بررسی ضرایب سایندگی و شکنندگی سنگدانه‌های مسیر مترو تبریز

امیرحسن رضایی فرعی*؛
دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکدهٔ فنی و مهندسی
مسعود مصطفایی؛ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
سید کاظم رضوی؛ دانشگاه تبریز، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹٦/۱۲/۲۳ پذیرش ۹۷/۰۷/۲۳

چکیده

حفر تونل‌های طویل غالباً به‌صورت مکانیزه و با ماشین حفاری تونل TBM انجام می‌شود. یکی از عوامل مهم در حفاری این تونل‌ها اثر سایندگی خاک و سنگدانه‌ها بر ابزارهای برشی و سایر بخش‌های دستگاه حفار تونل است که باعث کاهش چشم‌گیری در راندمان حفاری پروژه می‌شود. محققان عوامل مختلفی که باعث ایجاد سایش در ابزار حفاری می‌شوند را بررسی کرده‌اند. در تحقیق حاضر ۳۲ نمونه از سنگ‌دانه‌های مسیر تونل خط دو مترو تبریز انتخاب شده و میزان سایندگی و شکنندگی این سنگ‌دانه‌ها برای بخش‌های مختلف مسیر تعیین شده است. هم‌چنین از بین مهم‌ترین عوامل مؤثر، تأثیر پارامترهای وجود و میزان آب، جنس، اندازه و شکل سنگ‌دانه‌ها، نوع و میزان فوم حفاری بر میزان ضریب سایندگی و شکنندگی سنگ‌دانه‌های مسیر بررسی شده، قرار گرفته است. بدین‌منظور نیز حدود ۱۳۰ نمونه از سنگ‌دانه‌ها شامل ۲۰ نمونه برای بررسی تأثیر وجود و میزان آب، ۱۵ نمونه برای جنس، ۲۰ نمونه برای اندازهٔ دانه‌ها، ۳۰ نمونه برای شکل و ٤۲ نمونه برای تأثیر نوع و میزان فوم مصرفی تهیه شده است. روش‌های زیادی برای آزمایش سایندگی خاک و خرده سنگ‌ها در بخش‌های حفاری به‌وسیلهٔ محققان ارایه شده است که

*نویسنده مسئول rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

یکی از معتبرترین و متداول‌ترین این آزمایش‌ها آزمون LCPC است. بر اساس نتایج حاصل برای بررسی تأثیر میزان آب بر ساینده‌گی، روی سه جنس آندزیت، ماسه سنگ و کنگلومرای مسیر از حالت خشک تا وجود آب به میزان ۳۰٪ وزنی نمونه آزمایش انجام شده است که در دو جنس ماسه سنگ و کنگلومرا با افزایش میزان آب ساینده‌گی بیش‌تر شده ولی در آندزیت از ۲۰٪ به بعد کاهش ساینده‌گی مشاهده می‌شود، میزان ضریب شکنندگی نیز در کل با افزایش میزان آب کاهش می‌یابد. از لحاظ سنگ‌شناسی بیش‌ترین تأثیر بر ساینده‌گی را کنگلومرا داشته و از نظر شکنندگی هم آندزیت شکننده‌ترین است. در تأثیر اندازهٔ دانه‌ها، با افزایش اندازهٔ دانه‌ها سایش زیادتر و شکنندگی کم‌تر می‌شود. تأثیر فوم بر ساینده‌گی به این صورت است که تا حد خیس‌شدگی ساینده‌گی کاهش یافته و بیش‌تر از آن باعث افزایش ساینده‌گی می‌شود. از بین فوم‌های مختلف آزمایش‌شده نیز فوم شیمی بتن دارای حداقل ساینده‌گی است.

واژه‌های کلیدی: ضریب ساینده‌گی، شکنندگی، آزمون LCPC، فوم حفاری، آبرفت‌های مسیر خط ۲ مترو تبریز.

مقدمه

امروزه استفاده از دستگاه حفاری مکانیزه (TBM[1]) برای احداث تونل‌ها، به‌ویژه در مناطق شهری، گسترش چشم‌گیری پیدا کرده است. به‌دلیل پرهزینه بودن این روش باید حتی‌الامکان با کاهش استهلاک تجهیزات و ابزار حفاری استفاده شده و در نتیجه افزایش سرعت حفاری برای کاهش هزینه‌ها گام برداشت. سایش سر مته حفاری[2] از مهم‌ترین مسائل مربوط به بهره‌برداری، نگه‌داری و تعمیر این دستگاه‌ها است. یکی از عوامل مؤثر بر استهلاک، اثر ساینده‌گی خاک جبهه کار تونل بر ابزارهای برشی و سایر بخش‌های دستگاه حفاری تونل است. سایش خاک‌ها روی TBM را به دو نوع سایش اولیه و سایش ثانویه تقسیم می‌کنند. سایش اولیه شامل ساینده‌گی مته‌ها، ابزار برشی و بوکت‌های TBM است و سایش ثانویه ساینده‌گی متعاقب ساینده‌گی اولیه در قسمت‌های نگه‌دارنده مته‌ها و ابزارهای برنده و دریچه‌های تخلیه خاک به عقب است [۱]. سایش ابزار، به‌معنی ساینده‌گی ناشی از برش در هنگام حفاری،

1. Tunnel Boring Machine
2. Cutter head

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

باعث کاهش سرعت حفاری و هم‌چنین افزایش نیروی پیش‌ران و گشتاور مورد نیاز ماشین حفار به‌دلیل تماس بالا با خاک می‌شود. پژوهش‌های مختلفی نیز در زمینهٔ تعیین نیروی پیش‌ران یا تراست ماشین‌های حفار انجام یافته است [۲]. تمرکز اکثر پژوهش‌های انجام یافته در زمینهٔ سایش ابزارهای برشی حفاری بر تونل‌های حفاری شده در زمین‌های سنگی است و پژوهش‌های کم‌تری بر میزان سایندگی خاک‌ها انجام یافته است؛ در حالی‌که تجربیات تونل‌سازی اخیر حاکی از سایش قابل توجه در ابزار ماشین‌های مکانیزه حفار تونل در زمین‌های خاکی به‌ویژه در آبرفت‌های درشت‌دانه است [۳]. میزان سایندگی سنگ به‌وسیلهٔ عوامل محدود و شناخته شده‌ای کنترل می‌شود [٤]، [٥]، [٦]، حال آن‌که در خاک‌ها عوامل متعددی مانند نوع کانی‌های تشکیل‌دهندهٔ دانه‌های خاک، توزیع دانه‌بندی و گردشدگی به‌عنوان عامل زمین‌شناسی در میزان سایندگی مؤثر هستند [۷]، [۸]. علاوه بر این عواملی مانند شرایط محیطی و میزان و نوع فوم مصرفی بر سایندگی تأثیرگذارند. بر این اساس به‌دلیل گستردگی عوامل تأثیرگذار، تاکنون مجمع بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM[1]) روش استانداردی برای آزمون سایندگی خاک پیشنهاد نکرده است [۸].

روش‌های ارزیابی ظرفیت سایندگی سنگ‌ها به دو گروه کلی روش‌های سنگ‌شناسی و روش‌های مکانیکی (استفاده از نمونه‌های سنگ سالم یا خرده‌های سنگ) تقسیم‌بندی شده‌اند [۹]. هم‌چنین روندهای پیش‌بینی ظرفیت سایشی سنگ‌ها دامنهٔ وسیعی از مقیاس‌ها شامل آزمایش‌های کوچک مقیاس مبتنی بر تعیین سختی، مدل‌های آزمایشگاهی با مقیاس متوسط و آزمایش‌های حفاری صحرایی یا مدل‌های آزمایشگاهی تمام مقیاس را شامل می‌شود [٦]. به‌طورکلی روش‌ها و آزمون‌های تعیین سایندگی کوچک مقیاس زیادی وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها شامل سرشار (CAI)، سایش نروژی (NTNU)، آزمون LCPC، سختی موس (MH)، ویکرز (VHN)، برینل (BHT)، راکول (RHT)، آزمون لس‌آنجلس (LHT) و محتوی کوارتز معادل (EQC) است [۱۰].

1. International Society for Rock Mechanic

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

برای تعیین میزان سایش ابزارهای فولادی ناشی از حفاری تونل داخل مصالح آبرفتی، سه آزمایش متداول قابل کاربرد است. آزمایش NTNU[1] سایشی که روی ذرات خرد شده سنگی با ابعاد کوچک‌تر از ۱ میلی‌متر انجام می‌شود، برای تخمین قابلیت حفاری سنگ‌ها به‌روش حفاری ضربه‌ای توسعه یافته و از اوایل دههٔ ۱۹۸۰ برای ارزیابی کارایی TBM در سنگ‌های سخت و زمین‌های آبرفتی نیز استفاده می‌شود [۱۱]. آزمایش سرشار[2] که روی نمونه‌هایی با ابعاد ۱ سانتی‌متر و بیش‌تر انجام شده است و با تعیین مقدار اندیس سایش سرشار (CAI[3]) سایندگی سنگ‌ها طبقه‌بندی می‌شود [۱۲]. آزمون سوم که روی نمونه‌های با دانه‌بندی ٤ الی ٦/۳ میلی‌متر انجام می‌گیرد آزمایش LCPC[4] است [۱۳] که بررسی‌های مختلفی با استفاده از این روش روی پارامترهای مؤثر بر سایندگی مصالح خاکی آبرفتی انجام گرفته است [١٤]، [۱۵]. در سال‌های اخیر و با توجه به گسترش روزافزون پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه در مناطق شهری که عمدتاً روی مصالح آبرفتی قرار دارند و هزینهٔ زیاد تأمین، تعویض و نصب ابزار برشی، تحقیقات زیادی در بارهٔ تأثیر پارامترهای مختلف مصالح سنگی [١٦] و هم‌چنین پارامترهای راهبری دستگاه انجام شده است [۱۷]، [۱۸]. ولی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و مهندسی متفاوت لایه‌های آبرفتی در پروژه‌های مختلف انجام پژوهش‌های ویژه هر پروژه تونل‌سازی مکانیزه، به‌ویژه تونل‌های با طول و سطح مقطع زیاد، ضروری است. در این زمینه می‌توان به تحقیقات انجام شده روی سایندگی خاک‌های مسیر خط ۱ مترو تبریز اشاره کرد [۱۹]. هم‌چنین اصغری و حیدری با استفاده از آزمایش سرشار به بررسی سایندگی خاک‌های مترو تبریز پرداخته‌اند [۲۰]. در تحقیق حاضر، باتوجه به موارد اشاره شده و اهمیت پارامترهایی از قبیل جنس سنگ‌دانه‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها، میزان آب موجود و میزان و نوع فوم مصرفی بر میزان سایندگی و شکنندگی آبرفت‌ها، تأثیر این عومل مؤثر برای آبرفت‌های مسیر تونل خط دو مترو تبریز با استفاده از آزمون LCPC بررسی شده است.

