

پایش نرمه؛ رویکردی نوین برای ارزیابی عملکرد تیغه‌های دیسکی در برش سنگ

محمد ایزدشناس^۱؛ جعفر خادمی حمیدی^{۲*}؛ هادی صبوری^۳

۱- دانش‌آموخته مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه خوارزمی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

تجزیه و تحلیل توزیع اندازه تراشه حفاری یکی از رویکردهای ارزیابی کارایی برش و تیغه‌های به‌کاررفته در ماشین‌های حفاری مکانیکی است. در این مطالعه، رویکردی نوین به‌منظور ارزیابی عملکرد تیغه‌های دیسکی در مقیاس آزمایشگاهی ارائه و در آن به پایش نرمه تولیدشده در اثر فرایند برش سنگ پرداخته شد. از این‌رو مجموعه‌ای از آزمون‌های برش سنگ با ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی با دو نوع تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت روی نمونه سنگ گچ انجام شد. تراشه‌های برش برای هر تیغه جمع‌آوری، توزین و به‌وسیله شش الک با ابعاد ۴، ۸، ۱۶، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مش آنالیز سرندی شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق نفوذ در حالت برش منفرد مقدار نرمه تولیدشده کاهش می‌یابد و تیغه دیسکی مقطع ثابت نسبت به تیغه دیسکی V شکل نرمه کمتری تولید می‌کند. با محاسبه انرژی مصرفی در تولید نرمه مشخص شد که کمترین انرژی صرف شده در تولید نرمه برای هر دو تیغه دیسکی در نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ ۵ به دست می‌آید و مقدار آن برای تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت به ترتیب برابر ۱/۹ و ۱/۳ مگاژول بر مترمکعب است. در پایان مشخص شد که تیغه دیسکی مقطع ثابت به دلیل صرف انرژی کمتر در تولید نرمه نسبت به تیغه دیسکی V شکل عملکرد مؤثرتری دارد.

واژگان کلیدی: حفاری مکانیزه، برش‌پذیری سنگ، آنالیز سرندی، انرژی ویژه، آزمون برش خطی

۱- مقدمه

توجه به هزینه سرمایه‌ای زیاد تهیه ماشین‌های حفاری مکانیکی نظیر ماشین حفر تمام مقطع تونل (TBM)، ماشین حفر بازویی و ماشین حفر دوپل اهمیت ایجاد مراکز تحقیق و توسعه را به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند برش سنگ به وجود آورده است. از این‌رو تعدادی مراکز تحقیقاتی در دانشگاه‌های معتبر کشورهای صاحب سبک و پیشرو در تونل‌سازی به روش مکانیزه نظیر آمریکا، نروژ، چین، ترکیه و ایتالیا از اواخر دهه ۵۰ میلادی تشکیل شده است. در ایران نیز با توجه به رشد صنعت حفاری مکانیزه در کشور، این نیاز

امروزه کاربرد فضاهای زیرزمینی با توجه به نیازهایی که در حوزه‌های انتقال انرژی و حمل‌ونقل برای جوامع تأمین می‌کند بیش‌ازپیش شده است. نرخ پیشروی سریع، ایمنی و عدم نیاز به نیروی انسانی زیاد با توجه به امکان مکانیزه شدن عملیات حفاری، روش حفاری مکانیکی را در مقایسه با روش چالزنی و انفجار در تأمین اهداف یادشده با رشد، پیشرفت و مقبولیت بیشتری برای مهندسان، مدیران و کارفرمایان پروژه‌ها روبه‌رو کرده است. این افزایش تقاضا، با

*نویسنده مسئول: دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

پست الکترونیک: jafarkhademi@modares.ac.ir

هم میدانی مطالعه شده است. در پیشینه تحقیق پارامترهای مختلفی به منظور توصیف و توزیع ابعاد تراشه در حفاری سنگ استفاده شده است. متداول‌ترین پارامترها شامل شاخص درشتی (CI)، ثابت اندازه مطلق، میانه قطر ذرات (d_{50}) و ضریب یکنواختی است که تحقیقاتی در این زمینه توسط راکسبورو و رسپین [۵]، مک-فیت اسمیت و فاول [۶]، بیلگین [۷]، آلتینداگ [۸]، تونچدمیر و همکاران [۹]، ابوبکر و گرتش [۱۰]، ابوبکر [۱۱] و جئونگ و جئون [۳] انجام شده است. همچنین روابط بین پارامترهای توزیع دانه‌بندی تراشه، انرژی ویژه و نیروی برش به‌طور گسترده توسط محققانی چون برولند [۱۲]، رستمی و همکاران [۱۳]، آلتینداگ [۸]، قهرمان [۱۴]، فرخ و رستمی [۱۵] و حیدری و همکاران [۱۶] مورد بررسی قرار گرفته است.

