

## راندمان حفاری مکانیزه تونل به روش سپر تعادلی در زمین‌های نرم و ساینده

قدرت برزگری\*<sup>۱</sup>؛ علی ارومیه‌ای<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، gbarzegari@tabrizu.ac.ir

۲- استاد گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، uromia@yahoo.co.uk

(دریافت ۱ مرداد ۱۳۹۳، پذیرش ۱۷ شهریور ۱۳۹۴)

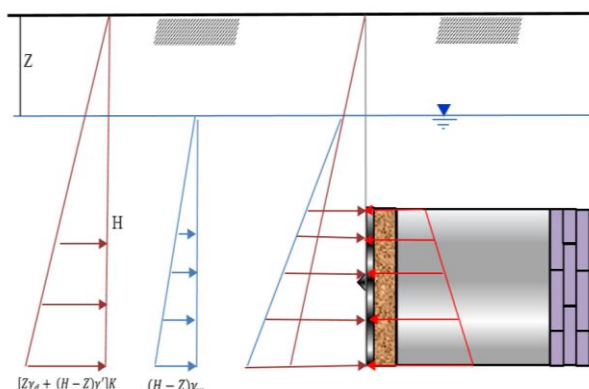
### چکیده

ساییدگی ابزارهای حفاری و سایر قسمت‌های ماشین‌های حفار تونل و تأثیر آن در کاهش راندمان عملیات و افزایش هزینه‌های اجرای تونل‌های شهری به یکی از مسائل مورد ادعای طرفین قرارداد تبدیل شده است که کارفرمایان، مشاوران، طراحان و پیمانکاران را با چالش‌هایی مواجه ساخته و حل و فصل آن نیازمند داشتن زمینه علمی کافی برای قضاوت کارشناسی صحیح است. در این مقاله میزان ساییدگی رسوبات، میزان مصرف ابزار حفاری و تأثیر ساییدگی ماشین حفار در پیشرفت عملیات حفاری در نیمه اول مسیر تونل‌های خط یک متروی تبریز بررسی شده است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، کوارتز معادل رسوبات در نیمه اول مسیر مورد مطالعه، در حد بین ۴۰ تا ۶۰ درصد است. بر اساس نتایج آزمایش LCPC، سرشار و دستگاه SATC، ساییدگی خاک مسیر در حالت خشک در حد متوسط تا خیلی ساینده و در حالت اشباع در حد کم تا متوسط ساینده ارزیابی شده است. بررسی اطلاعات میدانی نشان می‌دهد میزان تأخیر ناشی از ساییدگی خاک در این قسمت از مسیر، به‌طور تقریبی بیش از دو برابر مدت زمان لازم برای حفاری و نصب پوشش بتنی تونل است. بر اساس اطلاعات میدانی، فقط با تعیین درصد کوارتز خاک، نمی‌توان میزان ساییدگی مورد انتظار در ماشین حفاری را پیش‌بینی نمود و پارامترهای مختلفی در ساییدگی و میزان مصرف ابزار حفاری دخیل هستند نتایج بررسی‌ها نشان داد در محدوده با عدد SPT پایین و زیر سطح آب‌برزمینی، عمر ابزار حفاری افزایش نسبی دارد.

### کلمات کلیدی

راندمان حفاری مکانیزه، تونل، زمین‌های نرم و ساینده، ساییدگی ماشین حفار، متروی تبریز

## ۱- مقدمه



شکل ۱: شماتیکی از ایجاد تعادل فشار زمین در اتاقک حفاری

ماشین حفار تونل نوع سپر تعادلی [۱]

عدم امکان تخمین ساینده‌گی خاک و پیش‌بینی ساینده‌گی ابزار حفاری به یکی از کاستی‌های علم زمین‌شناسی مهندسی تبدیل شده و موضوعی مشترک بین زمین‌شناسی مهندسی، مهندسی مکانیک و مهندسی متالورژی به شمار می‌رود. ایده‌ی ارائه روشی نوین برای تخمین ساینده‌گی خاک‌ها، برای پیش‌بینی میزان ساینده‌گی ابزارهای حفاری و برآورد درست هزینه و زمان مورد نیاز، توسط محققان مختلفی بررسی شده و یا در حال بررسی است. مهمترین روش‌های تخمین ساینده‌گی خاک که در سال‌های اخیر معرفی شده‌اند عبارتند از:

۱. دستگاه SAT ارائه شده توسط SINTEF/NTNU [۴،۳].
۲. دستگاه PSAI ساخته شده در دانشگاه پنسیلوانیا [۵،۶].
۳. دستگاه SATC ساخته شده با همکاری دانشگاه تربیت مدرس و EPFL لوزان سوئیس [۷].
۴. دستگاه SGAT ساخته شده در BASF و NTNU/SINTEF [۸].

از جمله مشکلات فعلی دستگاه‌های سایش خاک جدید، عدم وجود داده‌های میدانی کافی برای بررسی عملکرد و کارایی واقعی دستگاه‌ها است. بنابراین برای ارائه شاخص ساینده‌گی قابل قبول، جمع‌آوری داده‌های میدانی به همراه انجام آزمایش سایش با دستگاه‌های جدید از برنامه‌های اصلاح و در توسعه دستگاه‌های جدید است.

## ۲- پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار در زمین‌های نرم و خاکی

پارامتر تخمین ساینده‌گی خاک یکی از مجهولات مورد نیاز برای پیش‌بینی عملکرد ماشین‌های حفار در زمین‌های نرم است.

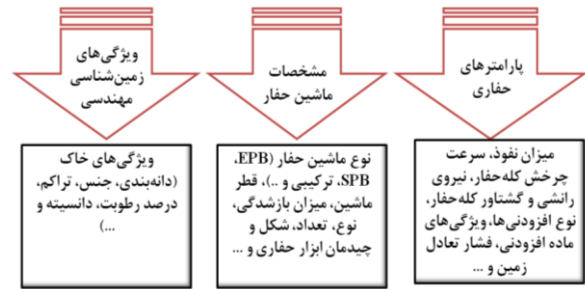
گسترش روزافزون شهرها و افزایش جمعیت و محدودیت معابر روزمینی، استفاده از فضاهای زیرزمینی را برای جابه‌جایی شهروندان، به یک راه‌حل اساسی در کلان‌شهرها تبدیل کرده است. با توجه به پیشرفت‌های انجام یافته در فناوری حفاری تونل در مناطق شهری، امروزه به‌کارگیری ماشین‌های حفاری تونل از نوع سپر تعادلی (EPB-TBM) به یک روش انحصاری تبدیل شده است. استفاده از این نوع ماشین‌های حفار و بهره‌گیری از این فناوری در احداث خطوط متروی کلان‌شهرهای ایران از جمله تهران، مشهد، قم، تبریز، شیراز، اصفهان، اهواز نیز مورد توجه قرار گرفته است.

در حفاری نوع سپر تعادلی تحت فشار تعادلی زمین، اتاقک حفاری با مصالح حفاری شده پر شده و متراکم می‌شود تا برای حفظ پایداری جبهه‌کار تونل فشاری برابر با فشار جانبی زمین اعمال کند (شکل ۱).

