

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد تیغه اسکنه‌ای در برش سنگ‌های ضعیف تا متوسط

مهدی محمدی حسین آبادی^۱؛ جعفر خادمی حمیدی^{۲*}؛ جمال رستمی^۳؛ کامران گشتاسبی گوهرریزی^۴

۱- دانشجوی دکترای استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس؛ mehdi.mohamadi@modares.ac.ir

۲- استادیار گروه استخراج معدن، دانشگاه تربیت مدرس؛ jafarkhademi@modares.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، مدرسه عالی معادن کلرادو؛ rostami@mines.edu

۴- دانشیار گروه مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس؛ goshtasb@modares.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳

چکیده	واژگان کلیدی
به‌منظور تعیین قابلیت برش (<i>Cuttability</i>) سنگ، آگاهی از مقدار نیروهای واردشده به لبه تیغه در محل تماس آن با سنگ و حجم خرده‌های حاصل از حفاری اهمیت دارد. تخمین این نیروها با روش‌های تحلیلی و آزمون‌های آزمایشگاهی برش سنگ امکان‌پذیر است. در این مقاله، با انجام آزمون‌های برش خطی روی چهار نمونه سنگ با مقاومت ضعیف تا متوسط به‌وسیله یک تیغه اسکنه‌ای (<i>chisel</i>)، نیروهای برشی حداکثر و میانگین وارد بر تیغه در حین برش سنگ اندازه‌گیری و با مقادیر محاسبه‌شده از روش نظری ایوانس (<i>Evans</i>) مقایسه شد. نتایج نشان داد که با افزایش عمق برش، هر سه نیروی برشی حداکثر، میانگین و نیروی برشی ایوانس به‌طور خطی افزایش می‌یابد و در یک عمق برش مشخص، معمولاً مقدار نیروی برشی ایوانس کمتر از مقدار نیروی برشی حداکثر و بیشتر از نیروی برشی میانگین به‌دست‌آمده از آزمون برش خطی است. همچنین مقدار نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین ارتباط مستقیمی با افزایش عمق برش دارد و در طراحی ماشین حفاری باید موردتوجه قرار گیرد، به‌طوری‌که مقدار آن بین ۱/۱۶ تا ۱/۴۹ برای عمق برش ۱ میلی‌متر و نزدیک ۱/۷ برای عمق برش ۴ میلی‌متر به دست آمد. همچنین نتایج نشان داد که این نسبت با افزایش درجه شکنندگی سنگ افزایش می‌یابد و کم‌ترین مقدار این نسبت مربوط به نمک با شکنندگی ۴/۸۲ و بیشترین مقدار آن مربوط به زغال‌سنگ با شکنندگی ۱۱/۸۶ است.	تیغه اسکنه‌ای، قابلیت برش سنگ، آزمون برش خطی سنگ، روش نظری ایوانس

۱- مقدمه

جوامع امروزی نیاز به حفاری پوسته زمین، به‌طور خاص با اهداف معدنکاری، احداث تونل‌های راه، انتقال آب به مناطق خشک و گرمسیری، توسعه خطوط حمل‌ونقل ریلی در شهرها و انتقال انرژی از قبیل نفت و گاز دارند. نیاز به حفاری به‌تدریج موازی با توسعه فناوری‌های مختلف و تقاضای روزافزون جوامع افزایش می‌یابد. روش چالزنی و آتشیاری یک روش قدیمی‌تر حفاری است که به‌صورت رایج استفاده شده است؛ اما در اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی، یک شاخه جدید علمی به نام "مکانیک برش سنگ" یا "حفاری مکانیکی (مکانیزه)" ایجاد شده و این امر یک رقابتی بین روش‌های حفاری مکانیکی و روش‌های حفاری سنتی به وجود آورده است. به‌رحال امروزه حفاری

مکانیکی سهم مهمی در صنعت حفاری دنیا دارد.

حفاری مکانیکی عبارت است از حفاری به‌وسیله ماشین‌هایی که انرژی را با اعمال نیرو از طریق ابزار برش (تیغه‌ها (*cutters*))، سرتمه‌ها (*bits*)) به سنگ یا زمین با ایجاد تنش‌های متمرکز منتقل می‌کنند [۱]. مکانیک برش سنگ، به بررسی اندرکنش ابزار برش با سنگ، طراحی و انتخاب ماشین‌های حفار مکانیکی و پیش‌بینی و بهینه‌سازی عملکرد حفاری برای اهداف امکان‌سنجی و برنامه‌ریزی می‌پردازد.

شناخت صحیح اندرکنش بین سنگ و ابزار برش به‌منظور ارزیابی برش‌پذیری سنگ و همچنین بهبود عملکرد ماشین حفاری برای دستیابی به سرعت بیشتر و هزینه کمتر در حفر فضاهای زیرزمینی

در زمینه مکانیک برش سنگ و حفاری مکانیکی شروع کرد و این تحقیق‌ها همچنان ادامه دارد [۸]، [۹]. در نیمه دوم دهه ۱۹۸۰ در دانشکده مهندسی معدن دانشگاه تکنیک استانبول، بیلگین و همکاران (*Bilgin et al*) موفق به ساخت و ابرابندی ماشین برش خطی سنگ شدند و تحقیق بر روی برش‌پذیری سنگ را آغاز کردند [۱۰]، [۱۱]. بعدها در سال ۲۰۰۷، بالچی (*Balci*) و بیلگین [۱۲] به بررسی ارتباط و همبستگی بین مقادیر انرژی ویژه حاصل از آزمون برش تمام‌مقیاس و کوچک‌مقیاس و لذا امکان استفاده از آزمون کوچک‌مقیاس برای طراحی ماشین‌های حفاری پرداختند. همچنین تحقیقات مشابهی در دانشگاه‌ها، شرکت‌های صنعتی خصوصی و مؤسسه‌های دولتی در برخی کشورهای دیگر مانند استرالیا، آفریقای جنوبی، روسیه، فرانسه و آلمان انجام شده است. دستگاه *LCM*، هم‌اکنون در مراکز تحقیقاتی دیگری همچون سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی همسود استرالیا (*CSIRO*)، دانشگاه نیوساوت‌ولز استرالیا، دانشگاه فنی خاورمیانه ترکیه موجود است.

در طی هفت دهه اخیر، محققان به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف هندسه تیغه (عرض تیغه، زاویه برش (*Rake angle*))، زاویه آزاد برش‌ها (*Clearance angle*) و هندسه برش (عمق برش و فاصله بین برش‌ها) بر روی نیروی برش و انرژی ویژه پرداخته‌اند [۱۳]–[۱۶]. همچنین، برخی مطالعات ارتباط بین خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ و انرژی ویژه و کارایی برش را بررسی کرده‌اند [۱۲]، [۱۷]–[۱۹]. مطالعات متعددی تلاش کرده‌اند تا رابطه بین اندازه تراشه‌های (*Chips*) تولیدشده در فرآیند برش سنگ و کارایی برش را در هر دو مقیاس آزمایشگاهی و میدانی توضیح دهند [۲۰]–[۲۳]. علاوه بر این، محققان زیادی از روش‌های شبیه‌سازی عددی برای مطالعه اندرکنش بین تیغه و سنگ و کارایی برش استفاده کرده‌اند [۲۴]–[۲۷].

۲-۲- مدل‌های نظری برش سنگ به‌وسیله تیغه‌های

خراشی

تیغه‌های خراشی به‌طورمعمول در ماشین‌های استخراج پیوسته، شیررها، ماشین‌های حفار بازویی و حفر ترانشه‌ها برای حفاری زمین‌های نرم غیر ساینده و سنگ‌های با مقاومت ضعیف تا متوسط مانند زغال‌سنگ، نمک و پتاس (مقاومت تک‌محوری فشاری ۴۰–۶۰ مگاپاسکال) استفاده می‌شود. بدنه این تیغه‌ها از فولاد سخت‌کاری شده بوده و نوک آن از کاربرد تنگستن ساخته می‌شود تا عمر تیغه در برابر سایش افزایش یابد [۱].

در تیغه‌های خراشی راستای اعمال نیرو به‌صورت موازی با سطح سنگ است. در تحقیق‌های گذشته، به مدل‌های نظری و تجربی مختلفی برای سازوکار برش و شکست سنگ با این تیغه‌ها اشاره شده

بسیار حائز اهمیت است. این مطالعه به بررسی آزمایشگاهی نیروهای برش سنگ به‌وسیله ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ، *SSLCM* (*Small Scale Linear Cutting Machines*) ساخته‌شده در دانشگاه تربیت مدرس و مقایسه آن با نیروهای حاصل از مدل نظری ایوانس می‌پردازد. همچنین، ارتباط این نیروها با اندازه تراشه‌های تولیدشده و درجه شکنندگی سنگ‌ها مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این اولین ماشین برش خطی در کشور است که امکان انجام مطالعات بنیادی در زمینه برش‌پذیری سنگ را فراهم می‌سازد.

