



مقاله پژوهشی

ارزیابی برش پذیری ماسه سنگ ها بر اساس ویژگی های بافت سنگ و پارامترهای ژئومکانیکی

پوریا حیدریان^{۱*}، محمدرضا آصف^۲، جعفر خادمی حمیدی^۳

۱- پژوهشکده سوانح طبیعی، گروه مخاطرات زمین شناختی، ایران

۲- گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، ایران

۳- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(دریافت: ۱۱ شهریور ۱۴۰۴، بازنگری: ۲۵ آبان ۱۴۰۴، پذیرش: ۲۳ دی ۱۴۰۴)

چکیده

روش های حفر مکانیزه جایگزین مناسبی برای روش های حفر سنتی محسوب می شوند. از سویی دیگر به کارگیری موفق این فناوری ها در پروژه های معدنی و عمرانی مستلزم شناخت برش پذیری سنگ و تطابق شرایط زمین با طرح ماشین است. در حفاری مکانیکی، منظور از برش پذیری سنگ، راحت یا مشکل بودن شکست (برش) سنگ به وسیله ابزار برش است که توسط انرژی ویژه برش و نیروهای برشی بیان می شود و تابع ویژگی های ژئومکانیکی و بافت سنگ است. در این تحقیق با استفاده از داده های آزمایشگاهی به دست آمده از ویژگی های فیزیکی، مکانیکی، بافتی و نیروی برشی نمونه های سنگ بکر از سازندهای متنوع (قرمز بالایی، لالون، گورپی و هزاردره) در نقاط مختلف کشور (تهران، قم و خوزستان)، سعی شده است تا ارزیابی دقیقی از برش پذیری سنگ ها با کمک این پارامترها بر اساس روش های آماری انجام شود. علاوه بر ویژگی های مکانیکی رایج، ویژگی های بافتی نمونه ها با تهیه و مطالعه مقطع نازک نمونه سنگ ها و کمی سازی پارامترهای آن تعیین شد. انرژی ویژه مهم ترین شاخص برش پذیری سنگ ها شناخته می شود که برای تعیین آن از آزمایش برش خطی کوچک مقیاس استفاده شد. در این تحقیق با کمک تحلیل رگرسیون خطی و چندمتغیره چگونگی همبستگی شاخص برش پذیری با سایر پارامترهای ژئومکانیکی و بافتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحلیل ها نشان دهنده طیف متنوعی از روابط بین پارامترهای ژئومکانیکی و بافتی با برش پذیری در ماسه سنگ ها و سنگ های آذرینیتی مورد مطالعه است. این روابط شامل همبستگی مستقیم، همبستگی غیرمستقیم و در برخی موارد، عدم ارتباط آماری معنادار میان این پارامترها است. بر همین اساس به منظور ارزیابی سریع تر و دقیق تر، شاخص برش پذیری سنگ بکر اصلاح شده با استفاده از پارامترهای بافتی و ژئومکانیکی مؤثر ارائه شد.

کلمات کلیدی

برش پذیری، برش خطی، ضریب بافتی، انرژی ویژه، تحلیل رگرسیون، شاخص برش پذیری اصلاح شده

*عهده دار مکاتبات: phpheidaryan@gmail.com

DOI: 10.22034/anm.2026.23606.1695

۱- مقدمه

در جوامع صنعتی برای معدن‌کاری و پروژه‌های زیربنایی مثل راه‌آهن و بزرگراه نیاز به حفاری پوسته زمین بسیار متداول است. نیاز به حفاری، موازی با توسعه فناوری‌های مختلف و تقاضای جوامع به تدریج افزایش می‌یابد. این نیاز بعد از جنگ جهانی دوم بیشتر شده است به همین دلیل توسعه‌های زیادی به‌خصوص در روش حفاری مکانیزه انجام شده است. در بسیاری از طرح‌های بزرگ‌مقیاس روش‌های حفر مکانیزه از نقطه‌نظر ایمنی، نرخ تولید (پیشروی) و زمان‌بندی پروژه، نسبت به روش حفر کلاسیک برتری دارد. از سویی دیگر، به‌کارگیری موفق این فناوری‌ها در پروژه‌های معدنی و عمرانی مستلزم شناخت برش‌پذیری سنگ و تطابق طرح ماشین با شرایط زمین است. یکی از روش‌های ارزیابی برش‌پذیری سنگ، تهیه نمونه از محل پروژه و انجام آزمون‌های برش سنگ در آزمایشگاه است.

خصوصیات مقاومتی سنگ بکر تابع ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ است؛ اما خصوصیات مقاومتی توده سنگ را می‌توان از طریق آنالیز ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها به دست آورد. در حفاری مکانیکی باید شناخت قبلی از برش‌پذیری سنگ وجود داشته باشد و از آن برای انتخاب و طراحی ماشین حفاری و پیش‌بینی عملکرد آن استفاده کرد. در ادبیات فنی موضوع، دو واژه قابلیت برش (برش‌پذیری^۱) و قابلیت حفاری (حفرپذیری^۲) 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 قابل‌مقایسه است. قابلیت حفاری، پیش‌بینی سرعت حفر و نفوذ یک ماشین حفار در توده سنگ است. راکسپورو (۱۹۸۷) برش‌پذیری سنگ را با نیروی ویژه برش^۳ (SFC)، نیروی ویژه نرمال^۴ (SFN) و انرژی ویژه برش^۵ (SE) تعریف کرده و نرخ سایش ابزار برش را برای شرایط زمین‌شناسی معرفی کرده است [۱]. نیروی ویژه برش، میانگین نیروهای عمل‌کننده بر روی ابزار برش برای برش دادن واحد عمق در جهت برش تعریف می‌شود. نیروی برش به‌طور وسیعی برای تعیین میزان گشتاور دستگاه حفاری استفاده می‌شود در مقابل نیروی نرمال برای تعیین ظرفیت نیروی پیشران بکار می‌رود. انرژی ویژه (SE) یکی از بهترین شاخص‌ها برای

کارآمدی برش سنگ است [۲]. شناسایی دقیق پارامترهای بافتی سنگ و ارزیابی تأثیر آن‌ها در پیش‌بینی برش‌پذیری سنگ بسیار مؤثر است. ضریب بافتی^۶ (TC) به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای کمی بافت سنگ شناخته می‌شود؛ اما به دلیل آنکه تنها در تعیین آن پارامترهای هندسی لحاظ شده است به‌تنهایی قادر به پیش‌بینی برش‌پذیری سنگ نیست. همچنین تعیین پارامترهای آن بسیار زمان‌بر و دارای خطای میکرومتریک است؛ بنابراین ارزیابی قابلیت برش سنگ بدون شناخت سایر پارامترهای بافتی مؤثرتر ممکن است باعث تخمین نادرست (کم یا زیاد) قابلیت برش سنگ شود که همین امر منجر به انتخاب نادرست ابزار برش و دستگاه حفاری می‌شود و تأثیر بسیار زیادی بر زمان‌بندی پروژه و شرایط اقتصادی آن خواهد گذاشت.

در زمینه ویژگی‌های بافتی، رابطه و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های مکانیکی و برش‌پذیری سنگ‌ها تحقیقات گسترده‌ای توسط محققین مختلف انجام شده است. اولسن [۳] بعد از انجام مطالعاتی در این زمینه پیشنهاد داده است که یک رابطه خطی بین تنش تسلیم و مربع ریشه میانگین اندازه دانه‌ها برای سنگ مرمر وجود دارد. هوارد و رونالد [۴] تئوری ضریب بافتی (TC) را توسعه دادند که با کمک آن می‌توان تغییرات ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها را با ویژگی‌های بافتی سنگ تعیین کرد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که هرچقدر تماس بین دانه‌ها قوی‌تر باشد و تراکم آرایش دانه‌ها بیشتر باشد مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ هم بیشتر خواهد بود. پریکرل [۵] اثر اندازه دانه بر روی مقاومت را بررسی کرد و نشان داد که یک رابطه لگاریتمی معکوس بین اندازه دانه و مقاومت سنگ وجود دارد. حیدریان و همکاران [۶] نشان دادند که ویژگی‌های مکانیکی تعدادی از سنگ‌های رسوبی تحت تأثیر ویژگی‌های بافتی آن‌ها است. اولسای [۷] گزارش کرده است که ویژگی‌های بافتی در ظاهر بسیار مهم‌تر از ترکیب کانی‌شناسی می‌باشند خصوصاً برای نشان دادن رفتار مکانیکی سنگ‌ها [۸].

طغزل و ظریف [۹] همچنین تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را بر روی ویژگی‌های مهندسی آن‌ها بررسی کرده و گزارش کردند که نوع تماس، شکل دانه و اندازه دانه‌ها به‌طور مشخصی بر روی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های گرانیتی اثرگذار است. طغزل و ظریف، یوسف و زبیدی و توماک و همکاران [۹-۱۱] در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که بین اندازه دانه و مقاومت تراکمی

تک‌محوری سنگ رابطه عکس وجود دارد؛ یعنی با کاهش اندازه ذرات مقاومت تراکمی تک‌محوری افزایش می‌یابد. تحقیقات گسترده‌ای که توسط رایزنان [۱۲] انجام شد نشان داد مقاومت سنگ هنگامی که ابعاد دانه‌ها بیشتر می‌شود، کاهش می‌یابد. لیو و همکاران [۱۳] مشاهده کردند که اندازه بزرگ‌تر دانه (مساحت) مقاومت گرانیات را کاهش می‌دهد در حالی که مرزهای بزرگ‌تر دانه‌ها (محیط) مقاومت سنگ را بهبود می‌بخشد. اوندل و همکاران [۱۴] همچنین نشان دادند که فراوانی فنوکریستال‌ها (پلاژیوکلاز و آمفیبول) دارای یک اثر مثبت بر روی مقاومت سنگ‌های آتش‌فشانی است. آن‌ها نشان دادند که علت آن، بالا بودن مدول الاستیسیته فنوکریستال‌ها در مقایسه با کانی‌های زمینه سنگ است. همتی و همکاران [۱۵] همچنین نشان دادند که ترک‌های القایی ناشی از تنش، تمایل به خمش یا گسترش در طول مرز اطراف فنوکریستال‌ها دارند. همچنین عده‌ای دیگر از محققان هستند که نتایج تحقیقات آن‌ها با موارد بالا متناقض است از جمله [۱۶-۱۸، ۵۹] که علت آن‌ها ممکن است متفاوت بودن منشأ سنگ‌ها باشد.

علی‌مددی و همکاران [۱۹] بیان می‌کنند که تغییرات اندازه دانه، شکل دانه و کانی‌شناسی را می‌توان در امتداد با میکرو ترک‌ها و سطوح ضعف به‌عنوان منبع ناهمگنی سنگ در نظر گرفت که سبب کاهش مقاومت مصالح سنگ می‌شوند. مطالعات بر پایه مدل‌سازی نشان می‌دهد که حداکثر مقاومت گرانیات می‌تواند به‌صورت معکوسی تحت تأثیر ناهمگنی هندسی [۲۰]، کانی‌شناسی [۲۱] و توزیع اندازه دانه [۲۲] باشد. رایزنان [۱۲] گزارش داد که توزیع یکنواخت بلورها سبب بهبود ویژگی‌های مکانیکی گرانیات می‌شود اما ساجید و عارف [۲۳] و لینکوئیست و همکاران [۲۴] پیشنهاد کردند که توزیع پراکنده اندازه دانه ممکن است باعث افزایش مقاومت گرانیات و کرنات‌های بلورین شود.

