

## ارزیابی ساینده‌ی خاک‌ها در حفاری مکانیزه تونل‌های شهری

### با نگرشی ویژه به خط یک قطار شهری تبریز

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

دریافت مقاله: ۹۰/۸/۱۷

پذیرش مقاله: ۹۱/۶/۱

#### چکیده

یکی از عوامل مهم در حفاری مکانیزه تونل‌های خاکی، اثر ساینده‌ی خاک‌ها و سنگ‌دانه‌ها بر روی ابزارهای برشی و سایر قسمت‌های کله‌حفار می‌باشد. روش‌های متعددی برای اندازه‌گیری درجه ساینده‌ی سنگ‌ها وجود دارد ولی در مورد خاک روش‌های تعیین ساینده‌ی محدودتر است. وجود این محدودیت در ارزیابی مناسب درجه ساینده‌ی خاک‌ها، یکی از چالش‌های علم زمین‌شناسی مهندسی در صنعت حفاری و تونل‌سازی مکانیزه می‌باشد. لذا لازم است با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و استفاده از اطلاعات موجود و عملی نسبت به بررسی این موضوع اقدام شود. در این مقاله با انجام آزمون‌های مختلف LCPC به بررسی تأثیر برخی از پارامترهای مهم و مؤثر در ساینده‌ی خاک‌ها (دانه‌بندی، درصد کوارتز معادل و درصد رطوبت) پرداخته شده و سپس وضعیت خاک مسیر خط یک متروی تبریز از لحاظ ساینده‌ی ارزیابی شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده با افزایش اندازه‌ی دانه‌های خاک، میزان ساینده‌ی افزایش می‌یابد. تأثیر درصد رطوبت در همه نمونه‌های مورد آزمایش یکسان نبوده، در تعدادی باعث افزایش و در تعدادی باعث کاهش میزان ساینده‌ی می‌شود. بررسی تأثیر درصد کوارتز معادل در میزان ساینده‌ی خاک نشان داد که با افزایش این پارامتر، بسته به اندازه دانه‌های خاک، میزان ساینده‌ی به صورت توانی افزایش می‌یابد. بررسی میزان ساینده‌ی خاک مسیر خط یک متروی تبریز، نشان داد خاک مذکور در حالت خشک، خیلی ساینده و در حالت اشباع در حد متوسط ساینده‌ی است.

**کلید واژه‌ها:** حفاری مکانیزه تونل، زمین‌شناسی مهندسی، سایش *TBM*، ساینده‌ی خاک

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشیارگروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس [uromeia@modares.ac.ir](mailto:uromeia@modares.ac.ir)

\* مسئول مکاتبات

## ۱. مقدمه

(Nilsen et al., 2007)، پدیده سایش در حفاری مکانیزه تونل‌ها را به دو نوع مختلف اولیه و ثانویه تقسیم کرده‌اند. سایش اولیه شامل ساییدگی ابزارهای برش بوده و سایش ثانویه که متعاقب سایش اولیه است شامل ساییدگی قسمت‌های نگهدارنده و پایه ابزارهای برش و سایر نقاط دستگاه حفار در تماس با خاک حفاری شده می‌باشد.

برای اندازه‌گیری درجه ساییدگی خاک به ویژه در حفاری مکانیزه تونل، تاکنون هیچ روش استاندارد توسط ISRM و یا سایر استانداردهای بین‌المللی پیشنهاد نشده است (Thuro et al., 2006). روش‌های موجود برای ارزیابی قابلیت ساییدگی خاک‌ها بر خلاف سنگ‌ها بسیار محدود بوده و به آزمون‌های LCPC و SAT محدود می‌شوند. البته لازم به ذکر است آزمون LCPC مختص اندازه‌گیری ساییدگی سنگدانه‌ها (Aggregate) می‌باشد. آزمون‌های مذکور با توجه به اینکه مختص کارهای تونلی و ابزارهای حفاری تونل نمی‌باشند دارای کاستی‌های فراوانی بوده و نتایج قابل اطمینانی از ساییدگی خاک‌ها در شرایط حفاری مکانیزه ارائه نمی‌کنند. شایان ذکر است تجهیزات انجام هیچ کدام از آزمون‌های مذکور در سال‌های قبل، در داخل کشور موجود نبوده و اطلاعات به دست آمده محدود به مقالات و کتب موجود است.

مسئله ساییدگی خاک‌ها در حفاری مکانیزه تونل‌های شهری، با ایده ارائه روشی مناسب جهت تخمین نسبتاً درستی از میزان ساییدگی خاک‌ها و پیش‌بینی میزان سایش ابزارهای حفاری تونل، توسط محققان مختلف و تولیدکنندگان صنعتی ابزارهای حفاری در پروژه‌های مختلف سراسر دنیا بررسی شده است (Nilsen et al., 2007; Langmaak et al., 2010; Plinninger et al., 2002 and 2003; Thuro et al., 2009; Alavi et al., 2012; gharabagh et al., 2011; Rostami et al., 2012). دلیل این امر تجربیات مختلف در پروژه‌های حفاری مکانیزه تونل‌های شهری و تأخیرات زیاد آنها به دلیل سایش خاک بوده که

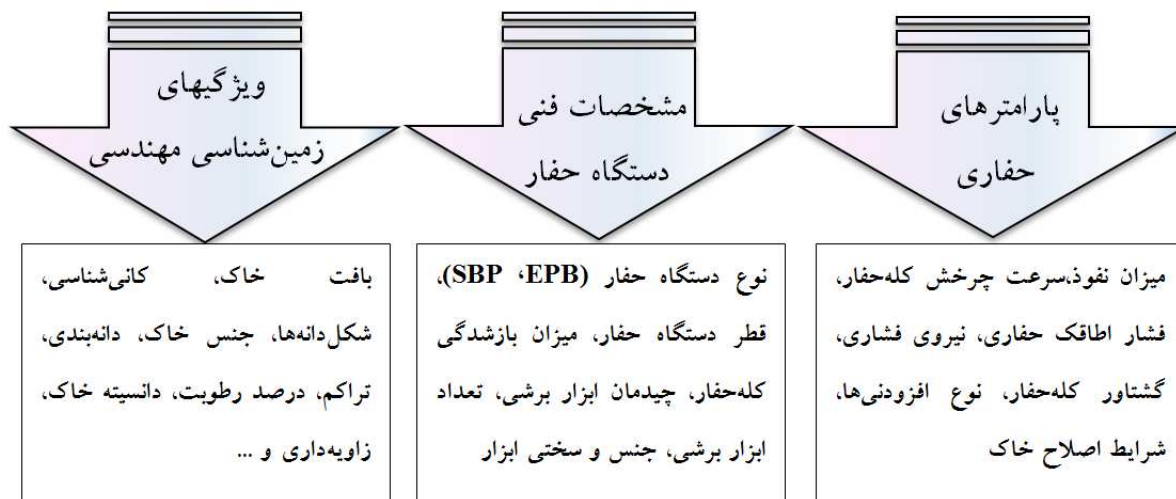
توقف‌های طولانی مدت به منظور تعویض و تعمیر ابزارهای حفاری در شرایط زیر سطح آب زیرزمینی به همراه داشته است. داشتن تخمین مناسب از قابلیت ساییدگی خاک، ضمن امکان انتخاب و استفاده بهینه از ابزارهای حفاری می‌تواند در کاهش تعداد بازدیدهای ابزارهای حفاری و سایش ثانویه که زمان‌بر و پرهزینه هستند مؤثر باشد.

## ۲. روش‌های اندازه‌گیری درجه ساییدگی خاک‌ها

به طور کلی مسئله ساییدگی در حفاری مکانیزه تونل توسط سه عامل اصلی شامل (۱) پارامترهای حفاری، (۲) مشخصات فنی دستگاه حفار، (۳) ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی کنترل می‌شود (شکل ۱). ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی یکی از پارامترهای اساسی در ساییدگی خاک‌ها به حساب می‌آید. از جمله ویژگی‌های زمین‌شناختی مهندسی دخیل در ساییدگی خاک‌ها می‌توان به ترکیب کانی‌شناختی، دانه‌بندی و زاویه‌داری، تراکم و میزان رطوبت آنها اشاره کرد.

## ۲-۱. آزمون سختی موس

این آزمون از ابتدایی‌ترین روش‌های بررسی سختی اجسام است، که توسط زمین‌شناس معروف، موس در سال ۱۸۲۴ بنیان نهاده شده است. سختی خاک یا سنگ متناسب با میزان فراوانی نوع کانی، سختی خاص خود را نشان می‌دهد. سختی یک کانی مقاومت آن را در مقابل سایش بیان می‌کند. بنابراین سنگ‌ها یا خاک‌های دربرگیرنده کانی‌های سخت، مقاومت بیشتری نسبت به سایش از خود نشان می‌دهند. در میان کانی‌های متداول، میکا و کلسیت خیلی نرم (سختی ۲/۵ و ۳ به ترتیب)، فلدسپار، پیروکسن و آمفیبول دارای سختی متوسط (سختی ۶) هستند. کوارتز و گارنت خیلی سخت (به ترتیب ۷ و ۷/۵) هستند (Nilsen et al., 2007). این آزمون بر روی سنگدانه‌های بزرگ گراول و قلوه‌سنگ‌ها در مصالح خاکی قابل انجام است.



