ارزیابی تأثیر پارامترهای عملکردی بر سایش ابزارآلات حفاری مکانیزه با استفاده از نمونه‌های سیلیسی

حسین میرمحرابی*، محمد غفوری، غلامرضا لشکری‌پور؛
دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ: دریافت ۹۲/٤/۱٦ **پذیرش** ۹۳/٤/۱٦

چکیده

از چالش‌های حفاری مکانیزه، سایش زیاد و پیش‌بینی نشده ابزار برش در برخی پروژه‌های احداث تونل است. این مسئله علاوه بر افزایش هزینه، زمان حفاری را هم از طریق نیاز بیش‌تر به تعمیر و نگه‌داری اجزای ماشین، افزایش می‌دهد. به‌منظور دست‌یابی به دید مناسبی از رابطهٔ بین پارامترهای اپراتوری ماشین حفار با پدیدهٔ مورد نظر، دستگاه آزمایشگاهی جدیدی در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و ساخته شده است. در این مقاله نتیجهٔ حاصل از آزمایش نمونه‌های سیلیسی به‌عنوان نمونه‌های با سختی زیاد و فراوان در طبیعت با دستگاه مذکور ارائه شده است. برای این منظور ۳٦ آزمایش با مقادیر متغیر سربار و سرعت چرخش در زمان‌های متفاوت روی ماسهٔ درشت سیلیسی انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که بین استهلاک سایشی ابزار برشی و زمان، فشار سربار و سرعت چرخش، رابطهٔ مستقیم وجود دارد به‌گونه‌ای‌که این رابطهٔ مستقیم، در مورد تأثیر سربار و سرعت چرخش خطی، و در مورد تأثیر زمان لگاریتمی است.

واژه‌های کلیدی: حفاری مکانیزه، سایش ابزار، ساینده‌گی خاک، آزمایش سایش خاک

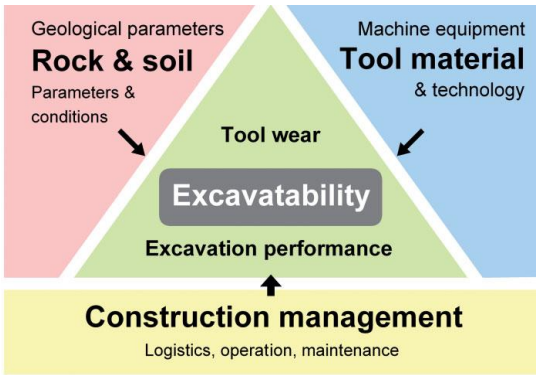
* **نویسنده مسئول** hosseinmirmehrabi@gmail.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

مقدمه

امروزه حفاری مکانیزه به‌دلیل مزایای آن بسیار فراگیر شده است. این موضوع به‌خصوص در محیط‌های شهری به‌دلیل کاهش ریسک نشست با ماشین‌های حفاری سینه‌کار بسته، به سرعت در حال توسعه است. از جمله مخاطرات مهم این روش، استهلاک زیاد ابزار برش در اثر پدیدهٔ ساینده‌گی است. ساینده‌گی را به‌صورت کلی می‌توان به‌عنوان خصوصیت یا استعداد نوعی سنگ یا خاک برای ایجاد سایش در ابزارآلات تعریف کرد [۱]. مشکلات ناشی از زمین‌های ساینده در بسیاری از طرح‌های تونل‌سازی دنیا از جمله پروژهٔ ECIS در لس‌آنجلس و تونل Elbe در هامبورگ، گزارش شده است [۲]. مشکلات ساینده‌گی در خط ۱ متروی اصفهان، خط ۱ متروی شیراز، قطعهٔ ۱ تونل قمرود و خط ۱ متروی تبریز نیز از زمرهٔ پروژه‌های داخل ایران گزارش شده است [۳].

به‌طورکلی سه گروه عوامل در بحث خسارت‌های ناشی از ساینده‌گی زمین در ماشین‌آلات حفاری دخیل‌اند که عبارتند از عوامل زمین‌شناسی، خصوصیات ابزارآلات، عوامل انسانی و اجرایی(شکل ۱). چنان‌که ملاحظه می‌شود، پارامترهای مرتبط با اپراتوری، یکی از زیرمجموعه‌های بخش مدیریت ساخت است که بر استهلاک ابزار مؤثر است. حسن‌پور و رستمی به تأثیر برخی از پارامترهای اپراتوری مانند سرعت چرخش کلهٔ حفار و نیروی پیشران بالا بر روی سایش دیسک‌ها اشاره کرده‌اند [٤]. هاشم‌نژاد و همکاران اخیراً با کمک آزمایش LCPC تأثیر برخی خصوصیات زمین‌شناسی بر ساینده‌گی خاک را بررسی کرده‌اند [۵].



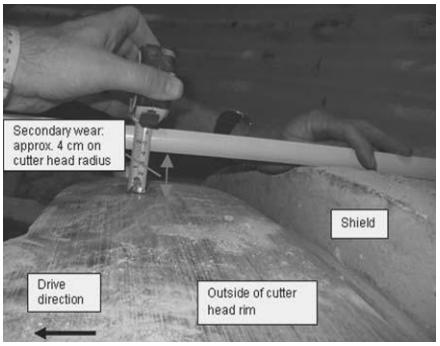
شکل ۱. پارامترهای مؤثر در سایش ابزار و عملکرد حفاری [٦]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

