

معرفی یک روش آزمایشگاهی جدید برای اندازه گیری سایندگی خاک

^{۱*} حسین میر محرابی، ^۲ محمد غفوری، ^۲ غلامرضا لشکری پور

^۱ دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ عضو هیات علمی دانشگاه فردوسی مشهد

E-MAIL: Hosseinmirehrabi@gmail.com

چکیده

سایش و استهلاک ابزار ناشی از آن، یکی از پارامترهای موثر در بهره‌وری، هزینه و زمان حفاری می‌باشد. طبیعتاً این تاثیر در زمین‌های ساینده جدی‌تر می‌باشد. با توجه به عدم امکان بازدید مکرر ابزار برشی در ماشین‌های حفاری نوع جبهه کار بسته، ریسک فرسودگی ابزار و افزایش هزینه تعمیر و نگهداری آن‌ها افزایش می‌یابد. از آنجاییکه هنوز هیچ روش استاندارد و یا مورد تایید جهانی برای سنجش قدرت سایندگی خاک‌ها وجود ندارد، موضوع اصلی این مقاله معرفی و ارزیابی مقدماتی یک روش آزمایشگاهی جدید با قابلیت‌های بیشتر و محدودیت‌های کمتر نسبت به سایر دستگاه‌های موجود می‌باشد.

کلمات کلیدی: حفاری مکانیزه، سایش ابزار، سایندگی خاک، آزمایش سایش خاک

۱- مقدمه

حفاری مکانیزه بخاطر مزایای آن امروزه بسیار فراگیر گردیده است. این موضوع بخصوص در محیط‌های شهری بخاطر کاهش ریسک نشست بوسیله ماشین‌های حفاری سینه کار بسته، سرعت در حال توسعه می‌باشد. در طی فرایند حفاری و حمل مصالح نخاله به بیرون تونل، سایش بخش‌های درگیر با مصالح می‌تواند در ابعاد مشکل‌سازی خود را نشان دهد و پیشرفت پروژه را بصورت قابل ملاحظه‌ای متاثر سازند. این مساله مخصوصاً در ماشین‌های تعادل با فشار خاک (EPB) در شرایط زیر سطح آب بسیار جدی‌تر می‌باشد. زیرا برای بازرسی و کنترل سلامت ابزار برش و احتمالاً تعویض آن‌ها شخص باید تحت شرایط هوای فشرده (هایپرباریک) بدون محفظه کله حفار برود. این فرایند علاوه بر هزینه‌بری و اتلاف زمان، خطر ساز نیز می‌باشد. در نتیجه یکی از ریسک‌هایی که توسط مهندسان و پیمانکاران در پروژه‌های تونلی باید بررسی گردد؛ تاثیر خاک‌های ساینده بر هزینه و زمانبندی کار می‌باشد (Nilsen et al., 2006a & 2007).

سایندگی را بصورت کلی می‌توان بعنوان خصوصیت یا استعداد یک نوع سنگ یا خاک برای ایجاد سایش در ابزارآلات تعریف نمود (Plinninger and Restner, 2008). مشکلات ناشی از زمین‌های ساینده در بسیاری از طرح‌های تونل‌سازی دنیا از جمله پروژه ECIS در لس آنجلس و تونل Elbe هامبورگ، گزارش شده است (Nilsen et al., 2006a). مشکلات سایندگی در خط ۱ متروی اصفهان، خط ۱ متروی شیراز، قطعه ۱ تونل قمرود و خط ۱ متروی تبریز نیز از پروژه‌های داخل ایران گزارش شده است (Moammeri & TarighAzali, 2010).

بطور کلی سه دسته عوامل در بحث خسارت های ناشی از ساینده‌گی زمین در ماشین آلات حفاری دخالت دارند که عبارتند از عوامل زمین شناسی، خصوصیات ابزار آلات، عوامل انسانی و اجرایی (Thuro & Kasling, 2009). در همین راستا حسن پور و رستمی (۱۳۸۹) به تاثیر برخی از پارامترهای اپراتوری مانند دور کاترهد و نیروی پیشران بالا بر روی سایش دیسک‌ها اشاره نموده‌اند. Hashemnejad, et al, 2012 نیز اخیرا با کمک آزمایش LCPC تاثیر برخی خصوصیات زمین شناسی بر ساینده‌گی خاک را مطالعه نموده‌اند.