در زمینه پیش‌بینی عملکرد حف‌پذیری سنگ‌ها و تعیین پارامترهای شاخص آن از جمله انرژی ویژه (SE) و نیروهای عمل‌کننده بر روی ابزار برشی، عده‌ای دیگر از محققین مطالعات مختلفی انجام داده‌اند از جمله راکسبورو و همکاران [۲۵] بر روی تئوری برش ایونز اصلاحاتی انجام دادند و یک مدل انرژی توسعه‌یافته توسط رانمن (۱۹۸۵) به‌منظور تخمین نیروهای حداکثر و میانگین به ازای واحد طول برش ارائه دادند. اروزی و ولر [۲۶] رابطه بین TC و نرخ حفاری بر

روی ماسه‌سنگ‌ها را بررسی کردند آن‌ها نشان دادند که TC و مؤلفه‌های آن‌ها اثر مستقیمی بر روی حف‌پذیری، ویژگی‌های مکانیکی و عملکرد سایشی سنگ‌ها دارد همچنین آن‌ها پیشنهاد کردند که ویژگی‌های دیگر سنگ‌ها از جمله درجه و نوع سیمان شدگی و پیوند ساختاری در TC، محاسبه و لحاظ گردد. بالچی و بیلگین [۲۷] یک محدوده وسیعی آزمایش برش خطی سنگ تمام‌مقیاس بر روی انواع مختلف سنگ‌ها انجام دادند و نشان دادند که مقدار نیروی برش اندازه‌گیری شده تطابق خوبی با مقاومت کششی و تراکمی سنگ‌ها دارد. همچنین مشخص گردید که ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی سنگ تحت تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی و بافتی سنگ است [۲۸، ۵۸] در حالی که روابط معناداری بین این دو پارامتر در مقیاس میکرو و ماکرو در چندین تحقیق مختلف گزارش شده است [۲۹-۳۱، ۱۰]. رابطه بین انرژی ویژه به‌دست‌آمده از آزمایش برش سنگ کوچک‌مقیاس را با شاخص تردی که در ارتباط با مقاومت کششی و تراکمی است، بررسی کردند. بالچی و همکاران [۳۲] دریافتند که با استفاده از UCS و مقاومت کششی برزیلی (BTS) می‌توان تخمین معقول‌تری از انرژی ویژه بهینه داشت. بالچی و بیلگین [۲۷] در تحقیقات خود نشان دادند که انرژی ویژه بهینه (SE) به‌دست‌آمده از آزمایش تمام‌مقیاس را می‌توان به‌صورت معقولی از طریق آزمایش برش سنگ کوچک‌مقیاس به‌دست آورد همچنین آن‌ها با ارائه یک رابطه تجربی پیشنهاد دادند که از آن برای تخمین نرخ پیوسته حفاری استفاده گردد. گروه دیگری از محققین با استفاده از مطالعات برش‌پذیری تجربی سنگ، تلاش کردند که یک تطابق بین برش‌پذیری با ویژگی‌های میکروسکوپی و ویژگی‌های بافتی سنگ از جمله ترکیب کانی‌شناسی، اندازه، شکل، توزیع ویژه دانه‌های کانی، تخلخل و ترک‌های ریز ذاتی سنگ برقرار سازند. به‌عنوان مثال رابطه بین بافت سنگ و انرژی ویژه بعلاوه پارامترهای مکانیکی توسط تریاکی و دیکمن [۳۳] بررسی شده است.

توماک و همکاران [۱۱] اثر ویژگی‌های بافتی بر روی عملکرد برش‌پذیری سنگ‌ها را بررسی کردند و نشان دادند که مقادیر نیروهای عمل‌کننده بر روی ابزار برش با افزایش ضریب بافتی افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که می‌توان از ضریب بافتی (TC) و اندازه دانه برای انتخاب و طراحی ماشین‌های برش سنگ در همه نوع سنگی استفاده کرد. تمام این تحقیقات توسط آزمایش برش سنگ کوچک

جدول ۱: نام نمونه سنگ‌ها، سازند و نشانه آن‌ها

ردیف	نام سنگ	نام سازند	محل نمونه‌گیری	نشانه	تعداد نمونه
۱	ماسه سنگ	قرمز بالایی	قم	GH-UP	۱
۲	گل سنگ	گور پی	خوزستان	GO-3 و GO-2	۲
۳	ماسه سنگ	لالون	تهران	LA-1 تا LA-4	۴
۴	ماسه سنگ	هزار دره	تهران	MH-1	۱
۶	ماسه سنگ	قرمز بالایی (۲)	قم	BH10 و BH1 -	۱۰

۲-۲- آزمون‌های مکانیکی، فیزیکی و برش‌پذیری

به منظور تعیین ویژگی‌های مکانیکی و برش‌پذیری مورد نظر در این تحقیق بر روی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک‌محوری (ASTM D2938-95)، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلین) (ASTM D3967)، مقاومت ساینده سنگ (سرشار) (ASTM D7625-10) و آزمایش برش خطی سنگ کوچک مقیاس انجام شد و پارامترهای مربوطه و مورد نیاز برای آن‌ها محاسبه گردیده است. همچنین، تخلخل، چگالی خشک و سرعت موج تراکمی به عنوان خواص فیزیکی نمونه‌های سنگ محاسبه شدند.

۲-۲-۱- آزمون مقاومت ساینده سنگ (سرشار)

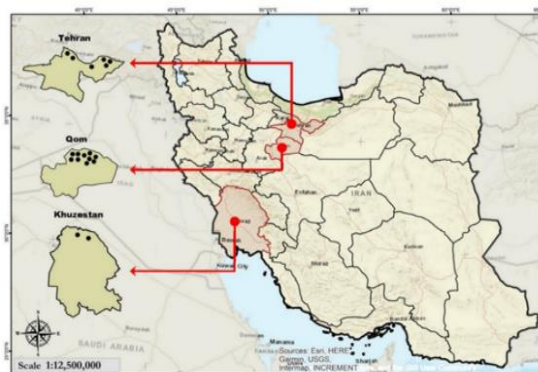
آزمایش سرشار به عنوان یک ابزار و روش ساده برای تعیین و بررسی ساینده سنگ‌ها استفاده می‌شود و طی آن شاخص ساینده سنگ سرشار (CAI) تعیین می‌شود [۲۶]. سوانا و پتر (۱۹۸۱) و وست (۱۹۸۹) اشاره کردند که CAI اساساً از طریق ترکیب کانی‌شناسی سنگ تعیین می‌شود اما امین و ولر [۳۴] تأکید کردند که ترکیب تأثیر مصالح سیمان سنگ (مقاومت سنگ) و درصد کانی‌های ساینده بر روی CAI مهم است. شاخص سرشار (CAI) عمدتاً تحت تأثیر درصد کانی‌های ساینده، درصد سیلیس و سختی هر یک از کانی‌های سازنده سنگ است اما شاخص سرشار برای سنگ‌های تحکیم نیافته و یا دارای فابریک ضعیف و خاک‌ها قابل قبول نیست و کاربرد ندارد [۲۶]. مقدار شاخص ساینده سنگ سرشار از طریق رابطه (۱) تعیین می‌شود [۳۵]. برای تعیین رده هر سنگ در زمینه ساینده از طبقه‌بندی ماتیر و گریسیگر [۳۶] (جدول ۲) استفاده شده است.

و یا بزرگ مقیاس انجام گردیده است که در آن سنگ بکر توسط ابزار برش Chisel که یک شیء اسکنه‌ای شکل است برش خورده‌اند؛ که نحوه شکست سنگ توسط این ابزار برش تا حدودی با نحوه شکست سنگ توسط ابزارهای برش دیگر از جمله ابزارهای دیسکی و نوک قلمی و حالت شکست سنگ در حفاری مکانیزه متفاوت است؛ بنابراین برای آنکه بتوان نحوه شکست سنگ در آزمایش برش خطی کوچک مقیاس به شرایط طبیعی نزدیک‌تر شود در این تحقیق از ابزارهای برش دیسکی استفاده شده است که قطعاً نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌تواند در پیشبرد مفاهیم پیش‌بینی برش‌پذیری سنگ در آینده راهگشا باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعات آزمایشگاهی

برای تعیین ویژگی‌های برش‌پذیری و بافتی سنگ‌ها و تعیین روابط موجود بین آن‌ها در این تحقیق تعداد ۱۸ نمونه سنگ که بر اساس طبقه‌بندی ISRM (۱۹۸۱) در گروه سنگ‌های نرم تا متوسط قرار دارند (بر اساس مقاومت تراکمی تک‌محوری) در نقاط مختلف استان‌های تهران، قم و خوزستان انتخاب و جمع‌آوری شدند که در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی آن‌ها نشان داده شده است و در جدول ۱ نام نمونه‌ها، سازند مربوطه و علائم اختصاری آن‌ها نشان داده شده است. باتوجه به محدودیت موجود در تنها دستگاه برش خطی کوچک مقیاس موجود در کشور مبنی بر آن که تنها می‌توان سنگ‌هایی با مقاومت تراکمی تک‌محوری حداکثر ۷۰ مگا پاسکال را تحت برش قرار داد؛ بنابراین در این تحقیق تمامی نمونه سنگ‌های منتخب بر اساس این شرط لازم انتخاب شدند و مورد آزمایش قرار گرفتند.



شکل ۱: موقعیت نمونه‌برداری از نمونه‌های مورد بررسی

۲-۲-۲- ضریب بافتی

ویلیامز و همکاران [۳۷] بافت را به صورت درجه ای از بلور شدگی تعریف کرده است. بافت سنگ اطلاعاتی درباره ترکیب دانه های کانی و ماتریکس سنگ ارائه می دهد. ضریب بافتی (TC) یک مقدار کمی بدون بعد است که اندازه ای از بافت سنگ است که اولین بار توسط هوارد و رونالد [۴] توسعه یافته است و برای پیش بینی حفر پذیری و ویژگی های مقاومتی سنگ بکار می رود. ضریب بافتی در واقع ویژگی های هندسی دانه های سنگ و بافت آن را کمی می کند؛ و از طریق رابطه (۲) محاسبه می شود.

$$TC = AW \left[\left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times \frac{1}{FF_0} \right) + \left(\frac{N_0}{N_0 + N_1} \times AR_1 \times AF_1 \right) \right] \quad (2)$$

در این رابطه: AW = وزن آرایش دانه ها (Packing).
 N_0 = تعداد دانه هایی که نسبت ابعاد (AR) کمتر از سطح تعیین شده از قبل است. N_1 = تعداد دانه هایی که نسبت ابعاد (AR) بیشتر از سطح تعیین شده از قبل است. FF_0 = میانگین محاسباتی نسبت ابعاد مشخص. AF_1 = مؤلفه زاویه [۴]. جزئیات مربوط به استخراج پارامترهای رابطه (۲) در مرجع [۴] ارائه شده است. همان طور که در رابطه (۲) مشاهده می شود ضریب بافتی تنها بیانگر خصوصیات هندسی دانه های تشکیل دهنده سنگ است و سایر خصوصیات بافتی سنگ ها از جمله سختی، مقدار و کیفیت سیمان و ماتریکس سنگ ها و ویژگی های مورفولوژیکی بافت سنگ در آن در نظر گرفته نشده است. باتوجه به این که پارامترهای بافتی سنگ دارای عدم قطعیت هستند و احتمال خطا در تعیین آن ها وجود دارد، لذا یکی از کارهایی که جهت کاهش این عدم قطعیت و خطاها می توان انجام داد بالا بردن جامعه آماری نمونه است.

برای آنالیز مقاطع نازک، ابتدا توسط دوربین دیجیتال نصب شده بر روی میکروسکوپ تصاویر تهیه می شوند. سپس مرز دانه ها به صورت دستی و با دقت بالا مشخص شده و برای تعیین ضرایب بافتی و تجزیه و تحلیل تصاویر از نرم افزارهای موجود در این زمینه استفاده می شود (شکل ۲). در این تحقیق از نرم افزار Image J استفاده شده است. معمولاً برای یک آنالیز صحیح باید حداقل حدود ۱۰۰ دانه (کانی) از هریک از مقاطع نازک تهیه شده از توده، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند [۳۸].

جدول ۲: طبقه بندی سایندهای سرشار سنگ [۳۶]

طبقه بندی	CAI
بدون سایندهای	۰/۳ - ۰/۵
کمی ساینده	۰/۵ - ۱
سایندهای متوسط تا ساینده	۱ - ۲
خیلی ساینده	۲ - ۴
بیش از حد ساینده	۴ - ۶

$$CAI = 10 \frac{\sum_{i=1}^n d_c}{n} \quad (1)$$

که در آن n تعداد آزمایش ها و d_c قطر سطح ساییده شده روی نقطه تیز نوک میله فولادی بر حسب میلی متر است. نتایج آزمون سرشار برای نمونه های مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده اکثر نمونه ها در گروه سنگ های با سایندهای متوسط تا خیلی ساینده قرار دارند اما برای نمونه های مارن و گل سنگ گوری با توجه به عدم سایش پذیری آن ها مقادیر سرشار آن ها نزدیک به صفر به دست آمد؛ بنابراین در گروه سنگ بدون سایندهای قرار می گیرند.