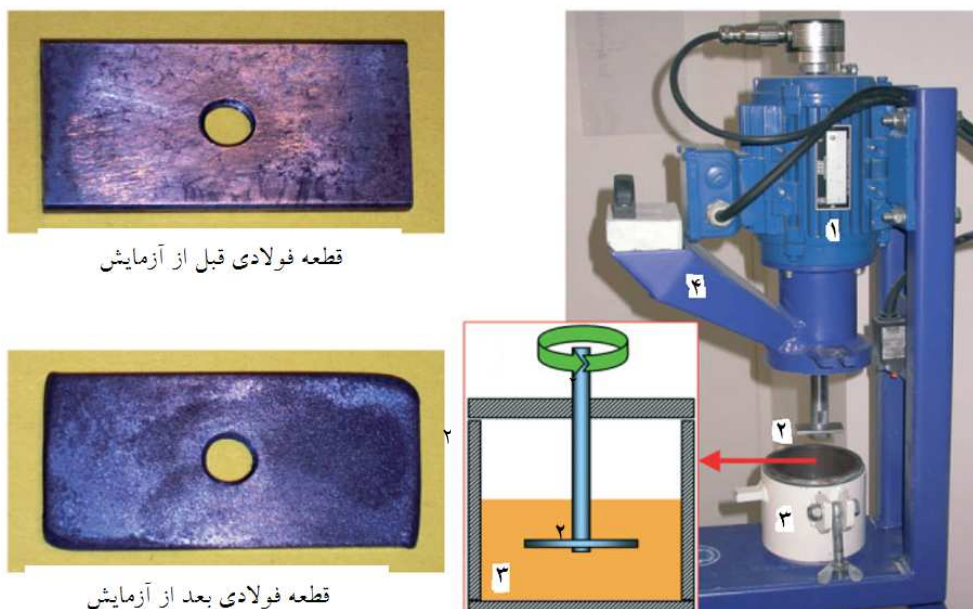
شکل ۱. پارامترهای مؤثر در سایش خاک در حفاری مکانیزه تونل

## ۲-۲. آزمایش LCPC

## ۲-۳. آزمایش سرشار

آزمایش سرشار (Cerchar) در سال ۱۹۷۱ توسط موسسه Cerchar فرانسه به منظور تعیین قابلیت و میزان ساینده‌ی سنگ ابداع شد. آزمایش مذکور یکی از آزمایش‌های ویژه برای تعیین درجه ساینده‌ی سنگ‌های سخت در اروپای غربی است. در این آزمایش بر روی سطح صاف نمونه سنگی، ۵ میخ فولادی (پین) در جهات مختلف کشیده شده و میزان ساینده‌ی (مسطح‌شدگی) نوک میخ در زیر میکروسکوپ با دقت یک دهم میلی‌متر اندازه‌گیری شده و میانگین آنها به عنوان شاخصی برای ساینده‌ی سنگ در نظر گرفته می‌شود (West, 1989). این آزمایش بر روی سنگدانه‌های بزرگ مصالح خاکی نیز قابل انجام است. در شکل ۳ تصویری از نحوه انجام آزمایش سرشار نشان داده شده است. بر اساس این آزمایش، سنگ‌ها به شش رده مختلف از غیر ساینده تا شدیداً ساینده تقسیم می‌شوند که در جدول ۱ نشان داده شده است.

دستگاه آزمایش LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) نوعی آزمون ساینده‌ی مرجع به شمار می‌آید که در استاندارد P18-579 (۱۹۹۰) فرانسه تشریح شده است. دستگاه آزمایش LCPC شامل یک موتور با قدرت ۷۵۰ وات است که برای چرخش قطعه فولادی مستطیلی شکل درون ظرف نگهدارنده خاک استفاده می‌شود. اندازه قطعه فولادی ۵۰×۲۵×۵۰ میلی‌متر و از نوع استاندارد با سختی راکول برابر با B60-75 می‌باشد. قطعه مذکور بعد از هر آزمایش تعویض می‌شود. بر طبق استاندارد،  $\pm 2$  گرم از خاک خشک شده به وسیله هوا با اندازه دانه‌های ۴ تا ۶/۳ میلی‌متر از طریق لوله قیفی شکل در درون ظرف نگهدارنده خاک ریخته می‌شود. سپس تیغه فلزی درون خاک به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۴۵۰۰ دور در دقیقه می‌چرخد. برای تخمین میزان سایش، قطعه فولادی قبل و بعد از انجام آزمایش LCPC توزین می‌گردد (شکل ۲، مقایسه قطعه فولادی قبل و بعد از آزمایش). میزان کاهش جرم قطعه فولادی (برحسب گرم بر تن) به عنوان ساینده‌ی خاک تعریف می‌شود (Thuro et al., 2006).

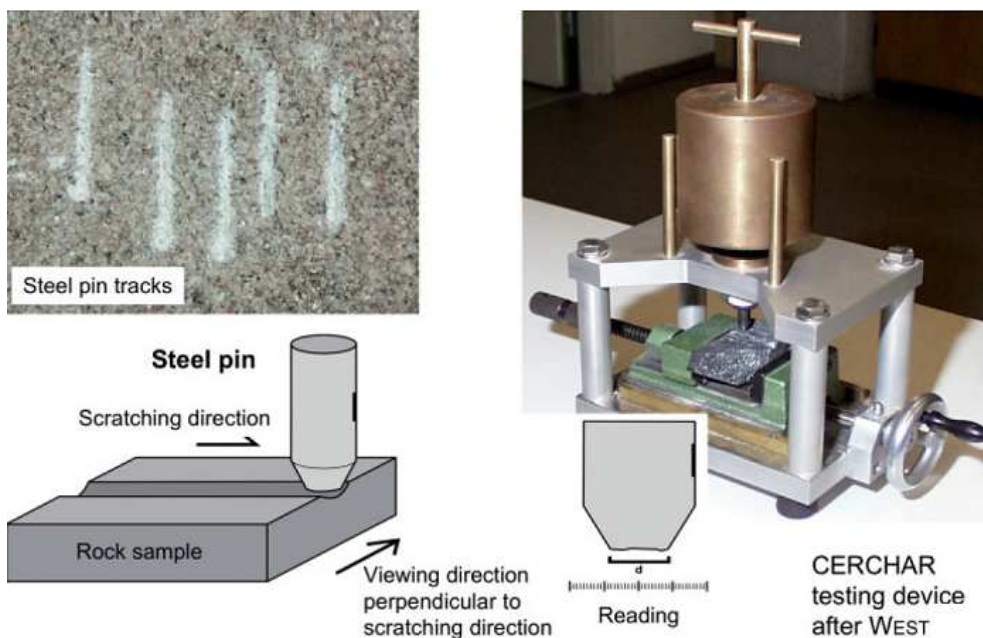


قطعه فولادی قبل از آزمایش

قطعه فولادی بعد از آزمایش

۱- موتور ۲- قطعه فولادی ۳- ظرف خاک (۹۳×۱۰۰ میلی متر) ۴- لوله قیفی

شکل ۲. دستگاه آزمایش LCPC و قطعه فولادی آن (Thuro et al., 2006)



شکل ۳. تصویر دستگاه سرشار ابداعی (West, 1989)

#### ۲-۴. آزمایش سایش NTNU و SAT

آزمون SAT در شکل ۴ نشان داده شده است. عدد سایش AV برابر با میزان کاهش وزن قطعه ساییده شده از جنس تنگستن کاربید به میلی گرم، بعد از ۱۰۰ دور چرخش در مدت ۵ دقیقه است. عدد AVS برابر با میزان کاهش وزن قطعه فولادی بعد از ۲۰ دور چرخش در مدت ۱ دقیقه است. عرض قطعه سایشی

آزمایش ساینده NTNU برای ارزیابی قابلیت حفاری سنگها به وسیله حفاری ضربه ای در آزمایشگاه زمین شناسی مهندسی موسسه فناوری نروژ (NTH) در سال ۱۹۶۰ ابداع شده است (Lien, 1961). طرح شماتیک آزمون سایش نروژی و

متداول ۱/۵ تا ۵ دور بر دقیقه در زمین نرم می‌چرخد. در نتیجه سرعت چرخش زیاد ۴۵۰۰ دور در دقیقه، سایش حاصل از LCPC عمدتاً در اثر ضربات و سرعت زیاد بین قطعه فولادی و مصالح مورد آزمایش است.

**جدول ۲. مقایسه دو آزمایش SAT و LCPC**

(Nilsen et al., 2007)

مورد	آزمایش SAT	آزمایش LCPC
نوع مصالح مورد آزمایش	خاک	سنگدانه‌ها
اندازه دانه‌بندی نمونه	>۴ میلی‌متر رس، سیلت، ماسه، شن (بخشی)	۴ تا ۶/۳ میلی‌متر شن (بخشی)
قطعه مورد سایش	فولاد ابزار برشی	فولاد نرم
سرعت چرخش سطح تماس بین مصالح و قطعه سایشی	۲۰ دور در دقیقه	۴۵۰۰ دور در دقیقه
عوامل ایجاد سایش	اصطکاک در سرعت کم سطح تماس	اصطکاک در نتیجه برخورد ضربات و در اثر سرعت زیاد در سطح تماس

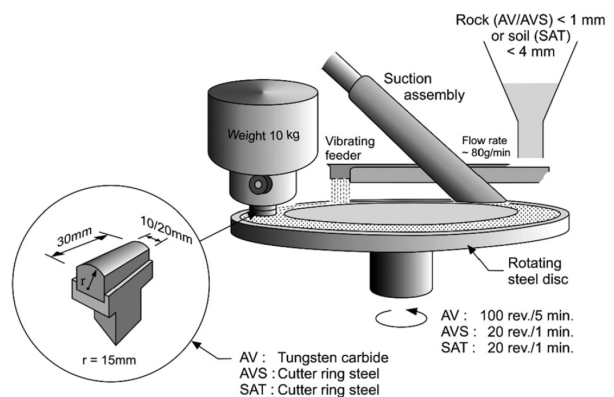
**۳. مشخصات عمومی طرح مورد مطالعه**

شبکه قطار شهری تبریز شامل چهار مسیر با طول کلی ۶۰ کیلومتر طراحی شده است. مسیر خط یک متروی تبریز از سمت شرق به غرب شهر و بخش تونل عمیق آن از زیر مرکز شهر عبور خواهد کرد. این بخش (تونل عمیق)، از ایستگاه شماره ۷ از کیلومتر ۰/۲ + ۸۵ شروع شده و در ایستگاه شماره ۱۷ در کیلومتر ۸/۳ + ۵۵ به پایان می‌رسد (شکل ۵).

