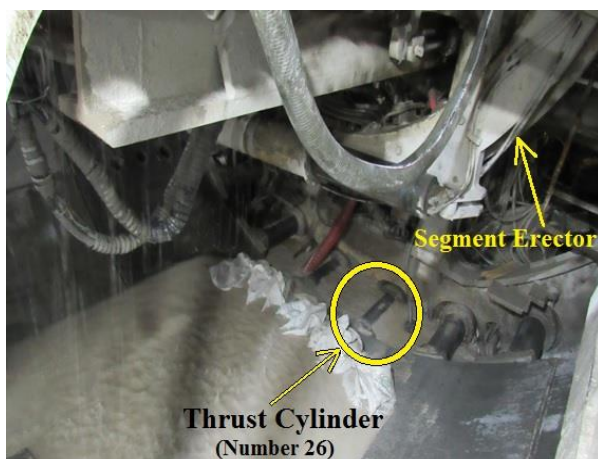


شکل ۲۳. A- بُرشکاری و آماده‌سازی سپرها برای جوشکاری B- جوشکاری سرتاسری محل اتصال سپرها.



شکل ۲۴. تغییرات نیروی کل تراست دستگاه در محدوده توقفات دستگاه.

در این پروژه جهت جلوگیری از ورود آب زیرزمینی از ناحیه سپرهای دستگاه، به فراخور زمان در مقاطع مختلفی از سازندهای زمین‌شناسی، اجزای سیستم آب‌بندی سپر میانی دستگاه (سیل: در دو سوی اتصال سپر میانی با سپرهای جلویی و انتهایی) و نیز برآش‌های آب‌بندی سپر انتهایی، مورد تعمیر و تعویض قرار گرفته‌اند.



شکل ۲۵. موقعیت جک تراست شماره ۲۶. ریزش آب و مصالح از روی نوار نقاله.

۷. اصلاحات ساختاری دستگاه در عبور از زون‌های آبدار در زون‌های آبدار، هجوم آب و ریزش مصالح از روی نوار نقاله در محدوده ارکتور (قطعه مکانیکی: نصب‌کننده پوشش بتنی سگمنتال بر دیواره تونل) موجب تأخیر در نصب سگمنت موقعیت کف تونل می‌شد. با توجه به ضرورت توقف حفاری در زمان نصب سگمنت‌ها (به دلیل عدم وجود جک‌های دیوارگیری در طراحی این نوع دستگاه)، در نتیجه با تأخیر در نصب سگمنت کف، روند پیشروی حفاری نیز کند می‌گردید. از این رو تیم راهبری می‌بایست با نصب یک پمپ آبکش در این ناحیه مشکل تجمع آب را برطرف می‌نمود. اما وجود جک تراست شماره ۲۶ مانع نصب پمپ آبکش در موقعیت مذکور بود. از این رو با تصمیم تیم مکانیک، جک شماره ۲۶ تراست از مدار خارج شد (شکل ۲۵). 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.

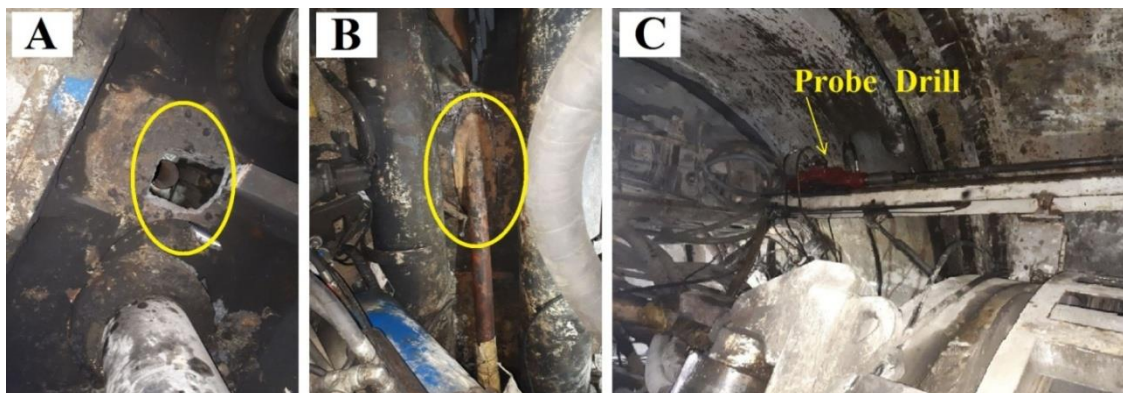
حفاری گمانه‌های پیشاهنگ (به تعداد ۷ حفره) تنها در نیمکره بالایی سپر (موقعیت ساعت ۱۰ تا ۲ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) ایجاد شده بود لذا امکان حفاری گمانه پیشاهنگ در نیمکره پایین سپر (ساعت ۲ تا ۱۰ در جهت حرکت عقربه‌های ساعت) وجود نداشت. از این‌رو با تصمیم اعضاء تیم فنی، جهت پیش‌بینی و مقابله با جریان‌های شدید آب زیرزمینی، در نیمکره پایینی سپر میانی تعداد ۹ حفره تعبیه شد (شکل ۲۶. بخش A) و با نصب لوله هادی بر روی این حفرات (شکل ۲۶. بخش B)، همانند موقعیت‌های نیمکره بالایی سپر برای حفاری گمانه‌های اکتشافی (با هدف انجام تزریق ثانویه و بهسازی زمین) آماده شدند.