جدول ۳: نتایج حاصل از انجام آزمایش سرشار و رده بندی نمونه ها بر اساس آن

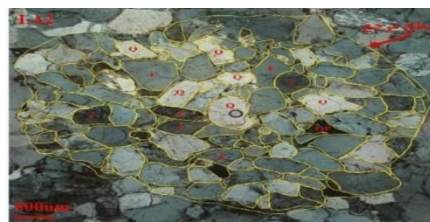
نام نمونه	CAI	رده بندی	نام نمونه	CAI	رده بندی
GH-UP	۰/۹۶	کمی ساینده	BH2	۰/۳۵	بدون سایندهای
GO-3	۰/۶۲	کمی ساینده	BH3	۰/۴۲	بدون سایندهای
GO-2	۱/۲۳	سایندهای متوسط	BH4	۱/۹۴	سایندهای متوسط
MH-1	۱/۳۷	سایندهای متوسط	BH5	۱/۴۱	سایندهای متوسط
LA1	۱/۱۹	سایندهای متوسط	BH6	۱/۵۳	سایندهای متوسط
LA2	۲/۲	خیلی ساینده	BH7	۰/۸۴	کمی ساینده
LA3	۱/۸۷	خیلی ساینده	BH8	۱/۱۵	سایندهای متوسط
LA4	۱/۴۷	سایندهای متوسط	BH9	۱/۱۱	سایندهای متوسط
BH1	۱/۱	سایندهای متوسط	BH10	۲/۲۵	خیلی ساینده

جدول ۴: ویژگی‌های مورفولوژیکی بافت نمونه سنگ‌ها

نام نمونه	شاخص میکرو ترک‌ها	شاخص اندازه دانه	نام نمونه	شاخص میکرو ترک‌ها	شاخص اندازه دانه
GH-UP	۲۶۸	۱۱۸	BH2	۱۶۳	۱۰۵
GO-3	۱۹۲	۱۰۵	BH3	۲۲۴	۱۳۰
GO-2	۲۰۸	۱۱۵	BH4	۱۴۹	۱۹۴
MH1	۱۳۲	۱۱۶	BH5	۱۲۷	۱۱۶
LA1	۲۲۱	۱۵۷	BH6	۱۷۴	۱۷۹
LA2	۱۴۸	۱۹۱	BH7	۱۹۵	۱۱۳
LA3	۸۶	۱۸۹	BH8	۱۳۱	۱۱۲
LA4	۱۳۸	۱۲۷	BH9	۱۸۷	۱۲۵
BH1	۲۱۳	۱۲۲	BH10	۱۵۵	۲۰۵

۴-۲-۲-۴- آزمایش برش خطی کوچک‌مقیاس

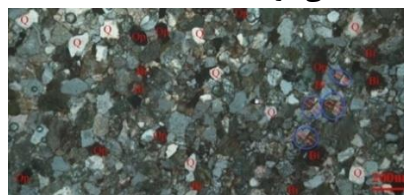
آزمون برش خطی روشی برای سنجش و ارزیابی مستقیم وضعیت برش‌پذیری سنگ در شرایط مشابه با شرایط واقعی حفر سنگ توسط ابزار برش است. اطلاعات به‌دست‌آمده از این آزمون، داده‌های ورودی برای پیش‌بینی سرعت حفاری ماشین، تعیین ویژگی‌های ماشین و طراحی کله حفاری (از نظر هندسی) را فراهم می‌نماید [۵۶، ۴۱]. در این تحقیق از دستگاه برش خطی کوچک‌مقیاس دانشگاه تربیت مدرس برای ارزیابی برش‌پذیری نمونه سنگ‌ها استفاده شده است. توان این دستگاه ۵/۹ کیلووات (kW) و حداکثر طول برش آن ۹۰۰ میلی‌متر است [۴۲]. این دستگاه قادر است برش به طول ۷۰ سانتی‌متر بر روی نمونه اعمال نماید. ابعاد بلوک سنگی که می‌توان در این دستگاه مورد آزمایش قرار داد ۲۰*۲۰*۲۰ سانتی‌متر مکعب است و برای نمونه‌های مغزه حفاری حداقل قطر نیز باید ۷۶ میلی‌متر باشد. آزمایش برش خطی کوچک‌مقیاس بر روی نمونه‌های سنگی در دو حالت مختلف انجام گرفت. نمونه‌های GO2، BH10-BH1 و GO3 به‌صورت مغزه حفاری و نمونه‌های LA1-LA4، MH1 و GH-UP به‌صورت بلوکی در شرایط کاملاً خشک تحت آزمایش برش خطی قرار گرفتند. با توجه به اینکه امروزه در پروژه‌های حفاری مکانیزه از ابزار برش دیسکی با مقطع ثابت استفاده می‌شود (به علت آنکه قادر به تحمل نیروی تراست بیشتری نسبت به نوع دیسکی V شکل می‌باشند و نرخ سایش آن‌ها کمتر است) لذا در این تحقیق به‌منظور آنکه شرایط برش سنگ با حالت اجرایی آن یکسان‌تر باشد از ابزار برش دیسکی مقطع ثابت در آزمایش برش خطی کوچک‌مقیاس استفاده شده است (شکل ۴).



شکل ۲: سطح مرجع و مرز دانه‌ها

۳-۲-۲- ویژگی‌های مورفولوژیکی بافت سنگ

ویژگی‌های مورفولوژیکی بافت سنگ‌ها اندازه دانه‌ها، مرز دانه‌ها و میکروتورک‌ها می‌باشند [۳۹]. یکی از روش‌های مرسوم برای تخمین شاخص اندازه دانه‌ها، روش اصلاح‌شده کایس (۱۹۵۶) است که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تعداد دانه‌های کانی در امتداد خطی به طول ۴۰ میلی‌متر در مقاطع میکروسکوپی و زیر میکروسکوپ پلاریزان شمارش می‌شود. برای جلوگیری از تأثیر فولیاسیون بر نتایج می‌توان اندازه دانه‌ها را در دو جهت عمود بر خط موردنظر (خط ۴۰ میلی‌متری) را ارزیابی کرد سپس شاخص اندازه دانه‌ها، میانگین این دو عدد است. افزایش مقدار در شاخص اندازه دانه نشان‌دهنده کاهش اندازه دانه است به عبارت دیگر اگر تعداد زیادی دانه‌های کانی در امتداد خط موردنظر باشند بیانگر ریزدانه بودن سنگ‌ها است. به‌منظور تعیین یکی دیگر از ویژگی‌های مورفولوژیکی مهم بافت سنگ‌ها، یک آنالیز در مورد مرز دانه‌ها و میکروتورک‌های موجود در آنجا انجام شده است چراکه به اعتقاد بسیاری از محققین از جمله همتی و همکاران [۱۵] ترک‌های القایی ناشی از تنش، تمایل به خمش یا گسترش در طول مرز اطراف فنوکریستال‌ها دارند بنابراین مطالعه میکروتورک‌ها تأثیر زیادی در رفتار مکانیکی سنگ‌ها خواهد داشت. میکروتورک‌ها ناپیوستگی‌هایی هستند که با کلید واژ کانی‌ها و مرز دانه‌ها در ارتباط هستند. در مقیاس میکرو، میکروتورک‌ها به‌صورت یک خط مستقیم ظاهر می‌شوند (شکل ۳). پهنای خط میکروتورک‌ها حدود ۰/۰۰۴۳ میلی‌متر است [۴۰]. در جدول ۴ ویژگی‌های مورفولوژیکی نمونه سنگ‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۳: شناسایی میکرو ترک‌ها در بافت سنگ‌ها با کمک تصاویر مقاطع نازک (دوایر آبی‌رنگ)

$$SE = \frac{F_C \times L}{V} \times 10^{-1} \quad (3)$$

$$1 \text{ Mj/m}^3 = 0.278 \text{ kW-h/m}^3$$

که در آن SE: انرژی ویژه (Mj/m³) FC: نیروی برشی (kN) L: طول برش (cm) V: حجم برش (cm³) (Y/D=V) Y: وزن مصالح برجای مانده (gr) و D: چگالی (gr/cm³) است. نتایج آزمون های آزمایشگاهی بر روی نمونه های سنگ بکر مورد بررسی، شامل ویژگی های فیزیکی، مکانیکی، ضریب بافتی و داده های آزمون برش خطی در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمونه های برش خورده در آزمایش برش خطی کوچک مقیاس با عمق برش ۲ میلی متر

۳- نتایج و بحث

۳-۱- رابطه بین ویژگی های بافتی، مکانیکی و فیزیکی

در این بخش ارتباط بین ویژگی های بافتی سنگ با ویژگی های مکانیکی و فیزیکی نمونه سنگها مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که در شکل ۶ (الف) مشاهده می شود رابطه بین مقاومت تراکمی تک محوری و ضریب بافتی سنگ به صورت خطی و مستقیم است به این صورت که با افزایش ضریب بافتی مقدار مقاومت تراکمی تک محوری سنگها نیز افزایش می یابد. این رابطه با نتایج به دست آمده توسط محققین مختلف از جمله هوارد و رونالدز [۴] و نتایج به دست آمده توسط آزون و همکاران؛ آرتورک و همکاران و گوپتا و شارما [۴۵-۴۷] همخوانی دارد. از طرفی، این نتایج با داده های به دست آمده توسط محققین دیگر از جمله بل؛ آلبر و قهرمان؛ توماک و همکاران و همتی و همکاران [۱۸، ۱۷، ۱۵، ۱۱]. متناقض است که علت آن هم ممکن است متفاوت بودن منشأ سنگها باشد یا اینکه می توان گفت که



شکل ۴: ابزار برش دیسکی با مقطع ثابت مورد استفاده در آزمایش برش خطی کوچک مقیاس

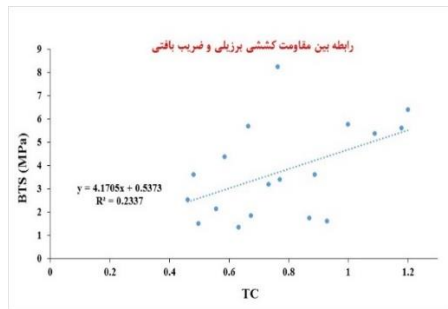
در این تحقیق عمق برش به صورت ثابت و به مقدار ۲ میلی متر انتخاب شده است (شکل ۵). مطالعات قبلی [۱۱، ۴۳] نشان داده که برای سنگ های دگرگونی و آذرین تطابق بسیار زیادی بین بافت سنگ و انرژی ویژه در عمق ۱/۵ تا ۲/۵ میلی متر به دست می آید. در سنگ های رسوبی علاوه بر عمق های کم برش، در عمق های زیاد (بیش از ۲/۵ میلی متر) هم تطابق بسیار خوبی بین بافت سنگ و انرژی ویژه به دست می آید که دلیل آن، وجود ویژگی های ساختاری، نیروی پیوندی بین دانه ها، میکرو شکستگی ها و دیگر پارامترهای ناشناخته برای سنگ های رسوبی است. همچنین بر اساس مطالعات توماک و همکاران [۱۱] برای انواع مختلف سنگ اعم از آذرین، دگرگونی و رسوبی حداقل عمق ۱/۵ میلی متر به عنوان عمقی که در آن تطابق بین پارامترهای اجرایی (عملکردی) برش بالا است پیشنهاد می شود؛ بنابراین در این تحقیق عمق برش ۲ میلی متر ثابت در نظر گرفته شده است. در آزمایش برش خطی بعد از انجام برش در عمق مورد نظر، نیروهای برشی (FC) و قائم (FN) متغیرهای خروجی آزمون می باشند که پس از هر بار ایجاد برش روی نمونه، توسط سیستم ثبت داده های دستگاه (دینامومتر) ثبت می شوند [۴۴، ۱۹، ۵۷]. سپس با کمک رابطه (۳) مقدار انرژی ویژه بهینه تعیین می گردد. نیروی برش و تسلیم (Q) تابع ویژگی های سنگ، نوع ابزار برش و هندسه برش است. در آزمون های برش خطی کوچک مقیاس، بر روی تمامی نمونه ها ۳ برش زده می شود (در بعضی موارد ۴ برش) و مقدار میانگین پارامترها تعیین می شود. تمام این آزمایش ها در سرعت ثابت ۱۲ سانتی متر بر ثانیه (cm/s) و در دما و رطوبت معمولی اتاق انجام شده است. برای هر برش ایجاد شده بر روی نمونه ها طول برش اندازه گیری شده و مقدار مصالح خرده شده از نمونه ها به صورت دقیق جمع آوری و توزین می شود چراکه این پارامترها در تعیین انرژی ویژه (SE) استفاده می شوند (رابطه ۳).