تولید نرمه در فرایند برش سنگ همواره به‌عنوان یک عامل منفی شناخته می‌شود که مشکلات عدیده‌ای را در حفاری نظیر گیر افتادن و کمک به سایش تیغه‌ها و ایجاد گردوغبار به وجود می‌آورد. بنابراین علاوه بر طراحی و نحوه قرارگیری تیغه‌ها کنار هم در حالتی که کمترین انرژی را صرف حفر سنگ کند (انرژی ویژه بهینه)، عدم تولید زیاد نرمه بنا به دلایل یادشده در بالا حائز اهمیت خواهد بود.

با بررسی سابقه موضوع آنچه به دست می‌آید خلأ بررسی نقش نرمه تولیدشده بر کارایی برش و عملکرد تیغه است که در این مطالعه عملکرد دو تیغه V شکل و مقطع ثابت از منظر تولید نرمه با انجام مجموعه‌ای از آزمون‌های برش روی نمونه سنگ گچ به‌وسیله ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی بررسی می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تیغه‌های دیسکی

به‌منظور انجام آزمون‌های برش سنگ با LCM کوچک‌مقیاس، از تیغه‌های دیسکی مقطع ثابت و V شکل با شعاع لبه ۱ میلی‌متر، قطر ۵۴ میلی‌متر و مقیاس ۱:۸ دیسک ۱۷ اینچی (۴۳۲ میلی‌متر) که طرح کلی آن در شکل ۱ آمده است استفاده شد. این تیغه‌ها که قابلیت نصب به‌وسیله یک نگهدارنده با اتصالات جداولی روی LCM کوچک‌مقیاس را دارد، از جنس فولاد ابزار گرم کار $H13$ ساخته شده و سختی آن با انجام عملیات حرارتی به 54 ± 2

احساس و مرکز تحقیقاتی و آزمایشگاه حفاری مکانیزه (MEL) در دانشگاه تربیت مدرس در سال ۱۳۹۵ تأسیس شد.

انجام آزمون‌های آزمایشگاهی برش سنگ با امکان ایجاد و بررسی طیف وسیعی از تحلیل حساسیت‌ها در هندسه برش و تیغه، نقش بسزایی در ارزیابی و بهبود عملکرد برش سنگ ایفا می‌کند. ماشین برش خطی (LCM) از جمله ابزار و تجهیزات آزمایشگاهی است که بررسی اندرکنش سنگ و تیغه را در مقیاس‌های آزمایشگاهی کوچک و بزرگ فراهم می‌کند. در آزمون کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ از تیغه‌های مقیاس شده و شاخص و نمونه‌سنگ‌های مغزه و بلوکی کوچک و در آزمون بزرگ‌مقیاس از تیغه‌های واقعی و نمونه‌های بلوکی بزرگ با ابعاد بیش از $5/0$ مترمکعب استفاده می‌شود. با اینکه آزمون بزرگ‌مقیاس نزدیک‌ترین آزمون آزمایشگاهی در شبیه‌سازی فرایند برش سنگ با ماشین‌های حفاری مکانیکی است اما تهیه نمونه‌های بلوکی بزرگ و هزینه سرمایه‌ای زیاد آن سبب شده تا آزمون کوچک‌مقیاس به‌عنوان جایگزینی برای آن در نظر گرفته شود.