از طرفی تجهیزات مربوط به حفاری گمانه پیشاهنگ دستگاه از مدل‌های قدیمی بود، لذا مقرر شد که این دستگاه نیز 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 ۲۶. بخش C).

از سوی دیگر به دلیل احتمال تأثیرگذاری عملیات حفاری تونل بر دبی چشمه کارستی سراب‌گرم (منبع آب شرب اهالی شهرستان سرپل ذهاب) و تشدید حساسیت این موضوع (به دلیل بحران اجتماعی پس از زلزله آبان‌ماه ۱۳۹۶) می‌بایست در جهت جلوگیری از تغییر رژیم هیدروژئولوژی منطقه نیز تمهیدات ویژه‌ای اندیشیده می‌شد.

اگرچه در این پروژه جهت پیش‌بینی جریان‌ات آب زیرزمینی حین حفاری، در چند مقطع از روش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (TSP) استفاده شده است (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷)، اما انتخاب این روش نیز با محدودیت‌هایی (هزینه‌های هر مرحله اجرای تست، خطرات احتمالی انفجار مواد ناریه در زمین‌های دارای گاز متان) همراه بوده است و امکان اجرای متوالی این آزمایش جهت شناسایی زون‌های آبدار در تمام نواحی محتمل، میسر نشد.

لذا مقرر شد جهت پیش‌بینی موقعیت جریان‌ات آب زیرزمینی و البته تقویت ظرفیت انجام تزریقات در سینه‌کار حفاری (با هدف بهسازی و آب‌بند کردن زمین) نیز تغییراتی در زمینه گمانه‌های پیشاهنگ (Probe Drilling)، در ساختار دستگاه اعمال شود. در طراحی اولیه دستگاه، نقاط تعبیه شده برای



شکل ۲۶. A- تعبیه حفره در نیمکره پایین سپر. B- نصب لوله‌های هادی بر روی حفره‌ها. C- دستگاه حفاری گمانه پیشرو.

گنتری شماره ۷ (به فاصله حدود ۲۰ متر عقب‌تر از کابین اپراتوری دستگاه)، انتقال داده شد تا تجهیزات آنها از مشکلات و تأثیرات مخرب مخاطرات احتمالی (هجوم آب و انفجار گاز متان)، محافظت گردند.

همچنین در این تونل، انتشار گاز انفجاری متان عمدتاً در زون‌های آبدار رخ می‌داد. لذا 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

در مثال دیگر می‌توان به انتشار شدید گاز سمی سولفید هیدروژن در برخی مترآژها 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 خوردندگی 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 غیره) بر روی دستگاه اعمال نمودند. در پایان این نکته را می‌بایست ذکر کرد که در پروژه بازی‌دراز به دلیل دست‌دوم بودن دستگاه و وجود مخاطرات زمین‌شناسی گوناگون در مسیر حفاری، تعمیرات و فعالیت‌های مکانیکی و الکترونیکی بسیار متنوعی بر روی قطعات دستگاه صورت گرفته است که شرح کلیه وقایع در این گزارش مقدور نبود. بسیاری از این تصمیمات به‌طور مستقیم به دلیل ملاحظات زمین‌شناسی انجام می‌گرفت که در این پژوهش تلاش شد به مهم‌ترین این موارد پرداخته شود.

