



## بررسی شیوه راهبری و بهسازی تجهیزات ماشین‌های حفر تونل (TBM) در شرایط نامساعد ژئوتکنیکی، مطالعه موردی: پروژه آزاد

وحید جودکی<sup>۱</sup>، رسول اجل‌لوئیان<sup>۱\*</sup>

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۷

### چکیده

برای اجرای تونل انتقال آب آزاد از یک ماشین حفر تونل (از نوع EPB Hard Rock) استفاده شده است. شرایط نامساعد ژئوتکنیکی در یک زون گسلی، راهبری ماشین را با مخاطرات ویژه‌ای مواجه ساخت. این مخاطرات به‌طور مشابهی در سوابق تونل‌بازی‌دراز (گیر کردن و توقف ماشین، معضل عمل‌آوری مصالح حفاری) نیز تجربه شده است. به منظور آزادسازی و پیشروی ماشین، نیاز به اتخاذ تمهیداتی در شیوه راهبری و ایجاد تغییراتی در ساختار تجهیزات ماشین حفار وجود داشت. در این پژوهش، جهت بررسی شیوه راهبری و بهسازی تجهیزات ماشین تونل آزاد از متدهای تحقیقی مختلف شامل: "مرور تجارب فنی سابق از طریق بررسی متون و ادبیات پژوهشی (مربوط به تونل‌بازی‌دراز)، بررسی مشاهدات زمین‌شناسی حین پیشروی ماشین (کنترل تغییرات لیتولوژیکی و شرایط آب‌زیرزمینی)، تحلیل داده‌های انحراف سنجی ماشین، آزمایشات دانه‌بندی مصالح حفاری، بررسی پارامترهای عملیاتی ثبت شده در سامانه دیتا لاگر ماشین (تراست، نرخ نفوذ، فشار جبهه‌کار) و نیز مستندسازی راهکارهای علاج‌بخشی" بهره‌گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد راهکارهای اجرایی جهت راهبری ماشین حفار در زون گسلی (استفاده از جکهای هیدرولیکی کمکی، نصب پمپ فشار قوی طبقاتی، تغییر مد حفاری بسته به مد نیمه‌باز- باز و ...) بر اساس تفکر فنی و قضاوت‌های مهندسی، به درستی اتخاذ گردیده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در جهت انتقال تجربیات فنی پیرامون شیوه راهبری و بهسازی تجهیزات ماشین‌های حفر تونل مفید واقع شود و از توقفات ماشین‌های حفار (در شرایط زمین‌شناسی مشابه این پژوهش) جلوگیری نماید.

**کلید واژه‌ها:** ماشین حفر تونل، زون گسلی، عمل‌آوری، انحراف سنجی، پارامترهای اپراتوری، جک هیدرولیکی کمکی.

۱. گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Rasajl@sci.ui.ac.ir

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

شناخت مخاطرات و چگونگی اتخاذ راهکارهای علاج بخشی در عملیات حفاری تونل‌ها می‌تواند ریسک مخاطرات ایمنی، هزینه‌ها و زمانبندی را تا حد زیادی تعدیل نماید (جودکی و همکاران، ۱۴۰۳). ماشینهای حفر تونل، از تجهیزات مدرن و مهم مکانیکی محسوب می‌شوند که به دلیل ایمنی و سرعت بالا، به ادوات ضروری در زمینه حفاری فضاهای زیرزمینی تبدیل شده‌اند (Cao et al. 2025, Sun et al. 2023, Yang et al. 2023). در شرکت‌های سازنده ماشین‌های حفر تونل، طراحی‌ها و ساخت ادوات، بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی ساختگاه طرح‌ها صورت می‌گیرد. بسیاری از نقص‌های فنی مکانیکی و الکترونیکی در ماشین‌های حفار، در مواجهه با شرایط نامساعد زمین‌شناسی در مسیر حفاری رخ می‌دهد. عملکرد قطعات مختلف ماشین و حتی میزان مواد مصرفی آنها (انواع روغن، گریس و غیره) نیز به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم مرتبط با تغییرات شرایط زمین‌شناسی سازندهای مسیر پیشروی است. از این‌رو در حین حفاری گاهاً در مواجهه با برخی شرایط خاص زمین‌شناسی، اعمال تغییراتی در ساختار و تجهیزات مکانیکی ماشین جهت عبور از زون‌های مسئله‌دار اجتناب‌ناپذیر است (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف، ۱۳۹۸-الف، ۱۳۹۹).

مخاطرات زمین‌شناسی اغلب می‌توانند به‌طور مستقیم و به‌عنوان عوامل اصلی، عملکرد ماشین‌های حفر تونل را محدود کنند. اما در برخی موارد، خطا در شیوه راهبری و تعمیرات ناکافی است که عوامل اصلی در محدودیت عملکرد ماشین هستند. این دو فاکتور باعث میشوند که مخاطرات زمین‌شناسی نیز بتوانند به‌طور غیر مستقیم و به‌عنوان عواملی ثانویه بر عملکرد ماشین تأثیر منفی بگذارند.

تأثیر شرایط نامساعد ژئوتکنیکی بر توقف ماشین‌های حفار در پروژه‌های متعددی مانند تونل‌های مترو آتن (Hoek et al., 1998; Marinos, 1998) و اوینوس-مورنوس (Grandori et al., 1995) در یونان، تونل پلاو-دو (Guetter and Weber, 2001) در اسلونی، تونل‌های پنستاک (Lovat, 2000) و

گوتارد (Amberg, 2001) در سوییس، تونل‌های فرسنادلو (Barla, 2000) و پونت-ونتو (Barla and Pelizza, 2000) در ایتالیا، تونل بزرگراه پینگلین (Shen et al. 1999; Tseng et al., 2001) در تایوان، تونل‌های انحراف آب رودخانه زرد (Shang et al., 2004)، هونگیان (Cui and Ke, 2023) و دیوکسینگلا (Liu et al., 2023) در چین، تونل‌های جرد (Shaterpour-Mamaghani et al., 2016)، توزلا (Dalgiç, 2003) و کیزیلیرمک (Home, 2016) در ترکیه، تونل گیبه-دو (De Biase et al., 2009) در ایتالی و ... گزارش شده است. در برخی از این تونل‌ها توقف‌های ماشین حفار بسیار طولانی‌مدت بوده و در برخی موارد مانند پروژه تونل انتقال آب لسوتو در آفریقای جنوبی (Finnsson, 2001)، با اجرای تدابیر لازم، عملیات حفاری با موفقیت و طبق برنامه زمان‌بندی، به پایان رسیده است.

از جمله موارد مشابه در پروژه‌های ایران نیز میتوان به تونل‌های زاگرس (Bayati and Hamidi, 2017) و البرز (Wenner and Wannemacher, 2009) اشاره کرد. اما یکی از شاخص‌ترین تجربه‌ها در پروژه‌های ایرانی به لحاظ مدت زمان توقفات، مربوط به تونل انتقال آب قمرود (Farrokh and Rostami, 2008; 2009) است. در مقالاتی از همین نویسندگان (جودکی و همکاران، ۱۳۹۴، ۱۳۹۶، ۱۳۹۷-ب)، گزارشات زمین‌شناسی مبسوطی در خصوص تجارب پروژه قمرود (گیر کردن سپر ماشین و با توقفات مکرر ۶۰۰ روزه) ارائه شده است. همین نویسندگان در بخشی از یک پژوهش (جودکی و همکاران، ۱۳۹۹) به چگونگی جلوگیری از توقفات مکرر این ماشین و نحوه ایجاد تغییرات در طراحی کله‌حفار ماشین در محیط تونل قمرود پرداخته‌اند. در پژوهش مذکور تجربیات بهسازی ماشین‌های حفار در سه پروژه دیگر (تونل‌های بازی‌دراز، چمشیر، کرمان) نیز تشریح شده است.

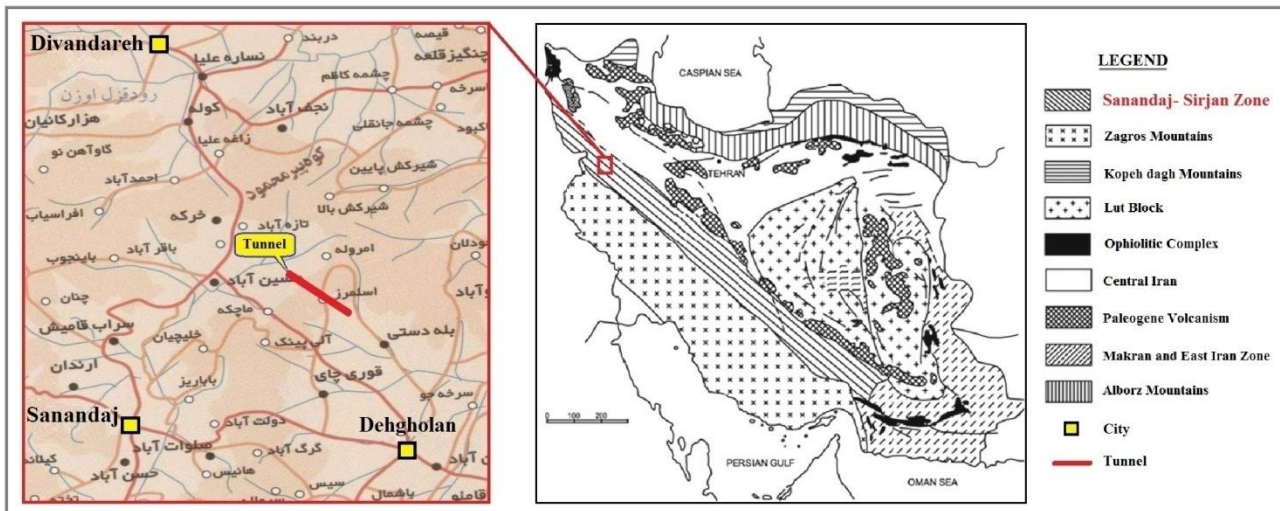
در این میان میتوان به پژوهش دیگری از همین نویسندگان (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف) اشاره کرد که در آن بر اساس نتایج تحلیل پارامترهای عملیاتی ماشین، به ضرورت ایجاد تغییراتی در سیستم محرک اصلی و کله‌حفار (با هدف

## ۲. زمین شناسی منطقه

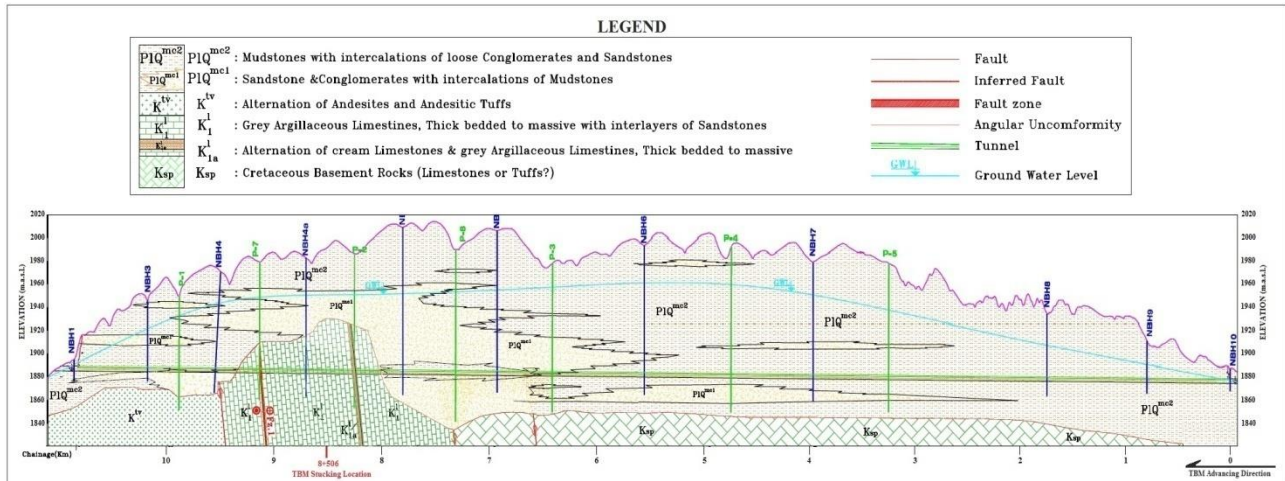
ساختمان تونل آزاد بر اساس تقسیم بندی کلی زمین شناسی ایران (Aganabati, 1998; Alavi et al. 1991) در زون زمین شناسی سندانج- سیرجان، قرار گرفته است (شکل ۱). در این پهنه وقوع جنبش های تکتونیک متعددی موجب ایجاد انبوهی از گسل خوردگی ها و زون های خرد شده در تشکیلات زمین شناسی شده است. لذا مشخصه اصلی این پهنه، وجود گسل خوردگی های فراوان می باشد (Stocklin, 1997; Stocklin, 1968). همانگونه که در مقطع زمین شناسی تونل (شکل ۲) دیده می شود؛ عمده مسیر پیشروی ماشین حفر تونل در ماسه سنگ، کنگلومرا، گل سنگها، سنگهای آهکی و آهک ماری قرار دارد. در تشکیلات آهکی (سازند مربوط به دوره زمانی کرتاسه) که هدف این مقاله است، به دلیل توسعه جریان های آب زیرزمینی (به ویژه در زون های گسلی)، مخاطرات زمین شناسی و چالش های اجرایی متنوعی در زمینه راهبری ماشین حفر رخ داده است. خصوصیات ژئومکانیکی تشکیلات آهکی در جدول ۲ ارائه شده است.

سازگار ساختن ماشین پروژه بازی دراز با شرایط زمین شناسی پرداخته شده است. بر خلاف تفکر سنتی رایج در محیط های آکادمیک، که علم زمین شناسی (در گرایش مهندسی) تنها مرتبط با علوم مهندسی ژئوتکنیک (مکانیک سنگ و مکانیک خاک) پنداشته می شود؛ در پژوهش مذکور مؤلفین با تشریح ایده ساخت مبدل های گیربکس برای سیستم محرک اصلی ماشین، به دنبال بررسی ارتباط دانش زمین شناسی با علم مهندسی مکانیک در حوزه ماشین های حفر تونل بوده اند. بر اساس نتایج تحقیق مذکور، تبادل اطلاعات و همکاری زمین شناسان با مهندسان مکانیک در تیم راهبری ماشین های حفر میتواند در شناخت مخاطرات و اتخاذ راهکارهای علاج بخشی جهت جلوگیری از توقفات ماشین در زون های نامساعد زمین شناسی، حائز اهمیت ویژه گردد.

هدف پژوهش حاضر نیز آن است که ضمن بررسی شرایط زمین شناسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی ماشین حفر در پروژه تونل انتقال آب آزاد، روند راهکارهای علاج بخشی با هدف انتقال تجارب فنی (راهبری و بهسازی تجهیزات ماشین) تشریح گردد.



شکل ۱. موقعیت زمین شناسی و جغرافیایی تونل انتقال آب آزاد.



شکل ۲. مقطع زمین شناسی مهندسی تونل آزاد.

جدول ۱. نتایج طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ‌های آهکی در مسیر حفاری.

Geological Formation		K11 & K11a	Fault Zone
RQD	RQD	60-85	10-25
	Description	Fair to Good	Very Poor
RMR	RMR89	50-60	20-30
	Description	Fair Rock	Poor Rock
GSI: Min -Max (Ave)		50-70 (55)	25-35 (30)

مناسبی برخوردار بوده است. اما با ورود ماشین به تشکیلات آهکی، به‌ویژه در زونهای گسلی چالش‌های اجرایی متعددی رخ داد. شرایط نامساعد ژئوتکنیکی در تشکیلات آهکی (وجود نواحی گسلی خردشده و دارای جریانهای پرفشار آب زیرزمینی) موجب صعوبت راهبری ماشین و افزایش زمان‌بندی اجرای طرح شده است.

۳. معرفی ماشین حفر تونل

برای حفاری تونل آزاد (به طول ۱۰۸۶۰ متر) از یک ماشین حفار تمام مقطع از نوع متعادل کننده فشار زمین (EPB) ساخت شرکت هرکنشت آلمان استفاده شده است (شکل ۳). این ماشین از طراحی و مشخصات فنی مناسبی جهت مواجهه با شرایط متنوع ژئوتکنیکی مسیر برخوردار است (جدول ۲). عملیات حفاری در ۸ کیلومتر ابتدایی تونل از راندمان نسبتاً



شکل ۳. ماشین حفار پروژه تونل آزاد.