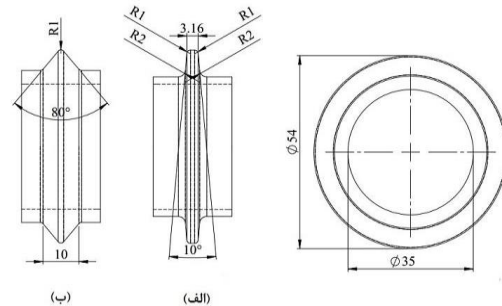
رویکردهای مختلفی برای توصیف قابلیت برش سنگ و ارزیابی عملکرد تیغه‌ها وجود دارد که می‌توان به نیروهای برش، انرژی ویژه، نرخ سایش و آنالیز سرندی تراشه (خرده)‌های برش اشاره کرد. اثربخشی برش سنگ معمولاً با پارامترهای خروجی از جمله کیفیت هندسی تراشه‌های حفاری تعیین می‌شود. دلیل این امر آن است که برای هر نسبت مشخصی از فاصله‌داری به عمق نفوذ (s/p)، ویژگی‌های خاصی از تراشه قابل‌دستیابی است [۱]. بررسی مشاهده‌ای تراشه‌های برش سنگ نشان می‌دهد که ابعاد آن بسته به شرایط برش، متفاوت است [۲]. توزیع اندازه تراشه حفاری همچنین در هنگام استفاده آن‌ها به‌عنوان سنگ‌دانه‌ها و طراحی امکانات پشتیبان دستگاه‌های حفاری مورد نیاز است. علاوه بر این، تعیین اندازه بهینه تراشه‌ها در ارزیابی کارایی برش ماشین حفاری مکانیکی و تولید در معدن و همچنین در کنترل و به حداقل رساندن هزینه کلی تولید اهمیت دارد [۳، ۴].

بررسی اندازه تراشه‌های سنگ تولیدشده در حفر مکانیکی با تیغه‌های مختلف هم در مقیاس آزمایشگاهی و

بعد از برش منفرد و گروهی نشان می دهد.



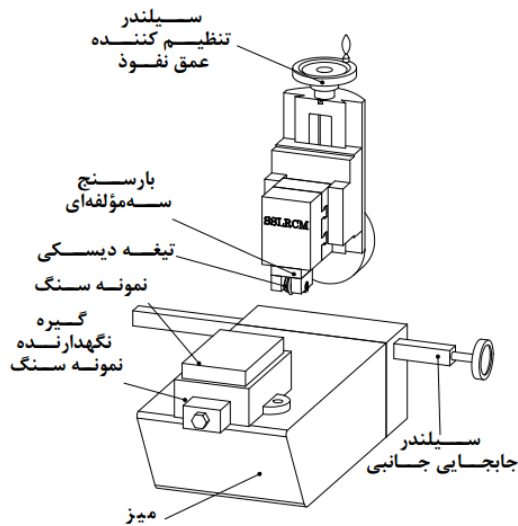
راکول (HRC) رسیده است [۱۷، ۱۸].



شکل ۱- طرح تیغه های دیسکی در آزمون کوچک مقیاس (الف) مقطع ثابت (ب) شکل V (ابعاد به میلی متر)

