tuse.shahroodut.ac.ir

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)

دوره‌ی ۴- شماره‌ی ۲/زمستان ۱۳۹۴

ارزیابی سایش ابزار برشی در تونل‌سازی مکانیزه در زمین‌های نرم- مطالعه موردی: تونل قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران

یادداشت فنی

صادق آمون[1*]؛ مصطفی شریف‌زاده[2]؛ کورش شهریار[3]؛ صادق طریق ازلی[4]

۱- دانش‌آموخته‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی مکانیک سنگ؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، مؤسسه مهندسین مشاور ایمن‌سازان

۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، دانشگاه کرتین استرالیا

۳- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۴- دکتری زمین‌شناسی مهندسی؛ دانشگاه فردوسی مشهد، مؤسسه مهندسین مشاور ساحل

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۰۵/۰۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۴/۱۲/۲۴

واژگان کلیدی

سایش

ابزار برشی

EPB

ساینده‌گی

پارامترهای راهبری ماشین

خط ۷ متروی تهران

چکیده

سایش ابزارهای برش و دیگر اجزای ماشین حفر تونل فشار تعادلی زمین (*EPB-TBM*) که در تماس با مصالح برجا و حفاری شده هستند یکی از فاکتورهای مهم در تونلسازی مکانیزه در زمین‌های نرم است. در ماشن‌های *EPB*، بازرسی کله‌حفار ماشین و تعمیر و نگهداری ابزارهای برش تحت شرایط پرفشار یا هایپرباریک انجام می شود که یک فرآیند زمان‌بر، خطرناک و پرهزینه است و باعث ایجاد تأخیر در فرآیند حفاری و کاهش ضریب بهره‌وری عملیات تونلسازی می‌شود. در این مطالعه، سایش ابزارهای برش ماشین حفار خط ۷ متروی تهران در طول ۶۵۰۰ متر ابتدایی مسیر تونل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این مسافت از تونل، تعداد ۱۱۶۹ ابزار برش مصرف شده است که از این تعداد ۶۵۴ عدد ریپر، ۳۵۷ عدد اسکریپر و ۱۵۳ عدد دیسک است. در این مقاله تأثیر فاکتورهای زمین‌شناسی و اپراتوری ماشین روی سایش ابزارهای برش به‌صورت کمی و با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش فشار زمین، نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار، مصرف ابزارهای برش به‌طور مشخص افزایش می‌یابد. همچنین، بهسازی خاک نقش کلیدی در کنترل سایش ابزارهای برش بازی می‌کند؛ به‌طوری‌که حتی در خاک‌های دانه‌درشت می‌توان با بهبود فاکتورهای بهسازی خاک، سایش ابزارهای برش را کاهش داد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به نیاز به گسترش شبکه‌های مترو و راه‌های ارتباطی در شهرهای پرجمعیت و بزرگ، همچنین محدودیت‌های نواحی شهری، استفاده از روش‌های مکانیزه تونلسازی در نواحی شهری اجتناب‌ناپذیر است. تونلسازی تمام مقطع با *TBM*، روشی پرکاربرد و شناخته شده برای حفر تونل است که امروزه ۸۰-۶۰ درصد تونل‌های طویل در جهان با *TBM*ها حفر می‌شوند. بر اساس گزارش ارائه شده توسط *Home, 2010*، تقریباً از تعداد ۳۵۰ دستگاه ماشین *EPB* در سراسر جهان استفاده شده است. این ماشین‌ها با محدوده وسیعی از شرایط زمین‌شناسی و مخاطرات مواجه هستند. یکی از بحرانی‌ترین این شرایط، رویارویی ماشین حفار با خاک‌های ساینده و به دنبال آن سایش بیش از اندازه روی ابزارهای برش و کله‌حفار ماشین است که در بسیاری از پروژه‌های تونلسازی با ماشین *EPB* در سراسر جهان گزارش شده است (*Azali & Moammeri, 2012*) و (*Amoun, et*

* تهران؛ بلوار شهید اشرفی اصفهانی؛ بالاتراز پل حکیم؛ خیابان شهیدآیت ا... صدوقی شرقی شماره ۵؛ مؤسسه مهندسین مشاور ایمن‌سازان؛ تلفن: ۴۴۲۳۴۲۶۱-۰۲۱ نمابر: ۴۴۲۳۴۲۳۰ کدپستی: ۱۴۶۱۹۳۴۳۶۱؛ رایانامه: Sadegh.mine87@aut.ac.ir

al., 2015)

از آن‌جایی که در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های *EPB*، پایدارسازی جبهه‌کار با فشار بیش از اتمسفر انجام می‌شود، عملیات بازدید و تعویض ابزار برشی در این شرایط را به نام عملیات هایپرباریک تعریف می‌کنند. عملیات هایپرباریک طی چهار مرحلهِ ساخت دوغاب بنتونیت، تخلیه اتاقک حفاری از خاک و تزریق دوغاب بنتونیت، تخلیه اتاقک حفاری از بنتونیت و جایگزینی هوای فشرده و انجام عملیات در شرایط هایپرباریک، انجام می‌شود که این مراحل باید به‌ترتیب و به‌صورت کامل انجام شوند و در صورتی که در هر مرحله مشکل ایجاد شود، به هیچ وجه مرحله بعد شروع نمی‌شود؛ زیرا خطرات جانی و مالی زیادی به‌همراه خواهد داشت. این فرآیند بسته به شرایط زمین، چندین روز به‌طول می‌انجامد. در نتیجه بازدید و نگهداری از ابزارهای برشی و کله‌حفار در زمین‌های نرم علاوه‌بر زمان‌بر بودن، خطرناک و پرهزینه است *(Nilsen, et al., 2006a)*.

ساینده‌گی خاک اثر قابل توجهی بر روی سایش و خوردگی ماشین‌های حفر تونل دارد. لذا تاکنون مطالعات زیادی راجع به ساینده‌گی خاک و عمر ابزار برشی در پروژه‌های تونلسازی مکانیزه با ماشین *EPB* در زمین‌های نرم انجام شده است *(Azali & Moammeri, 2012)*، *(Alavi Gharahbagh, et al., 2011)*، *(Nilsen, et al., 2007)*، *(Gwildis, et al., 2010)*، *(Köhler et al., 2011)*، *(Shinouda, et al., 2009)* و *(Moammeri & Azali, 2010)*. از جمله این تحقیقات می‌توان به تحقیقات طریق‌ازلی و معمری در سال ۲۰۱۲ بر روی تونل‌های مترو اصفهان *(Azali & Moammeri, 2012)*، آمون و همکارانش در سال ۲۰۱۵ بر روی تونل خط ۷ متروی تهران *(Amoun, et al., 2015)*، مطالعات نیلسن و همکارانش در سال ۲۰۰۶ بر روی تونل‌های *ECIS* لوس‌آنجلس و تونل *Elbe* در هامبورگ *(Nilsen, et al., 2006a)*، تحقیقات گویلدیس و همکارانش در سال ۲۰۱۰ *(Gwildis, et al., 2010)*، مطالعات کوهلر و همکارانش در سال ۲۰۱۱ *(Köhler et al., 2011)*، مطالعات شینودا و همکارانش در سال ۲۰۱۱ بر روی تونل *BW WEST* در سیاتل آمریکا *(Shinouda, et al., 2009)*، مطالعات معمری و طریق ازلی در سال ۲۰۱۰ بر روی تونل‌های مترو شیراز، تبریز و تونل انتقال آب قمرود *(Moammeri & Azali, 2010)* و تحقیقات گرودال و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اشاره نمود *(Grødal, et al., 2012)*.

به‌طور کلی مطالعات گسترده‌ای درباره حساسیت و پیش‌بینی سایش و خوردگی ابزار در *TBM*های سنگ سخت وجود دارد؛ اما در زمین‌های نرم و خاکی، روش یا استانداردی برای تخمین عمر ابزار برشی و شدت ساینده‌گی وجود ندارد. با این حال، تلاش‌های بسیاری برای ارائه روش و الگویی برای تخمین عمر ابزار برشی و برآورد شدت ساینده‌گی خاک‌ها به‌صورت تجربی و آزمایشگاهی شده است. از مهم‌ترین این تحقیقات می‌توان به ساخت دستگاه برآورد ساینده‌گی *LCPC* توسط مرکزی به همین نام در سال ۱۹۹۰ *(LCPC, 1990)*، مطالعات نیلسن و همکارانش در سال ۲۰۰۶ *(Nilsen, et al., 2006b)*، تحقیقات ترو و همکارانش در سال ۲۰۰۷ *(Thuro, et al., 2007)*، تحقیقات ترو و کاسلینگ در سال ۲۰۰۹ *(Thuro & Käsling, 2009)*، مطالعات داهل و همکارانش در سال ۲۰۱۲ *(Dahl, et al., 2012)*، علوی قره‌داغ و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۳ *(Alavi Gharahbagh, et al., 2011)* و *(Alavi Gharahbagh, et al., 2013)*، رستمی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ *(Rostami, et al., 2012)*، جاکبسن و همکارانش در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ *(Jakobsen, et al., 2012)* و *(Jakobsen & Lohne, 2013)* و برزگری و همکارانش در سال ۲۰۱۳ اشاره کرد *(Barzegari, et al., 2013)*.

ارزیابی سایش ابزارهای برش اغلب از محاسبه فاکتورهای عملکرد ماشین سخت‌تر و مشکل‌تر است. دلیل این ادعا این است که از یک سو سایش و خوردگی کاملاً و قطعاً توسط قابلیت ساینده‌گی مصالح تشکیل دهنده جبهه‌کار کنترل می‌شود و از سوی دیگر این پدیده به پیچیدگی اندرکنش بین زمین، چیدمان و جنس ابزارهای برش نیز مربوط می‌شود. از این رو عوامل تأثیرگذار بر سایش ابزار در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های *EPB* را می‌توان به‌صورت شکل ۱ خلاصه کرد.