سایش ممکن است در قسمت های مختلفی از TBM، از جمله ابزارآلات حفاری، جلو، عقب و محیط کله حفار، نوار نقاله حلزونی، لوله های اسلاری و پمپ ها رخ دهد. واضح است که سازنده ماشین بمنظور انتخاب اجزای ماشین و حفاظت از سایش های زمین، باید در مرحله طراحی به خصوصیات ساینده‌گی زمین دسترسی داشته باشد. بعلاوه در زمان ساخت نیز پیمانکار هنگامیکه اجزای ماشین در معرض زمین ساینده قرار می گیرد باید یک برنامه مناسب برای تعمیر و نگهداری و بازرسی های زمان بندی شده، تهیه نماید (Nilsen et al., 2007).

با توجه به تاثیر مهمی که قدرت ساینده‌گی زمین در طراحی و ساخت ماشین حفار و برنامه ریزی فاصله دوره های بازدید و حجم تعمیر و نگهداری در یک پروژه حفاری دارد یک تخمین صحیح از ابعاد این پارامتر در مراحل اولیه، در موفقیت و عملکرد پروژه بسیار موثر خواهد بود. با این وجود دانش محدودی درباره نحوه تاثیر ترکیب و جنس خاک و شرایط زمین (مانند فشار، درصد رطوبت و غیره) بر اندرکنش بین خاک و ابزار برشی موجود است (Alavi Gharahbagh et al., 2011).

بمنظور اندازه گیری ساینده‌گی خاک مطالعات گوناگونی تاکنون صورت پذیرفته است (Nilsen et al., 2007; Newby et al., 2008; Langmaack, 2009; Langmaack et al., 2010; Rostami et al., 2012) و روش های آزمایشگاهی مختلفی معرفی گردیده‌اند، با این حال بعلت محدودیت های خاص هر روش، هنوز هیچ یک نتوانسته‌اند بعنوان یک روش استاندارد و یا دارای پذیرش عمومی برای اهداف حفاری، مطرح گردند. هدف اصلی این مطالعه معرفی مقدماتی یک روش آزمایشگاهی جدید جهت سنجش ساینده‌گی خاک و ارزیابی قابلیت ها و محدودیت های آن برای هدف مورد نظر می باشد. این روش باید علاوه بر توانایی تفکیک ساینده‌گی خاک های معمول تا حد امکان ساده، قابل اطمینان و تکرارپذیر باشد.

۲- انتخاب روش مطالعه

برای مطالعه پارامترهای موثر خاک های گوناگون بر سایش ابزار برش، بکمک روش های آزمایشگاهی، از دو گزینه زیر می توان استفاده نمود:

الف- روش ساده تر: استفاده از دستگاه های آزمایشگاهی موجود

ب- روش مشکل تر: طراحی دستگاه جدید که تقریبا مشابه فرایند حفاری عمل نماید.

۲-۱- بررسی و امکانسنجی روش الف

تاکنون هیچ روش پذیرفته شده عمومی برای تخمین میزان سایش مورد انتظار در رابطه با خصوصیات خاک وجود ندارد (Nilsen et al., 2007). بعلاوه با توجه به گستردگی عوامل تاثیرگذار بر سایش، تا به امروز انجمن بین المللی مکانیک سنگ و یا انجمن جهانی ژئوتکنیک روش استاندارد را برای آزمایش ساینده‌گی خاک پیشنهاد نموده‌اند (Thuro et al., 2011). بطور کلی روش ها و آزمایشات موجود را می توان به سه دسته کلی تقسیم نمود. در ادامه برخی از محدودیت های موجود در این روش ها عنوان گردیده‌اند:

۲-۱-۱- روش های سختی سنجی مانند مقیاس نسبی مو (Moh's hardness)، عدد سختی ویکرز (VHN)، محتوای کوارتز و محتوای کانی های ساینده (AMC): از آنجایی که در این موارد تاثیر مواردی غیر از سختی مواد مانند اندازه دانه بندی، رطوبت، فشار و غیره در نظر گرفته نمی شود قابلیت استفاده در هدف مورد نظر را ندارند.

۲-۱-۲- آزمایش لس آنجلس (ASTM C131-66)، آزمایش نوردیک بال میل (NBMT)، تست سایش دوری و امثال آن: در این آزمایش ها که غالبا برای مطالعه سایش سنگدانه ها برای اهداف استفاده در بستر راه بکار می روند بیشتر هدف مربوط به تعیین میزان مقاومت سنگدانه ها در مقابل سایش / برخورد گوی ها / دانه ها / خود سنگدانه ها به یکدیگر بکار می روند بنابراین با توجه به تفاوت هدف و نوع مدل متناسب با هدف آن، برای تعیین تاثیر خاک های مختلف در سایدگی و استهلاک فولاد قابل بهره برداری نمی باشند.