1. Norwegian University of Science and Technology
2. Cerchar
3. Cerchar Abrasivity index
4. Laboratoire Central des Ponts et Chaussess

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

آزمون LCPC

این آزمون به‌وسیلهٔ مرکزی به همین نام در فرانسه در دهه ۱۹۸۰ به‌منظور طبقه‌بندی سایندگی سنگ و خاک در سنگ شکن‌ها ابداع شد [۱۳]. بنا به استاندارد AFNOR P18-579، این دستگاه از یک موتور با توان ۷۵۰ وات ساخته شده که به یک تیغه فولادی در درون یک سیلندر حاوی نمونه متصل است. تیغه مستطیل شکل، یک صفحه فلزی با ابعاد ۵×۲۵×۵۰ میلی‌متر است که از فولادی استاندارد شده با سختی ۶۰ الی ۷۵ راکول B تهیه شده است. برای انجام آزمایش ۵۰۰ گرم نمونه خشک شده در هوا با دانه‌بندی ٤ الی ٦/۳ میلی‌متر به‌وسیلهٔ قیف مخصوص به درون محفظه آزمایش ریخته شده و سپس تیغه فلزی به‌مدت ۵ دقیقه با سرعت ٤۵۰۰ دور در دقیقه در درون محفظه حاوی نمونه شروع به چرخش می‌کند. برای تعیین میزان سایندگی وزن تیغه فلزی (ایمپلر) قبل و بعد از آزمایش با دقت ۰/۱ گرم اندازه‌گیری می‌شود. کاهش وزن تیغه فلزی معیاری برای اندازه‌گیری میزان سایندگی است. بدیهی است که هر تیغه تنها برای یک آزمایش قابل استفاده است. در شکل ۱ قسمت‌های مختلف دستگاه LCPC ساخته شده در پروژهٔ خط ۲ مترو تبریز نمایش داده شده است. شکل ۲ نیز نحوهٔ انجام آزمایش به همراه یک نمونه از خاک و تیغه فلزی استفاده شده را قبل و بعد از انجام تست نشان می‌دهد.

با انجام هر آزمون دو پارامتر ضریب سایندگی(LAC) و ضریب شکنندگی (LBC) مطابق روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$LAC\ (A_{BR}) = \frac{(m_0 - m)}{M} \qquad (۱)$$

در این رابطه m_0 و m به‌ترتیب وزن ایمپیلر قبل و بعد از آزمون بر حسب گرم و M وزن کل نمونه آزمایش شده برحسب تن است. محدودهٔ تغییرات LAC بین ۰ تا ۲۰۰۰ گرم بر تن برای نمونه‌های خاک و سنگ است. بر اساس مقدار ضریب سایندگی حاصل از این آزمون، مصالح به رده‌های مختلف از سایندگی ناچیز تا بسیار سایینده طبقه‌بندی می‌شوند [۲۲] که دو طبقه‌بندی متداول برای سایندگی مصالح در جدول ۱ ارائه شده است.

علاوه بر ضریب سایندگی، با مقایسهٔ منحنی توزیع اندازهٔ ذرات نمونه قبل و بعد از انجام آزمایش LCPC، شکنندگی و تردی دانه‌ها مطابق رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود [۲۳]:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

$$LBC\ (B_R) = 100\left(\frac{m_{1.6}}{M}\right) \qquad (۲)$$

در این رابطه $m_{1.6}$ وزن ذرات کوچک‌تر از ۱/٦ میلی‌متر برحسب گرم و M وزن نمونه آزمایش‌شده برحسب گرم است. محدوده تغییرات LBC بین ۰ تا ۱۰۰ درصد برای نمونه‌های طبیعی خاک و سنگ است. جدول ۲ طبقه‌بندی مصالح بر مبنای محدوده تغییرات ضریب شکنندگی را نشان می‌دهد.

شکل ۱. بخش‌های اصلی دستگاه LCPC الف) الکتروموتور تامین کننده نیروی محرکه دستگاه، ب) محور انتقال نیرو و تیغه فلزی، ج) مخزن نمونه

شکل ۲. انجام آزمایش LCPC الف) نمونه خاک قبل از آزمایش، ب) ایمپلر قبل از انجام آزمایش، ج) نحوهٔ ریختن نمونه‌ها به داخل دستگاه، د) نمونه بعد از انجام آزمایش، ه) ایمپلر بعد از انجام آزمایش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

جدول ۱. طبقه‌بندی ساینگی مصالح بر اساس پارامتر LAC

مقدار LAC	توصیف	
	دانشگاه فنی مونیخ (۲۰۰۶) [۲۲]	Thuro & Kasling [۲۱]
۱۲۵۰–۲۰۰۰	بسیار ساینده	ساینگی بسیار زیاد
۵۰۰–۱۲۵۰	خیلی ساینده	ساینگی زیاد
۲۵۰–۵۰۰	ساینده	ساینگی متوسط
۱۰۰–۲۵۰	کمی ساینده	ساینگی کم
۵۰–۱۰۰	ساینگی ناچیز	ساینگی بسیار کم
۰–۵۰	غیرسایانده	غیر ساینده

جدول ۲. طبقه‌بندی مصالح بر اساس پارامترLBC [۲۳]

LBC	۰–۲۵	۲۵–۵۰	۵۰–۷۵	۷۵–۱۰۰
شکنندگی	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

با توجه به این‌که آزمون LCPC برای مواد دانه‌ای با ابعاد ٤ الی ٦/٣ میلی‌متر طراحی شده است بنابراین نمونه‌هایی با دانه‌بندی بیش‌تر از ٦/٣ میلی‌متر ابتدا خرد شده و سپس برای رسیدن به ابعاد مورد نظر الک می‌شود. عوامل مختلفی در نتیجه به‌دست آمده از آزمایش LCPC تأثیرگذار است. در تحقیق حاضر ضمن تعیین محدودهٔ تغییرات پارامترهای سایشی به‌دست آمده از این آزمایش در آبرفت‌های مختلف مسیر تونل خط ۲ مترو تبریز به بررسی تأثیر جنس سنگ (مشخصاً سه جنس غالب موجود در آبرفت‌های گستره مسیر)، تغییر میزان آب، تغییر سایز و شکل دانه‌ها و تأثیر میزان فوم مصرفی پرداخته شده است.

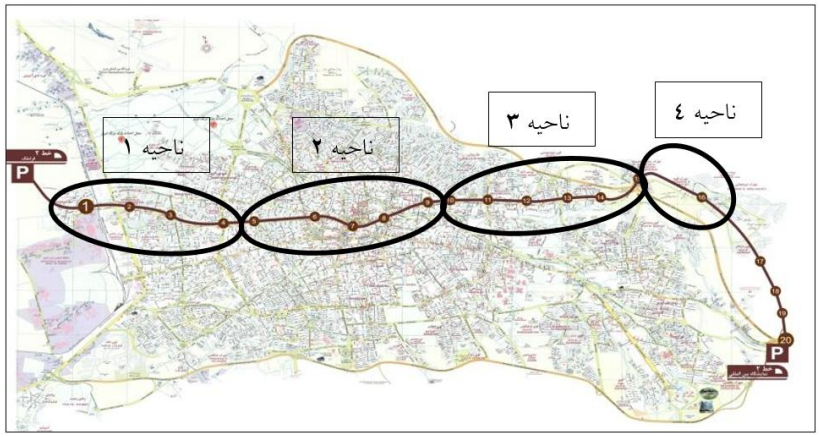
مطالعهٔ موردی و آزمایش‌های انجام یافته

خط ۲ متروی تبریز به‌طول تقریبی ۲۲/٤ کیلومتر منطقه قراملک در غرب تبریز را به نمایشگاه بین‌المللی تبریز در شرق آن متصل می‌کند. این خط در ناحیهٔ مکانیزه دارای ١٦ ایستگاه است و قطر حفاری تونل آن ۹/٤۹ متر است که به‌وسیلهٔ دو دستگاه حفار مکانیزه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

شار تعادلی زمین (TBM-EPB) حفاری می‌شود. از نظر ژئوتکنیکی، در مسیر پروژه، تونل در تناوبی از آبرفت‌های درشت‌دانه و ریزدانه حفاری خواهد شد و با توجه به تراز ایستابی آب در منطقهٔ عمده حفاری در زیر تراز آب انجام می‌گیرد. با توجه به سطح مقطع قابل توجه کاتر هد دستگاه‌ها، طول مسیر و اهمیت سایش ابزار در هزینه و زمان عملیات اجرایی بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان سایش ضروری است. در شکل ۳ شمای کلی پروژه خط ۲ مترو تبریز نشان داده شده است.

