نشریه‌ی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره ششم، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۵۵ تا ۶۲

بررسی آزمایشگاهی سایش ابزار برشی دستگاه EPB-TBM

صادق آمون[۱]؛ حمید چاکری[۲*]
۱- دانشجوی دکتری، مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی سهند تبریز
۲- دانشیار، مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دریافت : ۱۴۰۱/۰۸/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

میزان سایندگی خاک و مقاومت ابزار برش در مقابل سایش یکی از مهمترین فاکتورها در راندمان ماشین‌های *EPB-TBM* می‌باشد. سایش بیش از اندازه، تأثیر منفی بر روی پارامترهای اجرایی دستگاه حفار داشته و کارایی دستگاه را کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه زمان هر عملیات هایپرباریک جهت تعویض ابزارهای سایش یافته در حدود یک تا دو هفته می‌باشد، زمانبندی پروژه و هزینه تمام شده تونل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما از آنجاییکه روش و آزمایش جامع و مورد قبولی در خصوص بررسی سایش و سایندگی در زمین‌های نرم وجود ندارد، در این مطالعه جهت درک بهتر اندرکنش بین خاک و ابزار برش اقدام به طراحی و ساخت دستگاه شبیه ساز حفاری *TBM* شده است. در این مقاله، پس از معرفی دستگاه جدید ساخته شده در دانشگاه صنعتی سهند تبریز- ایران به منظور شبیه سازی مکانیزم حفاری *TBM*، به بررسی تاثیر دانسیته دو نوع خاک با دانه بندی متفاوت و با رطوبت های مختلف بر میزان سایش ابزار برش تحت شرایط مختلف پرداخته شده است. از مهمترین ویژگی‌های این دستگاه می‌توان به سرعت پایین چرخش کله‌حفار (مشابه ماشین‌های *EPB*)، تماس مداوم ابزار برش با خاک دست نخورده، تزریق مداوم مواد عمل آوری با فشار تزریق مشخص در طول آزمایش و کارکرد افقی شبیه *TBM* آن اشاره کرد. نتایج اولیه آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش دانسیته خاک از ۱/۵ تا ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب در رطوبت ۷ درصد مقدار بیشینه سایش ابزارهای برش از ۴/۱ درصد به ۱۱/۶ درصد افزایش پیدا می‌کند. این روند افزایشی برای رطوبت ۱۳ درصد نیز صادق است. همچنین بررسی سایش در تراکم های مختلف و در درصدهای رطوبت مختلف نشان می‌دهد در شرایط یکسان، در درصد رطوبت بیشتر، مقدار سایش کاهش می‌یابد. نتایج برخی آزمایشات عملکردی نشان می‌دهد که با افزایش نرخ نفوذ و سرعت چرخش کله‌حفار در شرایط متفاوت، به ترتیب سایش ابزار کاهش و افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی سایش، سایندگی، ابزار برش، *EPB-TBM*

۱- مقدمه

یکی از مسائلی که در حفاری مکانیزه با ماشین‌های *EPB-TBM* عمدتاً مورد توجه مهندسان و پیمانکاران قرار می‌گیرد، مشکلات و هزینه‌های ناشی از ایجاد سایش می‌باشد. با ایجاد سایش بر روی ابزار برش، حفاری متوقف می‌شود و با عملیات هایپرباریک، ابزارهای سایش یافته تعویض می‌گردند. با توجه به اینکه هر عملیات هایپرباریک به یک تا دو هفته زمان نیاز دارد و همچنین خطرات جانی احتمالی آن، هر چه تعداد دفعات عملیات هایپرباریک کاهش یابد می‌تواند در روند حفاری و کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد. از این رو توجه به کنترل سایش در پروژه‌های تونلسازی مکانیزه با *TBM* از اولویت برخوردار است **[1-3]**. با وجود گسترش حفاری‌های زیرزمینی و ساخت دستگاه های مختلف به منظور اندازه‌گیری میزان سایش ابزار برش در حفاری مکانیزه، روش دقیق برای اندازه گیری میزان وزن از دست رفته ابزار برشی تحت شرایط مختلف (رطوبت‌های متفاوت، فشارهای متفاوت، دانه‌بندی مختلف، شرایط ژئوتکنیکی متفاوت و ...) وجود ندارند **[3-23]**. هدف از این تحقیق ساخت

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: Chakeri@sut.ac.ir

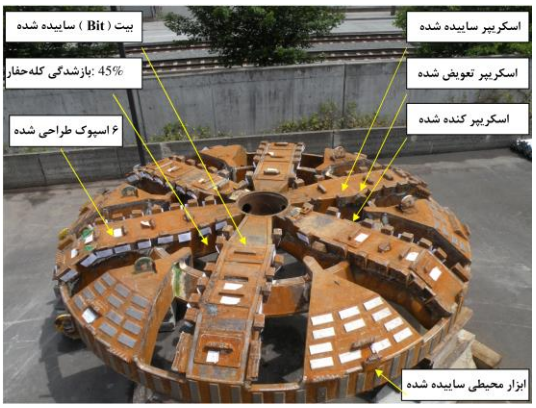
دستگاهی با محدودیت کمتر نسبت به دستگاه‌های موجود و همچنین شبیه‌سازی اندرکنش بین ساختار خاک و ابزار برش تحت رطوبت و فشارهای مختلف و همچنین ایجاد شرایطی برای ابزار برش تا به صورت مداوم در ساختار خاک نفوذ کند و در حین حفاری دائماً با خاک تازه در ارتباط باشد. شناخت اندرکنش بین ساختار خاک و ابزارهای برشی در حین حفاری تونل به روش مکانیزه کمک شایان به معرفی و ساخت دستگاهی برای اندازه‌گیری دقیق میزان سایش در محیط‌های خاکی می‌کند. با شناخت تأثیر عوامل مختلف بر روی سایش می توان در پروژه‌های حفاری از اتلاف وقت و همچنین بوجود آمدن هزینه‌های اضافی در پروژه جلوگیری کرد.

