

عمل آوری به عنوان راهکاری در مدیریت مخاطرات زمین شناسی در حفاری تونل با ماشین های EPB (مطالعه موردی: توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران)

مقاله پژوهشی

حمیدرضا طاهرخانی^۱؛ حسن بخشنده امنیه^{۲*}؛ جعفر حسن پور^۳؛ عماد خراسانی^۴

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی معدن- مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، hamidr.taherkhani@ut.ac.ir

۲- دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، hbakhshandeh@ut.ac.ir

۳- دانشیار؛ دانشکده زمین شناسی، دانشگاه تهران، hassanpour@ut.ac.ir

۴- دکتری مهندسی معدن - مکانیک سنگ، شرکت بهره برداری متروی تهران و حومه، مدیریت خط ۶ متروی تهران، emad.khorasani@yahoo.com

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۵/۰۳/۰۱؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

شماره صفحات: ۴۳ تا ۵۶

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2026.17726.1510

واژگان کلیدی	چکیده
عمل آوری ریزدانه انسداد نفوذپذیری سایش	امروزه با توجه به پیشرفت تکنولوژی و همچنین به صرفه بودن اقتصادی، فناوری EPB در زمین های درشت دانه و حتی همه انواع سنگ ها نیز با موفقیت اجرا می شود. عملکرد ماشین های EPB، چه در خاک و چه در سنگ، به طور چشمگیری به عمل آوری مناسب مواد حفاری شده بستگی دارد. در مسیر حفر تونل، ماشین های EPB-TBM با مخاطرات بسیاری همانند نبود یا کمبود ریزدانه در لایه های سنگی و خاکی تحت حفاری، انسداد، حد بالای نفوذپذیری مصالح حفاری شده، سایش و خوردگی روبرو خواهد شد. در این مقاله به معرفی این مخاطرات در بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران و به بررسی رفع آنها پرداخته شده است. با توجه به آزمایش های انجام شده، مشخص شد که حدود ۵ درصد از خاک های مسیر این تونل در محدوده خطر انسداد کم، ۵۰ درصد در محدوده خطر متوسط، ۳۵ درصد در محدوده خطر زیاد و ۱۰ درصد از خاک های مسیر نیز میل به رفتار کلوخه شدن دارند. در مترážهای ۵۰۰ تا ۶۵۰ و ۱۸۵۰ تا ۲۱۰۰ تونل، لایه های حفر شده با کمترین مقادیر پارامتر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در مقطع تونل همراه بوده است. ۶۸ درصد از واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل، دارای نفوذپذیری کمتر از $1 \times 10^{-07} \text{ m/sec}$ هستند که شرایط ایده آلی برای حفاری با ماشین EPB است. مقدار شاخص سرشار بین ۱/۹۶ تا ۳/۹۸ به دست آمده است که در رده سنگ های خیلی ساینده یا نزدیک به آن قرار می گیرند. مصالح حفاری شده در اتاقک فشار با استفاده از دوغاب آهک با دانسیته بالا، پرکننده ها و پلیمر عمل آوری شدند که موجب افزایش محتوای ذرات ریزدانه، بهبود قوام مصالح و کاهش نفوذپذیری و سایش مصالح در نقاله مارپیچ گردید. نتایج نشان داد که دوغاب آهک با غلظت ۵۰ تا ۷۰ درصد وزنی پودر سنگ آهک و نسبت تزریق ۱۰ تا ۴۰ درصد، بسته به ویژگی های مصالح حفاری شده، عملکرد مناسبی در عمل آوری ایجاد می کند. همچنین، قوام بهینه مصالح عمل آوری شده با اسلامپ هدف در محدوده ۱۵ تا ۲۲ سانتی متر حاصل گردید.

۱- مقدمه

اگر چه هنوز هم عمل آوری و گزینش عامل‌های عمل آورنده، اغلب بر پایه‌ی روش‌های آزمون و خطا که مستقیماً در محل کارگاه انجام می‌شود، صورت می‌گیرد اما در تونل سازی مدرن نیاز به روش‌های آزمایشگاهی مناسب در این زمینه رو به افزایش است. در مسیر حفاری تونل، علاوه بر زمین‌های نرم، احتمال برخورد به سنگ نیز وجود دارد. اگرچه در این زمینه کارهایی نیز صورت گرفته است، ولی دانش موجود در تونل‌سازی در راستای عمل آوری سنگ در حفاری با ماشین-های EPB، پاسخگوی نیاز صنعتگران نیست؛ به عبارتی مدل-های لازم در این زمینه توسعه نیافته است که بتوان به سرعت و به راحتی در مراحل اجرایی در برخورد با محیط‌های سنگی در این مورد تصمیم‌گیری کرد. بنابراین با توجه به آنچه گفته شد، مشخص می‌گردد که تا به امروز کار جامعی بر روی عمل-آوری سنگ، و به ویژه تاثیر درصد مواد ریزدانه سنگی و نفوذپذیری مواد عمل آوری شده‌ی سنگی بر فرآیند حفاری صورت نگرفته است. در ادامه به چکیده‌ای از کارهای انجام شده در زمینه حفاری در زمین‌های سنگی اشاره خواهد شد (Taherkhani et al., 2025).

ویتکه و همکاران (۲۰۰۷) برخی آزمون‌های آزمایشگاهی در زمینه عمل آوری سنگ بکر و شبیه‌سازی مکانیسم‌های مؤثر بر تجزیه سنگ بکر را معرفی کرد. این مطالعات نشان داد که استفاده از مواد عمل آوری، شامل دوغاب‌های با دانسیته بالا، سوسپانسیون‌های با وزن مولکولی بالا و فوم همراه با افزودنی‌های پلیمری، در اتاقک حفاری و جلوی کله حفار، موجب کاهش مقاومت برشی مصالح حفاری شده و یکنواختی گل آب (Muck) با هدف به حداقل رساندن گشتاور محرک مورد نیاز کله حفار می‌شود. همچنین، در این مطالعه بر انجام آزمون‌هایی تأکید شده است که امکان شبیه‌سازی مکانیسم‌های مؤثر بر تجزیه سنگ دست‌نخورده در اتاقک استخراج را با روشی واقع‌بینانه فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که رفتار مصالح در شرایط واقعی حفاری با ماشین‌های EPB به‌خوبی بازسازی شود (Wittke et al., 2007). طاهرخانی و همکاران به ارائه رویکردی تازه در ارتباط با آماده‌سازی شرایط زمین‌های سنگی پرداخت و در این مطالعه به بررسی اثر کانی‌شناسی و ویژگی‌های ژئومکانیکی و هیدروژئولوژیکی سنگ‌های رسی-آهکی بر عمل آوری مصالح

حفر شده در اتاقک فشار ماشین‌های EPB و اثر بنتونیت در عمل آوری سنگ‌ها پرداخت (Taherkhani et al., 2025). پیلا و همکاران، امکان‌سنجی استفاده از فناوری EPB در توده‌های سنگی و اثربخشی فرآیند تونل‌زنی را از نقطه نظر عمل آوری تراشه‌ها، کاهش نفوذپذیری مخلوط عمل آوری شده، انتقال فشار بر روی سینه‌کار تونل و قابلیت استخراج مواد با نقاله ماریپچ مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آزمون افت اسلامپ برای تعریف حداقل پارامترهای عمل آوری ضروری است، اما فقط آزمایش استخراج اجازه می‌دهد تا عملیات تونل سازی در مقیاس مناسب برای تعریف پارامترهای عمل آوری بهینه شبیه سازی شود (Peila et al., 2013).