بر اساس پژوهش‌های ژئوتکنیک فاز یک پروژه [۲٤]، مسیر تونل به چهار ناحیهٔ قابل تقسیم‌بندی است: ناحیه ۱. در غرب شهر تبریز حدفاصل میدان ماشین‌سازی تا تقاطع بلوار جهاد (از کیلومتر ۵۰۰+۲ تا کیلومتر ۰۰۰+٦) که تا عمق بررسی شده (حدود ۳۰ متر) عمدتاً رسوبات آبرفتی ریزدانه رسی و سیلتی دیده می‌شود. در میان این لایه‌های آبرفتی ریزدانه، میان لایه‌هایی از رسوبات ماسه‌ای هم وجود دارد، ولی مسیر تونل عمدتاً از درون رسوبات آبرفتی ریزدانه عبور می‌کند. حداکثر اندازهٔ دانه‌ها ٦۰ میلی‌متر و میزان شاخص خمیری در محدوده ۷ الی ۳۰ درصد است.



شکل ۳. شمای کلی مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز به‌همراه ٤ ناحیهٔ ژئوتکنیکی

ناحیهٔ ۲. حدفاصل تقاطع بلوار جهاد تا سرسیلاب در خیابان عباسی (تا کیلومتر ۳۰۰+۱۱). در این ناحیه در بخش مرکزی شهر لایه‌های زیرسطحی عمدتاً از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه (ماسه‌ای- شنی) که قطعات سنگی (قلوه سنگ و بولدر) در داخل آن‌ها شناور است، تشکیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

شده‌اند. ناحیهٔ ۳. حدفاصل سر سیلاب تا میدان شهید فهمیده (تا کیلومتراژ ۸۰۰+۱۵). در این ناحیهٔ در طول خیابان عباسی، در زیر یک لایه آبرفتی سطحی به ضخامت بین ۵ تا ۱۵ متر، لایه‌های سنگی ضعیف از نوع رس‌سنگ، لای‌سنگ، ماسه‌سنگ و سنگ‌مارن قرار دارد. در این ناحیهٔ تونل مترو در درون لایه‌های سنگی قرار می‌گیرد. ناحیهٔ ٤. حد فاصل میدان شهید فهمیده تا شرق شهرک باغمیشه (تا کیلومتراژ ٦٠٠+١٨). در این ناحیه تا اعماق حفاری شده، لایه‌های زیرسطحی عمدتاً از رسوبات آبرفتی درشت‌دانه (ماسه‌ای- شنی) و ریزدانه (رسی- سیلتی) تشکیل شده‌اند. مسیر تونل در این بخش از درون رسوبات درشت‌دانه و ریزدانه عبور می‌کند. لازم بذکر است جمع‌بندی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مصالح مسیر پروژه بررسی شده به‌وسیلهٔ محققان دیگر انجام گرفته است [۲۵].

برای تحقیق حاضر با اخذ ۳۲ نمونه (نمونه‌های S1 الی S32) از ایستگاه‌های در حال اجرای پروژه و هم‌چنین جعبه‌های نمونه خاک گمانه‌های بررسی‌های فاز یک سعی شد تا میزان سایندگی و شکنندگی سنگ‌دانه‌های مسیر تونل در حالت خشک در نواحی چهارگانه تعیین شود. در شکل ٤ تصاویر چند نمونه از محل نمونه‌برداری در ترانشه ایستگاه‌ها و جعبه‌های چوبی نمونه گمانه‌ها نمایش داده شده است. بر اساس نتایج پتروگرافی انجام گرفته جنس غالب سنگ‌دانه‌های مسیر آندزیتی، ماسه‌سنگی، کنگلومرا و به مقدار کمی پوکه معدنی و کوارتز خالص است. در جدول ۳ نتایج سنگ‌شناسی نمونه‌های آزمایشی مسیر ارائه شده است که با توجه به جدول ۳، ترکیب جنس سنگ‌دانه‌های نمونه مسیر در نواحی چهارگانه بدین‌شرح است:

الف) ناحیهٔ یک: آندزیت (۸۸/۸ ٪)، ماسه‌سنگ (٦/٧ ٪)، کوارتز (۲/۵ ٪)، پوکه (۲ ٪)

ب) ناحیهٔ دو: آندزیت (۹۷/۳ ٪)، ماسه‌سنگ (۲/۱ ٪)، کوارتز (۰/۱۵ ٪)، پوکه (۰/۵ ٪)

ج) ناحیهٔ سه: آندزیت (۳۷/۵ ٪)، ماسه‌سنگ (٤٢/٥ ٪)، کنگلومرا (۲۰ ٪)

د) ناحیهٔ چهار: آندزیت (۱۸/۵ ٪)، ماسه‌سنگ (۸۰/۵ ٪)، کوارتز (۱ ٪)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

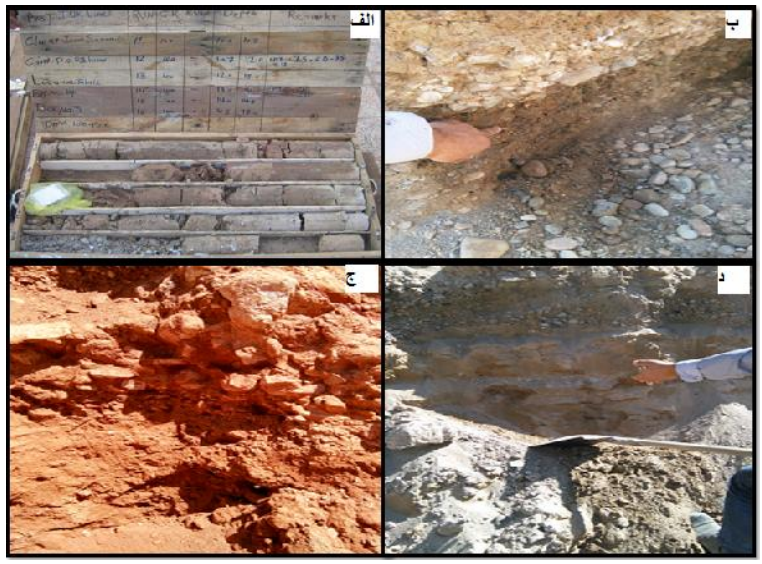
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

جدول ٣. نتایج سنگ‌شناسی نمونه‌های برداشت‌شده از آبرفت‌های گسترهٔ تبریز به‌همراه کرویت و گرد شدگی اولیه سنگ‌دانه‌ها

نمونه	آبرفت	جنس					مشخصات هندسی		
		پوکه	آندزیت	ماسه‌سنگ	کنگلومرا	کوارتز	کرویت	گرد شدگی	گردشدگی/کرویت
S-1	ناحیه ١	٠	٪٩٠	١٠	٠	٠	٠/٧٩	٠/٦٩	١/١٤
S-2	ناحیه ١	٠	٪٨٥	١٠	٠	٪٥	٠/٧٥	٠/٦٤	١/١٧
S-3	ناحیه ١	٪٣	٪٩٠	٪٧	٠	٠	٠/٧٤	٠/٦٥	١/١٣
S-4	ناحیه ١	٥	٪٩٠	٠	٠	٪٥	٠/٧٦	٠/٦٨	١/١١
S-5	ناحیه ٢	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٨	٠/٧	١/١٤
S-6	ناحیه ٢	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٧٨	٠/٧	١/١١
S-7	ناحیه ٢	٠	٪٩٠	٪١٠	٠	٠	٠/٧٩	٠/٦٩	١/١٤
S-8	ناحیه ٢	٠	٪٩٥	٪٥	٠	٠	٠/٧٨	٠/٦٨	١/١٤
S-9	ناحیه ٢	٪٢	٪٩٥	٪٣	٠	٠	٠/٧٩	٠/٦٥	١/٢١
S-10	ناحیه ٢	٪٣	٪٩٧	٠	٠	٠	٠/٨	٠/٦٩	١/١٥
S-11	ناحیه ٢	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٥	٠/٣	١/٦٦
S-12	ناحیه ٢	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٥	٠/٣	١/٦٦
S-13	ناحیه ٢	٠	٪٩٧	٪٣	٠	٠	٠/٨	٠/٦٩	١/٦
S-14	ناحیه ٢	٪١	٪٩٨	٪١	٠	٠	٠/٧٥	٠/٦	١/٢٥
S-15	ناحیه ٢	٠	٪٩٦	٪٢	٠	٪٢	٠/٧٤	٠/٦٥	١/٤
S-16	ناحیه ٢	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٤٤	٠/٣	١/٤٦
S-17	ناحیه ٣	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠	٠/٥	٠/٣	١/٧
S-18	ناحیه ٣	٠	٪٨٥	٪١٥	٠	٠	٠/٧	٠/٦٤	١/٠٩
S-19	ناحیه ٣	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠/٤	٠/٣	١/٣٣
S-20	ناحیه ٣	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠/٤	٠/٣	١/٣٣
S-21	ناحیه ٣	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠/٤	٠/٣	١/٣٣
S-22	ناحیه ٣	٠	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠/٦	٠/٣	٢
S-23	ناحیه ٣	٠	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠/٦	٠/٣	٢
S-24	ناحیه ٣	٠	٪٧٠	٪٣٠	٠	٠	٠/٧٧	٠/٦٧	١/٥
S-25	ناحیه ٣	٠	٪٧٠	٪٣٠	٠	٠	٠/٧٧	٠/٦٧	١/٥
S-26	ناحیه ٣	٠	٪٥٠	٪٥٠	٠	٠	٠/٧٥	٠/٦٣	١/٢
S-27	ناحیه ٤	٠	٪٥٠	٪٥٠	٠	٠	٠/٧٥	٠/٦٢	١/٢
S-28	ناحیه ٤	٠	٪٣٠	٪٧٠	٠	٠	٠/٧٣	٠/٦٣	١/١٦
S-29	ناحیه ٤	٠	٪٣٠	٪٧٠	٠	٠	٠/٧٣	٠/٦٣	١/١٦
S-30	ناحیه ٤	٠	٠	٪٩٥	٠	٪٥	٠/٦٩	٠/٤	١/٧٢
S-31	ناحیه ٤	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠/٧	٠/٤	١/٧٥
S-32	ناحیه ٤	٠	٠	٪١٠٠	٠	٠	٠/٧	٠/٣٨	١/٨٤

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]