۲- پیشینه تحقیق

۱-۲- مطالعات آزمایشگاهی برش سنگ

پژوهش‌های اولیه اصولی مربوط به مکانیک برش سنگ (زغال‌سنگ)، بعد از جنگ جهانی دوم و در اوایل دهه ۱۹۵۰ با هدف گسترش مکانیزاسیون در استخراج معادن زغال‌سنگ انگلستان آغاز شد. در این کشور، تحقیق‌ها در زمینه عملکرد تیغه‌های ناخنی خراشی (*Drag picks*) در مؤسسه ملی تحقیقات معدنی زغال‌سنگ، *MRDE-NCB* (*Mining Research and development*) معدن دانشگاه نیوکاسل و آزمایشگاه راه و حمل‌ونقل جاده‌ای در پژوهشکده محیط‌زیست این دانشگاه آغاز شد. اولین ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ در دهه ۱۹۵۰ میلادی در مرکز تحقیقاتی *NCB* با تأکید بر مکانیزاسیون معادن زغال‌سنگ و طراحی ماشین‌های زغال‌تراش ساخته شد [۲]، [۳]. بسیاری از نتایج این تحقیق‌ها در کتاب ارزشمند "مقاومت، شکست و کارپذیری زغال" گردآوری و توسط ایوانس و پومروی (*Pomero*) در سال ۱۹۶۶ به چاپ رسیده است [۴]. تحقیق‌های اولیه در زمینه قابلیت مکانیزاسیون و برش‌پذیری سنگ روی تیغه‌های اسکنه‌ای متمرکز بوده است. سپس در ابتدای دهه ۱۹۷۰، راکسبورو (*Roxborough*) و گروه تحقیقاتی وی [۵]–[۷]، ماشین *LCM* مشابهی را به‌منظور تحقیق بر روی قابلیت برش سنگ‌های با مقاومت متوسط توسعه دادند. اداره معادن ایالات متحده آمریکا پژوهش‌های خود در زمینه مکانیک برش سنگ را در طی دهه ۱۹۷۰ میلادی شروع کرد. مطالعه‌های اولیه به‌وسیله تیغه‌های غلتشی و سپس تیغه‌های خراشی متمرکز شده بود. همچنین آزمایشگاه مهندسی و پژوهش در مناطق سرد آمریکا، *CRREL* (*Cold Regions Research and Engineering Laboratory*) مطالعات متعددی در زمینه حفاری و برش خاک‌های یخ‌زده، یخچال‌های طبیعی و برف یخ‌زده به‌وسیله تیغه‌های خراشی انجام دادند. در طی زمان مشابهی، مدرسه معادن کلرادو، *CSM* (*Colorado School of Mines*) نیز پژوهش‌هایی را

در سال ۱۹۷۲ توسط نیشیماتسو (Nishimatsu) [۳۰] مدلی برای تیغه‌های شعاعی ارائه شد که در آن به جای مود شکست کششی، شبیه مدل مرجانت (Merchant) [۳۱] برای برش فلزات، از شکست برشی استفاده شده بود (رابطه ۲).

$$F_C = \frac{2 \times \tau \times w \times d \times \cos(\eta - \alpha) \cos(\phi)}{(n + 1) \times (1 - \sin(\eta + \phi - \alpha))} \quad (2)$$

در این رابطه:

τ ، مقاومت برشی

d ، عمق برش

α ، زاویه برش

w ، عرض تیغه

η ، زاویه صفحه شکست برشی

ϕ ، زاویه اصطکاک داخلی سنگ

n ، ضریب توزیع تنش

F_c ، نیروی برشی

از ترکیب دو مدل قبلی، افرادی مانند راکسبورو و همکاران [۳۲] نقطه گذار از تنش کششی به تنش برشی در برش سنگ را بررسی کردند. همچنین گوکتان (Goktan) [۳۳] در سال ۱۹۹۵ مدلی را برای پیش‌بینی نیروی برش موردنیاز در سنگ‌های با مقاومت فشاری تک‌محوری متوسط تا زیاد برای تیغه‌های شعاعی ارائه کرد (رابطه ۳).

$$F_C = \frac{\sigma_c \times d \times w \times (0.80 - (0.01 \times \frac{\sigma_c}{\sigma_t}))}{\sin(90 - \alpha) + \cos(90 - \alpha)} \quad (3)$$

در این رابطه:

σ_c ، مقاومت فشاری تک‌محوری

σ_t ، مقاومت کششی

d ، عمق برش

w ، عرض تیغه

α ، زاویه برش

F_c ، نیروی برشی

اولین مدل نظری برای تخمین نیروی برش سنگ با تیغه‌های نوک قلمی نیز توسط ایوانس [۳۴] در سال ۱۹۸۴ ارائه شد. سپس راکسبورو و لیو (Roxborough & Liu) [۳۵] با مطرح کردن زاویه اصطکاک بین سنگ و تیغه، این مدل را برای تیغه‌های نوک قلمی مورد بازنگری قرار دادند. همچنین گوکتان [۳۶] در سال ۱۹۹۷ مدل اصلاح‌شده‌ای از مدل ایوانس را برای این نوع تیغه‌ها ارائه کرد.

است. برخی از این نظریه‌ها بر مبنای ترک کششی و برخی بر مبنای شکست برشی هستند. در همه این موارد، سازوکارها در هندسه‌های مختلف ابزار، مشابه است. مطالعه‌های نظری و تجربی انجام‌شده توسط دانشمندان مختلف نشان می‌دهد که هر دو تنش کششی و برشی در فرایند شکستن سنگ نقش دارند. در ادامه به برخی از مهم‌ترین مدل‌های نظری اشاره می‌شود.

اولین مدل نظری برش سنگ توسط ایوانس براساس برش زغال‌سنگ به‌وسیله تیغه اسکنه‌ای پیشنهاد شد [۲۸]، [۲۹]. او با توجه به مشاهدات خود در حین آزمون برش، یک مسیر قوسی شکل را که از نقطه تماس نوک تیغه با سنگ (A) شروع شده و در نقطه (B) به سطح سنگ می‌رسد در نظر گرفت (شکل ۱). ایوانس برای ارائه مدل خود (رابطه ۱) فرض‌هایی مانند وجود شرایط کرنش صفحه‌ای به‌علت بزرگ‌تر بودن عمق برش نسبت به نفوذ تیغه و همچنین ایجاد ترک در سنگ به‌علت گسیختگی کششی در طول قوس AB در نظر گرفت.

$$F_C = \frac{2 \times \sigma_t \times d \times w \times \sin(\frac{90 - \alpha}{2})}{1 - \sin(\frac{90 - \alpha}{2})} \quad (1)$$

در این رابطه:

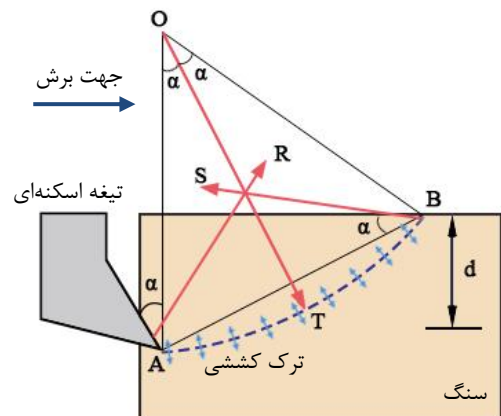
σ_t ، مقاومت کششی

d ، عمق برش

α ، زاویه برش

F_c ، نیروی برشی

در ادامه از روش نظری ایوانس به‌طور گسترده در ایجاد اصول بنیادی در فرایند برش سنگ و طراحی مؤثرتر ماشین‌های حفاری مانند شیرر، ماشین استخراج پیوسته و ماشین حفار بازویی استفاده شد.