۲-۲- تیغه های دیسکی

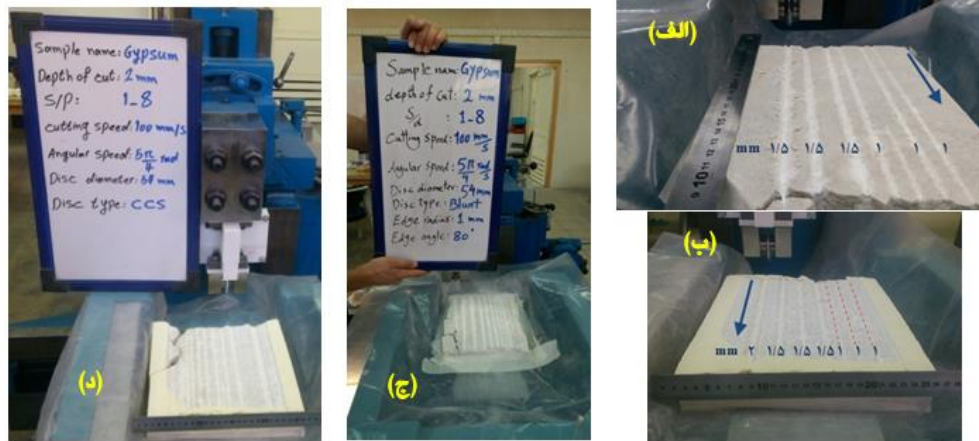
LCM کوچک مقیاس ساخت آزمایشگاه حفاری مکانیزه دانشگاه تربیت مدرس که مجهز به تیغه دیسکی است، توانایی ثبت و اندازه گیری نیروهای برش در سه راستای عمودی، برشی و کناری را دارد [۱۷، ۱۹، ۲۰]. اجزای این ماشین که تصویر آن در شکل ۲ نشان داده شده شامل سیلندر تنظیم کننده عمق نفوذ، سیلندر جابجایی جانبی به منظور ایجاد فاصله داری برش، جعبه قرارگیری نمونه سنگ، دینامومتر سه مؤلفه ای به منظور ثبت نیروهای برش و سیستم ثبت داده با نرخ داده برداری ۵۰۰ هرتز است. به منظور انجام آزمون کوچک مقیاس از نمونه سنگ گچ منطقه گرمسار که خواص فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۱ آمده است استفاده و به صورت بلوک با ابعاد $200 \times 200 \times 100$ میلی متر مکعب آماده سازی شد. پس از قراردادن نمونه سنگ در جعبه نگهدارنده ماشین و قبل از انجام آزمون، درستی کالیبراسیون تیغه دیسکی و دینامومتر مورد بررسی قرار گرفت. در طرح آزمایش، سه عمق نفوذ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر برای حالت برش منفرد و عمق نفوذ ۲ میلی متر برای حالت برش گروهی با دو تیغه دیسکی V شکل با شعاع لبه ۱ میلی متر و مقطع ثابت لحاظ شد. سرعت خطی LCM کوچک مقیاس روی ۱۰۰ میلی متر بر ثانیه و سرعت زاویه ای تیغه دیسکی برابر $5\pi/4$ رادیان بر ثانیه برای انجام آزمون برش خطی تنظیم و برای هر عمق، سه تکرار به منظور کاهش خطا انجام شد. شکل ۳ نمونه سنگ گچ را



شکل ۲- اجزای LCM کوچک مقیاس تجهیز شده به تیغه دیسکی دانشگاه تربیت مدرس [۱۷]

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سنگ گچ [۱۷]

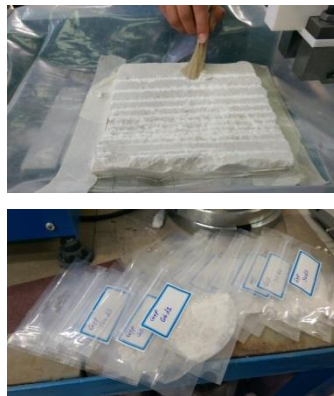
مقدار	ویژگی (واحد اندازه گیری)
10.3 ± 2.8	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
2.4 ± 0.5	مقاومت کششی برزیلی (MPa)
۲/۴۱	مدول الاستیسیته (GPa)
۰/۳۹	نسبت پواسون
۲۳۱۰	چگالی (kg/m^3)
۱/۸۷	شاخص سایندگی سرشار (۰/۱ میلی متر)



شکل ۳- آزمون کوچک مقیاس برش خطی سنگ گچ (الف) برش منفرد تیغه دیسکی V شکل (ب) برش منفرد تیغه دیسکی مقطع ثابت (ج) برش گروهی تیغه دیسکی V شکل (د) برش گروهی تیغه دیسکی مقطع ثابت

۳-۲- آنالیز سرنندی

با جمع‌آوری و توزین تراشه‌ها و همچنین در دست داشتن مقادیر نیروی غلتشی، مقدار انرژی ویژه برای هرکدام از تیغه‌ها در حالت‌های برش منفرد و گروهی محاسبه شد. در گام بعدی به منظور آنالیز سرنندی تراشه‌ها با هدف ارزیابی کارایی برش و تیغه‌های دیسکی، از مجموعه الک‌های چشمه مربعی با ابعاد ۴، ۸، ۱۶، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ مش مطابق شکل ۴ استفاده شد. در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب نمونه‌ای از تراشه‌های دانه‌بندی شده برای تیغه دیسکی مقطع ثابت و نمودار توزیع دانه‌بندی برای هر دو نوع تیغه دیسکی در حالت برش منفرد به‌ازای عمق‌های نفوذ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴- (الف) جمع‌آوری (ب) توزین و (ج) آنالیز سرنندی تراشه‌های برش

