

مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی ساینده‌گی زمین‌های نرم در تونل‌سازی مکانیزه

صادق آمون^{۱*}؛ کورش شه‌ریار^۲؛ مصطفی شریف‌زاده^۳؛ صادق طریق‌زلی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، مؤسسه مهندسی مشاور ایمن‌سازان

۲- استاد دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، دانشگاه کترین استرالیا

۴- دکتری زمین‌شناسی مهندسی، مؤسسه مهندسی مشاور ساحل

دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۲۲؛ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۵

چکیده

در ماشین‌های حفاری مکانیزه، ابزارهای برش وظیفه اصلی را در حفر زمین بر عهده دارند و در تماس مستقیم با مصالح حفاری هستند که این موضوع باعث ایجاد سایش و خوردگی آن‌ها می‌شود. از طرفی، توانایی پیش‌بینی سایش ابزار در تونل‌سازی مکانیزه با TBM‌های زمین نرم، تأثیر مستقیمی روی بهبود برنامه زمان‌بندی و تخمین هزینه‌های اجرایی پروژه‌ها دارد. با این وجود، فقدان یک استاندارد یا آزمایش پذیرفته شده جامع برای تعیین ساینده‌گی خاک‌ها در بررسی‌های ژئوتکنیکی، پیش‌بینی سایش ابزار را بسیار دشوار ساخته است. از این‌رو، در این مقاله انواع روش‌های ارزیابی ساینده‌گی زمین مرور و کارایی آن‌ها در تخمین میزان ساینده‌گی بررسی شده است. در این بررسی، در هر آزمایش از ویژگی‌های بخش در معرض سایش، تشابه‌های هندسه بارگذاری و سازوکارهای حرکت و از ویژگی‌های بخش ایجادکننده سایش، تأثیر ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل دانه‌ها و تراکم نمونه خاک با وضعیتی که به هنگام حفر مکانیزه خاک به وسیله ابزار برش یک TBM به وجود می‌آید، مقایسه شده است. در نهایت با وجود کاستی‌های قابل توجه در روش‌های ارزیابی ساینده‌گی زمین‌های نرم، می‌توان آزمایش‌های ساینده‌گی زمین نرم (SGAT: Soft Ground Abrasion Tester) و ساینده‌گی خاک دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (Penn State: Penn state soil abrasion test) را به‌عنوان مناسب‌ترین و کارآمدترین روش‌ها به کار برد.

واژگان کلیدی زمین‌های نرم، خاک، ابزار برش، ساینده‌گی، سایش ابزار، آزمایش‌های سایش، TBM

۱- مقدمه

تونل‌سازی تمام مقطع با TBM، روشی پرکاربرد و شناخته شده برای حفر تونل است. امروزه ۶۰ تا ۸۰ درصد تونل‌های بلند در جهان با TBM‌ها حفر می‌شوند. در پنج سال اخیر، تقریباً از ۳۵۰ دستگاه TBM با قطر ۳ تا ۱۵ متر برای حفاری در خاک استفاده شده است [۱]. به‌منظور حفاری در زمین‌های نرم، ترکیبی از دیسک، اسکرپر و ریپر روی کله حفار TBM‌ها نصب می‌شود که وظیفه اصلی را در حفاری بر عهده دارند و در تماس مستقیم با مصالح برجا هستند [۲]. سایش این ابزارها،

یکی از عوامل اساسی در ارزیابی کارایی استفاده از سیستم‌های حفاری مکانیزه و محدودیت‌های اقتصادی پیش روی آن‌هاست [۳].

سایش به‌صورت از دست رفتن مداوم و ناخواسته مواد از سطح یک جسم جامد، در اثر کنش‌های مکانیکی مانند تماس و حرکت نسبی مابین دو جسم، تعریف می‌شود [۴]. اصطلاح ساینده‌گی، پتانسیل سنگ یا خاک در ایجاد سایش روی ابزار برش را تشریح می‌کند [۵]. باینکه ساینده‌گی لغتی است عمومی و برخی از زمین‌ها به‌عنوان ساینده توصیف می‌شوند؛ اما

مطرح می‌شود. ویژگی‌های زمین‌شناسی خاک و سنگ دربرگیرنده تونل، جنس ابزار و تجهیزات ماشین حفر تونل، مدیریت ساخت و اپراتوری از عوامل مؤثر بر روی سایش هستند. گستردگی عوامل موجود همواره سبب آن شده است تا بررسی‌های مربوط به ساینده‌گی خاک بسیار پیچیده و بعضاً تشخیص صحیح در مورد تأثیر آن روی دستگاه حفر ناممکن گردد [۱۷]، [۱۸]، [۱۹] با توجه به گوناگونی عوامل مؤثر در ساینده‌گی خاک، می‌توان این پارامترها را به‌صورت شکل یک خلاصه کرد.



شکل ۱- عوامل مؤثر در ساینده‌گی زمین‌های نرم

۳- عوامل مؤثر بر ساینده‌گی زمین‌های نرم

در زمین‌های ساینده، سایش در چندین قسمت TBM، از قبیل ابزار برش، قسمت‌های مختلف ساختار کله حفر، دیواره فشار، صفحات ضد سایش و همچنین روی تجهیزاتی مانند نقاله مارپیچ در سپرهای EPB، پمپ و شیرها در سپرهای Slurry اتفاق می‌افتد [۲۰].

به‌طورکلی، تأثیر ساینده‌گی خاک‌ها روی ماشین‌های حفاری مکانیزه به‌صورت سایش‌های اولیه و ثانویه تشریح می‌شود.

مفهوم آن صریح و شفاف نیست. ساینده‌گی خاصیتی است برهم‌کنشی و اینکه یک زمین ساینده باشد یا نه، بستگی به خواص ابزار یا بخش در معرض سایش (جسم یکپارچه در اصطلاح تریبولوژی) و زمین یا بخش ایجادکننده سایش (جسم مقابل)، تحت شرایط دما و فشار حاکم، دارد [۳]. افزایش ساینده‌گی زمین، هزینه تعویض ابزارهای برش را به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌دهد؛ بنابراین دسترسی به سنجشی برای برآورد ساینده‌گی زمین، در محاسبه هزینه‌های مربوط به تأمین ابزارهای برش، بسیار مفید خواهد بود [۶].

تاکنون پژوهشگران مختلفی در بحث ساینده‌گی مطالعه کرده‌اند. برخی به‌منظور تعیین ساینده‌گی زمین‌های نرم و خاک، به طراحی روش‌های آزمایشگاهی و ارائه اندیس‌هایی برای تخمین ساینده‌گی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال رستمی و همکاران بر اساس شبیه‌سازی شرایط واقعی کار TBM‌های زمین نرم [۷]، جاکبسن و همکاران (Jacobsen, et al.) بر اساس ارائه روشی برای تخمین ساینده‌گی خاک و زمین نرم [۸]، شیمازک و ناتز حفاری [۹]، تارکوی و هندرن (Tarkoy & Hendron) بر اساس تأثیر سختی سنگ روی عملکرد ماشین‌های حفار [۱۰]، پسچن (Paschen) بر اساس تأثیر خصوصیات ژئومکانیکی بر روی رفتار سایشی سنگ‌ها [۱۱]، راکسبورو (Roxborough) بر اساس تأثیر خصوصیات سنگ‌ها بر روی قابلیت برش [۱۲]، برولند (Bruland) بر اساس شاخص سایش تیغه [۱۳]، ال امین و همکاران (Al-Ameen, et al.) بر اساس شاخص سایش ضربه دینامیکی [۱۴]، نیلسن و همکاران (Nilsen, et al.) بر اساس تأثیر تزریق فوم و پلیمر [۱۵]، تورو و همکاران (Thuro, et al.) بر اساس تعیین ساینده‌گی خاک‌های دانه‌ای [۱۶]، روش‌های آزمایشگاهی و شاخص‌هایی را برای تخمین ساینده‌گی خاک معرفی کرده‌اند.

در این مقاله ضمن معرفی عوامل مؤثر بر ساینده‌گی زمین‌های نرم، انواع سایش TBM‌ها و روش‌های مختلف ارزیابی ساینده‌گی زمین ارائه‌شده و با بحث و بررسی در مورد کارایی آن‌ها در ارزیابی ساینده‌گی زمین‌های نرم، کارآمدترین روش‌ها برای برآورد میزان ساینده‌گی این زمین‌ها معرفی شده است.

۲- عوامل مؤثر بر ساینده‌گی زمین‌های نرم

سایش معمولاً با طرح یک سؤال مبنی بر میزان مصرف مواد

در ساینده‌ی مربوط به هر کدام ضرب می‌شود. متداول‌ترین مقیاس‌های مورد استفاده در این روش‌ها، مقیاس‌های موجود برای تعیین سختی کانی‌ها هستند [۲۲].