جدول ۲. مشخصات ماشین حفار پروژه تونل آزاد

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	Herrenknecht	Germany	M-1888	3.7	10	14200	9	630

افزایش نیروی تراست)، اتصالات جکهای مفصلی پسیو دچار شکستگی نشدند و در نتیجه اتصال سپر انتهایی با سپر میانی ماشین حفظ گردید. جکهای مفصلی پسیو علاوه بر ایفای نقش در جهت دهی به ماشین در مسیر حفاری، نقش حفظ اتصال مابین سپر انتهایی و میانی ماشین را نیز ایفا می کنند. اتصال مابین سپر میانی و سپر جلویی نیز به وسیله جکهای مفصلی اکتیو (Active Articulation Cylinders) بر قرار می شود.

#### ۴. مخاطرات زمین شناسی

##### ۴-۱- بررسی فاکتورهای مؤثر در گیر کردن و توقف

##### ماشین

در تونل آزاد، ماشین حفار در کیلومتراژ ۸۵۰۶ حین پیشروی از حرکت باز ایستاد. به دلیل گیر کردن سپر انتهایی ماشین در زمین، علی رغم بالا بردن نیروی تراست تا میزان ۱۳۵۰۰ کیلو نیوتن، ماشین قادر به پیشروی نشد. در اثر افزایش نیروی تراست، اجزای داخلی یکی از جکهای مفصلی پسیو (Passive Articulation Cylinders)، آسیب دید (شکل ۴). البته در این موقعیت به دلیل تجربه اپراتور (توقف روند

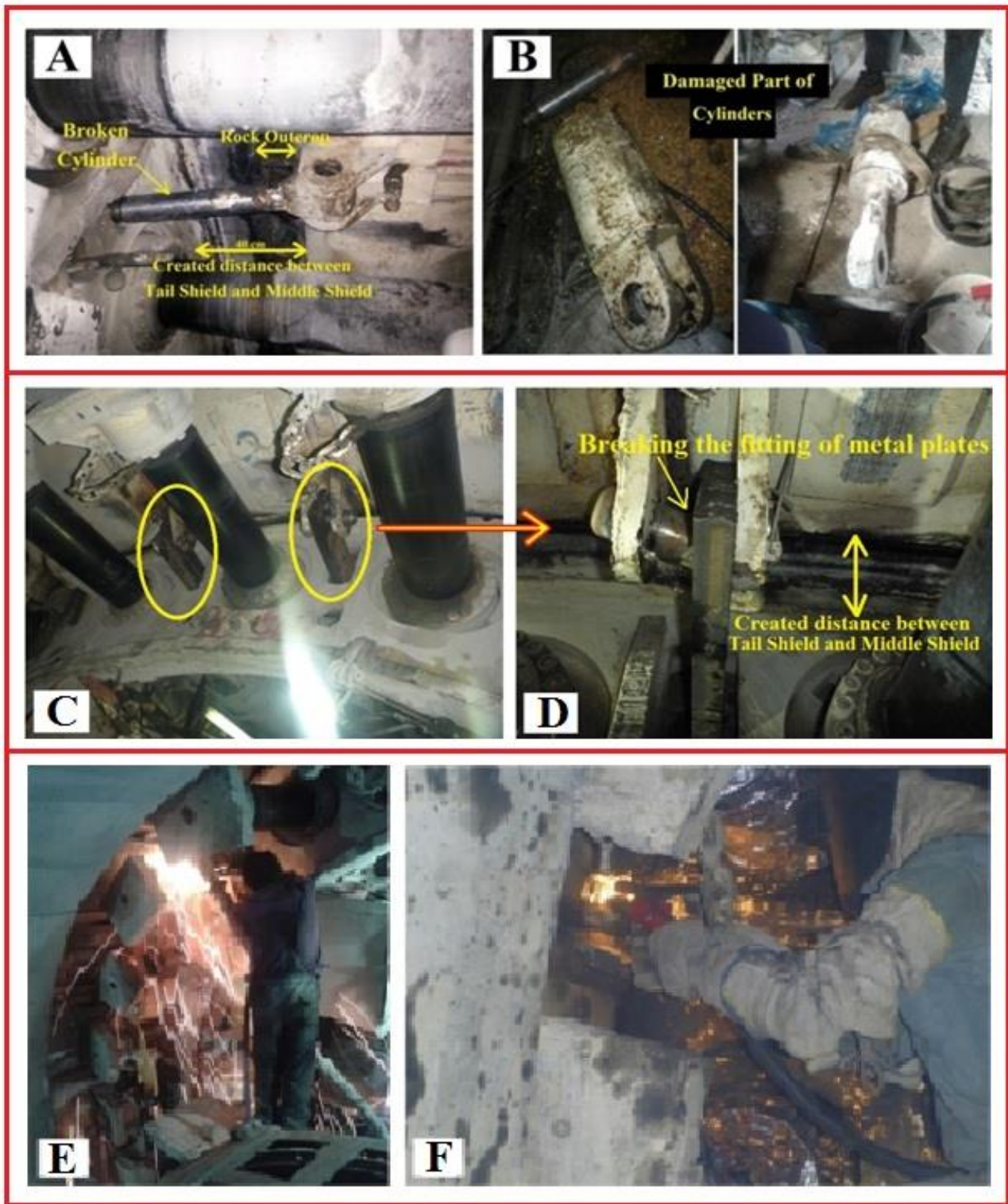


شکل ۴. جک مفصلی پسیو (در موقعیت ساعت ۷) ماشین حفار پروژه تونل آزاد.

سطوح ناپیوستگی، سپر ماشین توسط سنگ‌ها محصور شد و ماشین از پیشروی باز ایستاد. اپراتور ماشین جهت آزادسازی سپر، نیروی تراست را بیش از حد مجاز افزایش داد و این عامل موجب شکسته شدن اتصالات جکهای مفصلی پسیو شد و در نهایت سپر انتهایی ماشین به اندازه ۴۰ سانتی‌متر از سپر میانی فاصله گرفت. با توجه به گیر بودن سپر انتهایی در زمین، نیروی حاصل از جکهای تراست، موجب اعمال تنش‌های کششی شدید بر جکهای مفصلی پسیو و در نهایت گسیختگی آنها شده بود. جدا شدن سپرها چالش‌های فراوان اجرایی و توقف طولانی مدت ماشین را به دنبال داشت (شکل ۵). شرح کامل این تجارب فنی و نحوه آزادسازی ماشین پروژه بازی‌دراز، در پژوهشی از همین نویسندگان (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف) ارائه شده است.

توقف ماشین پروژه آزاد در کیلومتر ۸۵۰۶، مشابه با شرایطی است که پیش از آن در مورد ماشین پروژه تونل بازی‌دراز رخ داده بود. در موقعیت توقف ماشین پروژه آزاد، فشار جریانهای آب زیرزمینی (بیش از ۶ بار) به حدی بالا بود که در صورت بالا بردن نیروی تراست، با شکسته شدن اتصالات جکهای پسیو (و در ادامه با جدا شدن سپر انتهایی از سپر میانی و آسیب دیدن سیستم آبیندی سپرها) شرایط بسیار پیچیده‌ای برای ماشین حفار رخ می‌داد که کنترل و علاج بخشی آن به سهولت پروژه بازی‌دراز امکان‌پذیر نبود. لذا در موقعیت توقف ماشین تونل آزاد، می‌بایست تمهیداتی در نظر گرفته می‌شد که از وقوع اتفاقات مشابه پروژه بازی‌دراز جلوگیری گردد.

در تونل بازی‌دراز نیز حین حفاری در یک زون گسلی (کیلومتر ۴۹۹۷ در سازند زمین‌شناسی پابده) به دلیل روباره زیاد تونل با خزش توده‌سنگ‌های آهک مارنی در امتداد

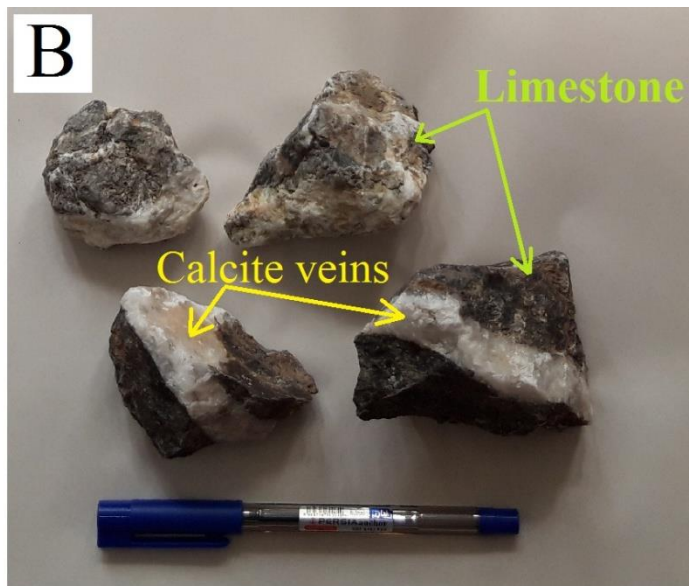
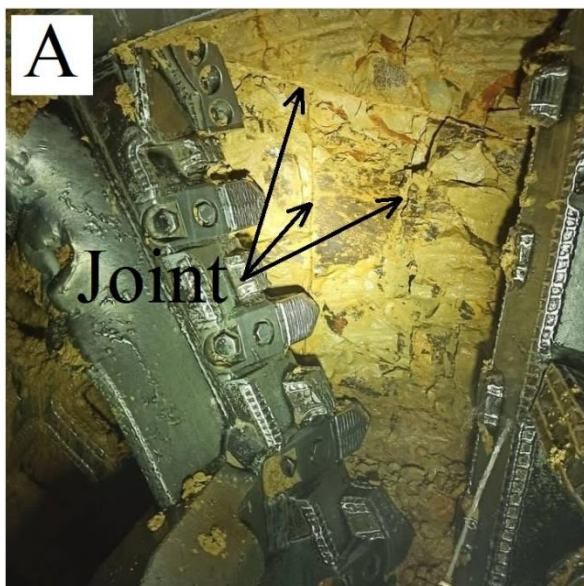


شکل ۵. ماشین پروژه بازی دراز، A: نمایی از شکستگی جک مفصلی پسیو، فاصله ایجاد شده بین دو سپر میانی و انتهایی، رخنمون توده سنگ. B: قطعات آسیب دیده جک های پسیو. C: جایگزینی قطعات فلزی به جای جک های پسیو. D: شکسته شدن مجدد اتصالات فلزی و جدا شدن مجدد سپر میانی از سپر انتهایی ماشین. E: بُرشکاری و آماده سازی سپرها برای جوشکاری. F: جوشکاری سرتاسری محل اتصال سپرها (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف).

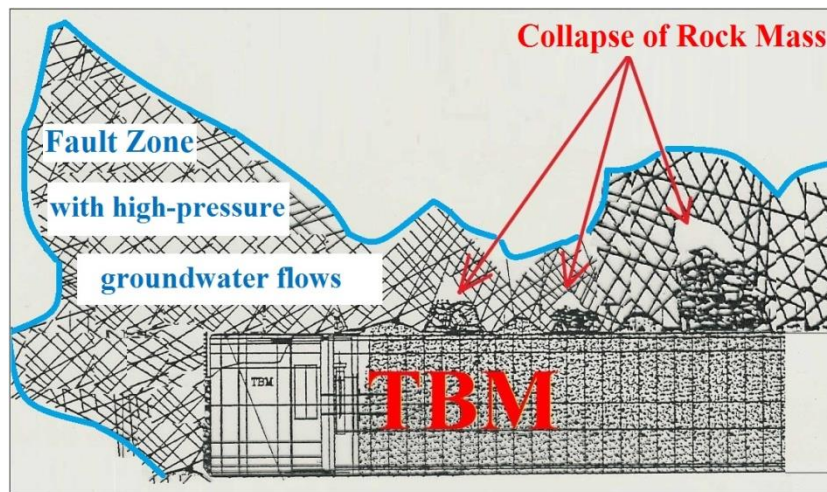
و ...). بود. با ورود و پیشروی در زون گسلی، تأثیرات منفی عوامل زمین‌شناسی بر راهبری ماشین شدت گرفت. در موقعیت توقف ماشین نیز توده‌سنگ آهکی به دلیل شرایط زمین‌شناسی (قرار گرفتن در یک زون خردشده و وجود جریان آب زیرزمینی) از پارامترهای ژئومکانیکی پایینی برخوردار بوده است. از سوی دیگر افزایش فشارهای همه‌جانبه به دلیل روباره زیاد تونل در این نقطه (بیش از ۱۰۰ متر)، می‌توانست موجب خزش و لغزش قطعات گوه‌ای توده‌سنگ بر روی سپر ماشین شود. فشردگی توده‌سنگ‌ها بر روی سپر، موجب ایجاد اصطکاک بدنه سپر ماشین با سنگها در حین حفاری می‌گردد (شکل ۷). مضاف بر اینکه در فضاهای زیر زمینی، مخاطرات زمین‌شناسی تابع زمان است و در این مقطع از تونل، عملیات حفاری حدود یکماه متوقف شده بود (به دلایل مختلفی از جمله: انجام امور تعمیر و نگهداری ماشین، اجرا و نصب سوئیچ کالیفرنیا در تونل و غیره). در نتیجه با توقف طولانی‌مدت ماشین در جبهه‌کار، خزش توده‌سنگها و فشردگی آنها بر روی سپر ماشین تشدید شده است.

تجربه گیر کردن سپر ماشین در تونل بازی‌دراز تنها به فاصله‌ای زمانی کمتر از دو سال، در پروژه آزاد (در فروردین سال ۱۳۹۸) به طور مشابه رخ داد. نتایج مشاهدات زمین‌شناسی و کنترل وضعیت ماشین در تونل آزاد نشان می‌دهد که در کیلومتر ۸۵۰۶، مجموعه‌ای از عوامل در توقف ماشین مؤثر بوده است:

**الف- وضعیت زمین‌شناسی:** از نظر شرایط نامساعد زمین‌شناسی، زونهای گسلی یکی از موقعیت‌های اصلی برای گیر کردن ماشینهای حفر تونل است. حرکت سنگها در زونهای گسلی، سپر ماشینهای حفر تونل را تحت فشار قرار می‌دهد که این پدیده می‌تواند منجر به توقف ماشین گردد. علاوه بر این، وجود آب‌های زیرزمینی در زون گسلی، عاملی است که خطر گیر کردن ماشین را تشدید میکند (Zhang et al., 2025; Xu et al., 2021, 2022). افزایش درزه‌داری در جبهه‌کار حفاری (شکل ۶-A) و مشاهده رگه‌های ثانویه کلسیتی در توده‌سنگ آهکی (شکل ۶-B) نشان‌دهنده نزدیک شدن ماشین پروژه آزاد به موقعیت زون گسلی و احتمال آغاز چالشهای اجرایی (مواجهه با جریانهای پر فشار آب زیرزمینی



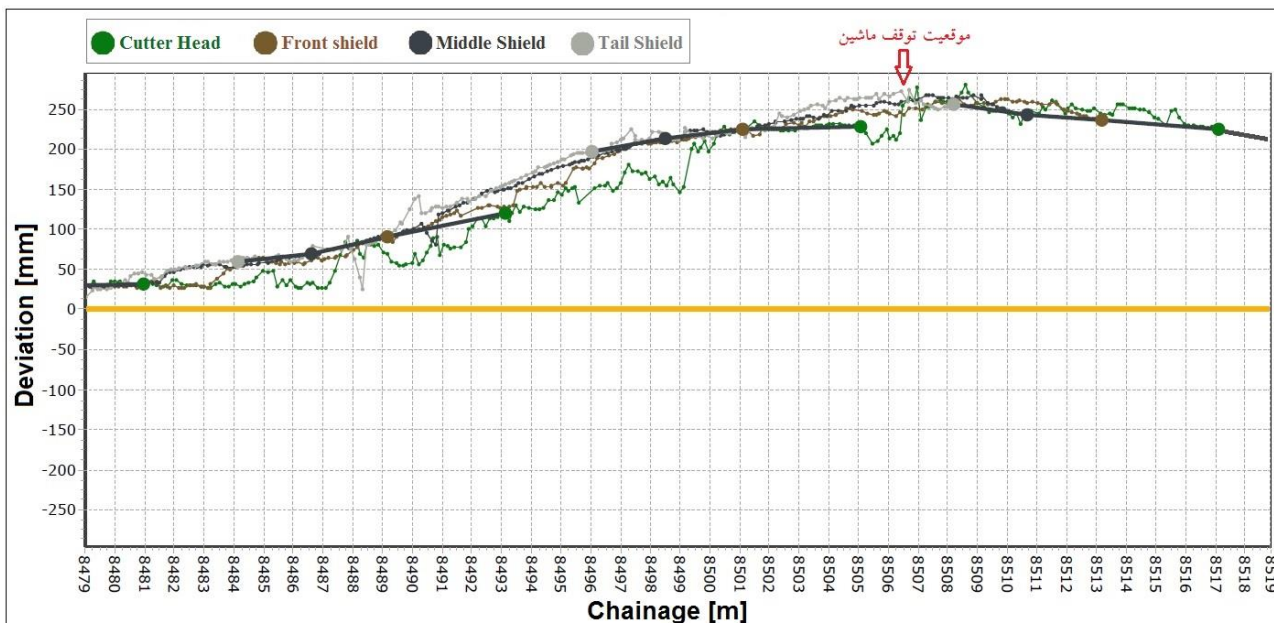
شکل ۶. A: بازدید جبهه کار تونل - نمایی از درزه داری توده سنگ. B: وجود رگه‌های ثانویه کلسیت در سنگ آهک، اخذ شده از مصالح حفاری (قبل از ورود به زون گسلی و مواجهه با جریانهای پر فشار آب زیرزمینی).