پیلا (۲۰۱۴) به ارائه برآوردی از امکان سنجی اصلاح رفتار مخلوط سنگی حفاری شده و هزینه‌های عملیات بهبود رفتار زمین پیش از آغاز به کار ماشین با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی به طراحان و پیمانکاران پرداخت (Peila, 2014).

یی و همکاران (۲۰۱۷)، برای بررسی عمل آوری مصالح حفاری شده، یک مطالعه موردی را در سنگ‌های نرم رسی انجام داده است و برای برطرف کردن مشکل انسداد (Clogging) و کلوخه شدن خاک از جنس سیلتستون آرژیلیتی با محتوای ۴۰/۵ درصد از کانی‌های رسی در مرحله اولیه ساخت خط ۱ متروی نانچانگ چین، طرحی نو را با در نظر گرفتن اندازه اسلامپ و شاخص آگونگی یا سیالیت (Liquidity index) ارائه نمودند (Ye et al., 2017).

همچنین پورهایمی و همکاران (۲۰۱۸) پژوهشی را در زمینه عمل آوری سنگ در تونل سازی EPB در بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران انجام دادند. بخش گسترشی خط ۶ متروی تهران به طول حدوداً ۶ کیلومتر هم در سازندهای خاکی و هم سنگی جای گرفته است. تزریق مواد افزودنی شامل بنتونیت، پودر سنگ‌آهک و فوم به داخل اتاقک فشار برای تولید یک ماده پلاستیک به دلیل عدم وجود ریزدانه (fine grain) در بخش سنگی، صورت گرفت. نتایج نشان از آن داشت که در خاک‌ها و توده سنگی با میزان ریزدانه کم، به کارگیری فوم به تنهایی، برای فراهم آوردن مواد خمیری بسیار خوب، کافی نیست و همچنین پس از عمل آوری مخلوط فوم و مواد سنگی از یکدیگر تفکیک شدند. برای همین از دوغاب پودر سنگ آهک و دوغاب بنتونیت استفاده گردید.

با توجه به آنچه که تا به امروز در زمینه عمل‌آوری مصالح سنگی در اتاقک فشار ماشین‌های EPB مطرح شده است، پایداری سینه‌کار به عنوان یکی از مخاطرات تونلسازی در محیط‌های سنگی مطرح نیست و موضوعات دیگری همچون چگونگی آب‌بند کردن محیط، کاهش سایش ابزار برش و به ویژه انتقال بهینه مصالح کنده شده به بیرون از اتاقک فشار و محیط تونل در این زمینه از اهمیت بالاتری برخوردار است.

در این مقاله، به بهینه‌سازی پارامترهای عمل‌آوری خاک در هنگام حفاری با ماشین EPB-TBM برای واحدهای خاکی و سنگی دربرگیرنده بخش مکانیزه مسیر تونل توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران پرداخته خواهد شد. جدول‌های نتایج عمل‌آوری و اصلاح شرایط مصالح سنگی حفاری شده در بخش‌های مختلف مسیر تونل براساس روش‌های مورد استفاده شامل تخمین نوع و میزان فوم و پلیمرهای موردنیاز در بخش عمل‌آوری مواد حفاری شده ارائه می‌گردد که تلاش در بهینه‌سازی مقادیر فوم با توجه به آزمایش‌ها و استانداردها دارد.

با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه عمل‌آوری مصالح حفاری شده در ماشین‌های EPB، اغلب پژوهش‌ها بر بررسی عملکرد مواد عمل‌آوری یا توسعه مدل‌های پیش‌بینی متمرکز بوده‌اند. تاکنون مطالعه‌ای که فرآیند انتخاب راهکار عمل‌آوری را بر پایه تلفیق نتایج آزمایش‌های زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی و با هدف کاهش مخاطرات زمین‌شناسی در پروژه‌های حفاری مکانیزه ارائه دهد، گزارش نشده است. از این رو، پژوهش حاضر با این رویکرد انجام شده است.

بنابراین، تمرکز این پژوهش بر ارائه یک چارچوب برای انتخاب راهکار مناسب عمل‌آوری بر اساس شرایط زمین‌شناسی و مخاطرات موجود است و معرفی دוגاب آهکی تنها یکی از راهکارهای اجرایی بررسی‌شده در این چارچوب محسوب می‌شود.

۲- پروژه توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران

توسعه جنوبی خط شش مترو تهران با طول حدود ۶۶۰۰ متر از ایستگاه دولت‌آباد در جنوب تهران آغاز شده و پس از عبور از اتوبان امام علی با طی مسیر بلوار بسیج، خیابان غیوری، سه راه ورامین، خیابان فدائیان اسلام به میدان حضرت عبدالعظیم

نتایج نشان می‌دهد که خروجی قابل‌پذیرش با دוגاب پودر سنگ آهک شامل حدود ۷۵ درصد وزنی پودر بدست می‌آید، به گونه‌ای که نفوذپذیری به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد و از جریان آب میان مواد در نقاله مارپیچ جلوگیری می‌کند و مواد حفاری شده دارای یکپارچگی و اصطکاک کافی در نقاله مارپیچ خواهند بود. علاوه بر این، بافت یا ترکیب مواد حفاری شده پایدار خواهد بود تا از تشکیل مواد سست یا افت (Slump) بسیار زیاد روی نوار نقاله جلوگیری کند (Pourhashemi et al., 2018).

هوانگ و همکاران (۲۰۱۹)، به اثر دانه‌بندی ذرات بر ویژگی‌های نفوذپذیری مصالح درشت دانه‌ی عمل‌آوری شده توسط کف برای حفر تونل EPB پرداخته است و اظهار داشته است که تفاوت در ویژگی‌های دانه‌بندی خاک منجر به تفاوت در پارامترهای عمل‌آوری برای برآوردن نیازهای نفوذناپذیرکردن خاک نیز می‌گردد و با تغییر در پارامترهای دانه‌بندی، ظرفیت عمل‌آوری فوم در خاک از بین می‌رود و لازم است از عامل‌های عمل‌آورنده دیگر مانند گل بنتونیت و پلیمر استفاده شود (Huang et al., 2019).

کیم و همکاران (۲۰۲۱)، برای بررسی نحوه کاربرد ماشین‌های EPB در زمین‌گرانی‌های هوازده، یک مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که عمل‌آوری مصالح سنگی فاکتوری کلیدی در افزایش پایداری سینه‌کار تونل و افزایش راندمان استخراج مواد حفاری شده در ماشین EPB است. در این مطالعه مشخص گردید که ماشین EPB در گرانی‌های هوازده (حتی در حالتی که بسیار درشت و غیرچسبنده باشد) با استفاده از ویژگی‌های ذرات خرد شده گرانی‌های هوازده و با به کارگیری دوجاب‌های پلیمری به عنوان عامل عمل‌آوری به همراه فوم، قابل استفاده است (Kim et al., 2021).