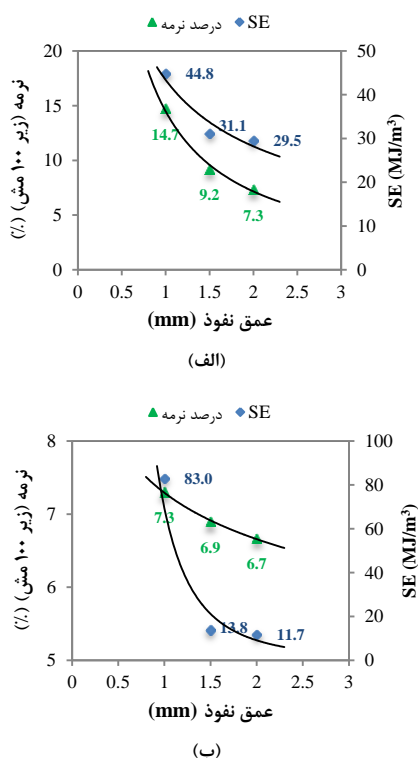
۳- ارزیابی عملکرد تیغه‌های دیسکی

روش‌های مختلفی برای توصیف برش‌پذیری سنگ و ارزیابی عملکرد تیغه‌ها وجود دارد. یکی از شناخته‌شده‌ترین آن، انرژی ویژه برش سنگ است که از تقسیم نیروی برش بر واحد حجم یا وزن سنگ حفرشده به دست می‌آید. در این مطالعه ضمن ارزیابی عملکرد تیغه‌ها و کارایی برش سنگ با انرژی ویژه، از درصد نرمه تولیدشده در فرایند برش سنگ به‌عنوان رویکردی جدید استفاده می‌شود.

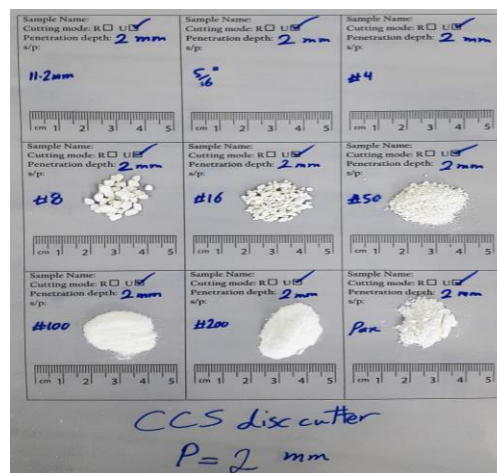
همین اساس تراشه‌های عبوری از الک شماره ۱۰۰ مش (۱۵۰ میکرون) به‌عنوان ریزدانه و یا به‌عبارتی دیگر به‌عنوان نرمه در نظر گرفته شد.

۳-۱- حالت برش منفرد

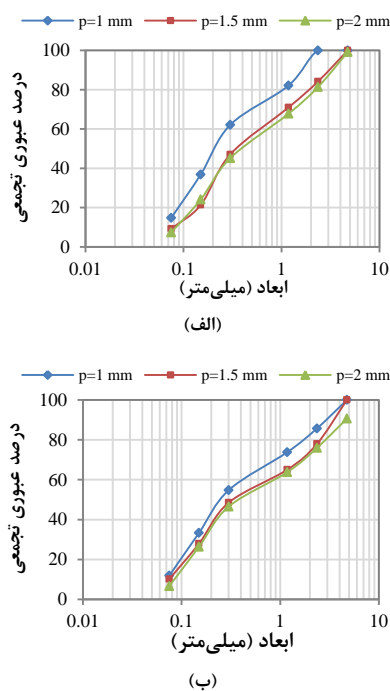
مطابق شکل ۷ مشخص شد که با افزایش عمق نفوذ مشابه انرژی ویژه، مقدار درصد تولید نرمه کاهش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار این شکل مشخص است، میزان تولید نرمه به ازای عمق‌های نفوذ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در حالت برش منفرد برای تیغه دیسکی V شکل به ترتیب ۱۴/۷، ۹/۲ و ۷/۳ درصد و برای تیغه دیسکی مقطع ثابت به ترتیب برابر ۷/۳، ۶/۹ و ۶/۷ درصد وزنی تراشه‌های برش است. انرژی ویژه در عمق نفوذ ۲ میلی‌متر برای تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت به ترتیب برابر ۲۹/۵ و ۱۱/۷ مگاژول بر مترمکعب حاصل شده است. بنابراین در حالت برش منفرد، تیغه دیسکی مقطع ثابت نسبت به تیغه دیسکی V شکل علاوه بر صرف انرژی ویژه کمتر، به دلیل تولید نرمه کمتر، کارایی بیشتری دارد.