۲-۱-۳- روش هایی که مخصوص اندازه گیری قدرت سایدگی خاک ها در حال توسعه و معرفی می باشند: با توجه به نوپا بودن و برخی محدودیت های خاص هر روش هنوز دارای پذیرش عمومی نیستند و غالبا در حال اصلاح، تکمیل و یا معرفی می - باشند در ذیل این روش ها معرفی گردیده اند:

۲-۱-۳-۱- آزمایش LCPC: این آزمایش شامل چرخش سریع (۴۵۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه) یک پره فلزی از آهن معمولی درون استوانه ای با حدود ۵۰۰ گرم نمونه خاک با دانه بندی بین ۴ تا ۶/۳ میلیمتر می باشد. در نهایت تفاوت وزن پره قبل و بعد از آزمایش معیاری برای قدرت سایدگی خاک می باشد. دستگاه انجام این آزمایش در استاندارد (P18-579(1990) تشریح گردیده است. مزیت این دستگاه ارزان بودن آن و سریع بودن آن است در حالیکه دارای محدودیت هایی می باشد از جمله عدم امکان بررسی تاثیر فشار و تراست دستگاه، بازه دانه بندی بسیار محدود، سرعت بسیار زیاد پره در این آزمایش که اثر ضربه را نسبت به واقعیت (سرعت بین ۱ تا ۲ دور بر دقیقه) افزایش زیادی می دهد.

۲-۱-۳-۲- آزمایش SAT: این آزمایش مدل توسعه یافته آزمایش NTNU (Bruland, 1998) می باشد که برای تخمین سایدگی سنگ ها ساخته شده بود. در آزمایش فوق سنگ در حد ۱ میلیمتر خرد گردیده و تست می شده اند اما در شکل جدیدتر (مخصوص خاک) با ایجاد تغییراتی اندازه دانه ها تا ۴ میلیمتر افزایش داده شده اند. در این آزمایش دیسک حاوی نمونه با سرعت ۲۰ دور بر دقیقه به مدت ۵ دقیقه می چرخد. برخی مزایای این روش عبارتند از: استفاده از جنس ابزار برشی بعنوان سنجنده سایدگی، دور چرخش پایین، خارج شدن پیوسته مصالح تست شده از دور آزمایش، اما محدودیت هایی نیز بقرار زیر دارد: محدوده دانه بندی کوچک، خرد شدن دانه های بزرگتر، تفاوت با شرایط واقعی و در نتیجه عدم امکان ارزیابی تاثیر فشار و تراست دستگاه و بعلاوه عدم امکان ارزیابی تاثیر رطوبت یا سایر افزودنی ها به خاک. ضمنا بعلت کم بودن حجم نمونه خاک، انتخاب نمونه معدل که نماینده مناسبی برای خاک مورد نظر باشد، مخصوصا در خاک های درشت دانه تر، بسیار مشکل می باشد.

۲-۱-۳-۳- آزمایش جدید معرفی شده توسط دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (Rostami et al., 2012): در این روش که جدیدترین دستگاه ساخته شده برای بررسی سایدگی خاک ها با اهداف حفاری و تونل زنی می باشد (شکل شماره ۱)، سعی گردیده است تا محدودیت های دانه بندی در سایر روش ها را تا حد زیادی (تا اندازه شن - قلوه) از بین ببرد. در این دستگاه یک موتور با قدرت ۵ اسب، امکان چرخش یک پره سه تیغه با سرعت های متغیر، تحت فشار محصور تا ۱۰ بار را در داخل مصالح خاکی بوجود آورده است. افت وزن پوشش های فولادی روی هر تیغه بعنوان شاخصی برای سایدگی خاک استفاده می گردد. در این روش امکان بررسی تاثیر رطوبت، فشار و سرعت چرخش بر سایش فلزات وجود دارد. هر چند این روش برای هدف مورد نظر بسیار

مناسب بنظر می‌رسد اما همچنان تحقیق بر روی کارایی آن توسط ابداع کنندگان ادامه دارد از طرف دیگر این دستگاه تنها یک نمونه در جهان دارد و ساخت آن نیز هزینه نسبتا بالایی طلب می‌نماید.