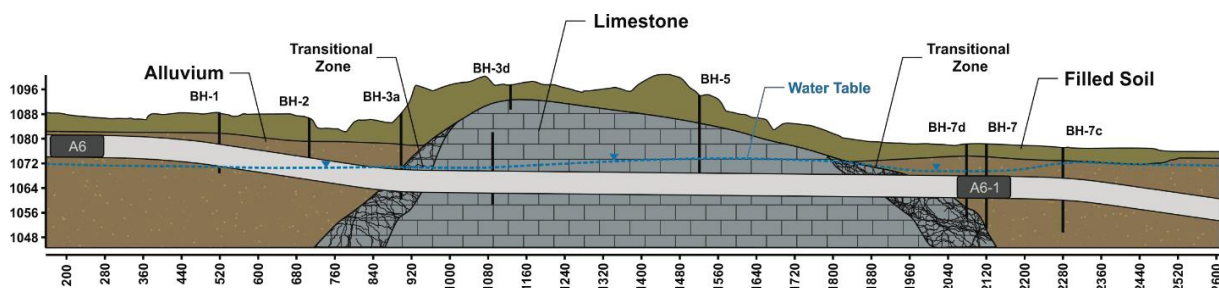
از مجموع این پژوهش‌ها روشن است که در مرحله طراحی و مناقصه و پیش از آغاز به کار ماشین حفار EPB در زمین‌های سنگی، ضروری است که آزمون‌های آزمایشگاهی لازم انجام شود تا امکان عمل‌آوری مصالح کنده شده بررسی شده و تخمین خوبی از مجموعه‌های عمل‌آوری مطلوب ارائه گردد و همچنین لازم است جنبه‌های زیست‌محیطی مربوط به مدیریت مخلوط گل یا مواد حفاری شده‌ی عمل‌آوری شده نیز در نظر گرفته شوند.

در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است.
جدول ۳، مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران را به ۱۵ ناحیه مشخص زمین‌شناسی-ژئوتکنیکی تقسیم کرده است که هر کدام از آنها دربرگیرنده‌ی یک یا چند واحد زمین‌شناسی مهندسی معرفی شده در **جدول ۱** و **جدول ۲** هستند. همچنین در این جدول، شرایط آب‌یرزمینی در هر کدام از ناحیه‌ها مشخص گردیده است.

همان‌گونه که از شکل ۱ پیداست، پایش‌های میدانی و داده‌های گمانه‌های حفر شده نشان دادند مسیر تونل در آغاز حدود ۵۰۰ متر در خاک ریزدانه‌ی منسجم (مساعد برای حفاری تونل با ماشین *EPB*) و سپس در توده‌سنگ آهکی کراتاسه با مقاومت فشاری تک محوری ۷۰ تا ۱۲۰ مگاپاسکال پیشروی می‌کند. در دو سر محدوده‌ی سنگی، زون‌های انتقالی محتمل بود که هوازگی، استحکام و یکپارچگی توده‌سنگ آهکی را کاهش داده است. ضخامت لایه‌بندی در این واحد در بازه ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به ندرت تا حدود ۱۵۰ سانتی‌متر نوسان دارد. براساس طبقه‌بندی‌های موجود، می‌توان آنها را در رده خردشدگی متوسط قرار داد. شرایط ناپیوستگی‌ها به طور عمومی، خوب و سطوح درزه‌ها به ویژه در عمق، با هوازگی کم، بازشدگی و مواد پرکننده اندک و کمی زیر ارزیابی می‌گردد.

و خیابان شهید قمی و در نزدیکی کمربندی ورامین پایان می‌یابد. در مسیر توسعه جنوبی خط ۶، ۴ ایستگاه در تقاطع‌ها و میدان‌های مهم در نظر گرفته شده که با نام‌های A6-1 تا A6-4 نامگذاری شده‌اند. بخش مکانیزه تونل شامل کل مسیر، از ایستگاه A6 آغاز شده و تا ایستگاه A6-4 با طول ۶۶۰۰ متر با دستگاه EPB-TBM حفاری خواهد شد.

۱-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی مسیر
 بررسی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی پروژه نشان داد که مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران از واحدهای مختلف زمین‌شناسی شامل سنگ آهک، رس و نهشته‌های آبرفتی ریزدانه و درشت‌دانه عبور می‌کند. تفاوت ویژگی‌های این واحدها موجب تغییرات قابل توجهی در دانه‌بندی، نفوذپذیری، میزان ریزدانه، سایش و رفتار مصالح حفاری شده گردیده است و در نتیجه، نوع و مقدار مواد عمل‌آوری مورد نیاز در بخش‌های مختلف مسیر نیز متفاوت بوده است. با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل، لایه‌های خاکی در برگیرنده مسیر تونل در چهار واحد (*ET1, ET2, ET3, ET4*) و توده‌های سنگی مسیر نیز در دو واحد (*RT1, RT2*) دسته‌بندی شده‌اند که ویژگی‌های توصیفی و دانه‌بندی این واحدهای خاکی و سنگی



شکل ۱- بخشی از مقطع زمین‌شناسی مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران (با تمرکز بر واحدهای سنگی)

جدول ۱- مشخصات واحدهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی دسته‌بندی شده در مسیر تونل

واحد زمین‌شناسی مهندسی	<i>ET1</i>	<i>ET2</i>	<i>ET3</i>	<i>ET4</i>
توصیف خاک	شن ماسه‌ای و ماسه شنی	ماسه شنی به همراه سیلت و رس	ماسه رسی به همراه شن، رس و سیلت ماسه‌ای	سیلت و رس ماسه‌ای و رس به همراه ماسه
درصد عبوری از الک ۲۰۰	کمتر از ۱۵٪	بین ۱۰ تا ۳۰٪	۳۰ تا ۶۰٪	همواره بیشتر از ۵۰٪
درصد مانده روی الک ۴	کمتر از ۴۵٪	بین ۲۰ تا ۵۰٪	بین ۱۰ تا ۵۰٪	کمتر از ۲۰٪
نوع خاک (برپایه طبقه‌بندی <i>USCS</i>)	<i>GW, GW-GM, GP-GC, SW, SP</i>	<i>SC, SC-SM, GC</i>	<i>SC, SM, CL</i>	<i>CL, ML, CL-ML</i> (به ندرت <i>CH</i>)

جدول ۲- مشخصات واحدهای زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی دسته‌بندی شده در واحدهای سنگی مسیر تونل

ردیف	واحد زمین‌شناسی مهندسی	لیتولوژی	ساختار	مقاومت فشاری تک محوری	شرایط پایداری در تونل
۱	RT1	سنگ آهک	چین خورده، درزه‌دار	۱۰۰-۱۲۰ مگاپاسکال-مقاوم تا خیلی مقاوم-مستحکم	ناپایداری‌های ساختاری موضعی
۲	RT2	سنگ آهک	هوازده و کمی خرد شده	۷۰-۱۰۰ مگاپاسکال-مقاوم	ناپایدار

جدول ۳- ناحیه‌بندی مسیر تونل بر پایه گسترش واحدهای خاکی و سنگی در برگرفته سینه‌کار حفاری

ردیف	جایگاه (متر از)	طول مقطع (m)	واحدهای زمین‌شناسی مهندسی						توضیحات
			ET1	ET2	ET3	ET4	RT1	RT2	
۱	۴۰۰-۰	۴۰۰							خشک
۲	۶۷۰-۴۰۰	۲۷۰							
۳	۷۷۱-۶۷۰	۱۰۱							اشباع
۴	۸۷۹-۷۷۱	۱۰۸							اشباع
۵	۱۷۶۶-۸۷۹	۸۸۷							اشباع
۶	۱۸۸۴-۱۷۶۶	۱۱۸							اشباع
۷	۲۲۳۲-۱۸۸۴	۳۴۸							اشباع
۸	۲۴۵۲-۲۲۳۲	۲۲۰							اشباع
۹	۲۷۱۰-۲۴۵۲	۲۵۸							
۱۰	۴۱۵۹-۲۷۱۰	۱۴۴۹							
۱۱	۵۱۰۵-۴۱۵۹	۹۴۶							خشک
۱۲	۵۳۲۱-۵۱۰۵	۲۱۶							خشک
۱۳	۵۶۶۱-۵۳۲۱	۳۴۰							خشک
۱۴	۵۸۸۰-۵۶۶۱	۲۱۹							خشک
۱۵	۶۶۳۰-۵۸۸۰	۷۵۰							خشک