مرسوم‌ترین و ساده‌ترین مقیاس برای ارزیابی سختی کانی‌ها، مقیاس سختی موس است. در این مقیاس، کانی‌های مختلف بر اساس توانایی‌های هر یک در ایجاد خراش بر روی دیگری ارائه شده‌اند. کانی‌ها با اعداد یک تا ده رتبه‌بندی شده و کانی قرار گرفته در هر رتبه، توانایی ایجاد خراش بر روی کانی‌های رتبه‌های پایین‌تر را دارد (جدول ۱). باید توجه داشت که این مقیاس تنها برای رتبه‌بندی کانی‌های ارائه شده است و در آن، اختلاف میان سختی رتبه‌های متوالی را به هیچ‌عنوان نمی‌توان کمی و قابل‌اندازه‌گیری در نظر گرفت. برای برطرف کردن مشکل ذکر شده در مورد مقیاس سختی موس، می‌توان به جای آن از مقیاس سختی روزیوال بهره برد. این مقیاس، مبتنی است بر واکنش کانی‌ها در برابر یک پودر ساینده استاندارد که در آن مقدار ۱۰۰۰ به کروندوم نسبت داده شده و سختی بقیه کانی‌ها نسبت به آن سنجیده می‌شود (جدول ۱). در این حالت، اختلاف عددی میان سختی کانی‌های مختلف، به‌طور کمی معنی‌دار خواهد بود [۲۳].

سایش مورد انتظار روی صفحات ضد سایش و ابزار برش که برای حفاری طراحی شده‌اند و به تعویض در فواصل زمانی نیاز دارند، سایش اولیه نامیده می‌شود. از طرف دیگر، سایش ثانویه سایشی است طراحی نشده و زمانی که سایش اولیه روی ابزار برش بیش‌از اندازه باشد، منجر به سایش ساختار کله حفار، قسمت‌های پشتیبان ابزار برش و دیگر سطوح دور از انتظار طراحان و تولیدکنندگان TBM می‌شود که سایش ثانویه می‌نامند. شکل ۲ سایش‌های اولیه و ثانویه یک دستگاه TBM نشان می‌دهد [۲۱].

۴- ارزیابی ساینده‌ی خاک و زمین نرم

به‌طور کلی مطالعات گسترده‌ای درباره حساسیت و پیش‌بینی سایش و خوردگی در مورد سنگ‌ها وجود دارد، اما در مورد دانه‌های خاک و تأثیر آن‌ها بر روی TBM‌های زمین نرم کارهای بسیار کمی صورت گرفته است. این موضوع شاید به آن دلیل باشد که همواره به جای آزمایش تنها به پیش‌گویی میزان سایش این مواد، مثلاً از روی سرعت عملکرد TBM و یا از روی ساینده‌ی این دستگاه بسنده شده است [۱۹].

۴-۱- روش‌های کانی‌شناسی

زمین‌شناسان، ساینده‌ی زمین را بر اساس ساینده‌ی کانی‌های تشکیل‌دهنده آن، محاسبه می‌کنند. در این روش، درصد کانی‌های موجود در زمین تعیین شده و بر اساس مقیاس‌های موجود



شکل ۲- سایش‌های اولیه و ثانویه دستگاه TBM

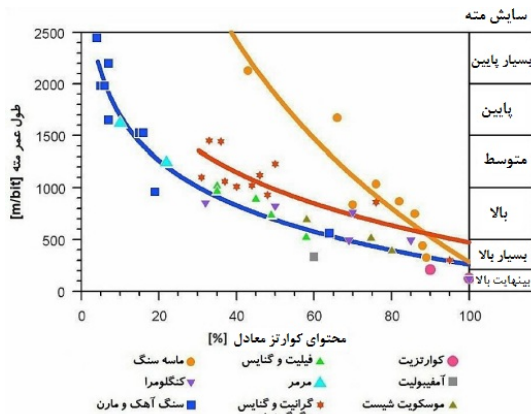
است. در سختی ویکرز، از یک هرم مربع‌القاعده به‌عنوان سنبه استفاده می‌شود. عدد سختی هرم الماس (DPH) و یا عدد سختی ویکرز (VHN) به‌صورت تقسیم باربر مساحت فرورفتگی تعیین می‌شود. امروزه آزمون سختی ویکرز، به دلیل

از دیگر روش‌های کانی‌شناسی، می‌توان به روش‌های ویکرز، برینل، راکول و محتوای کانی‌های ساینده (AMC) یا محتوای کوارتز معادل (EQC) اشاره کرد. تفاوت بین این روش‌ها اساساً مربوط به شکل و اندازه دندان‌های مورد استفاده برای بارگذاری

نمونه خاک مشخص می‌شود.

$$EQC \text{ or } AMC = \sum_{i=1}^n A_i R_i (\%) \quad (1)$$

در صورتی که از مقیاس سختی موس برای تعیین سختی کانی‌ها استفاده شود، عدد حاصل AMC و هنگامی که از مقیاس روزیوال استفاده گردد، حاصل EQC خواهد بود [۲۴]. در شکل ۳، طول عمر مته‌های چالزنی در سنگ‌های مختلف، برحسب محتوای کوارتز معادل ترسیم شده است. کاملاً مشخص است که با افزایش درصد کوارتز معادل، عمر مته کم می‌شود؛ اما برخی از سنگ‌ها (مانند ماسه‌سنگ) دارای روندهای خاص خود هستند. این امر نشان می‌دهد باینکه محتوای کانی‌های ساییده یکی از عوامل مؤثر بر میزان سایش و عمر برنده‌هاست؛ اما عوامل مؤثر دیگری نیز وجود دارند [۲۵].



شکل ۳- طول عمر مته‌های چالزنی، برحسب درصد کوارتز معادل [۲۵]

۲-۴- روش‌های مکانیکی

گسترده‌گی عوامل مؤثر بر روی ساینده‌گی زمین‌های نرم (Error! Reference source not found.)، نیاز انجام آزمایش‌های مختلف برای اندازه‌گیری دقیق میزان ساینده‌گی را هرچه بیشتر نشان می‌دهد. از این رو با توجه به این گسترده‌گی تا به امروز مجمع بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) و یا انجمن ژئوتکنیک (ISGE) هیچ روش استانداردی را برای تعیین ساینده‌گی خاک پیشنهاد نکرده‌اند [۲۶].

۲-۴-۱- آزمایش سایش لس آنجلس

آزمایش سایش لس آنجلس با شماره استاندارد ASTM C-131، شامل یک استوانه گردان به قطر ۷۰ و طول ۵۲ سانتی‌متر است. برای انجام این آزمایش نمونه خاک با قطر بزرگ‌تر از ۱/۷ میلی‌متر به وزن ۲/۵ الی ۵ کیلوگرم داخل استوانه ریخته می-

سرعت‌پایین در انجام این آزمون و همچنین دشواری آماده‌سازی سطح نمونه و تعیین قطر نمونه مورد آزمایش، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳].

جدول ۱- مقیاس‌های مختلف سختی کانی‌ها [۲۳]

کانی	سختی موس	سختی روزیوال	سختی ویکرز (MPa)
الماس	۱۰	۱۴۰۰۰	-
کروندوم	۹	۱۰۰۰	۲۳۰۰۰
توپاز	۸	۱۷۵	۱۸۵۰۰
کوارتز	۷	۱۲۰	۱۱۰۰۰
فلدسپات (ارتوز)	۶	۳۷	۸۰۰۰
آپاتیت	۵	۶/۵	۵۵۰۰
فلوئوریت	۴	۵	۱۷۵۰
کلسیت	۳	۴/۵	۱۲۵۰
ژیپس	۲	۰/۲۵	۴۰۰
تالک	۱	۰/۰۳	۲۰۰

متداول‌ترین آزمون سختی نفوذی، آزمایش راکول است. در این آزمایش، از عمق فرورفتگی تحت بار ثابت، به‌عنوان مقیاسی برای سختی استفاده می‌شود. ابتدا یک‌بار فرعی به‌اندازه ۱۰ کیلوگرم وارد می‌شود. این بار نیاز به آماده کردن سطح را به حداقل رسانده و تمایل به ایجاد فرورفتگی یا برآمدگی به‌وسیله سنبه را کم می‌کند. سپس بار اصلی وارد شده و عمق فرورفتگی به‌طور خودکار برحسب اعداد سختی قراردادی بر یک سنجه صفحه‌ای مدرج، ثبت می‌شود [۲۳].

آزمون سختی برینل نیز عبارت است از ایجاد فرورفتگی در سطح کانی به‌وسیله یک گلوله فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر با نیروی ۳۰۰۰ کیلوگرم. بار در زمان استاندارد که معمولاً ۳۰ ثانیه است وارد شده و قطر فرورفتگی پس از برداشتن بار، با یک میکروسکوپ کم قدرت اندازه‌گیری می‌شود. سطحی که فرورفتگی روی آن ایجاد می‌شود باید نسبتاً صاف باشد. عدد سختی برینل، به‌صورت تقسیم بار بر مساحت داخلی فرورفتگی بیان می‌شود [۲۳].

در بررسی‌ها معمولاً محتوای کانی‌های ساییده یا کوارتز معادل با استفاده از آنالیزهای مقاطع نازک یا XRD، تعیین می‌گردد. در این روش، ابتدا تمامی کانی‌های موجود در خاک با مطالعات کانی‌شناسی شناسایی می‌شوند. با درصدگیری چندگانه، ارزش سایش روزیوال تمامی کانی‌ها مشخص می‌شود. سپس به کمک رابطه زیر مقدار محتوای کوارتز معادل یا کانی‌های ساییده

۴-۲-۳- آزمایش میل بال نوردیک

از دیگر آزمایش‌های اندازه‌گیری دانه‌های باقیمانده در برابر سایش، آزمون میل بال نوردیک می‌باشد. این آزمایش بیشتر در اروپا و بخصوص در کشورهای اسکانندیناوی و ایسلند مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش انجام این آزمون، تفاوت‌های اندکی با آزمون میکرو دوال دارد. جدول ۲ تفاوت‌های میان این دو آزمایش را نشان می‌دهد [۲۹].