یکی از هزینه‌های عمده‌ی احداث تونل با ماشین‌های حفار تونل در سنگ‌های سخت و زمین‌های نرم، سایش ابزارهای حفاری است. عملیات بازبینی و تعویض ابزار حفاری در زمین‌های نرم بویژه در مناطق سست و زیر سطح آب‌زیرزمینی از طریق نگهداری پایداری جبهه‌کار تونل با استفاده از فشار هوا انجام می‌گیرد که عملیات هایپرباریک نامیده می‌شود. که زمان‌بر، هزینه‌بر و همراه با ریسک است. انجام این عملیات نیازمند شرایط زمین‌شناسی قابل آب‌بند با دوغاب بنتونیت است که در آن بعد از تخلیه مصالح حفاری شده از اتاقک حفاری، فشار هوایی معادل با فشار لازم برای نگهداری زمین و نیروی آب تراوشی به جبهه‌کار اعمال می‌شود و افراد تحت شرایط خاص به این محدوده تحت فشار وارد شده و از ابزارهای حفاری بازدید کرده و یا آن‌ها را تعویض می‌کنند. علاوه بر آن، بازدید از ابزار حفاری در هر پروژه - ای بصورت دوره‌ای انجام می‌گیرد که هر چقدر تعداد آن کاهش یابد می‌تواند در روند حفاری و کاهش هزینه‌ها تأثیر داشته باشد [۲]. داشتن برنامه‌ی بازدید از ابزار حفاری با فواصل زمانی معین و بهینه نیازمند آگاهی از شرایط زمین‌شناسی و قابلیت ساینده‌گی خاک و یا سنگ مورد حفاری است.

به‌طور کلی پارامترهای مؤثر در سایش ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل به سه گروه اصلی شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی، مشخصات فنی ماشین‌های حفار و پارامترهای حفاری تقسیم می‌شوند (شکل ۲).

سخت همانند سنگ‌دانه‌ها و خاک عمدتاً از نوع سایشی است [۱۶]. با توجه به ماهیت و مکانیزم سایش، روش‌های مختلفی برای ارزیابی سایش وجود دارد (شکل ۳). بنابراین به نظر می‌رسد فرآیندهای مختلفی برای ایجاد سایش در ماشین حفار با توجه به محل وقوع آن‌ها وجود دارد. در جدول ۱ نقاط دارای پتانسیل سایش در ماشین‌های حفار نوع سپرهای تعادلی (EPB) ارائه شده است.



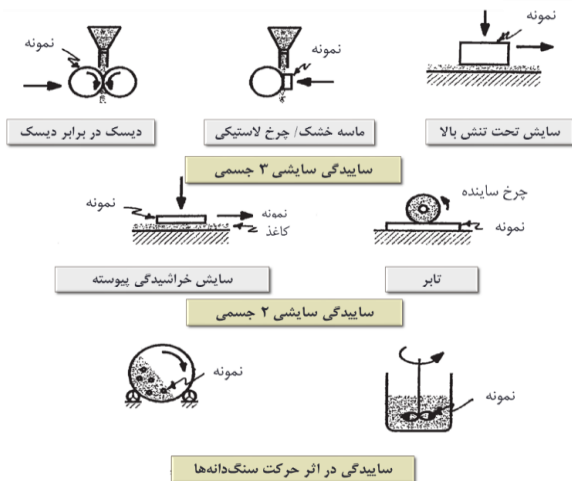
شکل ۲: پارامترهای مؤثر در سایش خاک در حفاری مکانیزه تونل

[۱]

مدل‌های پیش‌بینی عملکرد ماشین حفار تاکنون با تخمین سایش اولیه دیسک‌های برنده در حالت حفاری باز (بدون فشار) ارائه شده و به تدریج توسعه یافته‌اند [۱۳-۹]. مدل‌های مذکور بنا به دلایل زیر برای حفاری زمین‌های نرم و خاکی قابل استفاده نیستند:

۱. تعداد پارامترهای دخیل در سایش در زمین‌های نرم بسیار متنوع هستند و متغیرهای زیادی وجود دارد.
۲. در تونل‌های سنگی کله‌حفار تنها مجهز به دیسک‌های برنده و گاهی ابزار بیلچه‌ای بوده، در صورتی که در تونل‌های زمین‌های نرم، علاوه بر آن‌ها، از خراشنده‌ها، تراشنده‌ها و ابزار محافظ نیز استفاده می‌شود.
۳. حفاری تونل در سنگ‌ها، از طریق خرد کردن و استخراج تراشه‌های سنگی در فاصله بین دیسک‌های برنده انجام می‌شود. ولی در حفاری‌های زمین‌های نرم و خاکی، زمین جبهه حفاری بوسیله ابزار حفاری، خراشیده و تراشیده می‌شود.
۴. آزمایش سرشار، تقریباً قابل مقایسه با حرکت دیسک‌های برنده بر روی سطح سنگ است که سایش اولیه آن‌ها را منعکس می‌کند. در حالی که در حفاری زمین‌های نرم، مکانیزم سایش مختلف شده و هنوز آزمایش قابل قبولی برای ارزیابی ساینندگی خاک وجود ندارد.

ساییدگی بر اساس مکانیزم آن طبقه‌بندی مختلفی دارد. ASTM-G02 دو رده‌بندی کلی شامل ساییدگی سایشی و ساییدگی غیرسایشی ارائه داده است. ساییدگی سایشی بیشتر در اثر حرکت نسبی دو سطح، دو جسم و یا یک سطح و یک جسم که با یکدیگر در تماس هستند اتفاق می‌افتد. در این پدیده جسم سخت باعث خراشیدگی، تراشیدگی و ریزشکستگی جسم نرم‌تر می‌شود. این نوع سایش به دو صورت (دو جسمی و سه جسمی) اتفاق می‌افتد [۱۴]. ساییدگی ضربه‌ای در اثر ضربه و شکستگی ایجاد می‌شود. ساییدگی ناشی از چسبندگی در اثر تماس نزدیک دو سطح تحت تنش‌های زیاد که موجب تغییر شکل پلاستیکی و ایجاد اتصالات موضعی می‌شود [۱۵]. ساییدگی به وسیله ذرات



شکل ۳: مکانیزم مختلف سایش و روش‌های اندازه‌گیری [۱۴]

### ۳- زمین‌شناسی طرح

شهر تبریز از شمال با رشته کوه‌های شرقی- غربی عون‌ابن‌علی و از جنوب بوسیله ارتفاعات نه چندان مرتفع که جنس آن‌ها از رسوبات آبرفتی سخت شده و کنگلومرا است، محصور شده است. قسمت اعظم محدوده مورد مطالعه، بوسیله رسوبات آبرفتی پوشیده است. در زیر رسوبات آبرفتی، طبقات مارنی زرد رنگ و لایه‌های مارنی- شیلی خاکستری رنگ متعلق به سازند باغمیشه وجود دارند. شکل ۴ نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

### ۴- زمین‌شناسی مهندسی

برای مطالعات زمین‌شناسی مهندسی تونل خط یک متری تبریز، بالغ بر ۸۵ گمانه ماشینی با متر اژ کلی ۲۸۰۰ متر با دستگاه حفاری دورانی به روش مغزه‌گیری ممتد حفاری شده است. عمق گمانه‌ها از ۳۰ تا ۵۰ متر متغیر بوده و در همه گمانه‌ها برای بررسی وضعیت لایه‌ها و مقاومت زمین، آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها انجام یافته است. ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی رسوبات مسیر مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است.

## ۵- ساینده‌ی رسوبات تونل‌های خط یک متروی تبریز

### ۵-۱- مطالعات کانی‌شناسی و تعیین درصد کوارتز معادل

برای انجام مطالعات کانی‌شناسی از رسوبات مسیر در فواصل مختلف نمونه‌گیری و مقاطع میکروسکوپی تهیه شد. مطالعات کانی‌شناسی نشان داد قطعات سنگی، اغلب از نوع آندزیت، هورنبلند آندزیت و داسیت است. کانی‌های اصلی بلورهای درشت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار کوارتز، پلاژیوکلاز، آمفیبول و پیروکسن و کانی‌های فرعی شامل بلورهای ارتوپيروکسن و بیوتیت است. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی، محتوای تشکیل‌دهنده‌ی رسوبات مسیر مورد مطالعه، از چهار گروه اصلی شامل، سنگ‌دانه‌های آذرین (قطعات آتشفشانی از جنس آندزیت و داسیت)، کوارتز، بلورهای نیمه‌شکل‌دار پلاژیوکلاز، پیروکسن، آمفیبول و سایر تشکیل‌دهنده‌ها (قطعات مارنی و کربناته) تشکیل شده است. گردشگی ذرات، متوسط