میکرومتر (۲۰۰#)

- انسداد
- حد بالای نفوذپذیری خاک
- سایش و خوردگی

۳-۱- فقدان ریزدانه (مقدار درصد عبوری از الک ۷۵ میکرومتر)

به طور کلی ماشین EPB برای زمین‌هایی که دارای ذرات ریزدانه قابل توجهی باشند، مناسب‌تر است ولی در عین حال امکان حفاری در زمین‌هایی که درصد خاک ریزدانه در آنها کمتر از ۳۰ درصد نیز باشد، وجود دارد ولی نیاز به تمهیدات خاصی در عمل‌آوری مصالح کنده شده دارد که موضوع این

۳- مخاطرات زمین‌شناسی در خط ۶ متروی تهران

اهمیت شناسایی مخاطرات زمین، مربوط به گزینش استراتژی مناسب برای عمل‌آوری مواد حفر شده در هنگام حفاری با ماشین‌های EPB است. به بیان دیگر، چنانچه رفتار حفارپذیری زمین با ماشین از قبل پیش بینی شده باشد، با اطمینان بیشتری می‌توان درباره‌ی نوع تمهیدات مناسب (مانند انتخاب نوع رفتار فیزیکی فوم، بنتونیت و دیگر افزودنی‌ها) جهت تغییر شرایط و پارامترهای زمین تصمیم گرفت. با توجه به آنچه که گفته شد، مخاطرات محتمل زمین‌شناسی که روی عمل‌آوری شرایط مصالح حفر شده مؤثر است، موارد زیر را در بر می‌گیرد:

- نبود ریزدانه یا کمبود آن (درصد عبوری از الک ۷۵

مقاله است. با توجه به آنچه گفته شد، بخش‌هایی از مسیر تونل که در آنها مقدار درصد ریزدانه خاک (عبوری از الک #۲۰۰) کمتر از ۳۰ درصد باشد، به عنوان توزیع مکانی یکی از شرایط خاص زمین‌شناسی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده روی سنگ آهک و سنگ مارن، ریزدانه تولید شده در آهک، تاثیر خاصی روی عمل‌آوری مصالح نخواهد داشت، به این معنی که شرکت موثری در عمل‌آوری مواد کنده شده ندارد، در حالی که ریزدانه تولید شده در سنگ مارن که بیش از ۵۰ درصد آن را رس تشکیل داده است، به صورت موثری در فرآیند عمل‌آوری مصالح حفر شده شرکت می‌کند. بنابر نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که حضور رس در فرآیند عمل‌آوری تعیین کننده است.

در شکل ۲ تغییرات مکانی مقدار ریزدانه (درصد عبوری از الک ۲۰۰) در مسیر پروژه نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، در مترهای ۵۰۰ تا ۶۵۰ (پیش از ورود به واحد سنگی) و ۱۸۵۰ تا ۲۱۰۰ تونل (پس از گذر از واحد سنگی)، لایه‌های حفر شده با کمترین مقادیر پارامتر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در مقطع تونل همراه می‌باشند.

۲-۳- انسداد

در تونل‌هایی که ماشین حفاری تونل برای حفاری خاک‌های چسبنده به کار گرفته می‌شود، همواره خطر انسداد، ماشین را تهدید می‌نماید. در چنین زمین‌هایی چسبندگی رس به سطوح فلزی ماشین سبب کاهش بهره‌وری ماشین می‌گردد. که می‌توان از افزودنی‌های مناسب (مانند کف، پلیمر و فیلر) برای عمل‌آوری مصالح حفر شده استفاده کرد تا چسبندگی آن را کاهش یابد (Bakhshandeh Amnieh et al., 2016). در این مطالعات برای ارزیابی خطر کلاگینگ از روش توز و هولمان استفاده شده است (Thewes & Hollmann, 2016).

در شکل ۳، توزیع مکانی رفتار انسداد برای لایه‌های خاکی مسیر تونل نشان داده شده است. با توجه به آنچه که در این شکل نشان داده شده است، حدود ۵ درصد از خاک‌های مسیر در محدوده خطر انسداد کم (little clogging)، ۵۰ درصد در محدوده خطر متوسط (medium clogging)، ۳۵ درصد در محدوده خطر زیاد (Strong clogging)

(clogging) و ۱۰ درصد از خاک‌های مسیر نیز میل به رفتار کلوخه شدن (Lumps) دارند.

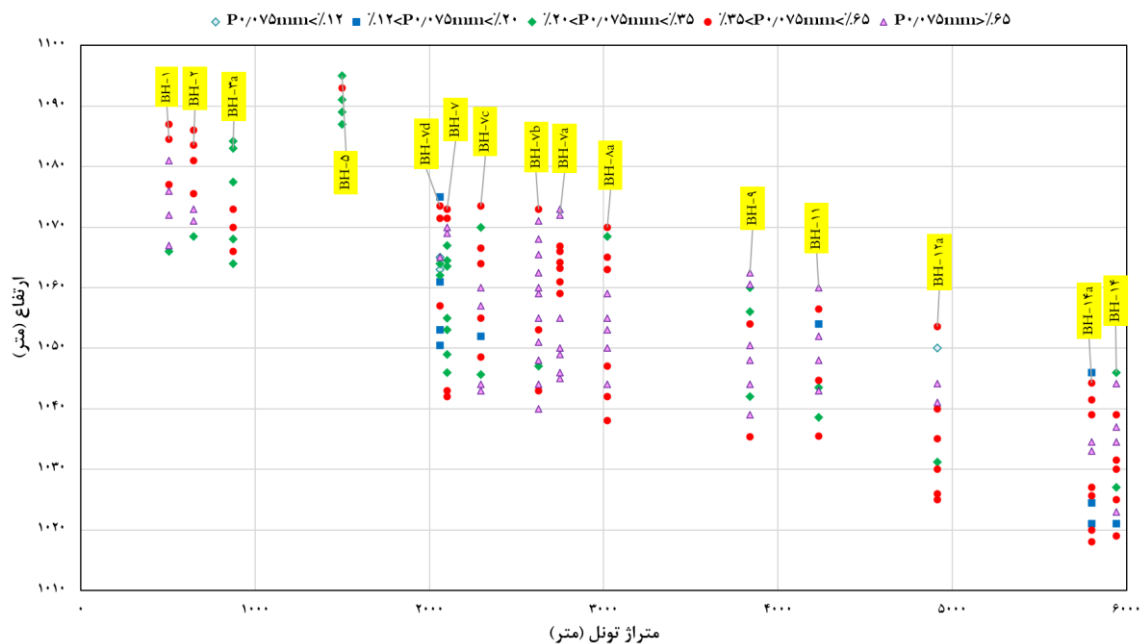
همان‌گونه که در کارهای توز به آن اشاره شده است، این خاک‌ها پتانسیل این را دارند که با افزایش رطوبت در سینه‌کار (به علت تزریق آب در سینه کار) از محدوده خطر متوسط یا کم به محدوده خطر بالا منتقل شوند. به عبارت دیگر با تغییر رطوبت، نقاط می‌توانند بر روی خطوط شاخص خمیری ($Plasticity Index (I_p)$) جایجا شوند (Thewes & Hollmann, 2016). لازم به توضیح است که دلیل افزایش رطوبت می‌تواند تزریق آب یا افزودنی‌های دیگر در حین حفاری باشد. بنابراین به هنگام اجرای تونل و حفاری با ماشین EPB در این خاک‌ها باید دقت لازم صورت گیرد که حجم آب اضافه شده به سینه کار و اتاقک فشار به گونه‌ای باشد که در محدوده بحرانی قرار نگیرند.