۲- تاریخچه موضوع سایش و ساینده‌گی

سایش به‌صورت از دست رفتن ماده از سطح جسم در اندرکنش بین خاک و ابزار برشی تعریف می‌شود که عمدتاً بر روی ابزارهای برشی، کله‌حفار، محفظه حفاری و نقاله مارپیچ در حین حفاری در زمین‌های نرم اتفاق می‌افتد. مسئله سایش در تونلسازی از جمله مشکلات اساسی می‌باشد که بر روی زمانبندی پروژه و هزینه‌ها تأثیر زیادی دارد **[5]**. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تنها عامل مؤثر در سایش ابزار برش به حساب نمی‌آید؛ بلکه نوع *TBM* و محل جایگذاری ابزارها بر روی کله‌حفار و نیز عملیات تعمیر و نگهداری *TBM* ازجمله عوامل مؤثر بر سایش ابزار برش می‌باشند **[3]**. شکل ۱ پارامترهای موثر در سایش ابزار در تونلسازی مکانیزه با دستگاه *EPB-TBM* نشان داده شده است. سایش در حفاری مکانیزه به دو بخش اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود. سایش اولیه به سایش مورد انتظار که روی ابزارهای حفاری اتفاق می‌افتد و طراحی شده می‌باشد، گفته می‌شود. ابزارهای ساییده شده در مدت زمان معلوم تعویض و تعمیر می‌شوند. سایش ثانویه زمانی اتفاق می‌افتد که سایش اولیه بر روی ابزارهای برشی بیش از اندازه باشد و باعث آسیب به بدنه دستگاه شود. سایش ثانویه مورد انتظار طراحی‌های *TBM* نبوده و در صورت بروز، مشکلات اساسی را در روند حفاری به وجود می‌آورد **[5]**.

در اشکال ۲ و ۳ نمونه‌هایی از سایش اولیه و ثانویه نشان داده شده است.

شکل ۱- پارامترهای موثر در سایش ابزار در تونلسازی مکانیزه با دستگاه EPB-TBM [3]



شکل ۲- انواع سایش اولیه بر روی دستگاه EPB-TBM [2]

شکل ۳- انواع ثانویه بر روی دستگاه EPB-TBM

عوامل متعددی بر روی سایش ابزار برش در محیط‌های خاکی تأثیر می‌گذارد. شرایط خاک برجا، کانی‌های تشکیل دهنده و وضعیت مکانیکی خاک عوامل مهم ایجاد کننده سایش در محیط خاکی می باشند. با شبیه‌سازی شرایط حفاری مکانیزه در محیط خاکی، می‌توان تخمین خوبی از میزان ساینده‌گی خاک‌ها در شرایط مختلف بدست آورد. با وجود انجام تحقیقات متعدد در زمینه تخمین سایش ابزار برش در زمین‌های نرم و ساخت دستگاه‌های مختلف، هنوز روش استاندارد و جامع برای اندازه گیری سایش وجود ندارد. روش‌های

مختلفی برای اندازه‌گیری سایش وجود دارد که عمدتاً مبتنی بر خواص کانی شناسی محتوای خاک تشکیل دهنده می باشند. ولی اخیراً دستگاه‌هایی برای شبیه سازی خواص مکانیکی خاک حفاری شده و نیز دخالت دادن پارامترهای حفاری در حین آزمایش طراحی و ساخته شده است تا بتوان تقریب دقیقی از میزان سایش در شرایط مختلف بدست آورد و تأثیر هر یک از پارامترها را به دقت بررسی کرد.

از این بین می‌توان به ساخت دستگاه *LCPC* در مرکزی به همین نام در فرانسه اشاره کرد **[12,23-25]**. طبقه‌بندی سایش در محیط‌های سنگی و خاکی توسط همین دستگاه در سال ۲۰۰۹ انجام شد **[16]**. علوی قره باغ و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به بررسی مشکلات ناشی از سایش در محیط‌های خاکی و شناخت عوامل مؤثر اولیه و عملیاتی پرداختند. همچنین با شناخت این عوامل اقدام به ساخت دستگاه *PSA* نمودند **[1]**. در سال ۲۰۱۱ کهلر تحقیق خوبی در مورد عوامل مؤثر بر سایش از دیدگاه تریبولوژیکی انجام داد **[7]**. قره‌باغ و همکارانش در سال ۲۰۱۴ مطالعه‌ای در مورد تأثیر عمل‌آوری خاک در حفاری با *EPB* در زمین‌های نرم انجام دادند **[26]**.