شکل ۱: شما و نمای دستگاه جدید دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا و اجزای آن (Rostami et al., 2012)

۲-۱-۴- سایر روش‌ها:

۲-۱-۴-۱- آزمایش میلر (ASTM G75-01): در این آزمایش که مخصوص سنگ است نمونه سنگی خرد شده و درون دوغاب بنتونیتی مخلوط می‌گردد و سپس در اثر حرکت و ضربه پیستون درون دوغاب ساینده پیستون حاصل می‌گردد به اینصورت که نمونه فولادی به مدت ۶ ساعت با سرعت ۴۸ بار در دقیقه بصورت رفت و برگشتی درون دوغاب حرکت می‌کند. مزیت این روش با توجه به شباهت عملکرد آن در زمینه ساینده‌گی در دستگاه‌های حفاری مکانیزه نوع گل آبی (Slurry) می‌باشد، ولی محدودیت‌هایی دارد شامل اینکه بعلت آسیاب شدن نمونه‌ها و استفاده بصورت دوغاب شرایط واقعی در سایر روش‌های حفاری را نمایندگی نخواهد کرد ضمن اینکه امکان ارزیابی تاثیر فشار و تراست، تغییرات رطوبت و افزودنی‌ها نیز وجود ندارد.

۲-۱-۴-۲- آزمایش ماسه خشک/چرخ لاستیکی (ASTM G70-00):

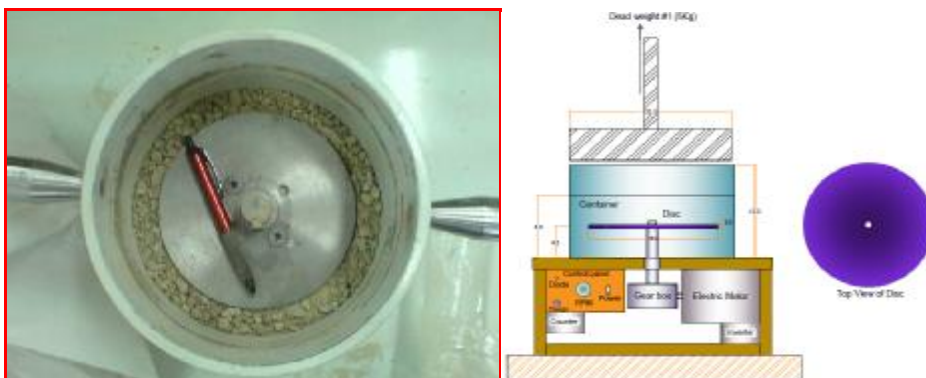
در این آزمایش فقط از مصالح کوارتزی اوتواوا در حد دانه‌بندی ماسه استفاده شده است تا میزان مقاومت سایشی فلزات مختلف مقایسه گردد. در این روش نیز محدودیت دانه‌بندی وجود دارد و اثر رطوبت و افزودنی‌ها را نمی‌توان ارزیابی نمود. یکی از مزایای این روش نیز خارج شدن نمونه‌های تست شده از دور آزمایش می‌باشد.

با توجه به محدودیت‌های روش (الف) تصمیم به استفاده از روش (ب) گرفته شد. بدین منظور با توجه به هدف مورد نظر، گزینه‌های مختلفی بصورت اولیه طراحی گردید و پس از مقایسه آن‌ها گزینه برتر انتخاب گردید و ساخته شد. از جمله مزایای این طرح دانه‌بندی نسبتا وسیع‌تر، شباهت مناسب‌تر با واقعیت، امکان ارزیابی دور و نیروی پیشران یا فشار روباره، امکان بررسی تاثیر رطوبت و سایر افزودنی‌ها و غیره را می‌توان نام برد.

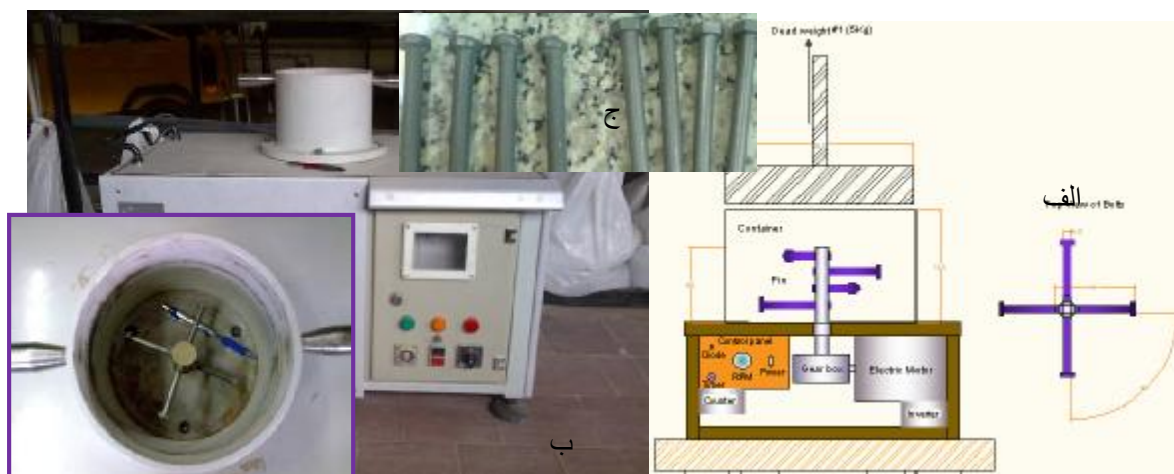
۳- روش آزمایش پیشنهادی (Ferdowsi Abrasion Test [FAT])