شکل ۱- عوامل مؤثر بر سایش ابزار برش در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های EPB

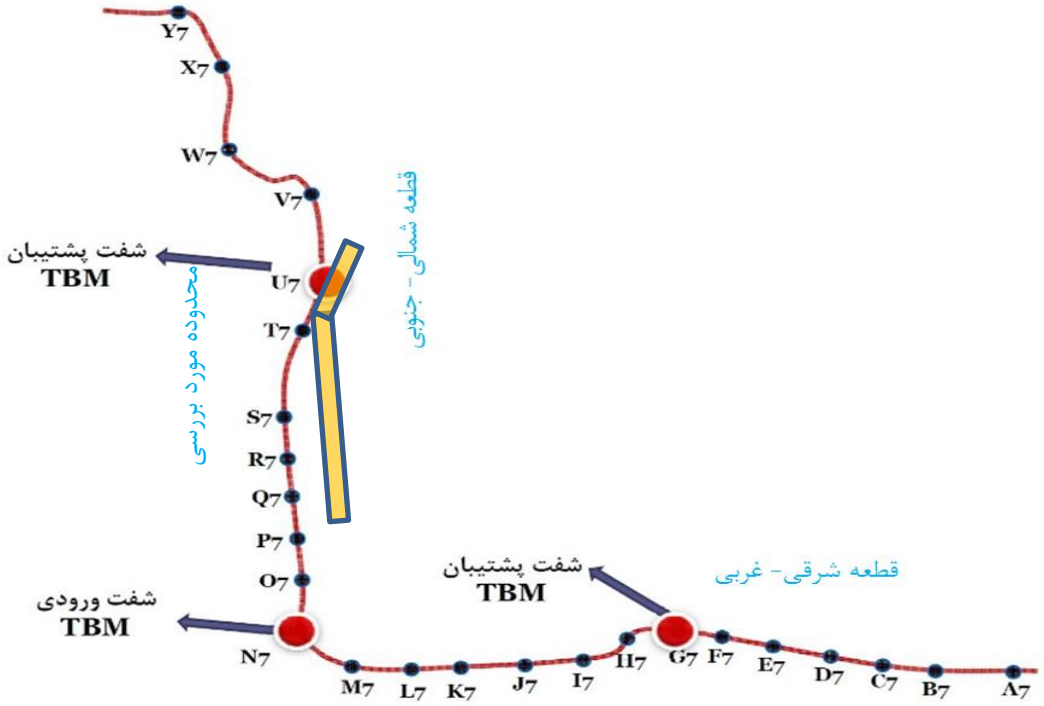
در این پژوهش با اندازه‌گیری‌های میدانی به بررسی سایش ابزار برشی در ماشین *EPB* قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران پرداخته شده است. در این مقاله، پروژه قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران و میزان مصرف ابزارهای برشی در این پروژه به‌طور مختصر تشریح شده است. همچنین به دلیل ثابت بودن ویژگی‌های ماشین حفر تونل خط ۷ متروی تهران در طول حفاری تنها به ارزیابی تأثیر فاکتورهای اپراتوری (اجرایی) ماشین و فاکتورهای زمین‌شناسی بر روی سایش ابزار برشی پرداخته شده است.

۲- معرفی پروژه و ماشین خط ۷ متروی تهران

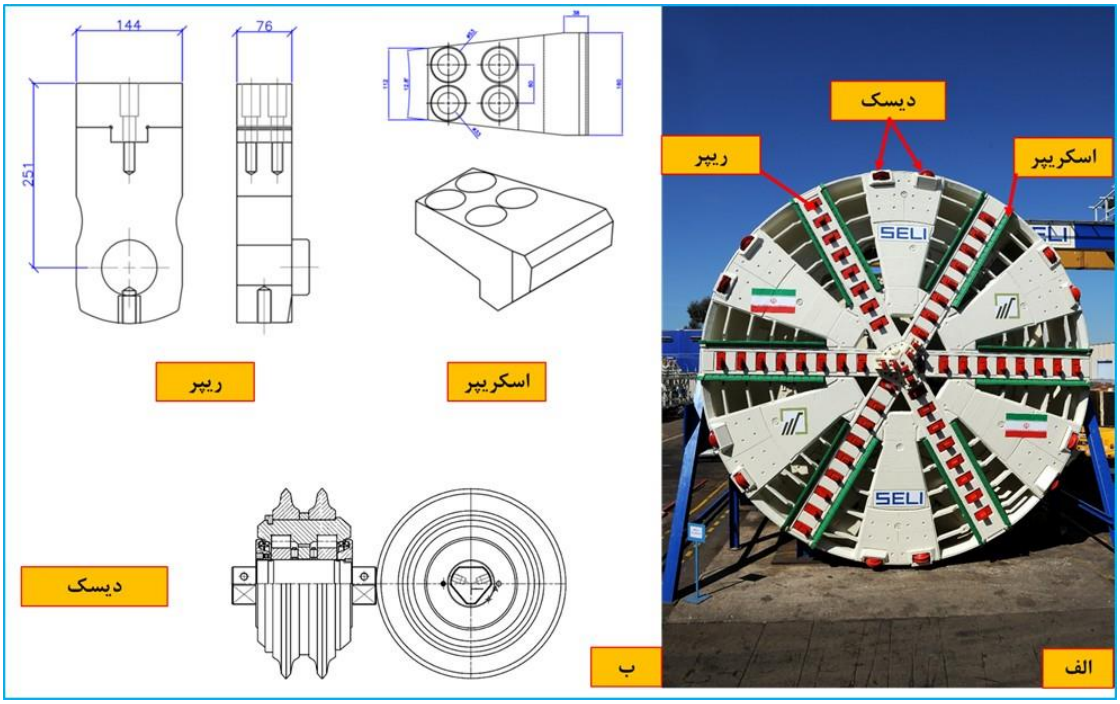
خط ۷ متروی تهران دارای ۲۷ کیلومتر طول با ۲۵ ایستگاه است. تونل خط ۷ به دو قطعه شمالی- جنوبی با طول ۱۴ کیلومتر و شرقی- غربی با طول ۱۳ کیلومتر تقسیم می‌شود که مطالعات انجام شده در این تحقیق مربوط به بخش شمالی- جنوبی مسیر است. پلان مسیر تونل خط ۷ متروی تهران در شکل ۲ نشان داده شده است. بخش شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران از خیابان کوهستان (سرو غربی) نزدیک بزرگراه یادگار امام در شمال غرب تهران آغاز می‌شود و در محل ایستگاه *N7* به بخش شرقی- غربی متصل می‌گردد. تونل با یک دستگاه ماشین حفار فشار تعادلی زمین با قطر ۹٫۱۶ متر ساخت شرکت *LOVAT* کانادا، توسط شرکت ایتالیایی *SELI* و مجموعه مهندسی سپاسد حفاری می‌شود. حفاری در سال ۲۰۱۰ با نرخ پیشروی ۱۱-۹ متر در روز شروع شد و تا کنون ۶۵۰۰ متر از مسیر تونل حفاری شده است *(SELI, 2008)*.

بر اساس طراحی شرکت سازنده، کله‌حفار ماشین دارای شش پره (اسپوک) با قابلیت حفاری در جبهه کار مختلط است که با ابزارهای مختلف حفاری شامل دیسک‌های قابل تعویض با ریپر (*Ripper*)، ریپر و اسکریپر (*Scraper*) مجهز شده است. در شکل ۳ ماشین *EPB* قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران نشان داده شده است. ویژگی‌های این ماشین به شرح زیر است:

- طول سپر و سیستم پشتیبان به‌ترتیب ۱۰ و ۹۵ متر.
- حداکثر نرخ نفوذ ۶۰ میلی‌متر در دقیقه و حداکثر سرعت چرخش کله‌حفار ۲ دور در دقیقه.
- حداکثر نیروی پیشران کله‌حفار ۶۵۰۰۰ کیلونیوتن و حداکثر گشتاور کله‌حفار ۲۰۰۰۰ کیلونیوتن در متر.
- تعداد ریپرها، اسکریپرها و دیسک‌ها به‌ترتیب ۴۹، ۱۹۲ و ۱۲ عدد.



شکل ۲- پلان مسیر خط خط ۷ متروی تهران



شکل ۳- الف) نمای کلی از دستگاه EPB-TBM قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران و ب) و طرح شماتیک ابزارهای برشی

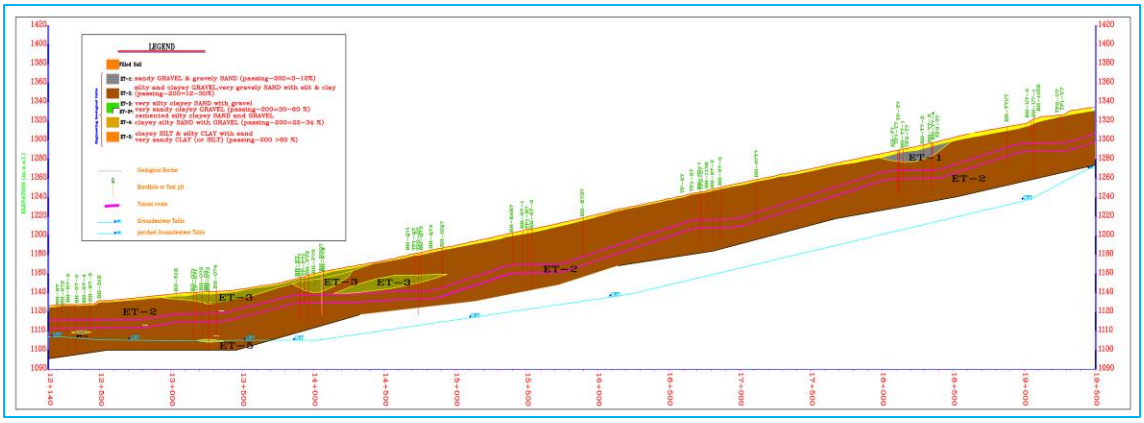
تاکنون ۶۵۰۰ متر ابتدایی تونل کامل شده است که در این مسافت از تونل، تعداد ۱۱۶۹ قطعه ابزار برشی ساییده شده در ۷۳ ایستگاه تعویض شدند. لذا فاکتورهای اپراتوری ماشین از قبیل سرعت چرخش کله‌حفار، نیروی پیشران، گشتاور، فشار جبهه‌کار و نرخ نفوذ کله‌حفار به‌دقت ثبت شد تا عملکرد ماشین مورد آنالیز قرار گیرد و تأثیر هر یک از این فاکتورها روی سایش ابزار بررسی شود.