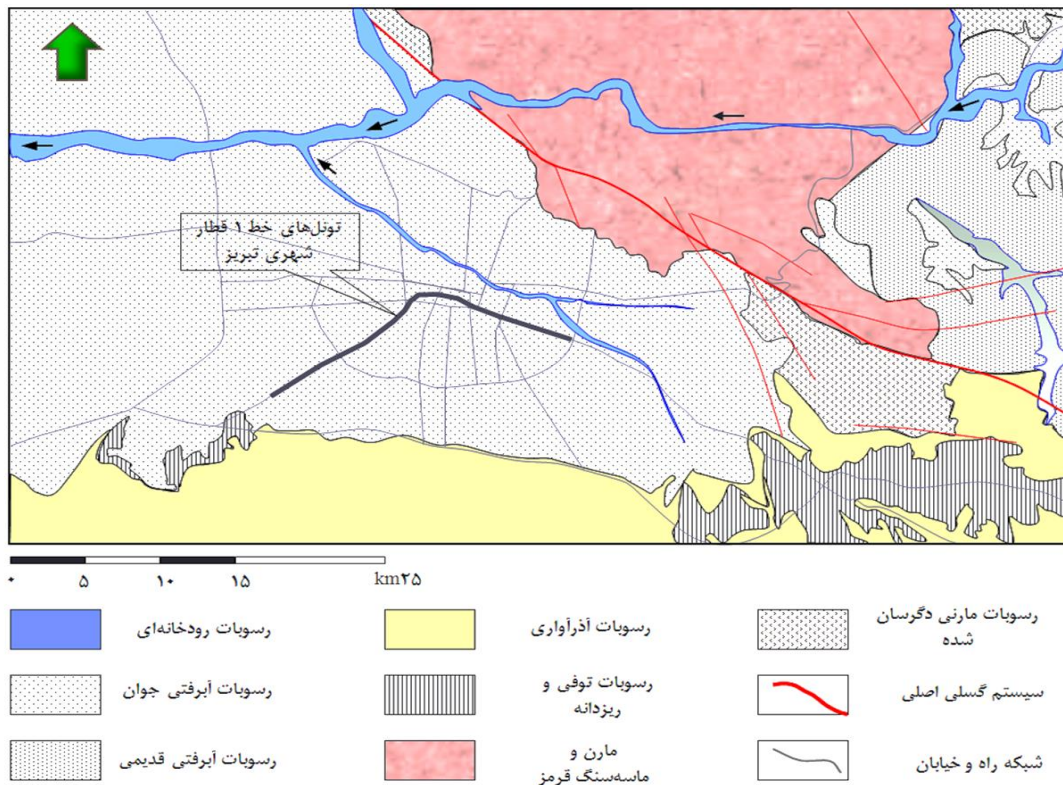
بوده و جورشدگی آن‌ها متوسط تا خوب است. قطعات بلوری پراکنده در متن ماسه اغلب از نوع پلاژیوکلاز بوده و به میزان اندک کوارتز، بیوتیت و آمفیبول نیز مشاهده شده است. به‌منظور در نظر گرفتن تأثیر تمامی اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خاک در ساینده‌ی، محتوای متوسط کوارتز معادل نمونه‌ها بر اساس سختی رزیول محاسبه شده است. درصد اجزای مختلف خاک و محتوای کوارتز معادل آن در فواصل مختلف در شکل ۵ ارائه شده است. درصد محتوای کوارتز معادل خاک مسیر بین ۴۲ تا ۶۰ درصد تغییر می‌کند. برای تخمین میزان ساینده‌ی رسوبات مسیر بر اساس درصد کوارتز معادل، از رابطه بین درصد کوارتز معادل و ضریب ساینده‌ی LCPC استفاده گردید. با استفاده از شکل ۶، ضریب ساینده‌ی LCPC خاک مسیر مورد مطالعه در حد ۲۵۰ تا ۷۰۰ (g/t) برآورد شد. بر این اساس ساینده‌ی نمونه‌های مسیر، در حد متوسط تا خیلی ساینده ارزیابی شد.

جدول ۱: نقاط دارای پتانسیل سایش در ماشین‌های حفار نوع EPB

		ابزارهای حفاری: ابزارهای حفاری اولین قسمتی از ماشین حفار هستند که با زمین درگیر می‌شوند و ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی برجای زمین، بیشترین تأثیر را در سایش این قسمت‌ها دارد.
		پایه نگهدارنده تیغه ابزارها و بدنه ابزارهای برشی: سایش در این قسمت‌ها پس از سایش اولیه و از بین رفتن لبه‌های برشی ابزار اتفاق می‌افتد. در صورت عدم توجه کافی، حتی در فاصله کم ممکن است بدنه ابزارها و کله حفار دچار آسیب‌های جدی شود.
		کله حفار: از پرهزینه‌ترین نوع آسیب‌دیدگی ماشین‌های حفاری تونل در زمین‌های خاکی و سنگی در اثر ساینده‌ی زمین می‌باشد که ترمیم آن، علاوه بر هزینه‌های زیاد مستلزم صرف زمان بسیار زیاد برای تعمیرات است.
		فاصله بین کله حفار و پوسته ماشین حفار: این نقطه از ماشین حفار نیز از نقاط حساس در برابر سایش می‌باشد که منجر به از بین رفتن پوسته ماشین حفار و نیز آسیب جدی به آن می‌گردد.
		دیوار فشار (Bulk head): با توجه به تماس ممتد آن با خاک حفاری شده تحت فشار، یکی از نقاط آسیب‌پذیر در برابر سایش می‌باشد.
		نقاله مارپیچی و پوسته آن: با ساینده‌ی نقاله مارپیچی و کاهش قطر آن در داخل پوسته و یا افزایش قطر داخلی پوسته در اثر ساینده‌ی، فاصله‌ای بین نقاله مارپیچی و پوسته ایجاد شده و جریان مداوم و بدون کنترل مصالح حفاری شده در حین حفاری (در زمین‌های با گرادیان هیدرولیکی بالا) را سبب می‌شود.
		

جدول ۲: ویژگیهای زمین‌شناسی مهندسی خط یک متروی تبریز

نوع	نام آزمایش	نتایج	
آزمایش‌های صحرایی	نفوذ استاندارد (SPT)	خیلی سست تا خیلی متراکم در پاره‌ای از موارد لایه‌هایی با SPT پایین	
	نفوذپذیری درجا	$10^{-2}$ تا $10^{-6}$ (سانتی‌متر بر ثانیه)	
آزمایش‌های آزمایشگاهی	سطح آب زیرزمینی	عمق سطح آب زیرزمینی ۲/۵ تا ۲۳ متر، حداکثر هد هیدرولیکی بالای تونل: ۰/۸ بار	
	دانه‌بندی خاک (بر اساس طبقه بندی یونیفاید)	به ترتیب فراوانی شامل SP-SM, SW-SM, GP و در بعضی موارد GP-GM و GW-GM در برخی موارد، میان لایه‌های ریزدانه با دانه‌بندی CL و ML	
	درصد رطوبت	۱۳ الی ۱۶ درصد	
	وزن مخصوص ( $g/cm^3$ )	وزن مخصوص طبیعی لایه‌ها بین ۱/۲۸ تا ۲/۳ وزن مخصوص خشک بین ۱ تا ۱/۹	
	مقاومت تک‌محوری	۰/۷ تا ۴/۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع	
	برش مستقیم	$\phi$	لایه‌ی شنی: ۳۷ درجه، لایه‌ی ماسه‌ای: ۳۴ درجه لایه‌های سیلتی: ۱۵ تا ۲۴ درجه
		C	صفر تا ۰/۲۵ ( $Kg/cm^2$ )
مقاومت سه‌محوری	$\phi$	نمونه‌های ماسه‌ای: ۲۹ - ۴۱ درجه نمونه‌های سیلتی - رسی: ۴ تا ۸ درجه	
	C	چسبندگی زهکشی نشده نمونه‌های ماسه‌ای بین صفر تا ۰/۱۸ ( $Kg/cm^2$ ) نمونه‌های سیلتی - رسی: ۰/۲۹ تا ۳ ( $Kg/cm^2$ )	