پس از بررسی و امکان‌سنجی روش‌های مختلف بصورت نظری، گزینه‌ای که در عین سادگی و امکان تاثیر شرایط واقعی (مانند فشار، رطوبت و غیره)، توانایی پوشش محدوده مناسبی از دانه‌بندی خاک را نیز داشته باشد، بعنوان دستگاه پیشنهادی برای ساخت انتخاب گردید. طرح اولیه آزمایش جدید در شکل شماره ۲ نشان داده شده است (بالا و پایین دیسک با مصالح پر می‌گردیده

است). پس از تعدادی آزمایش امکان‌سنجی بعلت مشکلاتی از قبیل یکسان نبودن زبری سطح دیسک‌ها با توجه به دست‌ساز بودن آن‌ها، نیاز به ترازوی ظرفیت بالا با دقت هزارم گرم (با توجه به وزن نسبتاً زیاد دیسک‌ها)، نیاز به موتور قویتر برای آزمایش بر روی دانه‌های درشت خاک، عدم مشارکت مصالح دورتر از مجاورت دیسک در فرآیند اصلی آزمایش و برخی مشکلات دیگر طرح دستگاه تغییر داده شد و بصورت شکل شماره ۳ اصلاح گردید. روش کار به اینصورت برنامه‌ریزی گردید که تعداد ۴ عدد پیچ آهنی M8 بطول ۹ سانتیمتر با سختی ۱۷۹ در مقیاس ویکرز قبل از آزمایش کدگذاری گردیده و پس از تعیین وزن جداگانه (با دقت هزارم گرم)، در محل مشخص خود درون دستگاه محکم می‌گردند. فاصله عمودی پیچ‌ها از یکدیگر ۲ سانتیمتر و از بالا به پایین در جهت ساعتگرد با زاویه ۹۰ درجه نسبت به پیچ بالاتر جانمایی گردیده‌اند. سپس نمونه‌های خاک (تا حداکثر ابعاد دانه‌بندی ۲ سانتیمتر) به وزن حدود ۶ کیلوگرم درون محفظه دستگاه ریخته می‌شود. حال می‌توان با انتخاب سه پارامتر متغیر زمان، وزن سربار و سرعت چرخش، آزمایشات مورد نیاز را انجام داد. پس از اتمام آزمایش پیچ‌ها باز می‌گردند و دوباره با دقت هزارم گرم وزن می‌شوند. میانگین تفاوت وزن پیچ‌ها بعنوان شاخصی از سایش ابزار فرض می‌گردند.



شکل ۲: نمای شماتیک دستگاه سایش ساخته شده به‌مراه نمای واقعی سنچسگر دیسک آهنی از بالا



شکل ۳: الف) نمای شماتیک دستگاه سایش اصلاح شده با سنچسگر پیچ آهنی بجای دیسک (دستگاه FAT) (ب) تصویر دستگاه (ج) پیچ‌های سنچسگر قبل از آزمایش و بعد از بیش از حدود ۲۰ آزمایش