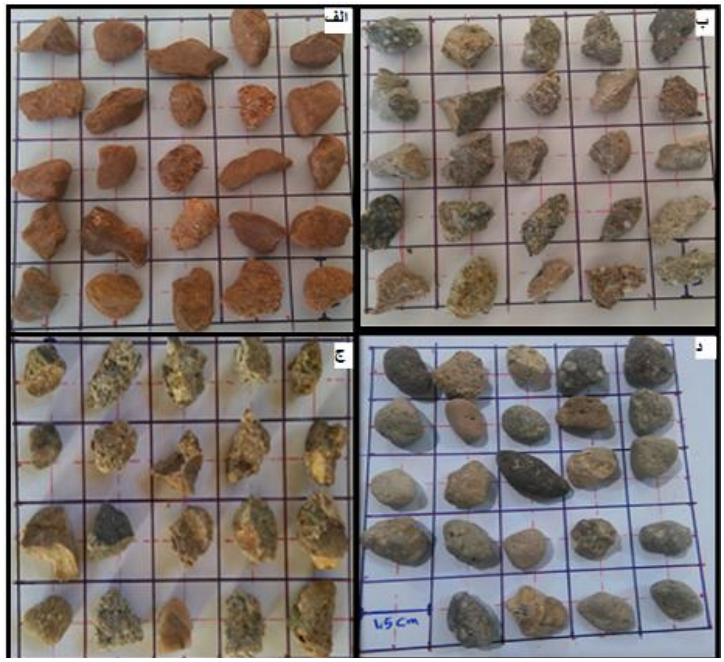
شکل ٤. تصاویر محل نمونه‌برداری در ترانشه ایستگاه‌ها و جعبه نمونه گمانه‌ها

با توجه به این که متغیرهای شکل دانه (کرویت و گردشدگی) روی سایش دانه‌ها تأثیر دارند، از این‌رو، به‌منظور کمی کردن متغیرهای شکل دانه از تکنیک عکس‌برداری از دانه‌ها و مقایسهٔ آن با نمودار پیشنهاد کرومباین واسالس [٢٦] استفاده شده است. از هر نمونه آماده شده برای آزمایش LCPC به‌صورت تصادفی ۲۰ دانه انتخاب شده است. نتایج مربوط به کرویت و گردشدگی نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. در شکل ۵ نمونه‌ای از تصاویر دانه‌های آماده شده از جنس‌های مختلف قبل از انجام آزمایش نمایش داده شده است. نمونه‌های شکسته از خردکردن قطعات بزرگ سنگ‌ها به‌دست آومده است. شکل ٦ عکس‌برداری انجام‌شده از برخی نمونه‌ها را بعد از آزمایش LCPC برای بررسی کرویت و گردشدگی نشان می‌دهد.

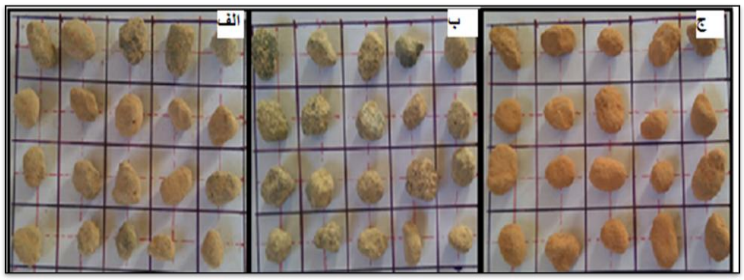
در کنار بررسی میزان سایندگی و شکنندگی نمونه‌ها در نواحی مختلف مسیر پروژه، برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان سایندگی و شکنندگی سنگ‌دانه‌ها با استفاده از آزمایش LCPC، به‌منظور بررسی وجود رطوبت و میزان آب زیرزمینی تعداد ۲۰ نمونه (M1 الی M20) از سه جنس عمده مسیر، تأثیر جنس سنگ‌دانه‌ها ۱۵ نمونه (P1 الی P15)، شکل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

دانه‌ها ۳۰ نمونه (SH1 الی SH30)، سایز دانه‌ها ۲۰ نمونه (Si1 الی Si20)، میزان فوم مصرفی ۲٤ نمونه (F1 الی F24) و نوع فوم مصرفی ۱۸ نمونه(FT1 الی FT18) از سنگدانه‌های مسیر تونل خط دو مترو تبریز تهیه شده است.



شکل ۵. عکس‌برداری از دانه‌های آماده‌شده برای آزمایش LCPC برای نمونه‌های الف) آبرفت‌های ماسه سنگی طبیعی، ب) آبرفت‌های آندزیتی شکسته، ج) آبرفت‌های کنگلومرای شکسته، و د) آبرفت‌های آندزیتی طبیعی



شکل ٦. بررسی کرویت و گرد شدگی بعد آزمایش LCPC برای نمونه‌های الف) S-5 (آبرفت ناحیه ۲)، ب) S-21 (آبرفت ناحیه ۳)، ج) S-31 (آبرفت ناحیه ٤)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

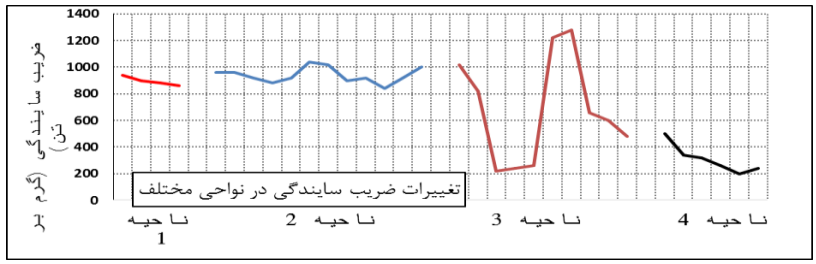
نتایج ضرایب سایندگی و قابلیت شکنندگی در مسیر تونل خط ۲ مترو تبریز

مقادیر ضریب سایندگی نمونه‌های تهیه شده از آبرفت‌های نواحی چهارگانه مسیر تونل خط ۲ مترو تبریز با استفاده از آزمون LCPC تعیین شده است. در شکل ۷ گستره مقادیر LAC در طول مسیر برای حالت خشک نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها، بیش‌ترین مقدار سایندگی مربوط به نمونه‌های S-22 و S-23 متعلق به آبرفت ناحیهٔ ۳ و کم‌ترین مقدار LAC مربوط به نمونه‌های S-31 و S-32 متعلق به آبرفت ناحیهٔ ٤ است. با توجه به این‌که جنس تیغه‌ها در تمام آزمایش‌ها یک‌سان است از این‌رو، عوامل متغیر در آزمایش LCPC در حالتی که نمونه‌ها خشک هستند، متغیرهای شکل دانه و جنس دانه‌ها است. در نتیجه به‌دلیل تغییر این عوامل سایندگی اندازه‌گیری شده در آبرفت‌های مسیر تونل مترو خط دو تبریز متفاوت هستند. محدودهٔ ضریب سایندگی هر یک از نواحی آبرفت‌های گستره مسیر در جدول ٤ ارائه شده است.

کم‌ترین پراکندگی حول میانگین ضرایب سایندگی مربوط به آبرفت ناحیهٔ ۱ و بیش‌ترین پخش‌شدگی، مربوط به آبرفت‌های ناحیهٔ ۳ است که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان سایندگی در آبرفت ناحیهٔ ۳ قابل مشاهده است. به‌طورکلی مقادیر سایندگی بیش‌تر بر اساس آزمایش LCPC مربوط به نمونه‌هایی است که درصد کنگلومرا بیش‌تر و گرد شدگی کم‌تر داشته‌اند، و سایندگی کم‌تر مربوط به نمونه‌هایی است که درصد ماسه‌سنگ بیش‌تر با نسبت کرویت بر گردشدگی پایینی دارند. چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود سایندگی بیش‌تر در ناحیهٔ ۳ به علت وجود کنگلومرا و سایندگی کم‌تر در ناحیهٔ ٤ مربوط به ماسه‌سنگ است. از لحاظ درصد فراوانی جنس‌های مسیر هم بیش‌ترین مربوط به آندزیت است که از لحاظ سایندگی بعد از کنگلومرا قرار داشته و بیش‌ترین تأثیر را روی سایندگی ابزار حفاری می‌گذارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]



شکل ۷. نتایج ضریب سایندگی برای هر یک از آبرفت‌های نواحی ٤ گانه مسیر تونل خط دو مترو تبریز

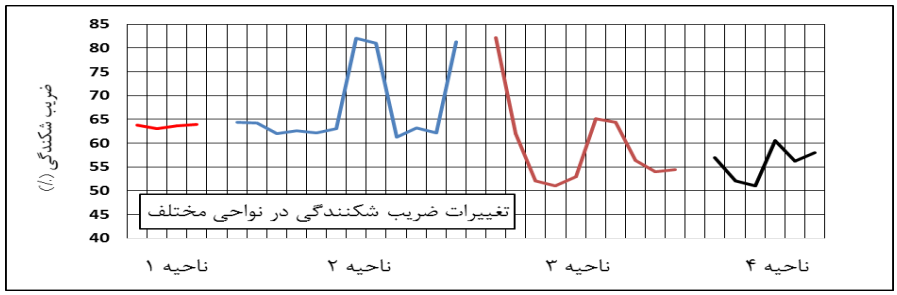
جدول ٤. محدودهٔ ضرایب سایندگی، برای هر یک از نواحی آبرفت‌های گستره مسیر

آبرفت	محدوده سایندگی بر اساس Thuro & Kasling [۲۱]	ضریب سایندگی (گرم برتن)	انحراف معیار
ناحیهٔ (۱)	سایندگی زیاد	۹٤۰–۸٦۰	۳٤/۱٦
ناحیهٔ (۲)	سایندگی زیاد	۱۰٤۰–۸٤۰	۳۸/۲۹
ناحیهٔ (۳)	سایندگی کم تا بسیار زیاد	۱۲۸۰–۲۲۰	٤۰٦/۷
ناحیهٔ (٤)	سایندگی کم تا متوسط	۵۰۰–۲۰۰	۱۰۲/۵