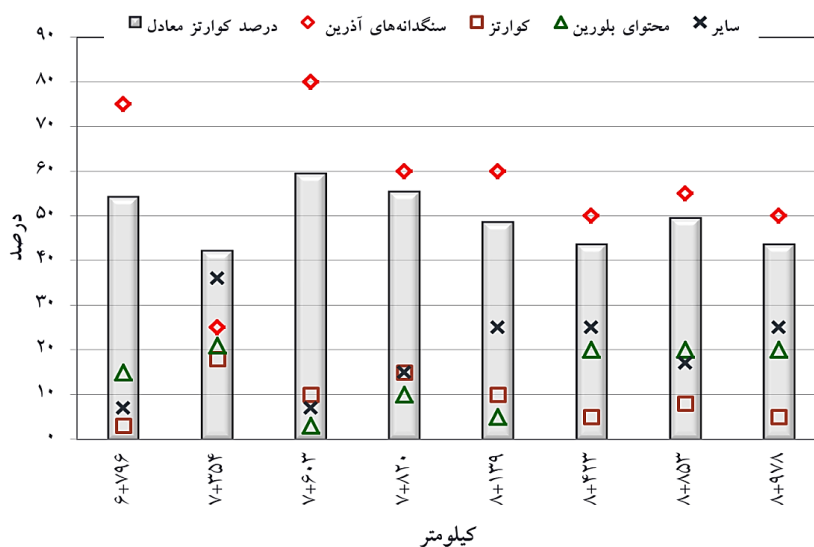
شکل ۴: نقشه زمین‌شناسی محدوده طرح [۱]

۵-۲- آزمایش سرشار

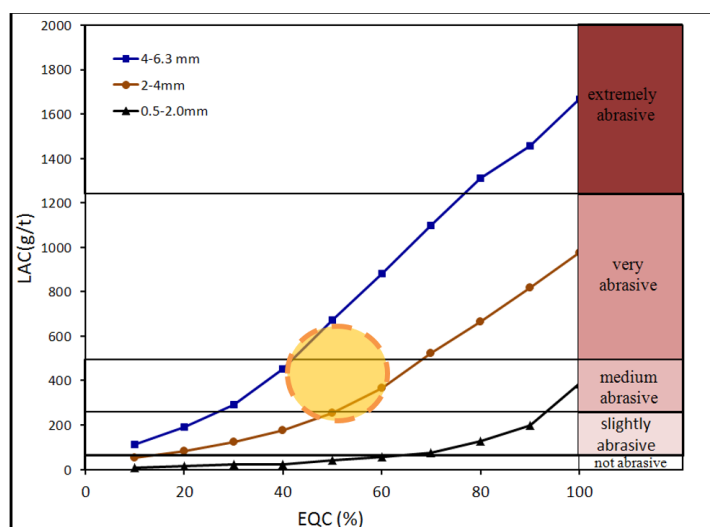
چون خاک مسیر مورد مطالعه اغلب از سنگ‌دانه‌های آتشفشانی ناشی از خردشدن قلوه‌سنگ‌ها و قطعه‌سنگ‌ها تشکیل شده است بنابراین یکی از روش‌های تخمین میزان ساینده‌گی، انجام آزمایش سرشار روی نمونه‌های سنگی بزرگ‌تر است. آزمایش سرشار بر روی قلوه‌سنگ‌های نمونه‌های مسیر، شاخص ساینده‌گی سرشار (CAI) نمونه‌ها را در حد ۲/۸ تا ۴/۶ نشان داد که بر اساس تقسیم‌بندی ارائه شده در [۱۷]، این سنگ‌ها اغلب در رده خیلی ساینده تا شدیداً ساینده قرار می‌گیرند.

۵-۳- آزمایش LCPC

آزمایش LCPC یکی از استانداردهای موجود برای ارزیابی سنگدانه‌های با اندازه ۶/۳-۴ میلی‌متر است. برای بررسی دقیق میزان ساینده‌گی خاک مسیر، نمونه‌هایی از آن انتخاب و آزمایش LCPC بر روی آن‌ها انجام شد. برای بررسی تأثیر آب، یکی از نمونه‌ها به دو صورت خشک و اشباع آزمایش شد. نتایج آزمایش‌ها، در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس، خاک مسیر در حالت خشک در حد خیلی ساینده و در حالت اشباع (زیر سطح آب زیرزمینی) در حد متوسط ساینده است.



شکل ۵: درصد اجزا، سختی و متوسط کوارتز معادل خاک مسیر در فواصل مختلف

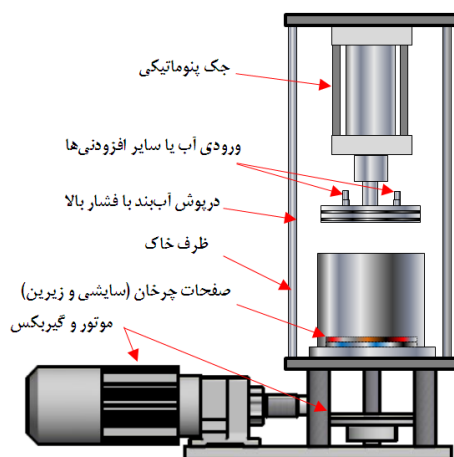


شکل ۶: ساینده‌گی خاک مسیر بر اساس رابطه بین کوارتز معادل و ضریب ساینده‌گی [۱]

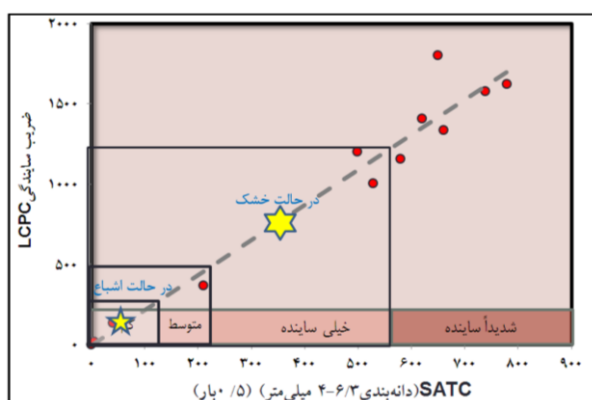
جدول ۳: نتایج آزمایش LCPC خاک مسیر تونل خط یک قطار شهری تبریز [۱]

شماره نمونه	کیلومتر	نوع خاک (بر اساس یونیفاید)	شرایط آزمایش	وزن قطعه فولادی قبل از آزمایش (گرم)	وزن قطعه فولادی بعد از آزمایش (گرم)	کاهش وزن قطعه (میلی گرم)	ضریب ساینده‌گی LCPC (LAC)	وضعیت ساینده‌گی خاک
۱	۸+۱۳۹	SP-SM	خشک	۴۶/۷۴۹	۴۶/۴۳۹	۳۱۰	۶۲۰	خیلی ساینده
			اشباع	۴۶/۵۶۳	۴۶/۴۲۶	۱۳۷	۲۷۴	متوسط ساینده
۲	۷+۶۰۳	SP-SM (شن‌دار)	خشک	۴۶/۲۵۴	۴۵/۸۸۵	۳۶۹	۷۳۸	خیلی ساینده
۳	۷+۳۵۴	SM	خشک	۴۶/۵۲۶	۴۶/۱۹۴	۳۳۲	۶۶۴	خیلی ساینده
۴	۸+۹۷۷/۶	SM	خشک	۴۶/۶۳۳	۴۶/۳۶۰	۲۷۳	۵۴۶	خیلی ساینده