رستمی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اقدام به باز طراحی و ساخت دستگاه و پیش‌بینی تأثیر برخی پارامترهای خاک بر روی ابزار برش نمودند **[2]**. برزگری و همکارانش در سال ۲۰۱۲ اقدام به ساخت دستگاهی بر مبنای شبیه‌سازی چمبر دستگاه *EPB* و اندازه‌گیری سایش در این محیط کردند **[22]**. جاکوبسن و همکارانش در سال ۲۰۱۳ بررسی‌هایی در مورد چالش‌های موجود در حفاری مکانیزه در زمین‌های نرم انجام دادند و در سال ۲۰۱۳ اقدام به ساخت دستگاه *SGAT*و بیان چگونگی تأثیرپذیری میزان سایش ابزار برش از کانی شناسی، میزان رطوبت و فشار کردند **[19,20]**. کوپفرل در سال ۲۰۱۶ اقدام به ساخت دستگاه *RuB* و بررسی تأثیر برخی از پارامترهای عملیاتی دستگاه بر روی میزان سایش نمود **[27]**. وی و همکارانش در سال ۲۰۱۸ با استفاده از دستگاه جدید ساخته شده به بررسی تأثیر دانه‌بندی بر روی سایش ابزار برش پرداخت. نتایج آزمایش‌ها بر روی نمونه ماسه حاوی ذرات شن نشان می‌دهد که با افزایش میزان شن در محتوی خاک تا میزان ۷۵٪ میزان سایش‌ها افزایش پیدا می‌کند و سپس با افزایش دوباره میزان شن، درصد سایش ها کاهش می‌یابد. همچنین بررسی تأثیر اندازه ذرات شن نشان می‌دهد که دانه‌های حاوی شن ۲۰-۱۰ میلی‌متری میزان سایش بیشتری از ذرات شن با اندازه ۱۰-۵ میلی‌متر در پین‌های برشی ایجاد می‌کند. در سال ۲۰۱۹ وی اقدام به بررسی تأثیر محتوی کوارتز معادل و مدت زمان آزمایش و نیز میزان رطوبت و تأثیر مواد افزودنی نمود. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش محتوی کوارتز نمونه، درصد سایش‌های اتفاق افتاده افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش مدت زمان آزمایش، درصد سایش پین‌ها نیز افزایش می‌یابد. وی و همکارانش در سال ۲۰۲۰ برای بررسی بهتر تأثیر مواد افزودنی اقدام به انتخاب دو نوع فوم با مشخصات متفاوت کردند. با استفاده از از این مواد افزودنی و انجام آزمایش‌های سایش و اسلامپ به بررسی مقدار بهینه هر یک از این پارامترها نمودند. نتایج نشان می‌دهد که خاک ماسه‌ای حاوی مقداری شن تأثیرپذیری بیشتری از حضور فوم داشته است و نسبت به نمونه‌های مشابه افت میزان سایش بیشتری را تجربه کرده است. همچنین بررسی‌های انجام شده بر روی *FIR* نشان می‌دهد که در نمونه با *FIR=30%* میزان سایش‌ها بیش از ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است **[28-32]**. جدول ۱ بررسی اجمالی از ویژگی دستگاه‌های *SGAT* و *PSA* و *SSAT* می‌باشد.

جدول ۱- مقایسه مشخصات دستگاه‌های SGAT، PENN STATE، RUB

	SGAT	Penn state	RUB
نوع ابزار برشی	چهار میله فولادی	سه تیغه پروانه‌ای	صفحه ستاره‌ای شکل
سرعت چرخش کله‌حفار (دور در دقیقه)	۱-۱۰۰	۶۰-۱۸۰	۴۵-۱۴۰
نرخ نفوذ ابزار (میلی‌متر در دقیقه)	۰-۲۰۰	۰	۰/۰۵-۰/۲
فشار محفظه (بار)	۶	۱۰	۰
دانه‌بندی (میلی‌متر)	۰-۱۰	۰/۵-۷	۰/۰۶-۴
نحوه تزریق مواد افزودنی	پیوسته	قبل از شروع آزمایش و پیوسته	قبل از شروع آزمایش

۳- دستگاه شبیه‌ساز حفاری EPB-TBM دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دستگاه شبیه ساز حفاری *TBM* به منظور شبیه سازی مکانیزم حفاری تونل در دانشگاه صنعتی سهند تبریز ساخته شده است. با استفاده از این دستگاه می‌توان میزان سایندگی خاک و سایش ابزار برش، تحت شرایط مختلف را بررسی کرد. از ویژگی‌ها و مزایای این دستگاه می‌توان به سرعت پایین چرخش کله‌حفار، تماس مداوم پین-ها با خاک دست نخورده، تزریق مداوم مواد عمل‌آوری با فشار تزریق مشخص در حین آزمایش و کارکرد افقی آن اشاره کرد (شکل ۴).