۴-۲-۴- آزمایش سایش میلر

در حفاری با یک TBM از نوع دوغابی، سایش در بخش‌های مختلفی همچون بخش‌های تخلیه، پمپ‌ها و لوله‌ها اثر می‌گذارد. غالباً در حفاری تونل‌های طویل به دلیل برخورد‌های طولانی مدت بخش‌های تخلیه با دوغاب مواد خاکی حفر شده، سایش همواره اتفاق می‌افتد. به این منظور، در آمریکا آزمایش استاندارد شده به نام آزمایش میلر ابداع شد. این آزمایش با شماره استاندارد ASTM G75-01 شناخته می‌شود. در این آزمون به کمک دستگاه سایش میلر میزان سایش نمونه خاک در تماس با یک دوغاب اندازه‌گیری می‌شود [۳۰].

شود که در میان دانه‌های خاک، گلوله‌های آهنی به قطر ۴۶/۸ میلی‌متر نیز قرار می‌گیرد. سیلندر با سرعت ۳۰ تا ۳۳ دور در دقیقه، برای ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ چرخش کار می‌کند. پس از آن، مواد از الک ۱/۷ میلی‌متری عبور داده می‌شوند. مقدار سایش لس- آنجلس، از تقسیم کردن وزن خاک عبوری از الک ۱/۷ میلی-متری پس از آزمایش، به وزن نمونه خاک اولیه مورد آزمایش به دست می‌آید [۲۷].

۴-۲-۲- آزمایش میکرو دوال

دستگاه تست سایش میکرو دوال با شماره استاندارد AASHTO TP 58-00 برای اندازه‌گیری مقدار سایش پیل‌های (Pebble) ریز تا متوسط طراحی شده است که شامل یک استوانه گردان به قطر ۱۷ و طول ۱۹ سانتی‌متر است. برای انجام آزمایش، نمونه مورد نظر در داخل سیلندر نمونه‌گیر ریخته می‌شود و پس از انجام آزمایش برای اندازه‌گیری میزان سایش، وزن مواد عبوری از الک شماره ۱۶ در استاندارد ASTM اندازه‌گیری می‌شود. مقدار سایش میکرو دوال، از تقسیم کردن وزن خاک عبوری از الک شماره ۱۶ پس از آزمایش به وزن نمونه خاک اولیه مورد آزمایش به دست می‌آید [۲۸].

جدول ۲- مقایسه دو آزمایش میکرو دوال و میل بال نوردیک [۲۹]

پارامترها	میکرو دوال	میل بال نوردیک
اندازه دانه‌های مورد آزمایش	۴/۷۵ تا ۱۶ میلی‌متر	۱۱/۲ تا ۱۶ میلی‌متر
سرعت چرخش	۱۰۰ ± ۵ دور در دقیقه	۹۰ ± ۳ دور در دقیقه
مجموع چرخش	۹۵۰۰ تا ۱۲۰۰۰ دور	۵۴۰۰ دور
اندازه کره‌های فولادی	۹/۵ میلی‌متر قطر	۱۵ میلی‌متر قطر
وزن نمونه مورد آزمایش	۵۰۰ ± ۵ گرم	۷۰۰۰ ± ۱۰ گرم
وزن کاهش یافته	عبوری از الک شماره ۱۶	عبوری از الک ۲ میلی‌متری
ابعاد سیلندر (قطر درونی، طول درونی)	۱۷۰ ± ۲ میلی‌متر، ۱۹۰ ± ۲ میلی‌متر	۲۰۶ ± ۲ میلی‌متر، ۳۳۵ ± ۲ میلی‌متر

۴-۲-۵- آزمایش سایش دوری

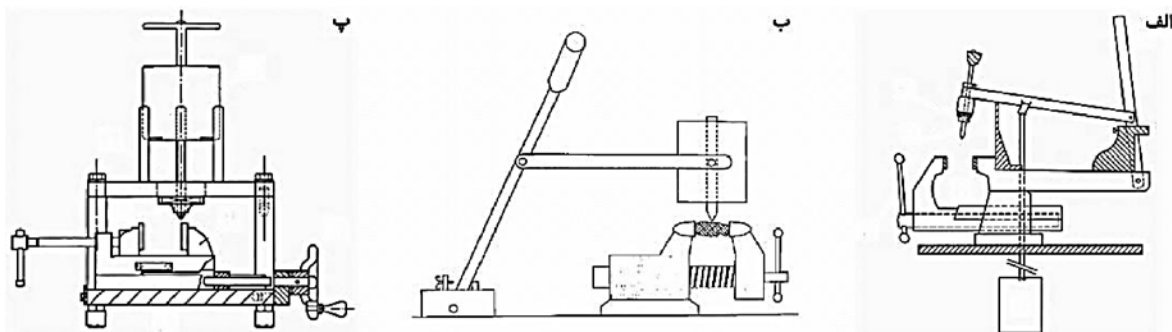
این آزمایش با شماره استاندارد کشور پرتغال NP-309، شباهت زیادی به آزمایش استاندارد برزیل MB-3379 و استاندارد آلمان DIN 52108 دارد. در این آزمایش نمونه خاک از طریق دو محفظه با نرخ ۱۵۰ گرم در دقیقه بر روی سطحی در حال چرخش ریخته می‌شود. نمونه خاک بر روی صفحه در حال چرخش از زیر دو قطعه فولادی استاندارد که روی آن‌ها بار ۳۳۴ نیوتنی قرار داده شده

این دستگاه دارای یک سینی می‌باشد که از پایه و دوغاب پر می‌شود. (به عنوان مثال: دوغاب بنتونیت همراه خاک). قطعه فولادی استاندارد تحت بار قائم ۲۲/۲۴ نیوتنی در داخل مخلوط دوغاب و ماده پایه فرو می‌رود. قطعه فولادی در یک حرکت رفت و برگشتی در داخل دوغاب به مدت ۶ ساعت حرکت می‌کند و عدد میلر با محاسبه کاهش وزن قطعه فولادی به دقت می‌آید [۱۵].

شود. با حرکت دادن اهرم، پین فولادی با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر ثانیه بر روی سطح سنگ کشیده می‌شود. ابزار وست (شکل ۴. پ) نیز از گیره و پین فولادی بارگذاری شده بهره می‌برد؛ اما سرعت انجام آزمایش در آن نسبتاً پایین‌تر است و زمان بیشتری برای کشیدن ۱۰ میلی‌متری پین، صرف می‌شود. در هر آزمایش، پنج پین بر روی نمونه کشیده می‌شود. این کار در دو جهت مختلف انجام می‌شود و در نهایت، میانگین ۱۰ اندازه‌گیری صورت گرفته، به‌عنوان نتیجه آزمایش گزارش می‌شود [۳۳].

۴-۲-۷- آزمایش سایش NTNU

این آزمایش در اوایل دهه ۱۹۶۰ در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی انستیتو تکنولوژی نروژ و برای تخمین قابلیت حفاری سنگ‌ها به روش حفاری ضربه‌ای توسعه یافته است. همچنین از اوایل دهه ۱۹۸۰ از این آزمایش برای ارزیابی کارایی TBM در سنگ‌های سخت نیز استفاده می‌شود. این آزمایش هم برای نمونه‌های سنگ و هم برای نمونه‌های خاک قابل‌اجراست [۲۱].



شکل ۴- انواع مختلف دستگاه‌های آزمایش سرشار. الف) نسل اول (ب) نسل دوم (پ) نسل سوم [۳۲]

همان‌گونه که ذکر شد علاوه بر AV، مقدار AVS نیز به‌وسیله این آزمایش قابل‌محاسبه است. عامل AVS، مشابه AV اندازه‌گیری می‌شود، با این تفاوت که از یک تیغه فولادی جایگزین تیغه کاربرد تنگستنی شده و زمان آزمون نیز از ۵ دقیقه به یک دقیقه یا ۲۰ دور چرخش دستگاه تغییر پیدا می‌کند.

در ابتدا از این آزمایش تنها برای محاسبه میزان سایش ذرات کوچک‌تر از یک میلی‌متر استفاده می‌شد؛ اما با تغییراتی که در سال ۱۹۹۰ در دستگاه و نحوه انجام آزمایش به وجود آمد، دستگاه برای اندازه‌گیری سایش دانه‌های خاک یا پودر سنگ خرد شده کوچک‌تر از چهار میلی‌متر قابل‌استفاده شد. در این

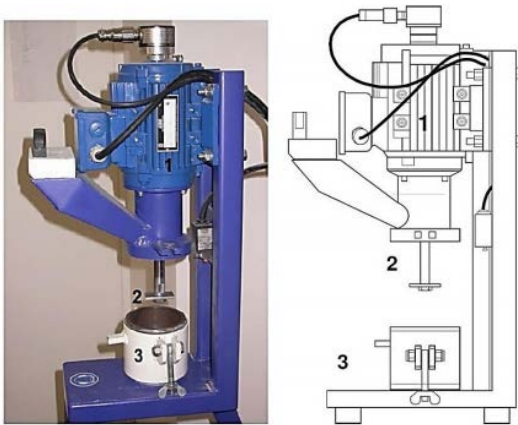
است عبور می‌کند. این صفحه دوار با سرعت ۱/۲۵ متر بر ثانیه به مدت ۱۶۰ ثانیه می‌چرخد. این چرخش سبب خوردگی و کاهش وزن نمونه‌های استاندارد فولادی مورد استفاده در این آزمایش می‌شود. در نهایت عدد سایش دوری (DHN) به صورت نسبت کاهش وزن نمونه‌های فولادی به وزن اولیه نمونه‌های فولادی به‌دقت می‌آید [۳۱].