#### ۵-۴- دستگاه SATC



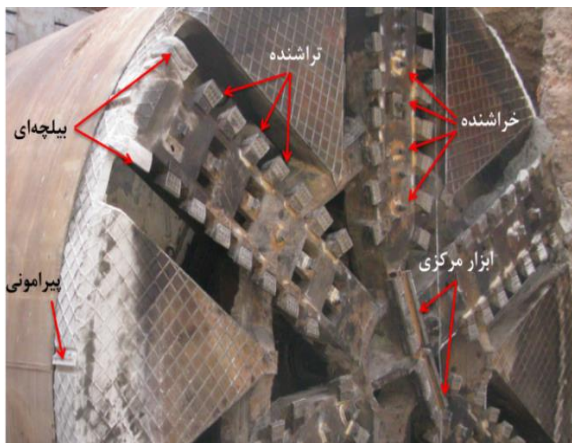
شکل ۷: تصویر شماتیک دستگاه سایش خاک SATC [۱]



شکل ۸: رده‌بندی نتایج دستگاه SATC بر اساس LAC

دستگاه SATC، از دستگاه‌های جدید ارزیابی ساینده‌گی خاک بر مبنای مدل‌سازی مکانیزم حفاری مکانیزه تونل به روش سیر تعادلی است که با همکاری دانشگاه تربیت مدرس و EPFL لوزان سوئیس ساخته شده است [۱،۷]. شکل ۷ تصویری از دستگاه SATC را نشان می‌دهد.

با استفاده از این دستگاه امکان ارزیابی ساینده‌گی خاک در حالت‌های مختلف مشابه با شرایط واقعی وجود دارد و می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف از جمله دانه‌بندی، رطوبت، تراکم، فشار اتاقک حفاری، افزودنی‌های اصلاح کننده خاک (فوم و پلیمر) و غیره را بررسی کرد [۱۸]. برای رده‌بندی اولیه میزان ساینده‌گی خاک بر اساس نتایج دستگاه SATC، از ارتباط بین ضریب ساینده‌گی LCPC و نتایج دستگاه SATC (در شرایط آزمایش با فشار ۰/۵ بار و دانه‌بندی ۴-۶/۳ میلی‌متر) استفاده شده است [۱]. شکل ۸ رده‌بندی مذکور را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش با دستگاه SATC، از مسیر تونل‌های خط یک قطار شهری تبریز، نمونه‌ی میانگین با دانه‌بندی ماسه‌ی شن‌دار تهیه شده و در دو حالت خشک و اشباع (شرایط زیر سطح آب‌زیرزمینی) آزمایش سایش انجام گرفت (شکل ۹). نتیجه‌ی آزمایش‌ها، در جدول ۴ ارائه شده است. بر این اساس، خاک مسیر در حالت خشک، خیلی ساینده و در حالت اشباع، کمی ساینده ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۰: تصویری از کله حفار ماشین خط یک متروی تبریز و ابزارهای آن

در اشکال ۱۱ و ۱۲ به ترتیب تعداد ابزارهای مصرفی و درصد تأخیرات ناشی از ساینده‌گی خاک تا ایستگاه ۱۲ نشان داده شده است. در این تخمین، مدت زمان لازم برای حفاری هر رینگ (۱/۴ متر) و نصب قطعات بتنی نگهداری تونل برابر به‌طور متوسط برابر با ۶۰ دقیقه و هر شیفت کاری در این کارگاه برابر با ۱۲ ساعت در نظر گرفته شده است. با توجه به حفاری تعداد ۲۶۵۰ رینگ در هر کدام از تونل‌ها، مشاهده می‌شود مدت زمان لازم برای انجام عملیات تعویض ابزارهای سایش یافته تقریباً دو برابر (در تونل سهند) و بیش از دو برابر (در تونل سیلان) مدت زمان لازم برای حفاری و نصب رینگ می‌باشد. سایر موارد شامل توقف‌های مربوط به تعطیلات، خرابی ماشین‌آلات و تعمیرات مکانیکی، تعمیرات الکتریکی، اتمام مواد مصرفی و مدت زمان انتظار ماشین حفار برای سیستم حمل و نقل ریلی خاک حفاری و غیره می‌شود.

آمارهای میدانی نشان می‌دهد در نیمه اول مسیر تا ایستگاه شماره ۱۲، در ماشین حفار سهند به تعداد ۲۶ بار (۲۰ بار در شرایط نرمال و ۶ بار در شرایط هایپرباریک) و در ماشین حفار سیلان به تعداد ۳۶ بار (۲۷ بار در شرایط نرمال و ۹ بار در شرایط هایپرباریک) عملیات تعویض ابزارهای حفاری انجام یافته است. نوع و تعداد ابزار مصرفی بر اساس موقعیت تعویض آن‌ها در هر کدام از ماشین‌های حفار در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مقایسه شکل ۵ و شکل ۳ نشان می‌دهد بین تغییرات درصد کوارتز معادل و تعداد ابزار مصرفی ارتباط مشخصی وجود ندارد. به عبارتی دیگر، تأثیر سایر عوامل در سایش ابزار قابل توجه است. تعداد ابزار مصرفی و مراحل تعویض در ماشین حفار سیلان نسبت به سهند که در شرایط زمین‌شناسی یکسانی قرار دارند بیشتر است. بنابراین علاوه بر شرایط زمین‌شناسی سایر عوامل از



(الف) نمونه درون سیلندر خاک در حالت خشک



(ب) نمونه درون سیلندر خاک در حالت اشباع



(ج) نمونه و صفحه سایشی بعد از آزمایش در حالت خشک



(ج) نمونه و صفحه سایشی بعد از آزمایش در حالت اشباع

شکل ۹: آزمایش سایش با دستگاه SATC، نمونه‌ی مسیر تونل خط یک متروی تبریز [۱]

## ۶- مشخصات عمومی طرح

بخش تونل‌های عمیق خط یک متروی تبریز از دو رشته تونل (شمالی و جنوبی) تشکیل شده که از زیر مرکز شهر عبور می‌نماید. این بخش بطول تقریبی ۸ کیلومتر، از سمت شرق و از ایستگاه شماره ۷ (کیلومتر ۶+۶۵۵/۶۰۰) واقع در میدان جانبازان شروع شده و در ایستگاه شماره ۱۶ (کیلومتر ۱۴+۷۲۷) واقع در میدان امام حسین به پایان خواهد رسید. اجرای تونل‌های دوقلو، به‌وسیله دو دستگاه ماشین حفار TBM-EPB با قطر ۶/۸۸ متر، به نام‌های سهند (تونل شمالی) و سیلان (تونل جنوبی) در حال انجام است. محور تونل‌ها در عمق حدود ۹ تا ۲۱ متری از سطح زمین قرار دارد. موضوع مطالعه این مقاله حداقل ایستگاه شماره ۷ تا ایستگاه شماره ۱۲ (کیلومتر ۱۰+۳۷۵) (تقریباً نیمی از مسیر) است.

## ۷- تأثیر ساینده‌گی خاک در روند حفاری

ساینده‌گی رسوبات مسیر تونل‌های خط یک متروی تبریز یکی از مسائل مهم و دخیل در راندمان انجام عملیات حفاری و میزان بهره‌وری ماشین‌های حفاری است. با توجه به قرارگیری ۵/۲۲ کیلومتر از ۸/۰۹ کیلومتر یعنی حدود ۶۵ درصد مسیر در زیر سطح آب‌زیرزمینی (از حد فاصل بین ایستگاه ۱۰ تا ۱۱ تا نزدیکی‌های انتهای مسیر)، انجام عملیات بازدید، تعویض و تعمیر ابزارهای حفاری در شرایط هایپرباریک انجام می‌گیرد. در این ماشین‌های حفار، از پنج نوع ابزار حفاری شامل دیسک‌های برنده، ابزارهای بیلچه‌ای، تراشنده، خراشنده و ابزارهای پیرامونی استفاده شده است. در شکل ۱۰ موقعیت این ابزارها در روی کله‌ی حفار نشان داده شده است. در جدول ۵ تصاویر ابزار حفاری و توضیحات مربوط به آن‌ها تشریح شده است.