شکل ۱- نمایی شماتیک از فرضیه شکست کششی ایوانس (اقتباس از [۴])

۳- مطالعات آزمایشگاهی

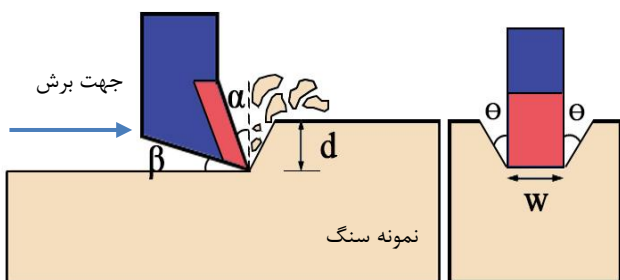
۱-۳- تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

نگه‌دارنده در پیشانی ماشین نگهداری و با یک پیچ در آن محکم شده است به‌گونه‌ای که از جابجایی و لغزش آن در جهات مختلف جلوگیری شود [۴۱]، [۴۲].

شکل ۲ دستگاه آزمون برش سنگ کوچک‌مقیاس استفاده‌شده در این مطالعه و شکل ۳ نمایی شماتیک از هندسه تیغه و برش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ماشین کوچک‌مقیاس برش خطی سنگ آزمایشگاه حفاری مکانیزه دانشگاه تربیت مدرس



شکل ۳- نمایی شماتیک از هندسه برش و تیغه اسکنه‌ای

آزمون‌های برش خطی بر روی نمونه‌های بلوکی با حداکثر ابعاد ۱۵×۱۵×۲۰ و در عمق‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر انجام شد. قابل ذکر است که نمونه زغال‌سنگ در قالبی با همین ابعاد به‌وسیله گچ محصور شد تا از شکستگی لبه‌ها در حین برش سنگ جلوگیری شود. به‌منظور انجام آزمون، ابتدا نمونه در داخل گیره دستگاه محکم شده و با اعمال عمق برش حدود ۲ میلی‌متر شیارهای متوالی روی کل سطح نمونه ایجاد شد تا ضمن آماده‌سازی سطح نمونه از تراز بودن آن اطمینان حاصل شود. به‌عنوان مثال، (الف)

شکل ۴ (الف و ب) سطح نمونه را قبل و بعد از آماده‌سازی آن نشان می‌دهد.

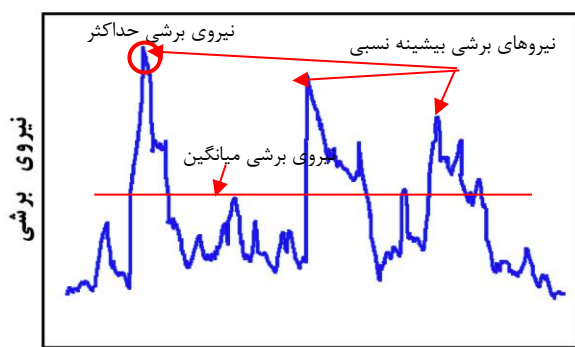
آزمون‌های برش خطی سنگ، روی چهار نمونه ماسه‌سنگ (سازند قم)، مارن (زنجان)، زغال‌سنگ (البرز شرقی) و نمک (گرمسار) با مقاومت خیلی کم تا متوسط انجام شده است. خواص مکانیکی اصلی نمونه‌ها در آزمایشگاه با توجه به استانداردهای *ASTM* و چگالی آن‌ها مطابق دستورالعمل پیشنهادی *JSRM*، اندازه‌گیری شده است [۳۷]–[۴۰]. آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره (*UCS*) روی مغزه‌های با قطر *NX* (۵۴ mm) و نسبت طول به قطر ۲/۵–۲ با آهنگ بارگذاری در محدوده ۰/۵–۱/۰ *MPa/s* و آزمون مقاومت کششی برزیلی (*BTS*) روی مغزه‌های با نسبت طول به قطر ۰/۵ با آهنگ بارگذاری در حدود ۲۰۰ *N/s* انجام شد. برای هر نمونه، حداقل ۵ تکرار برای مقاومت فشاری تک‌محوری و ۱۰ تکرار برای مقاومت کششی انجام شد. خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها در جدول ۱ آمده است. از نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری به مقاومت کششی ماده‌سنگ در جدول ۱، به عنوان شاخص شکنندگی استفاده می‌شود.

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌ها

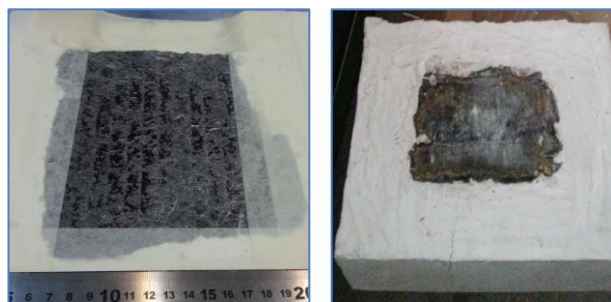
نمونه	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	E (GPa)	ρ (gr/cm ³)	$\frac{\sigma_c}{\sigma_t}$
مارن	۲۲	۳/۲۵	۱/۴۶	۲/۴	۶/۷۷
نمک	۱۸/۷	۳/۸۸	۱/۷۲	۲/۱	۴/۸۲
ماسه‌سنگ	۳۷/۵	۳/۹۵	۵/۳۲	۲/۲	۹/۶۲
زغال‌سنگ	۱۴	۱/۱۸	-	۱/۲۹	۱۱/۸۶

۲-۳- آزمون برش خطی سنگ

آزمون‌های برش‌پذیری سنگ به‌وسیله دستگاه *SSLCM* ساخته‌شده در آزمایشگاه حفاری مکانیزه دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. این دستگاه شامل یک ماشین هیدرولیکی برای تأمین حرکت خطی، دینامومتر متصل شده به پیشانی دستگاه و دیتالاگر به ترتیب برای اندازه‌گیری و ثبت نیروهای برش و یک گیره برای استقرار نمونه است. توان این دستگاه برابر ۵/۹ *kW* و حداکثر کورس آن ۹۰ سانتی‌متر است. همچنین سرعت حرکت خطی دستگاه در دامنه وسیعی قابل تنظیم است. عمق برش را می‌توان با جابجایی لغزنده عمودی روی پیشانی دستگاه با دقت ۰/۱ میلی‌متر تنظیم کرد. میز کار دستگاه در هر دو راستای عمودی و جانبی حرکت می‌کند و به‌این‌ترتیب با حرکت جانبی آن تنظیم دقیق فاصله بین شیارهای مجاور با دقت ۰/۱ میلی‌متر میسر می‌شود. در این آزمون‌ها از یک تیغه اسکنه‌ای فولادی با عرض لبه‌ی (W) ۱۲ میلی‌متر، زاویه برش α صفر و زاویه آزاد β ۱۲ درجه استفاده شد که به‌وسیله‌ی یک

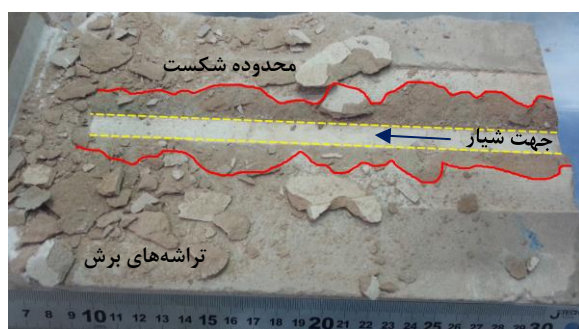


شکل ۵- نمودار نیروی برشی برحسب زمان



شکل ۴- آماده‌سازی سطح نمونه زغال سنگ با ایجاد شیارهای متوالی به وسیله تیغه اسکانه‌ای، الف- قبل از آماده‌سازی و ب) بعد از آماده‌سازی

شکل ۴- آماده‌سازی سطح نمونه زغال سنگ با ایجاد شیارهای متوالی به وسیله تیغه اسکانه‌ای، الف- قبل از آماده‌سازی و ب) بعد از آماده‌سازی



شکل ۶- شیار با عمق ۴ میلی‌متر روی نمونه ماسه‌سنگ و تراشه‌های ایجادشده

پس از آماده‌سازی سطح نمونه، با اعمال عمق برش موردنظر یک شیار روی نمونه ایجاد شده و نیروی برشی در طول مسیر اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. در حین فرایند برش، نیروی برشی اعمال شده روی یک تیغه با توجه به ماهیت شکننده بودن سنگ و تشکیل تراشه‌ها به‌طور مداوم تغییر می‌یابد. شکل ۵ نمونه‌ای از نمودار نیروی برشی برحسب زمان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، نیروی برشی با سه کمیت نیروی برشی حداکثر (حداکثر مقدار نیروی برشی ثبت‌شده برای ایجاد شیار)، نیروی برشی میانگین (مقدار متوسط نیروهای ثبت‌شده) و میانگین نیروهای برشی بیشینه نسبی (مقدار متوسط نیروهای بیشینه نسبی ثبت‌شده در اثر تشکیل تراشه‌ها) قابل اندازه‌گیری است. در این مطالعه از مقدار نیروی برشی حداکثر و نیروی برشی میانگین استفاده شده است. به‌منظور افزایش صحت نتایج و قابلیت تکرار آزمون‌ها، برای هر عمق برش حداقل ۳ بار آزمایش تکرار شد.