۳- زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل خط ۷ متروی تهران

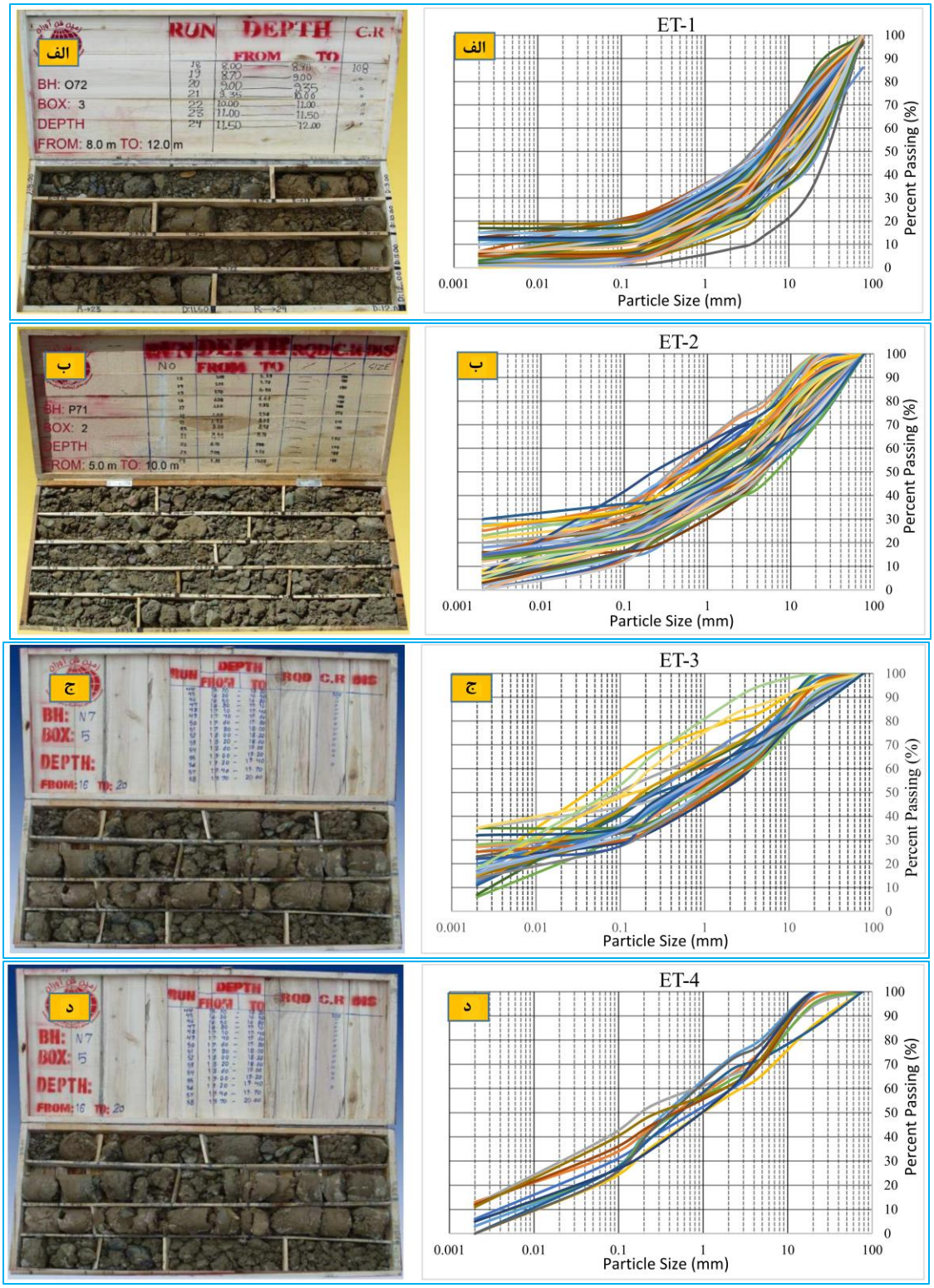
قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران در آبرفت‌های کواترنری دشت تهران قرار گرفته است. در طی مطالعات مقدماتی، تعداد ۲۲ گمانه و ۸ چاهک اکتشافی بر روی مسیر تونل حفر شده است. سپس در طی مطالعات تکمیلی، ۴۶ گمانه و ۲۴ چاهک در موقعیت ایستگاه‌ها حفر شده است *(SELI, 2008)*.

یکی از مهم‌ترین فعالیت‌ها در مطالعات ژئوتکنیکی تونل‌های مکانیزه در خاک، تفکیک مناسب واحدهای خاکی متناسب با رفتار آنها در تونلسازی است. در این مطالعه، مواد خاکی دربرگیرنده مسیر تونل براساس توزیع دانه‌بندی و ویژگی‌های مهندسی به پنج واحد زمین‌شناسی مهندسی تقسیم شده است. پروفیل زمین‌شناسی مهندسی تونل در شکل ۴ آورده داده شده است. واحدهای اصلی زمین‌شناسی مهندسی پیش روی مسیر تونل در طول حفاری به‌صورت زیر است *(SELI, 2008)*:

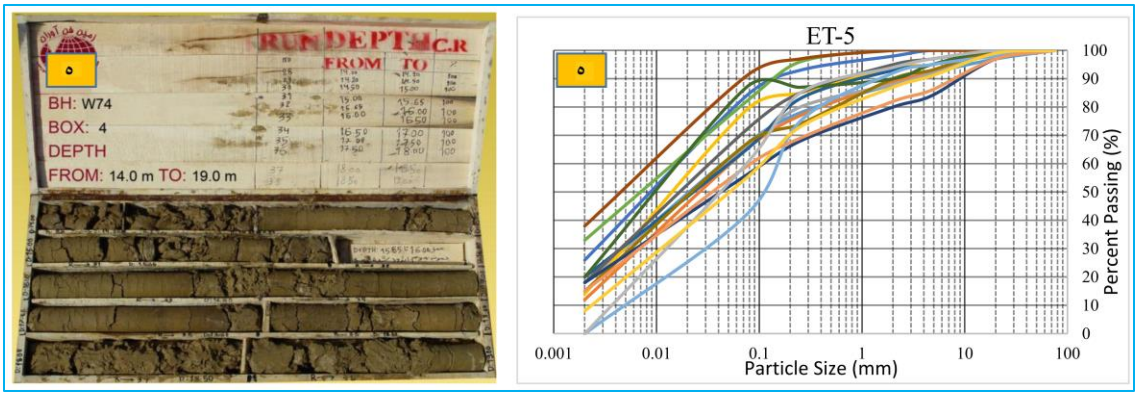
- واحد *ET-1*: شن ماسه‌ای/ ماسه شنی، مقدار درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰ (سیلت و رس) کم‌تر از ۱۲ درصد (ادامه شکل ۶-الف)؛
- واحد *ET-2*: ماسه شنی به‌همراه سیلت ورس/ شن ماسه‌ای به‌همراه سیلت و رس، مقدار درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰ بین ۱۲ تا ۳۰ درصد (ادامه شکل ۶-ب).
- واحد *ET-3*: ماسه رسی به‌همراه شن/ سیلت و رس ماسه‌ای به‌همراه شن، مقدار درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰ بین ۳۰ تا ۶۰ درصد (ادامه شکل ۶-ج).
- واحد *ET-4*: ماسه رسی به‌همراه شن، درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰ بین ۲۲ تا ۳۴ درصد (ادامه شکل ۶-د).
- واحد *ET-5*: سیلت و رس ماسه‌ای/ رس سیلتی با ماسه، مقدار درصد رد شده از الک شماره ۲۰۰ بیش از ۶۰ درصد (ادامه شکل ۶-هـ).



شکل ۴- پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ متروی تهران



شکل ۵- چپ) نمایی از نمونه‌های خاکی و راست)منحنی‌های توزیع دانه‌بندی: الف) واحد خاکی ET-1، ب) واحد خاکی ET-2، ج) واحد خاکی ET-3، د) واحد خاکی ET-1 و هـ) واحد خاکی ET-5



ادامه شکل ۶- چپ) نمایی از نمونه‌های خاکی و راست)منحنی‌های توزیع دانه‌بندی: الف) واحد خاکی ET-1، ب) واحد خاکی ET-2، ج) واحد خاکی ET-3، د) واحد خاکی ET-1 و ه) واحد خاکی ET-5

مسیر تونل ابتدا طول ۹۰۰ متر (از ایستگاه *N7*) در واحدهای ریزدانه *ET-5* و *ET-3* عبور کرده، سپس تا پایان ۶۵۰۰ متر ابتدایی تونل در واحد درشت‌دانه *ET-2* قرار داشته است که در این مسافت، سایر واحدهای خاکی به صورت لنز مشاهده شده‌اند.

