

ارزیابی برش‌پذیری ماسه‌سنگ قرمز فوقانی با استفاده از آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس

سجاد علی مدد^۱، جعفر خادمی حمیدی^{۲*}، کورش شهریار^۳، مهدی محمدی حسین آبادی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، sajad.alimadad@modares.ac.ir

^۲ استادیار گروه استخراج معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، jafarkhademi@modares.ac.ir

^۳ استاد دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، k.shahriar@aut.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، mehdi.mohamadi@modares.ac.ir

(دریافت ۲۲ خرداد ۱۳۹۶، پذیرش ۶ اسفند ۱۳۹۶)

چکیده

طراحی و انتخاب ماشین مناسب و پیش‌بینی عملکرد آن برای برنامه‌ریزی و تخمین هزینه‌های پروژه در استخراج مکانیکی و حفر مکانیزه تونل‌ها ضروری است. ارزیابی برش‌پذیری سنگ در روش‌های حفر مکانیزه شامل بررسی رفتار سنگ و اندرکنش آن با تیغه است و انجام آزمون‌های برش در مقیاس آزمایشگاهی، مطمئن‌ترین راه برای ارزیابی دقیق رفتار سنگ و تیغه در شرایط نزدیک به محیط واقعی است. در این مطالعه، از آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس برای ارزیابی برش‌پذیری سنگ و ارتباط آن با پارامترهای مکانیکی سنگ استفاده شده است. بدین منظور، نمونه‌هایی از ماسه‌سنگ قرمز بالای قم انتخاب شده و همزمان آزمون‌های استاندارد برای شناسایی نوع سنگ و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی آن انجام شده است. نتایج آزمون‌های برش خطی کوچک‌مقیاس نشان می‌دهد نیرو و انرژی ویژه برش به ترتیب یک رابطه خطی مستقیم و یک رابطه غیرخطی با عمق برش دارد. همچنین، سرعت برش رابطه معنی‌داری با نیرو و انرژی ویژه ندارد. علاوه بر این، نیروهای حاصل از آزمون برش خطی با نتایج مدل ایوانس مقایسه شد. مقایسه نتایج، تطابق خوب روش آزمایشگاهی با مدل نظری را نشان داد. با وجود این، آزمون‌های بیشتری برای دریافت نتایج دقیق‌تر و ارایه یک مدل جدید برش‌پذیری سنگ در حال انجام است.

کلمات کلیدی

آزمون برش سنگ، نیروهای برش، انرژی ویژه برش

۱- مقدمه

کوچک‌مقیاس روی ماسه‌سنگ به نتایج مشابه دست یافتند [۱۰]. فیلیپس^۸ نیز در بررسی اثر سرعت برش روی نیروی برش مشاهده کرد رابطه‌ی معناداری بین این دو پارامتر وجود ندارد [۱۱].

در این پژوهش قابلیت برش سنگ در روش‌های حفر مکانیزه با استفاده از آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس ارزیابی می‌شود. این آزمون که به تازگی و برای اولین بار در کشور ساخته شده است [۱۲]، زمینه انجام مطالعات بنیادی و کاربردی برش‌پذیری سنگ را فراهم می‌سازد. در این مطالعه، نمونه‌های ماسه‌سنگ برای انجام آزمون‌های برش سنگ انتخاب و ارتباط نیروهای برش و انرژی ویژه با برخی از پارامترهای موثر بررسی می‌شود.

۲- تئوری مقاله و روش کار

۲-۱- برش‌پذیری سنگ و مدل‌های ارزیابی

در حفاری مکانیزه و به عبارتی دیگر در آن دسته از روش‌های حفاری که از ابزار مکانیکی برای جدا کردن سنگ از موقعیت آن استفاده می‌شود، دو واژه قابلیت برش^۹ (برش‌پذیری) و قابلیت حفاری^{۱۰} (حفرپذیری) سنگ مطرح است. تاکنون تعاریف متفاوتی برای هر یک ارائه شده است، اما به‌طور ساده می‌توان گفت که تفاوت این دو در مقیاس است. قابلیت برش سنگ بیشتر به داده‌های آزمون برش ماده سنگ اطلاق می‌شود که بر اساس آن عملکرد نسبی ابزار و ماشین برش قابل مقایسه است. قابلیت حفاری، پیش‌بینی سرعت حفر و نفوذ یک ماشین حفار در توده سنگ است. شکل (۱-الف) سازوکار ایجاد تراشه طولی در آزمون برش کوچک‌مقیاس و شکل (۱-ب) هندسه برش را نشان می‌دهد.