با مقایسهٔ منحنی توزیع اندازهٔ ذرات نمونه قبل و بعد از انجام آزمایش LCPC، شکنندگی و تردی دانه‌ها تعیین شده است. روشن است که آزمایش LCPC باعث ریزتر شدن دانه‌ها شده و در نتیجه درصد عبوری ذرات در نمودارهای دانه‌بندی بعد از آزمایش LCPC افزایش‌یافته است. در شکل ۸ بازه مقادیر LBC در طول مسیر برای حالت خشک نشان داده شده است. طبق طبقه‌بندی جدول ۲ ضریب قابلیت شکنندگی برای آبرفت‌های ناحیه‌های ۱ و ٤ در محدوده زیاد است. آبرفت‌های ناحیهٔ ۲ و ۳ ضریب شکنندگی در محدوده زیاد تا خیلی زیاد را نشان می‌دهند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]



شکل ۸. نتایج ضریب قابلیت شکنندگی برای هر یک از آبرفت‌های نواحی ٤ گانه مسیر تونل خط دو مترو تبریز

بررسی تأثیر وجود و میزان آب بر سایندگی و شکنندگی

به‌منظور بررسی تأثیر درصد رطوبت و میزان آب موجود در مقدار ضریب سایندگی و شکنندگی، آزمایش LCPC روی ۲۰ نمونه (نمونه M1 تا M20) که از نواحی مختلف مسیر تونل خط دو مترو تبریز انتخاب شده است با میزان آب مختلف انجام می‌شود. میزان آب نمونه‌ها برابر صفر(حالت خشک)، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪ وزنی نمونه‌ها انتخاب شده است. در این آزمایش تأثیر میزان آب بر میزان سایندگی سه جنس ماسه‌سنگی، آندزیتی و کنگلومرای مسیر بررسی شده قرار گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۵ و شکل ۹ ارائه شده است.

بر اساس نتایج حاصل از میزان آب ۰٪ تا ۵٪ در هر سه جنس مصالح سایندگی افزایش یافته است. به‌نظر می‌رسد میزان آب ۵٪ باعث چسبیدن مصالح به دیواره ظرف و قفل شدن سنگ‌دانه‌ها بهم شده و این امر عامل افزایش سایندگی در هرسه جنس است. از درصد میزان آب ۵ الی ۱۰، در هر سه جنس کاهش ضریب سایندگی مشاهده می‌شود و میزان سایندگی حداقل در میزان آب ۱۰٪ ایجاد شده است. رفتار ماسه‌سنگ و کنگلومرا در درصدهای بیش‌تر مشابه هم است و در هر دو جنس افزایش میزان آب تا اندازه ۳۰ درصد باعث افزایش سایندگی

جدول ۵. ضریب سایندگی و شکنندگی برای ۲۰ نمونه‌ی آبرفت تبریز در مسیر تونل خط دو مترو برای میزان آب مختلف

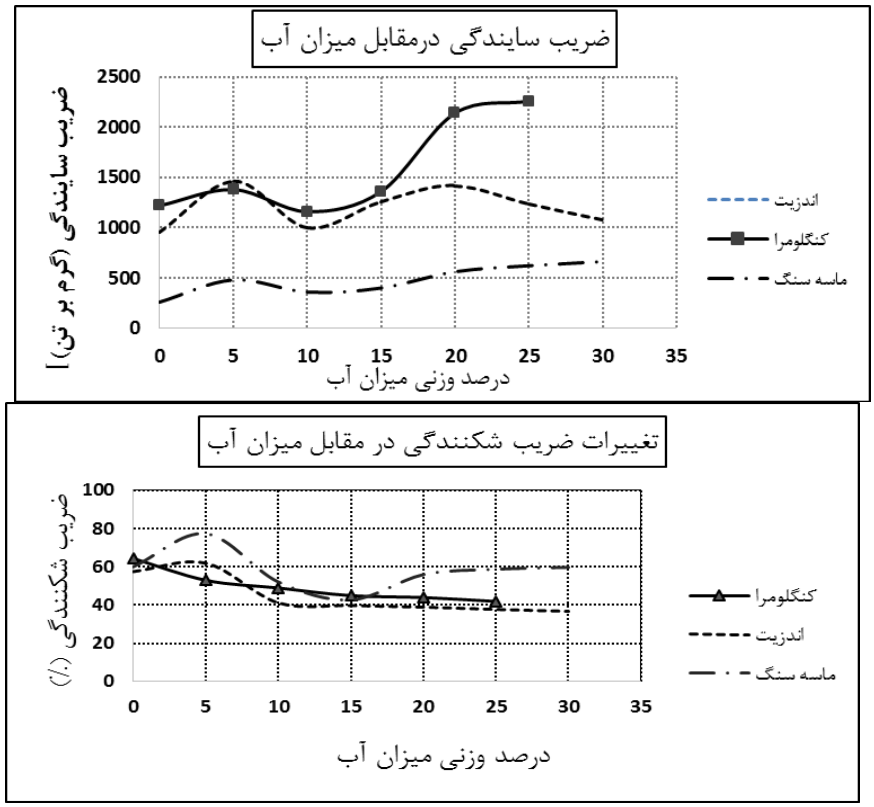
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

نمونه	جنس	درصد وزنی میزان آب	ضریب شکنندگی (٪)	ضریب ساینده‌گی (gr/ton)	نمونه	جنس	درصد وزنی میزان آب	ضریب شکنندگی (٪)	ضریب ساینده‌گی (gr/ton)
M-1	کنگلومرا	۰	٦٤,٤	۱۲۲۰	M-11	ماسه‌سنگ	۲۰	٥٦,۲	٥٦۰
M-2	کنگلومرا	٥	٥۳	۱۳۸۰	M-12	ماسه‌سنگ	۲٥	٥۹	٦۲۰
M-3	کنگلومرا	۱۰	٤۹	۱۱٦۰	M-13	ماسه‌سنگ	۳۰	٦۰	٦٦۰
M-4	کنگلومرا	۱٥	٤٥	۱۳٦۰	M-14	آندزیت	۰	٥۷,٦	۹٦۰
M-5	کنگلومرا	۲۰	٤٤	۲۱٤۰	M-15	آندزیت	٥	٦۲	۱٤٦۰
M-6	کنگلومرا	۲٥	٤۲	۲۲٦۰	M-16	آندزیت	۱۰	٤۱,٤	۱۰۰۰
M-7	ماسه‌سنگ	۰	٦۰,۲	۲٦۰	M-17	آندزیت	۱٥	٤۰	۱۲٦۰
M-8	ماسه‌سنگ	٥	۷۷,٦	٤۸۰	M-18	آندزیت	۲۰	۳۹,۲	۱٤۲۰
M-9	ماسه‌سنگ	۱۰	٥۲,٤	۳٦۰	M-19	آندزیت	۲٥	۳۸	۱۲٤۰
M-10	ماسه‌سنگ	۱٥	٤۳	٤۰۰	M-20	آندزیت	۳۰	۳۷	۱۰۸۰

مصالح شده است که در کنگلومرا افزایش ساینده‌گی در مقادیر آب بیش‌تر به‌طور چشم‌گیری بیش‌تر است. در آندزیت هم تا میزان آب ۲۰٪ افزایش ساینده‌گی دیده می‌شود ولی از ۲۰٪ به بعد کاهش ساینده‌گی مشاهده می‌شود. در بیش‌تر نمونه‌ها با افزایش میزان آب تا ۱۰ درصد وزنی مصالح، ضریب قابلیت شکنندگی مصالح کاهش می‌یابد. بر اساس مشاهدات انجام‌شده حین انجام آزمایش با میزان آب ۱۰٪ مشخص شد که در تمامی نمونه‌ها پس از گذشت چند دقیقه از شروع آزمایش، دانه‌ها به دیوارهٔ مخزن دستگاه چسبیده و حالت فولیکوله پیدا می‌کنند. همین موضوع باعث عدم برخورد تیغهٔ آزمایش به دانه‌ها هنگام آزمایش شده و در نتیجهٔ میزان خردشدگی دانه‌ها در میزان آب ۰٪ تا ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در اکثر نمونه‌ها از ۱۰٪ به بعد افزایش شکنندگی مشاهده می‌شود. علت افزایش LBC بعد از میزان آب ۱۰ درصد به‌دلیل این است که دیگر دانه‌ها به جدارهٔ ظرف نمونه نچسبیده و تیغه به دانه‌ها برخورد کرده در نتیجه خردشدگی به نسبت مقدار ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بر اساس نتایج آزمایش LCPC وجود و افزایش میزان آب در اکثر موارد باعث افزایش ساینده‌گی می‌شود که الگوی مشاهده شده با نتایج تحقیقات مشابه [۱۹] هم‌خوانی دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]



شکل ۹. نمودار مقادیر ضریب قابلیت ساینگی و قابلیت شکنندگی در مقابل درصد وزنی میزان آب

بررسی تأثیر جنس مصالح بر ساینگی و شکنندگی

به‌منظور بررسی تأثیر جنس سنگ‌دانه‌ها روی سایش‌پذیری، از آن‌جاکه جنس غالب آبرفت‌های گسترهٔ تبریز آندزیت، ماسه‌سنگ و کنگلومرا است. نمونه‌های P1 تا P15 مطابق جدول ٦ آماده‌سازی شده و آزمایش LCPC روی هر نمونه انجام شد. در این سری از آزمایش‌ها برای بررسی تأثیر جنس سنگ‌دانه‌ها بر میزان ساینگی، مقادیر درصد رطوبت (برابر صفر)، کرویت و گردشدگی برای تمامی نمونه‌ها یک‌سان در نظر گرفته شده است. جدول ٦ و نمودار شکل ۱۰ تغییرات میزان ضرایب ساینگی و شکنندگی را برای جنس‌های مختلف نشان می‌دهند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

بر اساس نتایج حاصل بیش‌ترین میزان LAC مربوط به نمونهٔ P-1 (کنگلومرا) و کم‌ترین میزان LAC مربوط به نمونهٔ P-7 (ماسه سنگ) است.