در شکل ۶ یک نمونه از شیار ایجادشده روی نمونه ماسه‌سنگ با عمق ۴ میلی‌متر و تراشه‌های تشکیل‌شده در اثر برش خطی سنگ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در اثر اندرکنش بین سنگ و تیغه، سنگ تحت زاویه می‌شکند (زاویه شکست θ ، Breakout angle) و باعث ایجاد یک محدوده شکست با عرض بیشتر از عرض لبه تیغه می‌شود. همه آزمون‌های برش در حالت برش منفرد (Unrelieved cutting) انجام شد، یعنی فاصله بین شیارهای مجاور به‌گونه‌ای انتخاب شد که محدوده شکست آن‌ها هیچ‌گونه همپوشانی نداشته باشد.

پس از هر آزمون، خرده‌های حاصل از برش برای محاسبه انرژی ویژه و اندازه‌گیری شاخص درشتی (Coarseness index) به‌صورت کامل جمع‌آوری و توزین شد.

انرژی ویژه فراگیرترین معیار برای ارزیابی کارایی فرایند حفاری است و یک ارتباط معکوس با کارایی عملیات حفاری دارد. حاصل ضرب نیروی برشی و فاصله حرکت تیغه، مقدار انرژی صرف شده در برش را به دست می‌دهد. با تقسیم این مقدار بر حجم سنگ حاصل از برش در طی این فرایند انرژی ویژه برحسب MJ/m^3 محاسبه می‌شود [۱] (رابطه ۴).

$$SE = \frac{F_c \times L \times \rho}{10 \times M} \quad (4)$$

در این رابطه:

L ، طول شیار برش (cm)

ρ ، چگالی (gr/cm^3)

M ، جرم سنگ کنده‌شده (gr)

F_c ، نیروی برشی (kN)

۳-۳- اندازه‌گیری شاخص درشتی

هندسه خرده‌های حفاری یکی از شاخص‌های ارزیابی کارایی برش است [۲۲]. یکی از روش‌های کارآمد برای بررسی اندازه خرده‌ها، استفاده از تحلیل سرنندی برای رسم منحنی توزیع دانه‌بندی است. با استفاده از این منحنی می‌توان نحوه توزیع اندازه خرده‌ها را بررسی

جدول ۲- نتایج تحلیل سرنندی خرده‌ها برای نمونه ماسه‌سنگ در عمق ۴ میلی‌متر

شماره الک	قطر (mm)	مانده روی الک (%)	مانده تجمعی (%)
۷	۱۶	۷/۶۷	۷/۶۷
۱۶			
۵	۸	۲۰/۸۴	۲۸/۵۱
۱۶			
۴	۴/۷۵	۱۹/۹۳	۴۸/۴۴
۸	۲/۳۶	۲۰/۹۰	۶۹/۳۴
۱۶	۱/۲	۱۰/۹۹	۸۰/۳۳
۳۰	۰/۶	۴/۹۵	۸۵/۲۸
۵۰	۰/۳	۳/۰۷	۸۸/۳۵
۱۰۰	۰/۱۵	۳/۰۸	۹۱/۴۳
زیرالک	-	۸/۵۷	۱۰۰
مجموع		۱۰۰	CI=۵۹۹

۴- نتایج و بحث

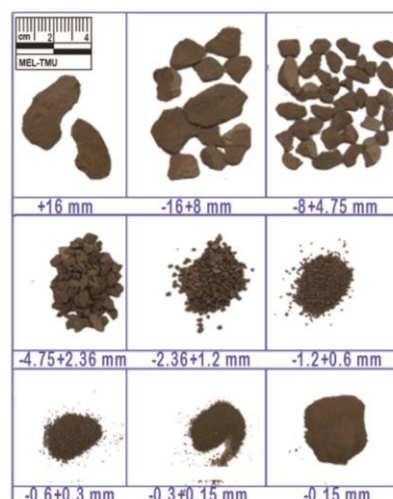
• شاخص درشتی

شاخص درشتی بزرگ‌تر به معنی مقادیر بیشتر ذرات درشت‌دانه خرده‌ها، بازده بیشتر برش و همچنین شکنندگی بیشتر سنگ است [۴۳]. منحنی توزیع دانه‌بندی و شاخص درشتی محاسبه‌شده برای همه نمونه‌ها در عمق برش ۴ میلی‌متر در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، با افزایش اندازه ذرات، مقدار شاخص درشتی افزایش پیدا می‌کند. با دقت در منحنی‌های دانه‌بندی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار شاخص درشتی از ۳۹۹ برای نمک تا ۵۹۹ برای نمونه ماسه‌سنگ، منحنی دانه‌بندی به سمت اندازه ذرات بزرگ‌تر (سمت راست) منتقل می‌گردد و مقدار d_{50} نیز از ۰/۹۳ تا ۵/۰۳ افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عمق برش، مقدار شاخص درشتی به‌طور خطی افزایش می‌یابد (شکل ۹).

کرد. مطالعات متعددی شاخص درشتی (CI) را برای تعیین میزان توزیع خرده‌های حاصل از برش مورد بررسی قرار داده‌اند. راکسبورو و ریسپین (Roxborough & Rispin) [۲۱] برای مطالعه توزیع اندازه ذرات خرده‌سنگ‌های برش‌یافته، با استفاده از تحلیل سرنندی شاخص درشتی را تعریف کردند. شاخص درشتی، یک عدد بدون بعد است که نشان‌دهنده درجه خردشدگی خرده‌های حاصل از برش سنگ بوده و برای اندازه‌گیری اندازه نسبی خرده‌های برش استفاده می‌شود. مجموع درصد تجمعی مواد باقیمانده روی هر الک، بیانگر عدد شاخص درشتی برای هر برش است. باید به این نکته توجه کرد که شاخص درشتی یک اندازه‌گیری استاندارد شده نیست و به تعداد و اندازه الک‌های استفاده‌شده وابسته است. با تغییر تعداد و اندازه الک‌ها، امکان مقایسه مستقیم بین شاخص درشتی وجود ندارد و برای بررسی این مشخصه باید تعداد و اندازه الک‌ها در تمام اندازه‌گیری‌ها یکسان باشد.

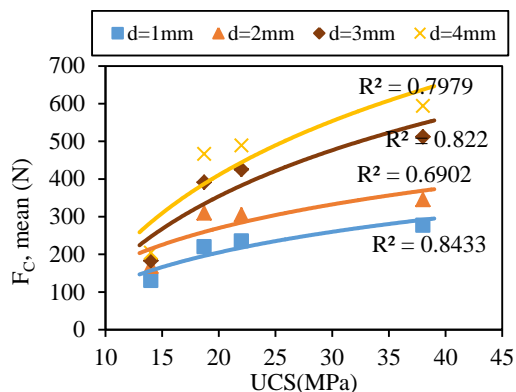
خرده‌های جمع‌آوری‌شده از هر آزمون برش وزن و با استفاده از سری الک‌های با شماره مناسب دانه‌بندی شد تا توزیع دانه‌بندی خرده‌ها و شاخص درشتی به‌دست آید. در شکل ۷ نمونه‌ای از توزیع دانه‌بندی خرده‌های حاصل از برش نمونه ماسه‌سنگ با عمق ۴ میلی‌متر نشان داده شده است.

در این مطالعه بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین قطر دهانه الک مورد استفاده به ترتیب برابر ۱۶ میلی‌متر و ۰/۱۵ میلی‌متر بود. مجموع درصد تجمعی مواد باقیمانده روی هر الک، شاخص درشتی را برای هر برش به دست می‌دهد. به‌عنوان مثال، نحوه محاسبه شاخص درشتی برای ماسه‌سنگ در عمق ۴ میلی‌متر در جدول ۲ آمده است.