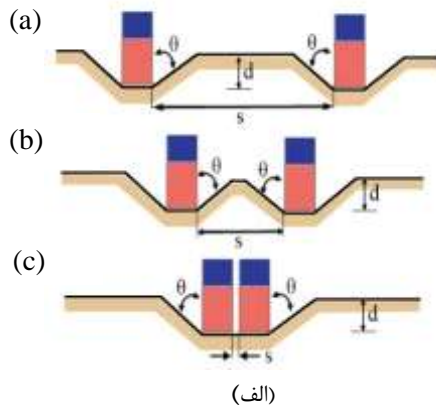
برای این آزمون استاندارد خاصی وجود ندارد ولی عموماً با استفاده از یک تیغه اسکنه‌ای (از جنس کارباید تنگستن) با عرض لبه ۱۲/۷ میلی‌متر و زاویه شیب^{۱۱} ۵- درجه و زاویه آزاد^{۱۲} ۵ درجه روی نمونه‌های مغزه با قطر ۷۶ میلی‌متر و یا بلوکی به ابعاد ۲۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر مکعب و معمولاً با عمق برش کمتر از ۱۰ میلی‌متر انجام می‌شود. نیروهای برشی (Fc) و قائم (Fn)، متغیرهای خروجی آزمون است که پس از هر بار ایجاد شیار روی نمونه، به دست می‌آید. مقادیر این دو نیرو در طراحی عوامل عملیاتی ماشین حفار شامل نیروی پیشران، گشتاور و توان ماشین به کار گرفته می‌شود. انرژی ویژه برش که به عنوان مقدار انرژی مورد نیاز برای کندن حجم یا وزن واحد سنگ تعریف می‌شود (مطابق رابطه ۱)، برای بیان راندمان برش و ارزیابی عملکرد ماشین حفاری استفاده می‌شود.

روش‌های حفر مکانیزه مانند استفاده از ماشین‌های حفر بازویی^۱ (رودهدر)، شیرر لودر^۲ و ماشین استخراجی پیوسته^۳ در استخراج مکانیزه زغال‌سنگ و ماشین حفر تمام مقطع تونل (TBM) جایگزین مناسبی برای روش‌های حفر سنتی از نقطه‌نظر ایمنی، نرخ تولید و زمان‌بندی پروژه است. از سویی دیگر، به‌کارگیری موفق این فناوری در پروژه‌های معدنی و عمرانی مستلزم شناخت برش‌پذیری سنگ و تطابق شرایط زمین با طرح ماشین است. مطمئن‌ترین و نسبتاً ارزان‌ترین راه برای ارزیابی دقیق برش‌پذیری سنگ در شرایطی نزدیک به محیط واقعی، تهیه نمونه از محل پروژه و انجام آزمون‌های برش سنگ در آزمایشگاه است.

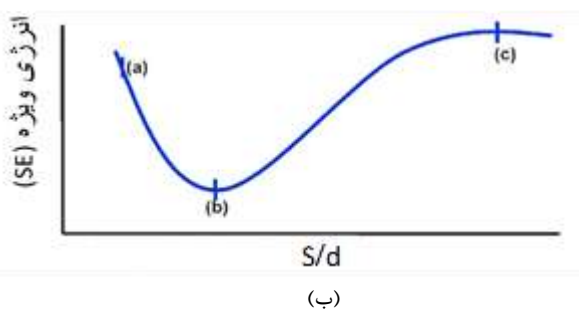
دستگاه‌های آزمون برش سنگ بسته به مقیاس ابزار برش و اندازه نمونه در دو گروه کوچک و بزرگ (تمام) مقیاس ساخته می‌شود. آزمون‌های بزرگ‌مقیاس با توجه به وابستگی نتایج به مقیاس و غیرخطی بودن فرآیند حفاری، نتایج دقیق‌تری برای استفاده در طراحی ماشین فراهم می‌سازد. در عوض، آزمون کوچک‌مقیاس ساده‌تر و ارزان‌تر است و نیاز به نمونه‌های کوچک‌تر دارد که تهیه آن از مسیر در مراحل اولیه پروژه راحت‌تر است.

با استفاده از نتایج آزمون‌های برش سنگ می‌توان پارامتر انرژی ویژه را برای چیدمان بهینه ابزار برش محاسبه و اندازه‌گیری کرد. انرژی ویژه برش عبارت است از مقدار انرژی لازم برای تولید واحد حجم یا وزن سنگ خردشده که با تقسیم نیروی برش متوسط بر حجم یا وزن سنگ کنده‌شده به ازای واحد طول برش سنگ به دست می‌آید [۱-۶]. همچنین می‌توان عوامل عملیاتی ماشین از جمله نیروی پیشران، گشتاور و توان موردنیاز را تخمین زد.