اجرای تونل‌های دوقلو با فاصله حدود ۶ متر از یکدیگر، به وسیله دو دستگاه ماشین حفار تونل TBM سپردار، به روش فشار تعادل زمین (EPB) ساخت شرکت NFM فرانسه در حال انجام است که حدود ۵۰ درصد از مسیر تا زمان نگارش این مقاله به پایان رسیده است. قطر حفاری شده تونل‌ها ۶/۸ متر بوده و قطر داخلی تونل‌ها پس از نصب جداره (Lining) برابر

در آزمون‌های NTNU و AVS، برابر با ۱۰ میلی‌متر است (Nilsen et al., 2007).

Nilsen et al. (2007)، روش جدیدی را برای ارزیابی سایش خاک ارائه کرده‌اند که مشابه NTNU در سنگ‌ها بوده و به عنوان SAT معرفی کرده‌اند. تفاوت عمده‌ی آن با آزمایش NTNU در سنگ‌ها، استفاده از خاک تا اندازه ذرات ۴ میلی‌متر است. برای این منظور از یک قطعه سایشی با جنس فولاد و عرض برابر با ۲۰ میلی‌متر استفاده می‌شود.



**شکل ۴. طرح شماتیکی انجام آزمایش ساینده‌ی AV، AVS و SAT**

(Dahl et al., 2012)

**جدول ۱. رده‌بندی ساینده‌ی بر اساس نتایج آزمایش**

سرشار (Thuro et al., 2009)

ردیف	شاخص ساینده‌ی سرشار	میزان ساینده‌ی
۱	<۰/۳	غیر ساینده
۲	۰/۳-۰/۵	ساینده‌ی بسیار کم
۳	۰/۵-۱/۰	ساینده‌ی کم
۴	۱/۰-۲/۰	متوسط ساینده
۵	۲/۰-۴/۰	خیلی ساینده
۶	۴/۰-۶/۰	به شدت ساینده

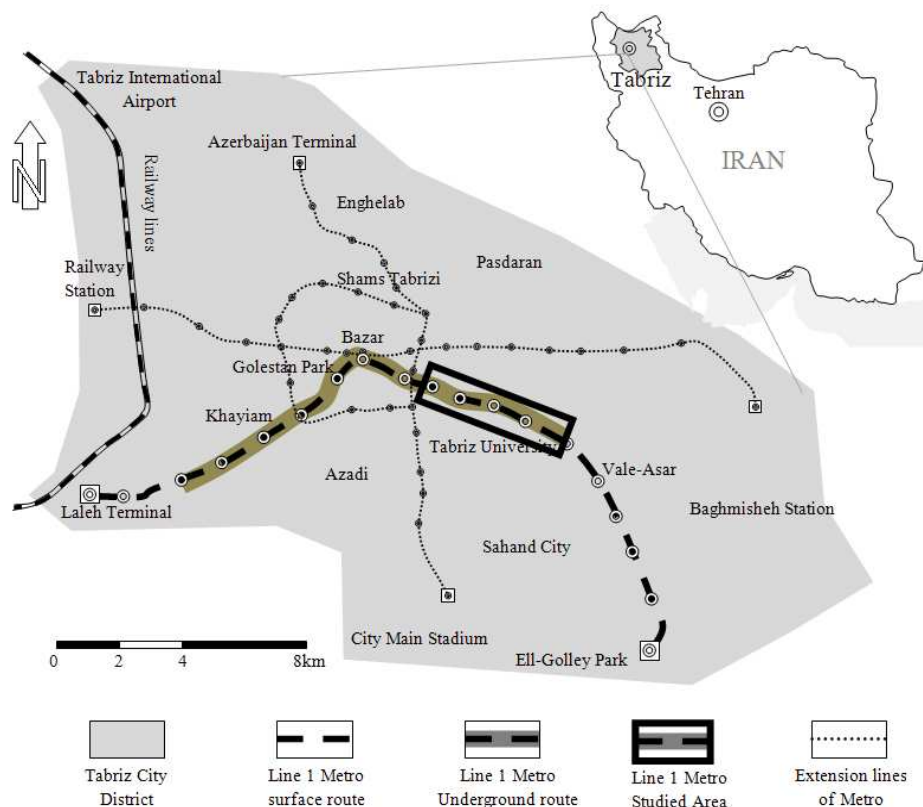
جدول ۲ مقایسه دو آزمایش SAT و LCPC را نشان می‌دهد. در مقایسه با LCPC، آزمایش SAT به شرایط حفاری تونل نزدیک‌تر است. چون که کله‌حفار با سرعت نسبتاً کم به صورت

**سنگ‌های آذرین** و آواری اشاره کرد. قسمت اعظم محدوده مورد مطالعه به وسیله رسوبات آبرفتی جوان پوشیده است ولی حفاری‌های انجام شده نشان می‌دهد که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی زرد رنگ و لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری رنگ متعلق به سازند باغمیشه وجود دارند. این رسوبات آبرفتی از شمال توسط رسوبات قرمز رنگ تخریبی قاره‌ای کوه‌های عون‌ابن‌علی به سن میوسن میانی و از جنوب توسط کنگلومرای پلیوسن احاطه شده‌اند. رسوبات قرمز رنگ دارای طبقات گچی و نمکی بوده و رین (۱۹۳۵) این رسوبات را جزو سازند قرمز فوقانی معرفی کرده است. این سازند غالباً از ماسه‌سنگ، مارن، سیلتستون و کنگلومرا همراه با طبقات گچی و نمکی تشکیل یافته است. در شکل ۶ نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر تبریز نشان داده شده است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

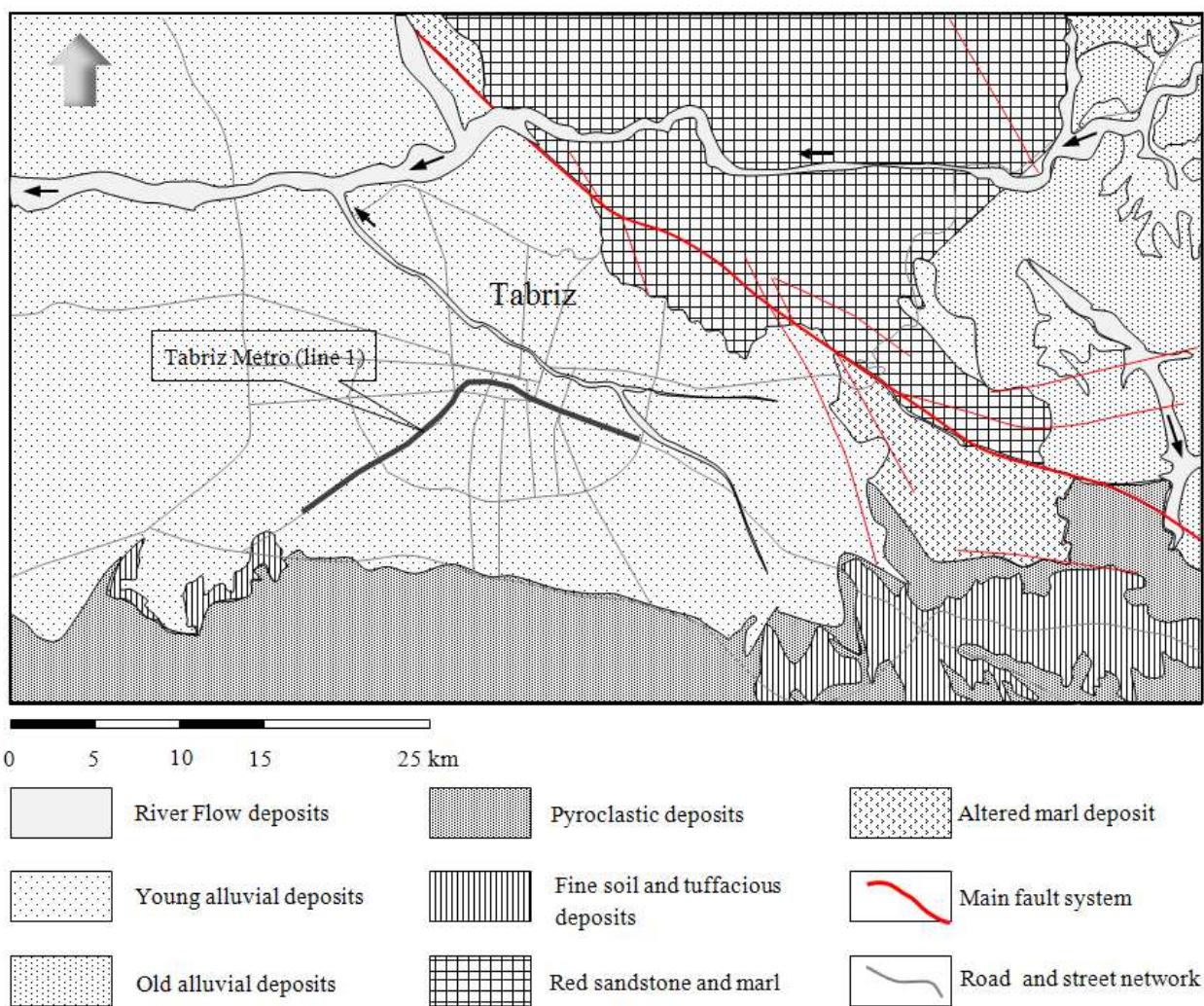
با ۶ متر می‌شود. عمق تونل از ۸ متر در نقطه شروع تا ۲۲ متر در محدوده مرکز شهر تغییر می‌کند. جداره تونل از قطعات پیش ساخته بتن مسلح بوده که در کارخانه‌ای جداگانه ساخته شده و برای نصب توسط دستگاه ماشین حفار به محل ایستگاه شماره ۷ و ۱۲ (شفت‌های مسیر تونل) منتقل می‌شوند. ضخامت قطعات بتنی پیش ساخته ۳۰ سانتی‌متر بوده و هر حلقه آن (Ring) از ۵+۱ قطعه (۵ قطعه + یک قطعه کلید) تشکیل شده است.