کانی‌های سازنده سنگ‌ها می‌داند. همچنین ضعیف بودن تطابق بین ضریب بافتی و مقاومت کششی سنگ‌ها در این تحقیق علاوه بر وجود ریزترک‌ها در سطح کانی‌ها ممکن است به علت این واقعیت باشد که در ضریب بافتی سنگ پارامترهای پتروگرافی شاخص همانند تخلخل و ترکیب کانی‌شناسی در نظر گرفته نشده است. همان‌گونه که آزونی و همکاران [۴۵] اشاره کرده‌اند که TC نمی‌تواند توصیف‌کننده ویژگی‌های مکانیکی سنگ باشد و توصیه کردند که پارامترهای شاخص ترکیب کانی‌شناسی به مؤلفه‌های TC اضافه شود. رابطه بین ضریب بافتی و عدد سرشار نمونه سنگ‌ها در شکل ۶ (ج) نشان می‌دهد که رابطه مستقیم و خطی با ضریب تطابق پایین بین این دو پارامتر وجود دارد ($R^2=0.2$). نتایج به‌دست‌آمده با نتایج آرتورک و همکاران و رستمی و همکاران [۴۶، ۴۳] همخوانی دارد. علت پایین بودن ضریب تطابق می‌تواند به دلیل آن باشد که هندسه دانه‌ها تنها عامل تأثیرگذار بر سایندگی سنگ نیست و عدد سرشار وابستگی زیادی به درصد کانی‌ها، سختی دانه‌ها، پیوند بین دانه‌ها و کیفیت ماتریکس یا سیمان سنگ دارد. روزی و ولر [۲۶] این موضوع را موردبررسی قرار دادند و نشان دادند که عدد سرشار وابستگی زیادی به ترکیب کانی‌های سازنده سنگ و درجه سیمان شدگی سنگ‌ها دارد.

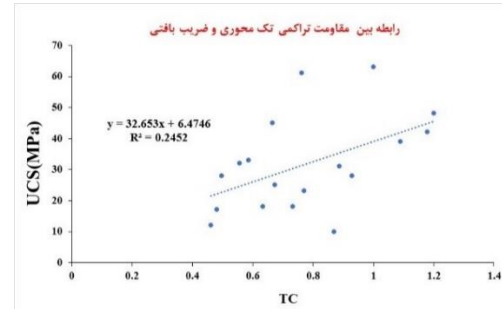
در خیلی از موارد مقاومت تراکمی و کششی و سایر ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی نمونه‌ها دارد؛ اما مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و بافتی حتی برای نوع یکسانی از نمونه‌ها به دلیل وجود عدم قطعیت‌های موجود در مواد (نمونه سنگ‌ها) متغیر است. تعدادی از دلایل برای این عدم قطعیت‌ها می‌تواند ناشی از آنیزوتروپی، دگرگونی و منشأ سنگ‌ها باشد [۴۶]. در برخی نمونه‌ها مشاهده می‌شود علیرغم پایین بودن مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ، مقدار ضریب بافتی نسبتاً بالا است این می‌تواند ناشی از بزرگ‌تر بودن ابعاد دانه‌های کانی‌ها نسبت به مساحت ماتریکس آن‌ها، یا ضعیف بودن پیوند بین دانه‌ها باشد. نتایج رابطه بین مقاومت کششی برزلی و ضریب بافتی در این تحقیق در شکل ۶ (ب) نشان می‌دهد که یک رابطه مستقیم بین آن‌ها وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج محققین قبلی از جمله آرتورک و همکاران [۴۶] همخوانی خوبی دارد. همان‌گونه که در شکل ۶ (ب) مشاهده می‌شود بین مقاومت کششی برزلی و ضریب بافتی سنگ‌ها رابطه مستقیم وجود دارد اما ضریب تطابق آن پایین است ($R^2=0.23$) (ضریب تطابق به‌دست‌آمده از تحقیق [۴۶] $R^2=0.41$)، مریام و همکاران [۳۰] علت ضعیف بودن رابطه بین این دو پارامتر را، وجود ترک‌های موجود در سطح

جدول ۵: نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی

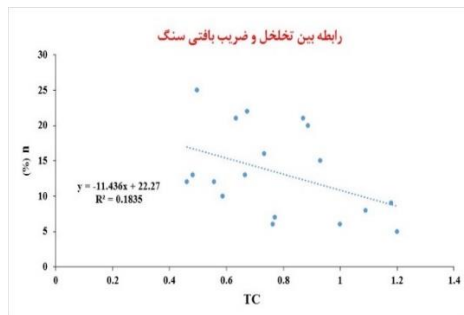
نام نمونه	UCS (MPa)	BTS (MPa)	n (%)	چگالی خشک (gr/cm ³)	F _c (kN)	(Mj/m ³) SE	TC
GH-UP	۲۸	۱۶	۱۵	۲٫۴۲	۰٫۵۰۵	۱۸٫۲۴	۰٫۹۳
GO-3	۱۰	۱٫۷۵	۲۱	۲٫۳۸	۰٫۱۱۶	۱۲٫۴۱	۰٫۸۷
LA2	۶۳	۵٫۷۷	۶	۲٫۴۳	۰٫۵۶۱	۲۶٫۳۸	۱٫۱
MH1	۱۷	۱٫۶۲	۱۳	۲٫۲۵	۰٫۱۰۷	۲۰٫۵۶	۰٫۴۸۱
LA1	۳۲	۲٫۱۳	۱۲	۲٫۲۹	۰٫۱۴۸	۱۹٫۸۵	۰٫۵۵۷
BH1	۱۸	۱٫۳۵	۲۱	۲٫۳۲	۰٫۴۴۷	۱۷٫۹۳	۰٫۶۳۳
GO2	۱۲	۲٫۵۳	۱۲	۲٫۲۷	۰٫۰۵۲	۱۸٫۱۲۵	۰٫۴۶۲
BH3	۲۵	۱٫۸۴	۲۲	۲٫۳۳	۰٫۵۲۴	۱۰٫۶۴	۰٫۶۷۴
LA3	۶۱	۸٫۲۴	۶	۲٫۳۶	۰٫۱۳۶	۲۶٫۶۷	۰٫۷۶۳
LA4	۴۲	۵٫۶	۹	۲٫۴۶	۰٫۱۱۰	۲۲٫۴۹	۱٫۱۸
BH2	۲۸	۱٫۵	۲۵	۲٫۲۴	۰٫۱۳۵	۹٫۸۰	۰٫۴۹۷
BH4	۲۳	۳٫۴	۷	۲٫۳۷	۰٫۲۷۰	۲۸٫۴۸	۰٫۷۷۱
BH5	۳۳	۴٫۳۶	۱۰	۲٫۲۶	۰٫۱۵۳	۲۲٫۷۶	۰٫۵۸۶
BH6	۳۹	۵٫۳۸	۸	۲٫۳۹	۰٫۱۱۵	۲۶٫۳۹	۱٫۰۹
BH7	۳۱	۳٫۶	۲۰	۲٫۳۷	۰٫۵۳۰	۱۸٫۹۳	۰٫۸۸۷
BH8	۴۵	۵٫۷	۱۳	۲٫۴۵	۰٫۱۵۶	۲۰٫۲۶	۰٫۶۶۵
BH9	۱۸	۳٫۲	۱۶	۲٫۴۲	۰٫۶۰۴	۲۰٫۱۷	۰٫۷۳۳
BH10	۴۸	۶٫۴	۵	۲٫۴۱	۰٫۹۲۶	۲۸٫۸۹	۱٫۲



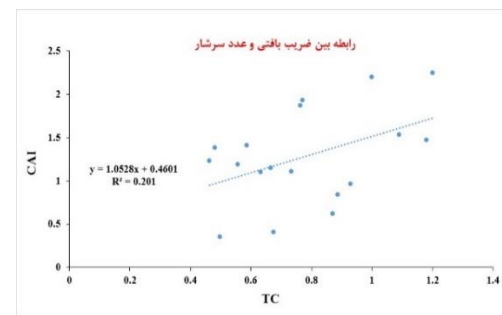
ب



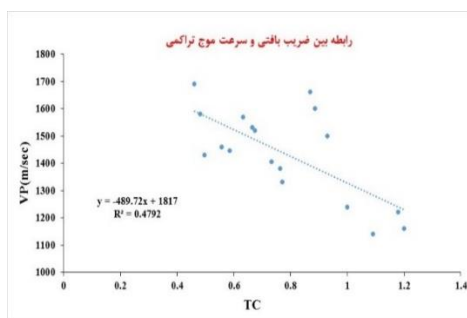
الف



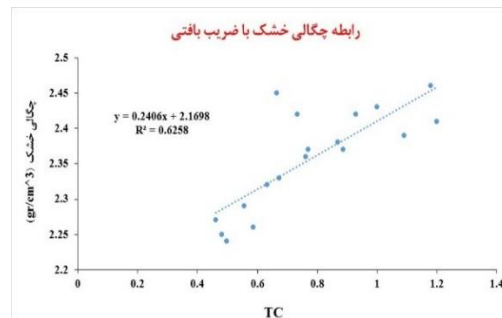
د



ج



ه



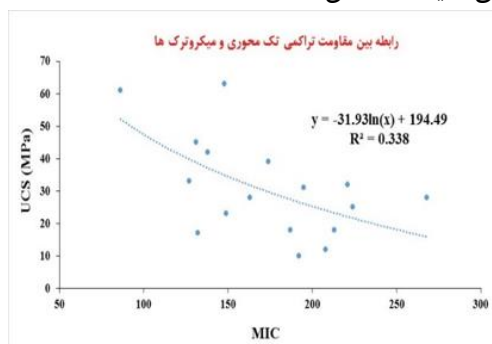
و

شکل ۶: رابطه بین ضریب بافتی با ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها

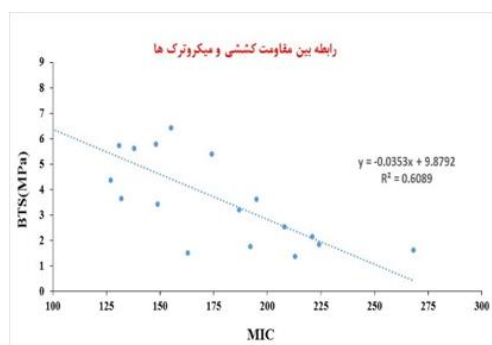
به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج ارزوی و ولر [۲۶] همخوانی خوبی دارد ($R^2 = 0.73$)، اما با نتایج ازتورک و همکاران [۴۶] تناقض دارد به‌طوری‌که آن‌ها یک رابطه معکوس بین این دو پارامتر را نشان دادند. این تفاوت در نتایج می‌تواند به دلیل منشأ سنگ‌های مورد آزمایش باشد چراکه در این تحقیق و تحقیقات ارزوی و ولر [۲۶] از نمونه‌های سنگ رسوبی استفاده شده است اما در تحقیقات ازتورک و همکاران [۴۶] از سنگ‌های رسوبی و آذرین به‌طور هم‌زمان استفاده شده است. نکته دیگر این است که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق ارتباط ضریب بافتی با سرعت موج، به‌صورت یک رابطه معکوس با ضریب تطابق متوسط است ($R^2 = 0.47$) که در شکل ۶ (ه) مشاهده می‌شود. تحقیقات انجام‌شده توسط گوپتا و شارما [۴۷] بیانگر وجود یک رابطه معکوس بین این دو پارامتر است که با نتیجه به‌دست‌آمده در این تحقیق همخوانی دارد اما با نتایج آتچی

رابطه بین ضریب بافتی با درصد تخلخل نمونه سنگ‌ها در شکل ۶ (د) نشان می‌دهد که این دو پارامتر تقریباً مستقل از یکدیگر هستند و تخلخل، یک پارامتر شاخص برای توصیف ضریب بافتی سنگ‌ها نیست. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده از رستمی و همکاران [۴۳] همخوانی خوبی دارد اما با نتایج ازتورک و همکاران [۴۶] تناقض دارد. همان‌طور که در شکل ۶ (و) مشاهده می‌شود چگالی خشک دارای تطابق خوبی ($R^2 = 0.63$) با ضریب بافتی سنگ است به‌طوری‌که با افزایش چگالی سنگ‌ها مقادیر ضریب بافتی آن‌ها افزایش می‌یابد. به‌بیان دیگر افزایش درصد دانه‌ها نسبت به ماتریکس و فضاهای خالی که در ترکیب سنگ‌ها قرار دارد، موجب افزایش وزن سنگ‌ها می‌شود از طرفی دیگر با افزایش درصد ذرات جامد (دانه‌های کانی) در سنگ‌ها مقدار ضریب بافتی سنگ افزایش خواهد یافت؛ بنابراین رابطه مستقیم بین آن‌ها وجود دارد. نتایج