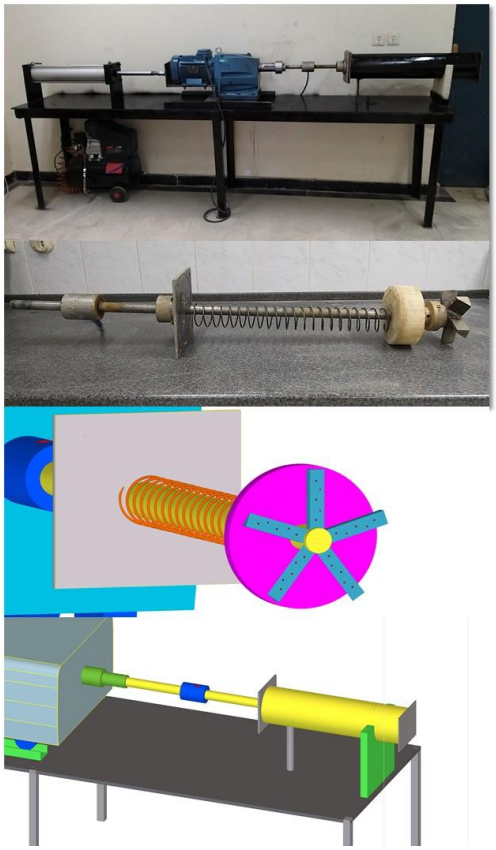
دستگاه از یک کمپرسور هوا و جک پنوماتیکی با حداکثر کورس جک ۵۰ سانتی متر تشکیل شده است. این جک توسط یک کمپرسور هوا

نیروی لازم برای حرکت موتور و گیربکس را بر روی ریل فراهم می-سازد. با استفاده از رگلاتور و شیر تنظیم سرعت، امکان کنترل سرعت عملکرد جک فراهم می شود. اتصال جک وموتور توسط یک تکیه گاه غلتکی انجام شده است.

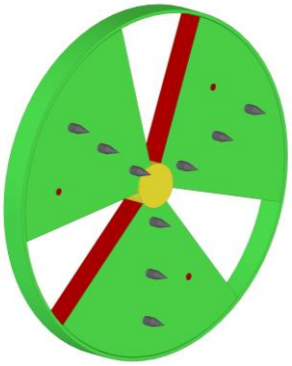
موتور استفاده شده در این دستگاه دارای توان ۳ کیلو وات می‌باشد. حرکت دورانی کله‌حفار توسط گیربکس فراهم می‌شود. گیربکس استفاده شده امکان اجرای سرعت‌های چرخشی پایین را فراهم می-سازد که شبیه‌سازی خوبی از حفاری *TBM* در داخل خاک می‌باشد. مجموعه موتور و گیربکس روی ریلی به طول ۷۰ سانتی متر قرار گرفته است که با باز شدن جک و حرکت موتور روی ریل، کله‌حفار به داخل خاک نفوذ می‌کند و موجب حفاری خاک می شود. به منظور اجرای سرعت‌های چرخش متفاوت از یک اینورتور استفاده شده است. بنابراین استفاده از این دستگاه امکان دسترسی به سرعت‌های مختلف چرخش کله‌حفار را فراهم می‌سازد (شکل ۴).

شفتی به طول ۱/۱ متر و قطر ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. روی شفت محلی برای اضافه کردن مواد عمل‌آوری خاک وجود دارد. کله‌حفار به انتهای شفت بسته می‌شود و با چرخش در داخل خاک، ابزارهای برشی در برخورد با خاک ساییده می‌شوند. به منظور شبیه-سازی فضای چمبر دستگاه *TBM* از یک قطعه پلی اتیلن استفاده شده است. با باز شدن جک و حرکت موتور و گیربکس روی ریل، شفت به داخل خاک نفوذ می‌کند. خاک از مجراهای موجود روی کله‌حفار به فضای پشت کله‌حفار یعنی محفظه چمبر وارد می‌شود. فنر موجود در پشت قطعه پلی اتیلن از سقوط جبهه‌کار در حین حفاری جلوگیری می‌کند. مجموعه شفت در داخل محفظه‌ای به طول ۷۵ سانتی متر و قطر ۱۵ سانتی متر عملیات حفاری را انجام می‌دهد (شکل ۴).

کله‌حفار دستگاه شبیه‌ساز *TBM* دانشگاه صنعتی سهند تبریز با مقطع دایره‌ای و با بازشدگی ۴۳ درصد ساخته شده است. بر روی کله حفار ۱۲ پین به صورت مارپیچی جاسازی شده است که در شعاع-های مختلف یک پین برای اندازه‌گیری میزان سایش وجود دارد. علاوه‌بر پین‌های موجود بر روی هر پره، محل‌هایی برای اضافه کردن مواد عمل آوری خاک وجود دارد که این امکان را فراهم می‌سازد در حین آزمایش به صورت مداوم با فشار تزریق مشخص این مواد به داخل محفظه تزریق شود. طول پین‌های استفاده شده در این مطالعه ۳ سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۵). وزن کردن پین‌ها با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام شده است.