۴-۲-۶- آزمایش سایش سرشار

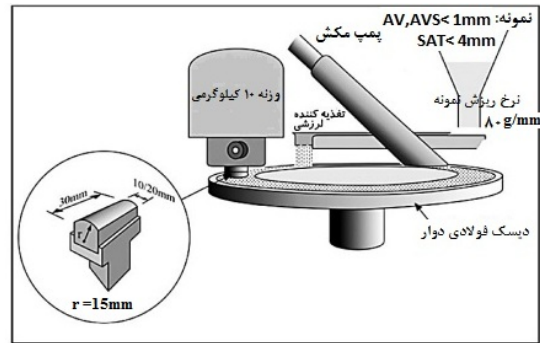
آزمایش سرشار برای نخستین بار در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط انستیتو سرشار (CERCHAR) فرانسه، معرفی شد. تا به حال سه نسل مختلف از دستگاه‌های آزمایش سرشار طراحی و ساخته شده‌اند. نسل اول (شکل ۴. الف) همان‌گونه که اشاره شد، توسط انستیتو سرشار فرانسه طراحی و ساخته شد. نسل دوم دستگاه (شکل ۴. ب)، توسط مدرسه معدنی کلرادو (CSM) و نسل سوم (شکل ۴. پ) توسط وست طراحی و ساخته شد [۳۲]. اجزای مختلف دستگاه‌های آزمایش، در شکل (شکل ۴) به نمایش درآمده‌اند. اهرم آزمایش، مستقیماً به پین فولادی متصل شده است که بار استاتیکی ۷۰ نیوتنی بر آن اعمال می‌-

در آزمایش سایش نروژی برای سنگ، عوامل AV و AVS یا مقدار سایش تیغه‌هایی از جنس کاربرد تنگستن و فولاد که معیاری برای سنجش قدرت ساینده‌گی سنگ هستند، تعیین می‌شوند. در این آزمایش برای تعیین AV، سایش تیغه کاربرد تنگستن که تحت بار ۱۰ کیلوگرم قرار دارد، بر اثر تماس با نمونه پودر سنگ با دانه‌های کوچک‌تر از یک میلی‌متر که بر روی صفحه دوار می‌چرخد، مورد سنجش قرار می‌گیرد. مقدار سایش یا AV، همان کاهش وزن تیغه بعد از ۱۰۰ دور چرخش (حدوداً ۵ دقیقه) دیسک کاربرد تنگستن (برحسب میلی‌گرم) است (شکل ۵).

آزمون عامل SAT محاسبه می‌شود و روش کار همانند AVS است [۲۱].



شکل ۶- دستگاه آزمایش LCPC (۱. موتور الکتریکی، ۲) پروانه فولادی، ۳) ظرف نمونه [۲۱]



شکل ۵- اصول اجرای آزمایش سایشی [۲۱] NTNU

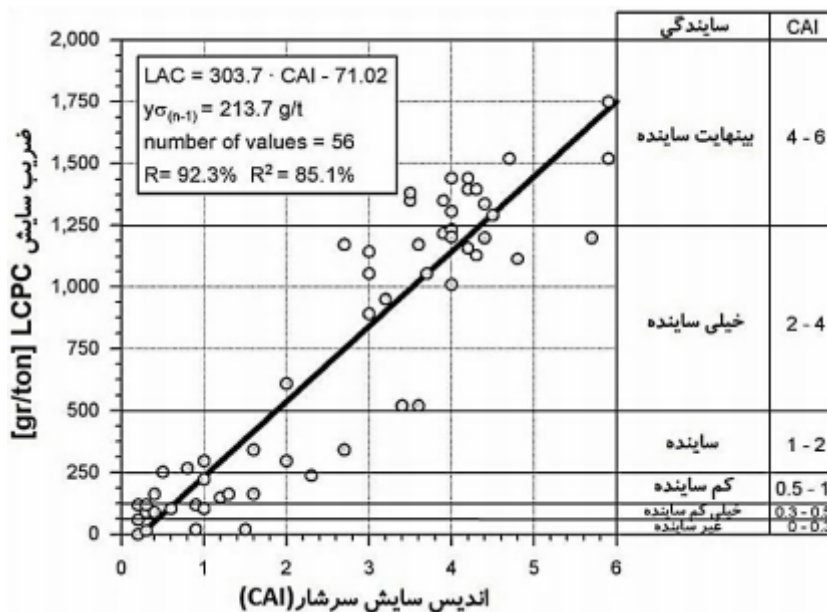
۴-۲-۸- آزمایش LCPC

آزمایش LCPC به وسیله مرکزی به همین نام در فرانسه و در دهه ۱۹۸۰ معرفی شده است. استاندارد فرانسوی AFNOR P18-579 (1990) روش انجام این آزمایش را به شرح زیر توصیف می‌کند. سایش سنج LCPC از یک موتور ۷۵۰ واتی تشکیل شده است که به یک پروانه فولادی متصل است. پروانه از جنس فولاد با سختی HRC 60-75 بوده و دارای ابعاد ۵×۲۵×۵۰ میلی‌متر است. این پروانه در داخل یک مخزن استوانه‌ای قرار می‌گیرد که حاوی نمونه آزمایشی است (شکل ۶) [۲۱].

آزمایش بر روی ۵۰۰ گرم از نمونه خشک‌شده در هوا، با ابعاد ۴ الی ۶/۳ میلی‌متر انجام می‌گیرد. پروانه فولادی با سرعت ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و به مدت پنج دقیقه در داخل ظرف حاوی نمونه دوران می‌کند. برای تعیین میزان ساینده‌گی نمونه، جرم پروانه قبل و بعد از آزمایش تعیین می‌شود. ضریب سایشی (LAC) را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۱]:

$$LAC = \frac{m_o - m}{M} \quad (2)$$

طبقه‌بندی سایشی سنگ‌ها بر اساس نتایج آزمایش LCPC و ارتباط آن با طبقه‌بندی سرشار را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. همچنین، در جدول ۳ رده‌بندی پتانسیل سایش ابزار همراه با نمونه خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC آورده شده است [۱۶].



شکل ۷- ارتباط ضریب سایش LCPC و اندیس سایش سرشار (CAI) [۱۶]

جدول ۳- رده بندی ساینده‌ی خاک و سنگ بر اساس مقادیر LAC [۱۹]

مقدار LAC (gr/ton)	توصیف ساینده	پتانسیل سایش ابزار	سنگ نمونه یا ترکیب خاک	خاک
۰ - ۵۰	غیر ساینده	خیلی کم	چوب، زغال	رس سیلتی و سیلت رس دار، ماسه کربناتی.
۵۰-۱۰۰	خیلی کم	کم	سیلتستون، گلسنگ، مارن.	
۱۰۰-۲۵۰	کم	متوسط	اسلیت، ماسه سنگ ریزدانه با میان لایه های رس، دولومیت، مرمر.	گراول غنی از کربنات
۲۵۰-۵۰۰	متوسط	بالا	سنگ آهک ماسه دار و ماسه سنگ، فیلیت و شیست (کم کوارتز).	ماسه غنی از کریستال و کوارتز.
۵۰۰-۱۲۵۰	بالا	خیلی بالا	ماسه سنگ کوارتزی، آندزیت، بازالت، میکا شیست، آمفیبولیت سست.	گراول غنی از کریستال و کوارتز، خاک‌های دانه ریز
۱۲۵۰-۲۰۰۰	خیلی بالا	بی‌نهایت بالا	سینیت، گنیس، اکلوزیت، آمفیبولیت سخت.	دارای کوارتز یا گراول کریستالی، پبل و کوبل (Cobble).

۴-۲-۹- آزمایش ساینده‌ی خاک PENN STATE

آزمایش ساینده‌ی خاک PENN STATE در سال ۲۰۱۰ در دانشگاه پنسیلوانیا آمریکا و برای اندازه‌گیری میزان سایش، طول عمر ابزار و همچنین سایش ثانویه اجزای مختلف TBM‌های زمین نرم، طراحی شده است [۲۶].

دستگاه این آزمایش، شامل یک محفظه استوانه‌ای با قطر ۳۵۰ میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر است. ابعاد محفظه طوری انتخاب شده که انواع دانه‌بندی خاک را شامل شود تا شرایط برجای خاک را تا حد ممکن شبیه‌سازی کند و از تغییر اندازه دانه‌ها جلوگیری نماید (شکل ۸). یک پروانه به‌منظور ایجاد ماکزیمم نیروی تماسی با خاک در نظر گرفته شده که به یک شفت محرک متصل است و در داخل محفظه استوانه‌ای می‌چرخد. این پروانه، سه تیغه مثلثی با شعاع ۱۵۰ میلی‌متر دارد که به فاصله ۱۲۰ درجه از یکدیگر قرار گرفته‌اند؛ فاصله بین تیغه‌های پروانه از بدنه محفظه تقریباً ۱۲ میلی‌متر است. برای جلوگیری از سایش شدید تیغه‌ها و اندازه‌گیری بهتر وزن از دست‌رفته ابزار، تیغه‌ها با پوشش محافظ روکش داده می‌شوند (شکل ۹). محفظه دستگاه به‌عنوان یک اتافک تحت فشار ساخته شده است و قابلیت انجام آزمایش، تحت فشار 10 bar (145 Psi) را دارد [۲۶].