۸. نتیجه‌گیری

تعمیرات مکانیکی و تغییرات ساختار دستگاه حفار در پروژه بازی‌دراز با در نظر گرفتن ملاحظات زمین‌شناسی صورت گرفته است و تبادل اطلاعات مابین زمین‌شناسان پروژه با مهندسین مکانیک و الکترونیک (در تیم راهبری پروژه)، مبنای نهایی جهت اتخاذ تصمیمات اجرایی بوده است. در این پروژه

برای بهبود عملکرد ماشین حفار در شرایط متغیر زمین‌شناسی مسیر (سنگ‌های توده‌ای با شاخص کیفی بالا، زون‌های گسلی، هجوم آب و گاز)، مجموعه‌ای از اصلاحات ساختاری از جمله "ساخت ۷ عدد مبدل گیربکس برای افزایش سرعت چرخش کله‌حفار، تغییر آرایش ابزارهای برشی کله‌حفار، حذف تمام جک‌های مفصلی پسیو دستگاه، حذف جک شماره ۲۶ تراست، تعبیه ۹ عدد چال گمانه پیشرو در نیمکره پایین سپر دستگاه و غیره" به انجام رسیده است. بزرگ‌ترین چالش این پروژه، عدم تناسب طراحی کله‌حفار در مواجهه با سنگ‌های توده‌ای (با درزه‌داری اندک) بوده است. نتایج تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه حفار نشان می‌دهد که طراحی دستگاه (سرعت چرخش کله‌حفار و نیز فواصل آرایش ابزارهای برشی) موجب شده که مکانیسم برش در سنگ‌ها (فرآیند تشکیل تراشه در اثر عملکرد دیسک‌های برشی روی سنگ) به درستی انجام نگیرد. اگرچه تجربه ساخت مبدل‌های گیربکس برای افزایش سرعت چرخش کله‌حفار، با موانع و چالش‌هایی مواجه شده است، اما با توجه به سابقه کوتاه حفاری مکانیزه در ایران (حدود دو دهه)، اینگونه تجارب را می‌توان اقداماتی مبتکرانه، جسورانه و درخور تحسین تلقی نمود. تحقق چنین ایده‌هایی در آینده مقدور خواهد بود چراکه با مطالعه دقیق‌تر و عزم جدی (با اتکا به صنایع داخلی و همکاری دوجانبه متخصصین داخلی با شرکت‌های سازنده دستگاه‌های حفار) می‌توان قابلیت‌های ماشین‌های حفار موجود در کشور (از جمله دستگاه پروژه بازی‌دراز) را افزایش داد و این تجهیزات را در پروژه‌های آینده (در تونل‌هایی که شرایط زمین‌شناسی مشابه دارند) با موفقیت به‌کار گرفت. تحقق این اهداف نیازمند توسعه دانش و همکاری بین‌رشته‌ای متخصصین رشته‌های فنی (مکانیک، الکترونیک و غیره) با دانش‌آموختگان زمین‌شناسی است. در این میان می‌بایست ابتدا مبحث "ارتباط دانش زمین‌شناسی با علوم فنی مهندسی" در محیط‌های دانشگاهی و صنعتی کشور تبیین گردد. پژوهش حاضر نیز با هدف برداشتن یک گام کوچک در راستای تبیین این مهم، به انجام رسیده است.

همکاران صنعتی خود در این پروژه (پرسنل واحد خدمات مهندسی، اعضای تیم حفاری و به‌ویژه مهندسين مکانیک) صمیمانه قدردانی نمایند.