شکل ۷. طرحی شماتیک از ریزش توده سنگها بر روی سپر ماشین حفر تونل (حین پیشروی در زون گسلی).

می‌شود. در موقعیت توقف، کله‌حفار ماشین بیش از ۲۵۰ میلی‌متر انحراف عمودی (به سمت بالا) داشته است. از طرفی مقادیر انحراف عمودی در قسمتهای مختلف ماشین (کله‌حفار، سپر جلویی، سپر میانی، سپر انتهایی) نیز متفاوت بوده است. در محل توقف ماشین میزان انحراف عمودی کله‌حفار با میزان انحراف در قسمتهای مختلف سپر ماشین، اختلافی در حدود ۵۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. لذا این فاکتور نیز در تشدید درگیری سپر ماشین با زمین مؤثر است (شکل ۸).

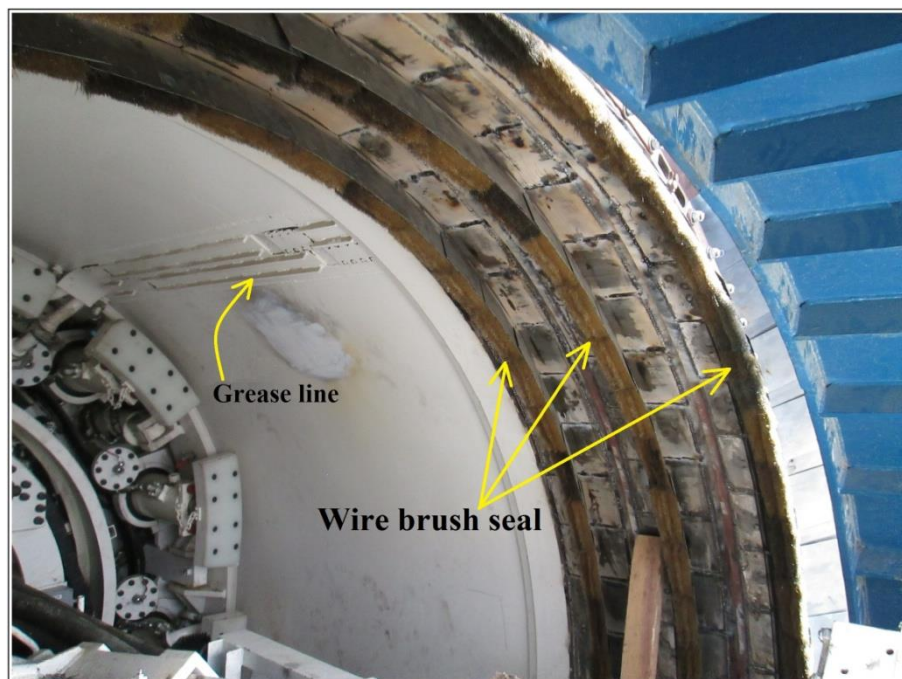
ب- انحراف کله‌حفار ماشین: تأثیرات منفی شرایط نامساعد ژئوتکنیکی (زون‌های گسلی با جریانهای پُر فشار آب زیرزمینی) بر راهبری ماشین به نحوی است که حتی در صورت حضور اپراتورهای باتجربه، انحراف ماشین از مسیر حفاری گاهاً اجتناب‌ناپذیر است. تحلیل نوسانات داده‌های انحراف‌سنجی ماشین در مسیر پیشروی نشان می‌دهد که میزان انحرافات عمودی کله‌حفار در موقعیت توقف ماشین، نیز فاکتوری تأثیرگذار بر درگیری سپر ماشین با زمین محسوب



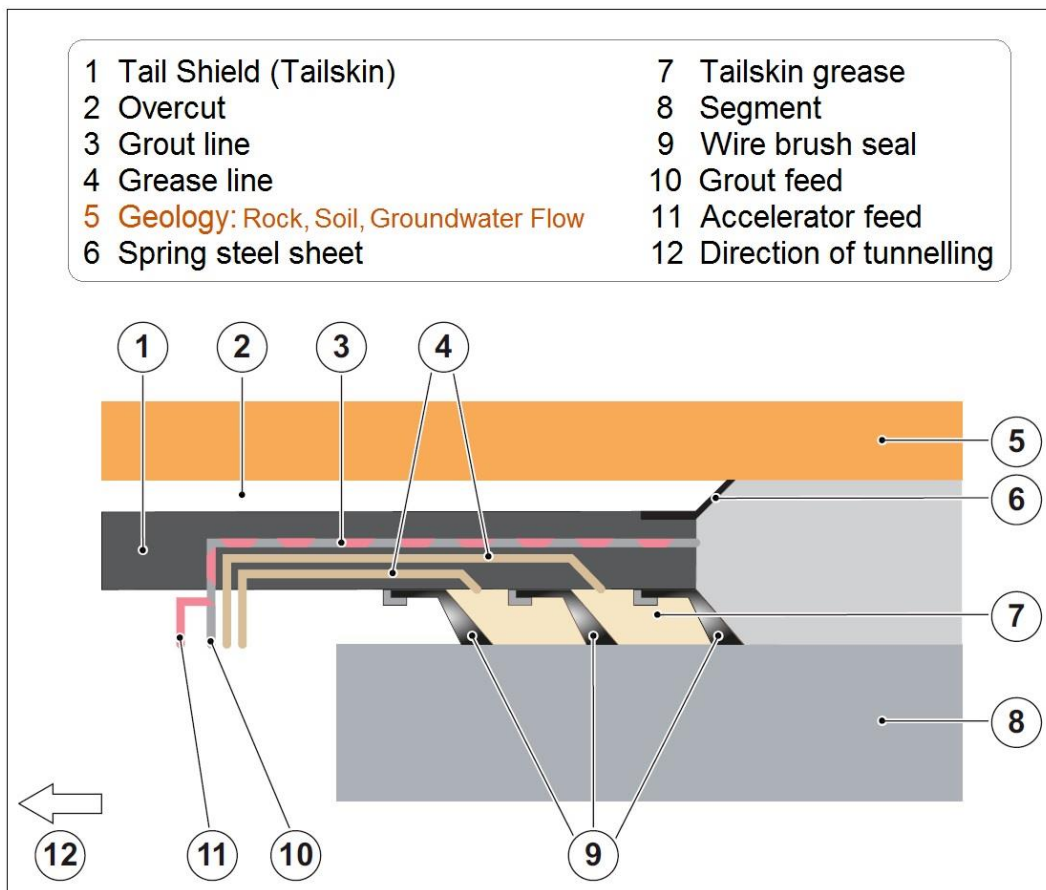
شکل ۸. میزان انحراف عمودی در قسمتهای مختلف ماشین تونل آزاد (حین پیشروی در زون گسلی).

جریانهای پرفشار آب زیرزمینی، امکان عبور از سیستم آبنندی و ورود به فضای انتهای سپر ماشین را پیدا خواهند نمود (شکل ۱۱). از طرفی انجام تعمیرات کامل (تعویض هر سه ردیف برآش) تنها در شرایطی امکان پذیر است که تشکیلات زمین شناسی دارای جریانهای پرفشار آب زیرزمینی نباشد و ماشین در موقعیت زمینهای کم آب یا خشک قرار داشته باشد. در تونل آزاد به دلیل فشار بالای آب زیرزمینی (تا بیش از ۶ بار) و صعوبت راهبری ماشین در زونهای گسلی، فرسایش و خرابی شدید برآشهای آبنندی در چند مقطع رخ داده است. در موقعیت گیر کردن ماشین نیز به دلیل خرابی برآشهای آبنندی، احتمال آب شستگی گروت و نفوذ دوغاب سیمان در این قسمت از سپر انتهایی ماشین وجود داشته است. ورود همزمان دوغاب سیمان به همراه مصالح زمین شناسی (ذرات سنگ) در فضای بین برآشها، میتواند عاملی محتمل در ایجاد اصطکاک و تشدید درگیری سطوح انتهای سپر ماشین با زمین محسوب شود.

ج- خرابی سیستم آبنندی انتهای سپر ماشین: در محدوده انتهای سپر ماشین، سه ردیف برس سیمی (برآش) به منظور جلوگیری از ورود جریان آب زیرزمینی، مصالح زمین (ذرات سنگ و خاک) و گروت (ملات سیمانی تزریق شده در پشت پوشش بتنی سگمتال تونل) نصب گردیده است. به این منظور، گریسی الیافدار (با نام تجاری ماستیک) نیز از طریق پمپ و لاینهای تزریق (تعبیه شده در بدنه سپر ماشین)، بطور مستمر همزمان با پیشروی ماشین در بین برآشها تزریق می شود. این گریس با پُر کردن فضاهای خالی بین برآشها، وضعیت آبنندی انتهای سپر ماشین را تثبیت می نماید (شکل های ۹ و ۱۰). افزایش ناگهانی نرخ مصرف گریس تزریقی در این قسمت از ماشین، میتواند اولین نشانه از فرسودگی برآشها باشد. با گذشت زمان، در اثر توسعه فرسودگی ها و ایجاد خرابی شدید در برآشها، حتی با تزریق حجم بالایی از گریس نیز آبنندی تأمین نخواهد شد. در نتیجه



شکل ۹. موقعیت لاینهای برآش در انتهای سپر ماشین پروژه آزاد (تصویر مربوط به مرحله مونتاژ ماشین و قبل از آغاز حفاری تونل است).



شکل ۱۰. طرحی شماتیک از سیستم آببندی انتهای سپر ماشین پروژه آزاد.



شکل ۱۱. ورود جریان آب زیرزمینی از انتهای سپر ماشین پروژه آزاد به دلیل فرسودگی براش ها و عدم عملکرد سیستم آببندی.

## ۱-۱-۴- بررسی شیوه علاج بخشی جهت آزادسازی سپر

## ماشین

به منظور پیشگیری از وقوع تجارب پروژه بازی دراز (وقوع خرابی و آسیب به تجهیزات ماشین)، در تونل آزاد جهت آزادسازی سپر ماشین راهکارهای مختلف طی جلسات فنی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت بر اساس بررسی سوابق تجارب گذشته (تجارب ماشین بازی دراز)، تحلیل شرایط زمین‌شناسی، کنترل وضعیت ماشین و قضاوت‌های مهندسی، ایده استفاده از جک‌های هیدرولیکی کمکی مطرح گردید.

مزیت این ایده آن است که با توجه به موقعیت نصب جک‌های کمکی در سپر انتهایی، نیروی مازاد اعمال شده توسط این ادوات هیچگونه تنش کششی بر روی اتصالات جک‌های مفصلی پس‌پس اعمال نمی‌کند. در نتیجه با افزایش نیروی پیشران (به منظور آزادسازی ماشین)، احتمال شکستگی اتصالات جک‌های مفصلی و جدا شدن دو سپر از یکدیگر کاهش می‌یافت. لذا اپراتور بجای افزایش نامتعارف نیروی جک‌های تراست ماشین می‌توانست برای بالا بردن نیروی پیشران، نیروی جک‌های کمکی را در کنار فشار جک‌های تراست مورد استفاده قرار دهد. این ایده از تکرار تجربه ماشین بازی دراز جلوگیری می‌نمود.

با توجه به عدم آزادسازی ماشین در تراست ۱۳۵۰۰ کیلو نیوتن، تعداد ۴ عدد جک هیدرولیک ۲۵ تُنی، به تونل انتقال داده شد. این جک‌ها پس از عملیات جوشکاری تکیه‌گاه‌ها (جهت اتصال جک‌ها به بدنه سپر ماشین) در موقعیت سپر انتهایی نصب گردیدند تا با اعمال نیرو به آنها، توان نیروی پیشران ماشین افزایش داده شود و از این طریق سپر ماشین آزاد گردد. جک‌ها در ۴ موقعیت (موقعیت‌های ساعت ۱۲، ۳، ۶، و ۹) در محدوده بین سپر انتهایی و آخرین رینگ پوشش بتنی تونل نصب گردیدند.

از آنجایی که پیشروی ماشین به واسطه فشار جک‌های تراست بر سطح قطعات بتنی پوشش سگمنتال تونل صورت می‌گیرد، لذا پیش از اعمال نیرو به جک‌های کمکی و جک‌های تراست، قطعات انتهایی پوشش سگمنتال تونل با نصب پلیت

و اتصالات فولادی (از طریق نصب بولت و جوشکاری) به یکدیگر دوخته شدند تا از ناپایداری‌های احتمالی (جابجایی یا شکستگی سگمنت‌ها) در زمان اعمال نیروهای پیشران جلوگیری گردد (شکل ۱۲). همچنین با استفاده از قابلیت‌های ماشین، تزریق بتونیت (به عنوان روان کننده) در اطراف سپر ماشین نیز انجام گرفت تا از اصطکاک سپر با زمین در لحظه آزادسازی ماشین کاسته شود.



شکل ۱۲. اتصال قطعات پوشش بتنی سگمنتال تونل به

یکدیگر جهت جلوگیری از ناپایداری در زمان اعمال نیرو به جک‌های پیشران.

پس از فراهم شدن شرایط برای شروع مجدد پیشروی ماشین، همزمان با اعمال نیرو به جک‌های تراست، به جک‌های هیدرولیک کمکی ۲۵ تُنی نیز نیرو اعمال شد (شکل ۱۳). نیروی اعمال شده توسط چهار جک کمکی مجموعاً نزدیک به ۹۸۰ کیلو نیوتن قابل برآورد بود، اما علی‌رغم اضافه شدن این نیرو به نیروی جک‌های تراست (ثبت شده به میزان ۱۳۳۰۰

پسیو، جدا شدن سپرهای انتهایی و میانی ماشین، خرابی سیستم آبنندی سپرها، توقف طولانی مدت عملیات حفاری، افزایش هزینه‌های مالی پروژه و ... جلوگیری به عمل آید. نتایج و جزئیات نیروهای پیشران حاصل از جکهای هیدرولیک کمکی در قالب جدول ۳ ارائه شده است. پایش و بررسی داده‌های ثبت شده در سامانه دیتالاگر ماشین، نشان می‌دهد که در لحظه آزاد سازی و حرکت ماشین، نیروی اعمالی از جکهای تراست ۱۳۱۵۰ کیلو نیوتن بوده است. نیروی اعمالی از جکهای هیدرولیک کمکی نیز در حدود ۴۰۰۰ کیلو نیوتن قابل برآورد است (جدول ۳). در نتیجه سپر ماشین در اثر تجمع نیرویی تقریبی معادل ۱۷۱۵۰ کیلو نیوتن (ناشی از عملکرد همزمان جکهای تراست و جکهای کمکی)، آزاد گردید و ماشین شروع به پیشروی نمود (شکل ۱۵). جهت درک بهتر توضیحات، در شکل شماره ۱۶ موقعیت نصب جکهای کمکی (Additional Cylinder) در سپر انتهایی ماشین تونل آزاد ارائه شده است. در شکل مذکور موقعیت سایر اجزای ماشین (نظیر جکهای مفصلی پسیو، جکهای مفصلی اکتیو، سپر انتهایی، سپر میانی، سپر جلویی، جکهای تراست و غیره که در متن به آنها اشاره شده است) نیز قابل مشاهده است. همچنین در انتهای مقاله، شرح مختصری از ویژگی‌ها و نحوه عملکرد این قطعات ارائه شده است (پیوست شماره ۱).