۴-۲-۱۰- آزمایش SGAT

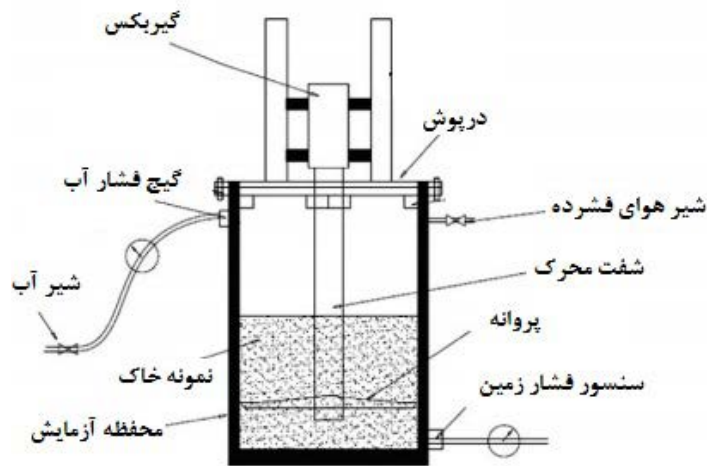
آزمایش SGAT، در سال ۲۰۱۳ با همکاری مشترک دانشگاه

علم و فن‌آوری نروژ (NTNU)، مهندسی سنگ SINTEF و شرکت ساخت مواد شیمیایی BASF به‌منظور شبیه‌سازی اندرکنش بین ابزار حفاری TBM و خاک برجا، در مقیاس کوچک طراحی شده است [۸]. دستگاه آزمایش SGAT باهدف ارائه یک روش آزمایش قابل‌اعتماد برای تخمین ساینده‌ی انواع خاک‌های برجا و بهسازی شده و همچنین، تخمین گشتاور موردنیاز برای عملکرد مناسب TBM‌های زمین نرم توسعه‌یافته است. دستگاه آزمایش شامل یک واحد محرک (با حرکت قائم و چرخشی) است که به انتهای آن دو میله فولادی قابل تعویض، شبیه کله حفار، با سختی ویکرز ۲۲۷ (معادل سختی راکول ۲۰) متصل هستند. محفظه انجام آزمایش دارای دریچه‌ای است که لوله‌هایی از پمپ فوم و هوای فشرده به آن متصل شده است (شکل ۱۰). در طول آزمایش می‌توان آب، بنتونیت یا مواد افزودنی بهسازی خاک را به‌صورت پیوسته و مستقیم به ابزار شبیه کله حفار اضافه و شرایط واقعی کار TBM را شبیه‌سازی کرد.

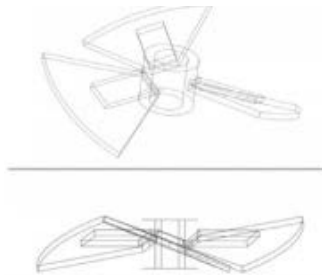
دستگاه این آزمایش، شامل یک محفظه استوانه‌ای با قطر داخلی ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر است که پیکره کلی دستگاه دارای ارتفاع ۲۱۰ و عرض ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد. ابزار حفاری دستگاه شامل دو میله فولادی هستند که به یک نگهدارنده متصل شده‌اند. طراحی این ابزار به‌نحویست که در طول آزمایش، نیروهای تماسی نسبتاً بالا بین میله فولادی

قابل توجه نخواهد بود؛ چراکه آزمایش برای شرایط زمین نرم طراحی شده است. به‌رحال، در خاک‌هایی که دارای مقدار زیادی گراول و کوبل هستند، ممکن است آزمایش SGAT زیاد مناسب نباشد [۸].

پایینی و نمونه خاک متراکم شده ایجاد می‌شود و سوراخ‌های موجود روی میله فولادی پایینی، نازل‌هایی برای افزودن مواد بهسازی خاک به نمونه می‌باشند (شکل ۱۱) [۸]. در حال حاضر، آزمایش برای نمونه خاک‌هایی با اندازه دانه‌های کوچک‌تر از ۱۰ میلی‌متر طراحی شده است؛ این محدودیت



شکل ۸- تصویر و طرح شماتیک دستگاه ساینده‌گی خاک PENN STATE [۲۶]



الف

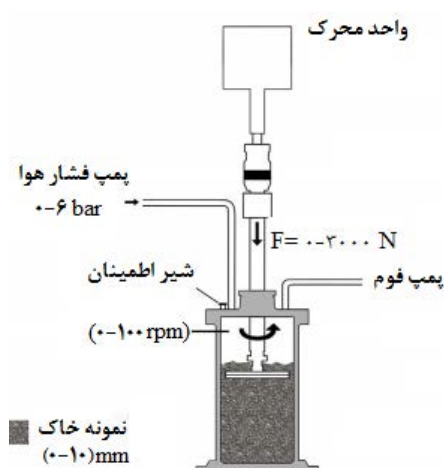


ب

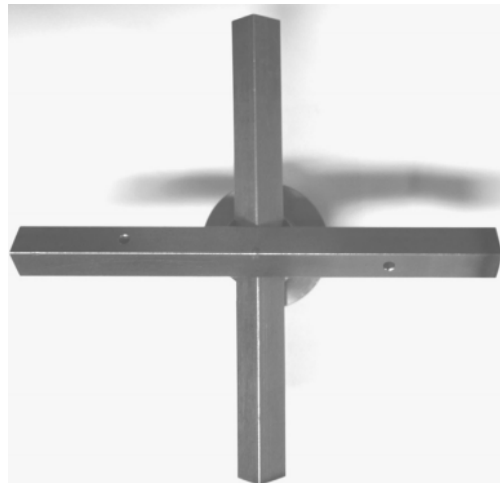


ج

شکل ۹- تیغه‌های پروانه: الف) طرح کلی پروانه و تیغه‌ها، ب) پروانه با سه پوشش محافظ، ج) نحوه نصب پوشش محافظ روی پروانه با دو پیچ [۲۶]



شکل ۱۰- تصویر و طرح شماتیک دستگاه ساینده‌گی خاک زمین نرم (SGAT) [۸]



شکل ۱۱- ابزار حفاری SGAT. سوراخ‌های میله فولادی پایینی، نازل‌هایی برای افزودن مواد بهسازی خاک هستند [۸]

۵- مقایسه آزمایش‌های ساینده

تنوع زیاد آزمایش‌های ساینده خاک، به خوبی نشان‌گر عدم وجود یک روش کلی و موردقبول متخصصین مکانیک سنگ و حفاری، به منظور برآورد ویژگی‌های سایشی آن‌هاست. دلیل اصلی این امر را می‌توان ناشی از ماهیت رفتاری و نه ذاتی سایش دانست. بدون شک، آزمایشی ایده‌آل خواهد بود که اجزای درگیر، سازوکارهای حرکت و محیط انجام آن، مشابه وضعیت موجود در فرآیند واقعی سایش باشد. به بیان دیگر، برای بررسی سایش در اجزای هر سیستم، باید آزمایشی متناسب با مواد، سازوکارها و محیط دربرگیرنده آن سیستم، طراحی نمود. با توجه به مواد یادشده، در ادامه کارایی آزمایش‌هایی که تا به حال مرور شده‌اند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی، ویژگی‌های جسم یکپارچه (بخش در معرض سایش) و جسم مقابل (بخش ایجادکننده سایش) به کاررفته در آزمایش، با وضعیتی که به هنگام حفر مکانیزه خاک، به وسیله ابزارهای برش یک TBM به وجود می‌آید، مقایسه می‌شود. در مورد جسم مقابل (خاک)، تأثیر ترکیب کانی‌شناسی، اندازه و شکل دانه‌ها، تراکم نمونه خاک بر نتایج آزمایش، مورد بحث قرار گرفته است. برای جسم یکپارچه (ابزار برش) نیز تشابه‌های هندسه بارگذاری و سازوکارهای حرکت، بررسی شده‌اند. نهایتاً برای سهولت مقایسه کارایی روش‌های مختلف، بر اساس عوامل یادشده، جدولی از امتیازها برای هر کدام از روش‌های آزمایشی تهیه شده است.

۵-۱- روش‌های کانی‌شناسی

تنها پارامتری که در این روش‌ها تعیین می‌شود، سختی کانی‌های تشکیل‌دهنده خاک است و عوامل دیگری همچون شکل و اندازه دانه‌های تشکیل‌دهنده مورد توجه قرار نمی‌گیرند. در این روش‌ها، جسم یکپارچه نیز حضور ندارد؛ بنابراین، ویژگی‌های هندسی جسم یکپارچه و سازوکارهای حرکت نیز تأثیری بر نتایج حاصل نخواهد داشت. با توجه به موارد یادشده، تنها ستون مربوط به سختی کانی‌ها دارای امتیاز ۱ و بقیه ستون‌ها امتیاز صفر خواهند داشت (جدول ۴). با وجود کاستی‌های یادشده، این روش یکی از کم‌هزینه‌ترین و ساده‌ترین روش‌های ارزیابی ویژگی‌های سایشی خاک‌هاست که در مطالعات اولیه مورد توجه قرار می‌گیرد.