محققان مختلفی بر روی ارزیابی برش‌پذیری سنگ و ارتباط آن با پارامترها و عوامل موثر از جمله ویژگی‌های ماده‌سنگ، هندسه تیغه و هندسه شیار تحقیق کرده‌اند. تیریاکی و دیکمن^۴ با اندازه‌گیری برخی خواص فیزیکی و مکانیکی نوعی ماسه‌سنگ به بررسی اثر این خواص روی انرژی ویژه در آزمون برش خطی پرداختند [۷]. کیم^۵ با انجام آزمون برش خطی روی نوعی سنگ‌آهک مشاهده کرد که با افزایش عمق برش نیروی برش افزایش و انرژی ویژه کاهش می‌یابد [۸]. همچنین بیلگین^۶ و همکاران با انجام آزمون برش خطی روی ماسه‌سنگ نتیجه گرفتند با افزایش عمق برش نیروی برش به‌صورت خطی افزایش می‌یابد [۹]. ویلیامز و هاگان^۷ نیز با انجام آزمون برش خطی



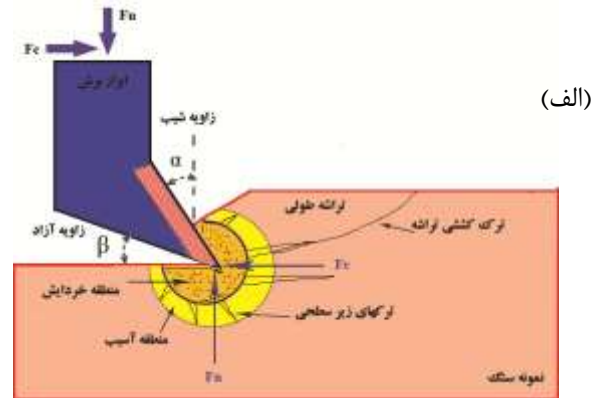
(الف)



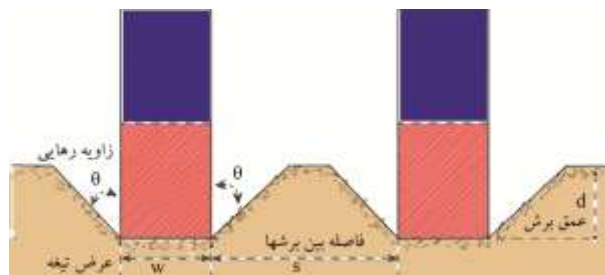
(ب)

شکل ۲- تغییرات انرژی ویژه با نسبت فاصله به عمق برش (s/d)
 الف) فاصله بین برش های مجاور [۱۳]، ب) ارتباط بین انرژی ویژه و نسبت
 فاصله به عمق برش [اقتباس از ۱]

در تحقیق های گذشته، به مکانیزم های برش متفاوتی برای شکست و خردایش سنگ اشاره شده است. برخی از آن ها شکست کششی و برخی دیگر شکست برشی را برای خردایش سنگ معرفی کرده اند. به طور کلی مدل های ارائه شده برای تعیین نیروهای برش سنگ را می توان به دو دسته مدل های نظری و تجربی تقسیم کرد. مدل های نظری بر اساس تعادل نیروها و با توجه به تنش های شکست کششی و یا برشی به وجود آمده اند. در جدول ۱ مدل های نظری و تجربی تعیین نیروی برش آورده شده است.



(ب)



شکل ۱- الف) سازوکار ایجاد تراشه طولی در آزمون برش کوچک-
 مقیاس. ب) هندسه برش های آزمون کوچک مقیاس [۱۳]

می توان گفت ماشین در شرایطی در وضعیت بهینه عملکرد خود قرار دارد که انرژی ویژه برش حداقل باشد که این خود تابعی از انتخاب بهینه متغیرهای هندسی تیغه (از جمله عرض و زوایای تیغه) و هندسه برش (عمق و فاصله بین برش ها) است. در شکل ۲، به عنوان نمونه ارتباط بین انرژی ویژه و نسبت فاصله به عمق برش (s/d) نشان داده شده است.

انرژی ویژه در آزمون برش خطی طبق رابطه ۱ محاسبه می شود [۱۴].

$$SE = \frac{F_C \times L}{V} \times 10^{-1} \quad (1)$$

که در آن:

SE انرژی ویژه (مگاژول بر مترمکعب)

F_C نیروی برش متوسط (کیلو نیوتن)

L طول برش (سانتی متر)

V حجم سنگ کنده شده (سانتی مترمکعب)

جدول ۱- مدل های نظری و تجربی ارائه شده برای تعیین نیروهای برش سنگ [۱۳]

شماره رابطه	معادله نیرو	محققان	نوع مدل
۲	$F_{C, chisel} = \frac{2 \times \sigma_t \times d \times w \times \sin(\frac{90-\alpha}{2})}{1 - \sin(\frac{90-\alpha}{2})}$	ایوانس [۵]	نظری
۳	$F_C = \frac{16 \times \pi \times \sigma_t^2 \times d^2}{\sigma_c \times \cos^2 \theta}$	ایوانس [۱۵]	نظری
۴	$F_{C, attack} = \frac{16 \times \pi \times \sigma_c \times \sigma_t^2 \times d^2}{[2 \times \sigma_t + (\sigma_c \times \cos(\frac{\phi}{2})) \times (\frac{1 + \tan(\eta)}{\tan(\frac{\eta}{2})})]^2}$	راکسبورو و لیبو [۱۶]	نظری
۵	$F_{C, radial} = \frac{\sigma_c \times d \times w \times (0.80 - (0.01 \times \frac{\sigma_c}{\sigma_t}))}{\sin(90 - \alpha) + \cos(90 - \alpha)}$	گوکتان [۱۷]	نظری
۶	$F_{C, attack} = \frac{4 \times \pi \times \sigma_t \times d^2 \times \sin^2(\frac{\phi}{2} + \eta)}{\cos(\frac{\phi}{2} + \eta)}$	گوکتان [۱۸]	نظری
۷	$F_{C, radial} = \frac{2 \times \tau \times w \times d \times \cos(\phi)}{(n + 1) \times (1 - \sin(\eta + \phi - \alpha))} \times \cos(\eta - \alpha)$	نیشیماتسو [۱۹]	نظری
۸	$F_{C, radial} = -24.504 + 0.513 \times \tau + 1.873 \times d + 0.249 \times \eta + 0.227 \times w - 0.154 \times \alpha - 0.047 \times \sigma_c$	بیلماز [۲۰]	تجربی