#### ۴. زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل

شهر تبریز بر روی جلگه وسیعی در حدود ۷۰ کیلومتری شرق دریاچه ارومیه در حوزه آبریز آجی‌چای بنا شده است و شاخه‌ای از آجی‌چای به نام میدان‌چای یا مهران‌رود از مرکز شهر می‌گذرد. از نظر سنگ‌شناسی، واحدهای سنگی ناحیه تبریز شامل طبقات رسوبی، سازند آتشفشانی و تخریبی می‌باشد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به رسوبات مارنی و



شکل ۵. جانمایی مسیرهای قطار شهری تبریز

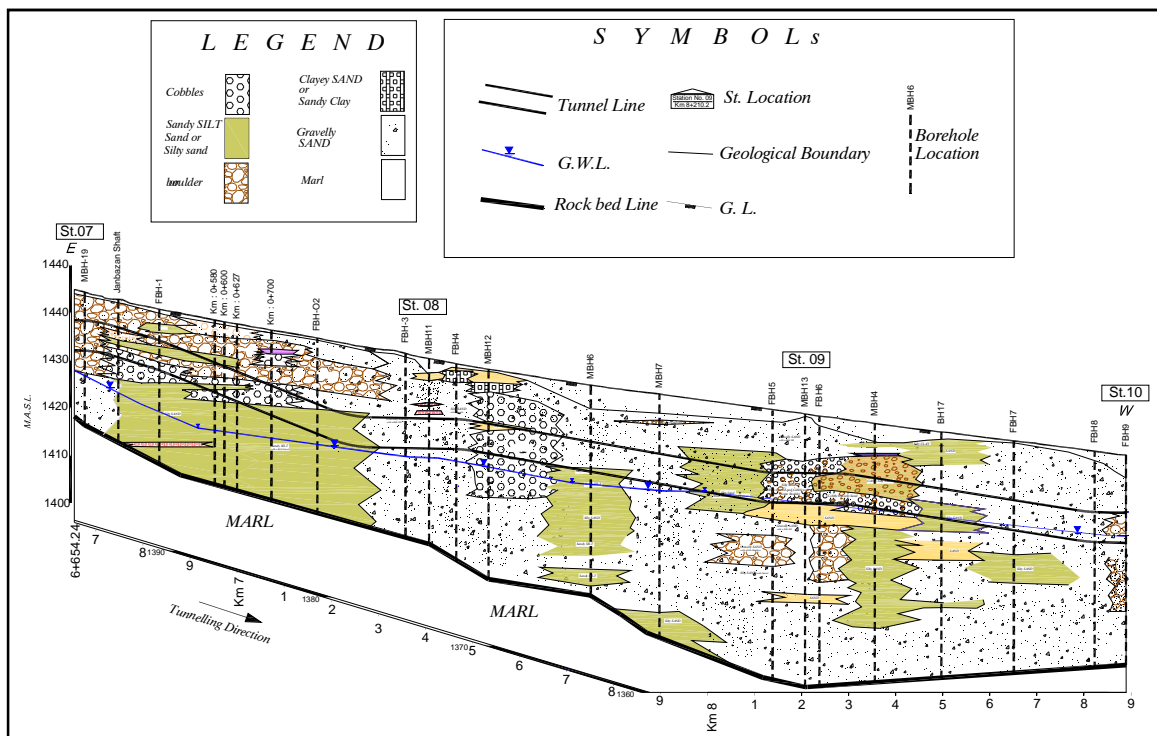


شکل ۶. نقشه زمین‌شناسی محدوده شهر تبریز (برگرفته از سازمان نقشه زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۲)

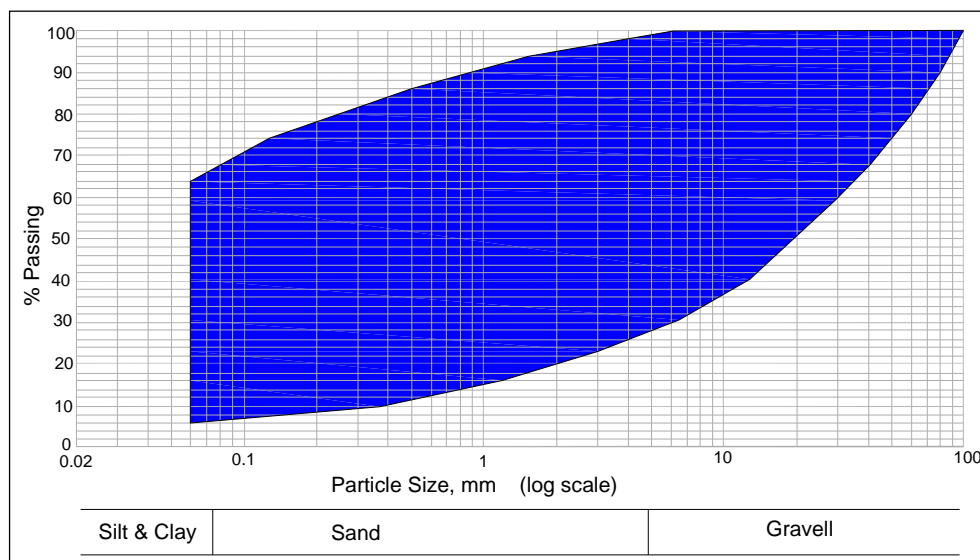
ژئوتکنیکی، بیشتر در محدوده ماسه سیلتی و شنی همراه با قلوه‌سنگ و قطعه‌سنگ قرار دارد. عمق سطح آب‌زیرزمینی در قسمت شرقی تونل (سمت شروع حفاری) حدود ۱۵ متر زیر تراز کف تونل قرار دارد، ولی بعد از حدود ۱/۵ کیلومتر به سمت غرب، تراز تونل به تدریج در زیر سطح ایستابی قرار می‌گیرد (بر اساس گزارش‌های زمین‌شناختی مسیر و اطلاعات حاصل از فاز اجرا). شکل ۷ نیم‌رخ زمین‌شناسی مسیر در محدوده‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در شکل ۸ محدوده توزیع دانه‌بندی خاک مسیر نشان داده شده است.

مسیر تونل از رسوبات آبرفتی با ضخامت بیش از ۳۰ متر تشکیل شده است. محور تونل در این محدوده در عمق حدود ۱ تا ۲۰ متر قرار دارد. حفاری‌های انجام شده نشان می‌دهند که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی زرد رنگ و لایه‌های مارنی-شیلی خاکستری رنگ متعلق به سازند باغمیشه وجود دارد. رسوبات آبرفتی مسیر از لحاظ دانه‌بندی بسیار متنوع و با جورشدگی ضعیف بوده و دارای گردشدگی متوسط تا زیاد و کرویت متوسط هستند.

لایه‌بندی رسوبات در طول مسیر ممتد نبوده و در اکثر نقاط حاوی عدسی‌های رسوبی درشت‌دانه و ریزدانه در امتدادهای مختلف است. دانه‌بندی رسوبات بر اساس مطالعات



شکل ۷. نیمرخ زمین شناسی مسیر در محدوده مورد مطالعه (بر اساس گزارش سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸)



شکل ۸. محدوده توزیع دانه بندی خاک مسیر مورد مطالعه (بر اساس گزارش سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸)

۵. بررسی سایندهای خاکها با استفاده از دستگاه LCPC  
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در میزان سایندهای خاکها از دستگاه LCPC واقع در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه پلی تکنیک فدرال در شهر لوزان کشور سوئیس

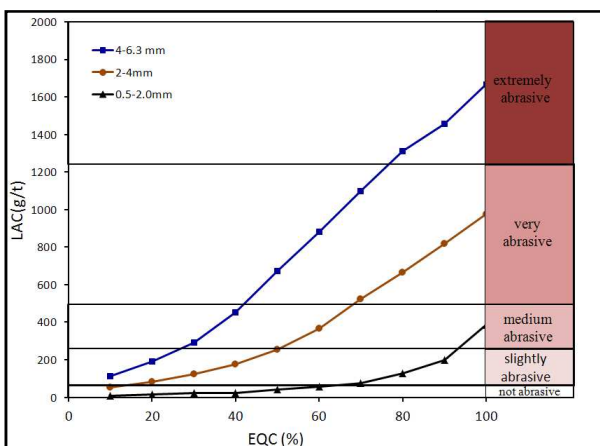
۵. بررسی سایندهای خاکها با استفاده از دستگاه LCPC  
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در میزان سایندهای خاکها از دستگاه LCPC واقع در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه پلی تکنیک فدرال در شهر لوزان کشور سوئیس

۵. بررسی سایندهای خاکها با استفاده از دستگاه LCPC  
به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در میزان سایندهای خاکها از دستگاه LCPC واقع در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه پلی تکنیک فدرال در شهر لوزان کشور سوئیس





شکل ۱۰. نمونه‌های آزمایشی با دانه‌بندی ۶/۳-۴ میلی‌متر (A) سنگ آهک (B) کوارتز (C) مخلوط کوارتز ۳۰ درصد (D) مخلوط کوارتز ۵۰ درصد



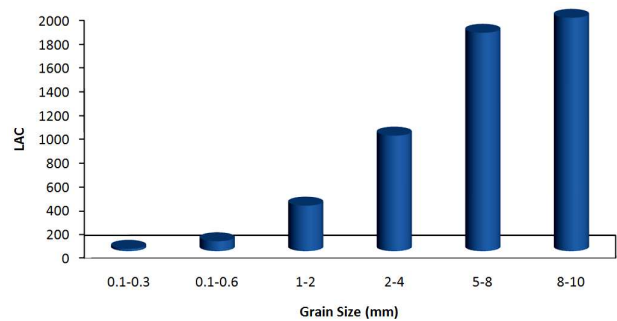
شکل ۱۱. نمودار تغییرات ضریب ساینده‌گی LCPC (LAC) با افزایش درصد کوارتز و اندازه دانه‌های خاک

۳-۵. تأثیر آب در قابلیت ساینده‌گی خاک‌ها

برای بررسی تأثیر آب بر میزان ساینده‌گی خاک‌ها، بر روی نمونه‌های مختلف موجود در دو حالت خشک و اشباع (مغروق در آب)، آزمایش LCPC انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است.