۵-۲- آزمایش سایش لس آنجلس

این آزمایش، بر روی نمونه خاک با اکثر ابعاد دانه‌بندی انجام می‌شود؛ بنابراین، سختی کانی‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها عوامل مؤثر خواهند بود؛ اما از آنجایی که نمونه خاک همراه با گلوله‌های فولادی، بدون عمل تراکم در محفظه انجام آزمایش ریخته می‌شود، امتیازی برای این پارامتر در نظر گرفته نمی‌شود (به ترتیب امتیازهای ۱ و ۰ در جدول ۴). تشابهی نیز مابین هندسه بارگذاری و سازوکار حرکت، با وضعیت ابزار برنده‌ی نصب‌شده بر روی کله حفار TBM در زمین‌های نرم وجود ندارد. به نظر می‌رسد، این آزمایش مشابه آسیاهای مورد استفاده برای کاهش ابعاد قطعات سنگی است. چراکه در این آسیاها نیز از گلوله‌ها

سنگ‌های سخت، دانست. سازوکار حرکت نیز تا حدودی مشابه سازوکار برنده‌های قلمی در کله حفار ماشین است و این پارامتر دارای امتیاز ۰/۵ خواهد بود.

۵-۶- آزمایش میلر

این آزمایش بر روی دوغاب ساختمانی، مشابه با آنچه در حفاری‌ها استفاده می‌شود؛ انجام می‌گیرد؛ بنابراین، از عوامل مربوط به جسم مقابل در این آزمایش سختی کانی‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها تأثیرگذار خواهند بود و از طرفی به خاطر این که نمونه به صورت دوغاب مورد آزمایش قرار می‌گیرد، تراکم مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. هندسه اعمال بار قطعه فولادی استاندارد و سازوکار حرکت رفت و برگشتی آن تا حدودی مشابه با شرایط واقعی کار سپرهای دوغابی است. در واقع این آزمایش، روش توسعه یافته آزمایشی است که در صنعت نفت، برای پیش‌بینی میزان سایش مته‌های حفاری در حفر تونل‌های عمیق قائم دوغابی وجود داشت و به منظور تعیین سایش در قسمت‌های مختلف یک TBM از نوع دوغابی برای اولین بار در آمریکا ابداع شد.

۵-۷- آزمایش دوری

این آزمایش بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ماسه و کوچک‌تر از آن انجام می‌شود؛ بنابراین، علاوه بر سختی کانی‌ها، اندازه و شکل دانه‌ها نیز تا حدودی مؤثر خواهند بود. همچنین، هندسه اعمال بار قطعه‌های فولادی در این آزمایش تا حدودی شبیه به شرایط واقعی ابزار برنده در زمین‌های نرم می‌باشد؛ اما تشابهی بین سازوکار حرکت در این آزمایش و شرایط واقعی وجود ندارد. در اصل، این آزمایش همراه با آزمایش‌های لس آنجلس و میل بال نوردیک برای مطالعه ساینده‌گی اگرگات استفاده شده در پروژه‌های راه‌سازی و ساخت بتن، معرفی شده است.

۵-۸- سیستم قدیم آزمایش NTNU

این آزمایش بر روی نمونه خاک با دانه‌های کوچک‌تر از یک میلی‌متر انجام می‌شود؛ بنابراین، تنها پارامتر تأثیرگذار مربوط به جسم مقابل، سختی کانی‌ها می‌باشد. همچنین، با توجه به این موضوع که در آزمایش AVS، جسم یکپارچه تقریباً مشابه قطعات مورد استفاده در برنده‌های TBM است و سازوکار حرکت قطعات فولادی آزمایش شده تا حدودی شبیه شرایط واقعی است؛ امتیاز ۰/۵ به این پارامترها اختصاص داده می‌شود.

جهت اعمال بار، استفاده می‌شود. در اصل، این آزمایش برای مطالعه ساینده‌گی اگرگات (مصالح سنگی) استفاده شده در پروژه‌های راه‌سازی، معرفی شده است.

۵-۳- آزمایش سایش میکرو دوال

در این آزمایش، ابعاد دانه‌بندی محدود شده اما این محدوده تا حدودی شبیه دانه‌بندی خاک‌های زمین نرم (ابعاد کوچک‌تر از 10mm - بدون در نظر گرفتن کوبل و بولدرها) می‌باشد؛ بنابراین، امتیاز ۰/۵ به پارامتر اندازه و شکل دانه‌ها اختصاص داده و سختی کانی‌ها به عنوان عامل مؤثر انتخاب می‌شود. همچنین هیچ‌گونه تشابهی مابین شرایط جسم یکپارچه حاضر در آزمایش، با شرایط واقعی وجود ندارد. می‌توان گفت، این آزمایش نیز مانند آزمایش سایش لس آنجلس تا حدودی مشابه آسیاهای مورد استفاده برای کاهش ابعاد قطعات سنگی است.

۵-۴- آزمایش سایش میل بال نوردیک

شرایط اجرای این آزمایش، تقریباً مشابه آزمایش میکرو دوال و لس آنجلس است؛ اما به دلیل محدود بودن ابعاد دانه‌بندی به بازه ۱۱/۲ تا ۱۶ میلی‌متر، این آزمایش برای زمین‌های نرم مناسب نخواهد بود. در واقع، این آزمایش نیز برای مطالعه ساینده‌گی اگرگات استفاده شده در پروژه‌های راه‌سازی، معرفی شده است.

۵-۵- آزمایش سایش سرشار

آزمایش سرشار به‌خوبی از عوامل مربوط به سنگ، تأثیر می‌پذیرد و پژوهش‌های انجام شده توسط مؤلفین مختلف، نشان داده‌اند که عواملی چون سختی کانی‌های تشکیل دهنده سنگ، شکل و ابعاد کانی‌ها و مقاومت فشاری تک‌محوره بر نتایج حاصل از آزمایش سرشار، مؤثرند؛ اما به خاطر عدم استفاده از این آزمایش برای نمونه خاک‌های دانه ریز تا درشت، هیچ امتیازی برای پارامتر شکل و اندازه دانه‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. در آزمایش سرشار تا به حال تأثیر تراکم نمونه بر نتایج آزمایش سرشار بررسی نشده، اما نمی‌توان تأثیر آن را در این آزمایش نادیده گرفت؛ بنابراین امتیاز ۰/۵ برای این پارامتر در نظر گرفته می‌شود. همچنین، تشابهی نیز مابین هندسه بارگذاری یک پین نوک‌تیز با ابزار برش کله حفار TBM زمین‌های نرم وجود ندارد. البته می‌توان آن را تا حدودی شبیه به هندسه اعمال بار به‌وسیله دیسک‌های مورد استفاده در TBM

۵-۱۱- آزمایش SGAT

دستگاه آزمایش SGAT، برای رفع نواقص و کاستی‌های آزمایش‌های اخیر ساینده‌گی خاک، در دانشگاه NTNU توسط جاگبسن و همکارانش طراحی و ساخته شد. این آزمایش علاوه بر امکانات دستگاه PENN STATE، امکان انجام عمل تراکم و افزودن مستقیم مواد بهسازی خاک بر روی ابزار را در طی آزمایش فراهم ساخته است.

جهت مقایسه کارایی آزمایش‌های مختلف با یکدیگر، می‌توان از مجموع امتیازهای تخصیص‌یافته برای عوامل مختلف هر آزمایش، بهره برد. جهت بررسی دقیق‌تر، عوامل مربوط به جسم مقابل و جسم یکپارچه جداگانه محاسبه می‌شوند. همچنین مجموع امتیازهای جسم یکپارچه، در $1/5$ ضرب می‌شوند تا هر دو بخش، وزن یکسانی در مجموع کلی داشته باشند. این جمع-بندی را می‌توان در جدول ۵ مشاهده کرد. با توجه به جدول مزبور، می‌توان نکات زیر را در خصوص روش‌های آزمایشی مختلف، نتیجه‌گیری نمود:

- جدول ۵، کارایی روش‌های مختلف را در بررسی وقوع سایش در برنده‌های نصب‌شده بر روی کله حفار TBM‌های زمین نرم، رده‌بندی می‌کند. در صورتی که کاربردهای دیگری چون TBM‌های سنگ سخت، ماشین‌های کله‌گاو، دستگاه‌های معدنکاری پیوسته، سیستم‌های مختلف حفر چال و ... مدنظر باشند، ترتیب قرارگیری آزمایش‌ها در این جدول، عوض خواهد شد.
- بر اساس نتایج بررسی‌های انجام‌شده، آزمایش‌های SGAT و PENN STATE، دارای بیشترین کارایی و آزمایش میل بال نوردیک، دارای کمترین کارایی است.
- امتیازهای مشابه به‌دقت آمده به‌وسیله آزمایش‌های مختلف را نباید به معنی یکسان بودن عملکرد آن‌ها انگاشت.
- در آزمایش‌های موردبحث، تأثیر نمونه خاک بر نتایج آزمایش، نمود بیشتری دارد تا تأثیر جسم یکپارچه. به‌گونه‌ای که در بیشتر آزمایش‌ها، جسم یکپارچه یا اصلاً حضور ندارد (روش-های کانی‌شناسی) و یا عملکردی متفاوت با شرایط واقعی دارد (آزمایش‌های لس‌آنجلس، میل بال نوردیک، میکرو دوال). همچنین با توجه به اینکه اکثر آزمایش‌ها کمترین امتیاز را از بخش جسم یکپارچه دریافت کرده‌اند؛ بنابراین می‌توان گفت در آزمایش‌های مرور شده، توجه اساسی

در واقع این آزمایش، خود ترکیبی از دو آزمایش مختلف بوده؛ بنابراین، کاربرد آن نسبت به سایر روش‌های آزمایشی، پرهزینه است؛ اما این سیستم برای بررسی تغییرات عمر دیسک‌های برنده در سنگ‌های سخت استفاده می‌شود.