اثرات سایش و آسیب‌دیدگی کله حفاری ماشین تونل‌زنی در صدها پروژهٔ تونلی از سراسر جهان مشاهده شده است. سایش ممکن است در قسمت‌های مختلفی از ماشین، از جمله ابزارآلات حفاری، جلو، عقب و محیط کله حفار، نقالهٔ مارپیچ، لوله‌های دوغاب و پمپ‌ها رخ دهد. واضح است که سازندهٔ ماشین به‌منظور انتخاب اجزای ماشین و حفاظت از سایش‌های ناشی از زمین، باید در مرحلهٔ طراحی به خصوصیات ساینده‌گی زمین دسترسی داشته باشد. به‌علاوه در زمان ساخت نیز هنگامی‌که اجزای ماشین در معرض زمین ساینده قرار می‌گیرند، پیمانکار باید برنامه‌ای مناسب برای تعمیر و نگه‌داری و بازرسی‌های زمان‌بندی شده، تهیه کند. در حالی‌که بازرسی‌های روزانه از کله حفار در ماشین‌های زمین‌های سخت کاری عادی است این امر در ماشین‌های زمین‌های نرم به خاطر دشواری‌های موجود بسیار کم‌تر انجام می‌گیرد [۷]. شکل‌های ۲ و ۳ مثال‌هایی از میزان سایشی که در پروژه‌های حفاری در زمین‌های نرم قابل مشاهده است را نشان می‌دهند. شکل ٤ منطقهٔ محیطی کله حفار را قبل و بعد از تعمیر ماشین در متروی پورتو نشان می‌دهد.



شکل ۲. سایش ثانویهٔ شدید در حد فاصل پشت کله حفار و سپر یک ماشین حفاری مکانیزه از نوع فشار تعادلی خاک [۸]



شکل ۳. سایش ثانویهٔ زیاد در دیوارهٔ خارجی کله حفار یک ماشین EPB با قطر حفاری ٤/۷ متر [۷]

انتخاب روش بررسی

برای بررسی تأثیر پارامترهای عملکردی ماشین حفار بر سایش ابزار برش، با روش‌های آزمایشگاهی، از دو گزینه می‌توان استفاده کرد که عبارتند از:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل ٤. یک باکت قبل از تعمیر (چپ) و بعد از تعمیر (راست) [۷]

الف) استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی موجود

ب) طراحی و ساخت دستگاهی جدید که مشابه فرایند حفاری عمل کند.

مهم‌ترین پارامترهای عملکردی دستگاه‌های TBM فشار پیشران[1] و گشتاور کله حفار[2] است که باید تأثیر آن‌ها بررسی شود. برای این منظور استفاده از روش (الف) دارای محدودیت‌هایی است که در ذیل به تفکیک بیان شده است. از طرف دیگر تاکنون روش پذیرفته شدهٔ عمومی، برای تخمین میزان سایش مورد انتظار در رابطه با خصوصیات خاک وجود ندارد. به‌علاوه با توجه به گستردگی عوامل تأثیرگذار بر سایش، تا به امروز انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ و یا انجمن جهانی ژئوتکنیک روش استانداردی را برای آزمایش ساینده‌گی خاک پیشنهاد ندادند [۹].

۱. آزمایش لس‌آنجلس[3]: در این آزمایش حدود ۵ تا ۱۰ کیلوگرم سنگ‌دانه درون محفظهٔ استوانه‌ای دستگاه ریخته می‌شود. سپس استوانهٔ حاوی سنگ‌دانه‌ها که دارای گوی‌های فولادی استاندارد نیز است، با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه و در مجموع ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ دور حول محور خود می‌چرخد. در اثر برخورد گوی‌ها با سنگ‌دانه‌ها و خود سنگ‌دانه‌ها به یک‌دیگر، مصالح دچار سایش و خردایش می‌شوند.

برخی مزایای استفاده از این دستگاه در تحقیقات ساینده‌گی خاک، دانه‌بندی وسیع به‌جز ریزدانه است که در آن به‌کار می‌رود. برخی محدودیت‌ها نیز سایش سنگ‌دانه‌ها در این دستگاه است. به‌علاوه شباهت کمی با شرایط کله حفاری ماشین‌های مکانیزه دارد. (در نتیجه

1. Thrust 2.Torque 3. ASTM C131-66

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

تأثیر نیروی پیشران و گشتاور را نمی‌توان به‌راحتی در آن بررسی کرد). هم‌چنین سایش به‌دست آمده در این دستگاه ناشی از اثر توأم ضربه و سایش است در حالی که در ماشین‌های حفاری به‌دلیل سرعت کم چرخش کلهٔ حفار (معمولاً بین ۱ تا ۲ دور بر دقیقه)، نسبت ضربه به سایش در این حد نیست. سایر آزمایش‌های مشابه همانند نوردیک بال میل[1] و سایش دوری[2] نیز برای تعیین استهلاک دانه‌های خاک در اثر صفحه فلزی یا برخورد با سایر دانه‌های خاک به‌کار می‌روند [۸]. در نتیجه این آزمایش‌ها برای هدف این تحقیق مناسب نیستند.

۲. آزمایش LCPC: این آزمایش شامل چرخش سریع (٤٥۰۰ دور بر دقیقه به‌مدت ۵ دقیقه) یک پرهٔ فلزی از آهن معمولی، درون استوانه‌ای با حدود ۵۰۰ گرم نمونه خاک با دانه‌بندی بین ٤ تا ٦/۳ میلی‌متر است. در نهایت تفاوت وزن پره، قبل و بعد از آزمایش معیاری برای قدرت ساینده‌گی خاک است. مزیت این دستگاه[3] (شکل ۵)، ارزان و سریع بودن آن است در حالی که محدودیت‌هایی دارد از جمله بررسی تأثیر نیروی پیشران دستگاه امکان ندارد، بازهٔ دانه‌بندی بسیار محدود است، سرعت بسیار زیاد پره در این آزمایش اثر ضربه را بیش از واقعیت نشان می‌دهد.