جمله کیفیت ابزار، نوع و مقدار افزودنی‌های به‌سازی خاک، پارامترهای اپراتوری و تعویض به موقع ابزارهای ساییده شده نیز دخیل هستند. برای برآورد عمر مفید ابزار مورد استفاده، ابزار بیلچه‌ای که نسبتاً منظم و بصورت کامل تعویض شده‌اند انتخاب شده است. در شکل ۱۴، عمر مفید ابزار بیلچه‌ای مورد استفاده بر اساس کیفیت ساخت، در ماشین‌های حفار سهند و سبلان نشان داده شده است. متوسط عمر مفید ابزار بیلچه‌ای ساخت داخل، برابر ۲۵۸ متر و ابزار بازسازی شده، برابر ۱۳۹ متر برآورد می‌شود بنابراین جنس و کیفیت ساخت ابزار از پارامترهای تعیین‌کننده است.

برای مطالعه میدانی تأثیر پارامترهای زمین‌شناسی در عمر ابزارهای حفاری، نوع لایه‌های زمین‌شناسی، میانگین اعداد SPT در مقطع تونل در طول مسیر و تعداد ابزار مصرفی در محدوده خشک (بالای سطح آب‌زیرزمینی) و اشباع (زیر سطح

آب‌زیرزمینی) بررسی شد.

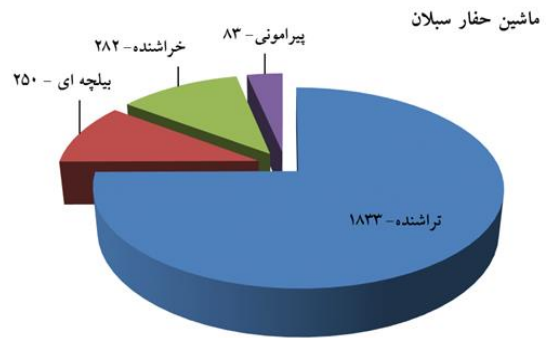
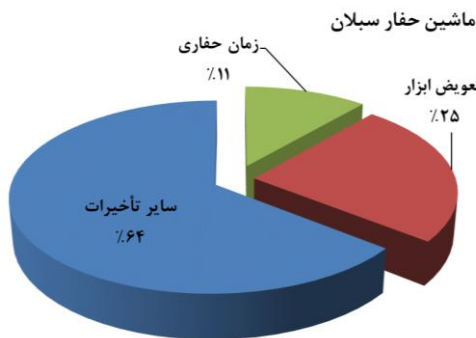
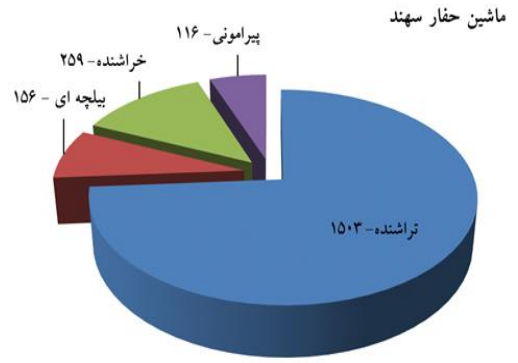
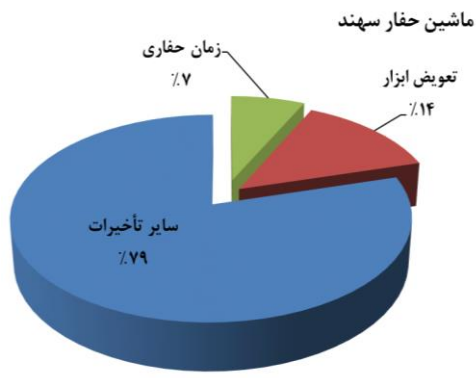
در شکل ۱۵ نیم‌رخ زمین‌شناسی مهندسی مسیر مورد حفاری، تغییرات SPT، مراحل تعویض و تعداد ابزار مصرفی در فواصل مختلف نشان داده شده است. مهمترین نکته‌ای که از بررسی پروفیل مذکور می‌توان به آن اشاره نمود عدم وجود ارتباط مشخص بین تغییرات دانه‌بندی خاک و SPT با تعداد ابزار مصرفی است. بطوری که در کیلومترهای اول که حاوی قطعه-سنگ و قلوه‌سنگ است انتظار سایش قابل توجه ابزار بدلیل شکستگی آن‌ها در اثر برخورد با قطعات سنگی بیشتر است ولی با توجه به حفاری دستگاه سبلان بعد از حفاری دستگاه سهند و اطلاع از ساینده‌گی خاک، برای پیشگیری از سایش ثانویه، تعداد بازبازدیدها و ابزار مصرفی نسبت به سهند بیشتر شده است.

جدول ۴: نتایج آزمایش سایش با دستگاه SATC نمونه‌ی مسیر تونل خط یک متروی تبریز.

شماره نمونه	شرایط آزمایش	وزن صفحه قبل از آزمایش (گرم)	وزن صفحه بعد از آزمایش (گرم)	کاهش وزن (میلی گرم)	وضعیت ساینده‌گی خاک
۱	خشک	۶۲۰/۸۹۰	۶۲۰/۵۲۰	۳۷۰	خیلی ساینده
۲	اشباع	۶۲۰/۷۵۰	۶۲۰/۶۹۰	۶۰	کم ساینده

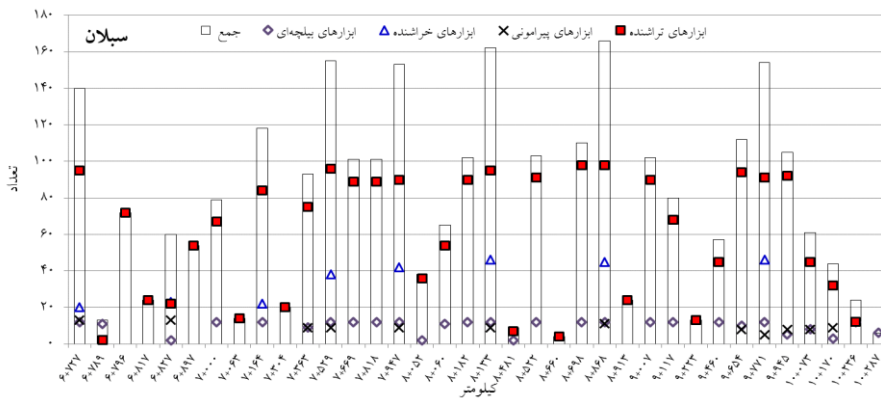
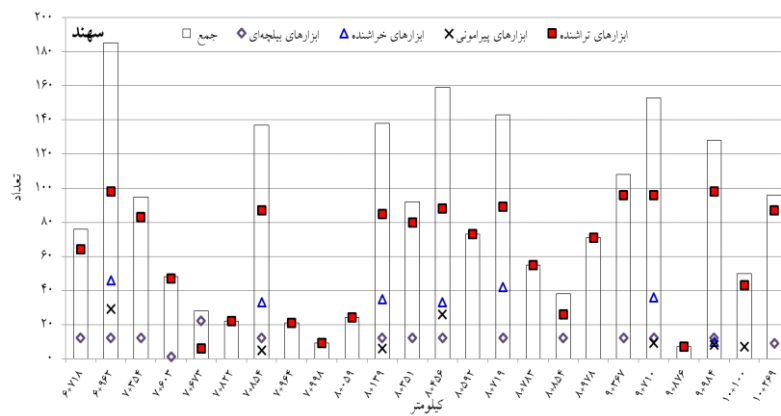
جدول ۵: ابزارهای حفاری ماشین‌های حفار متروی خط یک تبریز