شکل ۴- دستگاه شبیه‌ساز حفاری مکانیزه دانشگاه صنعتی سهند تبریز به همراه بخش‌های مختلف

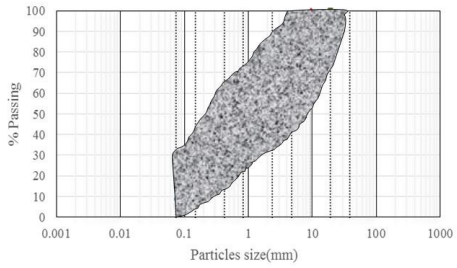


شکل ۵- کله‌حفار و ابزارهای برش در دستگاه شبیه‌ساز حفاری مکانیزه دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۴- روش آزمایش در دستگاه شبیه‌ساز حفاری صنعتی سهند تبریز

نمونه‌های استفاده شده در این مقاله از خط دو متروی تبریز می-باشند. نمونه‌های تهیه شده در محیط آزمایش رطوبت خود را از دست می‌دهند و در زمان انجام آزمایش بسته به شرایط آن به صورت خشک یا مرطوب به این صورت که با اضافه کردن مقدار مشخصی از آب به صورت مرطوب انجام می‌شود. دانه‌بندی‌های استفاده شده در

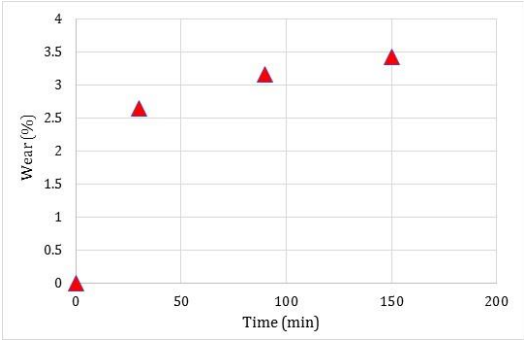
شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. در مجموع از سه نوع دانه بندی برای انجام آزمایش استفاده شده است. از خاک شماره سه برای انجام آزمایش‌های اولیه و بررسی تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک بر روی سایش استفاده شده است. همچنین از این آزمایش‌ها برای تعیین پارامترهای عملیاتی دستگاه استفاده شده است. مراحل آماده سازی خاک به این صورت می‌باشد که در ابتدا خاک دانه‌بندی شده و به مقدار رطوبت مورد نظر می‌رسد. سپس تا ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متری خاک در محفظه حفاری ریخته می‌شود، سپس کله‌حفار و قطعه پلی-اتیلن و فنر در داخل محفظه قرار می‌گیرد و درپوش محفظه بسته می‌شود. سپس محفظه به روی دستگاه نصب می‌شود و آزمایش با شرایط عملیاتی و ژئوتکنیکی مشخصی انجام می‌شود. لازم به ذکر است وزن کردن پین‌ها قبل و بعد از آزمایش انجام می‌شود.



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده

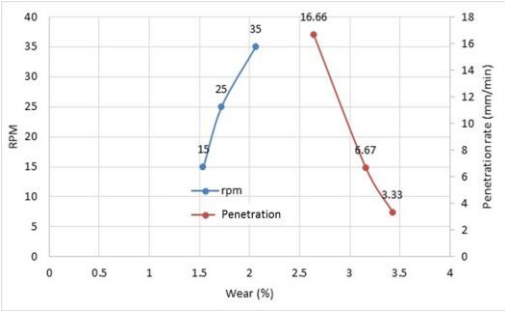
۵- نتایج اولیه آزمایشات دستگاه شبیه‌ساز حفاری صنعتی سهند تبریز

با توجه به لزوم بررسی و تعیین پارامترهای اولیه مورد نیاز (پارامترهای عملیاتی دستگاه) آزمایشی طراحی شد. به همین منظور در ابتدا آزمایش‌هایی با خاک شماره سه انجام شد. بدین صورت که مقدار مشخصی خاک دانه‌بندی با چگالی ۱/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و رطوبت ۱۰ درصد آماده‌سازی گردید. آزمایش‌ها در سه زمان ۳۰ و۹۰ و۱۵۰ دقیقه انجام گرفته است. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌گردد که میزان سایش‌ها در۱۵۰ دقیقه مقادیر بیشتر و قابل مقایسه‌ای دارند که به عنوان معیار برای آزمایش‌ها انتخاب شدند.



شکل ۷- مقدار سایش در زمان‌های مختلف

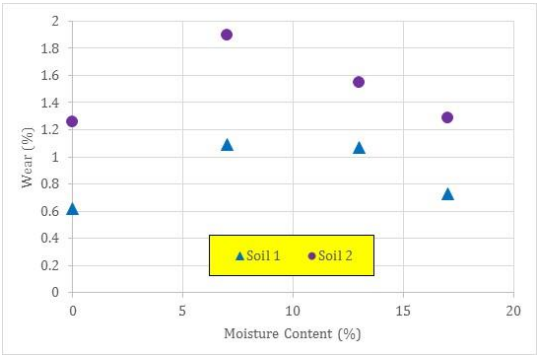
همچنین آزمایش‌هایی برای تعیین سرعت چرخش کله‌حفار انجام شد. برای این کار نیز آزمایش‌هایی با استفاده از خاک شماره ۳ با رطوبت ۱۰ و نرخ نفوذ ۳/۳۳ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت‌های چرخش ۱۵، ۲۵ و ۳۵ دور در دقیقه انجام شد که در نهایت سرعت ۳۵ دور در دقیقه به عنوان معیار برای آزمایش‌ها انتخاب شد (شکل ۸).



شکل ۸- مقدار سایش در سرعت و نرخ نفوذهای مختلف

برای تعیین درصد رطوبت نیز آزمایش‌هایی با درصد رطوبت ۰، ۷، ۱۳ و ۱۷ انجام شد. با توجه به پایین بودن مقادیر سایش پین‌ها رطوبت‌هایی که بیشترین مقدار سایش را داشته (۷ و ۱۳) برای آزمایش‌ها انتخاب شدند.