در این مطالعه، با استفاده از بررسی‌های پتروگرافی دانه-های خاک، محتوای کانی‌های هر پنج واحد خاکی دربرگیرنده مسیر تونل تخمین زده شد. براساس نتایج بررسی‌های پتروگرافی نمونه‌های انتخاب شده، این دانه‌ها اغلب از سنگ-های آتشفشانی و آذرآواری هستند. در جدول ۱ بافت، ترکیب کانی‌شناسی و نام سنگ‌ها به همراه تصاویر پتروگرافی نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۱- نتایج آزمون پتروگرافی بر روی دانه‌های خاک

ترکیب کانی‌شناسی	بافت	نام سنگ	تصاویر	
به احتمال زیاد فلدسپات به‌همراه سیلیس آزاد. کانی‌های تیره، مانند اکسیدهای آهن.	نهان بلورین	توف ریولیتی		
اکثراً فلدسپات‌های پلاژیوکلاز به همراه مقداری فلدسپات‌های قلیایی و مقداری سیلیس آزاد. محصولات دگرسانی، مانند کلسیت، کلریت و اپیدوت	ریز بلور	توف سنگی		

۴- سایش ابزار برشی در ماشین *EPB-TBM*

سایش به‌صورت از دست رفتن مداوم و ناخواسته مواد از سطح یک جسم جامد، در اثر کنش‌های مکانیکی مانند تماس و حرکت نسبی مابین دو جسم، تعریف می‌شود (*Zum Gahr, 1987*).

به طور کلی در حفاری مکانیزه، تأثیر خاک‌های ساینده بر روی ماشین به‌صورت سایش اولیه (*Primary wear*) و ثانویه (*Secondary wear*) تعریف می‌شود. سایش مورد انتظار

روی ابزار حفاری (سطوحی از قبیل قلم‌های خراشنده، دیسک‌های برشی که برای حفاری طراحی شده‌اند) که به تعویض در فواصل زمانی نیاز دارند، سایش اولیه نامیده می‌شود. از طرف دیگر، سایش ثانویه، سایشی است طراحی نشده و زمانی که سایش اولیه روی ابزارهای برشی بیش از اندازه باشد، منجر به سایش ساختار کله‌حفار، قسمت‌های پشتیبان ابزار، اسپوک‌ها یا پره‌های کله‌حفار، پایه زینی شکل برنده‌ها (*Saddle*) و دیگر سطوح دور از انتظار طراحان و تولیدکنندگان *TBM* می‌شود که سایش ثانویه می‌نامند *(Nilsen, et al., 2006a)*.

دیسک‌ها مرسوم‌ترین ابزارهای حفاری هستند که هم در ماشین‌های زمین نرم و هم در ماشین‌های زمین سخت مورد استفاده قرار می‌گیرند *(O'Carroll, 2005)*. دیسک‌های نصب شده بر روی ماشین *EPB* قطعه شمالی- جنوبی خط ۷ از نوع جفت دیسکی با قطر ۱۵٫۵ اینچ و وزن ۱۵۰ کیلوگرم می‌باشند که به تعداد ۱۲ عدد در محیط کله‌حفار نصب شده تا خلاصی مورد نیاز کله‌حفار برای چرخش و حرکت ماشین به سمت جلو را ایجاد کنند.

ریپرها نوع دیگری از ابزارهای برشی هستند که بر روی سطح کله‌حفار نصب می‌شوند. این ابزار برش در واقع تمام سطح صفحه کله‌حفار را تشکیل می‌دهند و وظیفه اصلی حفاری در زمین‌های نرم را بر عهده دارند. ریپرها به صورت عمود بر جبهه‌کار تونل نصب شده و به‌خاطر موقعیت عمودیشان نسبت به جبهه‌کار تونل، مستقل از جهت چرخش کله‌حفار عمل می‌کنند و در جهت سست کردن ساختار سخت خاک از آنها استفاده می‌شود. در خاک‌های دانه‌ایی مانند شن و ماسه، ریپرها ساختار زمین را به هم می‌زنند و زمین را با عمل خراشیدن می‌شکافند و در خاک‌های چسبنده نیز تأثیر مالشی دارند. همچنین، اسکریپرها معمولاً در قسمت‌های کناری هر اسپوک کله‌حفار نصب می‌شوند و ابعاد کوچک‌تری نسبت به سایر ابزارهای برشی دارند و معمولاً جمع کننده مصالح حفاری شده هستند *(O'Carroll, 2005)*.

شکل‌های ۶ و ۷ نمایی از دیسک‌ها، ریپرها و اسکریپرهای ساییده را نشان می‌دهند. در این مطالعه تعداد ۱۱۶۹ ابزار برش مصرف شده است که از این تعداد ۶۵۴ عدد ریپر، ۳۵۷ عدد اسکریپر و ۱۵۳ عدد دیسک است. شکل ۹ نمای قبل و بعد تعویض ابزارهای برشی را بر روی کله‌حفار ماشین حفر تونل قطعه شمالی- جنوبی نشان می‌دهد.

عمر ابزار برش (*CL: Cutter life*) به‌صورت مدت زمان استفاده از هر یک از ابزار برش تا زمان تعویض آنها تعریف می‌شود. از آنجایی که تعداد مصرف ریپرها به‌دلیل نوع استفاده از آنها بیش از سایر ابزارهای برش است، در این پژوهش عمر آنها به روش‌های مختلف محاسبه گردید. عمر ابزار برش محاسبه شده بر اساس

جدول ۲ است که در ادامه به آن پرداخته شده است. در شکل ۱۰ تغییرات عمر ابزار برش (عمر ریپرها) در طول مسیر و با توجه به ایستگاه‌های تعویض ابزار برش نشان داده شده است. خلاصه نتایج، کاهش مصرف ابزار برش از کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ را نشان می‌دهد که گویای افزایش عمر ابزار برش در این بخش از مسیر تونل است.

از آنجایی‌که هر سه نمودار از لحاظ کیفی بیانگر یک روند برای تغییر عمر ابزار برش هستند، لذا در ادامه به‌منظور بررسی‌های بیشتر در کنار سایر نمودارهای ترسیمی تنها یکی از این سه نمودار ترسیم شده است. شایان ذکر است ارجحیتی در ترسیم یکی از سه نمودار تغییرات عمر ابزار برش بر حسب *m/c*، *h/c* و m^3/c در کنار نمودارهای دیگر وجود ندارد.

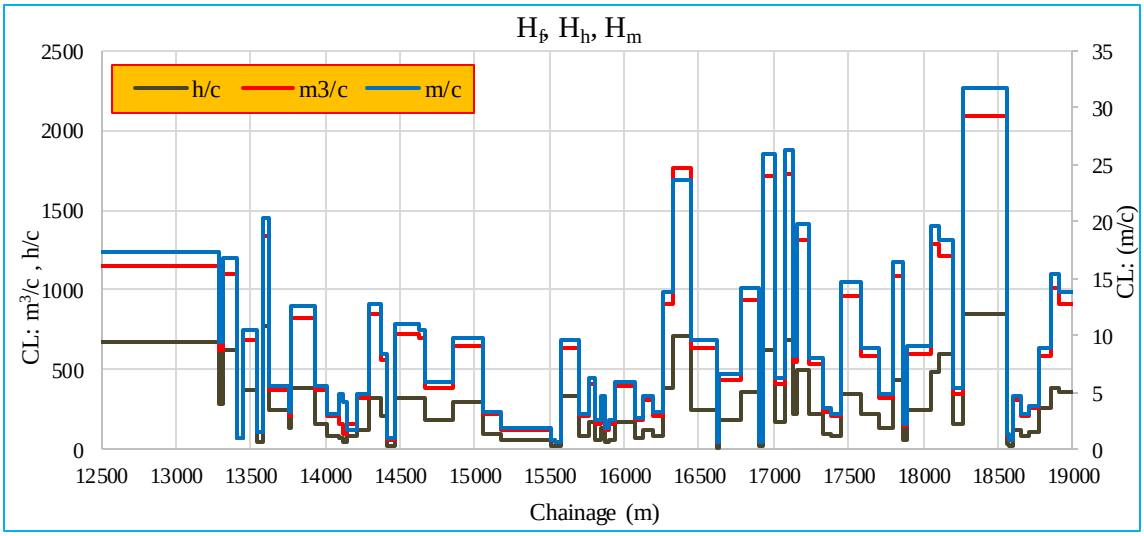
شکل ۷- الف) ریپرهای ساییده شده و ب) اسکریپرهای ساییده شده

شکل ۸- الف) اندازه‌گیری میزان سایش قبل از تعویض، ب) دیسک‌های نو، ج) دیسک‌های ساییده شده و د) اندازه‌گیری دیسک‌های ساییده شده بعد از تعویض

شکل ۹- چپ) ابزارهای برشی خرده شده قبل از تعویض و راست) ابزارهای برشی تعویض شده بر روی کله‌حفار

جدول ۲- انواع روش‌های محاسبه عمر ابزار برش

H_f	m^3/c	نسبت مقدار مواد حفاری شده در هر ایستگاه تعویض ابزار به تعداد ابزار برش مصرف شده
H_h	h/c	نسبت زمان حفاری هر ایستگاه تعویض ابزار به تعداد ابزار برش مصرف شده
H_m	m/c	نسبت فاصله حفاری شده بین هر دو ایستگاه تعویض ابزار مجاور به تعداد ابزار برش مصرف شده



شکل ۱۰- تغییرات عمر ابزار برحسب m^3/c، h/c و m/c در طول مسیر حفر شده تونل

۵- تأثیر پارامترهای اپراتوری و زمین‌شناسی بر روی سایش ابزار برش

سایش ابزار برش علاوه‌بر این‌که عامل مهمی در کنترل مقدار پیشروی و حفاری به شمار می‌آید، شاخص مهمی نیز برای ارزیابی حفرپذیری زمین در پروژه‌های تونلسازی محسوب می‌شود. اگرچه در حفاری مکانیزه، قابلیت حفاری ماشین *TBM* با فاکتورهایی هم‌چون عملکرد، نرخ نفوذ یا سرعت حفاری تعریف می‌شود، ولی در این میان معمولاً سایش به‌عنوان یک سوال مهم در فرآیند خوردگی و زوال مواد مطرح است. این فاکتورها از یک سو به شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی و از سوی دیگر به ابزاری که عهده‌دار حفاری هستند وابسته هستند.