شکل ۷- انرژی ویژه و درصد تولید نرمه در حالت برش منفرد با تیغه دیسکی (الف) V شکل (ب) مقطع ثابت



شکل ۵- نمونه‌ای از تراشه‌های دانه‌بندی شده برای تیغه دیسکی مقطع ثابت در حالت برش منفرد تراشه‌های برش

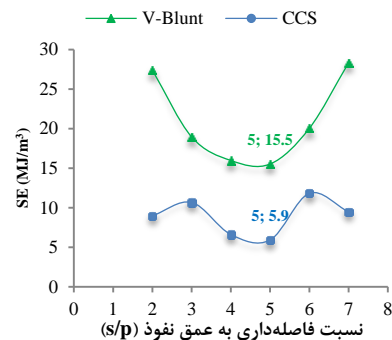


شکل ۶- توزیع دانه‌بندی تراشه‌های سنگ در حالت برش منفرد با تیغه دیسکی (الف) V شکل (ب) مقطع ثابت

تعاریف و استانداردهای متفاوتی برای طبقه‌بندی خاک و سنگ برحسب ابعاد دانه‌های تشکیل‌دهنده آن وجود دارد. در استاندارد ISO 14688-1:2002 [۲۱] ذرات دارای ابعاد زیر ۰/۰۶۳ میلی‌متر در طبقه ریزدانه قرار می‌گیرند. بر

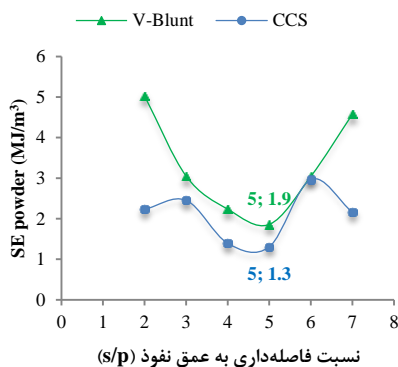
۳-۲- حالت برش منفرد

شکل ۸-الف و ب به ترتیب نمودار انرژی ویژه و درصد تولید نرمه برحسب نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ را برای دو نوع تیغه دیسکی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸-ب آمده، کمترین مقدار تولید نرمه برای تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت به ترتیب در نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ ۵ و ۴ برابر ۱۲/۰ و ۲۱/۰ درصد وزنی تراشه‌های برش حاصل شده است. به عبارتی تیغه دیسکی مقطع ثابت در حالت برش گروهی ۱/۸ برابر تیغه V شکل نرمه تولید می‌کند که علت آن را می‌توان به اثر توأمان برهم‌نهی برش‌های گروهی و سطح مقطع مسطح آن نسبت به تیغه دیسکی V شکل دانست. بنابراین تیغه دیسکی V شکل در برش سنگ گچ نسبت به تیغه دیسکی مقطع ثابت از منظر تولید نرمه کمتر عملکرد مؤثرتری دارد.

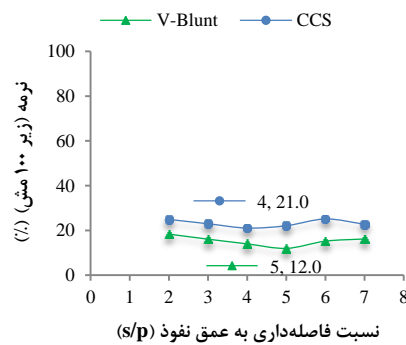


(الف)