تشکر و قدردانی

از آنجایی که این پژوهش در بستر تجربیات فنی پروژه بازی‌دراز شکل گرفته است، لذا نویسندگان لازم می‌دانند از

منابع

- آقاباتی، ع.، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ اول، ۵۸۶ صفحه.
- جودکی، و.، اجل‌لوئیان، ر. و حسن‌پور، ج.، ۱۳۹۸-الف. 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، سال ۲۸، شماره ۱۱۲. (در دست انتشار).
- جودکی، و.، حسن‌پور، ج.، اجل‌لوئیان، ر. و مسیح‌طهرانی، م.، ۱۳۹۸-ب. لزوم بومی‌سازی دانش بهسازی ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام در شرایط متنوع زمین‌شناسی ایران، مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران، سال ۲۸. (در دست انتشار).
- جودکی، و.، سهرابی‌بیدار، ع.، اجل‌لوئیان، ر.، امینی، ن. و دیکمن، ت.، ۱۳۹۷. ارزیابی نتایج آزمایش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (TSP) بر اساس شواهد زمین‌شناسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی دستگاه EPB Hard Rock. مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۲، صفحات ۳۱-۱۵.
- Bacon, S.N., McDonald, E.V., Baker, S.E., Caldwell, T.G. and Stullenbarger, G. 2008. Desert terrain characterization of landforms and surface materials within vehicle test courses at U.S. Army Yuma Proving Ground, USA: *Journal of Terramechanics*, Vol. 45, pp. 167-183.
- Bekker, M.G. 1956. *Theory of land locomotion: the mechanics of vehicle mobility*. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Bekker, M.G. 1960. *Off the road locomotion*. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press.
- Bekker, M.G. 1969. *Introduction to terrain-vehicle system*. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Bruland, A., 1998. *Hard rock tunnel boring*, vol.1-10, Ph.D. thesis, Norwegian university of science and technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Dasch, J.M. and Gorsich, D.J. 2012. *TARDEC story: sixty-five years of innovation, 1946-2010*. Defense Department, Army, U.S. Army Tank Automotive Research, Development and Engineering Center (TARDEC); 309 p.
- Drescher A. and Hambleton, J.P. 2010. *Geotechnics and Terramechanics*, 58th Annual Geotechnical Engineering Conference, University of Minnesota, pp. 7-19.
- Halvorson, J.J., McCool, D.K., King, L. and Gatto, L. 2001. Soil compaction and over-winter changes to vehicle ruts, Yakima Training Center, Washington: *Journal of Terramechanics*, Vol. 38, pp. 133-151.
- Harmon, R.S. and McDonald, E.V. 2014. Military geoscience in the twenty-first century- A historical perspective and overview, *The geological society of america Reviews in Engineering Geology XXII*, pp.1-10.
- Hassanpour, J., Rostami, J. and Zhao, J. 2011. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 26, no. 5: 595-603.
- Henderson, J.P. 2014. Dust storms and the 1980 Iran hostage rescue attempt, *The geological society of america Reviews in Engineering Geology XXII*, pp.49-55.
- Macias, F.J., 2016. *Hard Rock Tunnel Boring, Performance Predictions and Cutter Life Assessments* (Ph.D. thesis). Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, p. 203.
- 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. 2017. Relating geologic units and mobility system kinematics contributing to Curiosity wheel damage at Gale Crater, Mars. *Journal of Terramechanics*, Vol.73, pp. 73-93.
- Muro, T. 1988. Drilling rate of rotary percussion Drill bits and rock characteristics, *Journal of Terramechanics*, Vol. 25, No. 3, pp. 191-199.
- SCE (Sahel Consultant Engineers)., 2015. *Geological and Engineering Geological Review of Bazideraz Water Conveyance Tunnel*. SCE 4120 UNG TUN EG RP 001 D0.

-
- Shoop, S.A. 1993. Thawing soil strength measurements for predicting vehicle performance: Journal of Terramechanics, Vol. 30, pp. 405–418.
- Stocklin, J., 1977. Structural correlation of the Alpine range between Iran central Asia. Memoire Hors-Serve No.8 dela Societe Geologique de France, 8: 333-353.
- Rostami, J., 1997. Development of a Force Estimation Model for Rock Fragmentation with Disc Cutters Through Theoretical Modeling and Physical Measurement of Crushed Zone Pressure. Ph. D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, P. 249.
- Thuro, K., Wilfing, L., 2017. TBM performance prediction in hard rock. 12th Iranian and 3rd Regional Tunnel Conference, 27-29 Nov. 2017, Tehran, Iran.
- Villeneuve, M.C., 2017. Hard rock tunnel boring machine penetration test as an indicator of chipping process efficiency. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 9, No. 4, pp. 611-622.
- Wong, J.Y. 2010. Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering, Elsevier, pp. 1–19.