

بررسی آزمایشگاهی اثر اندازه دانه بر پارامترهای مکانیکی و چقرمگی شکست مود I مواد شبه سنگی

علی دوستان^۱؛ سید مصلح افتخاری^{۱*}؛ مرتضی احمدی^۱

۱- گروه مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۷؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

(نویسنده مسئول: mosleh.eftkhari@modares.ac.ir)

چکیده

ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها به شدت تحت تأثیر ریزساختار، بافت و خصوصیات پتروگرافی آن‌ها قرار دارند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای ریزساختاری، اندازه دانه است که تأثیر آن بر مقاومت سنگ در مطالعات پیشین نتایج متفاوتی داشته است. علت این اختلاف، تأثیر سایر ویژگی‌های ریزساختاری بر نتایج آزمایش‌ها بوده است. در این تحقیق، تأثیر اندازه دانه بر پارامترهای مکانیکی و چقرمگی شکست مود I در نمونه‌های سنگ مصنوعی، با ثابت نگه‌داشتن سایر عوامل ریزساختاری، بررسی شد. به همین منظور، سه گروه سنگ مصنوعی با ترکیب یکسان اما اندازه دانه متفاوت ساخته شده و تحت آزمایش‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و چقرمگی شکست مود I قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که اندازه دانه به عنوان یک عامل کلیدی در رفتار مکانیکی سنگ، تأثیر مستقیمی بر پارامترهای مقاومتی دارد. با افزایش اندازه دانه‌ها، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته به‌طور معناداری کاهش می‌یابند و چقرمگی شکست نیز همبستگی منفی قابل توجهی با اندازه دانه دارد. ضرایب همبستگی بین اندازه دانه و پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری ($R=-0.95$)، مقاومت کششی برزیلی ($R=-0.93$)، مدول الاستیسیته ($R=-0.98$) و چقرمگی شکست مود I ($R=-0.94$) است که نشان‌دهنده تأثیر قوی اندازه دانه بر این خصوصیات است. همچنین مشخص شد که در نظر گرفتن اندازه دانه در مدل‌های پیش‌بینی چقرمگی شکست باعث بهبود دقت این مدل‌ها می‌شود. این یافته‌ها بر اهمیت در نظر گرفتن اندازه دانه در تحلیل‌های مکانیکی سنگ و مدل‌های پیش‌بینی رفتار شکست تأکید دارند.

انداره دانه، نمونه شبه‌سنگی، مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، چقرمگی شکست مود I

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

دانه‌ها^۲، شکل دانه‌ها (کروی و زاویه‌دار)، نوع تماس بین دانه‌ای (نقطه‌ای، مستقیم، مقعر-محدب و در هم قفل شده^۳) تأثیر مستقیمی بر پارامترهای مکانیکی سنگ دارند. از جمله این پارامترها می‌توان به مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، مدول یانگ، نسبت پواسون، و چقرمگی

سنگ‌ها به دلیل تشکیل در شرایط و فرایندهای زمین‌شناسی مختلف دارای مقاومت فشاری و کششی متفاوتی هستند [۱]. ویژگی‌های ریزساختاری مانند نوع و درصد کانی‌های تشکیل‌دهنده، متوسط اندازه دانه، نزدیکی دانه‌ها^۱، چگالی