۱-۵. تأثیر دانه‌بندی بر قابلیت ساینده‌گی خاک‌ها

برای بررسی تأثیر اندازه دانه‌های خاک در درجه ساینده‌گی، ماسه‌های ساحلی غنی از کوارتز با دانه‌بندی‌های مختلف تهیه و آزمایش LCPC بر روی آنها انجام شد. نتیجه آزمایش‌ها در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور قابل مشاهده است دانه‌بندی خاک یکی از پارامترهای اساسی در قابلیت ساینده‌گی خاک است. با افزایش اندازه دانه‌های خاک میزان ساینده‌گی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

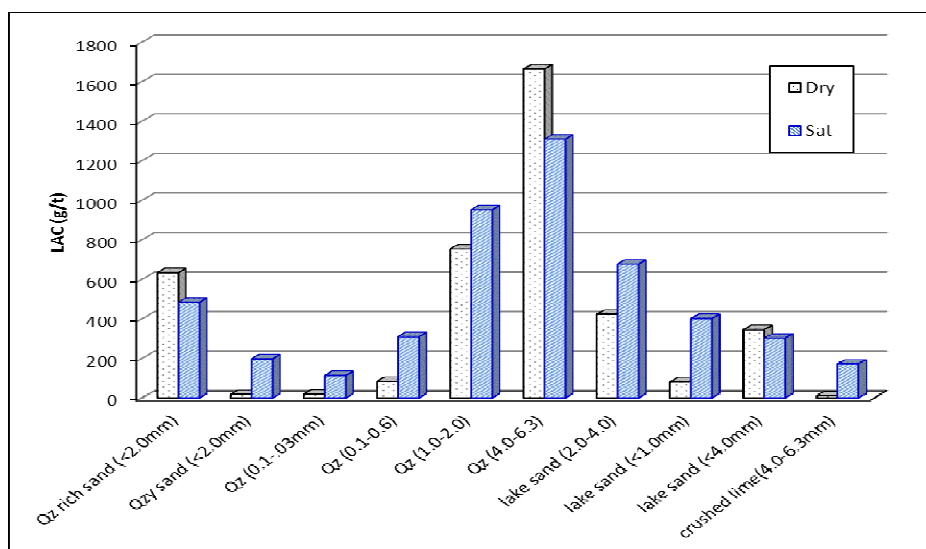


شکل ۹. نمودار تغییرات ضریب ساینده‌گی LCPC (LAC) با

افزایش اندازه دانه‌های خاک

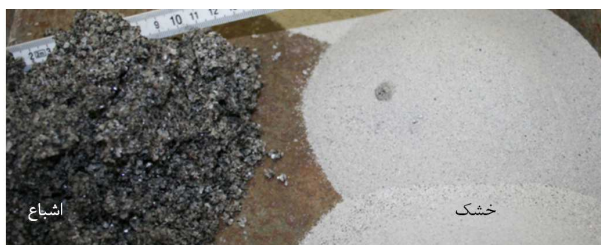
۲-۵. تأثیر کوارتز معادل در قابلیت ساینده‌گی خاک‌ها

به منظور بررسی تأثیر درصد کوارتز معادل (Equivalent quartz content) خاک بر میزان ساینده‌گی آن، سه سری نمونه با اندازه‌های مختلف ۲/۰ - ۴/۰، ۴/۰ - ۶/۳ و ۶/۳ - ۴/۰ میلی‌متر از اختلاط سنگ‌آهک خرد شده با درصدهای مختلف سنگدانه‌های کوارتزی تهیه و آزمایش LCPC بر روی آنها انجام شد (شکل ۱۰). در این مطالعه با توجه به اختلاط دستی سنگدانه‌های کوارتزی خالص، با سنگ آهک خرد شده، درصد سنگدانه‌های کوارتزی اختلاط شده در نمونه، به عنوان درصد کوارتز معادل نمونه محسوب گردید. نتایج آزمایش‌ها در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود درصد کوارتز خاک یکی از پارامترهای مؤثر در افزایش قابلیت ساینده‌گی خاک است. شکل مذکور همچنین تأثیر دانه‌بندی و افزایش اندازه دانه‌های خاک در ساینده‌گی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. نتایج آزمایش LCPC بر روی نمونه‌های مختلف در دو حالت خشک و اشباع

می‌شوند در شکل ۱۴، دانه‌بندی یک نمونه مورد آزمایش در حالت خشک و اشباع پس از انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۴. دانه‌بندی نمونه پس از آزمایش LCPC در حالت

خشک و اشباع

برای بررسی تأثیر دانه‌بندی و آب به صورت همزمان از دو نمونه‌ی سنگ متفاوت گنیس و گرانیت سیاه استفاده شد. سنگ‌های مذکور با استفاده از سنگ‌شکن خرد شده و در دانه‌بندی‌های مختلف آماده شدند. سپس آزمایش LCPC بر روی آنها در دو حالت مختلف خشک و اشباع انجام شد. نتایج آزمایش‌ها در نمودارهای شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج آزمون‌های مذکور نشان داد که تأثیر آب بر میزان سایندگی، مستقل از اندازه دانه خاک می‌باشد. دلیل افزایش سایندگی با اضافه کردن آب بر نمونه گرانیت را می‌توان به تشکیل دوغاب غلیظ ساینده نسبت داد. بر عکس در نمونه گنیس به دلیل فراوانی زیاد کانی بیوتیت، آب باعث افزایش لزجت و صابونی شدن نمونه شده و از میزان سایندگی آن می‌کاهد.

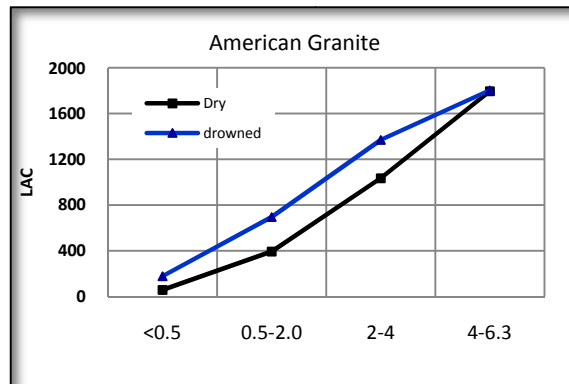
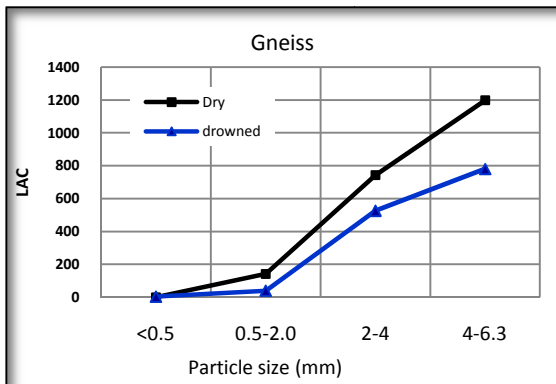
همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اکثر موارد وجود آب باعث افزایش میزان سایندگی خاک می‌شود. دلیل این افزایش را می‌توان به صورت زیر توضیح داد:

الف) تشکیل دوغاب غلیظ در حالت استفاده از آب  
 قطعه سایشی در حالت استفاده از آب در داخل دوغاب غلیظ به چرخش در می‌آید. در حالی که در آزمایش حالت خشک، بیشتر گوشه‌های قطعه، تغییر شکل یافته و ساینده می‌شود اما در دوغاب غلیظ تمامی قسمت‌های قطعه ساینده می‌شود (شکل ۱۳).



شکل ۱۳. بررسی تأثیر وجود آب در آزمایش LCPC (۱) قطعه سایشی در حالت خشک و (۲) در حالت اشباع

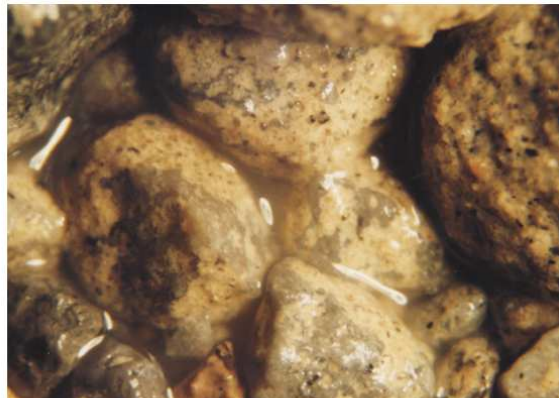
ب) خردشدگی تدریجی دانه‌ها در حالت استفاده از آب.  
 در هنگام استفاده از آب، مقدار زیادی از دانه‌ها به صورت خرد نشده باقی می‌مانند، در حالی که اگر آزمایش بر روی همان نمونه در حالت خشک انجام شود، تمامی سنگدانه‌ها پودر



شکل ۱۵. نتایج آزمایش LCPC بر روی نمونه‌های گنیس و گرانیت سیاه با دانه‌بندی‌های مختلف، در دو حالت خشک و اشباع