در این روابط:

$F_{C, attack}$ نیروی برش ابزار نوک قلمی (kN)، $F_{C, chisel}$ نیروی برش ابزار اسکنه‌ای (kN)، F نیروی برآیند (kN)

$F_{C, radial}$ نیروی برش ابزار شعاعی (kN)، n ضریب توزیع تنش، d عمق برش (m)

σ_c مقاومت فشاری (kPa)، τ مقاومت برشی (kPa)، σ_t مقاومت کششی (kPa)، ϕ زاویه اصطکاک سنگ بکر (درجه)

$2\theta = \phi$ زاویه نوک برش دهنده (درجه)، α زاویه شیب برش دهنده (درجه)، η زاویه اصطکاک بین سنگ و برش دهنده (درجه)

بسیار ریزدانه با خمیره (ماتریکس) میکرایتی (گل آهکی) است. بخشی از سنگ که با سیمان کربناته کامل پر نشده است حفره‌ای است. ذرات تشکیل دهنده سنگ و کانی‌ها تقریباً گرد شده ولی بعضی از کانی‌های کوارتز گوشه‌دار است. تصویر مقطع نازک سنگ با بزرگنمایی ۲۰۰ برابر در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌های تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ قرمز بالایی

نام آزمایش	نتیجه
مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	۳۷٫۵
مدول یانگ (GPa)	۵٫۳۲
مقاومت کششی (MPa)	۳٫۹۵
چگالی خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۲٫۲
تخلخل (درصد)	۱۹٫۲
درصد جذب آب	۸٫۵
سختی اشمیت	۴۳٫۲۲
ساینده‌گی سنگ (CAI)	۰٫۷۸۹

۲-۲-۳- آزمون برش سنگ

برای انجام آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس، از دستگاه ساخته‌شده در بخش استخراج معدن دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. این دستگاه شامل یک دستگاه صفحه‌تراش، حسگر اندازه‌گیری نیرو و ابزار برش است. از دیتالاگر برای ثبت داده‌ها در حین انجام آزمایش‌ها استفاده شده است.

در این مطالعه برای بررسی قابلیت برش سنگ به وسیله ابزار برش و اثر عمق و سرعت برش روی پارامترهای نیروی برش و انرژی ویژه، آزمون‌های برش بر روی نمونه‌های مغزه با قطر ۷۶ میلی‌متر انجام شده است. در این آزمایش‌ها از یک تیغچه از جنس فولاد آلیاژی با زاویه شیب صفر و زاویه آزاد ۱۲ درجه استفاده شده است. نیروی برش در حین آزمایش با استفاده از دینامومتر اندازه‌گیری شده و به سیستم جمع‌آوری داده منتقل و ذخیره می‌شود. با جمع‌آوری خرده‌های سنگ کنده‌شده در اثر برش و توزین آن و با توجه به چگالی سنگ، حجم سنگ کنده‌شده محاسبه می‌شود.

اولین مدل آرایه شده در این زمینه مربوط به تحقیق‌های ایوانس^{۱۳} [۱۶] است که مبنای بسیاری از تحقیق‌های پس از خود شده است. ایوانس در سال ۱۹۶۱، مدل خود را برای مکانیزم برش در زغال با استفاده از ابزار برش شعاعی آرایه کرد. در این مدل از حالت شکست کششی در حین فرآیند برش استفاده شده است.

۲-۲-۲- مراحل آزمون برش خطی سنگ کوچک مقیاس

۱-۲-۲- تهیه نمونه

بر اساس آنچه از کاوش متون دریافت می‌شود، آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس، تاکنون بیشتر بر روی سنگ‌های با مقاومت کم تا متوسط (۲۰ تا ۵۰ مگاپاسکال) انجام شده است. همچنین ماشین‌هایی که این نوع ابزار بر روی طبلک آن‌ها نصب می‌شود (مانند شیرر لودر، رنده^{۱۴}، ماشین استخراج پیوسته در معادن زغال‌سنگ و ماشین حفر بازویی) برای حفر سنگ‌های با مقاومت کم تا متوسط استفاده می‌شود [۱۴]. از این‌رو، پس از بررسی نمونه‌های مختلف در کشور، ماسه‌سنگ قرمز بالایی قم برای این تحقیق انتخاب شد. نمونه‌های سنگی به شکل بلوک از ماسه‌سنگ قرمز بالایی از ترانشه راه در کیلومتر ۵۰ بزرگراه تهران- قم تهیه شد. نمونه‌ها از لایه‌های ماسه‌سنگ بدون درزه و هوازدگی با چکش زمین‌شناسی جداشده و بعد از انتقال در شرایط دما و رطوبت آزمایشگاه نگهداری شد.