۳. آزمایش SAT: این آزمایش مدل توسعه یافتهٔ آزمایش NTNU است که برای تخمین ساینده‌گی سنگ‌ها ساخته شده است [۱۱]. در آزمایش NTNU سنگ در حد ۱ میلی‌متر خرد شده و تست می‌شود. اما در شکل جدیدتر (مخصوص خاک)، با ایجاد تغییراتی در دستگاه، اندازهٔ دانه‌ها تا ٤ میلی‌متر افزایش داده شده است. در این آزمایش دیسک حاوی نمونه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه به‌مدت ۵ دقیقه می‌چرخد. برخی مزایای این روش عبارتند از: استفاده از جنس ابزار برشی به‌عنوان سنجنده ساینده‌گی، سرعت چرخش پایین، خارج شدن پیوستهٔ مصالح تست شده از دور آزمایش. اما محدودیت‌هایی به‌قرار زیر نیز دارد: محدودهٔ دانه‌بندی کوچک، خرد شدن دانه‌های بزرگ‌تر، تفاوت با شرایط واقعی و در نتیجه عدم امکان ارزیابی تأثیر نیروی پیشران دستگاه و به‌علاوه ارزیابی تأثیر

1. Nordic Ball Mill 2. Dorry's Abrasion 3. AFNOR P18-579 (1990)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل ۵. مجموعهٔ تجهیزات آزمایش LCPC با پروانهٔ آن [۱۰]

رطوبت یا سایر افزودنی‌ها به خاک امکان ندارد. ضمناً به‌علت کم بودن حجم نمونه خاک، انتخاب نمونه معادل که نمایندهٔ مناسبی برای خاک مورد نظر باشد، مخصوصاً در خاک‌های درشت‌دانه‌تر، بسیار مشکل است.

٤. آزمایش میلر[1]: در این آزمایش که مخصوص سنگ است، نمونهٔ سنگی، خرد شده و درون دوغاب بنتونیتی مخلوط می‌شود و سپس در اثر حرکت و ضربهٔ پیستون درون دوغاب ساینده‌گی پیستون به‌دست می‌آید به این صورت که نمونهٔ فولادی به‌مدت ٦ ساعت با سرعت ٤٨ بار در دقیقه به‌صورت رفت و برگشتی درون دوغاب حرکت می‌کند. مزیت این روش با توجه به شباهت عملکرد آن در زمینهٔ ساینده‌گی در دستگاه‌های حفاری مکانیزه نوع دوغابی[2] است، ولی محدودیت‌هایی دارد که به‌علت آسیاب شدن نمونه‌ها و استفاده به‌صورت دوغاب، شرایط واقعی در سایر روش‌های حفاری را نمایندگی نخواهد کرد. ضمن این که امکان ارزیابی تأثیر نیروی پیشران، تغییرات رطوبت و افزودنی‌ها نیز وجود ندارد.

۵. آزمایش ماسهٔ خشک/چرخ لاستیکی[3]: در این آزمایش فقط از مصالح کوارتزی اوتاوا در حد دانه‌بندی ماسه استفاده شده است تا میزان مقاومت سایشی فلزات مختلف مقایسه شود. در این روش نیز محدودیت دانه‌بندی وجود دارد. یکی از مزایای این روش نیز خارج شدن نمونه‌های تست شده از دور آزمایش است.

٦. آزمایش‌های طراحی شده ویژهٔ بررسی‌های ساینده‌گی خاک: از سال ۲۰۱۱ میلادی محققان

1. Slurry 2. ASTM G70-00 3. Ferdowsi University Abrasion Test

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

مختلفی سعی کرده‌اند تا با ساخت دستگاه‌های جدید محدودیت‌های روش‌های پیشین را تا حد مناسبی مرتفع کنند. مهم‌ترین این دستگاه‌ها عبارتند از PSU [۱۲]، NDAT [۱۳] و SGAT [۱٤].

این روش‌ها به موفقیت‌های خوبی نیز دست یافته‌اند. اما برای رفع محدودیت‌های باقی‌مانده و کسب اطمینان از کارآیی آن‌ها، همچنان درحال آزمون و توسعه است. از این رو، برای تحقیق حاضر استفاده نشد.

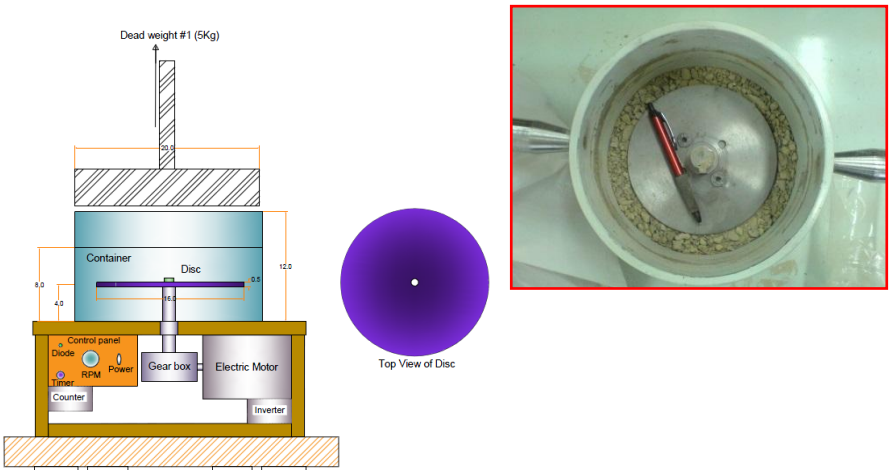
در نهایت با توجه به محدودیت‌های ذکر شده برای گزینهٔ (الف) تصمیم به استفاده از گزینهٔ (ب)، یعنی ساخت دستگاه، گرفته شد. بدین منظور با توجه به اهداف مورد نظر، گزینه‌های مختلفی به‌صورت اولیه طراحی شد و پس از مقایسهٔ آن‌ها، گزینهٔ برتر انتخاب و ساخته شد. از جمله مزایای این طرح دانه‌بندی نسبتاً وسیع‌تر، شباهت مناسب‌تر با واقعیت، امکان ارزیابی تأثیر سرعت چرخش و نیروی پیشران یا فشار روباره و ... را می‌توان نام برد.