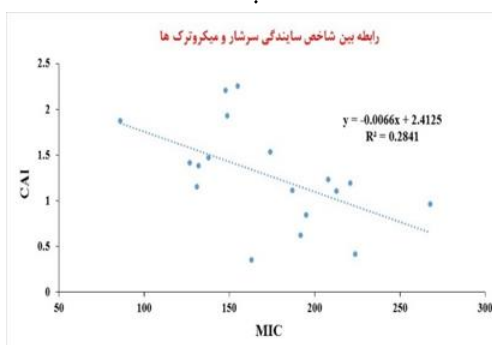
کاهش می‌یابد. این رابطه در واقع نشان‌دهنده آن است که هرچقدر پیوند بین‌بلوری دانه‌ها ضعیف‌تر باشد (ریزترک‌ها بیشتر باشند) پین‌های (قلم‌های) آزمون سرشار تمایل دارند تا به عمق بیشتری در نمونه سنگ نفوذ کنند. همچنین، از آنجایی که فشار وارد شده بر نوک قلم همیشه بیشتر از استحکام سنگ است، نوک قلم در تمام فاصله لغزشی (۳-۱۰ میلی‌متر) در سنگ فرو رفته باقی می‌ماند این به این معنی است که نوک قلم همیشه با بافت سطح ناهموار بافت سنگ در تماس است. به عبارت دیگر مقدار سایش بین دو وجه (سنگ و قلم) حداکثر خواهد بود [۳۴]؛ بنابراین افزایش ریزترک‌ها در سنگ‌ها به این ترتیب باعث کاهش شاخص ساینده سرشار خواهد شد که نتایج به دست آمده در این تحقیق تأیید کننده آن است.



الف



ب



ج

شکل ۷: رابطه بین ویژگی‌های مورفولوژیکی و مکانیکی سنگ‌ها

و کمالاتی [۴۸] تناقض دارد. این تناقض می‌تواند به دلیل نوع سنگ‌های مورد بررسی باشد، چراکه سنگ‌های آذرین را مورد بررسی قرار دادند. کاهش در سرعت موج تراکمی با افزایش ضریب بافتی نشان می‌دهد که انحراف ایجاد شده توسط بعد فراکتال بارزتر از افزایش تجمعی سرعت به وسیله اندازه دانه، نسبت ابعاد دانه‌ها و سایر موارد است [۴۷].

۳-۲- رابطه بین ویژگی‌های مورفولوژیکی بافت و مکانیکی سنگ

ریزترک‌ها به عنوان یکی از ویژگی‌های مورفولوژیکی مهم و تأثیرگذار بافت سنگ‌ها شناخته می‌شوند که در شکل ۷ (الف) رابطه آن با مقاومت تراکمی تک محوری نشان داده شده است و یک رابطه معکوس لگاریتمی با ضریب تطابق نسبتاً متوسطی ($R^2=0.34$) بین آن‌ها برقرار است. به عبارت دیگر افزایش ریزترک‌ها باعث کاهش مقاومت تراکمی سنگ می‌شود چراکه وجود ریزترک‌ها به عنوان نقاط ضعف در ساختمان سنگ‌ها شناخته می‌شوند؛ بنابراین تحت بارهای اعمالی به عنوان نقاط گسترش ترک عمل می‌کنند و باعث کاهش مقدار مقاومت سنگ می‌شوند. علی مددی و همکاران [۱۹] بیان می‌کنند که تغییرات اندازه دانه، شکل دانه و کانی‌شناسی را می‌توان در امتداد با ریزترک‌ها و سطوح ضعف به عنوان منبع ناهمگنی سنگ در نظر گرفت که سبب کاهش مقاومت مصالح سنگ می‌شوند. در شکل ۷ (ب) مشاهده می‌شود که بین شاخص میکروتک‌ها با مقاومت کششی برزلی یک رابطه معکوس وجود دارد که دارای ضریب تطابق خوبی است ($R^2=0.60$). در واقع نتیجه به دست آمده بیانگر آن است که وجود ریزترک‌ها در بافت سنگ باعث کاهش مقاومت کششی آن‌ها می‌شود چراکه وجود ریزترک‌ها به عنوان نقاط ضعف در ساختمان و بافت سنگ عمل می‌کند و باعث کاهش مقاومت سنگ‌ها تحت بارهای اعمالی خواهد شد از طرف دیگر و از آنجایی که نیروی پیوند بین‌بلوری نقش عمده‌ای در مقاومت ذرات در مقابل جدایش از یکدیگر دارند (به علت نیروهای کششی اعمالی بر سنگ) لذا کاهش این نیروها در اثر افزایش ریزترک‌ها باعث کاهش مقاومت کششی سنگ می‌شود. رابطه بین ریزترک‌ها با شاخص ساینده سرشار در شکل ۷ (ج) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود همبستگی بین این دو پارامتر به صورت یک رابطه خطی معکوس است به طوری که با افزایش ریزترک‌ها در بافت سنگ عدد ساینده سرشار

۳-۳- رابطه بین انرژی ویژه و ویژگی‌های مکانیکی و بافتی سنگ

مقاومت تراکمی تک‌محوری یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های اثرگذار سنگ بر روی برش‌پذیری آن‌ها است زیرا در ابتدای آزمون برش سنگ مقدار قابل‌توجهی از انرژی برش صرف غلبه بر مقاومت تراکمی سنگ می‌شود که برای ایجاد منطقه خردشده در زیر ابزار برش نیاز است. بر اساس شکل ۸ (الف) بین این دو پارامتر یک رابطه خطی مستقیم اما با ضریب تطابق نسبتاً ضعیفی وجود دارد که این نتایج با نتایج به‌دست‌آمده توسط بالچی و همکاران؛ ازتورک و همکاران؛ تیریایی و دیکمن و رستمی و همکاران [۴۹،۳۳،۳۲،۱۵] همخوانی خوبی دارد. البته علت تفاوت در ضریب تطابق برای محققین مختلف می‌تواند علاوه بر ماهیت متفاوت سنگ‌های مورد آزمایش، مربوط به عمق برش در آزمون‌ها باشد. در اینجا یادآوری می‌شود که بر اساس تئوری راکسبرو (۱۹۸۷) نیروها به‌صورت خطی با عمق برش کاهش پیدا می‌کنند.

رابطه بین انرژی ویژه و مقاومت کششی برزیلی (BTS) نشان می‌دهد که بین آن‌ها رابطه لگاریتمی مستقیم و مثبت با ضریب تطابق متوسط برقرار است ($R^2=0.62$) (شکل ۸ (ب)). نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج محققین مختلف از جمله بالچی و همکاران؛ تیریایی و دیکمن و بالچی و بیلگین [۳۳،۳۲،۲۷] همخوانی دارد. در تحقیقات گذشته گزارش شده است که سنگ‌های شکننده، شکست کششی را نشان می‌دهند، درحالی‌که سنگ‌های سخت‌تر در حالت برشی شکست می‌خورند. با این حال، ترک‌های شکست در یک سنگ که توسط ابزار برش ایجاد می‌شوند، بدون در نظر گرفتن نوع سنگ، ماهیت کششی دارند [۵۰-۵۲، ۲۵].

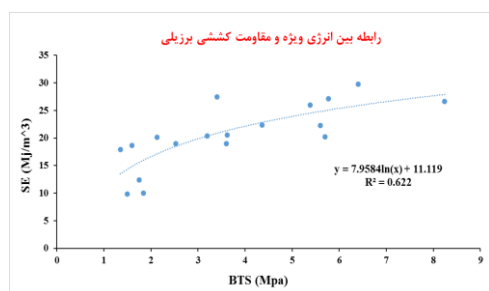
رابطه بین انرژی ویژه و با عدد سرشار در شکل ۸ (ج) نشان داده شده است. بین این دو پارامتر رابطه خطی و مستقیم با ضریب تطابق قوی وجود دارد ($R^2=0.92$). نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با داده‌های به‌دست‌آمده توسط محققین دیگر از جمله رستمی و همکاران [۴۳] همخوانی بسیار خوبی دارد و بیانگر آن است که شاخص سرشار یک شاخص مهم و قابل‌اتکا در ارزیابی برش‌پذیری سنگ‌ها است. علت همخوانی خوب بین این دو پارامتر می‌تواند این نکته باشد، که اگر مقاومت سطح سنگ افزایش یابد، توانایی ابزار برش در برش سنگ کاهش پیدا می‌کند. از طرفی می‌دانیم که انرژی ویژه با افزایش نیروی برش افزایش می‌یابد بنابراین برای غلبه بر

سطوح سخت سنگ نیاز به مقدار انرژی برش بیشتری است؛ لذا انرژی ویژه با افزایش شاخص سرشار بیشتر می‌شود. رابطه بین انرژی ویژه و تخلخل در شکل ۸ (د) نشان داده شده است که بر اساس آن رابطه معکوس خطی با ضریب تطابق قوی ($R^2=0.87$) بین آن‌ها برقرار است. این رابطه با نتایج به‌دست‌آمده توسط تیریایی و دیکمن و رستمی و همکاران [۴۳،۳۳]. همخوانی بسیار خوبی دارد. علت این موضوع هم آن است که هرگونه افزایش در فضای خالی سنگ سبب افزایش درصد رطوبت و جذب آب در سنگ‌ها می‌شود؛ بنابراین افزایش آب باعث کاهش ویژگی‌های مقاومتی و برش‌پذیری سنگ‌ها می‌شود بنابراین می‌توان گفت که تخلخل یکی از پارامترهای اثرگذار در تعیین انرژی ویژه سنگ است و کاهش آن باعث افزایش کیفیت و از طرفی کاهش برش‌پذیری سنگ می‌شود. مطالعات پریکرل و تاندون و گوپتا [۵۴-۵۳] نشان دادند که تخلخل باعث کاهش زیاد در مقاومت سنگ از طریق جهت دادن به رشد ترک در امتداد مسیرهای ترجیحی ضعیف می‌شود؛ بنابراین با کاهش مقاومت سنگ برش‌پذیری هم بیشتر می‌شود. افزایش تخلخل باعث کاهش چگالی سنگ‌ها می‌شود و از آنجایی که تخلخل تأثیر زیادی بر روی برش‌پذیری سنگ‌ها دارد، بنابراین انتظار می‌رود رابطه بین چگالی خشک سنگ و انرژی ویژه معنادار باشد اما در شکل ۸ (و) مشاهده می‌شود یک رابطه خطی مستقیم بین آن‌ها برقرار است اما مقدار ضریب تطابق آن ضعیف است ($R^2=0.15$). درواقع این رابطه نشان می‌دهد که افزایش چگالی سنگ‌ها به معنای کاهش فضاهای خالی موجود در سنگ‌ها است و باعث کاهش برش‌پذیری سنگ می‌شود به‌نحوی که مقدار انرژی لازم برای برش سنگ افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با گزارش تیریایی و دیکمن [۳۳] همخوانی دارد، اما نتایج آن‌ها دارای ضریب تطابق قوی‌تری است که این تفاوت ممکن است به دلیل منشأ سنگ‌های موردبررسی باشد.