۲-۲-۲- تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

برای شناسایی نوع سنگ و تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی آن، آزمایش‌هایی مطابق با استانداردهای انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^{۱۵} انجام شد [۲۱]. این آزمایش‌ها شامل مقاومت فشاری تک‌محوری^{۱۶}، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی^{۱۷}، آزمون سختی اشمیت، آزمون شاخص ساینده‌گی سورشار^{۱۸}، تعیین چگالی و تخلخل سنگ، درصد جذب آب و مطالعه میکروسکوپی مقطع نازک است. برای انجام این آزمایش‌ها نمونه‌های سنگی به شکل مغزه و بلوک با ابعاد و شرایط استاندارد تهیه شد. تصاویری از محل نمونه‌گیری و آزمون‌های آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای بررسی کانی‌های موجود در سنگ، بافت، شکل و ابعاد دانه‌ها، مقطع نازک از سنگ تهیه شد. این مقطع با میکروسکوپ پلاریزان (1000X) مطالعه شد. نوع تشکیل سنگ تخریبی (آواری) است. کانی‌های تشکیل‌دهنده این سنگ به ترتیب فراوانی کوارتز (حدود ۸۵ درصد)، فلدسپار، پلاژیوکلاز، مسکویت و کانی‌های اوپک (تیره) مانند اکسیدهای آهن است. بافت سنگ



ب- سختی اشمیت در آزمایشگاه



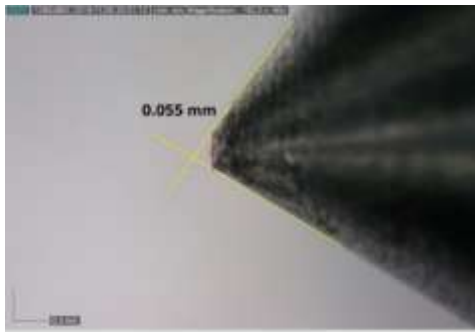
الف- محل نمونه‌گیری



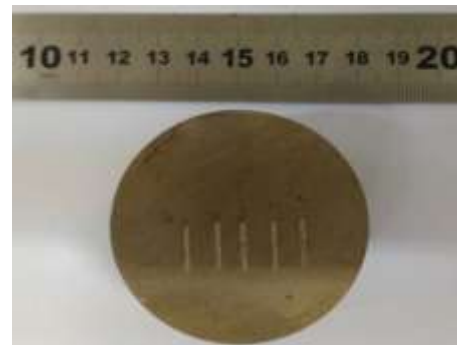
ت- نمونه‌ها پس از انجام آزمون BTS



پ- نمونه‌ها پس از انجام آزمون UCS

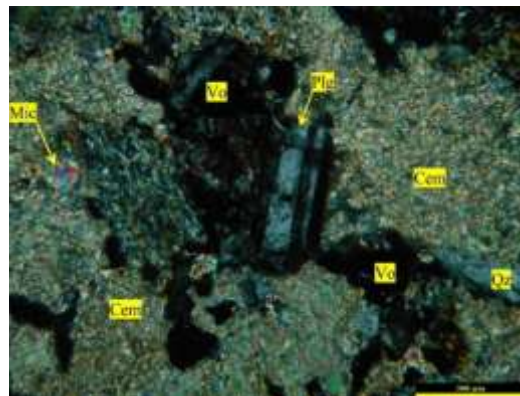


ج- اندازه‌گیری مقدار ساییدگی نوک قلم در آزمون سورشار



ث- نمونه پس از انجام آزمون سایندگی سورشار

شکل ۳- آزمون‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص مکانیکی سنگ



شکل ۴- تصویر مقطع نازک با بزرگ‌نمایی ۲۰۰ برابر: Cem (سیمان آهکی) Mic (میکا) Plg (پلاژیوکلاز) Qz (کوارتز) Vo (حفره)

با رفع محدودیت دستگاه برش خطی، عمق بیشتر از ۴ میلی‌متر نیز بررسی شود.