توصیه‌های کلی برای بهبود عملکرد ماشین EPB در هر یک از رده‌بندی‌های یاد شده به در موارد زیر خلاصه می‌شود:

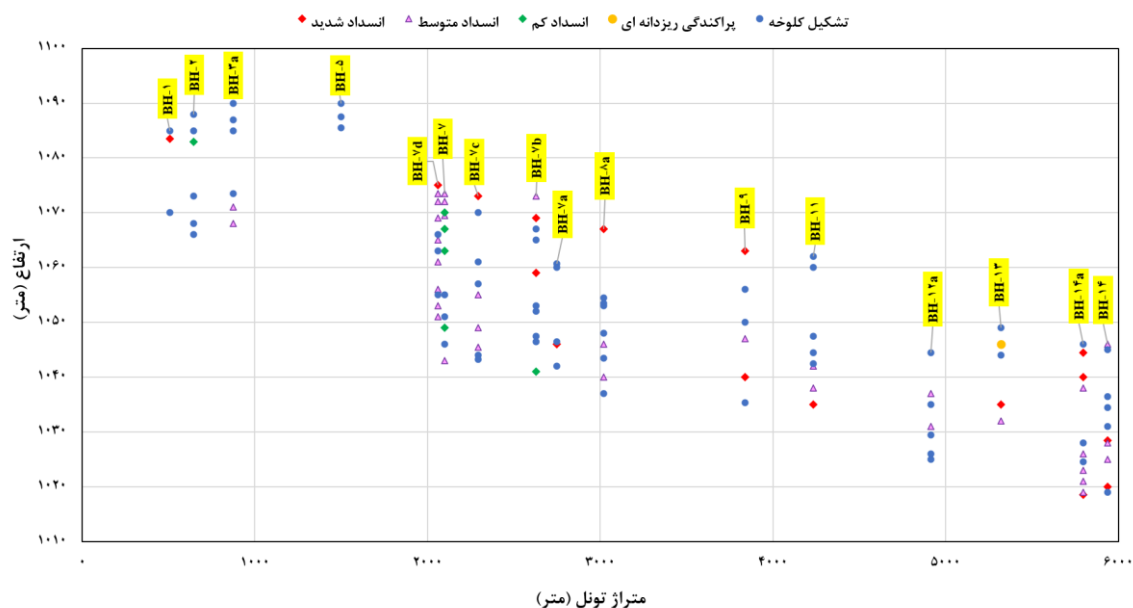
۱- خاک‌هایی با پتانسیل انسداد بالا در طی حفاری منجر به مشکلات اساسی و قابل توجهی خواهند شد و نیاز به عملیات پاکسازی روزانه در محدوده اتاقک و پره‌های کله حفر (cutterhead) خواهند داشت.

با توجه به شرایط زمین‌شناسی و ویژگی‌های مصالح حفاری‌شده، استفاده از فوم با غلظت (C_f): Foam (Concentration)، نسبت انبساط (FER): foam (expansion ratio) و نسبت تزریق (FIR): foam injection (ratio) مناسب توصیه می‌شود. براساس دستورالعمل‌ها و مطالعات منتشرشده، C_f معمولاً در محدوده ۰/۵ تا ۵ درصد، FER در محدوده ۵ تا ۳۰ (و در بسیاری از پروژه‌ها حدود ۱۰ تا ۱۵) و FIR غالباً در محدوده ۳۰ تا ۶۰ درصد انتخاب می‌شود. با این حال، انتخاب مقادیر نهایی این پارامترها باید براساس ویژگی‌های ژئوتکنیکی مصالح حفاری‌شده، شرایط آب زیرزمینی و نتایج آزمون‌های عمل‌آوری انجام گیرد (Merritt, 2015) (EFNARC, 2005).

۲- در زمان حفاری در خاک‌های با پتانسیل انسداد کم تا متوسط نباید تغییر زیادی در درصد رطوبت خاک صورت پذیرد، یعنی نباید آب اضافی به سینه کار تزریق شود، چون بلافاصله به خاک‌های با پتانسیل انسداد بالا تبدیل می‌شوند.



شکل ۲- تغییرات مکانی مقدار ریزدانه (درصد عبوری از الک ۲۰۰) در مسیر پروژه



شکل ۳- توزیع مکانی خطر انسداد در زمین‌های مسیر تونل خط ۶

است. یک خاک ایده‌آل برای ماشین *EPB* خاکی است که پس از حفاری و ورود به اتاقک فشار تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به سینه کار گردد و

۳-۳- نفوذپذیری مواد حفاری شده

نفوذپذیری مصالح حفر شده یکی از پارامترهای بسیار مهم در کنترل عملکرد ماشین در طی حفاری در زیر سطح ایستابی

منجر خواهد شد.

به طور کلی در بخش توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران به سبب اینکه در بیشتر مسیر، خاک تشکیل دهنده سینه کار از آبرفت درشت دانه تشکیل شده، لذا خطر ساینده‌گی و فرسوده شدن ابزار حفاری یکی از مهمترین مخاطرات حفاری بوده است. با توجه به زاویه‌دار بودن مصالح، ابعاد ذرات و درصد رد شده از الک ۲۰۰، به نظر می‌رسد که در برخی از مترژهای تونل خطر سایش و خوردگی ابزار و قطعات کله حفار بیشتر از بخش‌های دیگر باشد. برای واحدهای سنگی نیز در مرحله مطالعات تعداد ۴ آزمون سرشار (ASTM, 2010) بر روی نمونه‌های سنگ آهک برداشت شده از گمانه‌ها انجام شد که مقدار پارامتر شاخص سرشار در این آزمون‌ها بین ۱/۹۶ تا ۳/۹۸ به دست آمده است که در رده سنگ‌های خیلی ساینده یا نزدیک به آن قرار می‌گیرند.

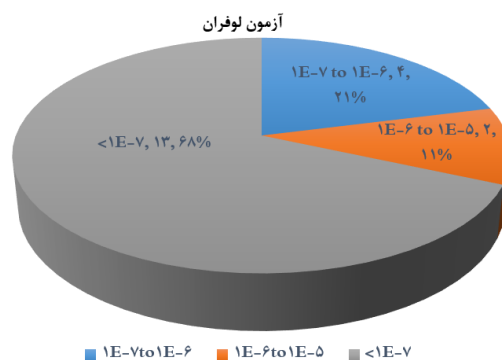
۴- انجام عمل آوری بهینه در سنگ‌های موجود در مسیر حفر تونل با ماشین‌های EPB راهکار مقابله با مخاطرات

توده سنگ در برگیرنده سینه کار پس از حفاری توسط دستگاه EPB به صورت ذرات درشت و ریز در اتاقک ریخته می‌شود. توزیع دانه‌بندی ذرات تأثیر قابل توجهی بر قابلیت مناسب عمل آوری خاک یا توده سنگ خرد شده دارند. شکل ۵ محدوده توزیع دانه‌بندی مصالح حفاری شده در مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران را نشان می‌دهد. برای تهیه این شکل، از مصالح حفاری شده در بخش‌های مختلف مسیر نمونه‌برداری انجام شد. سپس آزمایش دانه‌بندی با استفاده از مجموعه الک‌های استاندارد با اندازه‌های ۲۵/۴، ۱۹/۰۵، ۹/۵۳، ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۰/۱۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌متر روی نمونه‌ها انجام گرفت. حدود اندازه ذرات براساس سیستم طبقه‌بندی یکپارچه خاک (USCS) در نظر گرفته شد و برای هر نمونه، منحنی دانه‌بندی ترسیم گردید. در پایان، کران بالا و کران پایین منحنی‌های دانه‌بندی حاصل از تمامی نمونه‌ها تعیین و به صورت محدوده توزیع دانه‌بندی در ارائه شد؛ به گونه‌ای که منحنی دانه‌بندی هر یک از نمونه‌های برداشت شده در این محدوده قرار می‌گیرد.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد ۵ تا ۵۰ درصد ذرات دارای قطری کمتر از 1 mm هستند که مقدار آن

دارای نفوذپذیری کم باشد که از زهکش شدن آب زیرزمینی جلوگیری کند و به آب‌بند نمودن محیط اتاقک فشار کمک کند. بر پایه‌ی تحقیقات و تجربیات موجود، نفوذپذیری مناسب برای ماشین EPB کمتر از 10×10^{-5} متر بر ثانیه است (Budach & Thewes, 2015) و چنانچه در زمین‌هایی مقدار نفوذپذیری بیشتر از آن باشد باید با انجام عمل آوری بهینه، مقدار نفوذپذیری را کاهش داد تا بدین وسیله از جریان آب زیرزمینی به داخل نقاله ماریچ جلوگیری گردد.