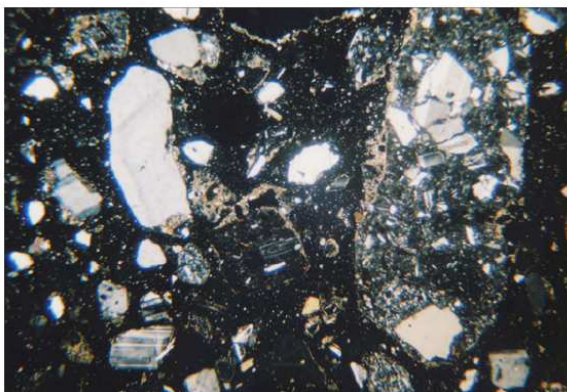


الف) X10 PPL

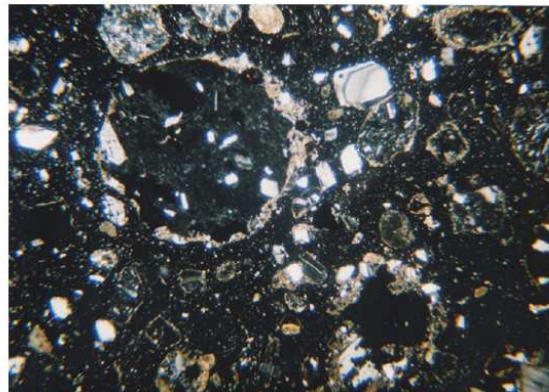


ب) X10 PPL

شکل ۱۶. تصاویر میکروسکوپی از نمونه‌های خاکی (۶۰۳+۷ الف) قطعات نیمه گرد شده تا گوشه‌دار سنگدانه‌های ولکانیکی، آهکی و خرده کریستال‌ها (ب) قطعات نیمه گرد شده سنگ‌های ولکانیکی (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸)



الف) X25 XPL



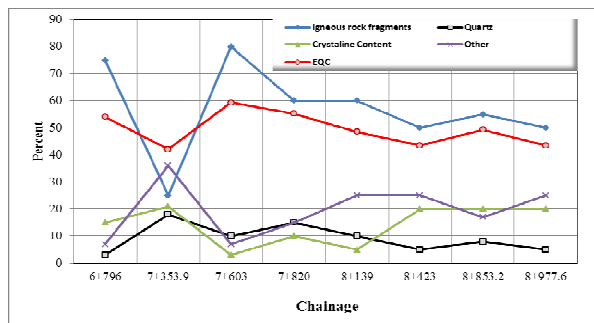
ب) X25 XPL

شکل ۱۷. تصاویری از مقاطع نازک نمونه‌های خاکی در (۶۰۳+۷ الف) قطعه‌سنگ بیضوی داسیتی همراه با قطعه بلورهای پلاژیوکلاز، کوارتز و ذرات در حد سیلت (ب) قطعه‌سنگ داسیتی کاملاً گرد شده، همراه با قطعه‌سنگ‌های آندزیتی و بلورهای پلاژیوکلاز و کوارتز (سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸)

$$EQC (\%) = \sum_{i=0}^n A_i \times R_i \quad (1)$$

در رابطه فوق  $A_i$  درصد هر کانی و  $R_i$  سختی رزیول و  $n$  تعداد کانی‌های مختلف است. در شکل ۱۹ درصد محتویات مختلف تشکیل‌دهنده خاک و بر اساس آن میزان کوارتز معادل خاک در کیلومترهای مختلف مسیر نشان داده شده است. به عنوان مثال نمونه خاک کیلومتر ۶+۷۹۶ از ۷۵ درصد قطعات سنگی آذرین، ۳ درصد کوارتز، ۱۵ درصد دانه‌های بلورین و ۷ درصد از سایر کانی‌ها تشکیل شده است که کوارتز معادل آن حدود ۵۴/۴ درصد برآورد می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کوارتز معادل نمونه‌های خاک مسیر بین ۴۳ تا ۶۰ درصد تغییر می‌کند.

نوع خاک مسیر از لحاظ دانه‌بندی بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید از نوع GP، GM، GW و SM است. بنابراین با در نظر گرفتن متوسط اندازه دانه‌بندی در حد ماسه متوسط تا شن ریز (۲ تا ۶/۳ میلی‌متر) و استفاده از نمودار ارائه شده توسط فستال (Festl, 2006) (شکل ۲۰)، و نمودار به دست آمده از مطالعات حاضر (شکل ۲۱)، ضریب ساینده‌گی LCPC خاک مسیر مورد مطالعه در حد ۲۵۰ تا ۷۰۰ g/t به دست می‌آید و خاک مسیر در حد متوسط تا خیلی ساینده ارزیابی می‌شود.



شکل ۱۹. نتایج مطالعات کانی‌شناختی نمونه‌های خاک در

کیلومترهای مختلف مسیر مورد مطالعه

(بر اساس گزارش سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸)

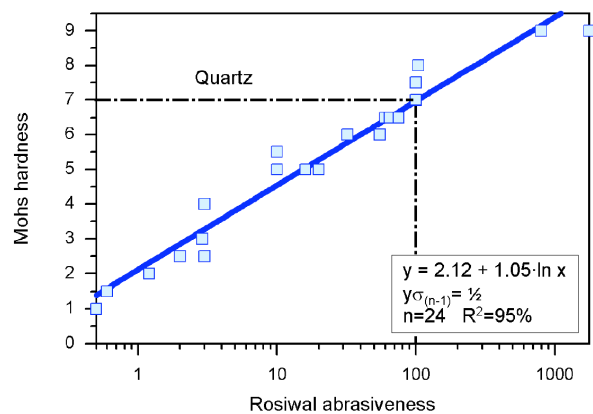
## ۶. ارزیابی ساینده‌گی خاک خط یک متروی تبریز

برای ارزیابی قابلیت ساینده‌گی خاک خط یک متروی تبریز از سه روش مختلف استفاده گردید.

### ۱-۶. مطالعات کانی‌شناختی

مطالعات کانی‌شناختی خاک مسیر مورد مطالعه نشان داد که محتوای کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی خاک‌ها از ۴ 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. اشکال ۱۶ و ۱۷ به ترتیب نمونه‌ای از تصاویر ماکروسکوپی و میکروسکوپی خاک مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

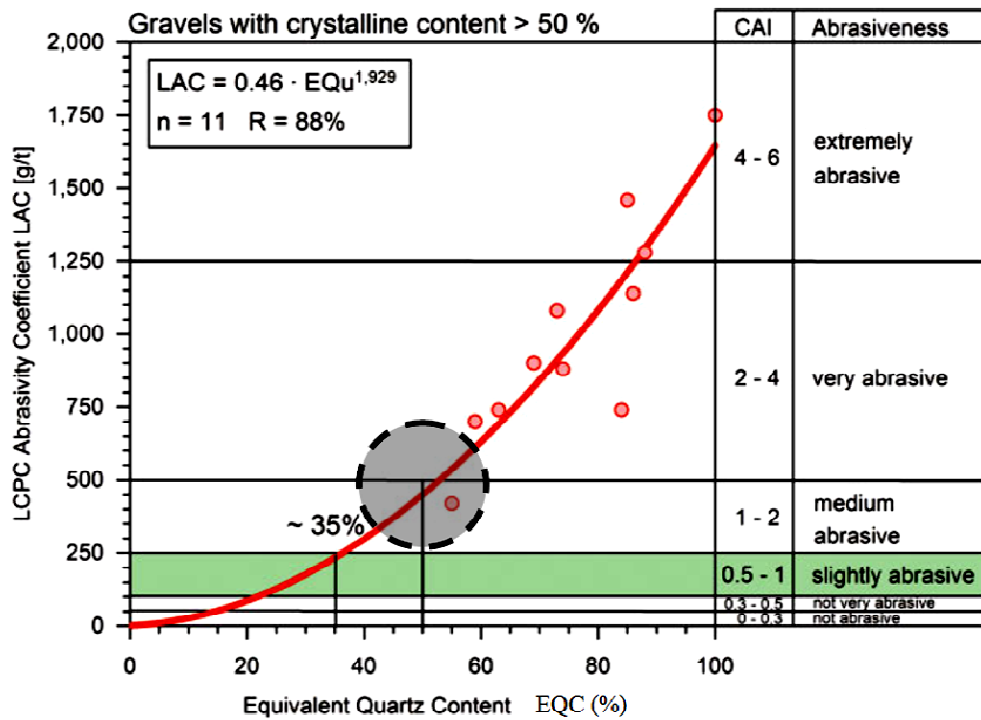
به منظور در نظر گرفتن نقش تمامی تشکیل‌دهنده‌های خاک در ساینده‌گی، میزان کوارتز معادل نمونه‌های خاک بر اساس سختی (سایش) رزیوال محاسبه شد. جهت تخمین سختی رزیوال بر اساس سختی موس از نمودار شکل ۱۸ (Thuro et al., 2003) استفاده گردید.