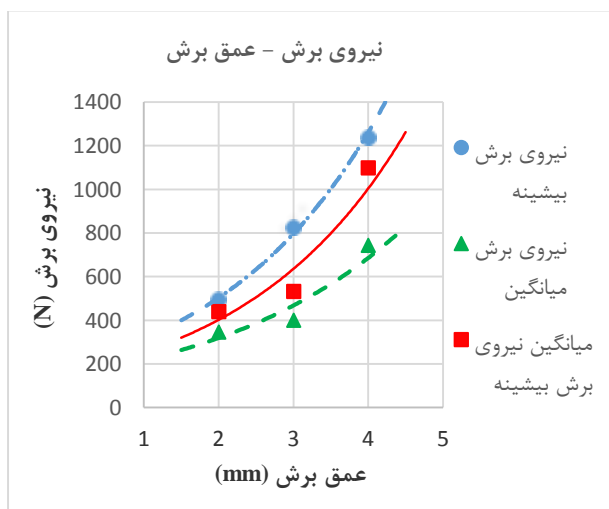
۲-۱-۳- اثر سرعت برش

برای بررسی اثر سرعت برش بر نیروی برش و انرژی ویژه، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مغزه با قطر ۷۶ میلی‌متر و با ثابت بودن سایر عوامل در عمق برش ثابت ۳ میلی‌متر و در سرعت‌های ۱۰ و ۱۲ و ۱۴ و ۱۶ سانتی‌متر بر ثانیه انجام شد. علت انتخاب این سرعت‌ها قابلیت دستگاه و امکان انجام آزمایش در این سرعت‌ها بود. شکل ۸ اثر سرعت برش روی نیروی برش و شکل ۹ اثر سرعت برش روی انرژی ویژه را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است، ارتباط معناداری بین سرعت برش، انرژی ویژه و نیروهای برش دیده نمی‌شود.

۲-۲-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل ایوانس

در این قسمت نتایج حاصل از آزمون برش خطی سنگ در آزمایشگاه با نتایج حاصل از مدل ایوانس مقایسه می‌شود. علت انتخاب مدل ایوانس برای مقایسه آن است که این مدل هنوز مقبولیت خوبی دارد و خود مبنای آرایه مدل‌های بعدی بوده است. برای مقایسه نتایج آزمایش‌ها با مدل‌های نظری، مدل ایوانس برای ابزارهای شعاعی انتخاب شد.



شکل ۶- تغییرات نیروی برش برحسب عمق برش

تجهیزات انجام آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس دانشگاه تربیت مدرس در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- ماشین آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس در دانشگاه تربیت مدرس

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۱- اثر عمق و سرعت بر نیرو و انرژی ویژه برش

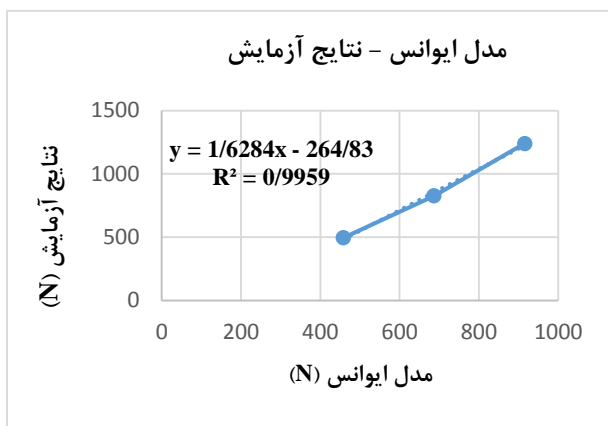
۳-۱-۱-۱- اثر عمق برش

برای بررسی اثر عمق برش بر روی نیروی برش و انرژی ویژه، آزمایش برش خطی کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های مغزه در عمق‌های ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انجام شد. برای هر عمق برش حداقل ۳ بار آزمایش انجام و از آن‌ها میانگین گرفته شد. این آزمایش‌ها با ثابت بودن سایر عوامل مانند سرعت برش، هندسه ابزار برش و جنس سنگ فقط برای بررسی اثر عمق برش انجام شد. برای انجام آزمایش ابتدا نمونه در داخل گیره دستگاه تراز و محکم شده و با اعمال عمق برش دقیق به دستگاه، آزمون برش انجام شد. خرده‌های حفاری حاصل از برش به صورت کامل جمع‌آوری و برای توزین و تحلیل دانه‌بندی نگهداری می‌شود. شکل ۶ اثر عمق برش روی نیروی برش و شکل ۷ اثر عمق برش روی انرژی ویژه را نشان می‌دهد. نیروی برشی با سه کمیت نیروی برش بیشینه، نیروی برش میانگین و میانگین نیروی برش بیشینه نسبی اندازه‌گیری و ثبت شد. نیروی برش بیشینه برابر با حداکثر مقدار نیروی برش ثبت شده برای ایجاد شیار، نیروی برش میانگین برابر با مقدار متوسط نیروهای ثبت شده و میانگین نیروی برش بیشینه نسبی برابر با مقدار متوسط همه نیروهای بیشینه نسبی ثبت شده در اثر تشکیل تراشه‌ها است.