رطوبت خاک از جمله عوامل مؤثر در سایش ابزارهای برشی می‌باشد. مشاهدات انجام شده از پروژه‌های تونلسازی با *TBM* نشان می‌دهد که با افزایش درصد رطوبت خاک معمولاً (نه همیشه) درصد سایش ابزار برش در کله‌حفار افزایش پیدا می‌کند. ممکن است این افزایش در اثر چسبیدگی دانه‌های خاک (چسبیدگی ذرات ریز دانه به هم) و افزایش چسبندگی ظاهری خاک در اثر رطوبت باشد. برای بررسی تأثیر رطوبت بر روی میزان سایش و همچنین تعیین رطوبت‌های مورد نیاز برای این تحقیق، آزمایش‌هایی انجام شد. آزمایش‌ها بر روی خاک ۱ و ۲ در رطوبت‌های صفر، ۷، ۱۳ و ۱۷ انجام شد که نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹- مقدار سایش در رطوبت‌های مختلف

نتایج نشان می‌دهد که در خاک ۱، میزان سایش با افزایش رطوبت تا ۷ درصد افزایش می‌یابد. با افزایش رطوبت تا ۷ درصد، دانه‌های

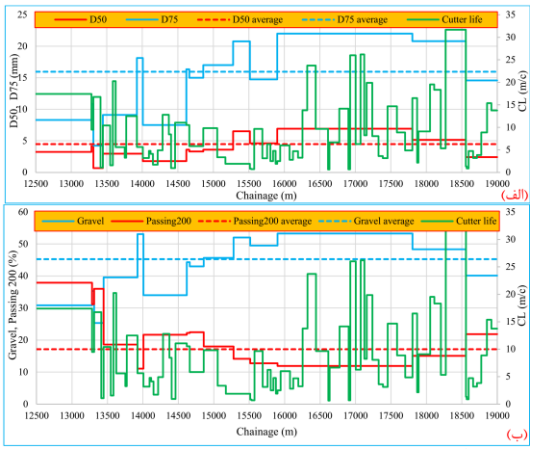
خاک به راحتی از پین‌های برشی جدا نمی‌شوند و درنتیجه سایش ابزارهای برشی افزایش می‌یابد؛ اما با افزایش درصد رطوبت همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین درصد سایش ابزارهای برشی کاهش پیدا کرده است. این کاهش تا رطوبت ۱۷ درصد ادامه پیدا کرده است. برای توجیه این کاهش می‌توان گفت، با افزایش رطوبت خاک (بیش از ۷ درصد) دانه‌ها در ساختار خاک بیشتر خاصیت متحرک بودن به خود می‌گیرند یا به عبارتی بهتر با نزدیک شدن به حالت اشباع، دانه‌های خاک توسط ذرات آب احاطه می‌شوند و موجب کاهش میزان سایش ابزار برشی می‌شود. روند تغییرات میانگین سایش در خاک ۲ نیز مشابه خاک ۱ می‌باشد. افزایش سایش در خاک ۲ تا رطوبت ۷ درصد ادامه پیدا کرده است و پس از آن روند نزولی (تا درصد اشباع خاک) ادامه داشته است.

در ادامه برای اثبات این موضوع که علاوه بر دانه‌بندی، پارامترهای دیگر و مهم‌تری تاثیرگذار بر روی سایش وجود دارد، شکل ۱۰ ارائه شده است.

برای بررسی تأثیر توزیع دانه‌بندی خاک بر روی سایش ابزار برشی، چند مفهوم و فاکتور باید معرفی شود. محیط‌های خاکی بر حسب اندازه دانه‌ها، معمولاً شن، ماسه، سیلت و رس نامیده می‌شوند. برای تشریح خاک‌ها، سازمان‌های مختلف حدود جدا کننده اندازه دانه‌های خاک معرفی کرده‌اند؛ بگونه‌ایی که چهار فاکتور مهم دانه‌بندی عبارت‌اند از *D50% (mm)*، *D75% (mm)*، درصد شن (*Gravel*) و درصد ریزدانه (*Passing 200*) که بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

- *D50%*: یعنی ۵۰ درصد دانه‌های خاک، قطری کم‌تر از این مقدار دارند. همچنین متوسط اندازه ذرات خاک نیز نامیده می‌شود؛
- *D75%*: یعنی ۷۵ درصد دانه‌های خاک، قطری کم‌تر از این مقدار دارند؛
- درصد شن: یعنی قسمتی که از الک ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) عبور کرده و روی الک ۴/۷۵ میلی‌متر (شماره ۴) باقی می‌ماند؛
- درصد ریزدانه: یعنی درصد عبوری از الک ۰/۰۷۵ میلی‌متر (شماره ۲۰۰). همچنین درصد سلیت و رس نیز نامیده می‌شود.

شکل ۱۰ تأثیر فاکتورهای دانه‌بندی را بر روی عمر ابزار برش نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر درصد شن، *D50%* و *D75%* از کیلومتراژ ۱۵+۲۷۹ تا ۱۹+۰۰۰ بیش از مقدار متوسط آنهاست که بالتبع مقادیر درصد ریزدانه برای این محدوده کمتر از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ می‌باشد. درحالی که عمر ابزار برش در کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ بیش‌تر از کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ می‌باشد.