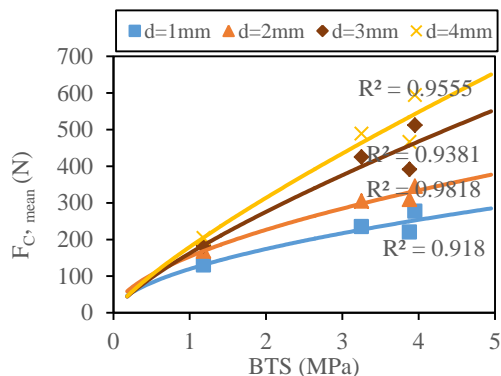


شکل ۷- دانه‌بندی خرده‌های حاصل از برش ماسه‌سنگ در عمق ۴ میلی‌متر

ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی نمونه‌ها با مقدار نیروی برشی موردنیاز برای غلبه بر آن در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ارتباط مستقیمی بین افزایش مقاومت نمونه‌ها و افزایش نیروی برشی وجود دارد.



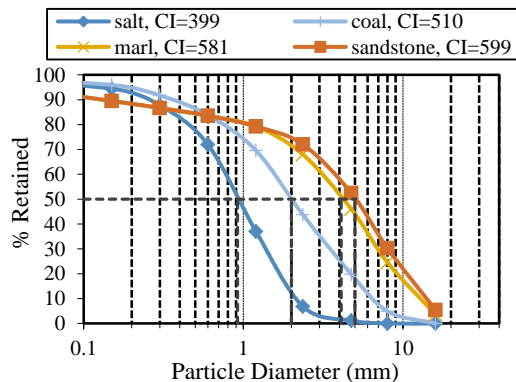
شکل ۱۱- ارتباط بین نیروی برشی و مقاومت فشاری تک‌محوری



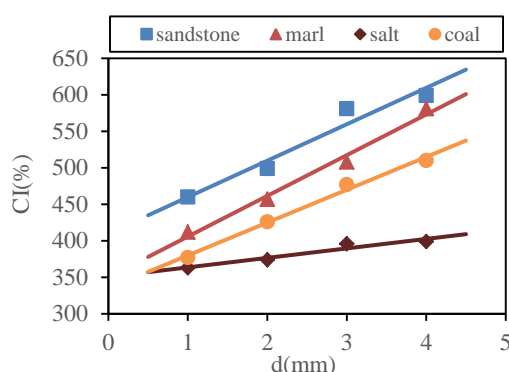
شکل ۱۲- ارتباط بین نیروی برشی و مقاومت کششی

نتایج حاکی از اثر بیشتر مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری روی مقدار نیروی برشی است که این موضوع با نتایج نظریه ایوانس هم‌خوانی دارد.

با استفاده از رابطه ایوانس نیروی برشی نظری برای نمونه‌ها در عمق برش مختلف محاسبه شد و ارتباط آن با نتایج آزمون آزمایشگاهی برش خطی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در همه نمونه‌ها، ارتباط قوی بین نیروی برشی نظری ایوانس و نیروی برشی آزمایشگاهی وجود دارد.



شکل ۸- منحنی دانه‌بندی اندازه ذرات تجمعی مانده روی هر الک و شاخص درشتی برای عمق برش ۴ میلی‌متر

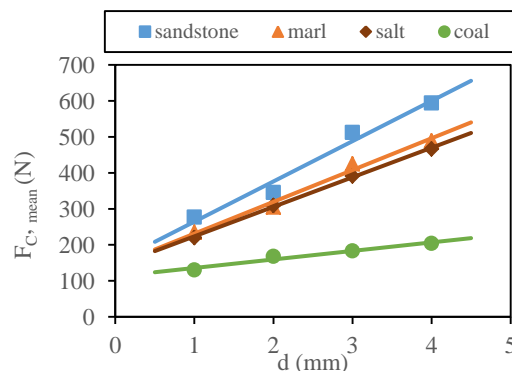


شکل ۹: ارتباط بین عمق برش و مقدار شاخص درشتی

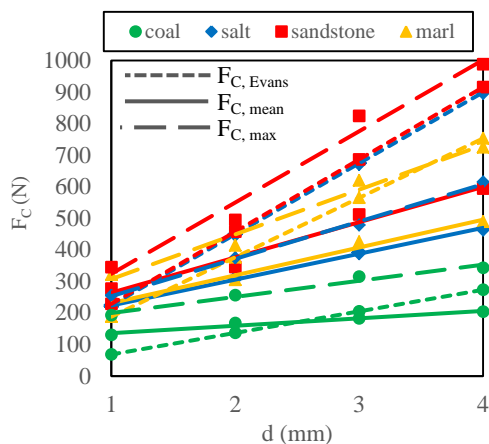
نتایج حاصل از تحلیل سرندی برای محاسبه شاخص درشتی در عمق‌های برش مختلف نشان از یک رابطه خطی و مستقیم بین عمق برش و مقدار این شاخص دارد.

نیروی برشی

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است با افزایش عمق برش نیروی برشی نیز افزایش می‌یابد. ارتباط خطی بین نیروی برشی و عمق برش با نتایج مطالعات پیشین از جمله بیلگین [۱۴] و چوپور (Copur) [۴۴] مطابقت دارد.



شکل ۱۰- ارتباط بین نیروی برشی و عمق برش

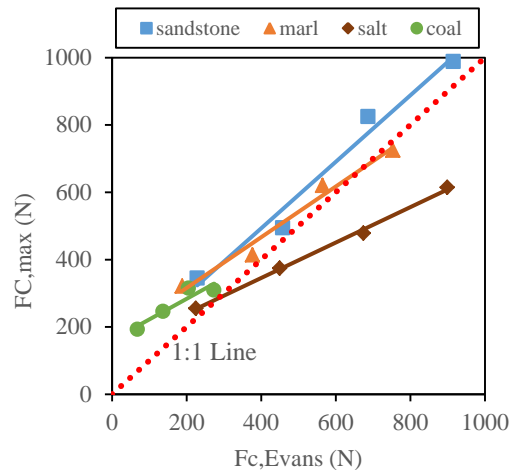


شکل ۱۵- ارتباط بین نیروهای برشی آزمایشگاهی و نظری (ایوانس) با عمق برش

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، با افزایش عمق برش، هر سه نیروی برشی میانگین، نیروی برشی حداکثر و نیروی برشی ایوانس به‌طور خطی افزایش می‌یابد و این نتایج با مطالعات تجربی قبلی از جمله یاشار و ییلماز (Yasar and Yilmaz) [۴۵] همخوانی دارد. همچنین نتایج این مطالعه حاکی از آن است که در یک عمق برش مشخص، معمولاً مقدار نیروی برشی ایوانس کمتر از مقدار نیروی برشی حداکثر و بیشتر از نیروی برشی میانگین به‌دست‌آمده از آزمون برش خطی است.

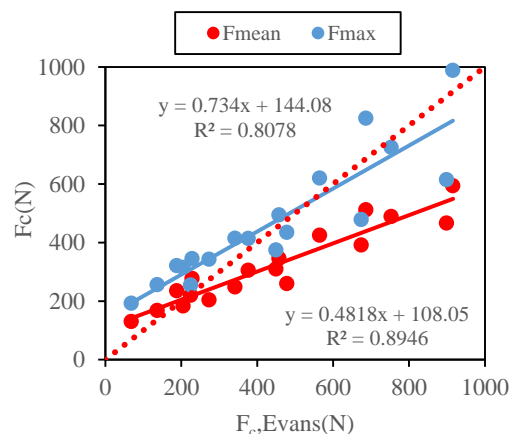
شکل ۱۶ ارتباط بین نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین با عمق برش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عمق برش نسبت بین این نیروها نیز به‌طور خطی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین، نشان‌دهنده سهولت برش سنگ موردنظر است. یک سنگ با نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برش میانگین بزرگ‌تر در مقایسه با یک سنگ با انرژی ویژه یکسان و نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین کمتر، سخت‌تر برش داده می‌شود [۴۶].

می‌توان نتیجه گرفت که نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین در نمونه‌های مختلف بین ۱/۱۶ تا ۱/۴۹ برای عمق برش ۱ میلی‌متر و نزدیک ۱/۷۲ برای عمق برش ۴ میلی‌متر است؛ بنابراین به‌عنوان یک نتیجه‌گیری، مقدار نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین نباید با تغییر عمق برش ثابت در نظر گرفته شود، زیرا این مقدار برای برش‌های عمیق‌تر بیشتر است.