از آنجا که مسیر تونل در واحد خاکی *ET-2* با روباره و ویژگی‌های ژئوتکنیکی تقریباً یکسانی حفاری شده است؛ از بین ویژگی‌های زمین‌شناسی، تنها به بررسی تأثیر فاکتورهای دانه‌بندی بر روی سایش ابزار پرداخته خواهد شد. همچنین با توجه به شکل ۱ مهم‌ترین فاکتورهای اپراتوری شامل گشتاور (*Torque*)، نیروی پیشران (*Thrust*)، فاکتورهای بهسازی خاک (*Conditioning*)، فشار جبهه‌کار (*Face pressure*)، نرخ نفوذ (*Penetration rate*) و سرعت چرخش کله‌حفار (*RPM*) می‌باشند که در ادامه تأثیر هر یک بر میزان سایش ابزارهای برشی بررسی شده است.

۲-۱- فاکتورهای دانه‌بندی

ساینده‌گی به‌عنوان ویژگی و یا پتانسیل سنگ یا خاک درک و تعریف می‌شود که علت سایش ابزار و قطعات ماشین است. براساس بررسی‌های انجام شده توسط محققین صاحب نظر در این زمینه، سایش ابزار به‌طور مشخص با افزایش ابعاد دانه‌های خاک افزایش می‌یابد (*Alavi Gharahbagh, et al., 2011*)، (*Alavi Gharahbagh, et al., 2013*)، (*Thuro, et al., 2006*) و (*Frenzel, et al., 2008*).

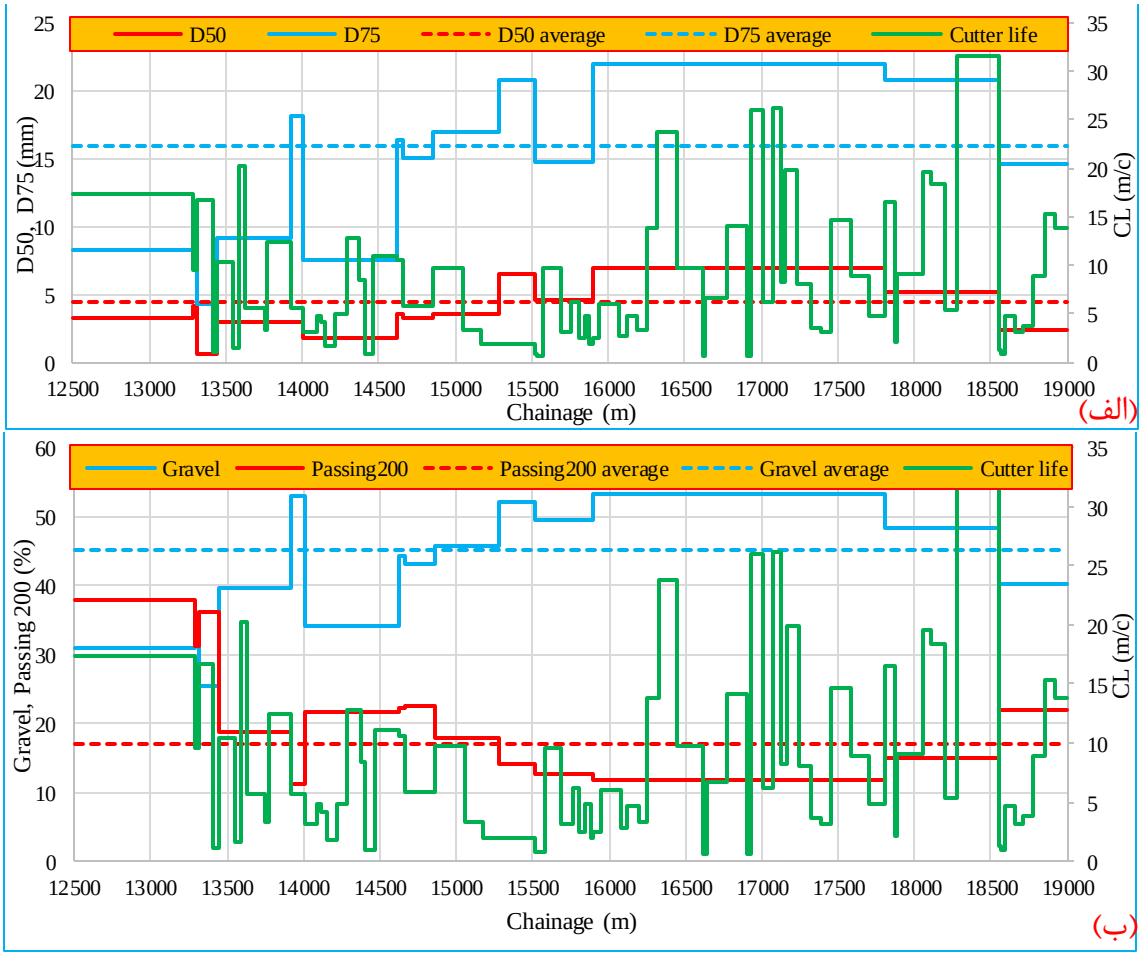
برای بررسی تأثیر توزیع دانه‌بندی خاک بر روی سایش ابزارهای برشی، چند مفهوم و فاکتور باید معرفی شود. محیط‌های خاکی بر حسب اندازه دانه‌ها، معمولاً شن، ماسه، سیلت و رس نامیده می‌شوند. برای تشریح خاک‌ها، سازمان‌های مختلف حدود جدا کننده اندازه دانه‌های خاک معرفی کرده‌اند؛ بگونه‌ایی که چهار فاکتور مهم دانه‌بندی عبارت‌اند از *D50% (mm)*، *D75% (mm)*، درصد شن (*Gravel*) و درصد ریزدانه (*Passing 200*) که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد به‌صورت زیر تعریف می‌شوند (*U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2001*):

- *D50%*: یعنی ۵۰ درصد دانه‌های خاک، قطری کم‌تر از این مقدار دارند. همچنین متوسط اندازه ذرات خاک نیز نامیده می‌شود؛
- *D75%*: یعنی ۷۵ درصد دانه‌های خاک، قطری

کم‌تر از این مقدار دارند؛

- درصد شن: یعنی قسمتی که از الک ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) عبور کرده و روی الک ۴٫۷۵ میلی‌متر (شماره ۴) باقی می‌ماند؛
- درصد ریزدانه: یعنی درصد عبوری از الک ۰٫۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰). همچنین درصد سلیت و رس نیز نامیده می‌شود.

شکل ۱۱ تأثیر فاکتورهای دانه‌بندی را بر روی عمر ابزار برش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر درصد شن، *D50%* و *D75%* از کیلومتراژ ۱۵+۲۷۹ تا ۱۹+۰۰۰ بیش از مقدار متوسط آنهاست که بالتبع مقادیر درصد ریزدانه برای این محدوده کمتر از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ است. درحالی که عمر ابزار برش در کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ بیش‌تر از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ است. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که تقریباً از کیلومتراژ ۱۵+۲۷۹ تا ۱۹+۰۰۰ خاک‌های دربرگیرنده تونل با افزایش درصد شن، مقادیر *D50%* و *D75%* و کاهش درصد ریزدانه‌های خاک، دانه درشت‌تر شده است؛ در حالی که عمر ابزار برشی از کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ از مقادیر آن در کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که عمر ابزار برش علاوه بر فاکتورهای دانه‌بندی (به عبارت کلی‌تر فاکتورهای زمین‌شناسی)، به فاکتورهای راهبری ماشین نیز وابسته است که تأثیر بیش‌تری بر عمر ابزار برشی دارند.