شکل ۱۰- عمر ابزار برشی در دانه‌بندی‌های مختلف- پروژه خط ۷ مترو تهران

در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که تقریباً از کیلومتراژ ۱۵+۲۷۹ تا ۱۹+۰۰۰ خاک‌های دربرگیرنده تونل با افزایش درصد شن، مقادیر *D50%* و *D75%* و کاهش درصد ریزدانه‌های خاک، دانه درشت‌تر شده است؛ در حالی که عمر ابزار برشی از کیلومتراژ ۱۶+۲۵۴ تا ۱۹+۰۰۰ از مقادیر آن در کیلومتراژ ۱۲+۵۰۰ تا ۱۶+۲۵۴ افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که عمر ابزار برش علاوه بر فاکتورهای دانه‌بندی (به عبارت کلی‌تر فاکتورهای زمین‌شناسی)، به فاکتورهای راهبری ماشین نیز وابسته است که تأثیر بیش‌تری بر عمر ابزار برشی دارند.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از آزمایش های اولیه انجام شده توسط دستگاه شبیه ساز حفاری *TBM* نشان می دهد که دستگاه توانایی خوبی برای شبیه سازی روند حفاری *TBM* دارد. همچنین این دستگاه توانایی بررسی پارامتر های عملیاتی دستگاه مثل تأثیر سرعت چرخش کله حفار، میزان نرخ نفوذ ،گشتاور و مقدار بازشو کاترهد، پارامترهای عمل‌آوری مصالح و ... را بر روی سایش دارد. همچنین باتوجه به ساختار دستگاه امکان بررسی تأثیر خواص ژئوتکنیکی خاک نیز بر روی سایش وجود دارد. نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده توسط این دستگاه را می توان به شرح زیر بیان کرد؛

- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده، به منظور تعیین نرخ نفوذ آزمایش های اصلی ، مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ نفوذ میزان سایش ها کاهش می یابد، در حقیقت با افزایش زمان آزمایش ها تعداد دفعات درگیری دانه های خاک با پین ها بیشتر می شود که باعث افزایش سایش در پین می شود.
- بررسی های انجام شده به منظور تعیین سرعت چرخش کله حفار نشان می دهد که با افزایش سرعت چرخش کله حفار ، تغییرات سایش پین ها با شیب کمی افزایش می

یابد.

- با افزایش سرعت چرخش کله حفار پین ها در یک نرخ نفوذ ثابت، تعداد دفعات بیشتری با دانه های خاک درگیر می شوند و موجب افزایش میزان سایش می شود. البته سایش ابزار در سرعت های مختلف به شدت وابسته به دانه بندی خاک و نسبت مواد ریز دانه و درشت دانه می-باشد.
- آزمایش های انجام شده در رطوبت های صفر ،۷، ۱۳ و ۱۷ نشان می دهد که در خاک شماره یک و شماره دو با افزایش رطوبت تا رطوبتی مشخص میزان سایش ها افزایش می یابد و پس از آن با افزایش رطوبت، سایش کاهش می یابد. بررسی تأثیر رطوبت بر روی سایش نشان می دهد با نزدیک شدن رطوبت ساختار خاک به رطوبت بهینه در حالت متراکم، میزان سایش ها مقدار بالاتری دارند.

۷- منبع‌ها

[1] Alavi Gharahbagh, E., Rostami, J., Palomino, A.M., 2011. New soil abrasion testing method for soft ground tunneling applications. Tunn. Undergr. Space Technol. 26 (5), 604–613. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.04.003.

[2] Rostami, J., Alavi Gharahbagh, E., Palomino, A.M., Mosleh, M., 2012. Development of soil abrasivity testing for soft ground tunneling using shield machines. Tunnel. Undergr. Space Technol. J. 28, 245–256. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.11.007.

[3] Amoun, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., Rostami, J., Tarigh Azali, S., 2017. Evaluation of tool wear in EPB tunneling of Tehran Metro, Line 7 Expansion. Tunnelling and Underground Space Technology 61, 233–246. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.11.001.

[4] Amoun, S., Sharifzadeh, M., Shahriar, K., & Rostami, J., 2015. Soil abrasiveness for EPB-TBM along Tehran metro tunnel line 7, Iran. In SEE Tunnel: Promoting Tunnelling in South East European Region: 41st General Assembly and World Tunnel Congress of International Tunnelling and Underground Space Association ITA-AITES, May 22-28.

[5] Nilsen, B., Dahl, F., Raleigh, P., Holzhäuser, J., 2007. The new test methodology for estimating the abrasiveness of soils for TBM tunnelling. In: Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), pp. 104–106.

[6] Gwildis, U.G., Sass, I., Rostami, J., Gilbert, M.B., 2010. Soil Abrasion Effects on TBM Tunnelling. World Tunnelling Congress, Vancouver, Canada.

[7] Köhler, M., Maidl, U., Martak, L., 2011. Abrasiveness and tool wear in shield tunnelling in soil. Geomechanik und Tunnelbau 4 (February), 36–53. https://doi.org/10.1002/geot.201100002.

[8] Shinouda, M.M., Frank, G., hauser, G., 2009. Planning and preparation for tunneling at Brightwater West. In: Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference, Las Vegas, Nevada, June 2009.

[9] Moammeri, H., Tarigh Azali, S., 2010. Taking Abrasive Action. World Tunnelling, December 2010, pp. 24–27.