³ Sutured

¹ Packing proximity

² Packing density

متفاوت بودند را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان دهنده ارتباط مثبت معنی دار بین اندازه دانه و مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت نقطه‌ای، مقاومت کششی برزلی و مدول یانگ می‌باشند [۸]. النیسان و بهنیا^۷ در سال ۲۰۲۱ تاثیر دانه‌بندی و ترکیبات کانی‌شناسی را بر روی سرعت گسیختگی، چقرمگی شکست و مسیر شکست در سه نوع سنگ گرانیت و هورنفلس^۸ (دو نوع گرانیت و یک نوع هورنفلس) با استفاده از نمونه‌های SCB^9 (خمش نیم‌دایره‌ای) بررسی نموده و نشان دادند که سرعت گسیختگی و چقرمگی شکست رابطه‌ای معکوس با اندازه دانه دارد [۹]. ژانگ و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۲۲ اثر اشباع و دانه‌بندی بر چقرمگی شکست را بر روی ۵ نوع سنگ گرانیتی منطقه بیشان چین مورد مطالعه قرار دادند. این نمونه‌ها حاوی کوارتز پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار و بیوتیت و دارای تفاوت‌های عمده‌ای در دانه‌بندی بودند که بر اساس اندازه دانه به پنج گروه تقسیم شدند. برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست از نمونه‌های CB^{11} (نمونه‌های با ترک ۷ شکل) استفاده شده و نشان دادند که چقرمگی شکست این نمونه‌ها با کاهش اندازه دانه، افزایش می‌یابد [۱۰]. شهسوار و شکبیا^{۱۲} در سال ۲۰۲۲ با استفاده از نمونه‌های ماسه‌سنگ ساخته شده و تغییر اندازه دانه از ۰/۲ به ۰/۸ میلی‌متر، افزایش مقاومت فشاری و مدول یانگ را بیان کردند [۱۱]. امامی میبدی و تعجیبان^{۱۳} در سال ۲۰۲۳ به بررسی رابطه بین خصوصیات مکانیکی و دانه‌بندی سنگ به روش تجربی و عددی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش اندازه دانه، مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کاهش پیدا می‌کند [۱۲]. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج متفاوتی پیرامون تأثیر دانه‌بندی بر روی پارامترهای مقاومتی در مطالعات پیشین وجود دارد. یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین دلایل این تناقض این است که دانه‌بندی تنها پارامتر ریزساختاری بر مقاومت سنگ نیست. برای آنکه تنها پارامتر مؤثر بر مقاومت، دانه‌بندی

شکست اشاره کرد که هر یک در تحلیل پایداری و طراحی سازه‌های سنگی نقش حیاتی دارند. دانه‌بندی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ریزساختاری است که تأثیر چشمگیری بر رفتار مکانیکی سنگ‌ها دارد [۲]. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که اندازه دانه بر مقاومت فشاری، کششی و مدول یانگ اثرگذار است [۳-۱۲]. به‌طور خاص، چقرمگی شکست، که میزان مقاومت سنگ در برابر رشد ترک را نشان می‌دهد، در بسیاری از شرایط مهندسی اهمیت بالایی دارد. از آنجا که مقاومت کششی سنگ‌ها معمولاً بسیار کمتر از مقاومت فشاری آنهاست، در بسیاری از موارد و کاربردهای مهندسی سنگ، شکست و گسترش ترک در اثر بارگذاری مود بازشدگی یا مود I رخ می‌دهد و از اینرو اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود I حایز اهمیت است و موجب شده است محققانی نیز به بررسی اثر اندازه دانه‌بندی بر چقرمگی شکست بپردازند [۹-۱۰]. پالچیک و هتزرور^۱ در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که پارامترهای مقاومتی سنگ با افزایش اندازه دانه، کاهش می‌یابد [۳]. همچنین پریکریل^۲ در سال ۲۰۰۱ با انجام آزمایش بر روی سنگ‌های گرانیت، دولومیت و آنهیدریت گزارش کرد که مقاومت فشاری تک محوری با افزایش اندازه دانه کاهش می‌یابد [۴]. درحالی که منگ و پن^۳ در سال ۲۰۰۷ ویژگی‌های پتروگرافی و مکانیکی ماسه‌سنگ‌ها را بررسی نموده و نشان دادند که با افزایش میانگین اندازه دانه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری افزایش یافته است [۵]. سوسا^۴ در سال ۲۰۱۳ بیان نمود که مقاومت فشاری میل به افزایش متناسب با اندازه دانه کوارتز دارد [۶]. اجلوئیان و همکاران^۵ نیز در سال ۲۰۱۷ با مطالعه اثر دانه‌بندی بر روی سنگ‌های کربناته گزارش کردند که مقاومت فشاری تک محوری با افزایش اندازه دانه در بازه ۰ تا ۵ میلی‌متر روند افزایش داشته و با افزایش اندازه دانه در بازه ۵ تا ۵۰ میلی‌متر روند کاهشی دارد [۷]. لکی روحانی و همکاران^۶ در سال ۲۰۲۰ سه گروه سنگ دولومیتی شمال غرب ایران که دارای ترکیب کانی‌شناسی یکسان اما دانه‌بندی

⁸ Hornfels

⁹ Semi-circular bending

¹⁰ Zhang et al

¹¹ Chevron bending

¹² Shahsavari and Shakiba

¹³ Emami Meybodi and Taajobian

¹ Palchik and Hetzor

² Prikryl

³ Meng and Pan

⁴ Sousa

⁵ Ajelloeian et al

⁶ Lakirouhani et al

⁷ Alneasan and Behnia

نسبت حجمی ماسه به سیمان ۱ و نسبت آب به سیمان ۰/۵ انتخاب گردید [۱۳].