جزئیات روش آزمایش پیشنهاد شده (FUAT [۱])

طرح اولیهٔ آزمایش جدید در شکل ٦ نشان داده شده است (بالا و پایین دیسک با مصالح پر می‌شود). پس از انجام تعدادی آزمایش امکان‌سنجی، به‌علت مشکلاتی از قبیل یکسان نبودن زبری سطح دیسک‌ها با توجه به دست‌ساز بودن آن‌ها، نیاز به ترازوی ظرفیت زیاد با دقت هزارم گرم (با توجه به وزن نسبتاً زیاد دیسک‌ها)، نیاز به موتور قوی‌تر برای آزمایش روی دانه‌های درشت خاک، عدم مشارکت مصالح دورتر از مجاورت دیسک در فرآیند اصلی آزمایش و ...، طرح دستگاه تغییر داده شد و به‌صورت شکل ۷ اصلاح شد. روش کار به‌این طریق برنامه‌ریزی شد که تعداد ٤ عدد پیچ آهنی نیم‌رزوه M8 به‌طول ۹ سانتی‌متر با سختی ۱۷۹ در مقیاس ویکرز قبل از آزمایش کدگذاری شده و پس از تعیین وزن جداگانه (با دقت هزارم گرم)، در محل مشخص خود درون دستگاه محکم می‌شوند. فاصلهٔ عمودی پیچ‌ها از یک‌دیگر ۲ سانتی‌متر و از بالا به پایین در جهت ساعت‌گرد با زاویهٔ ۹۰ درجه نسبت به پیچ مجاور جانمایی شده‌اند. سپس نمونه‌های خاک (تا حداکثر ابعاد دانه‌بندی ۲ سانتی‌متر) به وزن حدود ٦ کیلوگرم درون محفظهٔ دستگاه ریخته می‌شود. حال می‌توان با سه پارامتر متغیر زمان،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

وزن سربار و سرعت چرخش، آزمایش‌ها مختلف را انجام داد. پس از اتمام آزمایش پیچ‌ها بـاز شده و دوباره با دقت هزارم گرم وزن می‌شوند. تفاوت وزن مجموع پیچ‌ها به‌عنوان شاخصی از سایش ابزار فرض می‌شوند (شکل ۸).



شکل ٦. نمای شماتیک دستگاه سایش ساخته شده به‌همراه نمای واقعی سنجش‌گر دیسک آهنی از بالا



شکل ۷. دستگاه سایش اصلاح شده با سنجش‌گر پیچ آهنی به جای دیسک (دستگاه FUAT)

در جدول ۱ ویژگی‌های مختلف روش جدید با سایر روش‌های مشهور به‌صورت خلاصـه مقایسه شده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل۸. پیچ‌های سنجش‌گر قبل از آزمایش (راست) و بعد از بیش از حدود ۲۰ آزمایش (چپ)

جدول ۱. تفاوت جزئیات روش‌های مختلف اندازه‌گیری سایش خاک

نام آزمایش	مدت (دقیقه)	سرعت چرخش (دور در دقیقه)	سربار (فشار محصورکننده)	محدودهٔ دانه‌بندی خاک	نوع ماده سنجش‌گر	دقت قرائت (گرم)	مقدار نمونه خاک برای هر آزمایش (کیلوگرم)
FUAT	۱۵،۳۰،۶۰،۵	۳۰،۶۰،۹۰	۵،۱۵،۲۰ Kg	<۲۰mm	Normal steel(Rockwell hardness of B 88)	۰/۰۰۱	۶–۸
PSU new test	۵،۱۰،۳۰،۶۰	۶۰–۱۸۰	<۱۰ bar	Large gravel -cobble	steel(17,31,43,51&60 Rockwell hardness)	۰/۰۱	٤۰
SGAT	٤	۱-۱۰۰	< ٦ bars	<۱۰ mm	Standard construction steel. Vickers hardness 227(Rockwell hardness: 23)	۰/۰۰۱	٦/۵-۸
NDAT	۱۰	۲۰	۳bar	۱–۱۰۰ mm	Steel plate (Rockwell hardness of B 60–70)	۰/۰۰۱	٦
LCPC	۵	٤۵۰۰	۰	<٦/۳ mm	soft steel(Rockwell hardness of B 60–75)	۰/۰۱	۰/۵
SAT	۱	۲۰	۱۰ Kg	<٤ mm	Cutter ring steel	۰/۰۰۱	۰/۰۸

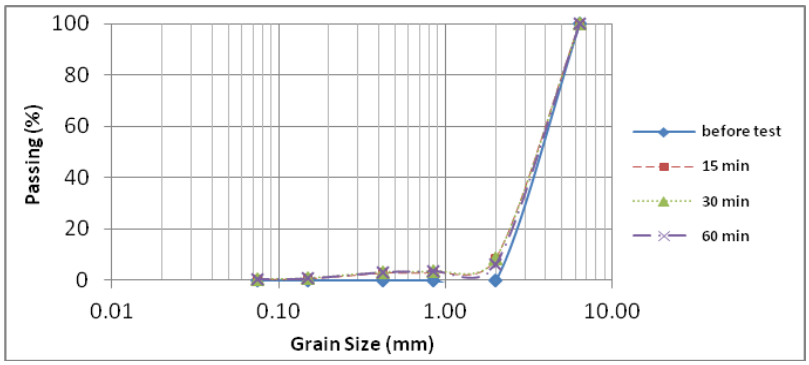
تعیین مصالح سنجش

خاک‌های سیلیسی دارای ساینده‌گی زیاد و بیش‌ترین فراوانی در طبیعت است. از آن‌جاکه وجود این نوع خاک با توجه به سختی زیاد منجر به افت نسبتاً زیاد وزن در فلزات می‌شود بنا بر این اثر سایر خطاهای آزمایش در آن تا حد زیادی کوچک می‌شود. از این رو، نمونه‌های سیلیسی مربوط به رگه‌های کوارتزی مناطق دگرگونی اطراف شهر ملایر برای این بررسی انتخاب شد. مصالح فوق همگی در حد دانه‌بندی بین ۲ تا ٦ میلی‌متر به‌صورت نسبتاً زبر با گردشدگی متوسط هستند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