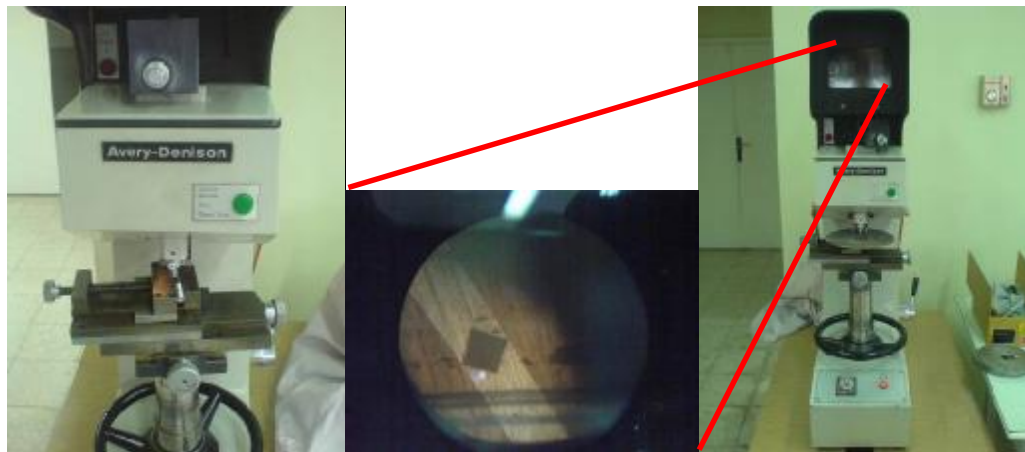
در جدول شماره ۱ ویژگی‌های مختلف روش جدید (FAT) با سایر روش‌های رقیب بصورت خلاصه مقایسه شده‌اند.

جدول ۱: تفاوت جزئیات روش‌های مختلف اندازه‌گیری سایش خاک

Name of test	Duration (min)	RPM	Surcharge (Kg)	Range of soil grains	Material	Reading level (gr)	Soil Amount (Kg)
FAT	30	60	15 Kg	<20mm	Normal steel(Rockwell hardness of B 88)	0.001	6
PSU new test	5,10,30&60	60-180	<10 bar	Large gravel - cobble	steel(17,31,43,51&60 Rockwell hardness)	0.01	40
LCPC	5	4500	0	<6.3 mm	soft steel(Rockwell hardness of B 60-75)	0.01	0.5
SAT(modified AVS)	1	20	10 Kg	<4 mm	Cutter ring steel	0.001	0.08

۴- تعیین سختی سنجگرها

با توجه به اهمیتی که جنس و سختی سنجگر در انواع آزمایشات سایش دارد با استفاده از دستگاه سایش ویکرز، سختی دیسک‌ها و پیچ‌ها اندازه‌گیری گردید (شکل شماره ۴). با استفاده از جداول موجود در منابع مرجع می‌توان این سختی را به سایر واحدهای سنجش سختی مانند راکول تبدیل نمود.



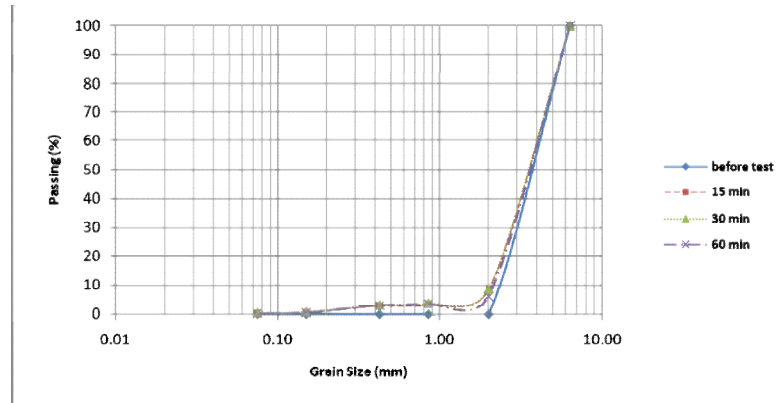
شکل ۴: تعیین سختی سنجگرها (راست: دیسک، چپ: پیچ) توسط دستگاه سختی سنج ویکرز

۵- کنترل تغییرات مصالح در طول آزمایش

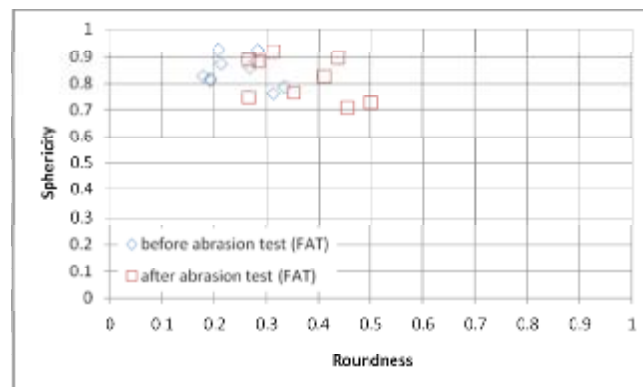
خاکهای سیلیسی دارای سایندهایی زیادی می‌باشند از آنجاییکه این امر منجر به افت وزن نسبتاً زیاد در فلزات می‌گردد بنابراین اثر سایر خطاهای آزمایش در آن تا حد زیادی کوچک خواهد گردید. از اینرو نمونه‌های سیلیسی مربوط به رگه‌های کوارتزی مناطق دگرگونی اطراف شهر ملایر برای مطالعه انتخاب گردید. مصالح فوق همگی در حد دانه‌بندی بین ۲ میلیمتر و یک چهارم اینچ بصورت نسبتاً زبر با گردشگی متوسط بوده‌اند.