از سوی دیگر مطابق شکل ۸-الف کمترین مقدار انرژی ویژه (انرژی ویژه بهینه) برای هر دو نوع تیغه در نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ ۵ حاصل شده که مقدار آن به ترتیب برابر ۱۵/۵ و ۵/۹ مگاژول بر مترمکعب است. به عبارتی دیگر، تیغه دیسکی مقطع ثابت نرمه بیشتر تولید و در مقابل انرژی ویژه کمتری نسبت به تیغه دیسکی V شکل در برش سنگ گچ مصرف می‌کند و این بدان معناست که با رویکرد انرژی ویژه، تیغه دیسکی مقطع ثابت عملکرد مؤثرتری نسبت به تیغه دیسکی V شکل دارد. به‌منظور ارزیابی صحیح عملکرد تیغه‌های دیسکی به کمک نرمه تولیدشده، حاصل‌ضرب درصد وزنی نرمه تولیدشده در مقدار انرژی ویژه مصرفی به ازای نسبت‌های فاصله‌داری به عمق نفوذ مختلف محاسبه شد تا انرژی صرف شده در تولید نرمه (ریزدانه) از درشت‌دانه تفکیک شود. همان‌طور که در نمودار شکل ۹ نشان داده شده است، کمترین انرژی صرف شده در تولید نرمه برای هر دو تیغه دیسکی در نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ ۵ به دست می‌آید و مقدار آن برای تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت به ترتیب برابر ۱/۹ و ۱/۳ مگاژول بر مترمکعب است. بنابراین از تلفیق دو رویکرد انرژی ویژه و استنباط کرد که تیغه دیسکی مقطع ثابت به دلیل صرف ۲۹/۷ درصد انرژی کمتر در تولید نرمه نسبت به تیغه دیسکی V شکل عملکرد مؤثرتری دارد.



شکل ۹- انرژی ویژه مصرفی در تولید نرمه برای هر دو نوع دیسکی



(ب)

شکل ۸- (الف) انرژی ویژه و (ب) درصد تولید نرمه در حالت برش گروهی برای هر دو نوع تیغه دیسکی

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهاد

فاصله‌داری به عمق نفوذ ۵ به ترتیب برابر با ۱۵/۵ و ۵/۹ مگاژول بر مترمکعب حاصل می‌شود. با حاصل‌ضرب درصد نرمه تولیدشده در مقدار انرژی ویژه، انرژی صرف شده در تولید نرمه برای هر دو نوع تیغه به دست آمد. نتایج نشان داد که تیغه دیسکی مقطع ثابت به دلیل صرف ۲۹/۷ درصد انرژی کمتر نسبت به تیغه V شکل در تولید نرمه از کارایی بیشتری در برش سنگ گچ برخوردار است. در ادامه پیشنهاد می‌شود رویکرد پایش نرمه تولیدشده برای ارزیابی عملکرد تیغه‌های دیسکی روی نمونه سنگ‌های بیشتر انجام و با نتایج این تحقیق مقایسه شود.

۵- سپاس‌گزاری

مطالعه حاضر در راستای پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول انجام شده است. علاقه‌مندان می‌توانند به‌منظور کسب اطلاعات تکمیلی به منبع [۱۷] و کتابخانه دانشگاه تربیت مدرس مراجعه نمایند. نویسندگان مقاله لازم می‌دانند از زحمات آقای مهندس فرشید نظمی و خانم مهندس عاطفه اسمعیلی لیما در فرایند تحلیل سرنده‌های برش و همفکری و مشاوره برای به سرانجام رسیدن این تحقیق، تقدیر و تشکر نمایند.

تولید نرمه در فرایند برش سنگ سبب ایجاد مشکلاتی نظیر گیر افتادن تیغه‌ها، ایجاد گردوغبار و تهویه می‌شود که می‌توان از آن به‌عنوان شاخصی در ارزیابی کارایی برش و تیغه‌ها بهره برد. از این‌رو مجموعه‌ای از آزمون‌های برش با دو نوع تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت در حالات منفرد و گروهی به‌وسیله ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی روی نمونه سنگ گچ با هدف ارزیابی عملکرد تیغه‌های دیسکی به کمک پایش نرمه تولیدشده انجام شد. سه عمق نفوذ ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در حالت برش منفرد و در حالت برش گروهی عمق نفوذ ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از انجام آزمون کوچک‌مقیاس برش خطی، تراشه‌های حاصل از برش هرکدام از تیغه‌ها جمع‌آوری، توزین و آنالیز سرنده‌ی روی آن‌ها انجام شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش عمق نفوذ مقدار نرمه تولیدشده برای هر دو نوع تیغه دیسکی در حالت برش منفرد همانند انرژی ویژه کاهش می‌یابد که این مقادیر برای تیغه دیسکی مقطع ثابت کمتر است و در نتیجه این تیغه عملکرد مؤثرتری در برش سنگ گچ دارد. در حالت برش گروهی نیز مقادیر نرمه تولیدشده و انرژی ویژه برای هر دو نوع تیغه محاسبه شد. نتایج نشان داد که کمترین نرمه تولیدشده برای تیغه دیسکی V شکل و مقطع ثابت در نسبت فاصله‌داری به عمق نفوذ به ترتیب ۵ و ۴ و برابر با ۱۲/۰ و ۲۱/۰ درصد و انرژی ویژه بهینه برای هر دو تیغه در نسبت