به‌طورکلی و بر اساس نتایج حاصل بیش‌ترین سایندگی مربوط به کنگلومرا و کم‌ترین میزان مربوط به ماسه‌سنگ است. آندزیت هم از لحاظ سایندگی کم‌تر از کنگلومرا و بیش‌تر از ماسه‌سنگ است و نتایج سایندگی نمونه‌های ترکیبی آندزیت و ماسه‌سنگ نشان می‌دهد که هر چقدر آندزیت بیش‌تر باشد سایندگی بیش‌تر و برعکس هرچقدر ماسه‌سنگ بیش‌تر می‌شود سایندگی کم‌تر می‌شود.

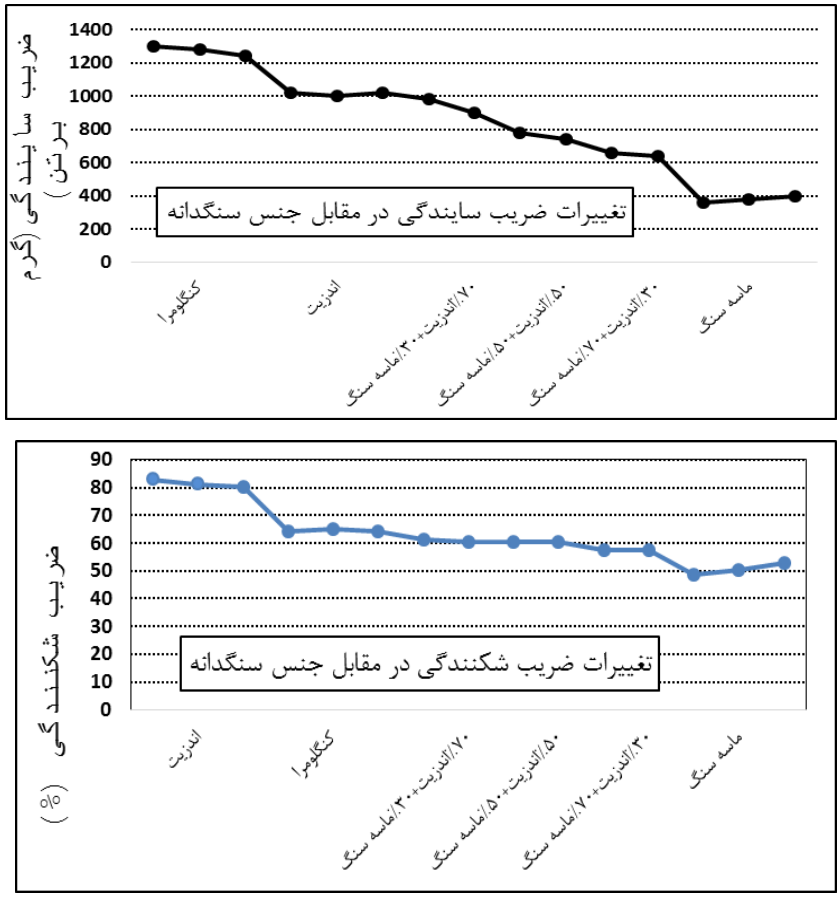
چنان‌چه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود از لحاظ جنس سنگ‌دانه بیش‌ترین شکنندگی در آندزیت وکم‌ترین شکنندگی در ماسه‌سنگ است و نمونه‌های کنگلومرا هم از لحاظ شکندگی بعد از آندزیت قرار می‌گیرد. هم‌چنین برای بررسی شکنندگی آندزیت و ماسه‌سنگ در این آزمایش ٦ نمونه با ترکیب مختلف آندزیت و ماسه‌سنگ تهیه و آزمایش شده است که بر اساس نتایج حاصل با افزایش میزان آندزیت، شکنندگی افزایش و برعکس هرقدر ماسه‌سنگ افزایش می‌یابد شکنندگی کاهش می‌یابد.

جدول ٦. نتایج ضریب سایندگی و شکنندگی در نمونه‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ، آندزیت و ترکیبات مختلف آندزیت- ماسه‌سنگ

نمونه	جنس	سایندگی (گرم بر تن)	ضریب شکنندگی (٪)	نمونه	جنس	سایندگی (گرم بر تن)	ضریب شکنندگی (٪)
P-1	کنگلومرا	۱۳۰۰	٦٤/٤	P-9	ماسه‌سنگ	٤۰۰	٥۲/۸
P-2	کنگلومرا	۱۲۸۰	٦٥/۲	P-10	٥۰٪آندزیت+٥۰٪ماسه‌سنگ	۷۸۰	٦۰/٦
P-3	کنگلومرا	۱۲٤۰	٦٤/۲	P-11	٥۰٪آندزیت+٥۰٪ماسه‌سنگ	۷٤۰	٦۰/٤
P-4	آندزیت	۱۰۲۰	۸۲/۸	P-12	۷۰٪آندزیت+۳۰٪ماسه‌سنگ	۹۸۰	٦۱/۲
P-5	آندزیت	۱۰۰۰	۸۱/۲	P-13	۷۰٪آندزیت+۳۰٪ماسه‌سنگ	۹۰۰	٦۰/٤
P-6	آندزیت	۱۰۲۰	۸۰/٤	P-14	۳۰٪آندزیت+۷۰٪ماسه‌سنگ	٦٦۰	٥۷/٤
P-7	ماسه‌سنگ	۳٦۰	٤۸/٤	P-15	۳۰٪آندزیت+۷۰٪ماسه‌سنگ	٦٤۰	٥۷/٦
P-8	ماسه‌سنگ	۳۸۰	٥۰/٤				

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

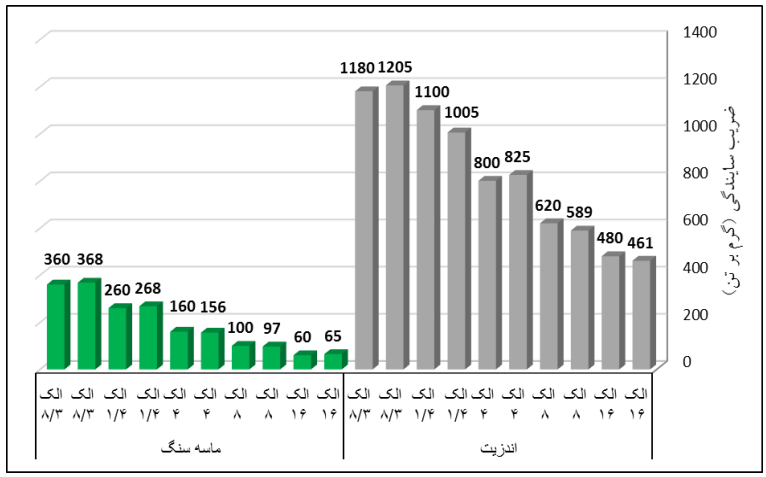


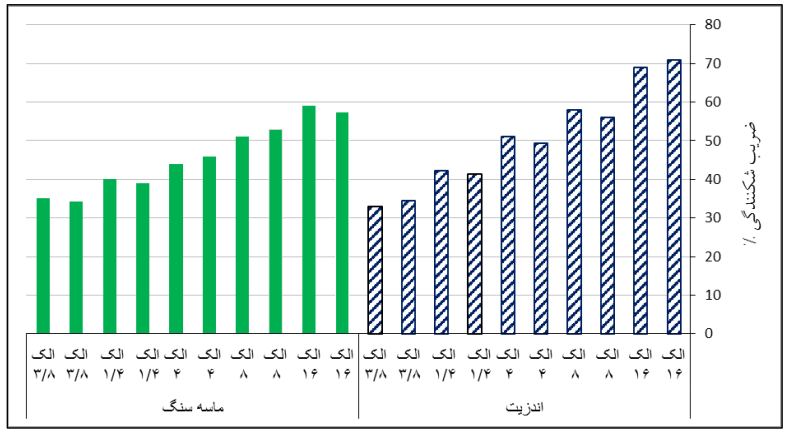
شکل ۱۰. نتایج ضرایب سایندگی و شکنندگی در جنس‌های مختلف آبرفت‌های مسیر تونل مترو خط دو تبریز

بررسی تأثیر اندازه سنگ‌دانه بر میزان سایندگی و شکنندگی

با توجه به تأثیر قابل توجه سایز دانه‌ها بر میزان سایش، در بخش حاضر آزمون سایندگی روی نمونه‌های با اندازهٔ الک‌های مختلف (الک شماره ۱۶ تا ۳/۸) و شرایط یک‌سان شکل و میزان آب در دو جنس غالب مسیر که آندزیت و ماسه‌سنگ است، انجام گرفته و نتایج حاصل در جدول ۷ و شکل ۱۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل بیش‌ترین سایندگی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]





شکل ۱۱. نمودار ضرایب ساینداگی و شکنندگی در برابر سایز دانه‌ها در دو جنس غالب مسیر (آندزیت و ماسه‌سنگ)

در جنس آندزیت مربوط به نمونه Si-9 (باقی‌مانده روی الک ۳/۸) و کم‌ترین سایش مربوط به نمونه Si-1 (باقی‌مانده روی الک ١٦) و در ماسه‌سنگ بیش‌ترین ساینداگی مربوط به نمونهٔ Si-19 و کم‌ترین سایش مربوط به نمونهٔ Si-12 است. به‌طورکلی با افزایش اندازهٔ دانه‌ها، ضریب ساینداگی افزایش یافته و ضریب شکنندگی کاهش می‌یابد که این امر با نتایج سایر محققان [۱۷]، [۱۹] نیز هم‌خوانی دارد. میزان افزایش ضریب ساینداگی با افزایش اندازهٔ دانه‌ها، در آندزیت بیش‌تر از ماسه‌سنگ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

جدول ۷. نتایج آزمون تأثیر اندازهٔ دانه‌ها در سایش‌پذیری در دو جنس غالب مسیر (آندزیت و ماسه‌سنگ)