تصویر ابزار قبل و بعد از مصرف	نوع ابزار
	<b>دیسک‌های برنده:</b> در متروی تبریز با توجه به برخورد با قطعات سنگی و قطعه‌سنگ، حدود ۲۲ عدد از ابزار خراشیده، بصورت قابل تعویض با ابزار دیسکی در نظر گرفته شده بود.
	<b>ابزار بیلچه‌ای:</b> تعداد ۱۲ عدد از این ابزار در قسمت محیطی کله‌حفار نصب می‌شوند و حفاری قسمت محیطی تونل را انجام می‌دهند. جهت حفاری این ابزارها عمود بر امتداد آن‌هاست.
	<b>ابزار تراشنده:</b> تعداد ۹۸ عدد از این ابزارها در بازوهای کله‌حفار با چیدمان شعاعی نصب می‌شوند و حفاری (تراشیدن) خاک را انجام می‌دهند. جهت حفاری این ابزارها عمود بر امتداد ابزار می‌باشد.
	<b>ابزار خراشنده:</b> تعداد ۴۶ عدد از این ابزارها بر روی بازوهای کله‌حفار با چیدمان شعاعی نصب می‌شوند و نقش خراشیدن خاک جبهه را به عهده دارند. جهت حفاری این ابزارها موازی با امتداد ابزار است.
	<b>ابزارهای پیرامونی:</b> ۲۰ عدد از این ابزارها در قسمت‌های محیطی کله‌حفار نصب می‌شوند. ابزارهای مرکزی ماشین حفار از اتصال این ابزارها به یکدیگر تشکیل شده است. این ابزارها نقش حفاری خاک پیرامون و قسمت مرکزی جبهه‌کار تونل را به عهده داشته و از ساینده‌گی پیرامون کله‌ی حفار جلوگیری می‌نمایند.



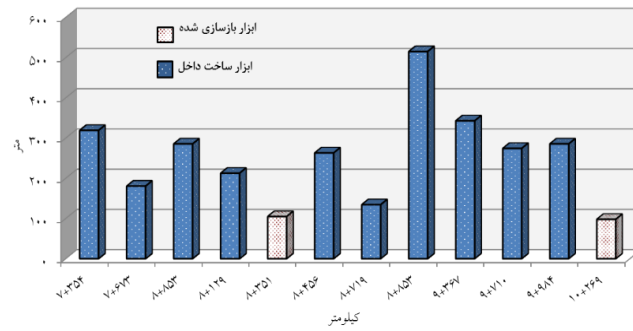
شکل ۱۲: برنامه زمانی عملیات حفاری خط یک متروی تبریز تا ایستگاه ۱۲

شکل ۱۱: تعداد ابزارهای تعویض شده در ماشین‌های حفار تونل‌های خط یک متروی تبریز تا ایستگاه ۱۲

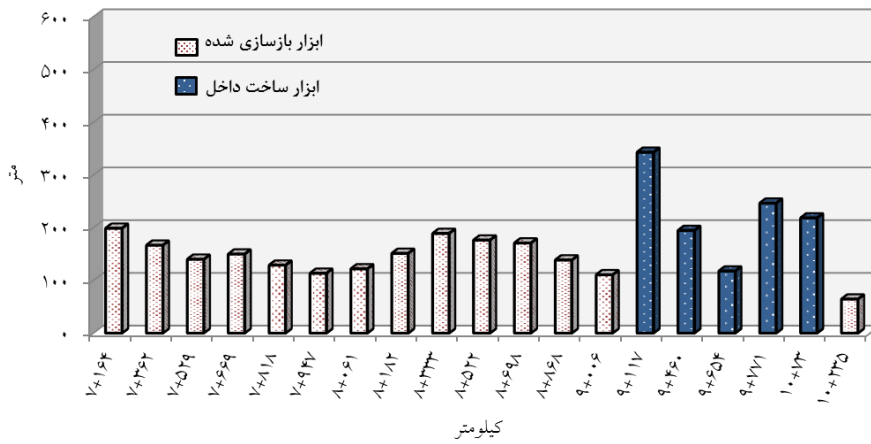


شکل ۱۳: تعداد ابزارهای مصرفی در فواصل مختلف (بالا) سهند (پایین) سیلان

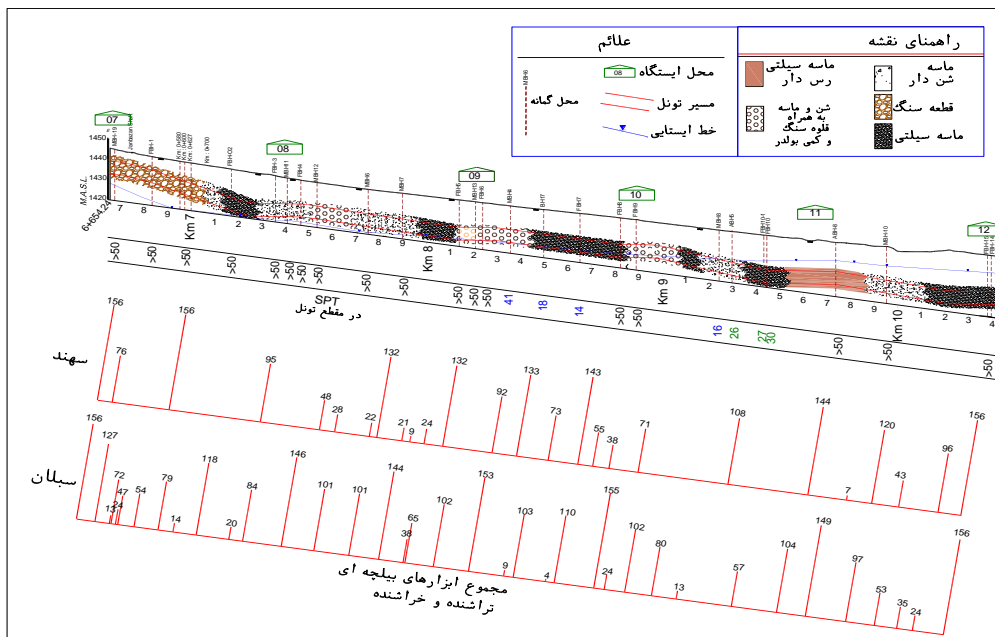
سهند - ابزار بیلچه‌ای



سبلان - ابزار بیلچه‌ای



شکل ۱۴: عمر مفید ابزار بیلچه‌ای در ماشین‌های حفار سهند و سبلان



شکل ۱۵: تغییرات مصرف ابزار حفاری در ماشین‌های سهند و سبلان بر اساس نیمرخ زمین شناسی.

### ۸- نتیجه‌گیری

نتایج مطالعات کانی‌شناسی، LCPC، سرشار و دستگاه SATC، ساینده‌ی رسوبات نیمه اول مسیر خط یک متروی تبریز را در حالت خشک در حد متوسط تا خیلی ساینده و در حالت اشباع در حد کم تا متوسط ساینده نشان داد. بررسی راندمان حفاری مسیر مورد مطالعه نشان داد میزان زمان لازم برای تعویض ابزار حفاری تقریباً دو برابر (در تونل سهند) و بیش از دو برابر (در تونل سبلان) مجموع زمان حفاری و نصب پوشش بتنی تونل است. بر اساس اطلاعات میدانی مسیر، فقط با تعیین تأثیر درصد کوارتز خاک نمی‌توان پیش‌بینی درستی از میزان ساینده‌ی ابزار حفاری به دست آورد. تأثیر سایر عوامل از جمله کیفیت ابزار مورد استفاده، تراکم خاک و آب‌زیرزمینی و میزان درصد کوارتز ممکن است در عمر مفید ابزار حفاری تأثیرگذار باشد. در محدوده با عدد SPT پایین و زیر سطح آب‌زیرزمینی، عمر ابزار حفاری افزایش نسبی دارد. بنا به دلایل زیر، بررسی مستقل تأثیر پارامترهای مختلف در ساینده‌ی خاک در بررسی‌های میدانی چندان قابل اطمینان نیست و برای حصول نتایج قابل اطمینان نیاز به داده‌های بیشتری در شرایط مختلف است:

۱. تنوع در نوع ابزار مورد استفاده بطور همزمان از لحاظ جنس، شکل و کیفیت ساخت
۲. عدم تعویض کامل و یکنواخت ابزارهای با دسترسی سخت و زمان‌بر (بوئیه ابزارهایی که بر روی کله‌حفار جوشکاری می‌شوند و یا ابزارهای پیرامونی)
۳. وجود میان‌لایه‌های با دانه‌بندی متفاوت و بوئیه درشت‌دانه و کاهش عمر ابزارها بدلیل شکستگی و لب‌پریدگی قسمت تنگستن-کاربید آنها
۴. عدم وجود شاخص و یا وسیله سنجش استاندارد اندازه‌گیری میزان ساینده‌ی ابزار در مراحل مختلف بازدید

### مراجع

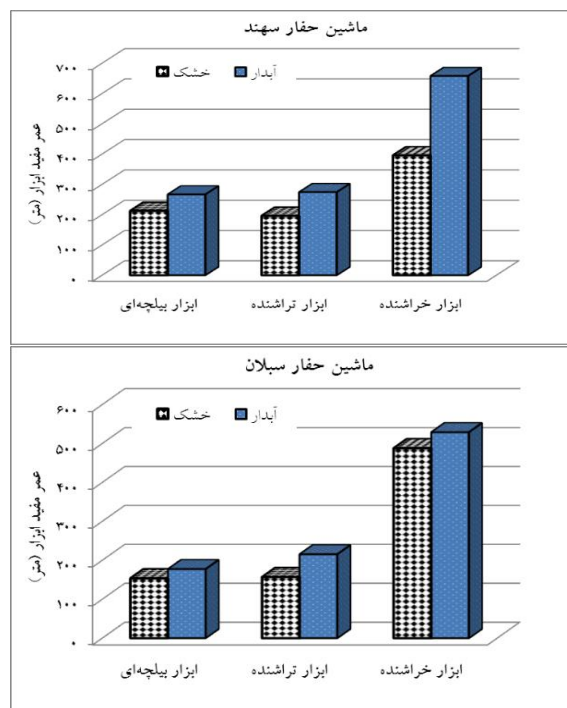
[1] Barzegari, G.; 2013; "Evaluation of soil abrasivity for mechanized EPB tunnelling applications, case study of Tabriz metro line 1", Ph.D Thesis, Tarbiat Modares University

[2] Alavi Garahbagh, E; Mooney, M.A.; Frank, G.; Walter, B. and Diponio, M.A.; 2013; "Periodic inspection of gauge cutter wear on EPB TBMs using cone penetration testing", Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 279-286. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.013>

[3] Jakobsen, P.; Langmaack, L.; Dahl, F. and

عدد SPT در بیشتر موارد بیش از ۵۰ و خاک مسیّر در حد خیلی متراکم است. در کیلومترهای ۸+۳۰۰ تا ۸+۸۰۰ میانگین عدد SPT به حدود ۱۶ می‌رسد ولی تغییر بارزی در مصرف ابزار مشاهده نمی‌گردد. از کیلومتر ۹+۰۰ تا ۹+۷۰۰، مقادیر SPT در محدوده ۱۶ تا ۳۰ قرار دارد و از این محدوده، تراز تونل در زیر سطح آب زیرزمینی قرار می‌گیرد. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است در کیلومترهای ۸+۸۵۳ و ۹+۱۱۷ به ترتیب در ماشین‌حفار سهند و سبلان، افزایش نسبی عمر مفید ابزار دیده می‌شود که می‌توان به کاهش تراکم خاک و وجود آب-زیرزمینی در این محدوده نسبت داد.

بررسی تأثیر آب‌زیرزمینی در عمر ابزار در طرح مورد مطالعه در شکل ۱۶ نشان می‌دهد در محدوده زیر سطح آب‌زیرزمینی نسبت به حالت خشک، عمر ابزار حفاری (بیلچه‌ای، تراشنده‌ها و خراشنده‌ها) تا حدودی بیشتر شده است. به عبارت دیگر، وجود آب زیرزمینی باعث کاهش ساینده‌ی خاک می‌شود. این مسئله با نتایج آزمایش دستگاه SATC همخوانی نسبی دارد. چون در مناطق خشک نیز حفاری با تزریق مواد اصلاح‌کننده خاک (فوم) به جبهه‌کار تونل انجام می‌گیرد و خاک مورد حفاری تا حد اشباع، مرطوب می‌گردد بنابراین امکان بررسی میزان تأثیر نقش آب‌زیرزمینی در ساینده‌ی خاک بصورت دقیق با استفاده از داده‌های میدانی موجود وجود ندارد.



شکل ۱۶: عمر ابزار حفاری در نقاط خشک و زیر سطح آب‌زیرزمینی.

- Underground Space Technology, 131-142.  
doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2012.06.015
- [11] Hamidi, J.K.; Shahriar, K.; Rezai, B. and Rostami, J. ; 2010; "*Performance Prediction of Hard Rock TBM Using Rock Mass Rating (RMR) System*", Tunnelling and Underground Sapce Technology, 333-345.  
doi:10.1016/j.tust.2010.01.008
- [12] Hassanpour, J.; Rostami, J. and Zhao, J. ;2011; "*A New Hard Rock TBM Performance Prediction Model for Project Planning*", Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 595-603.
- [13] Toth, A.; Gong, Q. & Zhao, J.; 2013; "Case studies of TBM tunneling performance in rock-soil interface" Tunnelling and Underground Space Technology, 140-150.  
doi:10.1016/j.tust.2013.06.001
- [14] Budiniski, K.G.; 2007; "*Guide to Friction, Wear and Erosion Testing*", West Conshohocken: ASTM.
- [15] Budiniski, K.G.; 2011; "*Adhesive Transfer to Abrasive Particles in Abrasion Testing*", Wear, 271, 1258-1263.
- [16] Zum Gahr, K.; 1998; "*Wear by Hard Particles*", Tribology International, 31(10), 587-596.
- [17] Thuro, K. & Kasling, H.; 2009; "*Classification of The Abrasiveness of Soil and Rock*", Geomechanics and Tunnelling, 179-188.  
doi:10.1002/geot.200900012
- [18] Barzegari, G.; Uromeihy, A. and Zhao, J.; 2015; "*Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects*", Tunnelling and Underground Space Technology, 48, 43-57.
- Breivik, T.; 2013; "*Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM*", Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 41-44.  
doi:10.1016/j.tust.2013.07.021
- [4] Nilsen, B.; Dahl, F.; Holzhauser, J. and Raleigh, P.; 2007; "*New Test Methodology for Estimating the Abrasiveness of Soils for TBM Tunnelling*", Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings (pp. 104-116).
- [5] Alavi Garahbagh, E; Rostami, J. and Palmino, A. M.; 2011; "*New Soil Abrasion Testing Method for Soft Ground Tunneling Application*", Tunnelling and Underground Space Technology, 26, 604-613.  
doi:10.1016/j.tust.2011.04.003
- [6] Rostami, J.; Alavi Garahbagh, E.; Palmino, A. and Mosleh, M.; 2012; "*Development of Soil Abrasivity Testing for Soft Ground Tunneling*", Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 245-256.  
doi:10.1016/j.tust.2011.11.007
- [7] Barzegari, G.; Uromeihy, A. & Zhao, J.; 2012; "*A Newly Developed Soil Abrasion Testing Method for Tunnelling Using Shield Machines*" Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology, 46, 63-74.
- [8] Jakobsen, P.; Langmaack, L.; Dahl, F., and Breivik, T.; 2013; "*Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM*", Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 41-44.  
doi:10.1016/j.tust.2013.07.021
- [9] Bieniawski, Z.; Celada, C. & Galera, J.; 2007; "*Predicting TBM Excavation*", Tunnels and Tunnelling International, 25, 28.
- [10] Delisio, A.; Zhao, J. and Einstein, H.; 2013; "*Analysis and Prediction of TBM Performance in Blocky Rock Conditions*" Tunnelling and