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، هر سه پارامتر نیروهای برش با افزایش عمق شیار، افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۷ با افزایش عمق برش تا یک اندازه بهینه پارامتر انرژی ویژه کاهش می‌یابد و بعد از این مقدار با افزایش عمق برش انرژی ویژه افزایش می‌یابد. برای تعیین دقیق‌تر این روند نیاز است که

جدول ۳- نتایج آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس و مدل ایوانس

عمق برش (mm)		نیروی برش (N)	
۴	۳	۲	
۱۲۳۹	۸۲۵	۴۹۴	نیروی برش حداکثر
۷۴۲	۳۹۹	۳۴۵	نیروی برش میانگین
۱۰۹۷	۵۳۱	۴۴۰	میانگین نیروی برش حداکثر
۹۱۴	۶۸۶	۴۵۷	مدل ایوانس

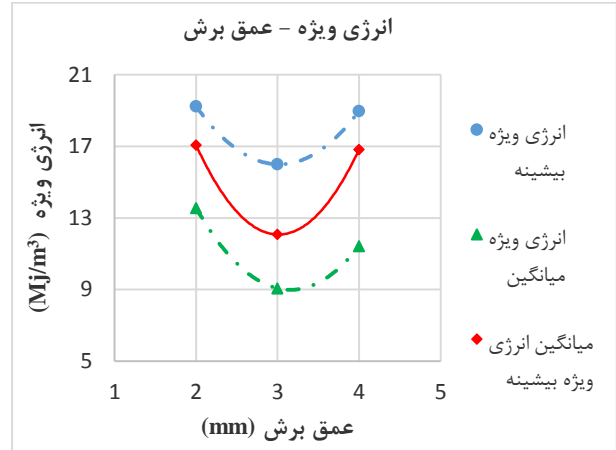


شکل ۱۰- مقایسه نتایج آزمون برش خطی کوچک مقیاس در این مطالعه با مدل نظری ایوانس

همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است همبستگی مناسبی بین نتایج آزمون برش خطی و مقادیر محاسبه شده از روش نظری ایوانس وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

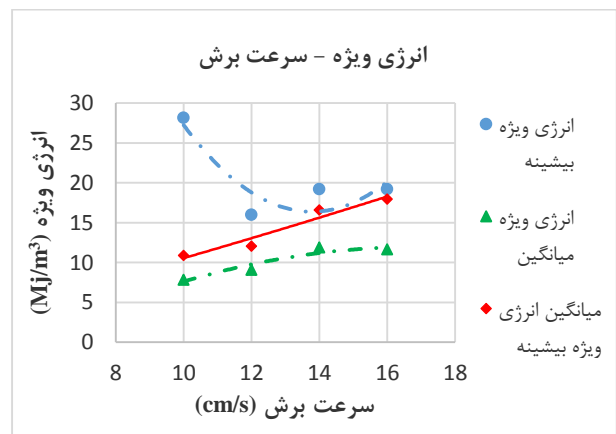
در پروژه‌های بزرگ حفاری، با توجه به کارایی روش‌های آزمایشگاهی در مدلسازی عملکرد ماشین و فرآیند برش و نتایج مفید و کاربردی آن‌ها، این آزمایش‌ها بخشی از مطالعات قبل از اجرا است تا هم در انتخاب و طراحی ماشین و هم در پارامترهای عملیاتی آن راهنما باشد. این آزمایش‌ها شامل دو دسته آزمون-های شاخص و آزمون برش سنگ (کوچک و تمام‌مقیاس) است. آزمون برش سنگ کوچک‌مقیاس یکی از آزمون‌های ساده و پرکاربرد است که برای ارزیابی قابلیت برش سنگ و در نتیجه کنترل فرآیند برش نتایج مفیدی به دست می‌دهد. هدف از انجام این آزمون بررسی ارتباط بین نیروهای برش، حجم خرده‌سنگ کنده‌شده و کارایی (راندمان) برش در آزمایشگاه و ارتباط آن با عوامل عملیاتی ماشین در شرایط واقعی است. مهم‌ترین نتایج حاصل از ارزیابی برش‌پذیری سنگ و انجام آزمون‌های برش خطی



شکل ۷- تغییرات انرژی ویژه بر حسب عمق برش



شکل ۸- اثر سرعت برش روی نیروی برش



شکل ۹- اثر سرعت برش روی انرژی ویژه

این مدل برای محاسبه نیروی برش در ابزار شعاعی ارایه شده است. در جدول ۳ نتایج آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس و مدل نظری ایوانس آمده است. همچنین در نمودار شکل ۱۰ مقایسه نتایج آزمون برش خطی کوچک‌مقیاس روی ماسه‌سنگ قرمز بالای در این مطالعه و مدل نظری ایوانس نشان داده شده است.