نمونه	جنس	حداقل اندازه دانه (mm)	ضریب ساینده‌گی (گرم برتن)	ضریب شکنندگی (٪)	نمونه	جنس	حداقل اندازه دانه (mm)	ضریب ساینده‌گی (گرم برتن)	ضریب شکنندگی (٪)
Si-1	آندزیت	۱/۱۹	٤٦١	۷۱	Si -11	ماسه‌سنگ	۱/۱۹	٦٥	٥٧/٥
Si -2	آندزیت	۱/۱۹	٤٨٠	٦٩	Si -12	ماسه‌سنگ	۱/۱۹	٦٠	٥٩
Si -3	آندزیت	۲/۳۸	٥٨٩	٥٦	Si -13	ماسه‌سنگ	۲/۳۸	۹۷	٥٣
Si -4	آندزیت	۲/۳۸	٦٢٠	٥٨	Si -14	ماسه‌سنگ	۲/۳۸	۱۰۰	٥١
Si -5	آندزیت	٤/٧٦	٨٢٥	٤٩/٤	Si -15	ماسه‌سنگ	٤/٧٦	١٥٦	٤٦
Si -6	آندزیت	٤/٧٦	٨٠٠	٥١	Si -16	ماسه‌سنگ	٤/٧٦	١٦٠	٤٤
Si -7	آندزیت	٦/٣٦	١٠٠٥	٤١/٣	Si -17	ماسه‌سنگ	٦/٣٦	٢٦٨	٣٩
Si -8	آندزیت	٦/٣٦	١١٠٠	٤٢/٢	Si -18	ماسه‌سنگ	٦/٣٦	٢٦٠	٤٠
Si -9	آندزیت	۹/٥١	١٢٠٥	٣٤/٥	Si -19	ماسه‌سنگ	۹/٥١	٣٦٨	٣٤/٣
Si - 10	آندزیت	۹/٥١	١١٨٠	٣٣	Si -20	ماسه‌سنگ	۹/٥١	٣٦٠	٣٥/٢

بررسی تأثیر شکل سنگ‌دانه بر میزان ساینده‌گی و شکنندگی

در ابتدای این بخش بر اساس فن عکسبرداری از دانه‌ها و معیارهای شرح داده شده در بخش‌های قبل، میانگین نتایج کرویت و گرد شدگی سنگدانه‌های گستره تونل مترو خط دو تبریز (نمونه‌های S1 الی S32) در جدول ۸ ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۸ مشاهده می‌شود که گردشدگی دانه‌ها بعد از آزمایش LCPC افزایش چشم‌گیری داشته است. این نشان می‌دهد که تیزگوشگی دانه‌ها بعد از آزمایش کم شده و دانه‌ها گردتر شده‌اند. هم‌چنین علی رغم افزایش کرویت در سنگ‌دانه‌ها بعد از انجام آزمایش، نسبت کرویت بر گردشدگی برای تمامی نمونه‌ها کاهش یافته است که کم‌ترین و بیش‌ترین میزان این کاهش به‌ترتیب مربوط به نمونه‌های ناحیهٔ ۱ و ٤ به میزان ٥ و ٢٥ درصد است.

در ادامه برای بررسی تأثیر شکل دانه‌ها بر میزان ساینده‌گی، روی ۳۰ نمونه (SH1 الی SH30) از جنس‌های مختلف با کرویت و گردشدگی‌های مختلف و رطوبت یکنواخت آزمایش LCPC انجام یافته است. لازم به‌ذکر است به‌منظور سنجش تکرارپذیری آزمایش‌های برخی از نمونه‌ها با مشخصات یک‌سان آزمایش شده است. در جدول ۹ به‌عنوان نمونه صرفاً مشخصات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

نمونه‌های ماسه سنگ و آندزیت ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل و به‌عنوان الگویی کلی، در تمامی جنس سنگ‌دانه‌ها با افزایش نسبت کرویت بر گردشدگی میزان ضریب سایندگی افزایش می‌یابد.

بررسی تأثیر میزان فوم مصرفی بر سایندگی خاک

در حفاری با ماشین‌های EPB-TBM فوم‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین مواد افزودنی به سینه کار نقش مهمی در کاهش مقاومت برشی خاک جبهه کار، ایجاد فشار یکنواخت در سینه کار و تسهیل تخلیه خاک حفاری شده به خارج از تونل ایفا می‌کنند. این مواد همراه با پلیمرها و مواد ضد رس در بسیاری مواقع از ملزومات اصلی حفاری در زمین‌های نرم می‌باشند، اما صرف‌نظر از ویژگی‌های مطلوبی که این مواد دارند استفاده بی رویه آن‌ها می‌تواند سبب بالا رفتن پتانسیل سایش موادخاکی، افزایش مصرف مته حفاری و در نهایت بالا رفتن هزینه پروژه شود. در بخش حاضر برای بررسی میزان اثر گذاری مقدار فوم مصرفی بر روی سایش، آزمایش بر روی ٢٤ نمونه (F1 الی F24) با جنس‌های آندزیت، ماسه‌سنگ، سیلیس و کنگلومرا با درصد فوم‌های مختلف انجام‌یافته است. از فوم متداول مورد مصرف در پروژه (A168) که مربوط به شرکت کمیل کاشان استفاده شده است. لازم بذکر است نسبت کرویت بر گردشدگی برای تمامی نمونه‌ها در حدود ۱/۱۵ انتخاب شده است. مطالعات جامعی بر روی مشخصات فوم‌های تو.لید کارخانجات مختلف داخلی و خارجی نیز انجام یافته است که نتایج آن بطور جداگانه در حال انتشار می‌باشد. در شکل ۱۲ مراحل انجام آزمایش بر روی مصالح فوم دار نمایش داده شده است.

این آزمایشات در محدوده بین حالت خشک تا میزان مصرفی ۱۰۰ میلی‌لیتر فوم (به ترتیب معادل با صفر الی ۲۰ درصد وزنی مصالح) انجام شده است. تغییرات ضریب سایندگی در برابر میزان فوم مصرفی برای جنس مصالح مختلف در شکل ۱۳ ارائه شده است. قابل مشاهده است که در تمامی جنس‌ها از صفر تا ۲۰ میلی‌لیتر سایندگی کاهش و از ۲۰ میلی‌لیتر تا ۱۰۰ میلی‌لیتر سایندگی افزایش می‌یابد. بعبارت دیگر زمانی که فوم در نمونه در حد خیس شدگی باشد حداقل سایندگی مشاهده شده و از آن به بعد با افزایش میزان فوم مصرفی که باعث در گیری بیشتر تیغه و مصالح می شود، سایندگی افزایش می‌یابد. در نتیجه میزان فوم بهینه در حدود ٤ درصد وزنی نمونه‌ها (برابر ۲۰ میلی لیتر) می باشد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

جدول ۸. میانگین نتایج متغیرهای شکل دانه قبل و بعد از آزمایش LCPC در آبرفت‌های گستره تبریز

آبرفت	قبل از آزمایش LCPC			بعد از آزمایش LCPC		
	کرویت	گرد شدگی	گردشدگی /کرویت	کرویت	گرد شدگی	گردشدگی /کرویت
ناحیه ۱	۰/۷۶	۰/۶۶	۱/۱۴	۰/۸۷	۰/۸	۱/۰۹
ناحیه ۲	۰/۷۱	۰/۵۸	۱/۳۲	۰/۸۶	۰/۷۸	۱/۱۱
ناحیه ۳	۰/۵۹	۰/۴۴	۱/۴۹	۰/۸۵	۰/۷۵	۱/۱۳
ناحیه ٤	۰/۷۲	۰/۵۱	۱/۴۷	۰/۸۶	۰/۷۷	۱/۱۲

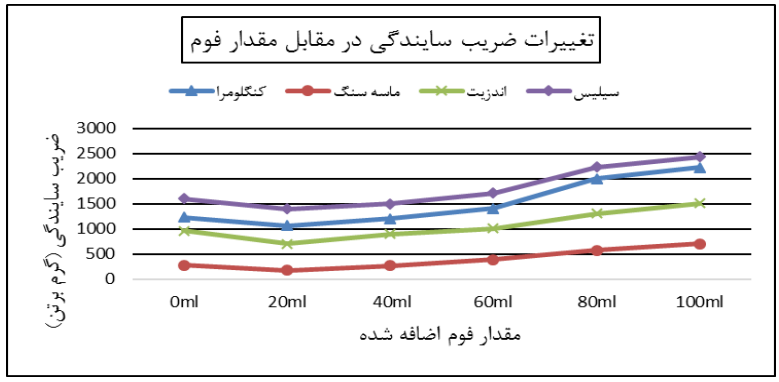
جدول ۹. بررسی متغیرهای شکل دانه در نمونه‌های ماسه‌سنگ و آندزیت