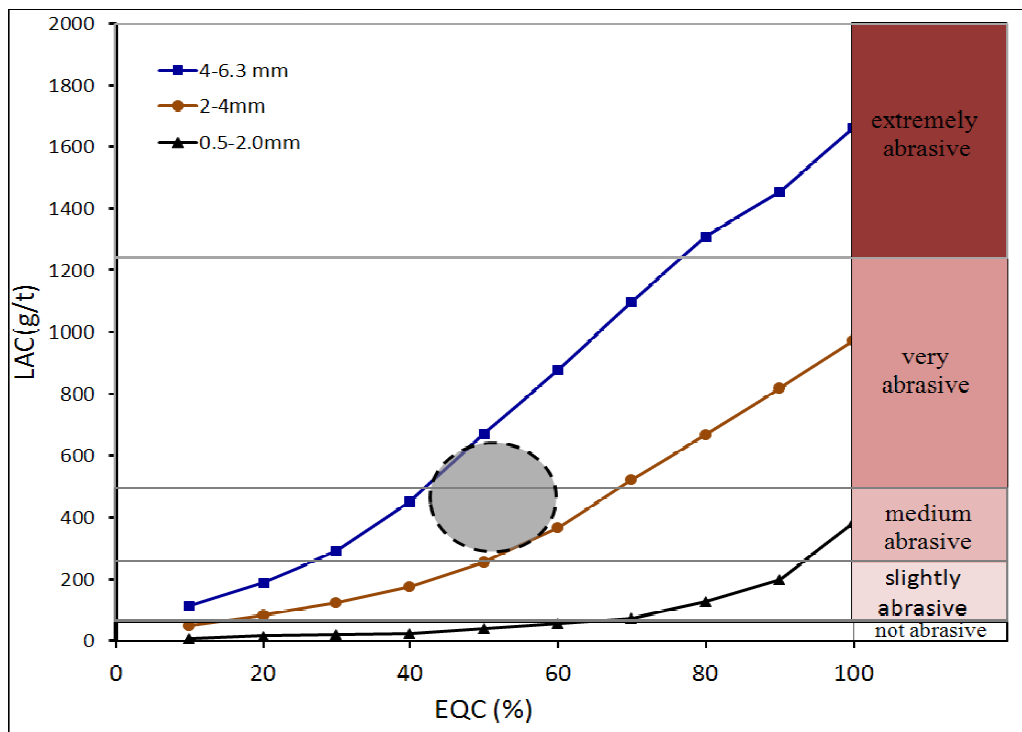
شکل ۱۸. نمودار همبستگی بین سایش رزیوال و سختی موس

(Thuro et al., 2003)

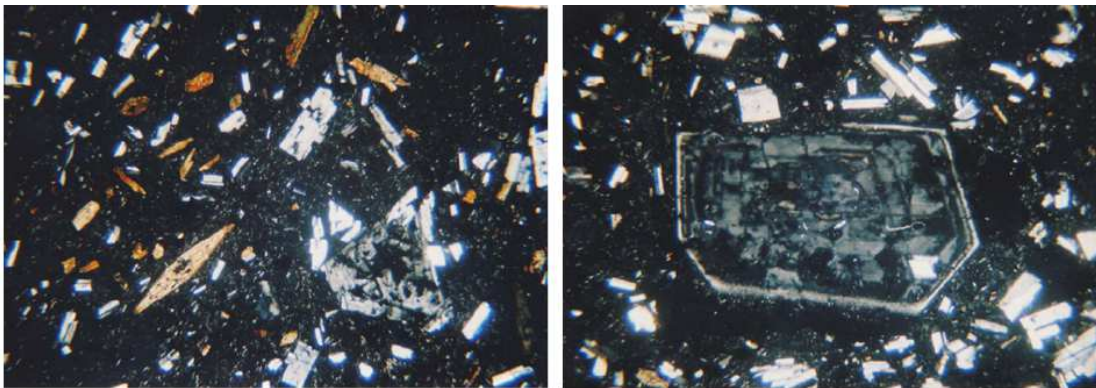
در این نمودار سختی کانی کوارتز به عنوان ساینده‌ترین کانی برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده و محتوای کوارتز معادل بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید.



شکل ۲۰. ساینده‌گی خاک مسیر مورد مطالعه بر اساس نمودار ارائه شده توسط (Festl, 2006) بر گرفته از (Thuro et al., 2009)



شکل ۲۱. میزان ساینده‌گی خاک مسیر مورد مطالعه بر اساس رابطه بین کوارتز معادل و ضریب ساینده‌گی LCPC



الف) X25 XPL

ب) X25 XPL

شکل ۲۲. تصاویری از مقاطع نازک نمونه‌های سنگی الف) بافت هیالومیکریتی پورفیریک در هورنبلند آندزیت ب) فنوکریستال شکلدار با زونینگ نوسانی در آندزیت (گزارش سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸)

بر اساس تقسیم‌بندی تورو (Thuro et al., 2009)، ارائه شده در جدول ۱، این سنگ‌ها به طور عمده در رده خیلی ساینده تا به شدت ساینده قرار می‌گیرند. ولی با توجه به اینکه مکانیسم تأثیر زمین بر سایش ابزار در دو حالت سنگ سخت و خاک، متفاوت است لذا مقایسه تأثیر درصد کوارتز و به طور کلی شاخص سرشار (CAI) در حفاری مکانیزه خاک‌ها می‌تواند بسیار گمراه کننده بوده و با خطای زیادی همراه باشد. در حفاری زمین‌های سنگی، ابزارهای برشی نقش بریدن و خردکردن (ایجاد تراشه) سنگ را دارند. در صورتی که در حالت حفاری در زمین‌های خاکی، ابزارهای مذکور بیشتر نقش غلتاندن سنگدانه‌ها، قلوه‌سنگ‌ها و قطعات سنگی از طریق فضای باز کله‌حفار تا جمع شدن در داخل اتاقک حفاری را دارند.

#### ۶-۲) آزمایش سرشار

با توجه به اینکه خاک مسیر مورد مطالعه به طور عمده از سنگدانه‌های آتشفشانی ناشی از فرسایش و خردشدگی قلوه‌سنگ‌ها و بولدرها تشکیل شده است. در شکل ۲۲، نمونه‌ای از تصویر میکروسکوپی سنگ‌های مذکور نشان داده شده است. بنابراین یکی از روش‌های تخمین میزان ساینده‌ی این خاک انجام آزمایش سرشار بر روی نمونه‌های سنگی بزرگ‌تر در حد قلوه‌سنگ و بولدر است. نتایج آزمایش‌های مذکور در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش‌های سرشار انجام شده بر روی نمونه‌های سنگی، مقدار شاخص ساینده‌ی سرشار (CAI) نمونه‌ها را در حد ۲/۸ تا ۴/۶ نشان داد.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های سرشار بر روی نمونه‌های سنگی مسیر مورد مطالعه

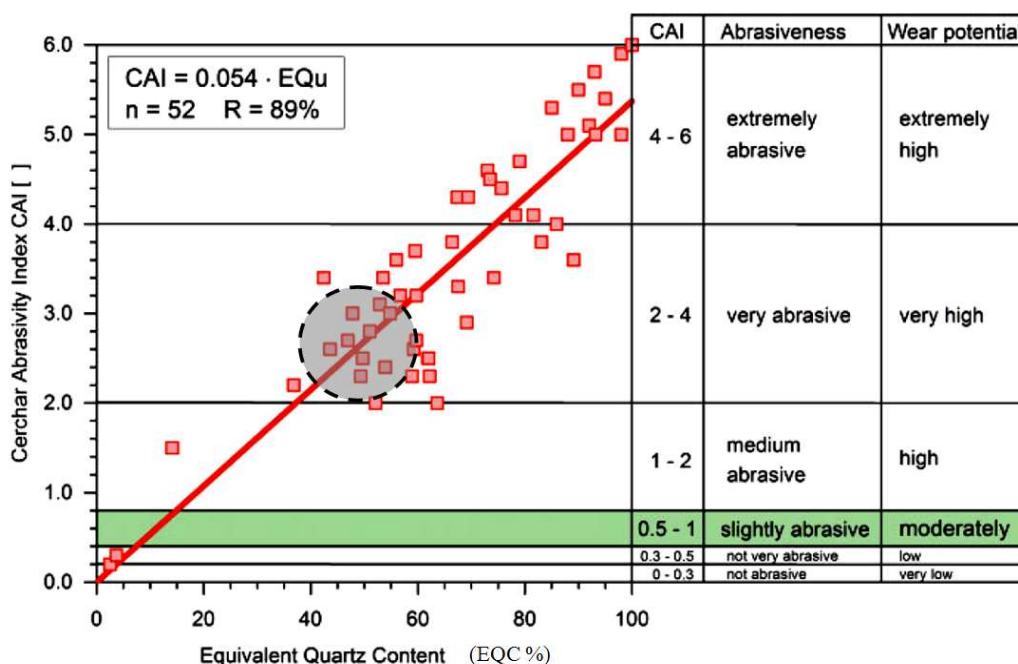
Sample No.	Mean objec. 1	Mean objec. 2	Mean objec. 3	Mean objec. 4	Mean objec. 5	CAI1	CAI2	CAI3	CAI4	CAI5	Mean CAI
1	45	48	40	55	52	2.61	2.784	2.32	3.19	3.016	2.8
2	70	65	70	75	60	4.06	3.77	4.06	4.35	3.48	3.9
3	80	85	75	70	85	4.64	4.93	4.35	4.06	4.93	4.6
4	55	60	60	55	58	3.19	3.48	3.48	3.19	3.364	3.3
5	70	62	70	83	78	4.06	3.596	4.06	4.814	4.524	4.2

### ۶-۳. آزمایش LCPC

به منظور بررسی دقیق میزان ساینده‌گی خاک مورد مطالعه، نمونه‌هایی از آن انتخاب و با استفاده از دستگاه آزمایش LCPC در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه EPFL سوییس آزمایش‌های LCPC انجام گردید. برای بررسی تأثیر آب در ضریب ساینده‌گی LCPC (LAC)، آزمایش بر روی یکی از نمونه‌ها در دو حالت خشک و اشباع انجام گردید. نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ دانه‌بندی بیشتر از نوع خاک ماسه‌ای سیلت‌دار با درصد کمی شن ریز بودند. نتایج آزمون‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک مسیر مورد مطالعه در حالت خشک، در حد خیلی ساینده و در حالت اشباع (زیر سطح آب زیرزمینی)، در حد متوسط ساینده‌گی می‌باشد.