کیلو نیوتن در سامانه دیتالاگر)، در این مرحله از اقدام، ماشین آزاد نگردید (جدول ۳). در ادامه تصمیم گرفته شده که از جکهای کمکی با توان بالاتر استفاده شود. همچنین ایده نصب چند دستگاه ویراتور برقی، بر روی سطح سپر انتهایی ماشین مطرح شد که در زمان اعمال نیروهای پیشران با ایجاد ارتعاش موجب شوند که اصطکاک سنگهای فشرده شده بر روی سپر کاهش یابد. لذا در مرحله بعدی، جکهایی با توان‌های بیشتر (دو عدد جک ۵۰ و دو عدد ۶۰ تنی) و چهار دستگاه ویراتور تهیه و به تونل منتقل گردید که پس از جانمایی و نصب بر روی بدنه سپر انتهایی ماشین؛ جهت امکان‌سنجی مورد آزمایش قرار گرفتند. بررسی شرایط حاکی از آن بود که جکهای ۵۰ و ۶۰ تنی نیز کارایی لازم را ندارند و نصب دستگاه‌های ویره بر روی سپر هم نمی‌تواند در آزاد کردن ماشین تأثیری داشته باشد. در این مرحله جکهای هیدرولیک کمکی جدید، نیرویی در حدود ۲۱۵۰ کیلو نیوتن را تأمین کردند که ثمری نداشت (جدول ۳). سرانجام در مرحله نهایی با تهیه و نصب جکهای سنگین ۱۵۰ تنی، اقدام مؤثری انجام گرفت که منجر به آزادسازی و حرکت ماشین شد (شکل ۱۴). شیوه بهسازی تجهیزات ماشین در تونل آزاد (از طریق نصب جکهای هیدرولیکی کمکی)، زمینه‌ای را فراهم آورد تا ضمن آزاد سازی ماشین، از تکرار تجارب مشابه در پروژه بازی‌دراز (گسیختگی جکهای مفصلی



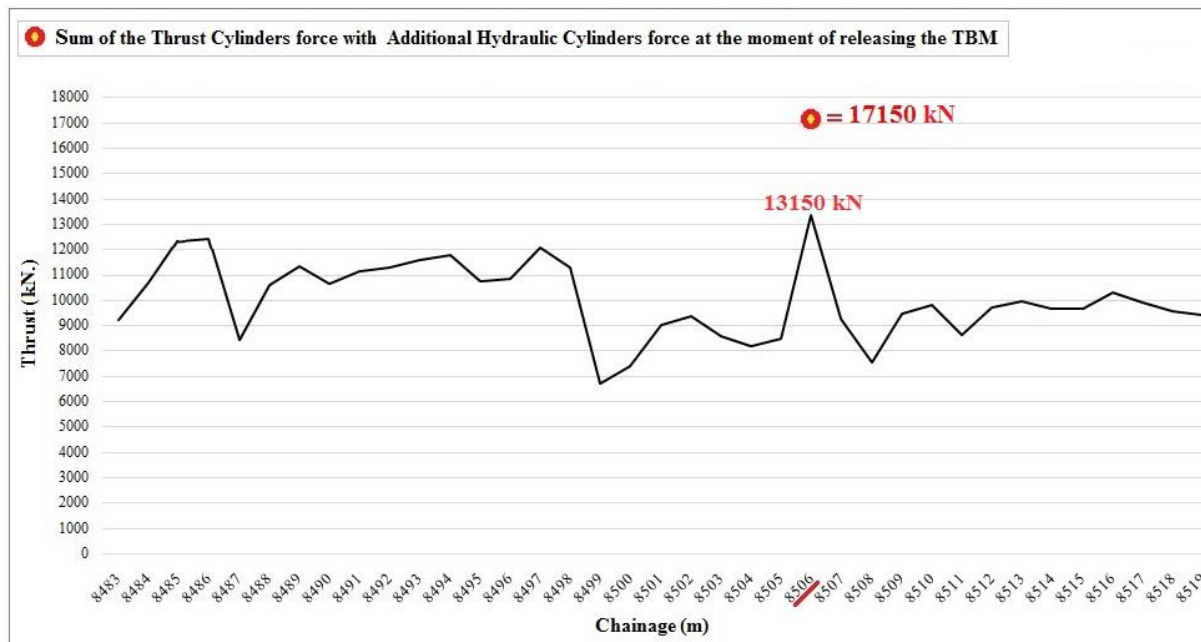
شکل ۱۳. نصب جک‌های هیدرولیکی کمکی ۲۵ تنی بر روی بدنه سپر انتهایی ماشین جهت افزایش نیروی پیشران.



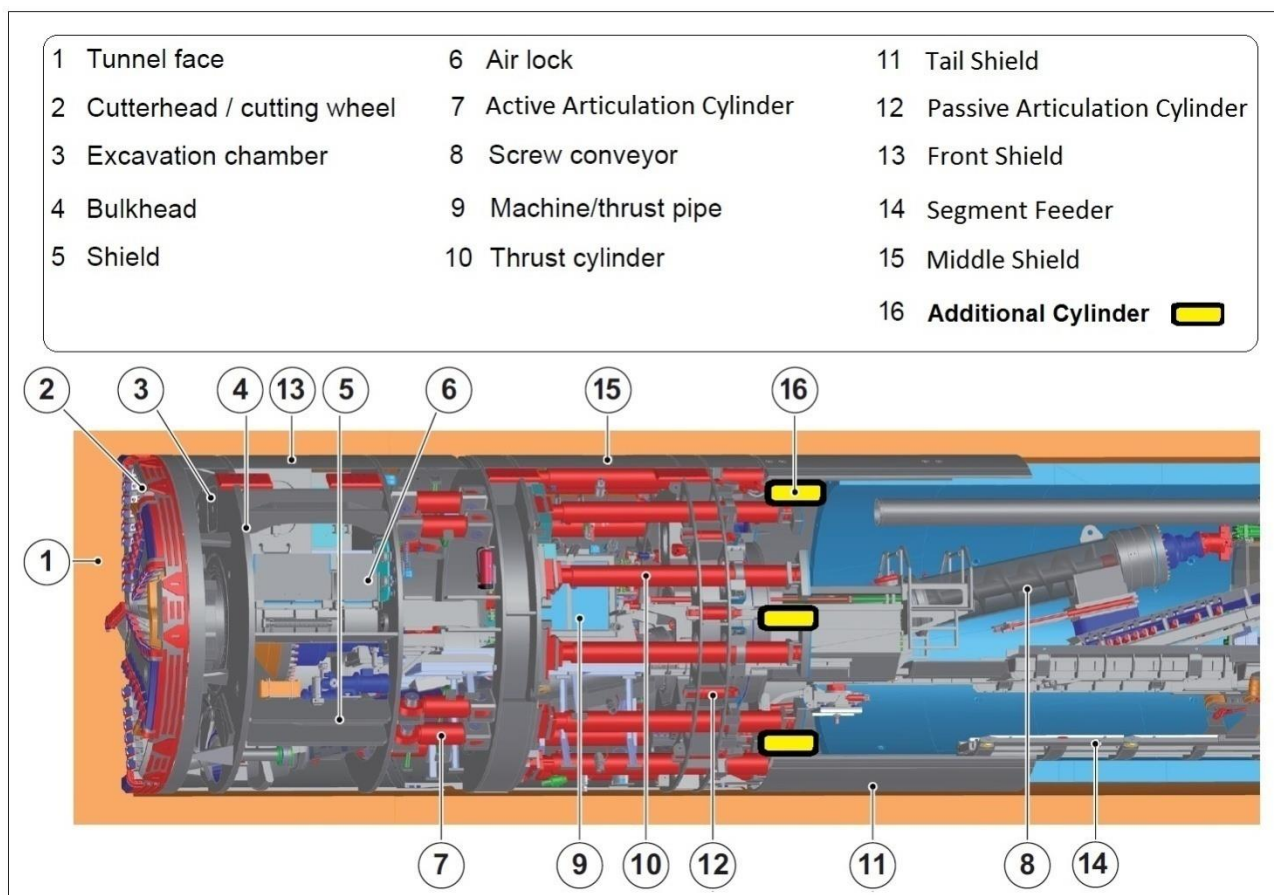
شکل ۱۴. نصب جک‌های هیدرولیکی کمکی ۱۵۰ تنی بر روی بدنه سپر انتهایی ماشین جهت افزایش نیروی پیشران.

جدول ۳. نتایج و بررسی جزئیات نیروهای پیشران حاصل از جک‌های هیدرولیک کمکی در مراحل علاج بخشی - آزاد سازی ماشین.

Stage	Additional Hydraulic Cylinder type based on power (Tons)	Maximum force produced by Additional Hydraulic Cylinder (kN)	Number of Additional Hydraulic Cylinders used	Maximum usable force from Additional Hydraulic Cylinders (kN)	Force utilized from Additional Hydraulic Cylinders (kN)	Force of Machine Thrust Cylinders (kN)	The sum of the forces of the Thrust Cylinders and the Additional Hydraulic Cylinders (kN)	Results
1	25	245	4	980	980	13300	14280	Not releasing the machine.
2	50	490	2	980	2156	13330	15486	Not releasing the machine. At this stage, vibrators were also installed, which was fruitless.
	60	588	2	1176				
3	150	1471	4	5884	4000	13150	17150	The machine was released before reaching the maximum usable force from the Additional Hydraulic Cylinders.



شکل ۱۵. نوسانات نیروی پیشران ماشین تونل آزاد (ثبت شده در سامانه دیتا لاگر) در محدوده زون گسلی و توقف ماشین.



شکل ۱۶. موقعیت نصب جک‌های هیدرولیک کمکی (عضو ۱۶) به منظور افزایش نیروی پیشران و آزاد سازی ماشین تونل آزاد

(et al. 2016, Peila, 2014, Peila et al. 2013, Wittke. 2007) ارائه شده است؛ اما واقعیت‌های تجربی در اجرا نشان می‌دهد که در زونهای دارای جریان‌های پُر فشار آب زیرزمینی، عملاً امکان عمل‌آوری مناسب در مصالح سنگی وجود ندارد. بخصوص اگر معضل جریان پُر فشار آب با کاهش درصد ذرات ریزدانه در مصالح نیز توأمان گردد؛ در آن شرایط صعوبت کار تشدید خواهد شد. این مسئله در برخی از پروژه‌های حفاری مکانیزه، تأخیرات زمانی و چالش‌های فراوانی ایجاد نموده است.

لذا از دیگر مشکلات اجرایی که در تونل‌های آزاد و بازی‌دراز بطور مشابه رخ داده است؛ مربوط به عدم امکان عمل‌آوری مصالح حفاری در محفظه چمبر ماشین (عضو ۳ در شکل شماره ۱۶) بوده است. در حقیقت در زونهای گسلی به دلیل فشار بالای آب زیرزمینی (گاهاً بیش از ۵ بار) و نیز نبود ذرات ریزدانه در توده‌سنگ‌های آهکی، ماشینهای حفار در این دو پروژه در بحث عمل‌آوری (تأمین خصوصیات پلاستیسیته مصالح حفاری: شکل‌پذیری و حالت خمیری) با محدودیت شدیدی مواجه بوده‌اند. حتی تزریق انواع فوم و مواد پلیمری جاذب آب در جبهه‌کار حفاری نیز اثر بخشی نداشت.

عمل‌آوری مصالح تأثیرات مثبت متعددی در روند حفاری شامل: بهبود نرخ پیشروی ماشین، کاهش گشتاور کله‌حفار، افزایش نرخ نفوذ ابزارهای برشی و کاهش سایش آنها، کاهش تنش بر روی اجزای سیستم محرک ماشین دارد. اما در تونل بازی‌دراز و تونل آزاد، عدم امکان عمل‌آوری مصالح، چالشهای اجرایی خاصی را در زونهای آبدار به دنبال داشت.

در تونل بازی‌دراز در چند مقطع برای شناسایی موقعیت زونهای آبدار از تجهیزات آزمایش پیش‌بینی لرزه‌ای تونل (TSP: Tunnel Seismic Prediction) بهره گرفته شد (جوذکی و همکاران، ۱۳۹۷-ج) تا در شرایط نامساعد پیش‌رو، راهبری ماشین با چالش‌های کمتری مواجه باشد. با این حال به دلیل معضل عمل‌آوری مصالح حفاری، حتی شناسایی موقعیت این زونها از طریق آزمایش TSP نیز

لازم به توضیح است که حتی در شرایط معمول حفاری نیز بخشی از نیروی تراست ماشینهای حفر تونل، صرف غلبه بر اصطکاک سپر ماشین با محیط زمین‌شناسی می‌شود. این نیروی اصطکاک با توجه به "وزن ماشین، سطح تماس ماشین با زمین و ضریب اصطکاک بین سنگ و فلز" قابل برآورد است. با قرار دادن مقادیر "نیروی اصطکاک، حجم مصالح حفاری در چمبر (عضو ۳ در شکل شماره ۱۶) و میزان فشار جبهه‌کار" در روابط تجربی و تئوریک که در این زمینه وجود دارد، میتوان میزان نیروی خالص تراست در زمان پیشروی ماشین را بدست آورد؛ البته تشریح این روابط خارج از بحث این مقاله است. اما بطور کلی در زونهای گسلی یا در زمینهای فشارنده (پدیده لهیدگی)، اصطکاک سپر ماشین با محیط زمین‌شناسی افزایش می‌یابد و طبیعتاً در شرایط بحرانی (نظیر موقعیت گیر کردن سپر ماشین پروژه آزاد)، اصطکاک به حداکثر مقادیر ممکن خواهد رسید. لذا در موقعیت آزاد سازی ماشین تونل آزاد، کل نیروی ایجاد شده از جکهای هیدرولیک کمکی و البته بخش قابل توجهی از نیروی جکهای تراست، صرف غلبه بر نیروی اصطکاک سپر ماشین با زمین شده است.

## ۲-۴- معضل عمل‌آوری مصالح حفاری

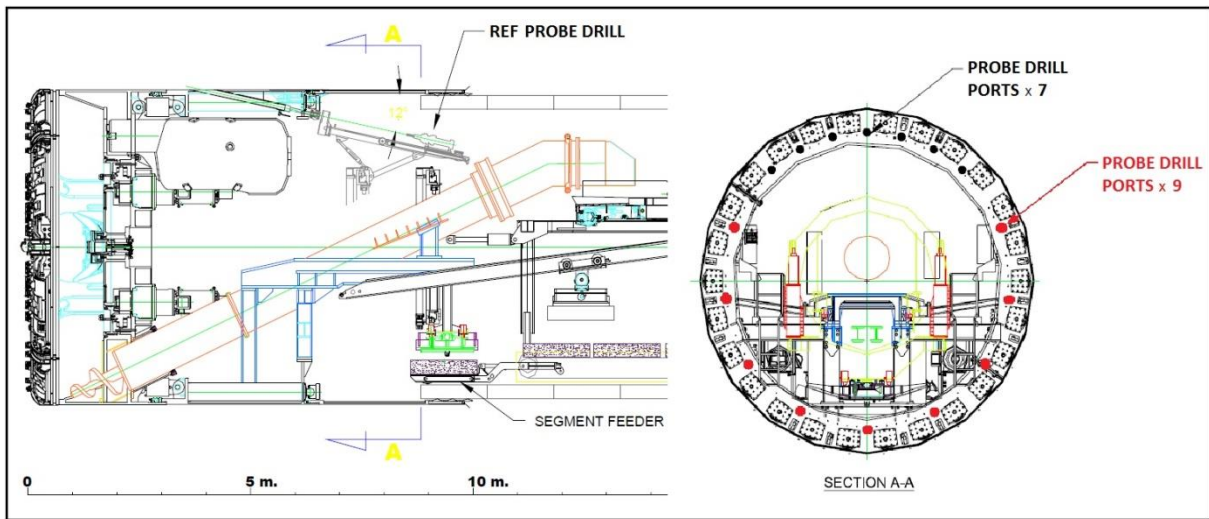
عمل‌آوری فرآیندی است که در آن از طریق تزریق فوم و مواد پلیمری، ضمن تغییر در خصوصیات مصالح حفاری (اعم از سنگ یا خاک)، مصالح را به ماده‌ای همگن، پلاستیک و خمیری تبدیل می‌کند. چنین مصالحی هم قابلیت فشار به جبهه‌کار را دارند و هم قابلیت انتقال از طریق نوار نقاله را دارند (Tarigh Azali et al. 2012, 2013, Wang et al. 2024, (Todaro et al. 2022). پیش از این، عمده سوابق مقالات پژوهشی در زمینه عمل‌آوری مصالح با ماشین‌های حفر تونل (از نوع متعادل کننده فشار زمین)، بیشتر متمرکز بر زمین‌های خاکی بوده است. اگر چه در سالیان اخیر پژوهش‌هایی نیز پیرامون عمل‌آوری مصالح در زمین‌های سنگی (Kim et al., 2021, Huang et al. 2019, Pourhashemi et al. 2018, , Ye

در مهمترین راهکار، به منظور کنترل آب زیرزمینی در جبهه کار حفاری و بهبود شرایط عمل آوری مصالح، تغییراتی در ساختار ماشین پروژه بازی دراز اعمال شد. در طراحی اولیه ماشین، نقاط تعبیه شده برای حفاری گمانه های پیشاهنگ (به تعداد ۷ حفره) تنها در نیمکره بالایی سپر (موقعیت ساعت ۱۰ تا ۲ در جهت حرکت عقربه های ساعت) ایجاد شده بود، لذا امکان حفاری گمانه پیشاهنگ در نیمکره پایین سپر (ساعت ۲ تا ۱۰ در جهت حرکت عقربه های ساعت) وجود نداشت. از این رو با تصمیم اعضاء تیم فنی، جهت پیش بینی و مقابله با جریان های محتمل آب زیرزمینی، در نیمکره پایینی سپر تعداد ۹ حفره تعبیه شد (شکل ۱۸) و با نصب لوله هادی بر روی این حفرات (شکل ۱۹-A و B)، همانند موقعیت های نیمکره بالایی سپر برای حفاری گمانه های اکتشافی (با هدف انجام تزریق دوغاب سیمان، آبنندی زمین و کمک به فرآیند عمل آوری مصالح) آماده شدند. از طرفی تجهیزات مربوط به حفاری گمانه پیشاهنگ از مدل های قدیمی بود. لذا دستگاه جدیدی بر روی ماشین نصب شد که هم قدرت مانور بیشتری (به ویژه در موقعیت های نیمکره پایین سپر) نسبت به دستگاه قبلی داشته باشد و هم در مدت زمان کمتری امکان حفاری گمانه های با طول بیشتر را مهیا سازد (شکل ۱۹-C). لازم به توضیح است علاوه بر بحث عمل آوری مصالح، هدف مهم دیگری نیز از این اقدام دنبال می شد که مربوط به حفاظت از منابع آب شهرستان سرپل ذهاب (جودکی و همکاران، ۱۴۰۰) و جلوگیری از تغییر رژیم هیدروژئولوژی منطقه در اثر حفاری تونل بود.