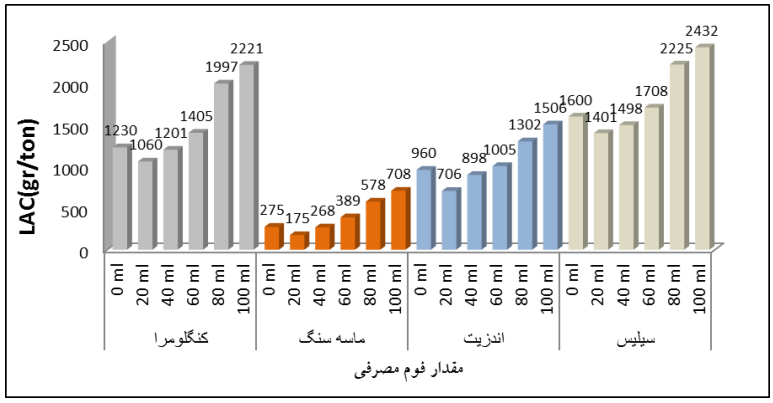
نمونه	جنس سنگدانه		کرویت	گرد شدگی	گردشدگی/کرویت	ضریب سایندگی (gr/ton)
	ماسه‌سنگ (٪)	آندزیت (٪)				
SH-1	۰	٪۱۰۰	۰/۵	۰/۳	۱/۶۶	۱۰۲۰
SH-2	۰	٪۱۰۰	۰/۵	۰/۳	۱/۶۶	۱۰۴۰
SH-3	۰	٪۱۰۰	۰/۵	۰/۳	۱/۶۶	۱۰۰۰
SH-4	۰	٪۱۰۰	۰/۸	۰/۷	۱/۱۴	۹۰۰
SH-5	۰	٪۱۰۰	۰/۸	۰/۷	۱/۱۴	۹۶۰
SH-6	۰	٪۱۰۰	۰/۸	۰/۷	۱/۱۴	۹۸۰
SH-25	۰	٪۱۰۰	۰/۶۵	۰/۵	۱/۳	۱۰۴۰
SH-26	۰	٪۱۰۰	۰/۵۹	۰/۴۲	۱/۴	۱۱۴۰
SH-27	۰	٪۱۰۰	۰/۷	۰/۵۱	۱/۳۹	۹۶۰
SH-7	٪۱۰۰	۰	۰/۷	۰/۶	۱/۱۶	۲۰۰
SH-8	٪۱۰۰	۰	۰/۷	۰/۶	۱/۱۶	۲۴۰
SH-9	٪۱۰۰	۰	۰/۷	۰/۶	۱/۱۶	۲۲۰
SH-10	٪۱۰۰	۰	۰/۴	۰/۳	۱/۳۳	۳۶۰
SH-11	٪۱۰۰	۰	۰/۴	۰/۳	۱/۳۳	۳۸۰
SH-12	٪۱۰۰	۰	۰/۴	۰/۳	۱/۳۳	۴۰۰
SH-28	٪۱۰۰	۰	۰/۵۵	۰/۴۵	۱/۲۲	۳۰۰
SH-29	٪۱۰۰	۰	۰/۶۱	۰/۵۱	۱/۱۹	۲۶۰
SH-30	٪۱۰۰	۰	۰/۴۹	۰/۳۹	۱/۲۵	۳۳۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

شکل ۱۲- مراحل انجام آزمایش تعیین سایندگی مصالح فوم دار، الف) وزن کردن فوم، ب)افزودن فوم به مصالح، ج) آزمایش درحالت خیس شدگی، د) آزمایش در حالت مصرف زیاد فوم، ه) تصویر دانه‌ها بعد از آزمون، ی) تصویر ایمپلر بعد از آزمون





شکل ۱۳. نتایج آزمایش تعیین سایندگی مصالح فوم دار به‌کمک دستگاه LCPC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده از انجام بیش از ١٦٥ آزمایش LCPC روی سنگ‌دانه‌های مسیر خط ٢ مترو تبریز:

- در مسیر خط ٢ مترو تبریز سنگ‌دانه‌های واقع در ناحیه‌های ١ و ٢ دارای سایندگی زیاد و سنگ‌دانه‌های ناحیه‌های ٣ و ٤ به‌ترتیب دارای محدوده سایندگی کم تا بسیار زیاد و کم تا متوسط هستند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقدار ضریب سایندگی مشاهده شده در سنگ‌دانه‌های آزمایش شده، به‌ترتیب برابر ١٢٨٠ گرم بر تن واقع در ناحیه ٣ مسیر و ٢٠٠ گرم بر تن واقع در ناحیه ٤ مسیر است. برای تمامی مسیر سنگ‌دانه‌ها دارای محدودهٔ شکنندگی زیاد تا خیلی زیاد هستند.
- مصرف فوم باید به‌صورت بهینه درحد کارپذیری خاک و خیس شدگی مصالح باشد. استفاده بیش از اندازه فوم در حفاری مکانیزه نه تنها سایندگی را کاهش نمی‌دهد بلکه با افزایش میزان ضریب سایندگی باعث تشدید ساییدگی تیغه‌ها و ابزارهای برشی دستگاه نیز می‌شود.
- افزایش دانه‌های سخت مانند کنگلومرا در آبرفت‌های گستره مسیر میزان سایندگی را تا حد زیادی افزایش می‌دهد ولی باتوجه به این‌که جنس غالب مسیر آندزیت هست عمده‌ترین اثر سایش در پروژه ناشی از مصالح آندزیتی است. هرچقدر سایز دانه‌ها افزایش می‌یابد سایندگی هم بیش‌تر می‌شود که در آندزیت این تغییرات بیش‌تر از ماسه‌سنگ است. هرچقدر سایز دانه‌ها بزرگ‌تر می‌شود شکنندگی کاهش یافته و برعکس با ریزتر شدن دانه‌ها شکنندگی افزایش می‌یابد. این حالت در هر دو جنس ماسه‌سنگ وآندزیت قابل مشاهده است و به‌طورکلی نمونه‌های آندزیت شکنندگی بیش‌تری نسبت به نمونه‌های ماسه‌سنگ دارند.
- بر اساس نتایج حاصل و به‌عنوان الگویی کلی، در تمامی جنس سنگ‌دانه‌ها با افزایش نسبت کرویت بر گردشدگی میزان ضریب سایندگی افزایش می‌یابد.
- به‌طورکلی می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بر اساس نتایج حاصل از آزمایش LCPC انجام یافته، وجود و افزایش میزان آب در اکثر موارد باعث افزایش سایندگی می‌شود که الگوی مشاهده شده با نتایج تحقیقات مشابه [١٩] همخوانی دارد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

منابع

1. 1.Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P., "Abrasivity testing for rock and soils", Tunnels & Tunneling International (April 2006) 47-49.

٢. آیتی ف.، مهدوری س.، "تخمین تراست مورد نیاز حفاری در تونل انتقال آب بهشت آباد"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ٧ (١) (١٣٩٢) ١٧٢٤-١٧٠٧.

3. Tarigh azali S., Moammeri H., "EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1", WTC ITA-AITES 2012 World Tunnel Congress, Thailand (2012).
4. Plinninger R. J., Spaun G., Thuro K., "Predicting tool wear in drill and blast", Tunnel and Tunnelling International (April 2002) 38-41.
5. Thuro K., Plinninger R. J., "Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting, ISRM-Technology road maps for rock maps", south African institute of mining and metallurgy (2003).
6. Plinninger R. J., Spaun G., Thuro K., "Prediction and classification of tool wear in drilling and blasting tunneling", Engineering Geology for Developing Countries, Proceedings of 9th congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, Durban, South Africa (2002) 2226-2236.
7. Frenzel Ch., Käsling H., Thuro K., "Factors Influencing Disc Cutter Wear", Geomechanics and Tunneling 1(1) (2008) 55-60.
8. Thuro K., Singer J., Kasling H., Bauer M., "Determining abrasiveness with the LCPC Test", Proceedings of the 1st Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver B.C (2007).
9. West G., "Rock abrasiveness testing for tunneling", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, Vol. 26 (2) (1989) 151-160.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

۱۰. همزبان م.ت.، معماریان ح.، رستمی ج.، "مقایسهٔ روش‌های مختلف تعیین ساینگی سنگ‌ها"، نشریهٔ مهندسی معدن، ۸ (۱۹)، (۱۳۹۲) ۸۷–۱۰۶.

11. Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raleigh P., "New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling", RETC Proceedings (2007) 104-116.

12. Cerchar, "Cerchar tests for the measurement of hardness and abrasivity of rocks", Centre Study Research, French Coal Industry, Document 73-59 (1973) 1-10.

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

14. Mostafaei M., Rezaei Far A.H., Rastegarnia A., "Assessment of the impact of case parameters affecting abrasion and brittleness factors in alluviums of Tabriz line 2 subway, Iran", Bull Eng Geol Environ, 78 (2019) 3851-3861.

15.Drucker P., "Validity of the LCPC abrasivity coefficient through the example of a recent Danube gravel", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 4(6) (2011) 41-50.

۱٦. هاشم‌نژاد آ.، غفوری م.، لشکری‌پور غ.، طریق ازلی ص.، "بررسی پارامترهای زمین‌شناسی مؤثر بر میزان ساینگی کانی‌ها به‌کمک دستگاه LCPC" نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ۸ (۲) (۱۳۹۳) ۲۲۴۳–۲۲۲۳.

۱۷. میرمحرابی ح.، غفوری م.، لشکری‌پور غ.، "ارزیابی تأثیر پارامترهای عملکردی بر سایش ابزارآلات حفاری مکانیزه با استفاده از نمونه‌های سیلیسی"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، ۹ (۳)، (۱۳۹٤) ۳۰۵۰–۳۰۳۳.

18. Gharahbagh E. A., Rostami J., Talebi, K, "Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]

face tunneling machines", Tunnelling and Underground Space Technology, 41 (2014) 127-136.

١٩. برزگری ق.، "ارزیابی سایندگی خاک‌ها در حفاری مکانیزه تونل به‌روش تعادل فشار زمین (مطالعهٔ موردی: خط یک متروی تبریز)"، رسالهٔ دکتری، دانشگاه تربیت مدرس (١٣٩١).

٢٠. اصغری ا.، حیدری ب.، "بررسی سایندگی خاک‌های مسیر تونل خط ٢ مترو تبریز"، ششمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس (١٣٨٨).

21. Thuro K., Kasling H., "Classification of the abrasiveness of soil and rock", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 2 (2) (2009) 179-188.

22. Plinninger R. J., Restner U., "Abrasiveness Testing, Quo vadis- A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods", Geomechanik und tunnelbau. Vol. 1(1) (2008) 61-70.

23. Käsling H., Thuro K., "Determining abrasivity of rock and soil in the laboratory Engineering Geology", Technische Universität München, (2010).

٢٤. پژوهش عمران راهوار، "گزارش نهایی مطالعات ژئوتکنیک مرحلهٔ اول پروژه خط ٢ قطار شهری تبریز" (١٣٨٧).

٢٥. صاحب خواجه م.، برزگری ق.، " بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی مسیر خط ٢ متروی تبریز"، دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران، کرمانشاه (١٣٩٣).

26. Krumbein W. C., Sloss L. L., "Stratigraphy and Sedimentation", W. H.Freeman and Co., San Francisco (1963) 660.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.4.6.3]