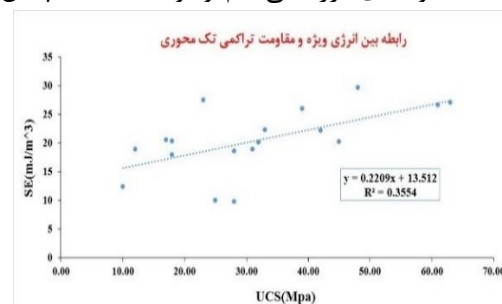
رابطه انرژی ویژه و سرعت موج تراکمی در شکل ۸ (ه) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بین انرژی ویژه و سرعت موج تراکمی رابطه‌ای معکوس با ضریب تطابق متوسط ($R^2=0.44$) وجود دارد. به عبارتی افزایش سرعت موج تراکمی سبب کاهش برش‌پذیری می‌شود. دلیل این موضوع هم افزایش مقاومت سنگ است زیرا افزایش سرعت موج تراکمی بیانگر افزایش مقاومت سنگ و همچنین کاهش تخلخل است. از آنجایی که افزایش مقاومت سنگ و

بودن ضریب تطابق بین این دو پارامتر، ممکن است به دلیل تنوع نمونه سنگ‌های موردبررسی باشد. در سنگ‌های آرژیلیتی به علت مقدار درصد ماتریکس و درصد کانی‌های رسی فراوان در ترکیب آن‌ها، رفتار این نوع سنگ‌ها از حالت شکننده به حالت شکل‌پذیر (رفتار پلاستیک) تغییر می‌کند؛ بنابراین تحت نیروهای اعمال‌شده، ریزترک‌های کمتری در سنگ تشکیل می‌شود؛ اما در ماسه‌سنگ‌ها برخلاف این حالت می‌شود به همین علت پراکندگی داده‌ها بیشتر است و بالطبع ضریب تطابق رابطه به‌دست‌آمده کاهش پیدا می‌کند.

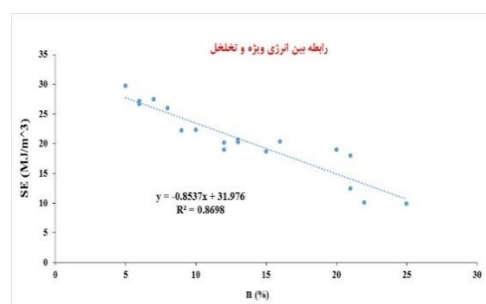
کاهش درصد تخلخل باعث می‌شوند که انرژی بیشتری برای برش سنگ‌ها موردنیاز باشد، بنابراین برش‌پذیری کاهش می‌یابد. رابطه بین انرژی ویژه و ریزترک‌ها در شکل ۸ (ی) نشان داده شده است. بر اساس این داده‌ها، افزایش ریزترک‌ها در سنگ‌ها باعث کاهش انرژی ویژه می‌شود. به عبارت دیگر افزایش ریزترک، باعث کاهش پیوند بین‌بلوری دانه‌های تشکیل‌دهنده شده و در نتیجه سنگ با انرژی کمتری توسط ابزار برش شکسته می‌شود؛ بنابراین برش‌پذیری سنگ با افزایش ریزترک‌ها افزایش می‌یابد. باتوجه به اینکه علاوه بر ماسه‌سنگ، نمونه‌های آرژیلیتی هم وجود داشته‌اند، پایین



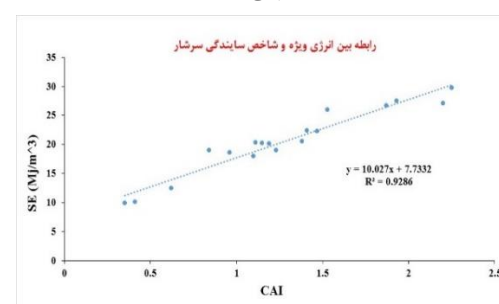
ب



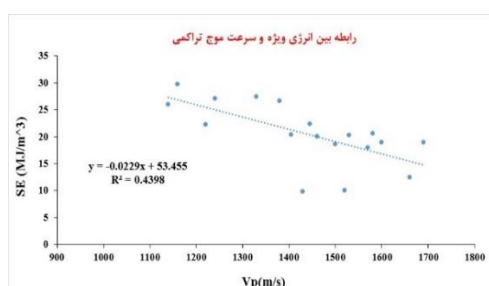
الف



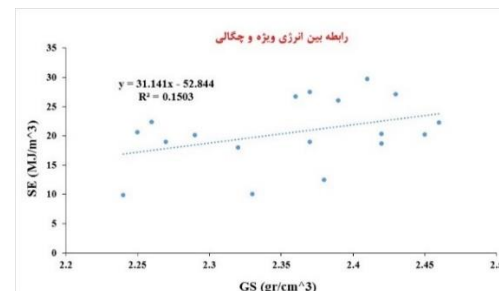
د



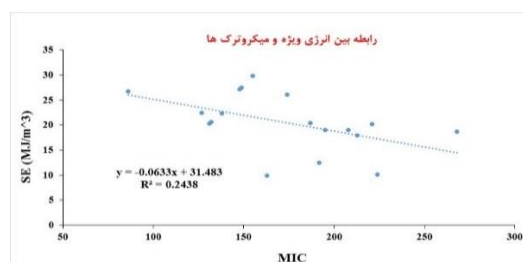
ج



ه



و



ه

شکل ۸: ارتباط بین انرژی ویژه و ویژگی‌های مکانیکی و بافتی سنگ‌ها

۴- تحلیل رگرسیون

تحلیل رگرسیون درواقع یک مجموعه از روش های آماری است که برای مدل سازی رابطه بین یک متغیر وابسته و یک یا چند متغیر مستقل استفاده می شود. روش تحلیل رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق، روش حداقل مربع است. نتایج تحلیل رگرسیون خطی در این تحقیق در جدول ۶ نشان داده شده است. برای صحت سنجی نتایج مدل

رگرسیون از آزمون های آماری F و t استفاده شده است. آزمون F برای ارزیابی معنی داری کلی مدل رگرسیون (ضریب تطابق) به کار می رود و دقت ثابت ها در تمام معادلات از طریق آزمون t تعیین می شوند. در این آزمون اگر مقدار F و t مشاهده ای بزرگ تر از مقدار F و t بحرانی باشد در این حالت فرضیه خنثی (null) رد می شود که این بدان معنا است که ضریب تطابق روابط بین پارامترهای مختلف سنگ و ثابت های معادله به صورت شاخص می باشند.

جدول ۶: نتایج آزمون F و t برای پارامترهای مورد بررسی

معادله	R^2	df	مقدار F مشاهده ای	مقدار F بحرانی	مقدار t مشاهده ای	مقدار t بحرانی
UCS=32.653(TC)+6.4746	۰٫۲۴	۱۷	۴۳۴۷	۲٫۲۷	۸٫۵۴	۲٫۱۰
BTS=4.1705(TC)+0.5373	۰٫۲۳	۱۷	۷۴٫۴۳	۲٫۲۷	۶٫۲۶	۲٫۱۰
CAI=1.0528(TC)+0.4601	۰٫۲	۱۷	۵٫۵۱	۲٫۲۸	۳٫۵۶	۲٫۰۶
Porosity=-11.436(TC)+22.27	۰٫۱۸	۱۷	۷۱۲	۲٫۲۷	۸٫۵۶	۲٫۱۰
GS=0.2406(TC)+2.1698	۰٫۶۲	۱۷	۰٫۱	۰٫۴۴	۲۷٫۴۲۸	۲٫۱۰
VP=-489.72(TC)+1817	۰٫۴۷	۱۷	۵۹۱۹۵	۲٫۳۱	۳۶٫۸۲	۲٫۱۰
BTS= - 0.0353(MIC)+9.8792	۰٫۶۰	۱۷	۴۸۸٫۲	۲٫۲۷	۱۶٫۰۷	۲٫۱۰
UCS = - 31.93ln(MIC)+194.4	۰٫۳۳	۱۷	۸٫۳۶	۲٫۲۷	۱۲٫۶۸	۲٫۱۰
CAI=-0.0066(mic)+2.4125	۰٫۲۸	۱۷	۶۵۸۹	۲٫۲۸	۱۶٫۳۳	۲٫۱۰
SE=0.2209(ucs)+13.512	۰٫۳۵	۱۷	۷٫۲۸	۲٫۲۸	۲٫۹۱	۲٫۰۷
SE=7.9584 ln (BTS)+11.119	۰٫۶۲	۱۷	۷٫۱۴	۲٫۲۸	۱۱٫۸۴	۲٫۰۷
SE=10.027(CAI)+7.7332	۰٫۹۲	۱۷	۱۰۵	۲٫۲۸	۱۴٫۳۱	۲٫۱۰
SE=-0.8537(n)+31.976	۰٫۸۷	۱۷	۰٫۸۳	۰٫۴۴	۳٫۵۹	۲٫۰۴
SE=-0.0229(Vp)+53.455	۰٫۴۴	۱۷	۸۳۸	۲٫۲۸	۳۶٫۳۰	۲٫۱۰
SE=31.141(Gs)-52.844	۰٫۱۵	۱۷	۶۴۵۲	۲٫۲۸	۱۳٫۵	۲٫۱۰
SE=-0.0633(mic)+31.483	۰٫۲۴	۱۷	۶۰	۲٫۲۸	۱۴٫۳۷	۲٫۱۰

است برای پیش بینی رابطه خطی بین یک متغیر وابسته و دو یا چند متغیر مستقل با یک فرمول ریاضی است؛ بنابراین مدل رگرسیون چند متغیره گاهی اوقات به عنوان مدل حداقل مربعات نیز نامیده می شود؛ که به طور کلی می تواند به صورت زیر بیان شود:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (۴)$$

در این رابطه Y متغیر وابسته و X_1 و $X_2 \dots X_n$ بیانگر متغیرهای مستقل و β_0 و β_1 و β_2 نشانگر ضرایب رگرسیون هستند و ε میزان خطا را نشان می دهد. پارامتر F بیانگر قابل اعتماد بودن نتایج آن است. در نتایج آنالیز چند متغیره

۴-۱- تحلیل رگرسیون چند متغیره ارتباط بین ویژگی برش پذیری با ویژگی های مکانیکی، فیزیکی و بافتی

یکی از روش های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک رگرسیون چند متغیره (چندگانه) است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر پاسخ (متغیر وابسته) با یک یا چند متغیر توصیفی (متغیر مستقل) برقرار می شود. در رگرسیون خطی چندگانه، پارامترهای یک مدل خطی به کمک یک تابع هدف و مقادیرهای متغیره، برآورد می شوند به عبارت دیگر آنالیز رگرسیون چند متغیره روشی

شاخص سرشار، مقاومت کششی برزلی دارای بیشترین اهمیت در پیش‌بینی ویژگی‌های برش‌پذیری سنگ‌ها است. در بین پارامترهای بافتی، اندازه دانه‌ها و ریزترک‌ها تأثیر زیادی بر روی انرژی ویژه و بالطبع برش‌پذیری سنگ‌ها دارند. اندازه دانه‌ها تأثیر بسیار زیادی بر روی مقاومت سنگ‌ها دارد زیرا با کوچک بودن ابعاد دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ، علاوه بر افزایش سطح تماس دانه‌ها با یکدیگر، امکان تشکیل ساختارهای ضعیف در سطح کانی‌ها کاهش می‌یابد. همچنین ریزترک‌ها به عنوان نقاط ضعف ساختاری در بافت سنگ شناخته می‌شوند که تأثیر زیادی در مقاومت سنگ دارند و به عنوان عامل کاهنده مقاومت شناخته می‌شوند. از آنجایی که ضریب بافتی معرف هندسه دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ است، تأثیر شگرفی بر روی ویژگی‌های مقاومتی و برش‌پذیری سنگ‌ها ندارد که این امر در آنالیزهای خطی و چند متغیره اثبات شده است.

جدول ۵: نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره

شاخص F	R ²	معادله
$10^{-6} * 111$	۰/۸۸	$SE=22.23+5.33(G_s)-0.79(n)-0.002(V_p)$
$10^{-4} * 66$	۰/۷۱	$SE=8/24+0/11(d)-0/031(mic)+11/15(Tc)-10/78(Aw)$
$10^{-8} * 39$	۰/۹۳	$SE=7/92+9/25(CAI)+0/49(BTS)-0/033(UCS)$

معرف ویژگی‌های هندسی بافت سنگ‌ها است و تعیین آن زمان بر و دارای خطای آنالیز میکرومتریک است زیرا سنگ‌های رسوبی دارای ماتریکس فراوان هستند و مرز بین دانه‌ها و زمینه به خوبی قابل تفکیک نیست؛ بنابراین از طریق سایر پارامترهای میکروسکوپی بافت سنگ می‌بایست از میزان این خطاها کاسته شود. همچنین تعیین پارامترهای ضریب بافتی باتوجه به فراوانی دانه‌های کانی‌ها در بافت سنگ‌ها دارای محاسبات آماری زیادی است که زمان بر و دارای درصد خطای بالا است. بر اساس نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره، علاوه بر تخلخل و شاخص ساینده سرشار، پارامترهای اندازه دانه‌ها (d)، تعداد ریزترک‌ها (mic) به عنوان پارامترهای بافتی و مقاومت کششی برزلی به عنوان پارامترهای مکانیکی در پیش‌بینی برش‌پذیری مؤثر می‌باشند و می‌توان از این پارامترها در تعیین انرژی ویژه استفاده کرد؛ بنابراین در این تحقیق رابطه (۵) به عنوان رابطه اصلاحی برای شاخص برش‌پذیری سنگ بکر پیشنهاد می‌شود.

$$IRCI' = \log \left[\frac{10(CAI \times mic \times d \times BTS)}{n} \right] \quad (5)$$

پارامتر اهمیت F می‌بایست کمتر از ۰/۰۵ باشد، در این حالت می‌توان گفت همه چیز درست است، اما اگر بیشتر از ۰/۰۵ باشد احتمالاً بهتر است از مجموعه متغیرهای مستقل دیگری استفاده شود [۵۵].

نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره در جدول ۷ نشان داده شده است. بر این اساس در بین ویژگی‌های فیزیکی سنگ‌ها، تخلخل نسبت به سایر پارامترهای فیزیکی با ویژگی‌های برش‌پذیری سنگ‌ها خصوصاً انرژی ویژه ارتباط قوی‌تری دارد و دارای درجه اهمیت بالاتری برای پیش‌بینی ویژگی‌های برش‌پذیری سنگ‌ها است. در بین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها، شاخص سرشار نسبت به سایر پارامترهای مکانیکی موردبررسی در این تحقیق با ویژگی‌های برش‌پذیری سنگ‌ها خصوصاً انرژی ویژه ارتباط بسیار قوی دارد و دارای درجه اهمیت بالاتری برای پیش‌بینی ویژگی‌های برش‌پذیری سنگ‌ها است. همچنین بعد از

۴-۲- شاخص برش‌پذیری اصلاح شده سنگ بکر

نتایج تحلیل‌های انجام گرفته در این تحقیق نشان می‌دهد که تخلخل تأثیر زیادی در پارامترهای برش‌پذیری سنگ دارد و می‌بایست به عنوان یکی از پارامترهای اثرگذار در ارزیابی برش‌پذیری لحاظ شود؛ بنابراین تخلخل که بیانگر حجم حفرات موجود در سنگ است، می‌بایست در کمی سازی بافت سنگ‌ها در نظر گرفته شود. همچنین شاخص ساینده سرشار یکی دیگر از پارامترهای اثرگذار است که رابطه قوی با پارامتر برش‌پذیری سنگ دارد. اندازه دانه‌ها و ریزترک‌ها به عنوان ویژگی‌های میکروسکوپی مؤثر (مورفولوژیکی بافت) در تعیین برش‌پذیری سنگ‌ها شناخته می‌شوند.

در آزمون برش خطی، در هنگامی که ابزار برش در حال عبور از روی نمونه است نیروهای اعمالی بر روی سطح سنگ همانند ساز و کار شکست سنگ در آزمایش برزلی عمل می‌کنند به نحوی سنگ در اثر نیروهای کششی ایجاد شده در زیر تیغه، شکسته و خرد می‌شود؛ بنابراین مقاومت کششی سنگ‌ها در تعیین برش‌پذیری آن‌ها نقش دارد. ضریب بافتی

پروژه‌های معدنی و عمرانی مستلزم شناخت برش‌پذیری سنگ و تطابق شرایط زمین با طرح ماشین است. در این تحقیق با تعیین ویژگی‌های بافتی و مکانیکی و تحلیل ارتباط بین آنها، شاخص برش‌پذیری برای تعدادی نمونه دارای تنوع از نظر نوع سنگ، سازند و موقعیت جغرافیایی نمونه‌ها مشخص شد. از مهم‌ترین نتایج و تحلیل‌های به‌دست‌آمده در این تحقیق می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

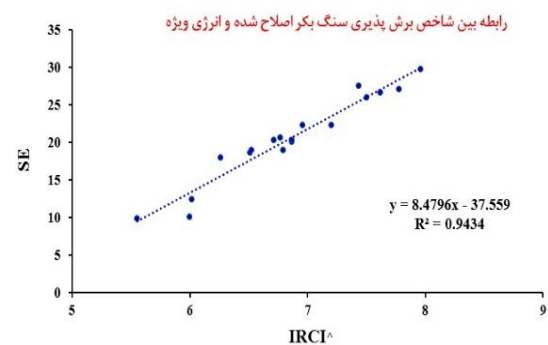
۱- تحلیل‌های آماری انجام‌شده روی پارامترهای بافت سنگ و ویژگی‌های مکانیکی نشان می‌دهد که ارتباط بین مقاومت کششی برزلی با تعداد ریزترک‌ها یک رابطه معکوس دارد. ریزترک‌ها در بافت سنگ به‌عنوان سطوح ضعف ساختاری عمل می‌کنند و باعث کاهش مقاومت کششی سنگ می‌شوند؛ بنابراین نیروی کششی بیشتر از سایر ویژگی‌های مکانیکی تحت تأثیر تعداد ریزترک‌ها است.

۲- ضریب بافتی دارای ضریب تطابق پایین ($R^2 = 0.22$) با ویژگی‌های مکانیکی است. عبارت دیگر تأثیر آن بر روی ویژگی‌های مکانیکی ناچیز است زیرا ضریب بافتی بیانگر ویژگی‌های هندسی بافت سنگ است و سایر پارامترهای بافتی از جمله تعداد و حجم حفرات و ویژگی‌های ساختاری (مانند ریزترک‌ها و جهت یافتگی دانه‌ها) در رابطه ضریب بافتی لحاظ نشده است.

۳- در بین ویژگی‌های مکانیکی سنگ، شاخص سرشار با $R^2 = 0.92$ و مقاومت کششی برزلی با $R^2 = 0.62$ بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های برش‌پذیری دارند. شاخص سرشار معرف سختی سطح سنگ در برابر ساینده‌گی در مقابل جسم خارجی است؛ بنابراین در زمان آزمایش برش خطی و عبور ابزار برش دیسکی، تأثیر مستقیم در برابر برش‌پذیری سنگ دارد و باعث افزایش انرژی ویژه می‌شود و قوی‌ترین ارتباط را با برش‌پذیری سنگ برقرار می‌کند. ساز و کار شکست سنگ تحت ابزار برش، کششی است؛ بنابراین مقاومت کششی سنگ تأثیر زیادی بر روی برش‌پذیری سنگ و کنترل آن خواهد داشت.

۴- افزایش ریزترک در سنگ‌ها باعث کاهش پیوند بین‌بلوری دانه‌های تشکیل‌دهنده می‌شود؛ بنابراین با انرژی کمتری توسط ابزار برش شکسته می‌شوند لذا برش‌پذیری با افزایش ریزترک‌ها بیشتر می‌شود. علت ضعیف بودن رابطه بین انرژی ویژه و تعداد ریزترک‌ها، پراکندگی نتایج داده‌ها است. از آنجایی که نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق از نوع ماسه‌سنگ و سنگ‌های آرژیلیتی می‌باشند، رفتار آنها

در این رابطه n تخلخل، CAI: شاخص ساینده‌گی سرشار، mic تعداد ریزترک‌ها، d اندازه دانه‌ها و BTS مقاومت کششی برزلی است. ارتباط بین انرژی ویژه به‌دست‌آمده در آزمایش برش خطی کوچک‌مقیاس، با مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص برش‌پذیری سنگ بکر اصلاح‌شده (IRCI') مطابق شکل ۹ است که در آن یک تطابق قوی بین انرژی ویژه و شاخص برش‌پذیری اصلاح‌شده سنگ بکر وجود دارد ($R^2 = 0.94$). ضریب تطابق به‌دست‌آمده بین این دو پارامتر، بیشتر از ضریب تطابق به‌دست‌آمده بین انرژی ویژه با درصد تخلخل، شاخص سرشار و مقاومت کششی برزلی است. این نشان‌دهنده آن است که شاخص برش‌پذیری چند متغیره تخمین قابل‌اعتمادتری برای برش‌پذیری نسبت به پارامترهای تک متغیره ارائه می‌دهد.



شکل ۹: رابطه بین شاخص برش‌پذیری سنگ بکر اصلاح‌شده و انرژی ویژه

شاخص برش‌پذیری اصلاح‌شده سنگ بکر به شاخص ساینده‌گی سرشار، تخلخل و اندازه دانه‌ها و تعداد ریزترک‌ها وابسته است که به‌صورت سریع توسط آزمایش‌های مرسوم و تکرارپذیر روی نمونه‌های مغزه‌ای و بلوکی شکل قابل انجام است. از آنجاییکه شاخص برش‌پذیری اصلاح‌شده سنگ بکر، بر اساس داده‌های محدوده به سنگ‌هایی با منشا خاص (سنگ‌های رسوبی)، عمق برش ثابت و ابزار برش ثابت (دیسکی شکل) پیشنهاد شده است بنابراین پیشنهاد می‌شود این شاخص علاوه بر سنگ‌های رسوبی برای سایر سنگ‌ها با منشأهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد و رابطه پیشنهادی بسط و گسترش داده شود.

۵- نتیجه‌گیری

روش‌های حفر مکانیزه، جایگزین مناسبی برای روش‌های حفر سنتی از نقطه‌نظر ایمنی، نرخ تولید و زمان‌بندی پروژه می‌باشند. از سویی دیگر به‌کارگیری موفق این فناوری‌ها در

- [3] W. A. Olsson, "Grain size dependence of yield stress in marble," *Journal of Geophysical Research*, vol. 79, pp. 4859–4861, 1974.
- [4] D. F. Howarth and J. C. Rowlands, "Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 20, no. 1, pp. 57–85, 1987, doi: 10.1007/BF01019511.
- [5] R. Příkryl, "Some microstructural aspects of strength variation in rocks," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, no. 5, pp. 671–682, 2001, doi: 10.1016/S1365-1609(01)00031-4.
- [6] P. Heidaryan, M. Asef, J. K. Hamidi, and M. Talkhablou, "The Relationship Between Mechanical Properties and Quartz-Feldspar composition of sedimentary rocks," *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, vol. 13, no. 36, pp. 1–13, Oct. 2023, doi: 10.22034/ANM.2023.19846.1592.
- [7] R. Ulusay, K. Tt~reli, and M. H. Ider, "Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques," 1994.
- [8] C. A. Ozturk, E. Nasuf, and S. Kahraman, "Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 114, no. 6, pp. 471–480, 2014.
- [9] A. Tuğrul and I. H. Zarif, "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey," *Eng Geol*, vol. 51, no. 4, pp. 303–317, 1999, doi: 10.1016/S0013-7952(98)00071-4.
- [10] N. Q. A. M. Yusof and H. Zabidi, "Correlation of Mineralogical and Textural Characteristics with Engineering Properties of Granitic Rock from Hulu Langat, Selangor," *Procedia Chem*, vol. 19, pp. 975–980, 2016, doi: 10.1016/j.proche.2016.03.144.
- [11] D. Tumac, C. Copur, Hanifi, Balci, and E. Er, Selman, 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, doi: 10.1007/s00603-017-1376-y.
- [12] M. Räisänen, "Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-Iitti complex, southeastern Finland," *Eng Geol*, vol. 74, no. 3–4, pp. 197–211, 2004, doi: 10.1016/j.enggeo.2004.03.009.
- [13] H. Liu, S. Kou, P. a. Lindqvist, J. E. Lindqvist, and U. Åkesson, "Microscope rock texture characterization and simulation of rock aggregate properties," *Assessment*, no. December, pp. 1–97, 2005, [Online]. Available:

تحت نیروی اعمال شده متفاوت است بطوریکه سنگ‌های آرژیلیتی رفتاری شکل‌پذیر دارند ولی ماسه‌سنگ‌ها شکننده‌تر هستند؛ بنابراین در سنگ‌های آرژیلیتی تعداد ریزترک‌های کمتری نسبت به ماسه‌سنگ‌ها تشکیل می‌شود.

۵- نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهد که در بین ویژگی‌های فیزیکی، درصد تخلخل (n)، در بین ویژگی‌های مکانیکی، شاخص سرشار (CAI) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) و در بین ویژگی‌های بافتی، اندازه دانه‌ها (d) و ریزترک‌ها (mic) بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی برش‌پذیری سنگ دارند.