توانست به بهبود راهبری و سرعت پیشروی ماشین در زونهای گسلی آبدار کمک چندانی کند (شکل ۱۷).



شکل ۱۷. A: عدم امکان عمل آوری مصالح حفاری و ریزش مصالح سنگی حفاری به همراه جریان شدید آب از روی نوار نقاله. B: تمیزکاری و جمع آوری مصالح سنگی ریخته شده از نوار نقاله بر روی فیدر- در موقعیت زونهای پُر فشار آب زیرزمینی شناسایی شده از طریق آزمایش TSP در پروژه بازی دراز (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-ج).



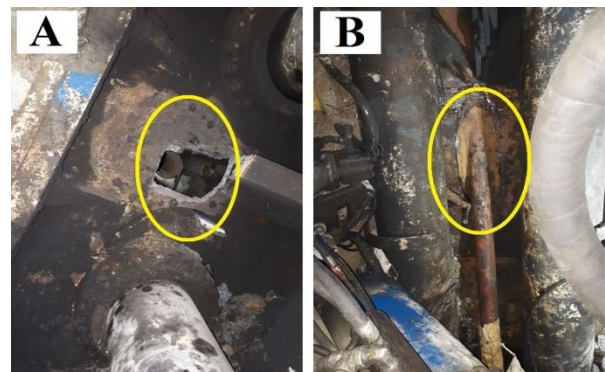
شکل ۱۸. طرحی شماتیک از ماشین تونل بازی دراز. موقعیت نقاط تعبیه شده (در کارخانه سازنده ماشین) برای حفاری گمانه‌های پیشاهنگ در قسمت بالای سپر ماشین (۷ موقعیت به رنگ سیاه). نقاط جدید ایجاد شده در محیط تونل برای حفاری گمانه‌های پیشاهنگ در قسمت پایین سپر ماشین (۹ موقعیت به رنگ قرمز).

تأثیرات اندک راهکارهای علاج بخشی در مواجهه با جریانهای آب زیرزمینی در تجارب تونل بازی دراز نشان میداد که در تونل آزاد (که جریانهای شدیدتری از آب زیرزمینی وجود داشت) می‌بایست در مورد معضل عمل‌آوری مصالح، راه‌حل‌های دیگری را برای ماشین حفار جستجو کرد.

#### ۱-۲-۴- بررسی دانه بندی مصالح حفاری و چالشهای

##### اجرای

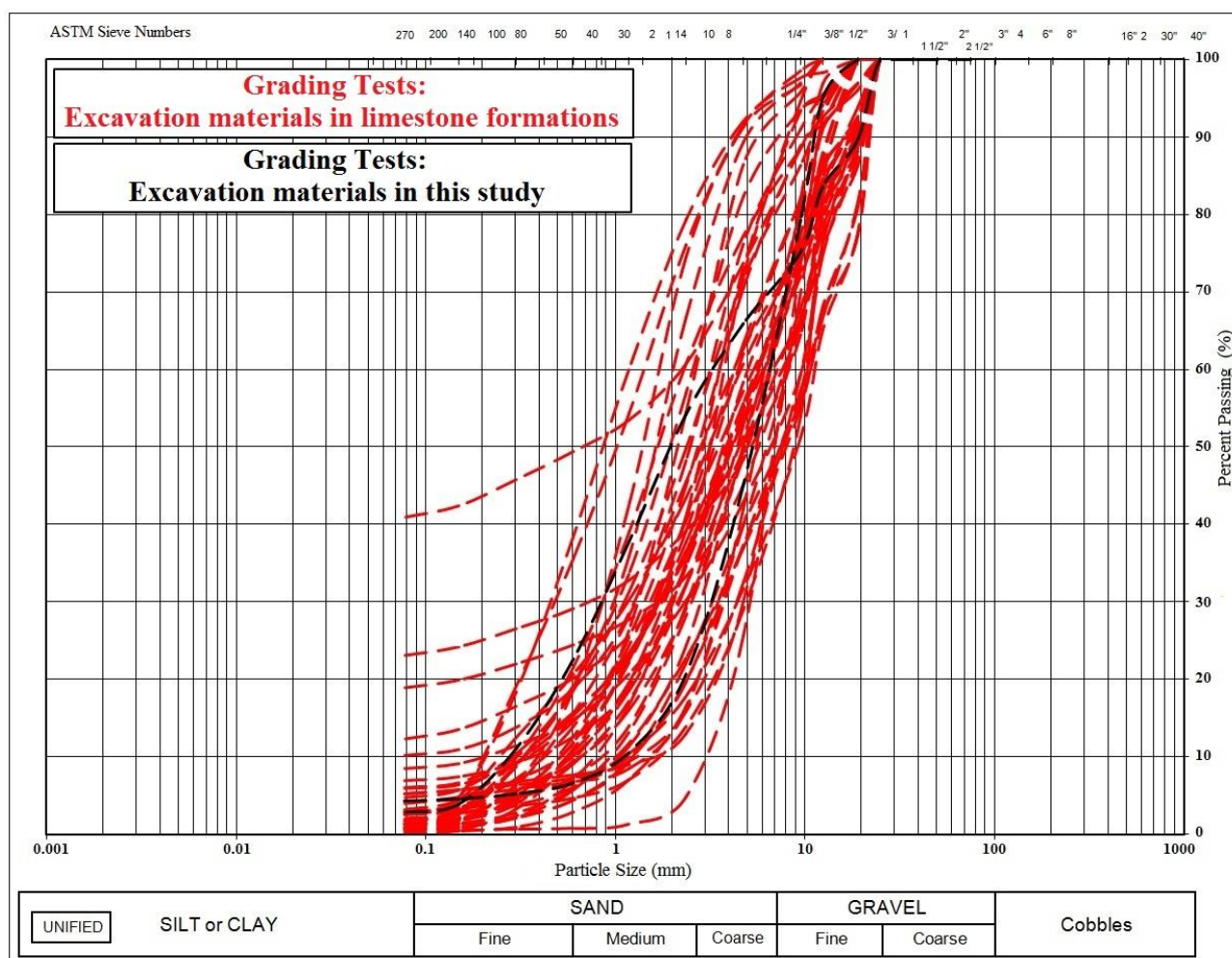
نتایج انجام آزمایشات دانه‌بندی بر روی مصالح حفاری تونل آزاد (در تشکیلات آهکی و محدوده مربوط به این تحقیق) نشان میدهد که این مصالح فاقد ذرات ریزدانه هستند و برای فرآیند عمل‌آوری، دانه‌بندی نامناسبی دارند (شکل ۲۰). کاهش ذرات ریزدانه بطور کلی موجب کاهش کارپذیری، افزایش اصطکاک و نفوذپذیری میشود (Ball et al. 2009). در گذشته مبنای انتخاب ماشین‌های متعادل کننده فشار زمین، داشتن حداقل ۳۰ درصد مصالح ریزدانه در زمین بود. اما امروزه با رشد و توسعه تکنولوژی‌های عمل‌آوری، امکان حفاری با این ماشینها در زمینهایی که درصد مصالح ریزدانه آنها تا ۱۰ درصد باشد نیز وجود دارد (BTS, 2005). در نتیجه



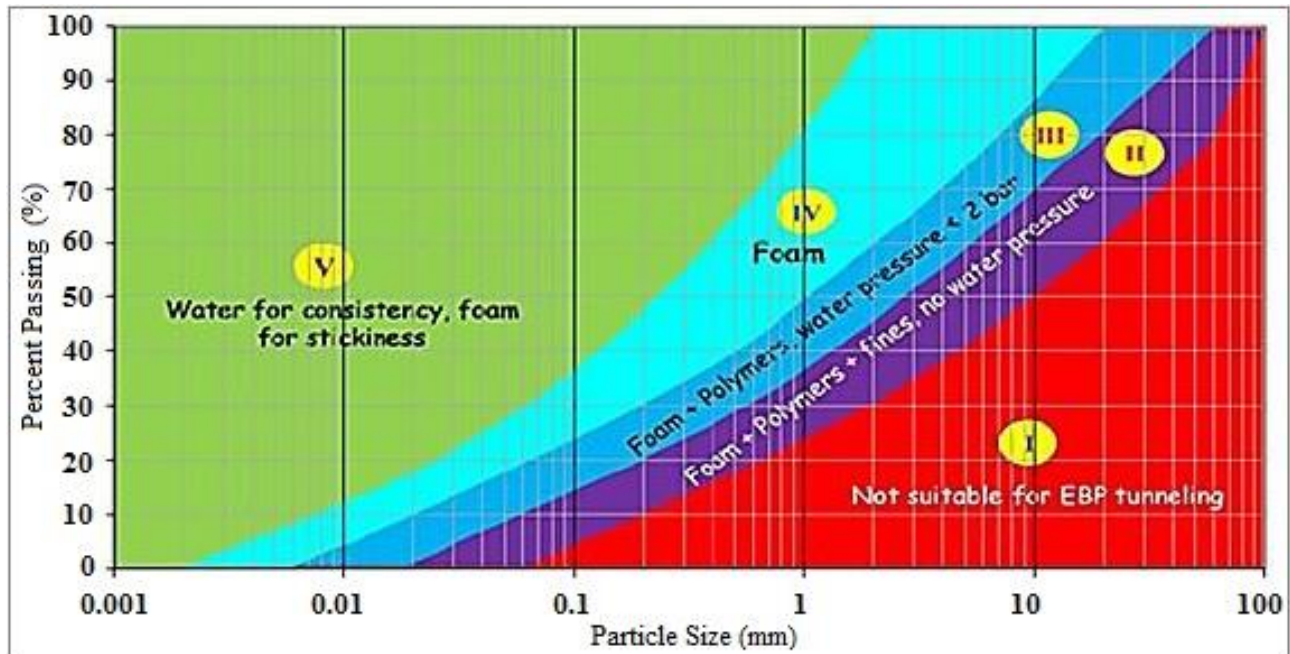
شکل ۱۹. A: تعبیه حفره در قسمت پایین سپر. B: نصب لوله‌های هادی بر روی حفره‌ها. C: دستگاه حفاری گمانه پیشاهنگ در ماشین پروژه بازی دراز (جودکی و همکاران، ۱۳۹۷-الف).

شکل شماره ۲۱)، تنها تحت شرایطی راهگشا خواهد بود که آب زیرزمینی وجود نداشته باشد و یا اینکه فشار آب کمتر از ۲ بار باشد. در این تونل در تشکیلات آهکی، فشار آب زیرزمینی در جبهه کار حفاری عمدتاً بیش از ۵ بار بوده است (و در برخی مقاطع گاهاً بیش از ۶ بار) که این فاکتور محدودیت های عمل آوری را به شدت توسعه داده است.

علی رغم توسعه تکنولوژی، حتی مدل های جدید ماشین های متعادل کننده فشار زمین (از جمله ماشین پروژه تونل آزاد)، به طور کلی در مصالحی که کمتر از ۱۰ درصد ریزدانه دارند با محدودیت مواجه هستند. مشکل نبود مصالح ریزدانه از طریق تزریق فوم و مواد پلیمری در جبهه کار تونل تا حد زیادی قابل جبران است. اما استفاده از فوم و پلیمر برای عمل آوری در محدوده دانه بندی مصالح تونل آزاد (رده های II و III در



شکل ۲۰. نتایج آزمایشات دانه بندی مصالح حفاری در تونل آزاد.



شکل ۲۱. روشهای پیشنهادی برای عمل آوری متناسب با توزیع دانه بندی مصالح در حفاری با ماشینهای متعادل کننده فشار زمین (با اقتباس از Thewes, 2007).



شکل ۲۲. تست ترکیب مصالح حفاری (سنگ و آب) با فوم جاذب آب (با نام تجاری Master-Roeswa710) در آزمایشگاه پروژه آزاد.

با توجه به عدم عمل آوری مصالح، در زمان تخلیه مصالح از دریچه اسکرو (نوار نقاله فولادی مارپیچ: عضو ۸ در شکل شماره ۱۶)، حجم زیادی از مصالح سنگی و آب از روی نقاله نوری بر روی فیدر (عضو ۱۴ در شکل شماره ۱۶) ریخته می شد. حجم مصالح انباشته شده بر روی فیدر (دستگاه حمل

حجم و فشار جریان آب در مسیر پیشروی ماشین در تونل آزاد گاهاً به حدی بالا بود که هیچ یک از فومهای جاذب آب (در محصولات شرکت های ایرانی و حتی در محصولات شرکت های معتبر خارجی) جهت تزریق در جبهه کار تونل نمی توانست کارایی مناسبی داشته باشد. پیش از برخورد به زونهای گسلی، چند محصول خارجی جهت جذب آب و عمل آوری مصالح حفاری در محل آزمایشگاه پروژه آزاد، مورد آزمایش قرار داده شد. این فومها اگرچه در محیط آزمایشگاه کارایی نسبی داشتند (شکل ۲۲) اما در شرایط واقعی حفاری در جبهه کار تونل به دلیل فشار زیاد آب (بیش از ۵ بار) واکنش مناسب با مصالح را نداشتند. استفاده از این مواد در عملیات حفاری (طی چند مرحله با غلظت های متفاوت) عملاً کوچکترین ثمری نداشت.

ب- نصب پوشش محافظ (منجید: از جنس نقاله نواری) با قابلیت باز و بسته شدن در موقعیت فیدر: جهت جلوگیری از ریزش مصالح بر روی فیدر، پوشش محافظی از جنس منجید (نقاله نواری) در زیر دریچه اسکرو نصب شد که فضای روی فیدر را پوشش می‌داد. این پوشش محافظ به صورت یک فرش در زمان حفاری بر روی سطح فیدر گسترده می‌شد (شکل ۲۵). در زمان حفاری، مصالح سنگی بر روی این فرش منجیدی، ریخته می‌شد و پرسنل اجرا می‌توانستند جهت شستشوی مصالح روی فرش با استفاده از فشار بالای آب (آب برگشتی سیستم خنک کننده که نیروی انتقال آن توسط پمپ طبقاتی تأمین می‌شد)، مصالح را به سمت یک پمپ بزرگ لجن‌کش مستقر در کف سپر انتهایی ماشین (در موقعیت نصب سگمنت) انتقال دهند (شکل ۲۶) و به این صورت زمانهای تمیزکاری در محدوده فیدر را تا حد بسیار زیادی کاهش دهند. این اقدام توانست تاخیرات زمانی عملیات حفاری (ناشی از عدم امکان عمل‌آوری مصالح) را تا حد زیادی کاهش دهد. نصب پوشش محافظ همچنین تا حد زیادی از تماس مستقیم مصالح سنگی با سطح قطعات فیدر جلوگیری می‌کرد. در نتیجه با نصب پوشش محافظ، از تشدید فرسایش و خرابی قطعات فیدر (و زمانهای توقف جهت تعمیرات آن) نیز پیشگیری می‌گردید (شکل ۲۷).