۵-۹- سیستم جدید آزمایش NTNU

در ابتدا از سیستم قدیم آزمایش NTNU، تنها برای محاسبه میزان سایش ذرات کمتر از یک میلی‌متر استفاده می‌شد؛ اما با تغییراتی که در سال ۱۹۹۰ در دستگاه و نحوه انجام آزمایش به وجود آمد، دستگاه برای اندازه‌گیری سایش دانه‌های کوچک-تر از چهار میلی‌متر قابل استفاده شد. به خاطر توسعه ابعاد دانه-بندی نمونه مورد استفاده در آزمایش SAT و نزدیک‌تر شدن ابعاد دانه‌ها به دانه‌بندی زمین‌های نرم، علاوه بر تأثیر سختی کانی‌ها، این پارامتر هم تا حدودی بر نتایج آزمایش تأثیرگذار خواهد بود. همچنین در این آزمایش، جسم یکپارچه مشابه قطعات مورد استفاده در برنده‌های TBM اند؛ بر این اساس، امتیاز مربوط به عوامل هندسه اعمال بار و سازوکار حرکت را می‌توان در جدول ۴، مشاهده کرد.

۵-۱۰- آزمایش PENN STATE

دستگاه آزمایش PENN STATE، به‌خوبی از عوامل مربوط به خاک، تأثیر می‌پذیرد و پژوهش‌های انجام‌شده توسط دکتر رستمی و همکارانش، نشان داده‌اند که عواملی چون محتوای رطوبت، توزیع ابعاد دانه‌بندی خاک، شکل دانه‌های خاک، سختی ابزار برنده و خاک، فشارهای جانبی محیط بر نتایج حاصل از ساینده‌گی خاک مؤثرند. در این آزمایش به دلیل ثابت بودن موقعیت تیغه‌ها در طول آزمایش، چرخش در محل ثابتی انجام می‌شود و تیغه‌ها در خاک تازه و متراکم نفوذ نمی‌کنند و تراکم فقط به خاطر زاویه‌دار بودن پروانه‌ها انجام می‌شود؛ بنابراین این پارامتر در این آزمایش تا حدودی مؤثر خواهد بود. در مورد جسم یکپارچه، پروانه مورد استفاده در آزمایش و سازوکار حرکت آن طوری طراحی شده است که شرایط واقعی کار ابزارهای برش TBM‌های زمین نرم را شبیه‌سازی کند. بر این اساس، امتیازهای مربوط به آزمایش دستگاه PENN STATE را می‌توان در کنار سایر آزمایش‌ها، در جدول ۴ مشاهده کرد.

سنجش‌های انجام‌شده بر روی جسم یکپارچه حاصل می‌شود. در صورتی که با توجه به ماهیت رفتاری و برهم‌کنشی پدیده سایش، توجه به اتفاقات به‌وقوع پیوسته بر روی جسم مقابل و یکپارچه اطلاعات کامل‌تری از فرآیند به‌وقوع پیوسته، فراهم می‌کند.

معطوف به ویژگی‌های خاک بوده و عوامل مرتبط با ابزار برنده، از جمله سازوکار حرکت و هندسه بارگذاری، چندان مورد توجه قرار نگرفته‌اند.

• در میان آزمایش‌های مورد بحث، غیر از روش‌های کنای‌شناسی که نتیجه آزمایش بر اساس عوامل مربوط به جسم مقابل به دست می‌آید؛ در بقیه آزمایش‌ها، نتیجه نهایی بر اساس

جدول ۴- سیستم امتیازبندی مورد استفاده برای ارزیابی کارآیی روش‌های آزمایشی مختلف در زمین‌های نرم

ملاحظات	جسم یکپارچه		جسم مقابل			نوع آزمایش
	سازوکار حرکت	هندسه بارگذاری	تراکم خاک	اندازه و شکل دانه‌ها	سختی کنای‌ها	
ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش. مناسب برای مطالعات اولیه.	.	.	.	.	۱	۱. روش‌های کنای‌شناسی
مناسب برای بررسی سایش در آسیاها.	.	.	.	۱	۱	۲. آزمایش لس‌آنجلس
مناسب برای بررسی سایش در آسیاها. استفاده‌شده در راه‌سازی.	.	.	.	۰/۵	۱	۳. آزمایش میکرو دوال
مناسب برای بررسی سایش در آسیاها.	.	.	.	.	۱	۴. آزمایش میل بال نوردیک
مناسب برای بررسی سایش در آسیاها. استفاده‌شده در راه‌سازی.	۰/۵	.	۰/۵	.	۱	۵. آزمایش سرشار
مناسب برای بررسی سایش مته‌های حفاری در حفر تونل‌های عمیق دوغابی.	۰/۵	۰/۵	.	۱	۱	۶. آزمایش میلر
مناسب برای مطالعه سایندهی اگرگات استفاده‌شده در پروژه‌های راه‌سازی و ساخت بتن.	.	۰/۵	.	۰/۵	۱	۷. آزمایش دوری
مناسب برای بررسی سایش در حفاری سنگ‌ها به‌روش حفاری ضربه‌ای.	۰/۵	۰/۵	.	.	۱	۸. سیستم قدیم آزمایش NTNU (AVS-AV)
مناسب برای بررسی کارآیی TBM در سنگ‌های سخت.	۰/۵	۰/۵	.	۰/۵	۱	۹. سیستم جدید آزمایش (SAT) NTNU
تا حدودی مناسب برای بررسی سایندهی خاک در پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه.	.	۱	.	۰/۵	۱	۱۰. آزمایش LCPC
مناسب برای بررسی سایش در سیستم‌های دوغابی و EPB.	۱	۱	۰/۵	۱	۱	۱۱. آزمایش PENN STATE
مناسب برای بررسی سایش در سیستم‌های دوغابی و گراول‌ها.	۱	۱	۱	۱	۱	۱۲. آزمایش SGAT

ن.م.

- محدود می‌شود.
- ۳- شکل دانه‌ها نیز در طی آماده‌سازی نمونه‌ها تغییر پیدا می‌کنند.
- ۴- برهم‌کنش بین ابزار و خاک در آزمایش‌ها با شرایط واقعی قابل‌مقایسه نیست.
- ۵- عواملی از قبیل فشار بالای آب که تا 8 bar هم می‌رسد، نادیده گرفته می‌شوند.
- ۶- در تونل‌سازی، از انواع سیستم‌های بهسازی خاک برای افزایش کارایی ابزار برنده استفاده می‌شود که آزمایش‌های مزبور قادر به اندازه‌گیری این تأثیر نیستند.

جدول ۵- امتیازهای به‌دقت آمده در ارزیابی کارایی روش‌های آزمایشی مختلف

ردیف	نوع آزمایش	جسم مقابل	جسم یکپارچه	مجموع
۱	آزمایش SGAT	۳	۳	۶
۲	آزمایش PENN STATE	۲/۵	۳	۵/۵
۳	آزمایش میلر	۲	۱/۵	۳/۵
۴	آزمایش LCPC	۱/۵	۱/۵	۳
۵	سیستم جدید آزمایش NTNU	۱/۵	۱/۵	۳
۶	سیستم قدیم آزمایش NTNU	۱	۱/۵	۲/۵
۷	آزمایش دوری	۱/۵	۰/۷۵	۲/۲۵
۸	آزمایش سرشار	۱/۵	۰/۷۵	۲/۲۵
۹	آزمایش لس‌آنجلس	۲	۰	۲
۱۰	آزمایش میکرو دوال	۱/۵	۰	۱/۵
۱۱	روش‌های کانی‌شناسی	۱	۰	۱
۱۲	آزمایش میل بال نوردیک	۱	۰	۱

۶- نتیجه‌گیری

و آرایش ابزار برش، سرعت پیشروی، فشار جبهه‌کار) خلاصه کرد.

در این مقاله، آزمایش‌های مرسوم و موجود مورداستفاده برای ارزیابی ظرفیت ساینده‌گی خاک‌ها مرور شدند و دامنه کاربرد هر یک از آن‌ها شرح داده شد. برخی از این آزمایش‌ها، به‌خوبی از ویژگی‌های جسم مقابل تأثیر می‌پذیرند؛ اما عملکرد جسم یکپارچه در اکثر این آزمایش‌ها متفاوت با شرایط واقعی است. بر این اساس، در طراحی و توسعه روندهای آزمایشی جدید، تشابه سازوکار واقعی فرآیند حفاری با سازوکار آزمایش دارای اهمیت بسیار زیادی است. در ارزیابی نتایج حاصل از آزمایش نیز باید تغییرات به وقوع پیوسته در جسم مقابل و جسم یکپارچه، هر دو موردتوجه قرار گیرند. درحالی‌که در آزمایش‌های مرسوم، نتیجه آزمایش تنها با تکیه بر سنجش‌هایی که

در کنار موارد یادشده، بعضی از فاکتورهای مؤثر بر روی نتایج آزمایش‌های تعیین ساینده‌گی که به‌وسیله آزمایش‌های SGAT و PENN STATE لحاظ می‌شوند اما سایر آزمایش‌های ساینده‌گی آن‌ها را نادیده می‌گیرند، به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

۱- آزمایش‌ها در شرایط خشک انجام می‌شوند؛ درحالی‌که در شرایط واقعی اغلب شرایط متغیری از محتوای رطوبت وجود دارد.