مراجع

- Balci, C., Bilgin, N. *Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007. 44(3): p. 468-476
- Evans, I. and Pomeroy, C. *The strength, fracture and workability of coal*. 1966: Pergamon.
- Roxborough, F., Phillips, H. *Experimental studies on the excavation of rocks using picks*. in Advances in rock mechanics: proceedings of the Third ISRM Congress of the International Society for Rock Mechanics. Natl Acad Sci, Washington, DC. 1974.
- McFeat-Smith, I., Fowell, R.J. *Correlation of rock properties and the cutting performance of tunnelling machines*. in Conference on Rock Engineering. 1977. PB Attewell.
- Evans, I. *A theory of the basic mechanics of coal ploughing*. in Proceedings of the international symposium on mining research. 1962.
- Rostami, J., Ozdemir, L. *A new model for performance prediction of hard rock TBMs*. in Proceedings of the rapid excavation and tunneling conference. 1993. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, INC.
- Tiryaki, B., Dikmen, A.C. *Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks*. Rock mechanics and rock engineering, 2006. 39(2): p. 89-120.
- Kim, E., *Investigation of conical bit rotation in full scale cutting tests*. 2010, The Pennsylvania State University.
- Bilgin, N., Demircin, M. A., Copur, H., Balci, C., Tuncdemir, H., & Akcin, N., *Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006. 43(1): p. 139-156.

کوچک مقیاس با مشخصات فیزیکی و مکانیکی معلوم، در ادامه آمده است.

۱- با تغییر عمق برش از ۲ تا ۴ میلی متر و اندازه گیری نیروی برش مشخص شد با افزایش عمق برش، نیروی برش نیز افزایش می یابد.

۲- انرژی ویژه یک رابطه غیرکنواخت با عمق برش نشان داد. این نتیجه ممکن است به علت تعداد کم آزمایش های برش و یا عمق های برش محدود (۲ تا ۴ میلی متر) باشد.

۳- با انجام آزمون های برش خطی کوچک مقیاس در سرعت های مختلف و با ثابت بودن سایر پارامترهای آزمایش شامل عمق برش، زاویه شیب و آزاد و جنس تیغه مشخص شد سرعت برش رابطه معناداری با نیروی برش و انرژی ویژه ندارد.

۴- در این مطالعه مشاهده شد ماسه سنگ قرمز بالایی با وجود درصد بالای کانی کوارتز به مقدار بسیار کم ساینده است. این نتیجه نشان می دهد که ساینده گی سنگ فقط وابسته به درصد کوارتز آن (کوارتز محتوی) نیست و عواملی از قبیل بافت سنگ، شکل و اندازه ی دانه ها و ذرات تشکیل دهنده سنگ، خمیره سنگ و میزان حفره های موجود در سنگ تاثیر گذار است.

۵- نتایج آزمون های برش خطی کوچک مقیاس و بررسی روند تغییرات و روابط بین پارامترها در این تحقیق، مطابقت خوبی با مطالعه های قبلی در این زمینه داشته است. با وجود این، برای کسب نتایج مطمئن تر و دقیق تر، مطالعه عمیق تر با انجام آزمایش های بیشتر و توسعه بانک اطلاعاتی در حال انجام است.

پی نوشت ها

- Roadheader
- Shearer Loader
- Continuous Miner
- Tiryaki and Dikmen
- Kim
- Bilgin
- Williams and Hagan
- Phillips
- Cuttability
- Boreability
- Rake angle
- Clearance angle
- Evans
- Plow
- International Society for Rock Mechanics (ISRM)
- Unconfined Compressive Strength (UCS)
- Brazilian Tensile Strength (BTS)
- Cerchar Abrasivity Index (CAI)

20. Yilmaz, N.G., Yurdakul, M., Goktan, R. *Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007. 44(6): p. 962-970.
21. Ulusay, R., *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. 2015: Springer.
10. Williams, E., Hagan, P. *Observations on the variation in acoustic emissions with changes in rock cutting conditions*. 2006.
11. Phillips, H. *The mechanical cutting characteristics and properties of selected rock formations*. Report to the Transport and Road Research Laboratory by the University of Newcastle upon Tyne (December, 1975), 1975.
۱۲. سجاد علی‌مدد، جعفر خادمی حمیدی، کورش شهریار، مهدی محمدی حسین‌آبادی، اندازه‌گیری نیروهای برش سنگ با طراحی و ساخت ماشین برش خطی کوچک مقیاس، ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، بهمن ۱۳۹۵
۱۳. محمدی حسین‌آبادی، مهدی. قابلیت برش سنگ به وسیله تیغه‌های خراشی تحت بارگذاری جانبی. رساله دکتری استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، در حال نگارش ۱۳۹۶.
14. Bilgin, N., Copur, H., Balci, C. *Mechanical excavation in mining and civil industries*. 2013: CRC Press.
15. Evans, I., *A theory of the cutting force for point-attack picks*. Geotechnical and Geological Engineering, 1984. 2(1): p. 63-71.
16. Roxborough, F., Liu, Z. *Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting*. in Proceedings of the sixth underground operator's conference, Kalgoorlie. 1995.
17. Goktan, R. *Prediction of drag bit cutting force in hard rocks*. in Proceedings of the 3rd international symposium on mine mechanization and automation, Golden, Colorado. 1995.
18. Goktan, R. *A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits*. in Proceedings of the fourth international symposium on mine mechanization and automation, Brisbane, Queensland. 1997.
19. Nishimatsu, Y. *The mechanics of rock cutting*. in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. 1972. Elsevier.