[10] Tarigh Azali, S., Moammeri, H., 2012. EPB-TBM tunneling in abrasive ground, Esfahan Metro Line 1. In: Phienwej, N., Boonyatee, T. (Eds.), ITA-AITES World Tunnel Congress (WTC), Bangkok, Thailand.

[11] Grødal, C., Equey, S., Armada, S., Espallargas, N., 2012. Effect of soil and rock composition on the wear process of cutter tool steel used in tunnel boring machines. In: Presented at the NordTrib Conference, Trondheim.

[12] LCPC, 1990. LCPC Abrasivemeter Standard. Normalisation Francaise, pp. 18–579.

[13] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, J., 2006b. Abrasivity testing for rock and soils. Tunnels Tunneling Int. (April), 47–49.

[14] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, P., 2006c. SAT: NTNU's new soil abrasion test. Tunnels Tunn. Int. (May), 43–45.

[15] Thuro, K., Singer, J., Käsling, H., Bauer, M., 2007. Determining abrasivity with the LCPC test. In: Proceedings of the 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium. May 2007, ARMA-07-103.

[16] Thuro, K., Käsling, H., 2009. Classification of the abrasiveness of soil and rock. Geomech. Tunnel. 2 (2), 179–188. https://doi.org/10.1002/geot.200900012.

[17] Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilsen, B., Grov, E., 2012. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method. Tunn. Undergr. Space Technol. 28, 150–158. https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.10.006.

[18] Alavi Gharahbagh, E., Rostami, J., Talebi, K., Ibarra, J., 2013. Experimental and practical study of impact of soil conditioning on soil abrasion and cutter wear of EPB TBMs. In: RETC Conference June 23–26, Washington, DC.

[19] Jakobsen, P.D., Langmaack, L., Dahl, F., Breivik, T., 2012. Predicting the abrasivity of in-situ like soils. Tunnels and Tunnelling International (June), 41–44.

[20] Jakobsen, P.D., Bruland, A., Dahl, F., 2013. Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT^{TM}) for determination of abrasiveness of soil and soft ground. Tunn. Undergr. Space Technol. 37, 107–114. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.04.003.

[21] Jakobsen, P.D., Lohne, J., 2013. Challenges of methods and approaches for estimating soil abrasivity in soft ground TBM tunnelling. Wear 308 (1–2), 166–173. https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.022.

[22] Barzegari, G., Uromeihy, A., Zhao, J., 2013. A newly developed soil abrasion testing method for tunnelling using shield machines. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol. Volume 46, P 63-74. https://doi.org/10.1144/qjegh2012-039.

[23] Oñate Salazar, C.G., Todaro, C., Bosio, F., Bassini, E., Ugues, D., Peila, D., 2018. A new test device for the study of metal wear in conditioned granular soil used in EPB shield tunneling. Tunnelling and Underground Space Technology 73, 212–221. https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.12.014.

[24] Nilsen, B., Dahl, F., Holzhäuser, J., Raleigh, J., 2006a. Abrasivity of soils in TBM tunnelling. Tunnels Tunneling Int. (March), 36–38.

[25] Thuro, K. Plinninger, R. 2007. Determining abrasivity with the LCPC test. Proceedings of the 1st Canada – U.S. Rock Mechanics Symposium, p. 8. https://doi.org/10.1201/NOE0415444019-c103

[26] Alavi Gharahbagh, E., Rostami, J., Talebi, K., 2014. Experimental study of the effect of conditioning on abrasive wear and torque requirement of full face tunneling machines. Tunn. Undergr. Space Technol. 41, 127–136. https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.003.

[27] Kupferle, J., Rottger, A., Theisen, W., Alber, M., 2016. The RUB Tunneling Device–A newly developed test method to analyze and determine the wear of excavation tools in soils. Tunneling and Underground Space Technology, pp. 1-6. https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.006.

[28] Wei, Y., yang, Y., Tao, M., 2018. Effects of gravel content and particle size on abrasivity of sandy gravel mixtures. Engineering geology, pp. 26-35. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.06.009.

[29] Wei, Y., Zheng, X., Su, F., Li, M., Li, F., Yang, U., 2018. Evaluating of cutting tool wear of earth pressure balance shield in granular soil based on laboratory test. Testing and evaluation, pp. 927-941. https://doi.org/10.1520/JTE20180402.

[30] Wei, Y., Yang, U., Tao, M., Wang, D., Jie, Y., 2020. Earth pressure balance shield tunnel in sandy gravel deposits: a case study of applications of soil conditioning. Bulletin of Engineering Geology and the Environment volume 79, pp. 5013–5030 (2020). https://doi.org/10.1007/s10064-020-01856-1.

[31] Wei, Y., yang, Y., Qiu, T., 2021. Effects of Soil Conditioning on Tool Wear for Earth Pressure Balance Shield Tunneling in Sandy Gravel Based on Laboratory Test. Journal of Testing and Evaluation, July 19. https://doi.org/10.1520/JTE20180851.

[32] Wei, Y., Wang, D., Li, J., Jie, Y., 2020. Eects of Soil Conditioning on Characteristics of a Clay-Sand-Gravel Mixed Soil Based on Laboratory Test. May 9. Appl. Sci., 10, 3300. https://doi.org/10.3390/app10093300.