شکل ۲۴. نصب پمپ فشار قوی طبقاتی و ایجاد خط لوله جدید جهت استفاده از آب برگشتی سیستم خنک کننده برای شستشوی مصالح سنگی روی فیدر.

کننده و شارژ کننده قطعات سگمنت) به حدی زیاد بود که پرسنل اجرایی گاهی یک شیفت کاری کامل را صرف تمیزکاری و جمع‌آوری مصالح روی فیدر می‌کردند (شکل ۲۳)، در نتیجه نصب قطعات سگمنتال پوشش بتنی و حفاری با تأخیرات زمانی بسیار طولانی مواجه می‌شد. صعوبت عملیات اجرایی به حدی توسعه یافت که در هر روز کاری (۲۴ ساعت)، ماشین تنها ۱ تا ۲ متر پیشروی می‌داشت.

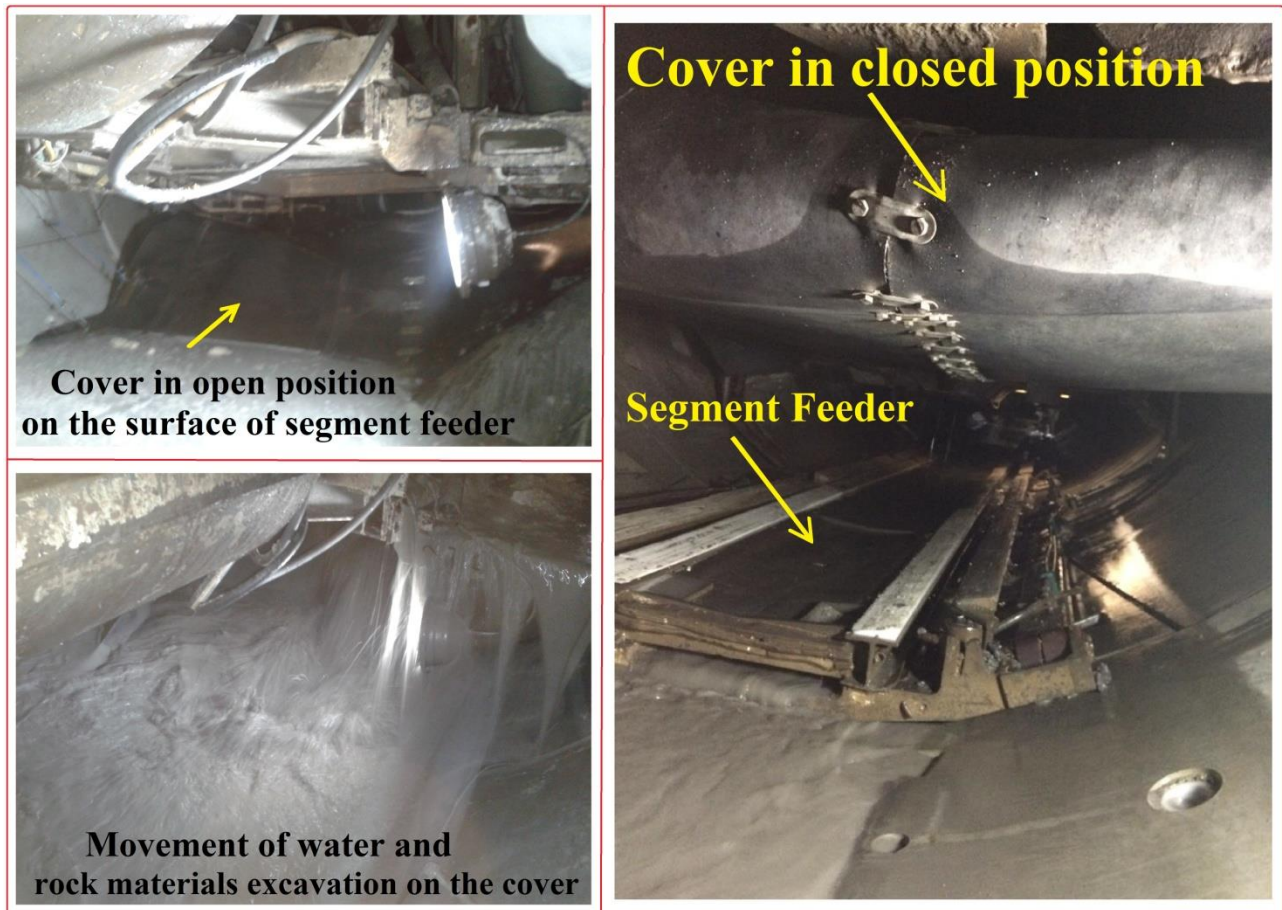


شکل ۲۳. ریزش مصالح سنگی حفاری بر روی فیدر در تونل آزاد (ناشی از معضل عمل‌آوری مصالح).

#### ۲-۲-۴- بررسی شیوه علاج بخشی (معضل ریزش مصالح حفاری)

بر اساس قضاوت‌های مهندسی در جلسات فنی، برای کاهش زمانهای تمیزکاری و مقابله با مشکل عمل‌آوری (ریزش مصالح بر روی فیدر)، مجموعه‌ای از راهکارهای علاج بخشی اتخاذ گردید که منجر به بهبود روند پیشروی ماشین (تا بیش از ۱۰ متر در دو شیفت کاری) گردید:

الف- نصب یک پمپ فشار قوی طبقاتی (شکل ۲۴) و ایجاد خط لوله جدید جهت استفاده از آب برگشتی سیستم خنک کننده ماشین (برای شستشو و جابجا کردن مصالح روی فیدر): با این اقدام ابتکاری، جریان آب بسیار پرفشاری برای شستشو تأمین می‌شد که پس از اتمام هر گام حفاری، به وسیله آن بتوان مصالح سنگی انباشته شده را از محدوده فیدر به سمت سپر انتهایی ماشین (عضو ۱۱ در شکل شماره ۱۶) منتقل کرد.



شکل ۲۵. نصب پوشش منجید در محدوده فیدر جهت کنترل آب و مصالح حفاری (کاهش زمان تمیزکاری).



شکل ۲۶. جمع آوری آب و تخلیه مصالح سنگی توسط پمپ بزرگ لجن کش در محدوده سپر انتهایی ماشین.



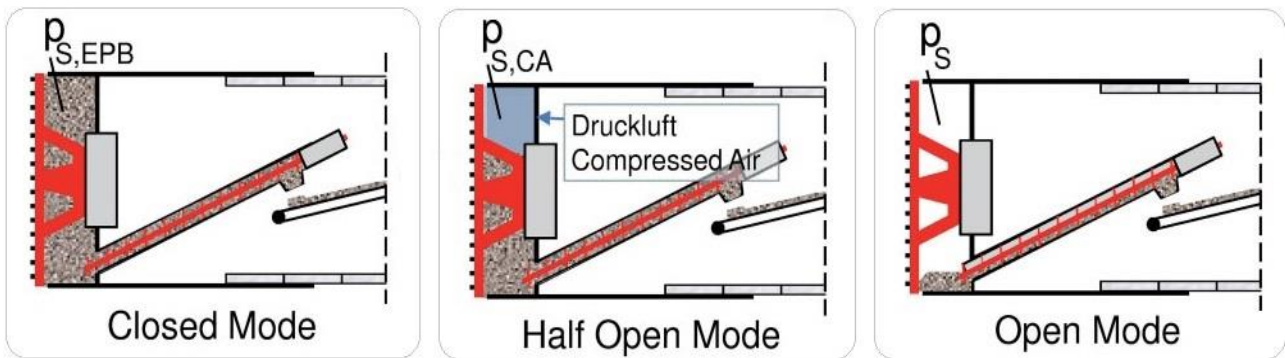
شکل ۲۷. خرابی (سایش و شکستگی) و تعمیر قطعات فیدر ماشین تونل آزاد، ناشی از اصطکاک سطوح با مصالح سنگی.

حال افزایش بود (شکل ۲۸). مارن به دلیل خاصیت جذب آب تا حدودی به عمل‌آوری و کارپذیری مصالح آهکی در محفظه چمبر کمک می‌کرد. لذا در ادامه حفاری با تصمیم تیم راهبری، در کیلومتر ۸۵۹۶ روش حفاری از مُد بسته به مُد نیمه باز و باز تغییر یافت (شکل ۲۹). در مُد نیمه باز و باز، دریچه اسکرو حین حفاری، نیمه باز و یا باز گذاشته می‌شد تا از بالا رفتن فشار در محفظه چمبر جلوگیری شود. با این اقدام تا حدی از پخش شدن و ریزش مصالح جلوگیری می‌شد و مصالح و آب تا حدودی به صورت یکنواخت بر روی نقاله نواری تخلیه می‌شد (شکل ۳۰).

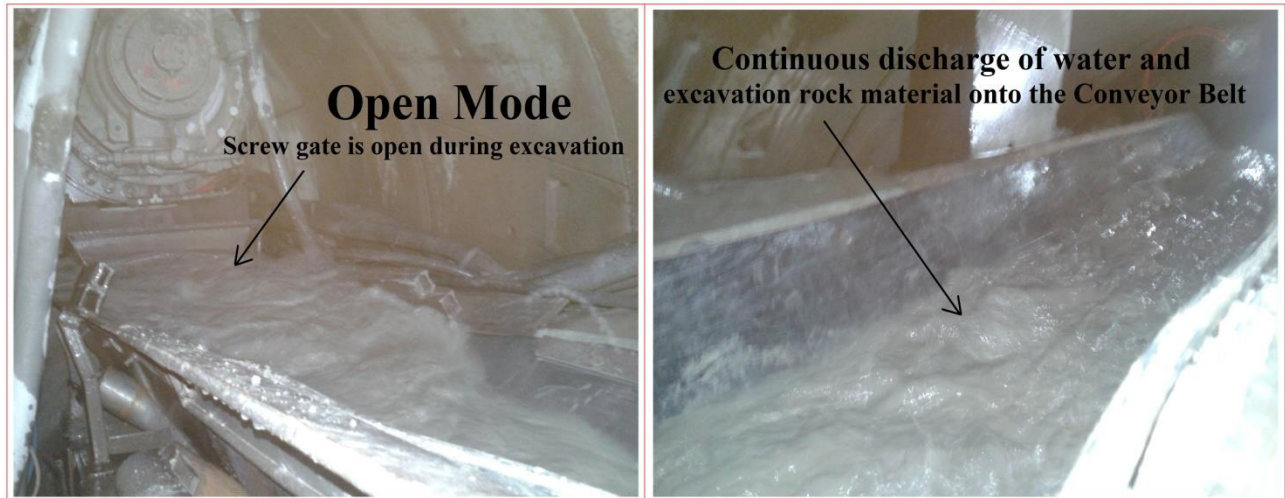
ج- تغییر روش حفاری از مُد بسته (Closed Mode) به مُد نیمه باز (Half Open Mode) و باز (Open Mode): یکی از دلایل ریزش و انباشته شدن مصالح بر روی فیدر مرتبط با شرایط حفاری ماشین در مد بسته بود که در حین حفاری، فشار در محفظه چمبر ماشین تا بیش از ۵ بار افزایش می‌یافت. لذا در زمانی که دریچه اسکرو برای تخلیه مصالح حفاری به صورت مقطعی توسط اپراتور گشوده می‌شد، حجم زیادی از مصالح و آب بطور ناگهانی و با فشار زیاد به اطراف پرتاب می‌شد. پس از عبور از محدوده توقف ماشین در زون گسلی، در ادامه مسیر حفاری درصد مارن در ترکیب سنگ‌شناسی تشکیلات آهکی به تدریج (در مقادیر جزئی) در



شکل ۲۸. کنترل تغییرات لیتولوژیکی مصالح حفاری. افزایش تدریجی درصد مارن (از تصویر سمت چپ به سمت راست) در ترکیب سنگ شناسی تشکیلات آهکی مسیر پیشروی ماشین از کیلومتر ۸۵۹۰ تا ۸۹۰۳.



شکل ۲۹. طرحی شماتیک از حفاری با مدهای بسته، نیمه باز و باز (Acaroglu et al. 2016, Herrenknecht et al. 2011).



شکل ۳۰. حفاری در مد نیمه باز و باز، دریچه اسکرو در زمان حفاری بطور پیوسته نیمه باز یا باز است (تخلیه یکنواخت و پیوسته مصالح حفاری و آب بر روی نقاله نوری، متر ۸۶۲۰).

حفاری (مد بسته)، به منظور جلوگیری از پدیده نشست زمین (که بیشتر در تونلهای شهری مطرح است) وجود نداشت.

### ۳-۲-۴- بررسی نوسانات پارامترهای عملیاتی

پارامترهای عملیاتی ماشینهای حفر تونل به عنوان شاخصی برای تعیین میزان سازگاری ماشین با شرایط متغیر زمین شناسی عمل می کنند (Nie et al., 2025). جهت قضاوت در مورد میزان اثر بخشی تغییر مد حفاری بسته به باز (جهت تعدیل معضل عمل آوری مصالح) نیز میتوان وضعیت تغییرات پارامترهای عملیاتی ماشین را کنترل کرد. بررسی نوسانات پارامترهای عملیاتی در سامانه دیتالاگر ماشین نشان می دهد که با باز گذاشتن دریچه اسکرو، فشار جبهه کار از حدود ۵ بار (در مد بسته)، حتی تا کمتر از ۱ بار (در مد باز) نیز کاهش داشته است (شکل ۳۱). در اثر کاهش فشار جبهه کار، نیروی تراست مورد نیاز برای پیشروی ماشین نیز از حدود ۱۰۰۰۰ کیلو نیوتن (در مد بسته) به کمتر از ۵۰۰۰ کیلو نیوتن (در مد باز) کاهش نشان می دهد (شکل ۳۲). همچنین پارامتر نرخ نفوذ متأثر از پارامترهای دیگر، از حدود ۳ الی ۴ میلی متر بر دور کله حفار (در مد بسته) تا متوسط ۱۰ میلی متر در دور کله حفار (در مد باز) افزایش نشان می دهد (شکل ۳۳). از این رو مجموعه شرایط حاکی از بهبود روند حفاری بوده است. با عنایت به مطالب ذکر شده، انتخاب روش حفاری با مد باز به منظور تعدیل معضل عمل آوری مصالح، میتواند دلایل فنی قابل قبولی داشته باشد.

بر اساس قضاوتهای مهندسی در جلسات فنی، تغییر شیوه حفاری از مد بسته به نیمه باز و باز به دلایل زیر، قابل توجیه تلقی شد:

- افزایش اندک و تدریجی درصد مارن در ترکیب تشکیلات سنگشناسی در ادامه مسیر پیشروی ماشین تا حدودی موجب تعدیل معضل عمل آوری مصالح می شد.

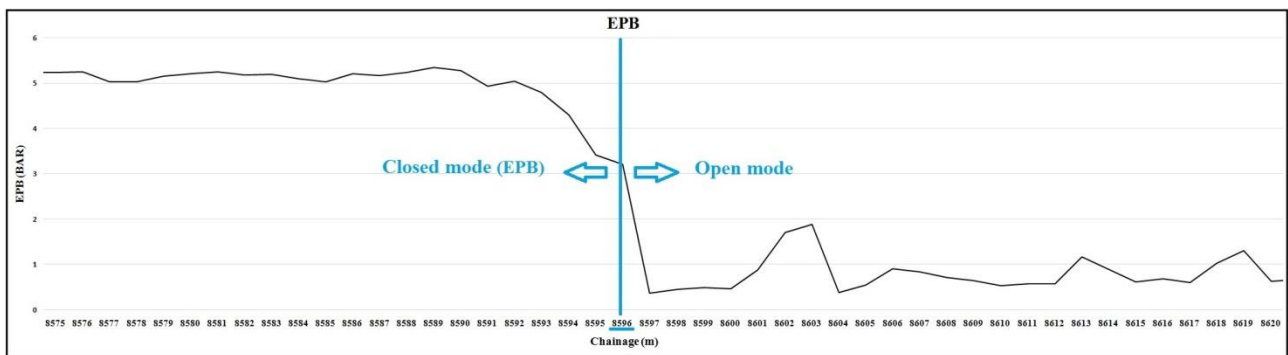
- بهبود راندمان حفاری و جلوگیری از توقفات ماشین.