۲- در شرایط برجای خاک انواع دانه‌بندی وجود دارد؛ در صورتی‌که در آزمایش‌های یادشده توزیع ابعاد دانه‌بندی

سایش‌های اولیه و ثانویه بر روی قسمت‌های مختلف TBM و مصرف ابزارهای برش در هزینه‌های اجرایی پروژه‌های تونل‌سازی مکانیزه شهری تأثیر زیادی دارند. علاوه بر این، تعویض ابزارهای برش معمولاً وقت‌گیر است که باعث ایجاد تأخیر در فرآیند حفاری و کاهش ضریب بهره‌وری عملیات تونل‌سازی می‌شود. مهم‌ترین عوامل ساینده‌گی خاک را می‌توان به‌صورت ترکیب کانی‌شناسی دانه‌های موجود در خاک (درصد کانی‌های ساینده)، شکل و اندازه دانه‌ها، محتوای رطوبت، گرد شدگی دانه‌ها، چگالی طبیعی خاک، عمق و ضخامت لایه خاکی، سختی و ساینده‌گی دانه‌ها، فشارهای جانبی محیط، فاکتورهای مربوط به بهسازی خاک و عوامل مربوط به ماشین حفار (نیروی پیشران، گشتاور، سرعت چرخش کله حفار، جنس

در ارزیابی ساینده‌گی زمین‌های نرم و شبیه‌سازی سازوکار حرکت ابزار برنده در این زمین‌ها می‌باشند؛ بنابراین، می‌توان از این آزمایش‌ها برای تخمین میزان ساینده‌گی زمین‌های نرم در پروژه‌های تونل‌سازی استفاده کرد.

اکثر بر روی جسم یکپارچه صورت می‌گیرند، گزارش می‌شود؛ چنین روندی نمی‌تواند اطلاعات کاملی از فرآیند برهم‌کنشی سایش ارائه دهد. بر اساس سیستم امتیازدهی ارائه‌شده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که آزمایش‌های SGAT و PENN STATE با در نظر گرفتن موارد فوق، دارای بیشترین کارایی

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
A_i	%	مقدار کانی در نمونه	m	gr	جرم پروانه بعد از آزمایش
R_i	%	عدد سایش روزیوال کانی	m_0	gr	جرم پروانه قبل از آزمایش
LAC	$\frac{gr}{ton}$	ضریب سایشی	M	0/0005 ton	جرم نمونه

۷- مراجع

- rock composition on cutting velocity and chisel wear of tunnelling machines. Glückauf, 106, 274 – 278.
- [10] Tarkoy, P. J., & Hendron, A. (1975). Rock hardness index properties and geotechnical parameters for predicting tunnel boring machine performance. Urbana: University of Illinois, Grant GI-36468.
- [11] Paschen, D. (1980). Petrographic and Geomechanical Characterization of Ruhr Area Carboniferous Rocks for the Determination of their Wear Behaviour. PhD Dissertation. Technische Universität Clausthal.
- [12] Roxborough, F. F. (1987). The role of some basic rock properties in assessing cuttability. Proceedings of seminar on tunnels, wholly engineered structures, (p. 122). Sydney.
- [13] Bruland, A., Dahlø, T., & Nilsen, B. (1995). Tunnelling performance estimation based on drillability testing. 8th ISRM Congress. 1, pp. 123-126. Tokyo, Japan: International Society for Rock Mechanics. Retrieved from <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=ISRM-8CONG RESS-1995-027#>.
- [14] Al-Ameen, S., & Waller, M. (1992). Dynamic impact abrasion index for rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 29(6), 555-560. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(92\)91613-A](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(92)91613-A).
- [15] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., & Raleigh, P. (2006). Abrasivity testing for rock and soils. T & T international(AVR), 47-49. ISSN: 1369-3999.
- [16] Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., & Bauer, M. (2006). Soil abrasivity assessment using the LCPC testing device. Felsbau, 24, 37-45.
- [17] Käsling, H., & Thuro, K. (2010). Determining [۲] شریف‌زاده، م. خادمی حمیدی، ج & ترکمنی قطب، ا. (۱۳۸۶). تونل‌سازی مکانیزه سپری. تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر.
- [1] Jakobsen, P. D., & Lohne, J. (2013). Challenges of methods and approaches for estimating soil abrasivity in soft ground TBM tunnelling. Wear, 38(1-2), 166-173. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.022>.
- [2] Verhoef, P. N. (1997). Wear of rock cutting tools: Implications for the site investigation of rock dredging projects. Delft University of Technology: TU Delft. ISBN: 90-5410-433-3.
- [3] Zum Gahr, K.-H. (1987). Microstructure and wear of materials (Vol. 10). Elsevier. ISBN: 0080875742.
- [4] Plinninger, R. J., & Restner, U. (2008). Abrasiveness testing, quo vadis?—a commented overview of abrasiveness testing methods. Geomechanics and Tunnelling, 1(1), 61-70. ISSN: 1865-7389.
- [5] Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). Hardrock tunnel boring machines. Wiley. com. ISBN: 3433016763.
- [6] Gharahbagh, E. A., Rostami, J., & Palomino, A. M. (2011). New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications. Tunnelling and Underground Space Technology, 26(5), 604-613. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.003>.
- [7] Jakobsen, P. D., Langmaack, L., Dahl, F., & Breivik, T. (2013). Development of the Soft Ground Abrasion Tester (SGAT) to predict TBM tool wear, torque and thrust. Tunnelling and Underground Space Technology, 38, 398-408. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.07.021>.
- [8] Schimazek, J., & Kantz, H. (1970). The influence of

- testing of aggregates in the southeast. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1837(1), 73-79. ISSN: 0361-1981.
- [29] Senior, S., & Rogers, C. (1991). Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario. Transportation Research Record(1301). ISSN: 0309051053.
- [30] ASTM G75-95. (1999). Standard test method for determination of slurry abrasivity (Miller number) and slurry abrasion response of materials (SAR number), Annual book of ASTM Standards .
- [31] Gudbjartsson, J., & Iversen, K. (2003). High-quality wear-resistant paving blocks in Iceland. Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving (PAVE AFRICA 2003), 12.
- [32] Rostami, J. (2005). CAI testing and its implications. T & T international(OCT), 43-45. ISSN: 1369-3999.
- [33] Plinninger, R., Käsling, H., Thuro, K., & Spaun, G. (2003). Testing conditions and geomechanical properties influencing the CERCHAR abrasiveness index (CAI) value. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(2), 259-263. ISSN: 1365-1609.
- [34] Köhler, M., maidl, U., & Martak, L. (2011). Abrasiveness and tool wear in shield tunnelling in soil. Geomechanics and Tunnelling 4. doi: 10.1002/geot.201100002.
- [35] Jalali, S. E., & Eftekari, M. (2008). An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines. Modern Management of Mine Producing, Geology & Environmental Protection (pp. 27-34). Albena: International Scientific GeoConference. ISBN: 9549181812 & 9789549181814.
- [36] Jalali, S. E., & Forouhandeh, S. F. (2011, June). Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction. Safety Science, 49(5), 664-669. DOI:10.1016/j.ssci.2010.12.015.
- [37] Singh, B., & Goel, R. K. (2006). Tunnelling in Weak Rocks. (J. A. Hudson, Ed.) Amsterdam: Elsevier B.V. ISBN-13:978-0-08-044987-6.
- abrasivity of rock and soil in the laboratory. Geologically Active, Taylor & Francis Group, 1973-1980. ISBN: 978-0-415-60034-7.
- [۱۸] آمون، ص. (۱۳۹۲). بررسی مکانیزم سایش و میزان مصرف ابزار برشی دستگاه حفار تمام مقطع فشار تعادلی زمین (EPB). تهران: پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [19] Thuro, K., & Käsling, H. (2009). Classification of the abrasiveness of soil and rock. geomechanics and Tunnelling 2 , 2. doi: 10.1002/geot.200900012.
- [20] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., & Raleigh, P. (2006). Abrasivity of soils in TBM tunnelling. Tunnels & Tunnelling International. ISSN: 0041-414X.
- [21] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., & Raleigh, P. (2007). New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling. Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), (pp. 104-116). Toronto Canada.
- [22] Frenzel, C., Käsling, H., & Thuro, K. (2008). Factors influencing disc cutter wear. Geomechanics and Tunnelling, 1(1), 55-60. ISSN: 1865-7389.
- [23] West, G. (1981). A review of rock abrasiveness testing for tunnelling. ISRM International Symposium, (pp. 585-594). Tokyo, Japan.
- [24] Thuro, K. (1997). Drillability prediction: geological influences in hard rock drill and blast tunnelling. Geologische Rundschau, 86(2), 426-438. ISSN: 0016-7835.
- [25] Thuro, K., & Plinninger, R. (2003). Hard rock tunnel boring, cutting, drilling and blasting: rock parameters for excavatability. Proceedings of the 10th ISRM International Congress on Rock Mechanics, (pp. 8-12).
- [26] Rostami, J., Gharahbagh, E. A., Palomino, A. M., & Mosleh, M. (2012). Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 245-256. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.11.007>.
- [27] ASTM C-131-01. (2006). Resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine.
- [28] Cooley, L. A., & James, R. S. (2003). Micro-Deval