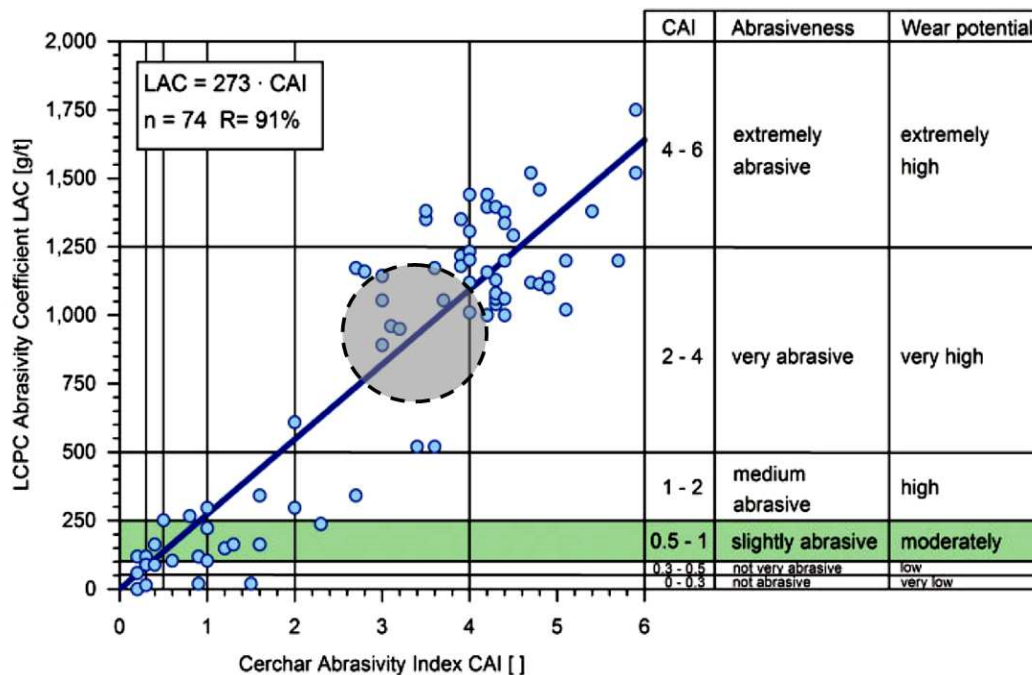
لذا استفاده از شاخص ساینده‌گی سرشار برای تخمین ساینده‌گی خاک مورد حفاری، از طریق روابط بین شاخص ساینده‌گی سرشار و کوارتز معادل و ضریب ساینده‌گی LCPC می‌تواند تخمین به نسبت درست‌تری ارائه دهد. بر این اساس ضریب ساینده‌گی LCPC خاک مورد مطالعه در حد ۶۰۰ تا ۱۲۰۰ برآورد می‌گردد و در حد خیلی ساینده ارزیابی می‌شود. اشکال ۲۳ و ۲۴ موقعیت خاک مورد مطالعه را در نمودارهای موجود بین شاخص ساینده‌گی سرشار (CAI) و ضریب ساینده‌گی LCPC و کوارتز معادل نشان می‌دهد.

البته با توجه به اینکه نمودارهای مذکور (اشکال ۲۳ و ۲۴) برای تخمین ساینده‌گی سنگ‌ها و بر اساس آزمون‌های انجام یافته بر روی انواع خاصی از سنگ‌ها (آمفیبولیت، میکاشیست، گنیس و کوارتزیت) توسعه یافته‌اند لذا استفاده از این نمودارها بایستی با احتیاط صورت پذیرد و در صورت امکان، نتایج به دست آمده با انجام آزمایش‌های واقعی کنترل شود.



شکل ۲۳. ساینده‌گی خاک مسیر مورد مطالعه بر اساس رابطه بین کوارتز معادل و شاخص ساینده‌گی سرشار (CAI)

بر گرفته از (Thuro et al., 2009)



شکل ۲۴. ساینده‌گی خاک مسیر مورد مطالعه بر اساس رابطه بین ضریب ساینده‌گی (LCPC) و

شاخص ساینده‌گی سرشار (CAI) بر گرفته از تورو (Thuro et al., 2009)

جدول ۴. نتایج آزمایش LCPC خاک مسیر تونل خط یک قطار شهری تبریز

شماره نمونه	کیلومتر	نوع خاک	شرایط آزمایش	وزن قطعه فولادی قبل از آزمایش (گرم)	وزن قطعه فولادی بعد از آزمایش (گرم)	کاهش وزن قطعه (میلی‌گرم)	ضریب ساینده‌گی LCPC (LAC)	وضعیت ساینده‌گی خاک
۱	۸+۱۳۹	SP-SM	اشباع	۴۶/۵۶۳	۴۶/۴۳۹	۳۱۰	۶۲۰	خیلی ساینده متوسط ساینده
۲	۷+۶۰۳	GW	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

#### ۷. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی‌های زمین‌شناختی مهندسی مسیر تونل و ارائه پارامترهای دخیل در تونل‌سازی با جزئیات کافی از موارد مهم در انتخاب روش حفاری و طراحی دستگاه حفار و عملکرد آن در حالت مکانیزه است. هر نوع تغییرات در ویژگی‌های زمین‌شناختی و پارامترهای زمین‌شناختی مهندسی مسیر تونل می‌تواند برنامه

زمان‌بندی و موفقیت پروژه را تحت تأثیر قرار دهد. ارزیابی صحیح میزان ساینده‌گی خاک مسیر حفاری، یکی از نیازهای اساسی در مطالعات زمین‌شناختی مهندسی است. با این حال به دلیل عدم دسترسی به تجهیزات و دستگاه‌های اندازه‌گیری سایش خاک در داخل کشور، از این مسئله مهم چشم‌پوشی می‌شود. تجربیات حاصل از حفاری‌های انجام شده در تونل‌های شهری متروی تبریز، اصفهان و شیراز نشان داد بحث



می‌توان تخمین نسبتاً مناسبی از وضعیت ساینده‌ی خاک بدست آورد. مطالعات انجام یافته، ساینده‌ی خاک مسیر خط یک متروی تبریز را در حالت خشک، در حد خیلی ساینده و در حالت اشباع، در حد متوسط ساینده‌ی نشان داد.

با توجه به اهمیت موضوع سایش در حفاری مکانیزه و اخیراً ساخت تجهیزات آزمون‌های مربوطه در داخل کشور، پیشنهاد می‌شود به منظور داشتن تخمین مناسبی از وضعیت ساینده‌ی خاک مسیر، در فاز مطالعات و اجرای پروژه‌های مشابه، بررسی‌های کانی‌شناختی و انجام آزمون‌های سایش از جمله Cerchar و LCPC در اولویت قرار گیرد.

همان‌طور که مطرح شد بسیاری از پارامترها (از جمله تراکم، مواد افزودنی، زاویه‌داری و غیره) در سایش خاک تأثیرگذار هستند. پیشنهاد می‌شود تأثیر پارامترهای مذکور در ساینده‌ی نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

ساینده‌ی خاک یکی از چالش‌های اساسی در حفاری مکانیزه تونل‌های شهری است که به دلیل عدم پیش‌بینی آن در مرحله مطالعات، باعث تأخیر در برنامه زمان‌بندی و تأخیرات ناخواسته در مرحله اجرایی شده و مشکلات قراردادی را به همراه دارد.

بررسی‌های انجام یافته با استفاده از آزمون LCPC در قالب این مقاله نشان داد علاوه بر جنس خاک، دانه‌بندی و درصد رطوبت نیز از پارامترهای مهم و مؤثر در ساینده‌ی خاک است. مطالعات انجام یافته نشان داد با افزایش اندازه دانه‌های خاک و کوارتز معادل، میزان ساینده‌ی خاک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. درصد رطوبت در بعضی از موارد باعث کاهش و در بسیاری از موارد باعث افزایش ساینده‌ی خاک می‌شود. با استفاده از مطالعات کانی‌شناختی و برآورد کوارتز معادل خاک مسیر مورد حفاری، در نقاط مختلف و با استفاده از نمودارهای موجود و نمودار به دست آمده از مطالعات حاضر

## منابع

- درویش زاده، ع.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی ایران، انتشارات امیرکبیر.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۷۲. نقشه زمین‌شناسی تبریز ۱:۱۰۰۰۰۰، تهران.
- سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۳. گزارش‌های ژئوتکنیکی مسیر تونل خط یک، تبریز.
- سازمان قطار شهری تبریز، ۱۳۸۸. گزارش‌های زمین‌شناسی فاز اجرا.
- معماریان، ح.، ۱۳۸۵. زمین‌شناسی برای مهندسين، انتشارات دانشگاه تهران.
- Alavi Gharahbagh, E., Rostami, J., Palomino, A.M., 2011. New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26: 604–613.
- Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grov, 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.
- Indian Geological Survey, 2011. <http://libguides.com.edu/content.php>
- Langmaack, L., Grothen, B., Jakobsen, P.D., 2010. Anti-wear and anti-dust solutions for hard rock TBMs, *Proceedings of World Tunneling Conference, Vancouver, Canada*.
- Lien, R., 1961. An indirect test method for estimating the drillability of rocks. PhD thesis, NTH Department of Geology, 90p.
- Nilsen B., Dahl, F., Holzhauser, J. and Raleigh, P., 2007. New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling. *Rapid excavation and tunneling conference*, pp. 104-116.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., Raleigh, P., 2006b. Abrasivity testing for rock and soils. *Tunnels and Tunneling International*, 47–49.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., Raleigh, P., 2006c. SAT: NTNU's new soil abrasion test. *Tunnels and Tunneling International*, 5: 43–45.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., Raleigh, P., 2006a. Abrasivity of soils in TBM tunneling. *Tunnels and Tunneling International*, 36–38.

- Rostami, J., Alavi Gharabagh, E., 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.
- Plinninger, R., Kasling, H., Thuro, K. and Spaun, G., 2003. Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40: 259-263.
- Plinninger, R.J., Käsling, H., Thuro, K. 2003. Wear Prediction in Hard rock Excavation Using the Cerchar Abrasiveness Index (CAI, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium. Schubert.
- Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., Bauer, M., 2006. Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device. *Felsbau*, 24: 37–45.
- Thuro, K., Käsling, H., 2009. Classification of the abrasiveness of soil and rock / Klassifikation der Abrasivität von Boden und Fels. *Geomechanics and Tunneling*, 2 (2): 179–188.
- Thuro, K., Käsling, H., 2003. Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability, ISRM, Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 1227-1233.
- West, G., 1989. Rock Abrasiveness Testing for Tunnelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics. Abstracts*, 26(2): 151-160