ملات مورد نیاز برای ساخت نمونه‌ها بر اساس استاندارد *ASTM C305-14* به صورت زیر تهیه شد:

- ابتدا سیمان به آب اضافه شد و مخلوط به مدت ۳۰ ثانیه به آرامی هم زده شد.
 - در طول این ۳۰ ثانیه، تمام ماسه مورد نیاز به تدریج به مخلوط اضافه گردید.
 - پس از افزودن ماسه، عمل اختلاط با سرعت متوسط به مدت ۳۰ ثانیه دیگر ادامه یافت.
 - ملات‌های چسبیده به دیواره ظرف به داخل ظرف بازگردانده شد تا ترکیب یکنواخت شود.
 - فرایند اختلاط مجدداً با سرعت متوسط به مدت یک دقیقه دیگر ادامه پیدا کرد.
 - پس از تکمیل اختلاط، ملات آماده شده درون قالب‌های استاندارد ریخته شد. برای اطمینان از یکنواختی و حذف حباب‌های هوا، قالب‌ها به آرامی روی سطح محکم ضربه داده شدند.
 - نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب باقی ماندند و سپس از قالب خارج شدند.
 - نمونه‌های جدا شده تحت شرایط استاندارد برای مدت ۲۸ روز عمل‌آوری شدند تا به مقاومت نهایی برسند.
- در شکل ۱، قالب‌های مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها نمایش داده شده است.

باشد، نمونه‌ها باید همگن باشند. دلیل دیگر می‌تواند عدم در نظر گرفتن اثر متقابل بین سایر پارامترهای ریزساختار در مطالعات قبلی باشد. در این تحقیق سه گروه نمونه سنگ مصنوعی همگن با ترکیب و بافت یکسان اما با دانه‌بندی‌های مختلف در آزمایشگاه، با هدف درک کامل و دقیق اثر دانه-بندی بر روی پارامترهای مکانیکی ساخته شده است. دلیل استفاده از نمونه‌های سنگ مصنوعی به جای سنگ طبیعی این است که اولاً نمونه‌های مصنوعی معمولاً هزینه کمتر دارند، زیرا فرایند تولید آن‌ها ارزان‌تر و آماده‌سازی راحت‌تری دارد. سنگ‌های مصنوعی عموماً با ترکیب دقیق مواد اولیه تولید می‌شوند، بنابراین می‌توان تأثیر ترکیب موارد و اندازه دانه را بر خواص مکانیکی بهتر ارزیابی کرد.

۲- آزمایش‌های تجربی

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه سنگ مصنوعی، ماسه سیلیسی، سیمان و آب شرب می‌باشد. سیمان به کار رفته از نوع سیمان پرتلند تیپ II است. در این تحقیق از سه گروه ماسه با شکل ذرات تقریباً گردگوشه با محدوده اندازه دانه مختلف استفاده گردید. ماسه با الک‌های شماره ۴، ۸، ۱۶ و ۳۰ که اندازه چشمه آن‌ها به ترتیب ۴/۷۵، ۲/۳۶، ۱/۱۸ و ۰/۶ میلی‌متر است، سرند شده که ماسه‌های مورد استفاده به ترتیب اندازه دانه از دانه ریز به دانه درشت *G1*، *G2* و *G3* نام‌گذاری شده‌اند. جدول ۱ اندازه دانه‌های به کار رفته در ساخت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- اندازه دانه‌های به کار رفته در ساخت نمونه

گروه	شماره الک	اندازه دانه (mm)
<i>G1</i>	۱۶-۳۰	۱/۱۸-۰/۶
<i>G2</i>	۸-۱۶	۲/۳۶-۱/۱۸
<i>G3</i>	۴-۸	۴/۷۵-۲/۳۶



شکل ۱- قالب‌های به کار رفته برای ساخت نمونه‌های برزیلی و مقاومت فشاری

با توجه به نتایج مقالات مختلف در زمینه تهیه نمونه‌های مصنوعی، طرح اختلاط مناسب برای ساخت نمونه‌ها به صورت