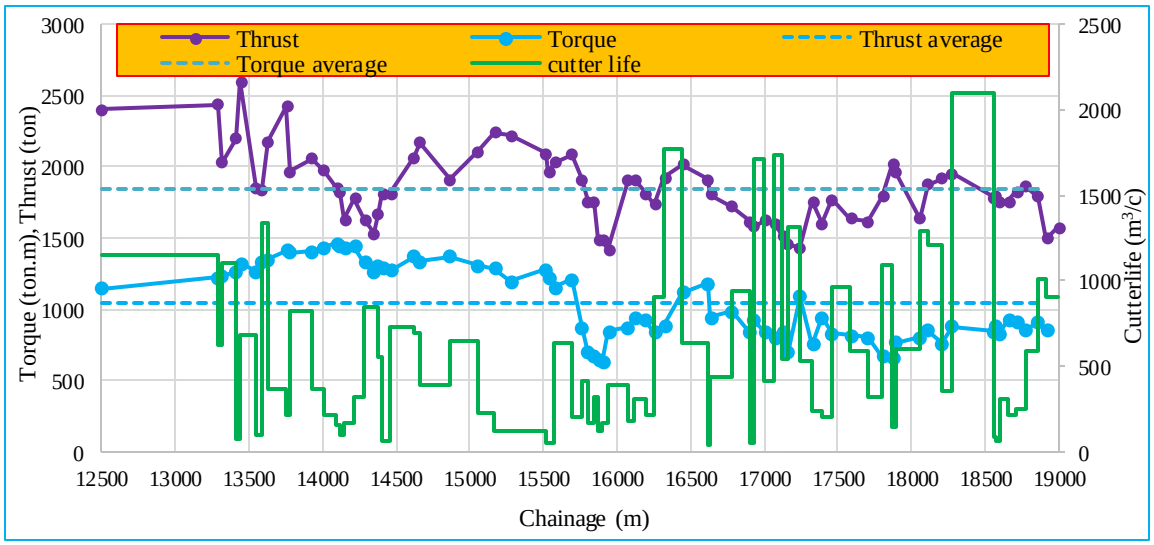
شکل ۱۱- تأثیر فاکتورهای دانه‌بندی بر روی عمر ابزار برش در طول مسیر: الف) تغییرات مقادیر D50% و D75% و ب) تغییرات مقادیردرصد شن و ریزدانه

۲-۲- گشتاور و نیروی پیشران

نیروی پیشران از جمله فاکتورهایی است که مقدار آن در حین حفاری توسط اپراتور برای راهبردن ماشین در مسیر تونل و ایجاد فشار *EPB* مناسب آن نقطه از مسیر تنظیم می‌شود. به عبارتی مقدار نیروی پیشران با توجه به نیروهای مورد نیاز برای برش جبهه‌کار و تعادل فشار زمین در جبهه‌کار تونل تخمین زده می‌شود.

یکی از فاکتورهای اساسی برای بررسی عملکرد ماشین، گشتاور است. گشتاور کله‌حفار وظیفه چرخاندن کله‌حفار برای برش زمین و انتقال مواد حفر شده به اتاقک حفاری را برعهده دارد. همچنین گشتاور کله‌حفار رابطه مستقیمی با نیروی پیشران دارد و از جمله فاکتورهایی است که مقدار آن در حین حفاری مستقیماً توسط اپراتور ماشین تنظیم نمی‌شود؛ بلکه تابعی از فاکتورهای دیگر است *(O'Carroll, 2005)*.

شکل ۱۲ متوسط نیروی پیشران و گشتاور اندازه‌گیری شده را همراه با تغییرات عمر ابزار برش در طول مسیر حفاری شده نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر نیروی پیشران و گشتاور اندازه‌گیری شده از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۵+۶۹۰ بیش از مقادیر متوسط ثبت شده در طول مسیر است؛ در حالی که عمر ابزار برش محاسبه شده در این محدوده کمتر از کیلومتراژ ۱۵+۶۹۰ تا ۱۹+۰۰۰ است. به‌طور کلی وقتی کله‌حفار ماشین با جبهه‌کار سفت روبه‌رو می‌شود، مقدار مواد حفر شده کاهش می‌یابد و در نتیجه نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار برای رسیدن به نرخ حفاری مورد نظر افزایش می‌یابند. این شرایط منجر به آسیب و مصرف بیش‌تر ابزار برشی می‌شود. اما همانطور که پیشتر بیان شد با توجه به اینکه شرایط زمین در طول مسیر تغییر چندانی نداشته است لذا این فرض صحیح نمی‌باشد. به‌همین خاطر، این افزایش نیروی پیشران و گشتاور، ممکن است به‌خاطر عدم آشنایی اپراتور با مسیر تونل و زمان آموزش نیز باشد که با توجه به مشخص بودن نوع زمین در طول مسیر، این احتمال منطقی‌تر به‌نظر می‌رسد.



شکل ۱۲- تغییرات مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و تأثیر آن بر روی عمر ابزار برش در طول مسیر

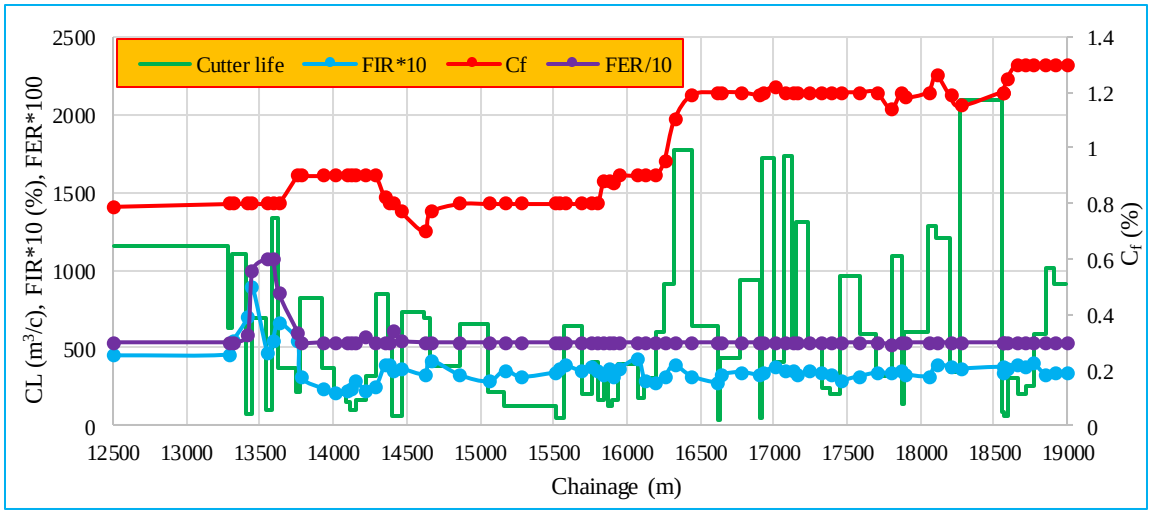
۲-۳- بهسازی خاک

به‌طور کلی به منظور حفاری با ماشین *EPB* همواره برای کنترل مخاطرات زمین و همچنین داشتن یک روند عادی و نرمال در طی حفاری، لازم است تا لایه‌های خاکی مسیر تونل توسط مواد افزودنی مختلف (فوم، پلیمر، بنتونیت و غیره) بهسازی شود. علت این امر آن است که یک خاک ایده‌آل برای ماشین *EPB*، خاکی است که پس از ورود به اتاقک حفاری تبدیل به یک ماده پلاستیک و خمیری با قابلیت اعمال فشار به جبهه‌کار، نفوذ پذیری کم برای جلوگیری از زهکش شدن آب زیرزمینی و آب‌بند کردن آن، خاصیت کم چسبناکی جهت عدم انسداد کله‌حفار، عدم افزایش در مقدار گشتاور ماشین و کاهش سایش ابزارهای برش و کله‌حفار باشد.

به‌طور سنتی، آب، بنتونیت و پلیمرها برای بهسازی خاک در تونلسازی مکانیزه به روش *EPB* استفاده شده‌اند؛ ولی امروزه متداول‌ترین انواع مواد افزودنی شامل دوغاب‌های بنتونیت، فوم و پلیمر می‌باشند. تعیین نوع مواد افزودنی و همچنین برآورد مقدار فاکتورهای مهم بهسازی ازقبیل غلظت ماده کف-ساز در محلول فوم (C_f)، نسبت انبساط فوم (*FER*) و نسبت تزریق فوم (*FIR*) همواره یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های طراحان و سازندگان تونل‌های مکانیزه در زمین‌های خاکی و نرم است *(Alavi Gharahbagh, et al., 2014)*. براساس استاندارد *EFNARC (2005)* محدوده کلی سه فاکتور C_f، *FER* و *FIR* در تونلسازی مکانیزه به‌ترتیب ۰٫۵ تا ۵ درصد، ۵ تا ۳۰ و ۱۰ تا ۸۰ درصد می‌باشند *(EFNARC, 2005)*. در این پروژه نیز مقدار فاکتور *FIR* در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد و مقدار فاکتور *FER* نیز در مقدار ثابت ۳ نگه داشته شده است. از طرفی مقدار فاکتور C_f از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ بر روی مقدار ۰٫۸ درصد و از کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ بر روی مقدار ۱٫۲ درصد تنظیم شده است.

با توجه به ثابت بودن مقادیر نسبت انبساط فوم و نسبت تزریق فوم در طول مسیر، افزایش مقدار غلظت فوم مصرفی به معنی افزایش میزان فوم مصرفی است. فوم به مخلوطی از ماده کف-ساز، هوا و آب گفته می‌شود. هنگامی که فوم به خاک اضافه می‌شود، حباب‌های هوا چگالی دوغاب خاکی را کم کرده و اصطکاک بین دانه‌های خاک را کاهش می‌دهد. با کاهش اصطکاک بین دانه‌های خاک و به دنبال آن، کاهش اصطکاک بین ابزار برش و دانه‌های خاک باعث کم شدن دمای ابزار شده که این موجب کاهش سایش آنها در برابر جریان مصالح حفاری شده و خاک برجا می‌شود.

شکل ۱۲ تأثیر قوی فاکتور غلظت ماده کف‌ساز بر روی عمر ابزار برش را نشان می‌دهد. به طوری که تفاوت بهسازی صحیح و نامناسب نیز قابل مشاهده و درک است. علاوه بر این مشاهدات میدانی نیز نشان می‌دهد که مقدار کم فاکتور C_f و بهسازی نامناسب باعث کاهش نرخ پیشروی و افزایش مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار می‌گردد که در نتیجه آن سایش بر روی ابزارهای برش و سایر قسمت‌های کله‌حفار افزایش می‌یابد.