کنترل تغییرات مصالح در طول آزمایش

به‌منظور دست‌یابی به‌نتایج نزدیک به واقعیت، مطلوب آن است که مشخصات اولیهٔ مصالح در طول آزمایش حداقل تغییرات را داشته باشند. مهم‌ترین مشخصات مصالح خاک به‌جز جنس، دانه‌بندی آن‌ها، کرویت و زبری دانه‌ها است. این ویژگی‌ها قبل و بعد از آزمایش سایش با هم مقایسه شدند. نتیجهٔ این مقایسه در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود تغییرات در حد قابل قبولی کم است.



شکل ۹. تغییرات دانه‌بندی در آزمون سایش با ۱۵ کیلوگرم سربار، سرعت ٦۰ دور بر دقیقه و زمان‌های مختلف

برای محاسبهٔ ضرایب گردشدگی [۱۵] و کرویت [۱٦] از این روابط استفاده شد:

$$R=Dr/Di \quad (۱)$$

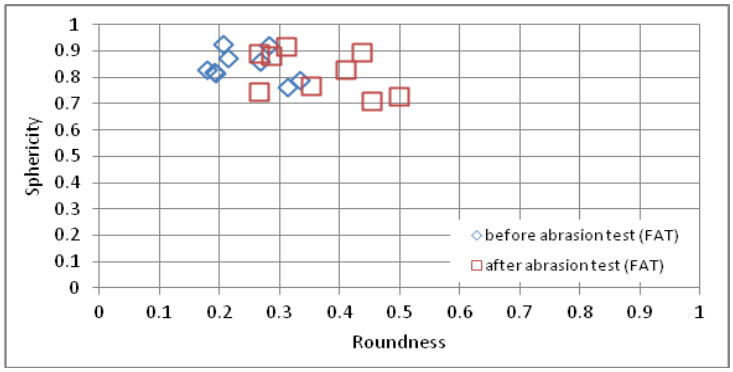
$$S=(Di/Dc)^{0.5} \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲)، R ضریب گردشدگی، S ضریب کرویت، Dc قطر دایرهٔ محیط بر دانه، Di قطر دایرهٔ محاطی و Dr قطر دایرهٔ منطبق بر تیزترین گوشهٔ دانه است.

برنامه‌ریزی برای آزمایش

برای بررسی رابطهٔ بین پارامترهای مختلف زمان، نیروی پیشران، و سرعت چرخش کله حفار با میزان سایش ایجاد شده در آن‌ها در یک مصالح ثابت، ماتریسی از ترکیب‌های مختلف زمان‌های آزمایش ۵، ۱۵،۳۰ و ٦۰ دقیقه با وزنه‌های سربار ۵، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم و سرعت‌های چرخش ۳۰، ٦۰ و ۹۰ دور بر دقیقه به‌کار گرفته شد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل ۱۰. تغییرات کرویت و گردشدگی ذرات در آزمون سایش با ۱۵ کیلوگرم سربار، سرعت ۶۰ دور بر دقیقه و مدت زمان نیم ساعت

نتایج آزمایش‌ها

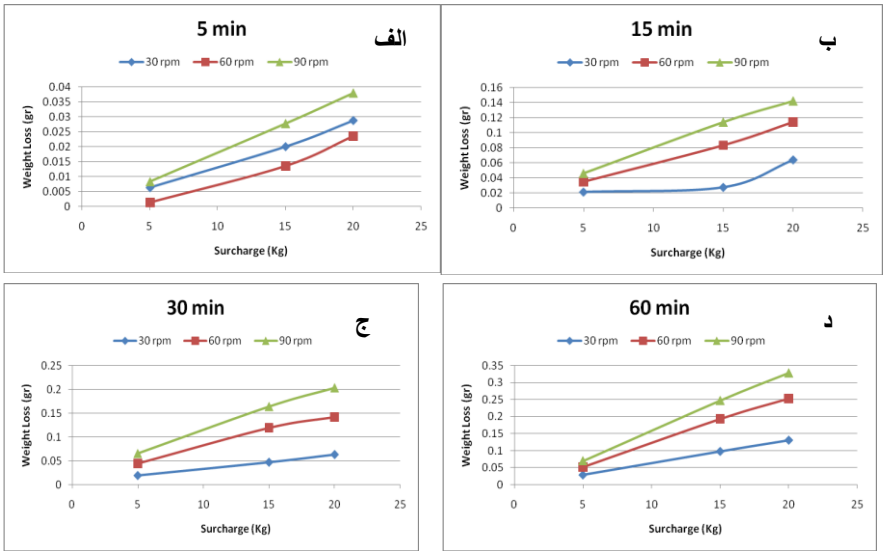
نتایج پردازش شده حاصل از ۳۶ عدد آزمایش شده در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. چنان‌که از دیدگاه تئوری انتظار می‌رود، رابطهٔ بین میزان سایش پین‌ها با پارامترهای زمان، فشار و سرعت چرخش مستقیم است. به‌علاوه نمودارها بیان‌گر رابطهٔ مستقیم خطی برای پارامترهای سربار (شکل ۱۱) و سرعت چرخش (شکل ۱۲) است. رستمی و همکاران (۲۰۱۲) نیز تأثیر سربار را در آزمایش با دستگاه PSU بررسی کرده‌اند در نمودار ارائه شده رستمی و همکاران، به‌صورت غیرمستقیم می‌توان رابطهٔ مستقیم و خطی بین افزایش فشار و افت وزن را استخراج کرد [۱۲]. رابطهٔ بین سرعت چرخش سنجش‌گر و افت وزن به‌دست آمده از دستگاه SGAT نیز رابطهٔ خطی مستقیم را تأیید می‌کند [۱۴].