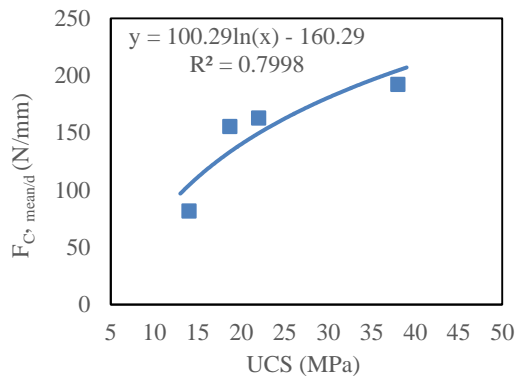
شکل ۱۳- ارتباط بین نیروی برشی آزمون و نیروی برشی ایوانس

در شکل ۱۴ ارتباط بین نیروی برشی ایوانس با نیروهای برشی حداکثر و میانگین نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر نیروی برشی ایوانس حدود ۲ برابر مقادیر نیروی برشی میانگین و ۱/۴ برابر مقادیر نیروی برشی حداکثر است.

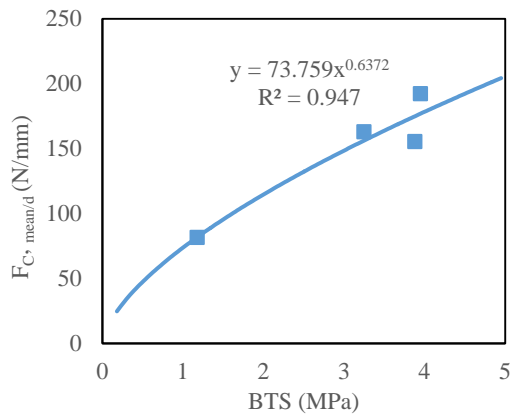


شکل ۱۴- ارتباط بین نیروی برشی میانگین و حداکثر با نیروی برشی ایوانس

در شکل ۱۵ روند تغییر هر سه نیروی برشی نظری ایوانس و نیروهای برشی آزمایشگاهی حداکثر و میانگین با افزایش عمق برش نشان داده شده است.



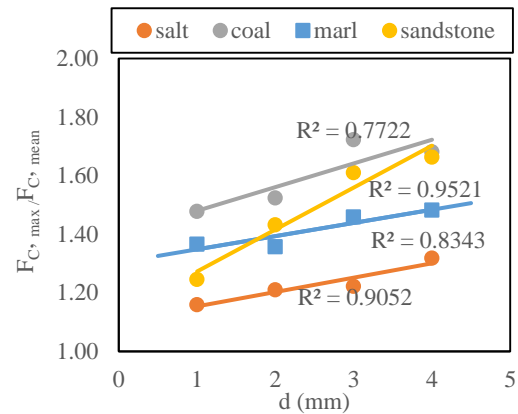
شکل ۱۸- ارتباط بین نیروی برشی ویژه و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها



شکل ۱۹- ارتباط بین نیروی برشی ویژه و مقاومت کششی

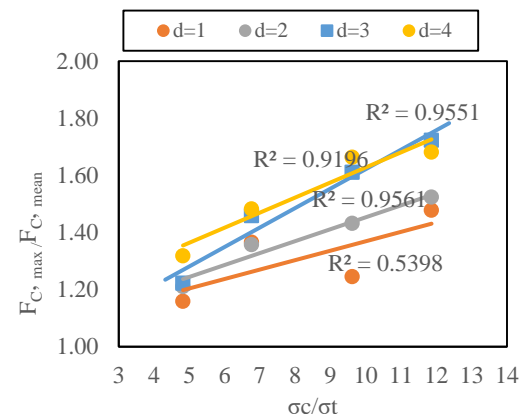
• انرژی ویژه

در یک سنگ مشخص، مقدار کمتر انرژی ویژه به‌عنوان اندازه‌گیری کارایی بیشتر سیستم برش ارزیابی می‌شود؛ اما مهم‌تر از آن، در زمینه ارزیابی قابلیت برش، می‌توان از این پارامتر برای مقایسه قابلیت برش سنگ‌های مختلف و نشان دادن تقریبی نرخ حفاری بالقوه برای نوع ماشین خاص در یک سنگ مشخص استفاده کرد. مطالعات بیلیگین و همکاران [۱]، [۶] نشان داد که به‌طور کلی با افزایش عمق برش انرژی ویژه کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه حاضر نیز تطابق خوبی با نتایج کارهای قبلی دارد و همان‌طور که در شکل ۲۰ نشان داده شده است با افزایش عمق برش انرژی ویژه به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که نمونه نمک ارتباط خطی قوی‌تری ایجاد می‌کند.



شکل ۱۶- ارتباط بین نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین با عمق برش

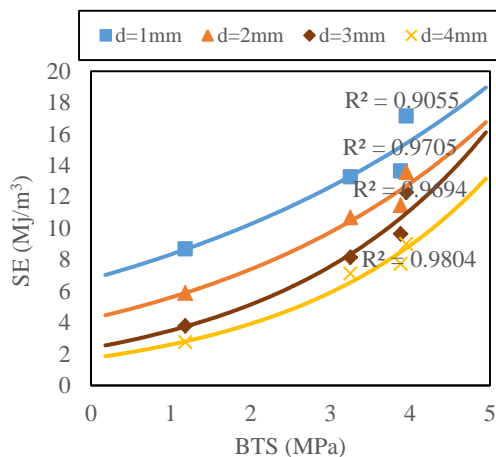
همچنین با افزایش مقدار شکنندگی سنگ، نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین به‌طور خطی افزایش می‌یابد (شکل ۱۷). کمترین مقدار این نسبت مربوط به نمک با شکنندگی ۴/۸۲ و بیشترین مقدار آن مربوط به زغال‌سنگ با شکنندگی ۱۱/۸۶ است.



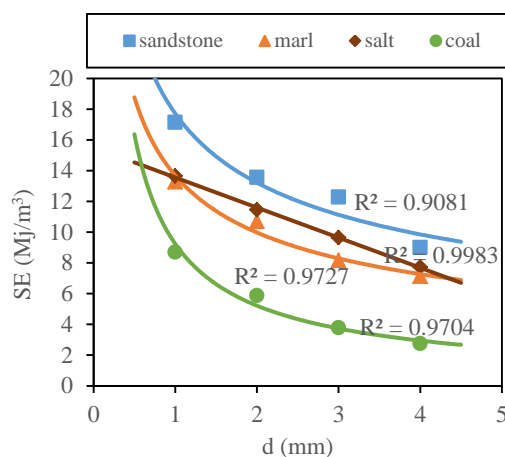
شکل ۱۷- ارتباط بین نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین با شکنندگی سنگ

• نیروی برشی ویژه

همان‌طور که قبلاً بیان شد، در تیغه خراشی با افزایش عمق برش، نیروی برشی نیز به‌طور خطی افزایش می‌یابد. با توجه به این ارتباط خطی، پارامتر عملکرد برش با نرمال کردن مقدار این نیرو نسبت به عمق برش تعریف می‌شود. پارامتر نیروی برشی ویژه به‌عنوان نیروی برشی در واحد عمق برش و معمولاً برحسب (N/mm) بیان می‌شود [۷]. گشتاور و توان موردنیاز برای برش سنگ‌های با مقاومت مختلف در یک نرخ مشخص را می‌توان با این پارامتر تخمین زد. ارتباط بین نیروی برشی ویژه و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی نمونه‌ها در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری و کششی، نیروی برشی ویژه نیز افزایش می‌یابد.



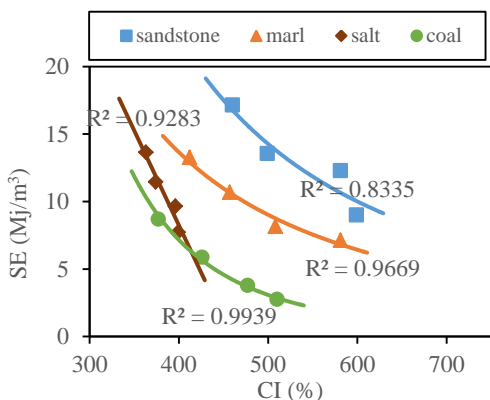
شکل ۲۲- ارتباط بین انرژی ویژه و مقاومت کششی



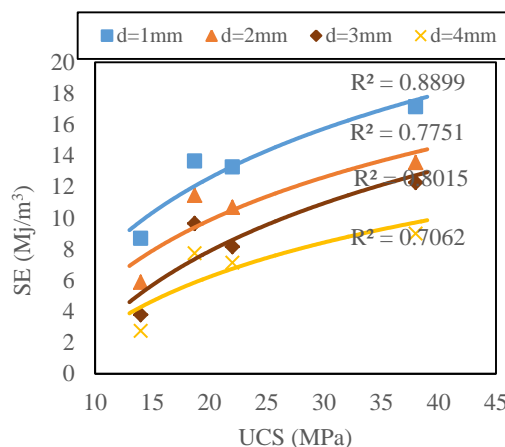
شکل ۲۰- ارتباط بین انرژی ویژه و عمق برش

با افزایش مقدار شاخص درستی و به عبارتی افزایش درصد تراشه‌های با اندازه بزرگ‌تر در خرده‌های حفاری، انرژی ویژه مصرفی نیز کاهش می‌یابد. این نتیجه در شکل ۲۳ نشان داده شده است. رابطه خطی قوی‌تری برای نمونه نمک را می‌توان به علت بافت متفاوت آن و شکست یکنواخت‌تر پیوندهای یونی Na^+Cl^- دانست.