به منظور تعیین هدایت هیدرولیکی درجا واحدهای خاکی واقع در مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران، تعداد ۱۹ آزمون نفوذپذیری لفران انجام شد. معرفی آزمون و تحلیل نتایج آن براساس استاندارد آزمون لفران (ISO, 2012) (SCC, 2014) صورت گرفته است. نتایج بدست آمده از آزمون‌های لوفران به ۳ گروه تقسیم گردید که درصد فراوانی هر یک از آنها در نمودار شکل ۴، نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل، عمدتاً دارای ضریب نفوذپذیری کمتر از $m/sec \times 10^{-07}$ هستند که شرایط ایده آلی برای حفاری با ماشین EPB است.



شکل ۴- درصد فراوانی تغییرات نفوذپذیری زمین

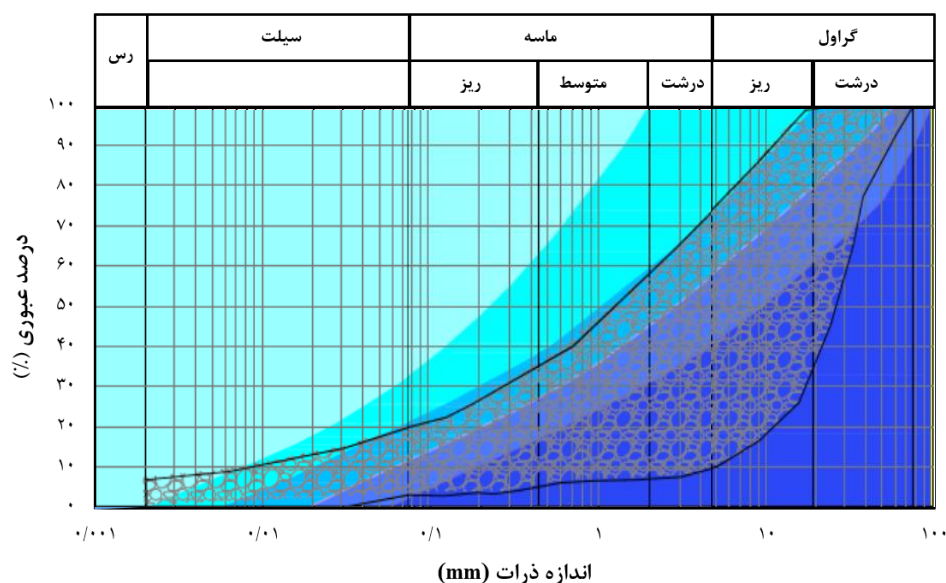
۳-۴- سایش (Abrasion) و خوردگی

تأثیر خاک‌های ساینده بر روی ماشین به صورت سایش اولیه و ثانویه تعریف می‌گردد. منظور از سایش اولیه، ساینده‌گی و فرسایش ابزار و سطوح حفاری از قبیل تیغه‌ای یا مته‌ای، دیسک کاتر و اسکریپر یا خراشنده است. از سوی دیگر، سایش ثانویه وقتی رخ خواهد داد که سایش اولیه بیش از اندازه گسترش یابد که در نهایت به ساینده‌گی سازه‌هایی که برای نگهداشتن یا پشتیبانی ابزارهای حفاری طراحی شده‌اند،

شده‌ی موجود در اتاقک فشار تامین می‌گردد که در حین ورود به اتاقک عمل‌آوری می‌شود. بنابراین اصلاح دانه‌بندی خاک باید در اتاقک فشار صورت گیرد تا قابلیت تأمین فشار در این محل افزایش یابد. بدین منظور برای رسیدن به یک توزیع مناسب دانه‌بندی و ایجاد یک مخلوط همگن در اتاقک فشار که توانایی انتقال فشار به سینه‌کار را داشته باشد، باید علاوه بر اینکه دانه‌بندی خاک پس از حفاری به دقت مشخص گردد، اثر عوامل عمل‌آوری خاک مانند فوم و پلیمرهایی که باعث تغییر در توزیع دانه‌بندی می‌گردد نیز مورد توجه و بررسی قرار گیرد.

در تشکیل رفتار پالپی و انتقال ذرات بزرگ نقش دارد. مقدار درصد ریزدانه خاک (عبوری از الک ۲۰۰) در بیشترین مقدار خود کمتر از ۲۰ درصد است که این مقدار خصوصاً در صورت مواجهه با آب برای تراکم‌پذیری، نفوذناپذیری و انتقال بهینه مصالح به بیرون از ماشین *EPB* و تشکیل مواد خمیری در اتاقک فشار مناسب نبوده و نیازمند تزریق مواد ریزدانه یا مواد پرکننده (*filler*) است.

پرکننده‌ها که معمولاً شامل ماسه‌های ریز و سنگ آهک خرد شده (پودر) است، دارای اثر تعدیلی بر توزیع دانه‌بندی مصالح برجا و کاهش ناهمگنی مصالح کنده شده در اتاقک حفاری است. فشار نگهداری سینه‌کار توسط مصالح کنده



شکل ۵- توزیع دانه‌بندی سنگ در حفاری با دستگاه EPB

خمیری مطلوب کافی نباشد و خطرات جداسازی حتی با به کارگیری فوم با ثبات نیز همچنان باقی بماند. پلیمرهای مختلف را می‌توان با تکنولوژی فوم برای کنترل جداسازی و بهبود حالت خمیری و جذب آب در ماتریس خاک و کاهش اسلامپ ترکیب کرد. با این حال، اگر محتوای ذرات دانه‌ریز کمتر از ۲۰٪ باشد، این ماده نیز کارساز نبوده و تزریق ذرات دانه‌ریز اضافی در اتاقک حفاری نیاز خواهد بود؛ زیرا در غیر این صورت به افزودن پلیمر زیادی برای رسیدن به خمیری مطلوب نیاز است که عملاً این پروسه را غیر اقتصادی خواهد کرد. افزودن ذرات دانه‌ریز به همراه فوم و پلیمر می‌تواند یک

در برخی موارد از پرکننده‌ها به منظور بهبود کیفیت زمین و اصلاح دانه‌بندی مصالح حفر شده موجود در اتاقک حفاری با اضافه کردن مصالح ریزدانه با ابعاد مشخص (که در دانه بندی مصالح برجا موجود نیست) استفاده می‌گردد. برای نمونه، برای رسیدن به یک توزیع مناسب در مصالح حفاری شده و جلوگیری از ورود آب به نقاله مارپیچ، نسبت مطلوب مصالح ریزدانه (کوچکتر از ۷۵ میکرون) در مواد کنده شده موجود در اتاقک حفاری باید حداقل ۲۰٪ باشد.