به‌علاوه در پژوهش حاضر، رابطهٔ خطی مستفیم به‌گونه‌ای است که با افزایش سرعت چرخش در آزمایش تأثیر سربارها (شکل ۱۱)، شیب خط نیز به تناسب افزایش می‌یابد. هم‌چنین به‌طور مشابه به‌ازای افزایش زمان آزمایش در آزمون‌های مربوط به تأثیر سرعت چرخش (شکل ۱۲)، شیب خط با افزایش همراه است. علت این امر را می‌توان ناشی از تأثیر مستقیم انرژی مصرفی بر میزان سایش، تعبیر کرد. از طرف دیگر خط برازش داده شده در تمام موارد عرض از مبدا بسیار کمی دارد و در نتیجه می‌توان عرض از مبدا آن را صفر فرض کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

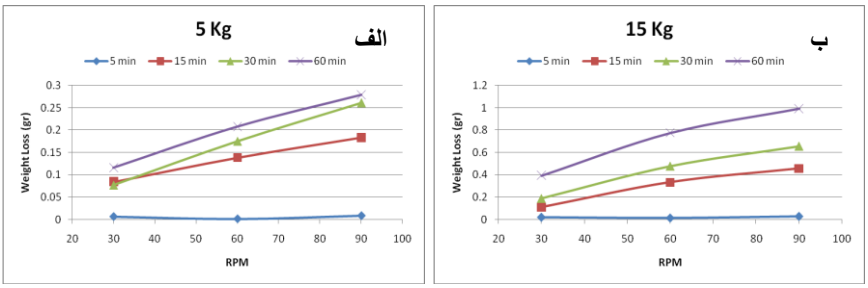
نمودارهای میزان سایش در برابر زمان (شکل ۱۳)، روندی نزدیک به لگاریتمی نشان می‌دهند. این کاهش نرخ افزایشی سایش، با اضافه شدن زمان آزمایش، را می‌توان تا حد زیادی به‌دست‌خوردگی نمونهٔ خاک و در نتیجه کاهش اندازه و زبری ذرات خاک با پیشرفت زمان مرتبط کرد. مطلب قابل توجه دیگر در این نمودارها نظم عمومی کم‌تر داده‌ها در منحنی‌های مربوط به آزمایش‌ها با زمان ۵ دقیقه یا سربار ۵ کیلوگرم است که این موضوع را می‌توان ناشی از بزرگ‌تر بودن نسبی خطاهای اپراتوری و دستگاهی نسبت به افت وزن ثبت شده، دانست. بنابراین زمان‌های طولانی‌تر و فشارهای بیش‌تر، تمایز بهتری برای تأثیر عوامل مختلف ارائه می‌دهد. از طرف دیگر با توجه به تغییر برخی خصوصیات فیزیکی نمونهٔ اولیه به‌ازای افزایش زمان آزمایش، نتایج حاصل از زمان‌های بسیار طولانی نیز معرف مناسبی برای خصوصیات نمونهٔ اولیه نخواهد بود و باید زمان بهینه را برای آزمایش مد نظر قرار داد.

با توجه به همهٔ‌آزمایش‌های صورت گرفته، مقادیر ۱۵، ۳۰ و ٦۰ به‌ترتیب برای سربار بر حسب کیلوگرم، زمان بر حسب دقیقه و سرعت چرخش بر حسب دور بر دقیقه، برای آزمایش سایش FUAT ، قابل پیشنهاد است.

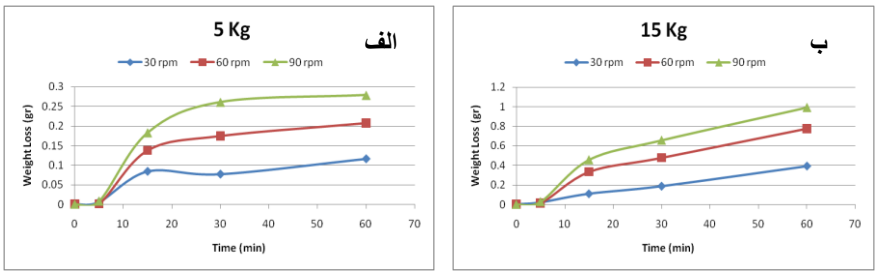


شکل ۱۱. میزان افت وزن تجمعی پیچ‌ها با تغییر در میزان سربار برای زمان‌های الف) ۵، ب) ۱۵، ج) ۳۰ و د) ٦۰ دقیقه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل ۱۲. میزان افت وزن تجمعی پیچ‌ها با تغییر در میزان سرعت چرخش برای سربارهای الف) ۵، ب) ۱۵ و ج) ۲۰ کیلوگرم.