از طرف دیگر، شکل ۲۱ و شکل ۲۲ تغییر انرژی ویژه برای مقادیر مختلف مقاومت کششی و فشاری را نشان می‌دهد. مقدار انرژی ویژه تقریباً به‌طور خطی با افزایش مقاومت کششی و فشاری افزایش می‌یابد. مشابه نیروی برشی و نیروی برشی ویژه، انرژی ویژه نیز ارتباط قوی‌تری با مقاومت کششی دارد.



شکل ۲۳- ارتباط بین انرژی ویژه و شاخص درستی

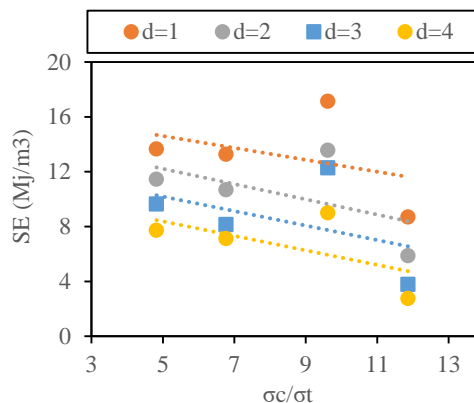


شکل ۲۱- ارتباط بین انرژی ویژه و مقاومت فشاری تک‌محوری

ارتباط بین انرژی ویژه و شکنندگی (نسبت σ_c/σ_t) نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه در شکل ۲۴ نشان داده شده است. با نگاهی دقیق به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش شاخص شکنندگی نمونه، یک روند کلی کاهشی در مقدار انرژی ویژه وجود دارد. در اینجا فقط یک استثنا وجود دارد و آن نمونه ماسه‌سنگ است؛ دلیل این امر ممکن است بافت سنگ و مسائل پیوند بین دانه‌های آن باشد.

این نسبت مربوط به نمک با شکنندگی ۴/۸۲ و بیشترین مقدار آن مربوط به زغال با شکنندگی ۱۱/۸۶ است. همچنین یک رابطه کاهشی بین انرژی ویژه و شکنندگی سنگ که با نسبت σ_c/σ_t نشان داده می‌شود وجود دارد، اما به خاطر تاثیر نوع سنگ و بافت آن با استثنائاتی نیز مواجه می‌شود. قابل ذکر است که آزمایش‌های تکمیلی دیگری بر روی انواع مختلف سنگ به منظور مشاهده تاثیر اندازه دانه و مکانیزم‌های بهم‌پیوستگی داخلی بر روی رفتار برشی سنگ انجام خواهد شد.

در مجموع نتایج مطالعات و تطابق نتایج با مشاهدات در معادن و کاربری‌های واقعی و همین‌طور مطالعات قبلی نشانگر توانمندی دستگاه ساخته‌شده در اندازه‌گیری نیروها و انرژی ویژه حفاری و انجام مطالعات مشابه بوده و امکان بهینه‌سازی ابزارها و ماشین‌های حفاری را در کاربری‌های مختلف در معادن و صنعت تونل به کشور می‌دهد.



شکل ۲۴- ارتباط بین انرژی ویژه و شکنندگی

۵- نتیجه‌گیری

آزمون‌های آزمایشگاهی برش خطی سنگ و مدل‌های نظری دو روش اصلی برای تخمین نیروهای وارد بر تیغه در حین برش سنگ است. نتایج آزمون برش سنگ، مطابق با مطالعات قبلی انجام‌شده مرتبط با نیروی برشی، تابعی از مقاومت سنگ، هندسه برش و شکنندگی سنگ است. این امر با ارزیابی انرژی ویژه و مقایسه نتایج با نظریه‌های گذشته نشان داده می‌شود.

نتایج این مطالعه نشان داد که با افزایش عمق برش از ۱ تا ۴ میلی‌متر:

(۱) هر سه نیروی برشی میانگین، نیروی برشی حداکثر و نیروی برشی ایوانس به‌طور خطی افزایش می‌یابد و معمولاً مقدار نیروی برشی ایوانس کمتر از مقدار نیروی برشی حداکثر و بیشتر از نیروی برشی میانگین به‌دست‌آمده از آزمون برش خطی است.

(۲) نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین در نمونه‌های مختلف به‌طور خطی افزایش می‌یابد و بین ۱/۱۶ تا ۱/۴۹ برای عمق برش ۱ میلی‌متر و نزدیک ۱/۷۲ برای عمق برش ۴ میلی‌متر است.

(۳) انرژی ویژه در نمونه‌های ماسه‌سنگ، مارن و زغال به‌طور غیرخطی کاهش می‌یابد و روند کاهش در نمونه نمک ارتباط خطی قوی‌تری ایجاد می‌کند.

(۴) اندازه ذرات خرده‌های حاصل از برش و مقدار شاخص درشتی (CI) با افزایش عمق برش افزایش می‌یابد و منجر به کاهش انرژی ویژه می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی حاکی از ارتباط مستقیم مقاومت‌های کششی و فشاری با نیروی برشی و انرژی ویژه است. همچنین، تأثیر بیشتر مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری روی مقدار نیروی برشی با نتایج نظریه ایوانس هم‌خوانی دارد.

با افزایش مقدار شکنندگی سنگ، نسبت نیروی برشی حداکثر به نیروی برشی میانگین به‌طور خطی افزایش می‌یابد. کم‌ترین مقدار

۶- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
σ_c	MPa	مقاومت فشاری تک‌محوری
σ_t	MPa	مقاومت کششی
τ	MPa	مقاومت برشی
E	GPa	مدول یانگ
F_c	N	نیروی برشی
SE	Mj/m ³	انرژی ویژه
w	mm	عرض تیغه
d	mm	عمق برش
L	cm	طول شیار برش
ρ	gr/cm ³	چگالی
β	°	زاویه آزاد
α	°	زاویه برش
Θ	°	زاویه شکست
n	-	ضریب توزیع تنش
φ	°	زاویه اصطکاک داخلی
M	gr	جرم سنگ کنده‌شده
η	°	زاویه اصطکاک بین سنگ و تیغه
CI	-	شاخص درشتی