بمنظور دستیابی به نتایج نزدیکتر به واقعیت، مطلوب آنست که مشخصات اولیه مصالح در طول آزمایش دارای حداقل تغییرات باشند. مهمترین مشخصات مصالح خاک بجز جنس، دانه‌بندی آن‌ها، کرویت و زبری دانه‌ها می‌باشد. این ویژگی‌ها قبل و

بعد از تست با هم مقایسه شده اند که نتیجه آن در شکل های شماره ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می گردد تغییرات در حد قابل قبولی کم می باشد.



شکل ۵: تغییرات دانه بندی در آزمون سایش با ۱۵ کیلوگرم سربار، سرعت ۶۰ دور بر دقیقه و زمان های مختلف



شکل ۶: تغییرات کرویت و گردشگری ذرات در آزمون سایش با ۱۵ کیلوگرم سربار، سرعت ۶۰ دور بر دقیقه و مدت زمان نیم ساعت

برای محاسبه ضرایب گردشگری (Dobkins & Folk, 1970) و کرویت (Folk, 1974) از روابط زیر استفاده گردید:

$$R = D_r / D_i \quad , \quad S = (D_i / D_c) 0.5$$

که در آن R ضریب گردشگری، S ضریب کرویت، Dc قطر دایره محیط بر دانه، Di قطر دایره محاطی و Dr قطر دایره منطبق بر تیزترین گوشه دانه می باشد.

۶- تعیین استاندارد آزمایش

برای طراحی روشی که بوسیله آن بتوان قدرت سایندهی خاک های مختلف را مورد سنجش قرار داد، با عنایت به اینکه هر چه افت وزن بیشتر باشد اثر خطاهای اپراتوری، دستگاهی و ... کوچکتر می گردد بنابراین باید سعی گردد میزان دور، زمان و سربار

تا حد امکان زیادتر انتخاب گردد ولی با توجه به اینکه هر چه پارامترهای فوق افزایش می‌یابند ویژگی‌هایی مانند دانه‌بندی و گردش‌دگی بیشتر از حالت اولیه فاصله می‌گیرند نیاز است که تا حد امکان موارد فوق در حد بهینه انتخاب گردند. با توجه به مواردی از قبیل مسائل مذکور و نتایج حاصل از آزمایشات ارائه شده در این مطالعه، در نهایت پارامترهای مناسب برای تعیین میزان ساینده‌گی خاک‌های مختلف با دستگاه جدید بصورت ذیل انتخاب گردید (شرایط استاندارد آزمایش FAT).

میزان سربار: ۱۵ کیلوگرم

سرعت چرخش: ۶۰ دور بر دقیقه

زمان آزمایش: ۳۰ دقیقه

۷- برنامه‌های آتی

برای بررسی رابطه بین پارامترهای مختلف زمان، تراست و سرعت چرخش کله حفار با میزان سایش ایجاد شده در آن‌ها (در یک نوع مصالح ثابت) با استفاده از این دستگاه، ماتریسی از ترکیب‌های مختلف زمان‌های آزمایش ۵، ۱۵، ۳۰ و ۶۰ دقیقه با وزنه‌های سربار ۵، ۱۵ و ۲۰ کیلوگرم و سرعت‌های چرخش ۳۰، ۶۰ و ۹۰ دور بر دقیقه طرح‌ریزی گردیده است. همچنین بررسی نحوه تاثیر اندازه و زبری دانه‌ها، رطوبت، سختی کانی‌ها نیز در برنامه کاری تعریف شده برای ادامه تحقیقات، گنجانده شده است.