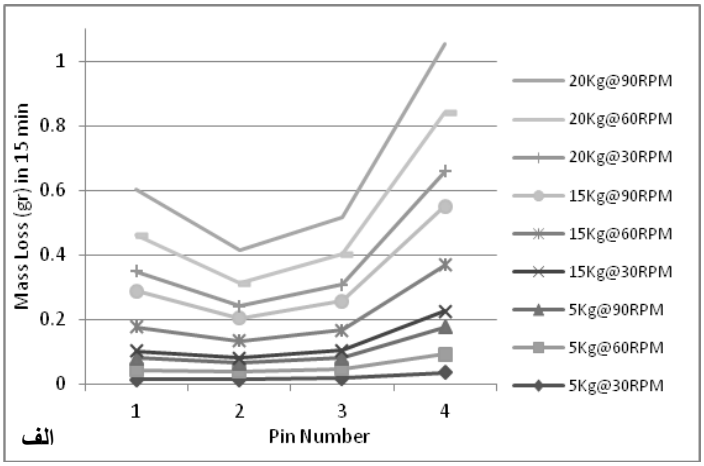
شکل ۱۳. میزان افت وزن تجمعی پیچ‌ها با تغییر در زمان آزمایش در سرعت‌های چرخش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دور بر دقیقه با سربارهای الف) ۵، ب) ۱۵ و ج) ۲۰ کیلوگرم

همچنین برای تعیین نحوهٔ تأثیر عمق قرارگیری پیچ‌ها درون نمونه، میزان افت وزن جداگانه آن‌ها با هم مقایسه شده است (شکل ۱۴). چنان که مشاهده می‌شود در ۳ پیچ پایینی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

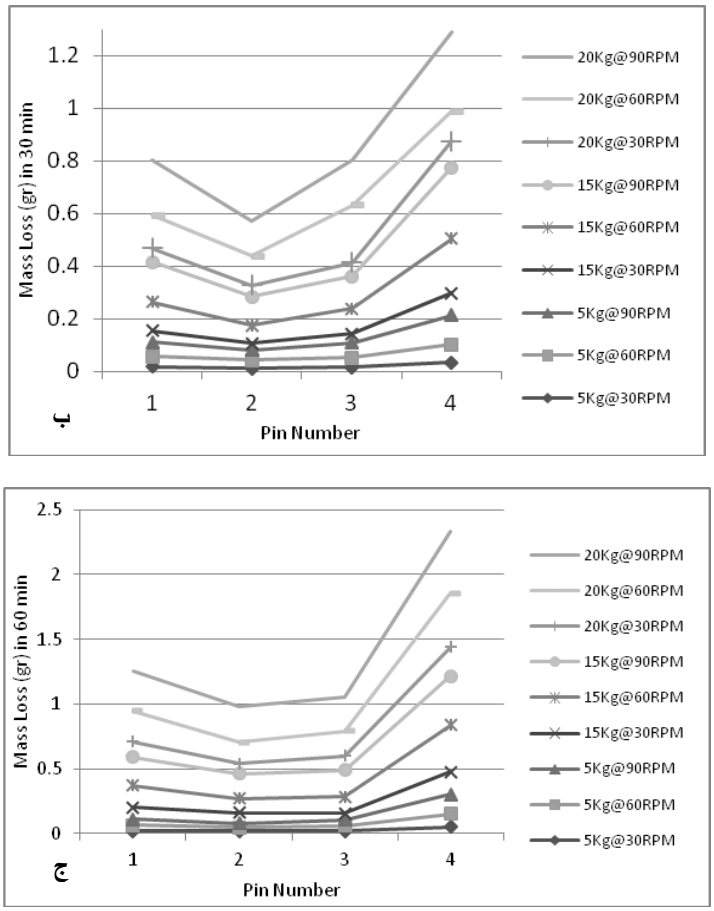
میزان افت وزن با عمق قرارگیری پیچ، رابطهٔ مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر، پیچ پایین‌تر دچار استهلاک بیش‌تری شده است. تنها مورد ناقض این واقعیت، پیچ شمارهٔ یک است که علیرغم داشتن کم‌ترین عمق، دارای دومین افت وزن است. با توجه به دقتی که در وضعیت نمونه‌ها پس از تست‌ها به عمل آمد؛ مشاهده شد که با پیشرفت زمان آزمایش دانه‌های درشت‌تر در بالا باقی می‌ماند و مصالح ریزتر به حاشیه و اعماق بیش‌تر مهاجرت می‌کند. بنا بر این با توجه به این واقعیت حدس زده می‌شود که پیچ بالایی برخلاف روند مورد انتظار به‌علت درگیر شدن با مصالح درشت‌تر (تأثیر اندازه)، سایشی بیش‌تر از جای‌گاه خود به‌دست آورده است. با توجه به اطلاعات موجود، سایش بیش‌تر در پیچ‌های پایین‌تر را نیز می‌توان به کاهش پوکی خاک به ازای افزایش عمق (با توجه به مهاجرت ریزدانه‌ها به عمق) نسبت داد.

چنان‌که با مقایسهٔ نمودارهای الف، ب و ج در شکل ١٤ ملاحظه می‌شود تفاوت افت وزن بین پیچ‌ها در آزمایش‌های با زمان طولانی‌تر و انرژی بیش‌تر، تمایز مشخص‌تری دارند. به‌علاوه برای تمام زمان‌های ۱۵، ۳۰ و ٦۰ دقیقه بیش‌ترین سایش‌ها مربوط به آزمایش‌های با سربار بیشینه (۲۰ کیلوگرم) است که باز هم مؤید تأثیر قوی فشار بر استهلاک ابزار است. این فشار در دستگاه‌های حفاری مکانیزه متأثر از تنش افقی زمین (عمق تونل)، میزان نیروی پیشران[1] و فشار تعادلی خاک[2] است.