در خاک‌ها و توده‌های سنگی با ذرات دانه‌ریز پایین، به کارگیری فوم، به تنهایی ممکن است برای تأمین مصالح

راه حل مقرون به صرفه باشد. افزودن ذرات دانه ریز، ویژگی‌های مصالح کنده شده در اتاقک فشار را تغییر داده و انسجام و پلاستیسیته (چسبندگی) بهینه مصالح کنده شده را فراهم می‌کند.

این موضوع با استفاده از دوغاب بنتونیت عملی می‌گردد. همچنین در خط ۶ متروی تهران از یک جایگزین مناسب برای دوغاب بنتونیت استفاده گردید که نتایج خوبی را نیز در بر داشت، این جایگزین دوغاب سنگ آهک با دانسیته بالا (*High Density Lime Slurry: HDLS*) است که مزایای بیشتری نسبت به بنتونیت دارد که از جمله آن امکان دستیابی به چگالی بالاتر از دوغاب بنتونیت است؛ همچنین دوغاب *HDLS* مقرون به صرفه‌تر بوده و به اقدامات ویژه‌ای که برای حمل و بازیابی بنتونیت لازم است، نیازی ندارد (*Pourhashemi et al., 2018*).

دوغاب *HDSL*، متشکل از حدود ۷۰٪-۵۰٪ وزنی پودر سنگ آهک است که برای یکنواختی بهتر دوغاب با یک روانساز ترکیب شده و مخلوطی با پلاستیسیته بهتری را تشکیل می‌دهد که به منظور انجام عمل‌آوری مصالح حفر شده، به درون اتاقک فشار ماشین *EPB* انتقال داده می‌شود. باید به این نکته اشاره گردد که درصد بالای آهک ممکن است باعث گرفتگی خطوط انتقال شود.

با استفاده از این روش، مصالح حفاری شده در اتاقک فشار با دوغاب آهک با دانسیته بالا به منظور افزایش محتوای ذرات ریزدانه و با پلیمر به منظور ایجاد حالت خمیری مناسب و جلوگیری از انسداد عمل‌آوری می‌شوند. در نتیجه، مصالح عمل‌آوری شده از قوام مناسب برخوردار بوده و نفوذپذیری آن‌ها در نقاله مارپیچ به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. مصالح حفاری شده دارای انسجام و اصطکاک کافی برای تشکیل پلاگ برای مقاومت در برابر فشار اتاقک حفاری در نقاله مارپیچ خواهد بود، بدون اینکه دچار لغزش گردد. بافت مصالح حفاری پایدار است و انسجام کافی برای جلوگیری از ایجاد روانی بیش از حد مواد عمل‌آوری شده را ایجاد می‌کند و میزان اسلامپ مصالح روی نوار نقاله یا محل خروج مصالح نیز در حالت بهینه قرار خواهد گرفت.

به طور کلی، در صورت نیاز به عمل‌آوری، نسبت وزنی تزریق دوغاب آهک با دانسیته بالا بر اساس مشاهده رفتار مصالح در نقطه تخلیه نقاله مارپیچ کنترل گردید؛ به گونه‌ای

که این نسبت با توجه به ویژگی‌های مصالح حفاری شده متغیر بوده و در بازه ۱۰ تا ۴۰ درصد قرار داشت. همچنین قوام مصالح عمل‌آوری شده با استفاده از آزمون اسلامپ ارزیابی شد؛ به طوری که اسلامپ هدف در محدوده ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متر قرار داشت. علاوه بر این، با توجه به اهمیت کنترل آب در فرآیند عمل‌آوری، توجه ویژه‌ای به نحوه نگهداشت آب در ماتریس مصالح حفاری شده معطوف گردید.

۵- نتیجه‌گیری

اهمیت شناسایی مخاطرات زمین، مربوط به گزینش استراتژی مناسب برای عمل‌آوری مواد حفر شده در هنگام حفاری با ماشین‌های *EPB* است. به بیان دیگر، چنانچه رفتار حفرپذیری زمین با ماشین از قبل پیش بینی شده باشد، با اطمینان بیشتری می‌توان درباره‌ی نوع تمهیدات مناسب (مانند انتخاب نوع رفتار فیزیکی فوم، بنتونیت و دیگر افزودنی‌ها) جهت تغییر شرایط و پارامترهای زمین تصمیم گرفت. نتایج بدست آمده درباره مخاطراتی همچون نبود یا کمبود مواد ریزدانه، انسداد، نفوذپذیری و سایش در مصالح حفر شده به شرح زیر است:

۱- در مترهاژ های ۵۰۰ تا ۶۵۰ (پیش از ورود به واحد سنگی) و ۱۸۵۰ تا ۲۱۰۰ تونل (پس از گذر از واحد سنگی)، میزان ریزدانه لایه‌های حفر شده با کمترین مقادیر پارامتر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در مقطع تونل همراه باشند. مقدار درصد ریزدانه مصالح حفر شده در مسیر توسعه جنوبی خط ۶ متروی تهران در بیشترین مقدار خود کمتر از ۲۰ درصد است که این مقدار خصوصا در صورت مواجهه با آب برای تراکم‌پذیری، نفوذناپذیری و انتقال بهینه مصالح به بیرون از ماشین *EPB* و تشکیل مواد خمیری در اتاقک فشار مناسب نبود، بنابراین تزریق مواد ریزدانه یا مواد پرکننده به مصالح حفر شده صورت گرفت.

افزایش محتوای ذرات دانه ریز مصالح حفاری شده به همراه استفاده از فوم و پلیمر، راهکاری مؤثر و اقتصادی برای بهبود عملکرد ماشین‌های *EPB* در مسیر پروژه بود. در این پژوهش، به جای دوغاب بنتونیت از دوغاب آهک با دانسیته بالا استفاده شد که مزایایی از جمله امکان دستیابی به چگالی بالاتر، کاهش هزینه‌ها و عدم نیاز به تجهیزات ویژه برای حمل و بازیابی را به همراه داشت. نتایج پژوهش نشان داد که

ایده آلی برای حفاری با ماشین EPB است.
۴- نتایج آزمون سرشار انجام شده روی واحدهای سنگی (نمونه‌های سنگ آهک برداشت شده از گمانه‌ها) تعیین گردید که شاخص سرشار در این آزمون‌ها بین ۱/۹۶ تا ۳/۹۸ به دست آمد که در رده سنگ‌های خیلی ساینده یا نزدیک به آن قرار می‌گیرند.

۶- سپاس‌گزاری

نویسندگان از یاری و همکاری دکتر یاور فیروزه‌ای در طراحی آزمایش‌ها و مهندس مریم پاشازاده در گردآوری داده‌ها نهایت سپاس‌گزاری را دارند.

استفاده از دوغاب آهک با غلظت ۵۰ تا ۷۰ درصد وزنی پودر سنگ آهک و نسبت تزریق ۱۰ تا ۴۰ درصد، متناسب با ویژگی‌های مصالح حفاری‌شده، شرایط مناسب عمل‌آوری را فراهم می‌کند. همچنین، دستیابی به اسلامپ هدف در محدوده ۱۵ تا ۲۲ سانتی‌متر، شاخص مناسبی برای کنترل قوام مصالح عمل‌آوری‌شده در حین حفاری بود.

۲- حدود ۵ درصد از خاک‌های مسیر در محدوده خطر انسداد کم، ۵۰ درصد در محدوده خطر متوسط، ۳۵ درصد در محدوده خطر زیاد و ۱۰ درصد از خاک‌های مسیر نیز میل به رفتار کلوخه شدن دارند.