- کاهش زمانهای حفاری و کاهش لرزش کله حفار: این عوامل موجب حفاظت و تأمین عمر مفید اجزای سیستم محرک ماشین (یاتاقان اصلی، چرخنده اصلی، پینیون ها و غیره) می شد.

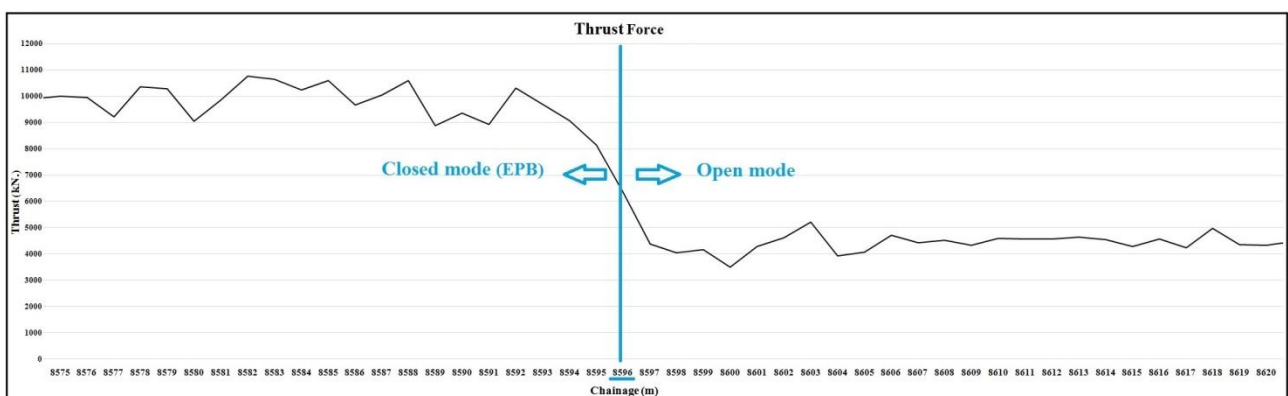
- کاهش احتمال شکستگی و در رفتگی پوشش بتنی سگمنتال تونل: که در این تونل در چند مقطع رخ داده است. این حوادث با هجوم آب زیرزمینی و صعوبتهای فراوان (جهت علاج بخشی، نصب مجدد پوشش بتنی و آبنبدی زمین) همراه بوده است.

- اندازه گیری و مقایسه آب خروجی از تونل در مقاطع زمانی مختلف نشان می داد که اختلاف مقادیر جریان آب خروجی از تونل (در هنگام حفاری مد بسته و در زمان حفاری مد باز) حداکثر در حد ۱۰ لیتر بر ثانیه است. لذا نتیجه قضاوتهای مهندسی این بود که حفاری با مد باز نمیتواند تأثیرات مخرب شدید بر اُفت سطح ایستابی آب زیرزمینی منطقه داشته باشد و تبعات مخرب زیست محیطی مشابه با تجارب برخی تونلها نظیر قطعه یک تونل قمروود (جودکی و همکاران، ۱۳۹۸-ب) را به دنبال داشته باشد.

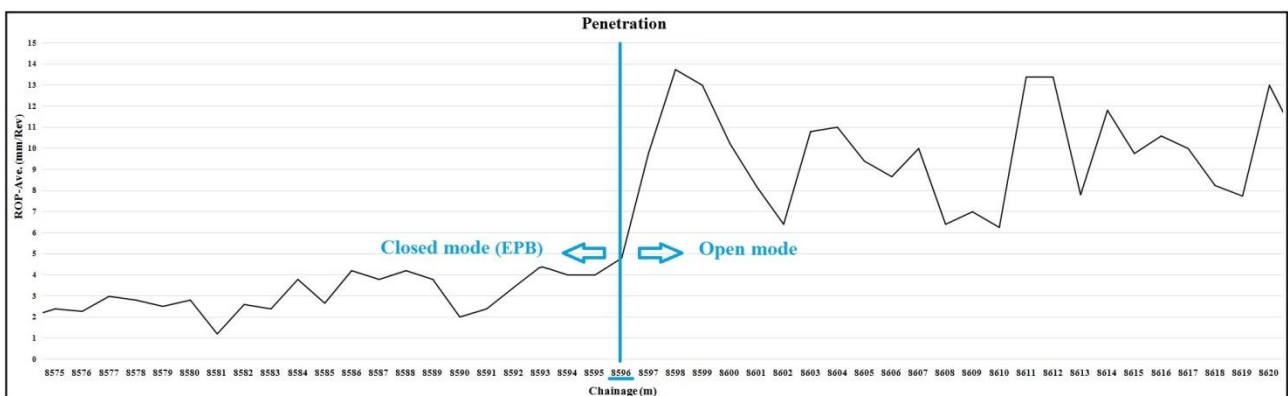
- در این پروژه با توجه به کوهستانی بودن و روبراه نسبتاً زیاد تونل، حساسیت اجرایی جهت اعمال فشار جبهه کار حین



شکل ۳۱. نوسانات پارامتر فشار جبهه کار ماشین با تغییر شیوه حفاری از مُد بسته به مُد باز.



شکل ۳۲. نوسانات پارامتر نیروی تراست ماشین با تغییر شیوه حفاری از مُد بسته به مُد باز.



شکل ۳۳. نوسانات پارامتر نرخ نفوذ ماشین با تغییر شیوه حفاری از مُد بسته به مُد باز.

جبهه کار کاهش بسیار چشمگیری نشان داد. پرسنل اجرایی از این موقعیت برای تعمیر و نگهداری ماشین برای دو کیلومتر باقی مانده از مسیر تونل استفاده نمودند.

به طور کلی با اجرای راهکارهای علاج بخشی مذکور، ماشین از شرایط نامساعد ژئوتکنیکی در زونهای آبدار عبور نمود. همانگونه که اشاره شد پس از عبور از ناحیه گسلی به تدریج با افزایش درصد مارن در تشکیلات آهکی، حجم آب جبهه کار نیز کاهش می یافت. به نحوی که سرانجام در کیلومتر ۸۹۰۳ با برخورد به یک لایه ناتراوا، جریان آب در

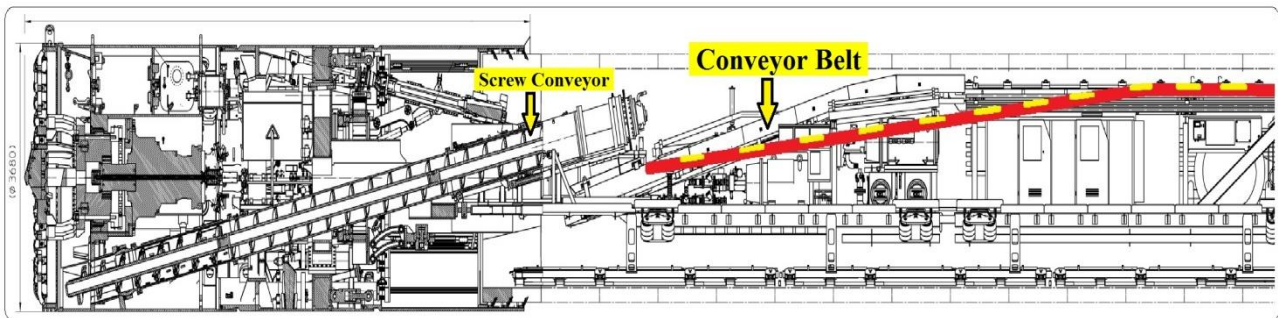
شرایط مشابه تونل آزاد با چالشهای کمتری در زونهای آبدار مواجه گردد و اندکی با معضل عمل آوری در زونهای پُر فشار آب زیرزمینی سازگار گردد.



شکل ۳۴. نمایی از شیب نقاله نواری ماشین تونل آزاد (زاویه دید از سمت دریچه اسکرو).

#### ۴-۲-۴- امکان اصلاح ساختار نقاله نواری ماشین

در خصوص مشکل عمل آوری مصالح در زونهای آبدار تونل آزاد، یکی از راهکارهایی که میتواند تا حدودی از ریزش شدید مصالح حفاری در محدوده فیدر ماشین جلوگیری کند و انتقال مصالح بر روی نقاله نواری را تسهیل نماید؛ این گزینه بود که مقداری از شیب نقاله نواری در محدوده جلوی دریچه اسکرو کاسته شود (شکل ۳۴). اگر چه در محیط تونل این امکان وجود نداشت. اما با اتمام عملیات حفاری و خروج این ماشین از تونل، این امکان وجود دارد که با اضافه کردن یک گنتری (شاسی و اسکلت متحرکی است که تجهیزات ماشین روی آن قرار میگیرد) به ساختار سیستم پشتیبان ماشین (به منظور انتقال تجهیزات زیر نوار به محدوده ای عقب تر) فضایی خالی در جلوی دریچه اسکرو ایجاد کرد تا بتوان شیب نقاله نواری را به میزان مورد نیاز (متناسب با تغییرات فشار آب زیرزمینی در هر مقطع از حفاری) کاهش داد (شکل ۳۵). با این راهکار، این ماشین میتواند در پروژه بعدی و در



شکل ۳۵. تغییر شیب نقاله نواری ماشین تونل آزاد با خط فرضی قرمز رنگ.

صنعت تونلسازی مکانیزه و نیز محققین محیطهای آکادمیک ارائه شد. خلاصه ای از دستاوردهای مهم و نکات برجسته این تحقیق در قالب پیوست شماره ۲ (در انتهای مقاله) ارائه شده است.

بطور کلی، عملیات راهبری ماشین حفار در پروژه آزاد یکی از پُر چالش ترین تجارب صنعت تونلسازی مکانیزه ایران بوده است. تحلیل همگی تجارب و ابتکارات اجرایی این پروژه (پیرامون شیوه راهبری و بهسازی تجهیزات ماشین) در قالب این پژوهش امکان پذیر نبوده است و شرح سایر تجارب، نیازمند نگارش مقالات دیگری است. با این حال مجموعه اطلاعات این مقاله با هدف انتقال تجربیات فنی به فعالان

با تجارب و دیدگاه‌های فنی جدید میتوان اینگونه تفسیر نمود که اگر ایده نصب جکهای هیدرولیکی کمکی در جلسات تیم مهندسی پروژه تونل بازی دراز طرح می‌گردید، قطعاً این امکان وجود داشت که با نصب این جک‌ها از وقوع مخاطرات اجرایی در زون گسلی (اعمال تنش‌های کششی و گسیختگی جکهای مفصلی پسیو، جدا شدن سپرهای ماشین، توقف طولانی مدت ماشین حفار و ...) جلوگیری به عمل آورد.

در سوابق اجرایی دیگر پروژه‌ها (نظیر توقفات ۶۰۰ روزه ماشین تونل قمرود) نیز ارائه راهکارهای فنی میتوانست از توقفات طولانی مدت ماشین‌ها پیشگیری نماید. لذا مستندسازی و انتقال این قبیل تجربیات فنی، میتواند پرسنل اجرایی را برای اتخاذ تصمیمات مناسب‌تر یاری نماید و زمینه را برای ارتقاء دانش پیرامون شیوه راهبری و بهسازی ماشین‌های حفار فراهم نماید.

#### پیوست‌ها

با توجه به فشردگی و تراکم قطعات در فضای داخلی ماشین، امکان نمایش تمامی اجزای ماشین در قالب تنها یک یا دو شکل شماتیک وجود ندارد. لذا در تصاویر شماتیک این مقاله، تنها قطعاتی نمایش داده شده‌اند که در متن مورد بحث قرار داده شده است. بطور مثال اجزای سیستم محرک اصلی (یاتاقان اصلی، گیربکس، موتورهای محرک و ...) و یا قطعه‌ای نظیر ارکتور (نصاب سگمنت) از جمله مواردی هستند که جهت نمایش نیازمند تصاویر شماتیک جداگانه‌ای هستند؛ اما با توجه به موضوعات این مقاله حائز الویت جهت نمایش و تشریح نبوده‌اند. لذا در پیوست شماره ۱ نیز تنها قطعات و اجزایی تشریح میگردند که متناسب با مباحث مقاله حائز الویت بیشتری هستند. همچنین در پیوست شماره ۲، خلاصه نتایج اصلی و نکات برجسته این تحقیق ارائه شده است.

#### ۵. نتیجه گیری

یافته‌های این تحقیق نشان میدهد که معضل گیر کردن سپر ماشین به دلیل مجموعه‌ای از عوامل؛ شامل شرایط نامساعد ژئوتکنیکی (در زون گسلی)، انحرافات عمودی کله‌حفار ماشین و نیز فرسودگی براسهای سیستم آبنندی انتهای سپر ماشین رخ داده است. بررسی و تحلیل جزئیات نیروهای پیشران حاصل از جکهای هیدرولیک کمکی، اثر بخشی این تجهیزات در آزادسازی ماشین را به اثبات می‌رساند.

همچنین نتایج تحقیق نشان میدهد که معضل عمل‌آوری مصالح حفاری، ناشی از نبود ذرات ریزدانه در مصالح و فشار بالای آب زیرزمینی در جبهه‌کار بوده است. بررسی و تحلیل پارامترهای عملیاتی ماشین (فشار جبهه‌کار، تراست، نرخ نفوذ) نشان میدهد که تغییر مد حفاری (از مد بسته به مد نیمه باز و باز) میتواند در کنار سایر راهکارهای اجرایی (نصب پمپ فشار قوی طبقاتی، نصب پوشش منجید در محدوده فیدر و ...)، فاکتوری تأثیرگذار برای تعدیل معضل عمل‌آوری مصالح باشد.

بطور کلی؛ یافته‌های زمین‌شناسی، نتایج تحلیل داده‌های انحراف سنجی ماشین، نتایج آزمایشات دانه‌بندی مصالح حفاری و بررسی پارامترهای عملیاتی ماشین در این پژوهش نشان میدهد که شیوه راهبری ماشین در شرایط نامساعد زمین‌شناسی تونل آزاد و راهکارهای علاج‌بخشی در زمینه بهسازی تجهیزات ماشین (نظیر: نصب جکهای هیدرولیکی کمکی در سپر انتهایی و ...) با تفکر فنی و بر اساس قضاوت‌های مهندسی صورت گرفته است.

همچنین مقایسه نتایج این پژوهش با ادبیات پژوهشی گذشته مؤید آن است که راهکارهای علاج‌بخشی در تونل آزاد، شیوه‌هایی فنی و اثر بخش‌تر نسبت به تجارب گذشته (نظیر تونل بازی‌دراز) محسوب میشوند. این راهکارها متأثر از افزایش تجربه و ارتقاء سطح دانش فنی در زمینه راهبری ماشینهای حفار اتخاذ گردیده‌اند.

پیوست ۱. معرفی اجزای ماشین حفار که در متن و تصاویر شماتیک مقاله مورد بحث قرار داده شده است.

Component Name	Description of Features and Operation
Cutterhead	The part of the machine that is in direct contact with the tunnel face. The cutting tools mounted on the cutterhead perform the cutting of the earth materials. The force required for this operation has two components: compression and rotation. The compression component is provided by the thrust cylinders of the machine, and the rotation component is provided by the main drive system components.
Chamber	It is a chamber located behind the cutterhead. It is possible to accumulate excavation materials and improve the material conditioning process (through the injection of foam and polymer materials) in this space. Replacement of cutting tools and repairs to the cutterhead are also carried out through this space.
Front Shield	The protective and maintenance part of the equipment is the main drive system of the machine. The front shield is connected to the cutterhead from the front and is connected to the middle shield of the machine from the rear.
Middle Shield	The middle shield is connected to the front shield from the front and to the tail shield of the machine. The thrust cylinders of the machine are also located in the middle shield position. Therefore, this part of the shield plays a role in power transmission and machine advancement due to the presence of thrust cylinders.
Tail Shield	The end part of shield machine, which is connected to the middle shield. One of its main functions is to create a suitable space for the erection of prefabricated concrete parts (segments) by the erector, so in order to prevent the entry of water and geological materials (rock and soil particles), it has a sealing system, which is described in the main text of the article..
Screw Conveyor	Its beginning is located at the lowest part of the front shield and in the chamber space. The extension of this piece is such that its end is located outside the tail shield and at the beginning of the machine backup system. The most important part of the screw is a steel shaft (with spiral blades) that, by rotating, transfers the excavation materials from inside the chamber to the belt conveyor at the beginning of the machine backup system.
Thrust Cylinders	They are located in the middle shield of the machine. They are responsible for providing power to press the cutterhead against the tunnel face and advance the machine. The number and power of these cylinders vary depending on the excavation diameter and the type of machine.
Active Articulation Cylinders	These cylinders connect the middle and front shields of the machine to each other. These cylinders correct deviations of the cutterhead from the excavation path. The number and power of these cylinders vary depending on the excavation diameter and the type of machine.
Passive Articulation Cylinders	These cylinders connect the tail shield and the middle shield of the machine to each other. In tunnels with curved paths, these cylinders can be used to increase the flexibility of the machine during advancement. The number and power of these cylinders also vary according to the excavation diameter and the type of machine.
Conveyor Belt	The excavated materials after exiting the screw gate, are discharged onto a conveyor belt. The conveyor belt is responsible for transporting the materials from the screw outlet to the end of the machine backup system. In medium-diameter tunnels, such as Azad tunnel, the materials are discharged into material-carrying wagons at the end of the backup system and then exited the tunnel by locomotive. However, in large-diameter tunnels, the conveyor belt usually extends the entire length of the tunnel and, with the help of belt booster systems, can transport the excavated materials to the depot outside the tunnel.
Segment Feeder	It is responsible for transporting prefabricated concrete parts (segments) to the installation position by the erector.
Probe Drilling	The components of this system are installed on the machine to drill boreholes to identify ground conditions and also for the purpose of performing injections (for sealing or improving the ground). The speed of drilling boreholes depends on the type and power of the equipment in this system.