1. Thrust 2. EPB

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]



شکل ١٤. میزان افت وزن پیچ‌ها به‌صورت جداگانه در حالت‌های مختلف برای زمان‌های مختلف الف) ١٥، ب) ٣٠ و ج) ٦٠ دقیقه (از بالاترین پیچ به سمت پایین‌ترین پیچ شمارهٔ پین از کد ١ تا ٤ افزایش می‌یابد)

نتیجه‌گیری

روش‌های آزمایشگاهی که به‌صورت ذاتی مخصوص بررسی ساینده‌گی خاک‌ها طراحی نشده‌اند، برای بررسی خصوصیات سایش خاک، دارای نارسایی‌های مهمی هستند. روش‌هایی که اخیراً با هدف شبیه‌سازی حفاری مکانیزه در خاک ساخته شده‌اند، نیز در حال آزمون و توسعه است. بنا بر این برای بررسی نحوهٔ تأثیر عوامل اپراتوری بر ساینده‌گی خاک، در این پژوهش

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

دستگاه جدیدی در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی باعنوان اختصاری FUAT طراحی و ساخته شده است. از جمله مزیت‌های این دستگاه، پوشش دانه‌بندی مناسب، امکان بررسی تأثیر فشار سربار، سرعت چرخش دستگاه و زمان، بر میزان افت وزن فلز سنجش‌گر و هم‌چنین سرعت و اقتصادی بودن نسبی آن است. هم‌چنین با توجه به درگیر شدن بخش بیش‌تری از خاک در فرآیند سایش، این دستگاه می‌تواند در مقایسه با دستگاه‌هایی که یک دیسک یا پره، در تمام طول آزمایش، تنها با مصالح اطراف خود (در یک تراز ثابت) در تماس است، نتایج معتبرتری ارائه کند.

رابطه‌های افت وزن به‌دست آمده در آزمایش سایش FUAT، نسبت به تغییرات فشار سربار و سرعت چرخش، رابطه‌هایی مستقیم و خطی با عرض از مبدأ نزدیک به صفر هستند. تغییرات مذکور توانسته افت وزن حدود ۰/۵ گرم، در یک مصالح ثابت، را تا بیش از ۱/۳ گرم، در زمان یک ساعت آزمایش، افزایش دهد. از طرف دیگر با افزایش زمان آزمایش، میزان افت وزن ثبت شده نیز با روندی نزدیک به لگاریتمی افزایش می‌یابد. این نتایج بیان‌گر اهمیت عوامل اپراتوری در تشدید مشکلات سایش، در ابزارآلات حفاری است.

نتایج نشان داده است که به‌صورت کلی میزان افت وزن با عمق قرارگیری هر پیچ رابطهٔ مستقیم دارد. به‌عبارت دیگر پیچ‌های پایین‌تر دچار استهلاک بیش‌تری شده‌اند. بر اساس مشاهدات، می‌توان علت آن را مهاجرت ریزدانه‌های موجود در نمونه و خرده ذرات تولید شده در زمان آزمایش سایش دانست. این امر منجر به کاهش پوکی نمونه خاک در اعماق بیش‌تر، به ازای پیشرفت زمان آزمایش، می‌شود.

بیش‌ترین سایش‌های ثبت شده، مربوط به آزمایش‌های با سربار بیشینه (۲۰ کیلوگرم) است. این نکته مؤید تأثیر مهم فشار تماسی بین دانه‌های خاک و فلز، بر میزان استهلاک ابزار است. این فشار در دستگاه‌های حفاری مکانیزه متأثر از تنش افقی زمین (عمق تونل)، میزان نیروی پیشران و فشار اعمالی به جبههٔ کار است. بر اساس این نتیجه می‌توان گفت که از نقطه‌نظر کاهش استهلاک ابزار برشی ماشین‌آلات حفاری، باید سعی کرد عمق پروژه را در حداقل ممکن انتخاب کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

منابع

1. Plinninger R.J., Restner U., "Abrasiveness Testing, Quo Vadis?-A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods", Geomechanics and Tunneling, Vol. 1 (1) (2008) 61-70.
2. Nilsen B., Dahl F., Holzhäuser J., Raleigh P., "Abrasivity of soils in TBM tunneling", Tunnels & Tunneling International, March 2006 (2006a) 36-38.
3. Moammeri H., Tarigh Azali S., "Abrasive effects on TBMs used to bore current or recently completed projects in Iran", World Tunnelling (Desember 2010) (2010) 24-27.

٤. حسن‌پور ج.، رستمی ج.، *عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت*، انتشارات نشر فن آریا، (۱۳۸۹).

5. Hashemnejad H., Ghafoori M., Lashkaripour G.R., Tariq Azali S., "Effect of geological parameters on soil abrasivity using LCPC machine for predicting LAC", Intrenational Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2 (12) (2012) 71-76.
6. Thuro K., Kasling H., "Classification of the abrasiveness of soil and rock", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 2 (2009) 179-188.
7. Nilsen B., Dahl F., Holzhauser J., Raliegh P., "New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling", RETC Proceedings (2007) 104-116.
8. Alavi Gharahbagh E., Rostami J., Palomino A.M., "New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications", Tunneling and Underground Space Technology Journal, Vol. 26 (5) (2011) 604-613.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]

9. Thuro K., Singer J., Kasling H., Bauer M., "Determining abrasiveness with the LCPC test", Proceeding of the 1th Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver B.C (2011).

۱۰. هاشم‌نژاد ه.، غفوری م.، لشکری‌پور غ.، و طریق‌ازلی، ص.، *بررسی تأثیرات شکل،کرویت وزاویه-داری در میزان ساینده‌گی نمونهٔ خاک به کمک دستگاه LCPC*، مجموعهٔ مقالات شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، (۱۳۹۱).

11. Bruland A., "Hard rock tunnel boring: Drillability test methods", Project report 13A-98, NTNU Trondheim (1998).

12. Rostami J., Alavi Gharahbagh E., Palomino A.M., Mosleh M., "Dvelopment of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines", Tunneling and Underground Space Technology Journal, Vol. 28 (2012) 245-256.

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

14. Jakobsen P.D., Langmaack L., Dahl F., Breivik T., "Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM tool wear, torque and thrust", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 38 (2013) 398-408.

15. Dobkins J.E., Folk R.L., "Shape development on Tahiti Nui", Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 40 (1970) 1167-1203.

16. Folk R.L., "Petrology of Sedimentary Rocks", Hempill publishing co., Austin, Texas (1974).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.3.7.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.3.3033]