۳- نتایج حاصل از آزمون‌های نفوذپذیری لوفران نشانگر نفوذپذیری بسیار پایین ۰/۶۸٪ از واحدهای خاکی تشکیل دهنده مسیر تونل، (کمتر از $10 e^{-07} m/sec$) بود که شرایط

۷- مراجع

- ASTM. (2010). D762510: Standard test method for laboratory determination of abrasiveness of rock using the CERCHAR method. *Philadelphia: American Society for Testing and Materials*.
- Bakhshandeh, H. A., & Zamzam, M. (2016). Geological Hazards analysis in Urban Tunneling by EPB Machine (Case study: Tehran subway line 7 tunnel). *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50(1), 23-36. Retrieved from https://ijmge.ut.ac.ir/article_57306_4e76f7cacd4208de43dde1ea877a6c74.pdf.
- Budach, C., & Thewes, M. (2015). Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research. *Tunnelling and Underground Space Technology*(50), 296-304. doi:10.1016/j.tust.2015.08.006.
- EFNARC. (2005). Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock. *Recommendation of European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products for Structures*.
- Huang, S., Wang, S., Xu, C., Shi, Y., & 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*(23), 4662-4674. doi:10.1007/s12205-019-0717-7.
- ISO. (2012). Geotechnical Investigation and Testing–Geohydraulic Testing–Part 2: Water Permeability Tests in a Borehole Using Open Systems. Vernier (Geneva), Switzerland: ISO 22282-2.
- Kim, T.-H., Lee, I.-M., Chung, H.-Y., Park, J.-J., & Ryu, Y.-M. (2021). Application ranges of EPB shield TBM in weathered granite soil: a laboratory scale study. *Applied Sciences*, 7(11), 2995. doi:10.3390/app11072995.
- Merritt, A. (2015). Soil conditioning for EPB tunnelling: some examples of laboratory testing and field

- monitoring. *Crossrail Project: Infrastructure Design and Construction*, 2, 159-170.
- Peila, D. (2014). Soil conditioning for EPB shield tunnelling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (18), 831-836. doi:10.1007/s12205-014-0023-3.
- Peila, D., Picchio, A., & Chiere, A. (2013). Earth pressure balance tunnelling in rock masses: Laboratory feasibility study of the conditioning process. *Tunnelling and Underground Space Technology* (35), 55-66. doi:10.1016/j.tust.2.
- Pourhashemi, M., Azali, S., Amiri, A., & Khorasani, E. (2018). Rock Conditioning in EPB-Tunneling, Case Study: Southern Extension of Tehran Metro Line 6. ITA: *International Tunnelling and Underground Space Association*, (pp. 1-7). Dubai, UAE.
- SCC. (2014). Soils–Determination of Permeability by the Lefranc Method. Ottawa, Ontario K1P 6N7, CANADA: Standards Council of Canada (SCC).
- Taherkhani, H., Hassanpour, J., Bakhshandeh Amnieh, H., Khorasani, E., & Rostami, J. (2025). Investigating the role of bentonite on the conditioning of muck during tunneling through marly limestone with EPB machines. *Canadian Geotechnical Journal* (62), 1-18. doi:10.1139/cgj-2024-0773.
- Taherkhani, H., Hassanpour, J., Bakhshandeh Amnieh, H., Khorasani, E., Rostami, J., & Saheb, A. (2025). GEP-Based Prediction of Workability of Conditioned Marly Limestone in EPB Machine Chambers. *Geotechnical and Geological Engineering*, 8(43), 1-22. doi:10.1007/s10706-025-03370-1.
- Thewes, M., & Hollmann, F. (2016). Assessment of clay soils and clay-rich rock for clogging of TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology* (57), 122-128. doi:10.1016/j.tust.2016.01.010.
- Wittke, W., Erichsen, C., & Gattermann, J. (2007). Conditioning of the intact rock. In W. e. Wittke, In: W. 6. V. G. G. E. *Geotechnik in Forschung und Praxis*, ed. Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. (pp. 250-264). Aachen: Translated from the German edition: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe.
- Ye, X., Wang, S., Yang, J., Yang, J., Sheng, D., & Xiao, C. (2017). Soil conditioning for EPB shield tunneling in argillaceous siltstone with high content of clay minerals: Case study. *International Journal of Geomechanics* (17(4)), 05016002: 1-8. doi:10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000791.

Conditioning as a strategy for mitigating ground-related hazards in EPB tunnelling: A case study of the southern extension of Tehran Metro Line 6

Hamidreza Taherkhani¹, Hasan Bakhshandeh Amnieh^{2*}, Jafar Hasanpour³, Emad Khorasani⁴

1- PhD graduated; Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, hamidr.taherkhani@ut.ac.ir

2- Associate Professor; Faculty of Mining Engineering, University of Tehran, hbakhshandeh@ut.ac.ir

3- Associate Professor; Faculty of Geology, University of Tehran, hassanpour@ut.ac.ir

4- Ph.D. in Mining Engineering (Rock Mechanics); Tehran and Suburbs Metro Operation Company, Management of Tehran Metro Line 6, emad.khorasani@yahoo.com

Received: 22 May 2026; Accepted: 13 Aug 2026
DOI: 10.22044/tuse.2026.17726.1510

Keywords	Extended Abstract
Rock/Soil conditioning Fine particles Clogging Permeability Abrasion	Summary Recent technological advances have enabled earth pressure balance (EPB) tunnel boring machines to excavate coarse-grained soils and rock formations successfully. However, their performance strongly depends on effective material conditioning. This study investigates the main ground-related hazards encountered during excavation of the southern extension of Tehran Metro Line 6, and evaluates a conditioning strategy to mitigate these challenges. Geological observations, laboratory testing, and field investigations were conducted to characterize ground conditions. The results show that conditioning with high-density lime slurry, fillers, and polymers improves material consistency, reduces permeability and abrasive effects, and enhances EPB tunnelling performance.

Introduction

EPB tunnelling in heterogeneous grounds is frequently affected by insufficient fines, clogging, excessive permeability, and high abrasivity, all of which reduce excavation efficiency and operational stability. Proper conditioning of excavated materials is therefore essential to maintain face support, chamber pressure, and spoil transportation. This study evaluates conditioning as a practical approach for improving EPB performance under the complex geological conditions of the southern extension of Tehran Metro Line 6.

Methodology and Approaches

Geological, geotechnical, and geomechanical investigations were carried out to characterize lithological units and evaluate grain-size distribution, clogging potential, permeability, and abrasivity. Based on these results, excavated materials inside the EPB pressure chamber were conditioned using high-density lime slurry, fillers, and polymers. Lime slurry containing 50–70 weight percent limestone powder was injected at ratios of 10–40%, depending on material characteristics. Conditioning performance was assessed through changes in consistency, workability, permeability, and abrasivity.

Results and Conclusions

Approximately 5% of the tunnel alignment exhibited low clogging potential, 50% moderate clogging

potential, 35% high clogging potential, and nearly 10% showed a tendency toward clumping behavior. Tunnel sections between chainages 500–650 m and 1850–2100 m contained the lowest percentage of particles passing the 0.075 mm sieve. About 68% of the investigated ground units had permeability values below 1×10^{-7} m/s, indicating favorable conditions for EPB excavation. The Cerchar abrasivity index, ranging from 1.96 to 3.98, implied nearly highly abrasive to highly abrasive ground. Conditioning increased the fine-particle content, improved material consistency, and reduced permeability and abrasive effects within the screw conveyor. Optimal performance was achieved using lime slurry containing 50–70 weight percent limestone powder with injection ratios of 10–40%, producing a target slump of 15–22 cm for efficient EPB tunnelling.