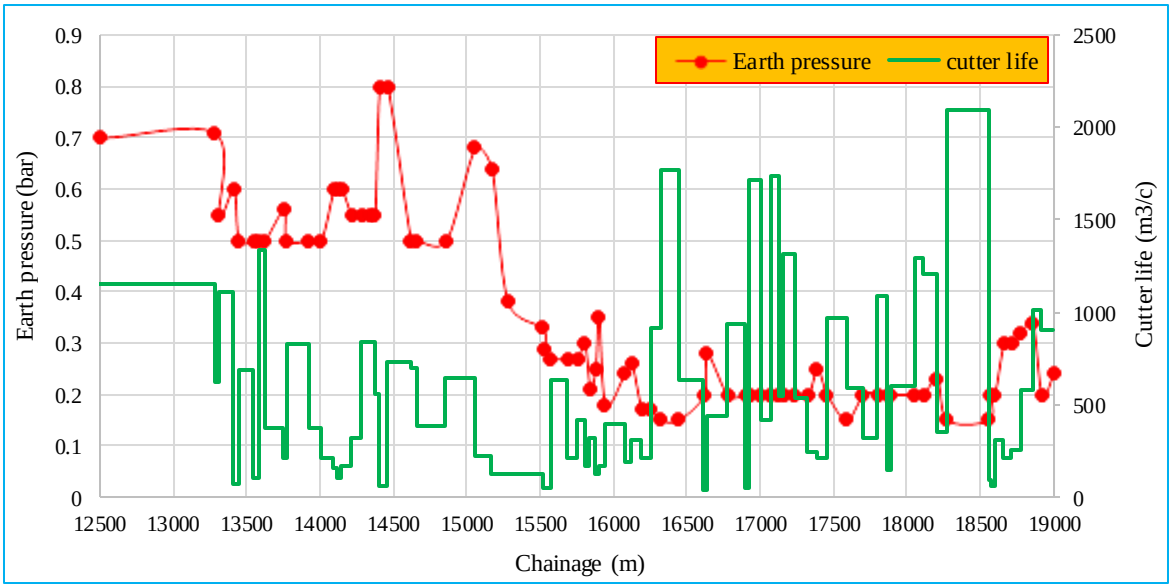
شکل ۱۳- تغییرات مقادیر فاکتورهای بهسازی و تأثیر آنها بر روی عمر ابزار برش در طول مسیر

۲-۴- فشار زمین

مقدار فشار زمین (فشار جبهه‌کار) عملاً به‌وسیله تنظیم سرعت چرخش نقاله مارپیچ و در حین حفاری توسط اپراتور ماشین تنظیم می‌شود؛ ولی به فاکتورهای دیگری مانند سرعت پیشروی، مقدار فوم مصرفی نیز بستگی دارد. فشار زمین یکی از فاکتورهای مهم در حفاری مکانیزه تونل‌ها به‌وسیله ماشین‌های *EPB-TBM* است.

در شکل ۱۴ تغییرات فاکتور فشار زمین و تأثیر آن بر روی عمر ابزار برش نشان داده شده است. در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که یک رابطه روشن بین عمر ابزار برشی و

فشار زمین وجود دارد. به عبارت دیگر، شکل مذکور نشان می‌دهد که با افزایش فشار جبهه‌کار عمر ابزار برشی کم می‌شود. چراکه به‌خاطر وجود فشار در اتاقک حفاری در تمام مدت چرخش کله‌حفار و پیشروی ماشین، ابزارهای برشی تحت تنش و فشار هستند که باعث سایش آنها می‌شود. قابل ذکر است که فشار زیاد زمین نه‌تنها باعث کاهش عمر ابزار برشی می‌شود بلکه موجب افزایش نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار نیز می‌گردد.



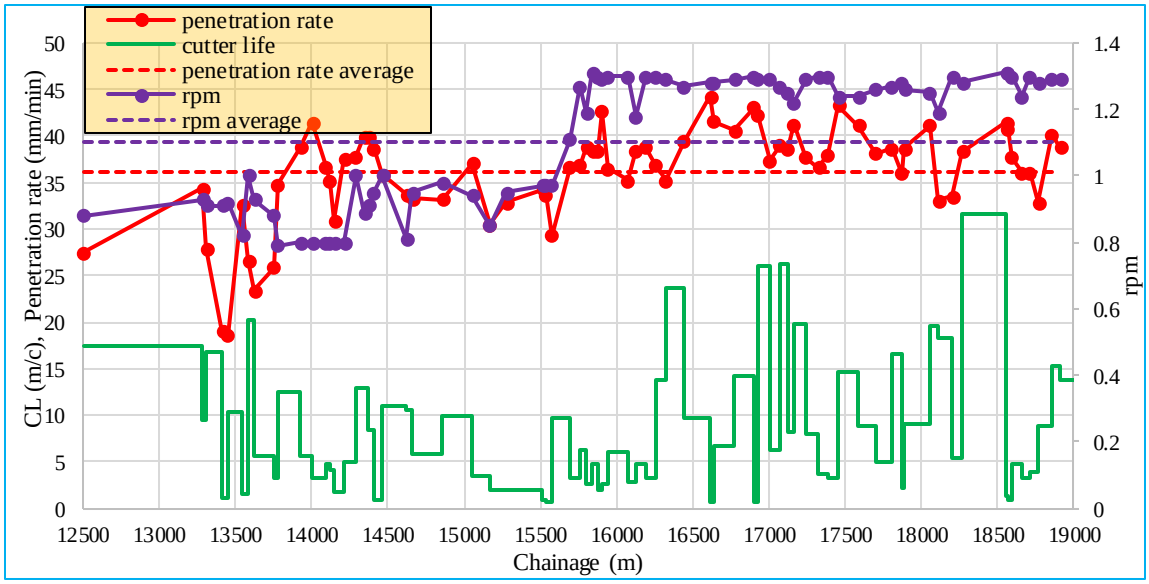
شکل ۱۴- تغییرات مقدار فشار زمین و تأثیر آن بر روی عمر ابزار برش در طول مسیر

۲-۵- نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار

یکی دیگر از فاکتورهای مؤثر در عملکرد ماشین‌های *EPB*، ارتباط بین نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار است و از جمله فاکتورهایی هستند که مستقیماً توسط اپراتور ماشین تنظیم می‌شوند که بر میزان سایش ابزارهای برش تأثیر مستقیم دارند *(O'Carroll, 2005)* شایان ذکر است مقدار فاکتور سرعت چرخش کله‌حفار مستقیماً توسط اپراتور تنظیم می‌شود اما مقدار فاکتور نرخ نفوذ متأثر از فاکتورهایی از قبیل نیروی پیشران، گشتاور کله‌حفار، جنس زمین و ... است. با این وجود در ادامه بررسی تأثیر تغییرات فاکتورهای مذکور بر روی سایش ابزارهای برشی پرداخته شده است.

برای بررسی تأثیر نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار بر روی عمر ابزار برش، این دو فاکتور به همراه عمر ابزار برش در طول مسیر حفر شده تونل در شکل ۱۵ ترسیم شده‌اند. نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار از کیلومتراژ ۱۵+۶۹۰ تا ۱۹+۰۰۰، بیش از مقدار متوسطِ ثبت شده در طول مسیر می‌باشند. همچنین مشاهده می‌شود، برخلاف آن‌چه که محققانی از جمله جاکبسن و همکارانش در سال ۲۰۱۳ طی بررسی‌های آزمایشگاهی نشان دادند، در واقعیت اتفاق نیفتاده و افزایش سرعت چرخش کله‌حفار و نرخ نفوذ باعث سایش بیشتر ابزار نشده است (Jacobsen, et al., 2013). این عدم تطابق مشاهده شده می‌تواند به‌خاطر کاهش فشار جبهه‌کار در این ناحیه از تونل باشد؛ چراکه فشار زیاد جبهه‌کار باعث افزایش نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار شده؛ در حالی که نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار کم می‌شود. بنابراین پتانسیل سایش ابزارهای برش افزایش می‌یابد. همچنین این عدم تطابق، به بهتر شدن بهسازی خاک در کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ نیز مربوط می‌شود؛ به‌دلیل اینکه یکی از دلایل اصلی برای کاربرد بهسازی خاک در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های *EPB*، کاهش نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و افزایش نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار ماشین است. شکل ۱۵ نشان می‌دهد که نرخ نفوذ کله‌حفار از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۵+۶۹۰ کم‌تر از مقدار متوسط ثبت شده در طول مسیر است و از طرفی عمر ابزار محاسبه شده برای این

مسافت از تونل، کم‌تر از کیلومتراژ ۱۵+۶۹۰ تا ۱۹+۰۰۰ است. این موضوع نشان می‌دهد که نرخ نفوذ کم باعث چرخیدن مسافت بیش‌تر ابزار بر روی جبهه‌کار تونل و درنتیجه افزایش سایش آنها می‌شود.



شکل ۱۵- تغییرات مقادیر نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار و تأثیر آنها بر روی عمر ابزار برش در طول مسیر

۶- نتیجه‌گیری

مطالعه تأثیر فاکتورهای اپراتوری ماشین بر روی سایش ابزارهای برشی و دیگر اجزای ماشین در پروژه‌های تونلسازی مکانیزه، منجر به بهینه‌سازی این فاکتورها در جهت بهبود عمر ابزارهای برشی، کاهش زمان مورد نیاز برای تعمیر و نگهداری ماشین و تعویض ابزارهای برشی می‌شود.

در این مطالعه، فاکتورهای مؤثر بر سایش ابزارهای برشی در طول ۶۵۰۰ متر ابتدایی پروژه خط ۷ متروی تهران بررسی شد. تعداد ابزارهای برشی تعویض شده در این پروژه ۱۱۶۹ عدد بوده که از این تعداد، ۶۵۴ عدد ریپر، ۳۵۷ عدد اسکریپر و ۱۵۳ عدد دیسک است.