شکل ۲- نمایشی از دستگاه سنتام و انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

۲-۳- آزمایش مقاومت کششی برزیلی

یکی از متداول‌ترین روش‌های تعیین مقاومت کششی به صورت غیرمستقیم، روش برزیلی است. به دلیل نزدیک‌تر بودن نتایج این روش به روش کشش مستقیم، ارزان‌تر و ساده‌تر بودن آن، بیشتر مورد اقبال قرار گرفته است. در تحقیق حاضر، به منظور انجام آزمایش برزیلی، طبق استاندارد *ISRM* [۱۵]، نمونه‌ها با قطر تقریبی ۵۴ و ضخامت ۳۰ میلی‌متر آماده شده‌اند.

دورتادور نمونه‌ها سلفون با ضخامت ناچیزی پیچیده شد (شکل ۳). برای انجام این آزمایش از دستگاه *HEICO* آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس استفاده گردید. پس از قراردادن فک آزمایش برزیلی در دستگاه، تا زمانی که نمونه دچار شکست و گسیختگی شده و ترک ناشی از فشار در مرکز نمونه ایجاد شود، از طریق میله به نمونه فشار وارد می‌شود. در شکل ۴ نمایشی از دستگاه و فک برزیلی استفاده شده در آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلی

۲-۲- آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

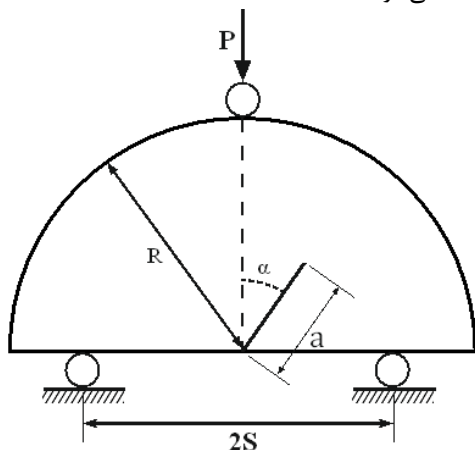
در این تحقیق، برای انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری از دستگاه یونیورسال سنتام آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس استفاده شد (شکل ۲). در این دستگاه جابه‌جایی کنترل‌پذیر بوده و امکان تنظیم سرعت بارگذاری وجود دارد. این دستگاه برای انجام آزمایش‌های کششی و فشاری دقیق طراحی شده است. برای انجام آزمایش، مطابق استاندارد *ISRM* [۱۴]، تعداد ۱۲ نمونه مصنوعی با قطر تقریبی ۵۴ و طول ۱۰۰ میلی‌متر آماده و مورد آزمایش قرار گرفت. با توجه به آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها، سرعت بارگذاری باید به نحوی انتخاب شود که نمونه در مدت زمان ۵ الی ۱۰ دقیقه دچار شکست شود. به همین دلیل نرخ بارگذاری ۰/۱۲ میلی‌متر بر دقیقه برای تمام نمونه‌ها انتخاب گردید. پس از قرار دادن نمونه بر روی مرکز تکیه‌گاه دایره‌ای پایینی، صفحه بالایی نیز دقیقاً مقابل صفحه پایینی قرار می‌گیرد. فک متحرک بالایی نیز با استفاده از سیستم به سمت پایین جابه‌جا شده و با صفحه بالایی قرار گرفته بر روی نمونه تماس می‌شود. پس از انجام کنترل‌های اولیه و ورود داده‌ها به نرم‌افزار، بارگذاری با نرخ ثابت آغاز می‌شود. دستگاه داده‌های نیرو و تغییر طول نمونه را تا لحظه شکست ثبت نموده و به کمک داده‌های ثبت شده می‌توان منحنی تنش- کرنش را رسم نمود.

مشخص در لبه آن ایجاد شده و تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار می‌گیرد استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، در صورتی که زاویه شکاف اولیه ایجاد شده با محور قائم (α) صفر درجه باشد، مود یک خالص رخ خواهد داد [۱۹]. شکل ۵ هندسه شماتیک نمونه SCB را نمایش می‌دهد.