۶- منابع‌ها

[5] Roxborough F., Rispin A. A laboratory investigation into the application of picks for mechanized tunnel boring in the lower chalk. *The mining engineer*. 1973;133(1):13.

[6] McFeat-Smith I., Fowell R., editors. Correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines. *Conference on Rock Engineering*; 1977: PB Attewell.

[7] Bilgin N. *Investigations into the mechanical cutting characteristics of some medium and high strength rocks*: University of Newcastle; 1977.

[8] Altındağ R. Estimation of penetration rate in percussive drilling by means of coarseness index and mean particle size. *Rock mechanics and rock engineering*. 2003;36(4):323-32.

[9] Tuncdemir H., Bilgin N., Copur H., Balci C. Control of rock cutting efficiency by muck size. *International journal of rock mechanics and*

[1] Gertsch R. E. *Rock toughness and disc cutting*: University of Missouri-Rolla; 2000.

[2] Liu X., Liu S., Ji H. Mechanism of rock breaking by pick assisted with water jet of different modes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015;29(12):5359-68.

[3] Jeong H.-Y., Jeon S. Characteristic of size distribution of rock chip produced by rock cutting with a pick cutter. *Geomechanics and Engineering*. 2018;15(3):811-22.

[4] Meddah M. S., Zitouni S., Belâabes S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2010;24(4):505-12.

- operational parameters: A case study in Golab II water transfer tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019;88:73-86.
- [17] ایزدشناس م. طراحی و ساخت تیغه‌ی دیسکی برای استفاده [17] در ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن-استخراج، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۹۷.
- [18] ایزدشناس م.، خادمی‌حمیدی ج.، صبوری ه. توسعه دامنه [18] کاربرد ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ در صنعت حفاری مکانیزه با طراحی و ساخت تیغه دیسکی. سیزدهمین کنفرانس تونل ایران؛ . تهران، هتل المپیک، ۱۳۹۸.
- [19] علی‌مدد س. ارزیابی قابلیت برش سنگ در مقیاس [19] آزمایشگاهی. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن-استخراج، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۹۵.
- [20] رستمی ک. توسعه یک اندیس آزمایشگاهی نوین برای [20] ارزیابی برش‌پذیری سنگ. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی معدن-استخراج، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۹۶.
- [21] ISO E. 14688-1: 2002: Geotechnical investigation and testing-Identification and classification of soil-Part 1: Identification and description. *Comité Européen de Normalisation Brussels*. 2002.
- mining sciences (1997)*. 2008;45(2):278-88.
- [10] Abu Bakar M., Gertsch L. Disc cutting tests on dry and saturated sandstone: muck as a performance estimator. 2012.
- [11] Abu Bakar M. *Saturation effects on mechanical excavatability of Roubidoux Sandstone under selected rock cutting tools*. Missouri: Missouri University of Science and Technology; 2012.
- [12] Bruland A. *Hard rock performance data and back-mapping*. Hard rock tunnel boring: NTNU, Department of Building and Construction Engineering; 2000.
- [13] Rostami J., Gertsch R., Gertsch L. Rock fragmentation by disc cutter: a critical review and an update. *Proceedings of North American rock mechanics symposium (NARMS'02)*, Toronto, Ontario 2002.
- [14] Kahraman S., Develi K., Yasar E. Predicting the penetration rate of percussive blasthole drills using coarseness index and median particle size. *CIM Bulletin*. 2004;97(1083):75.
- [15] Farrokh E., Rostami J. Correlation of tunnel convergence with TBM operational parameters and chip size in the Ghomroud tunnel, Iran. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2008;23(6):700-10.
- [16] Heydari S., Hamidi J. K., Monjezi M., Eftekhari A. An investigation of the relationship between muck geometry, TBM performance, and