مهمترین فاکتورهای مؤثر بر سایش ابزارهای برشی در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های *EPB*، شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی، ویژگی‌های ماشین و فاکتورهای اپراتوری می‌باشند. در حالی که تأثیر فاکتورهای دانه‌بندی روی سایش ابزارهای برشی بسیار مهم است؛ مطالعه نشان می‌دهد که با کنترل فاکتورهای اپراتوری از قبیل بهسازی خاک، فشار جبهه‌کار، گشتاور کله‌حفار، نیروی پیشران، نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار، حتی در خاک‌های دانه درشت عمر ابزار برش بهبود خواهد یافت. به‌گونه‌ایی که نتایج نشان می‌دهد با بهبود فاکتورهای بهسازی خاک حتی در خاک‌های دانه درشت، عمر ابزار برش تا ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر فاکتورهای بهسازی خاک بر روی عمر ابزار برش نشان می‌دهد که بهسازی خاک نقش کلیدی در کاهش سایش ابزارهای برش ایفا می‌کند. به‌گونه‌ایی که با افزایش غلظت ماده کف‌ساز از کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰، عمر ابزار برش از *406.87* m^3/c به *716.25* m^3/c، *193.95 h/c* به *287.09 h/c* و *6.27 m/c* به *10.76 m/c* افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر عمر ابزار برش بر حسب m^3/c، *h/c* و *m/c* به‌ترتیب ۴۳٫۲ درصد، ۳۲٫۴ درصد و ۴۱٫۷ درصد افزایش پیدا کرده است (جدول ۳).

سایر نتایج به دست آمده از از بررسی‌های انجام شده به شرح ذیل بیان می‌شود:

- بهینه‌سازی فاکتورهای بهسازی خاک سبب بهبود سایر فاکتورهای اپراتوری از قبیل فشار جبهه‌کار، گشتاور، نیروی پیشران، نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار می‌شود که نهایتاً می‌تواند منجر به کاهش سایش ابزارهای برش گردد.

- یکی از دلایل اصلی برای کاربرد بهسازی خاک در تونلسازی مکانیزه با ماشین‌های *EPB*، کاهش نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و افزایش نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار ماشین است که به طور مشخص باعث کاهش سایش ابزارهای برشی در بخش‌های انتهایی مسیر شده است.
- عدم آشنایی اپراتور ماشین با مسیر تونل و ویژگی‌های زمین دربرگیرنده تونل موجب بالا رفتن مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار می‌شود که سبب آسیب رسیدن به ابزارهای برشی می‌گردد.
- فشار زیاد جبهه‌کار علاوه بر افزایش مقادیر نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار باعث کاهش مقادیر نرخ نفوذ، سرعت چرخش کله‌حفار و درنتیجه سایش بیشتر ابزارهای برش می‌شود. چراکه به طور دائم ابزارهای برش تحت تنش و فشار قرار می‌گیرند.
- نرخ نفوذ کم باعث چرخیدن مسافت بیش‌تر ابزار برش بر روی جبهه‌کار و به دنبال آن افزایش سایش آنها می‌شود.
- در نهایت، تونل بر اساس فاکتورهای راهبری ماشین به دو بخش تقسیم می‌شود: ۱) کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۵+۶۹۰ و ۲) کیلومتراژ ۱۵+۶۹۰ تا ۱۹+۰۰۰؛ در بخش اول، به‌خاطر اینکه تونل با مقادیر بالای فشار جبهه‌کار، نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار و همچنین مقادیر کم نرخ نفوذ حفاری شده است موجب مصرف زیاد ابزار برشی گردیده است. ولی در بخش دوم، با بهبود فاکتورهای بهسازی خاک و کاهش مقادیر فشار جبهه‌کار، نیروی پیشران و گشتاور کله‌حفار، سایش ابزار برش کاهش یافته است (جدول ۴).

۷- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۳- مقایسه عمر ابزار برش براساس تغییرات فاکتورهای بهسازی

کیلومتراژ	m^3/c	عمر ابزار برش h/c	m/c
۱۲۵۰۰ تا ۱۶۲۵۴	۴۰۶٫۸۷	۱۹۳٫۹۵	۶٫۲۷
۱۶۲۵۴ تا ۱۹۰۰۰	۷۱۶٫۲۵	۲۸۷٫۰۹	۱۰٫۷۶
	۴۳٫۲٪	۳۲٫۴ ٪	۴۱٫۷ ٪

جدول ۴- مقایسه فاکتورهای اپراتوری برای ۶۵۰۰ متر از مسیر حفر شده تونل

کیلومتراژ	گشتاور (*ton.m*)	نیروی پیشران (*ton*)	فشار جبهه‌کار (*bar*)	غلظت کف‌ساز (%)	نرخ نفوذ (*mm/min*)	سرعت چرخش (*rpm*)
۱۲۵۰۰ تا ۱۵۶۹۰	۲۰۱۰٫۸۹	۱۳۰۹٫۸۷	۰٫۴۷	۰٫۸	۳۲٫۵۲	۰٫۹
۱۵۶۹۰ تا ۱۸۹۹۸	۱۷۳۲٫۶۷	۸۵۵٫۰۱	۰٫۱۸	۱٫۲	۳۸٫۵۶	۱٫۳

جدول ۵- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
Cf	%	غلظت ماده کف‌ساز
FIR	%	نسبت تزریق فوم
FER	-	نسبت انبساط فوم

۸- منبع‌ها

Home, L. (2010). Trends in the us of TBMs worldwide. Presented at NFF TBM seminar Bergen.

Tarigh Azali, S., & Moammeri, H. (2012). EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan metro line 1. In ITA-AITES world tunnel congress, International Tunnelling and Underground Space Association (ITA-AITES) and the Thailand Underground and Tunnelling Group (TUTG), Bangkok, Thailand.

Amoun, S., Sharifzadeh, M., Kourosh, SH., Rostami, J. (2015). Soil abrasiveness for EPB-TBM along Tehran metro tunnel line 7, Iran. ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Lacroma Valamar Congress Center, Dubrovnik, Croatia.

Nilsen, B., Dahl, F. E., Holzhauser, J., & Raleigh, P. (2006a). Abrasivity of soils in TBM tunnelling. Tunnels & Tunnelling International.

Gharahbagh, E. A., Rostami, J., & Palomino, A. M. (2011). New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications. Tunnelling and Underground Space Technology, 26(5), 604-613.

Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2007). New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling. In Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference (RETC) (pp. 104-106).

Gwildis, U. G., Sass, I., Rostami, J., & Gilbert, M. B. (2010, May). Soil abrasion effects on TBM tunneling. In World Tunnelling Congress, Vancouver, Canada.

Köhler, M., Maidl, U., & Martak, L. (2011). Abrasiveness and tool wear in shield tunnelling in soil/Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein. Geomechanics and Tunnelling, 4(1), 36-54.

Shinouda, M. M., Frank, G., & Hauser, G. (2009, June). Planning and preparation for tunneling at Brightwater West. In Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference, Las Vegas, Nevada.

Moammeri, H., Tarigh Azali, S. (2010). Taking abrasive action. World Tunnelling, December 2010, pp. 24–27.

Grødal, C., Equey, S., Armada, S., & Espallargas, N. (2012). Effect of soil and rock composition on the wear process of cutter tool steel used in tunnel boring machines. In NordTrib Conference, Trondheim.

LCPC, (1990). LCPC Abrasivemeter Standard. Normalisation Francaise P18–579.

NILSEN, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2006b). Abrasivity testing for rock and soils. T & T international, (AVR), 47-49.

Thuro, K., Singer, J., Kasling, H., & Bauer, M. (2007, January). Determining abrasivity with the LCPC test. In 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Thuro, K., & Käsling, H. (2009). Classification of the abrasiveness of soil and rock. Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels. Geomechanics and Tunnelling, 2(2), 179-188.

Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P. D., Nilsen, B., & Grøv, E. (2012). Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 150-158.

Gharahbagh, E. A., Rostami, J., & Talebi, K. (2014). Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 41, 127-136.

Rostami, J., Gharahbagh, E. A., Palomino, A. M., & Mosleh, M. (2012). Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 245-256.

Jakobsen, P. D., Langmaack, L., Dahl, F. E. B., & Breivik, T. (2012). Predicting the abrasivity of in-situ like soils. Tunnels and Tunnelling International, 6, 41-46.

Jakobsen, P. D., & Lohne, J. (2013). Challenges of methods and approaches for estimating soil abrasivity in soft ground TBM tunnelling. Wear, 308(1), 166-173.

Barzegari, G., Uromeihy, A., & Zhao, J. (2013). A newly developed soil abrasion testing method for tunnelling using shield machines. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 46(1), 63-74.

SELI, (2008). Tehran Metro Project- Line 7, North- South Section, general project design review.

Zum Gahr, K. H. (1987). Microstructure and wear of materials (Vol. 10). Elsevier.

O'Carroll, J. B. (2005). A Guide to Planning, Constructing, and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling. Parsons Brinckerhoff.

Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., & Bauer, M. (2006). Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device. Felsbau, 24(6), 37-45.

Frenzel, C., Käsling, H., & Thuro, K. (2008). Factors influencing disc cutter wear. Geomechanik und Tunnelbau, 1(1), 55-60.

U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2001. Engineering geology field manual, Second edition, Vol. 2.

Gharahbagh, E. A., Rostami, J., & Talebi, K. (2014). Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 41, 127-136.

EFNARC, A. (2005). Specifications and Guidelines for the use of specialist products for Mechanized Tunnelling (TBM) in Soft Ground and Hard Rock.