پیوست ۲. دستاوردها و نکات برجسته این تحقیق.

Applications in the Mechanized Tunneling Industry	
1	This research provides a practical solution to the problem of tunnel boring machine shield jamming in adverse geotechnical conditions (which has caused long-term suspensions of excavation operations in many mechanized tunneling projects).
2	It provides a practical solution to prevent time delays in excavation operations caused by the problem of material conditioning (in rock zones with high groundwater pressure flows).
Research and Academic Aspects	
1	The research literature on the relationship between geological sciences and mechanical engineering in the field of mechanized excavation machinery has expanded from a new perspective.
2	It has expanded the existing knowledge on the effect of adverse geotechnical and geological conditions on the failure of tunnel boring machine components from a new perspective.

## تشکر و قدردانی

از آنجایی که محتوای پژوهش در بستر تجربیات اجرایی مؤلف اول به عنوان ناظر مقیم در محل پروژه‌های تونل آزاد و تونل بازی‌دراز شکل گرفته است، لذا بر خود لازم می‌داند از کلیه همکاران گرامی در این دو پروژه صمیمانه قدردانی نماید.

## منابع

- جودکی، و. و اجل لوئیان، ر.، ۱۳۹۴- نقش شرایط زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی سازندها در رخداد مخاطرات حفاری (مطالعه موردی تونل قمرود)، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال بیست و پنجم، شماره ۹۷، صص ۱۵۱ تا ۱۶۲.
- جودکی، و. کوهیان‌افضل، ف. عالی‌انوری، ع. اجل لوئیان، ر. سهرابی‌بیدار، ع.، ۱۳۹۶- بررسی اشکال انحلالی سطحی و میزان توسعه آب زیرزمینی در ساختگاه قطعه ۴ تونل قمرود، فصلنامه علمی پژوهشی علوم زمین، سال بیست و ششم، شماره ۱۰۳، صص ۲۹ تا ۴۰.
- جودکی، و. حسن‌پور، ج. اجل لوئیان، ر.، ۱۳۹۷ الف- ارتباط علوم زمین‌شناسی و مهندسی مکانیک در افزایش بهره‌وری ماشین‌های حفار تمام مقطع، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۴، صص ۱ تا ۲۴.
- جودکی، و. اجل لوئیان، ر. یزدخواستی، ن.، ۱۳۹۷ ب- مقایسه نتایج برگردان دوبعدی داده‌های مقاومت‌سنجی با شرایط زمین‌شناسی در مسیر حفاری قطعه ۳ و ۴ تونل قمرود، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، جلد یازدهم، شماره ۱، صص ۴۹ تا ۶۴.
- جودکی، و. سهرابی‌بیدار، ع. اجل لوئیان، ر. امینی، ن. و دیکمن، ت.، ۱۳۹۷ ج- 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، صص ۱۵ تا ۳۱.
- جودکی، و. اجل لوئیان، ر. 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 بیست و هشتم، شماره ۱۱۲، صص ۳ تا ۱۲.
- جودکی، و. اجل لوئیان، ر. مبرقعی‌دینان، ن. سهرابی‌بیدار، ع. و عالی‌انوری، ع.، ۱۳۹۸ ب- جایگاه مبانی نظریه اخلاق زمین در پایش اثرات اکوهیدرولوژیکی پروژه‌های عمرانی، مجله علمی پژوهشی انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، سال دوازدهم، شماره ۴، صص ۱۲۳ تا ۱۴۳.
- جودکی، و. حسن‌پور، ج. اجل لوئیان، ر. و مسیح‌طهرانی، م.، ۱۳۹۹- لزوم بومی‌سازی دانش بهسازی ماشین‌های حفار تی‌بی‌ام در شرایط متنوع زمین‌شناسی ایران، نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک (انجمن مهندسان مکانیک ایران)، سال ۲۹، شماره ۱۳۰، صص ۱۱ تا ۲۴.
- جودکی، و. قاضی‌فرد، ا. حق‌شناس، ا.، ۱۴۰۰- تأثیر زمین‌شناسی شهری سرپل‌ذهاب بر حساسیت‌های اجرای دو سازه عمرانی، فصلنامه علمی پژوهشی دانش‌پیشگیری و مدیریت بحران، سال یازدهم، شماره ۳، صص ۲۳۸ تا ۲۵۴.
- جودکی، و. دریکوندی، م. میرزایی، م. فرزین‌پور، م. ر. و حسینی، ش.، ۱۴۰۳- بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی و چالش‌های اجرایی تونل دالوکش (پروژه راه اصلی شهرستان الیگودرز- مسجد سلیمان)، نشریه علمی پژوهشی عمران و پروژه، دوره ۶، شماره ۱۰، صص ۱۱ تا ۳۲.

- Acaroglu, O. Erdoğan, C. and Ekinici, E. 2016- Analysis of the EPB-TBM Excavation Parameters Used in a Tunnel Construction in Istanbul," Proceedings of the 2nd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'16), Budapest, Hungary – August 22 – 23, Paper No. MMME 113 DOI: 10.11159/mmme16.113.
- Aghanabati, A. 1998- Major sedimentary and structural units of Iran (map)," *Geosciences*, 7, 29-30.
- Alavi, M. 1991- Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran, *Geological Society of America Bulletin*, 103, 983-992.
- Amberg, F. 2001- Gotthard base tunnel, TBM heading equipment, *Progress in Tunneling After 2000*, AITESITA, World Tunnel Congress, Milano, June 10-13.
- Ball, R.P.A. Young, D.Y. Isaacson, J. Champa, J. and Gause, C. 2009- Research in soil conditioning for EPB tunneling through difficult soils, In: Almeraris, G., Mariucci, B. (Eds.), *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC)*, Las Vegas, USA, pp. 320–33.
- Barla, G. 2000- Lessons Learnt from the excavation of a large diameter TBM tunnel in complex hydrogeological conditions, *International Conference on Geotechnical & Geological Engineering Melbourne, Australia*, 19-24 November 2000.
- Barla, G., and Pelizza, S. 2000- TBM tunnelling in difficult ground conditions. In: Paper Presented at the *ISRM International Symposium*.
- Bayati M, Hamidi JK. 2017- A case study on TBM tunnelling in fault zones and lessons learned from ground improvement. *Tunn Undergr Space Technol.* 63:162–70.
- BTS. 2005- *Closed-Face Tunneling Machines and Ground Stability*, British Tunneling Society (Closed-Face Working Group) in association with the Institution of Civil Engineers: Thomas Telford Publishing, London (77 pp).
- Cao, A.Gao, H. Fan, S.Guo L., You, Z.Lei Y., Sun, Y.and He, J . 2025- Study on vibration mechanism and dynamic characteristics for TBM main bearing defects, *Journal of Mechanical Systems and Signal Processin.*, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.111807>
- Cui, G. and Ke, X. 2023- Rescue technology of the jamming accident for the double-shield TBM in complex geological conditions: A case study. *Alexandria Engineering Journal*. Volume 79, 15 September 2023, Pages 374-389.
- Dalgıç, S. 2003- Tunneling in fault zones, Tuzla tunnel, Turkey. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 18 (5), 453–465.
- De Biase, A. Grandori, R. Bertola, P. and Scialpi, M. 2009- Gibe II tunnel project- Ethiopia-40 bars of mud acting on the TBM“special designs and measures implemented to face one of the most difficult events in the history of tunnelling. In: Paper Presented at the *Rapid Excavation and Tunnelling Conference (RETC)*, Las Vegas, USA.
- Farrokh, E. and Rostami, J. 2008- Correlation of tunnel convergence with TBM operational parameters and chip size in the Ghomroud tunnel, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 23(6):700-710.
- Farrokh, E. and Rostami, J. 2009- Effect of adverse geological condition on TBM operation in Ghomroud tunnel conveyance project. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 24(4):436-446.
- Finnsson, S. 2001- Two tunnel boring machines for Lesotho: A design and case study, *Progress in Tunneling After 2000*, AITES-ITA, World Tunnel Congress. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 15, Issue 1, January-March 2000: 49-54.
- Grandori, R. Gager, M. Antonini, F. and Vigle, A. 1995- Evinos-Mornos tunnel – Greece, In: *Proceedings of the Rapid Excavation & Tunnelling Conference*, Chapter 47: 747–767.
- Guetter, W. and Weber, W. 2001- Two tunnels in totally different geological formations, In: *Proceedings of the Rapid Excavation & Tunnelling Conference*, Chapter 21: 241–260.
- Herrenknecht, M. Thewes, M. and Budach, C. 2011- The development of earth pressure shields: From the beginning to the present," *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 4, no. 1, pp. 11–35. <https://doi.org/10.1002/geot.201100003>
- Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. 1998- Applicability of the Geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation, *Bulletin of Engineering Geology and Environmen*, Vol. 57 (2):151-160.
- Home, L. 2016- Hard rock TBM tunneling in challenging ground: Developments and lessons learned from the field. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 57, 27–32.

- Huang, S. Wang, S. Xu, C. Shi, Y. and Ye, F. 2019- Effect of Grain Gradation on the Permeability Characteristics of Coarse-grained Soil Conditioned with Foam for EPB Shield Tunneling, *KSCE Journal of Civil Engineering, Geotechnical Engineering, Springer, Volume 23*, pages 4662–4674.
- Kim, T. Lee, I. Chung, H. Park, J. and Ryu, Y. 2021- Application Ranges of EPB Shield TBM in Weathered Granite Soil: A Laboratory Scale Study, *Applied Sciences*, No. 11, 2995, pp. 1-15, <https://doi.org/10.3390/app11072995>
- Liu, LP. Wang, XG. Li, CB. and Tan, ZH. 2023- Jamming of the double-shield tunnel boring machine in a deep tunnel in Nyingchi, Tibet Autonomous Region, China. *Tunn Undergr Space Technol.* 2023;131: 104819.
- Lovat, R.P. 2000- Cleuson Dixence Penstock Tunnel, AITES – ITA World Tunnel Congress, Durban, South African, Vol. 24: 611–614.
- Marinos, P.G. 1998- TBM excavation in weak rock heterogeneous rock masses for the Athens Metro, *Journal of Bulletin of Engineering Geology and Environment, Springer Berlin / Heidelberg, Vol.57: 151-160.*
- Nie, Y. Zhang, Q. Du, Y. and Du, L. 2025-TBM jamming risk prediction method based on fuzzy theory and Bi-LSTM. *Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 157, 106329.*
- Peila, D. 2014- Soil Conditioning for EPB Shield Tunnelling, *KSCE Journal of Civil Engineering*, No. 18(3), pp. 831-836.
- Peila, D. Picchio, A. and Chierigato, A. 2013- Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process, *Tunnelling and Underground Space Technology, Elsevier, Volume 35, p. 55–66, https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.11.006*
- Pourhashemi, M. Azali, S.T. Amiri, A. and Khorasani, E. 2018- Rock Conditioning in EPB-Tunneling, Case Study: Southern Extension of Tehran Metro Line 6, Dubai, UAE, s.n.
- Shang, Y., Xue, J., Wang, S., Yang, Z. and Yang, J. 2004- A case history of tunnel boring machine jamming in an interlayer shear zone at the yellow river diversion project in China, *Engineering Geology, Vol. 71 (3-4): 199-211.*
- Shaterpour-Mamaghani, A. Tumac, D. and Avunduk, E. 2016- Double shield TBM performance analysis in difficult ground conditions: a case study in the Gerece water tunnel, Turkey. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 75 (1), 251.
- Shen, C. Tsai, H. Hsieh, Y. and Chu, B. 1999- The methodology through adverse geology ahead of Pinglin large TBM. In: Paper Presented at the Proceeding of the Rapid Excavation and Tunnelling Conference.
- Stocklin, J. 1968- Structural history and tectonics of Iran : a review. *American Association Petroleum Geologists, Bulletin; 52(7): 1229 – 1258.*
- 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.*
- Sun, Z. Liu, J. Cheng, Y. Wu, Y. and Sun, W. 2023- Load characterization of the main bearing of a large tunnel boring machine based on dynamic characteristic parameters, *Journal of Advances in Mechanical Engineering, Vol. 15(3) 1–13, https://doi.org/10.1177/16878132231164233*
- Tarigh Azali, S. Ghafoori, M. Lashkaripour, G.R. and Hassanpour, J. 2013- Engineering geological investigations of mechanized tunneling in soft ground: A case study, East–West lot of line 7, Tehran Metro, Iran. *Engineering Geology, 166(8), Pages 170-185.*
- Tarigh Azali, S. and Moammeri, H. 2012- EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1. In: Phienweij, N., Boonyatee, T. (Eds.), *ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Bangkok, Thailand.*
- Thewes, M. 2007- TBM Tunneling Challenges- Redefining The State of The Art, *Underground Space: The 4th Dimension of Metropolises: Proceedings of the 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress. London: Taylor & Francis. ISBN: 9780415408073. http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2007/wtc2007/mc-3.pdf.*
- Todaro, C. Carigi, A. Peila, L. Martinelli, D. and Peila, D. 2022- Soil conditioning tests of clay for EPB tunnelling, *Underground Space, Volume 7, Issue 4, Pages 483-497, https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.11.002*
- Tseng, D. Tsai, B. and Chang, L. 2001- A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingress in Taiwan, *International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16: 175-183.*

- Wang, C. Zhao, W. Chen, C. Wang, Y. and Wang, X. 2024- A parameter design model for EPB shield soil conditioning in gravel stratum based on machine learning, *Construction and Building Materials*, Volume 411, 12, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134637>
- Wenner, D. and Wannemacher, H. 2009- Alborz service tunnel in Iran: TBM tunnelling in difficult ground conditions and its solutions. In: Paper Presented at the 1st Regional and 8th Iranian Tunneling Conference, Tehran, Iran.
- Wittke, W. 2007- Conditioning of the intact rock, In: W. 6. V. G. G. E. Geotechnik in Forschung und Praxis, ed. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. Aachen: Translated from the German edition: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe, pp. 250-264.
- Xu Z.H. Wang, W.Y. Lin, P. Nie, L.C. Wu, J. and Li. Z.M. 2021- Hard-rock TBM jamming subject to adverse geological conditions: Influencing factor, hazard mode and a case study of Gaoligongshan Tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volume 108, 103683.
- Xu, Z.H. Yu, T.F. Lin, P. Wang, W.Y. and Shao. R.Q. 2022- Integrated geochemical, mineralogical, and microstructural identification of faults in tunnels and its application to TBM jamming analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volume 128.
- Yang, Z. Wang, L. Zhou, J. Li, D. Zhang, K. and Guo, X. 2023- Mechanical characteristics of a tunnel boring machine cutterhead during rock breaking: Physical model tests and transient dynamic analysis, *Journal of Advances in Mechanical Engineering*, Volume 15, Issue 3. 1-11, <https://doi.org/10.1177/16878132231159971>
- Ye, X. Wang, S. Yang, J. Sheng, D. and Xiao, C. 2016- Soil Conditioning for EPB Shield Tunneling in Argillaceous Siltstone with High Content of Clay Minerals: Case Study, *International Journal of Geomechanics*, American Society of Civil, pp. 1-8, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000791](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000791)
- Zhang, Q. Ma, Y. Du, Y. Du, L. Wang, M. Zhang, S. and Nie, Y. 2025- Investigation into the collapse height of TBM jamming machinery induced by fault fracture zones and the verification of applicability. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volume 155, Part 1, 106196.