۶- بر اساس تحلیل رگرسیون چند متغیره در این تحقیق رابطه اصلاحی برای شاخص برش‌پذیری سنگ-بکر پیشنهاد شد. از جمله نقاط قوت این پژوهش اینست که شاخص پیشنهادی بر اساس داده‌های آزمون برش خطی کوچک مقیاس با ابزار برش دیسکی با سطح مقطع ثابت به جای ابزار برش اسکنه‌ای استفاده شده است که همخوانی بسیار زیادی با شرایط واقعی حفاری دستگاه مکانیزه دارد. همچنین در رابطه پیشنهادی در این تحقیق از پارامترهای بافتی ساده‌تری استفاده می‌شود که به راحتی و با سرعت بیشتر از طریق تصاویر مقطع نازک سنگ‌ها قابل برداشت هستند. استفاده از این پارامترها بجای ضریب بافتی، علاوه بر کاهش زمان محاسبات، موجب کاهش میزان خطای انسانی در آنالیز میکرومتریک می‌شود.

پیشنهاده‌ها

در پایان پیشنهاد می‌شود به منظور توسعه رابطه اصلاحی شاخص برش‌پذیری سنگ بکر، علاوه بر سنگ‌های رسوبی، سایر سنگ‌ها با منشأهای مختلف مورد ارزیابی قرار گیرند و رابطه پیشنهادی بسط و گسترش داده شود.

مراجع

- [1] S. Yasar, M. Capik, and A. O. Yilmaz, "Cuttability assessment using the Drilling Rate Index (DRI)," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 74, no. 4, pp. 1349–1361, 2015, doi: 10.1007/s10064-014-0715-4.
- [2] D. F. Howarth, "Experimental study on the relationship between rock texture and mechanical performance," *Institution of Mining and Metallurgy Transactions. Section A. Mining Industry*, vol. 95, 1986.

- [24] J. E. Lindqvist, U. Åkesson, and K. Malaga, "Microstructure and functional properties of rock materials," *Mater Charact*, vol. 58, no. 11-12 SPEC. ISS., pp. 1183–1188, 2007, doi: 10.1016/j.matchar.2007.04.012.
- [25] M. C. Hood and F. F. Roxborough, "Rock breakage: mechanical," *SME mining engineering handbook*, vol. 1, pp. 680–721, 1992.
- [26] A. Ersoy and M. D. Waller, "Textural characterisation of rocks," *Eng Geol*, vol. 39, no. 3–4, pp. 123–136, 1995, doi: 10.1016/0013-7952(95)00005-Z.
- [27] C. Balci and N. Bilgin, "Correlative study of linear small and full-scale rock cutting tests to select mechanized excavation machines," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 44, no. 3, pp. 468–476, 2007, doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.09.001.
- [28] P. Heydarian, M. R. Asef, J. K. Hamidi, and M. Talkhablo, "The relationship between mechanical properties and mineralogical composition of some sedimentary rocks," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 57, no. 4, Nov. 2024, doi: 10.1144/qjegh2024-069.
- [29] R. F. P. Mendes, F.M., Aires-Barros, L., "The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses.," *In: Proc. 1st Inc. Cong. Rock Mech., Lisbon*, vol. vol 1, pp. 217–223, 1966.
- [30] Kim. Y. c Merriam. R., Rieke . H.H., "TENSILE STRENGTH RELATED TO MINERALOGY AND TEXTURE OF SOME GRANITIC ROCKS.," *Eng Geol*, vol. 47, no. 4, pp. 155–160, 1970, doi: 10.1016/0379-6779(92)90376-T.
- [31] R. M. Goktan and N. Gunes, "A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks," *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 105, no. 4, pp. 257–263, 2005.
- [32] C. Balci, H. Demircin, M. A. Copur, and H. Tuncdemir, "Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance," *SIAMM - Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 104, no. 11, pp. 633–642, 2004.
- [33] B. Tiryaki and A. C. Dikmen, "Effects of rock properties on specific cutting energy in linear cutting of sandstones by picks," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 39, no. 2, pp. 89–120, 2006, doi: 10.1007/s00603-005-0062-7.
- [34] [34] S. I. Al-Ameen and M. D. Waller, "The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index," *Eng Geol*, <http://swepub.kb.se/bib/swepub:oai:ltu01:1632870?t=ab2=abs&language=en>
- [14] Ö. Ündül and S. Er, "Investigating the effects of micro-texture and geo-mechanical properties on the abrasiveness of volcanic rocks," *Eng Geol*, vol. 229, pp. 85–94, 2017, doi: 10.1016/j.enggeo.2017.09.022.
- [15] A. Hemmati, M. Ghafoori, and G. R. Moomivand, Hassan.Lashkaripour, "The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification," *Eng Geol*, vol. 266, p. 105467, 2020, doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105467.
- [16] M. J. Fahy, M.P., Guccione, "Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data.," *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol*, vol. 16 (4), pp. 467–485, 1979.
- [17] F. G. Bell, "The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England," *Eng Geol*, vol. 12, pp. 1–29, 1978, doi: [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(78\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0013-7952(78)90002-9).
- [18] M. Alber and S. Kahraman, "Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 42, no. 1, pp. 117–127, 2009, doi: 10.1007/s00603-008-0167-x.
- [19] J. K. Alimadadi, Sajad Hamidi, K. Shahriar, and M. Mohamadi, "CUTTABILITY ASSESSMENT OF UPPER RED SANDSTONE USING SMALL," vol. 13, no. 40, pp. 2–5, 2018.
- [20] O. K. Mahabadi, N. X. Randall, Z. Zong, and G. Grasselli, "A novel approach for micro-scale characterization and modeling of geomaterials incorporating actual material heterogeneity," *Geophys Res Lett*, vol. 39, no. 1, Jan. 2012, doi: 10.1029/2011GL050411.
- [21] J. W. Cho, S. H. Jeon, Seokwon.Yu, and S. H. Chang, "Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 230–244, 2010, doi: 10.1016/j.tust.2009.11.007.
- [22] M. Nicksiar and C. D. Martin, "Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks," *Eng Geol*, vol. 154, pp. 64–76, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.12.007>.
- [23] M. Sajid and M. Arif, "Reliance of physico-mechanical properties on petrographic characteristics: consequences from the study of Utlá granites, north-west Pakistan," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 74, no. 4, pp. 1321–1330, Nov. 2015, doi: 10.1007/s10064-014-0690-9.

- [45] A. Azzoni, E. Bailo, F. Rondena, and A. Zaninetti, "Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 29, no. 1, pp. 39–46, 1996, doi: 10.1007/BF01019938.
- [46] C. A. Özlürk, E. Nasuf, and N. Bilgin, "The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient," *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 104, no. 7, pp. 397–402, 2004.
- [47] V. Gupta and R. Sharma, "Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya," *Eng Geol*, vol. 135–136, pp. 1–9, 2012, doi: 10.1016/j.enggeo.2012.02.006.
- [48] U. Atici and R. Comakli, "Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient," *J South Afr Inst Min Metall*, vol. 119, no. 1, pp. 63–69, 2019, doi: 10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8.
- [49] C. A. Özlürk, E. Nasuf, and N. Bilgin, "The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient," *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 104, no. 7, pp. 397–402, 2004.
- [50] Y. Nishimatsu, "The mechanics of rock cutting," *rock mechanic*, vol. 9, pp. 261–270, 1971, doi: 10.1016/b978-0-08-042067-7.50014-3.
- [51] F. F. Roxborough, "Cutting rock with picks," 1973.
- [52] C. Evans and D. Pomeroy, *The Strength, Fracture and Workability of Coal A Monograph on Basic Work on Coal Winning carried out by the Mining Research Establishment, National Coal Board PERGAMON PRESS OXFORD · LONDON · EDINBURGH · NEW YORK TORONTO · PARIS · BRAUNSCHWEIG*. 1973.
- [53] R. Příkryl, "Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations," *Eng Geol*, vol. 87, no. 3–4, pp. 149–162, 2006, doi: 10.1016/j.enggeo.2006.05.011.
- [54] R. S. Tandon and V. Gupta, "The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya," *Eng Geol*, vol. 153, pp. 125–143, 2013, doi: 10.1016/j.enggeo.2012.11.005.
- [55] Jr. Frank E. Harrell, "Regression Modeling Strategies," pp. 1–656, 1999, doi: 10.1007/978-0-387-98135-2.
- vol. 36, no. 3–4, pp. 293–301, 1994, doi: 10.1016/0013-7952(94)90010-8.
- [35] M. Alber *et al.*, "ISRM suggested method for determining the abrasivity of rock by the cerchar abrasivity test," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 47, no. 1, pp. 261–266, 2013, doi: 10.1007/s00603-013-0518-0.
- [36] J.-F. Mathier and J.-P. Gisiger, "Abrasivity of Icelandic Basalts," in *10th ISRM Congress, p. ISRM-10CONGRESS*, 2003, p. 135.
- [37] C. M. Williams, H. Turner, F.J., Gilbert, "Petrography: An introduction to the study of rocks in thin sections.," *Secon edition, W.H. Freeman and Company, San Francisco, California*, p. 626p, 1982.
- [38] C. L. Reedy, "Review of digital image analysis of petrographic thin sections in conservation research," *Journal of The American Institute for Conservation*, vol. 45, no. 2, pp. 127–146, 2006, doi: 10.1179/019713606806112531.
- [39] K. Miskovsky, M. Taborda Duarte, S. Q. Kou, and P. A. Lindqvist, "Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates," *J Mater Eng Perform*, vol. 13, no. 2, pp. 144–150, 2004, doi: 10.1361/10599490418334.
- [40] K. Miskovsky, M. Taborda Duarte, S. Q. Kou, and P. A. Lindqvist, "Influence of the Mineralogical Composition and Textural Properties on the Quality of Coarse Aggregates," *J Mater Eng Perform*, vol. 13, no. 2, pp. 144–150, 2004, doi: 10.1361/10599490418334.
- [41] H. Chakeri, A. Maleki, H. Shakeri, M. Darbor, and H. Mousapour, "Laboratory and numerical investigation of cutting tool performance using a new small-scale linear cutting machine," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-08401-8.
- [42] M. Mohammadi, J. Khademi Hamidi, and K. Rostami, Jamal, Goshtasbi, "A Closer Look into Chip Shape/Size and Efficiency of Rock Cutting with a Simple Chisel Pick: A Laboratory Scale Investigation," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 53, no. 3, pp. 1375–1392, 2020, doi: 10.1007/s00603-019-01984-5.
- [43] K. Rostami, J. K. Hamidi, and H. R. Nejati, "Use of rock microscale properties for introducing a cuttability index in rock cutting with a chisel pick," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 13, no. 18, 2020, doi: 10.1007/s12517-020-05937-z.
- [44] M. H. Kadkhodaei, E. Ghasemi, J. Khademi Hamidi, and J. Rostami, "An experimental study on the effect of rock properties on the production of fine materials by a conical pick," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-05140-8.

[58] P. Heidaryan., M.R. Asef., J.Khademi Hamidi., M.Talkhablou, " The Relationship Between Mechanical Properties and Quart-Feldespar Composition of Sedimentary Rocks," *Jornal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 13(36), 1-13, 2023, (In Persian). doi: 10.22034/anm.2023.19846.1592.

[59] S. Beheshti., S.H. Yarahmadi Bafghi., A.A. Ghorbani., M.R. Rezvanianzadeh, " Relationship between Physical and Mechanical Properties of Jointed Rocks in Central Iran(Bafgh Block)," *Jornal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 12(31), 1-13, 2022, (In Persian).

[56] N. Asadi Aghbolaghi., A. Shafiei, " Simulation of Water Jet Cutting for Granite by Using Smoothed Particle Hydrodynamics," *Jornal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 10(23), 53-63, 2020, (In Persian), doi: 10.29252/anm.2020.11204.1372.

[57] R. Mohammadi., F. Samimi Namin., J. Khademi Hamidi, "Numerical Analysis of Disc Cutter Forces in Linear rock Cutting Procedure using Finite Element Method," *Jornal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 9(20), 53-66, 2019, (In Persian). doi: 10.29252/anm.2019.8036.1275.

¹ Cutability

² Boreability

³ Specific Cutting Force

⁴ Specific Normal Force

⁵ Specific Cutting Energy

⁶ Texture coefficient