۷- منابع

- cutting characteristics of some medium and high strength rocks,” PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, U.K, 1977.
- [15] K. G. Hurt and I. Evans, “A laboratory study of rock cutting using point attack tools,” in *The 21st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, 1980.
- [16] N. G. Yilmaz, M. Yurdakul, and R. M. Goktan, “Prediction of radial bit cutting force in high-strength rocks using multiple linear regression analysis,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 2007.
- [17] I. Mc Feat-Smith, “Correlation of Rock Properties and Tunnel Machine Performance in Selected Sedimentary Rocks,” PhD thesis, University of Newcastle upon Tyne, 1975.
- [18] N. Bilgin, M. A. Demircin, H. Copur, C. Balci, H. Tuncdemir, and N. Akcin, “Dominant rock properties affecting the performance of conical picks and the comparison of some experimental and theoretical results,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 139–156, 2006.
- [19] D. Tumac, H. Copur, C. Balci, S. Er, and E. Avunduk, “Investigation into the Effects of Textural Properties on Cuttability Performance of a Chisel Tool,” *Rock Mech. Rock Eng.*, vol. 51, no. 4, pp. 1227–1248, 2018.
- [20] J. S. Barker, “A laboratory investigation of rock cutting using large picks,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 519–534, 1964.
- [21] F. F. Roxborough and A. Rispin, “A laboratory investigation into the application of picks for mechanized tunnel boring in the lower chalk,” *Min. Eng.*, vol. 133, no. 1, p. 13, 1973.
- [22] A. Bruland, “Hard Rock Tunnel Boring,” PhD thesis, Department of Building and Construction Engineering, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway, 1998.
- [23] S. Heydari, J. Khademi Hamidi, M. Monjezi, and A. Eftekhari, “An investigation of the relationship between muck geometry, TBM performance and operational parameters: A case study in Golab II water transfer tunnel,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, 2019.
- [24] M. Marji, H. Hosseini Nasab, and A. Hossein Morshedi, “Numerical modeling of crack propagation in rocks under tbn disc cutters,” *J. Mech. Mater. Struct.*, vol. 4, no. 3, pp. 605–627, 2009.
- [25] H. Haeri, M. F. Marji, and K. Shahriar, “Simulating the effect of disc erosion in TBM disc cutters by a semi-infinite DDM,” *Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 6, pp. 3915–3927, 2015.
- [26] H. Y. Liu, S. Q. Kou, and P. Lindqvist, [1] N. Bilgin, H. Copur, and C. Balci, *Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries*. 2014.
- [2] C. D. Pomeroy, “The effect of lateral pressure on the cutting of coal by wedge shaped tools,” in *Proceedings of the congress on mechanical properties of non-metallic brittle materials. Butter Worths Scientific Publications, London*, 1958, pp. 469–479.
- [3] I. Evans and S. A. F. Murrell, “The forces required to penetrate a brittle material with a wedge-shaped tool,” *Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials*. Pergamon Press, London, pp. 432–439, 1958.
- [4] I. Evans and C. D. Pomeroy, *The strength, fracture and workability of coal*. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [5] F. F. Roxborough, “Cutting rocks with picks,” *Min. Eng.*, pp. 445–455, 1973.
- [6] F. F. Roxborough and H. R. Philips, “Experimental studies on the excavation of rocks using picks,” in *Advances in rock mechanics, Proceedings of the third ISRM congress*, 1974, pp. 1407–1412.
- [7] F. F. Roxborough, “The role of some basic rock properties in assessing cuttability,” in *Seminar on Tunnels: Wholly Engineered Structures*, 1987.
- [8] M. Mellor, “Mechanics of Cutting and Boring. Part 4. Dynamics and energetics of parallel motion tools,” Cold Regions Research and Engineering LAB, Hanover, NH, 1977.
- [9] J. Rostami, “Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure.” Colorado School of Mines, Golden, 1997.
- [10] N. Bilgin, T. Seyrek, and K. Shahriar, “Roadheader performance in Istanbul, Golden Horn clean-up contributes valuable data,” *Tunnels Tunn.*, vol. 20, no. 6, pp. 41–44, 1988.
- [11] N. Bilgin, T. Seyrek, E. Erding, and K. Shahriar, “Roadheaders glean valuable tips for Istanbul Metro,” *Tunnels Tunn. Int.*, vol. 22, no. 10, 1990.
- [12] C. Balci and N. Bilgin, “Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines,” *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 44, no. 3, pp. 468–476, 2007.
- [13] I. Evans, “Line spacing of picks for effective cutting,” in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, vol. 9, no. 3, pp. 355–361.
- [14] N. Bilgin, “Investigations into the mechanical

- [37] ASTM D4543-08, "Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances," *Annu. B. ASTM Stand. Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA*, 2008.
- [38] ASTM D2938-95, "Standard test method for unconfined compressive strength of intact rock core specimens," *Annu. B. ASTM Stand. Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA*, 1995.
- [39] ASTM D3967-95, "Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens," *Annu. B. ASTM Stand. Am. Soc. Test. Mater. West Conshohocken, PA*, 1995.
- [40] R. Ulusay and J. A. Hudson, "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006," *Comm. Test. methods. Int. Soc. Rock Mech. Compil. arranged by ISRM Turkish Natl. Group, Ankara, Turkey*, vol. 628, 2007.
- [41] M. Mohamadi, "cuttability of rock," 1398.
- [42] S. Alimadad, "assesment of rock cuttability," 1395.
- [43] H. Tuncdemir, N. Bilgin, H. Copur, and C. Balci, "Control of rock cutting efficiency by muck size," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 45, no. 2, pp. 278-288, 2008.
- [44] H. Copur, "Linear stone cutting tests with chisel tools for identification of cutting principles and predicting performance of chain saw machines," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 104-120, 2010.
- [45] S. Yasar and A. O. Yilmaz, "Drag pick cutting tests: A comparison between experimental and theoretical results," *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 893-906, 2018.
- [46] N. G. W. Cook, "Analysis of hard-rock cuttability for machines," 1970.
- "Numerical simulation of the fracture process in cutting heterogeneous brittle material," *Int. J. Numer. Anal. methods Geomech.*, vol. 26, no. 13, pp. 1253-1278, 2002.
- [27] J.-S. Lin *et al.*, "Numerical modeling of rock cutting," in *12th ISRM congress*, 2011.
- [28] I. Evans, "Theoretical aspects of coal ploughing," in *Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials*, 1958, pp. 451-468.
- [29] I. Evans, "A theory of the basic mechanics of coal ploughing," in *Mining Research*, Elsevier, 1962, pp. 761-798.
- [30] Y. Nishimatsu, "The mechanics of rock cutting," in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1972, vol. 9, no. 2, pp. 261-270.
- [31] Merchant ME, "Basic mechanics of the metal cutting process," *J. Appl. Mech.*, pp. 75-168, 1944.
- [32] F. F. Roxborough, P. King, and E. J. Pedroncelli, "Tests on the cutting performance of a continuous miner," *J. South African Inst. Min. Metall.*, vol. 81, pp. 9-26, 1981.
- [33] R. M. Goktan, "Prediction of drag bit cutting force in hard rocks," in *Proceedings of the 3rd international symposium on mine mechanization and automation, Golden, Colorado*, 1995, pp. 10-31.
- [34] I. Evans, "A theory of the cutting force for point-attack picks," *Int. J. Min. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 63-71, 1984.
- [35] F. F. Roxborough and Z. C. Liu, "Theoretical considerations on pick shape in rock and coal cutting," in *Proceedings of the sixth underground operator's conference, Kalgoorlie*, 1995, pp. 189-193.
- [36] R. M. Goktan, "A suggested improvement on Evans' cutting theory for conical bits," in *Proceedings of fourth symposium on mine mechanization automation, 1997*, vol. 1, pp. 57-61.



Experimental Study on the Performance of Chisel Tools in Cutting Weak to Moderate Rocks

Mehdi Mohammadi¹; Jafar Khademi Hamidi²; Jamal Rostami³; Kamran Goshtasbi⁴

1, 2, 4- Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- Mining Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, CO, USA

Received: 15 July 2019; Accepted:

Keywords

Chisel Tools
Rock Cuttability
Linear Cutting Machine (LCM)
Evans's Theoretical Method

Final English Extended Abstract

Summary

This study deals with an experimental study to determine the performance of chisel tools by performing a set of small-scale linear cutting tests. The average and maximum cutting forces are measured and compared with Evans's theoretical values. Also, the cutter force and specific energy values are correlated with rock properties. The findings showed a good agreement with previous studies.

Introduction

To date, various methods have been developed and introduced to determine the rock cuttability and machine performance, such as measuring the forces on the cutting tool, calculation of specific cutting force (F_c/d) and specific energy (SE) based on measured forces during the test. One of the most important factors in the design of excavation machines is the ratio of maximum cutting force to mean cutting force, which is related to the depth of cut.

Methodology and Approaches

Linear cutting tests were carried out in unrelieved mode at cutting depth of 1, 2, 3 and 4 mm, on four rock samples (sandstone, marl, salt, and coal), ranging from very low to moderate strength. Each cut is replicated at least 3 or 4 times. The magnitude of cutting force (F_c) generated on the front edge of chisel tool during cutting was recorded and the specific energy calculated based on it.

Results and Conclusions

It was found in this study that, as the depth of cut increases, both laboratory (maximum and mean) and theoretical cutting force increase directly. Usually the theoretical cutting force is between the mean and maximum cutting force obtained with the LCM. The ratio of maximum cutting force to mean value was linearly correlated with cutting depth for different samples and varied between 1.16 to 1.49 for $d=1$ mm and near 1.7 for $d=4$ mm. Also, this ratio increased with increasing brittleness value (σ_c/σ_t). The laboratory results indicated that a direct correlation exists between specific energy and cutting force with uniaxial compressive strength and Brazilian tensile strength. Furthermore, these findings showed that the tensile strength is more affective on cutting force than compressive strength which supports the findings of Evans. Finally, the results of studies and matching of results with observations in mines and actual applications, as well as previous studies, indicate the capability of the LCM made in Tarbiat Modares University to measurement of cutting forces and energy. Therefore, it is possible to optimize the excavation tools and machines with different applications in mining and tunnel industries in Iran.