۸- نتیجه گیری

امروزه یکی از دغدغه‌های مهندسان و پیمانکاران حفاری مکانیزه تونل‌ها سایش زیاد ابزار برش و سایر قطعات درگیر با نخاله در ماشین‌های حفاری TBM می‌باشد. علیرغم این نیاز صنعت که از آن برای تعیین دقیق‌تر قیمت حفاری و شرکت در مناقصات، طراحی و ساخت ماشین، برنامه‌ریزی دوره‌های بازدید و تعمیر و نگهداری و غیره می‌توان استفاده نمود، هنوز دانش عمومی کمی برای پیش‌بینی آن در پروژه‌ها وجود دارد و هیچ روش استاندارد یا پذیرفته شده عمومی برای این منظور معرفی نگردیده است. در این تحقیق دستگاهی ساخته شده است که بر اساس آزمایش‌های اولیه تا حد رضایتبخشی برای انجام مطالعات مورد نیاز و تعیین ساینده‌گی خاک‌ها مناسب بنظر می‌رسد. از آنجایی که تعیین میزان تاثیر پارامترهای مختلف زمین‌شناسی بر قدرت ساینده‌گی خاک‌ها امروزه بعنوان یک نیاز اساسی جهت تخمین ساینده‌گی خاک‌ها در مراحل مطالعاتی مطرح می‌باشد، پیشنهاد می‌گردد بوسیله دستگاه طراحی شده و یا سایر روش‌های مشابه آن تحقیقات بیشتری در مورد تعیین رابطه بین ویژگی‌های زمین‌شناسی مسیر تونل‌ها، مشخصات ماشین حفار و پارامترهای اپراتوری با سایش تحمیلی بر ابزارآلات مرتبط، بعمل آید.

منابع

حسن پور ج.، و رستمی ج.، (۱۳۸۹). "عملکرد ماشین‌های تونل‌بری در سنگ سخت"، انتشارات نشر فن آریا.

- Alavi Gharahbagh, E., Rostami, J., Palomino, A.M. (2011). "New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications", Tunneling and Underground Space Technology Journal, Vol.26 (5), pp. 604-613.
- Bruland, A. (1998). "Hard rock tunnel boring: Drillability test methods", Project report 13A-98, NTNU Trondheim.
- Dobkins, J.E. and Folk, R.L. (1970). Shape development on Tahiti Nui: Journal of Sedimentary Petrology, Vol.40, pp. 1167-1203.
- Folk, R.L., 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Hempill publishing co., Austin, Texas, 182 p.
- Hashemnejad, H., Ghafoori, M., Lashkaripour, Gh. R., Tariq Azali, S. (2012). "Effect of geological parameters on soil abrasivity using LCPC machine for predicting LAC", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2(12), pp. 71-76.
- Langmaack, L. (2009). "The truth about soil conditioning: dos and donts", In: Proceedings of World Tunneling Conference, Budapest, Hungary, May 2009.
- Langmaack, L., Grothen, B., Jakobsen, P.D. (2010). "Anti-wear and anti-dust solutions for hard rock TBMs", In: Proceeding of World Tunneling Conference, Vancouver, Canada, May 2010.



- Moammeri, H. and Tarigh Azali, S. (2010). "Abrasive effects on TBMs used to bore current or recently completed projects in Iran", World Tunnelling (Desember 2010), pp. 24-27.
- Newby, J., Gilbert, M., Maday, L. (2008). "Establishing geotechnical baseline values for deep soft ground tunnels", In: Proceedings of North American Tunneling Conference (NAT), 2008, San Francisco, CA, pp. 547-557.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P. (2006a). "Abrasivity of soils in TBM tunneling", Tunnels & Tunneling International, March 2006, pp. 36-38.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P. (2006b). "Abrasivity testing for rock and soils", Tunnels & Tunneling International, April 2006, pp. 47-49.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P. (2006c). "SAT: NTNU's new soil abrasion test", Tunnels & Tunneling International, May 2006, pp. 43-45.
- Nilsen, B., Dahl, F., Holzhauser, J., Raliegh, P. (2007). "New test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunneling", RETC Proceedings, pp. 104- 116.
- Plinninger, R.J. and Restner, U. (2008). "Abrasiveness Testing, Quo Vadis? – A Commented Overview of Abrasiveness Testing Methods", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 1(1), pp. 61-70.
- Rostami, J., Alavi Gharahbagh, E., Palomino, A.M., Mosleh, M. (2012). "Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines", Tunneling and Underground Space Technology Journal, Vol.28, pp. 245-256.
- Thuro, K. and Kasling, H. (2009). "Classification of the abrasiveness of soil and rock", Geomechanics and Tunnelling, Vol. 2, pp. 179-188.
- Thuro, K., Singer, J., Kasling, H., Bauer, M. (2006). "Soil abrasiveness assessment using the LCPC testing device", Felsbau 24 (2006), pp. 37-45.
- Thuro, K., Singer, J., Kasling, H., Bauer, M. (2011). "Determining abrasiveness with the LCPC test", Proceeding of the 1th Canada-U.S. Rock Mechanics Symposium, Vancouver B.C.