این آزمایش با استفاده از دستگاه بارگذاری سه نقطه‌ای SANTAM واقع در آزمایشگاه راه و ترابری دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تربیت مدرس انجام شد. نمونه‌های چقرمگی طبق استاندارد ISRM ساخته و آماده شدند. نمونه‌ها با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه تا زمان شکست تحت بارگذاری قرار گرفتند [۲۰]. عملیات بارگذاری موجب تمرکز تنش در اطراف نوک ترک ایجاد شده می‌گردد. تمرکز تنش نیز باعث توسعه ریزترک‌ها شده و در نهایت نمونه شکسته می‌شود.



شکل ۴- نمایشی از دستگاه به کاررفته برای انجام آزمایش مقاومت کششی برزیلی



شکل ۵- تصویر شماتیک نمونه SCB [۲۳]

کوروپو و همکارانش [۲۱] در سال ۲۰۱۳ روابط زیر را برای تعیین چقرمگی شکست ارائه کرده اند:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}\sqrt{\pi a}}{2RB} Y^* \quad (1)$$

$$Y^* = -1.297 + 9.516 \left(\frac{S}{2R}\right) - (0.47 + 16.457 \left(\frac{S}{2R}\right)\beta + 34.401 \left(\frac{S}{2R}\right)\beta^2) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{a}{R} \\ 0.4 \leq \frac{a}{R} \leq 0.6$$

۴-۲- آزمایش چقرمگی شکست

چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی شکست است. برخلاف آزمایش‌های مرسوم مقاومت فشاری و کششی که تنها استحکام نهایی ماده را مشخص می‌کنند، چقرمگی شکست نشان‌دهنده‌ی توانایی ماده در مقاومت در برابر رشد ترک و انتشار آن در شرایط بارگذاری مختلف است [۱۶]. در میان مودهای مختلف شکست، بررسی مود I اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا ترک‌های اولیه در بسیاری از سازه‌های سنگی و یا بتنی در اثر تنش‌های کششی شکل می‌گیرند و انتشار ترک در این مود می‌تواند به تخریب ناگهانی و کاهش عمر مفید سازه منجر شود [۱۷].

آزمایش چقرمگی شکست با سایر آزمایش‌های مکانیک سنگ متفاوت است؛ زیرا نمونه‌های مورد آزمایش باید دارای یک ترک با مشخصات هندسی معین بوده تا اثر ترک را تحت بارگذاری‌های مختلف بتوان بررسی و تحلیل نمود. عوامل زیادی مانند مقاومت سنگ مورد آزمایش، تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی در دسترس، سادگی یا پیچیدگی آماده‌سازی نمونه، در انتخاب روش تعیین چقرمگی شکست سنگ مؤثر است [۱۸]. در این تحقیق، برای تعیین چقرمگی شکست مود I از روش خمشی نیم‌دایره‌ای (SCB) که توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ پیشنهاد شده است استفاده گردید. در این روش از یک دیسک نیم‌دایره‌ای که یک شکاف با هندسه

$$0.5 \leq \frac{S}{2R} \leq 0.8$$

که در این روابط:

Y^* : ضریب شدت تنش بدون بعد

R : شعاع نمونه برحسب میلی‌متر

D : قطر نمونه برحسب میلی‌متر

S : فاصله افقی بین دو تکیه‌گاه که نمونه بر روی آن‌ها قرار

می‌گیرد برحسب میلی‌متر

K_{IC} : چقرمگی شکست مود I

با به دست آوردن حداکثر بار شکست نمونه (P_{max})، به

کمک روابط فوق می‌توان چقرمگی شکست مود I را محاسبه نمود.

۳- نتایج و بحث

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و مدول یانگ، سه گروه نمونه با سه نوع دانه‌بندی متفاوت و در مجموع ۳۶ عدد نمونه ساخته شد و طبق استاندارد *ISRM* مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول ۲ تا ۵ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و چقرمگی شکست مود I آورده شده است.

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در جدول ۲ نشان می‌دهد، مقاومت نمونه‌ها از ۳۹/۶ تا ۵۹/۷۳ مگاپاسکال متغیر بوده و با افزایش اندازه دانه مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش یافته است. طبق طبقه‌بندی آنون، ۵۰ درصد نمونه‌ها قوی و ۵۰ درصد نمونه‌ها نسبتاً قوی می‌باشند. شکل ۶ نمونه‌های آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری را قبل و بعد از شکست نشان می‌دهد [۲۲].

جدول ۲- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها

شماره نمونه	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	
	میانگین	انحراف معیار
G_1	۵۶/۰۵	۳/۰۷
G_2	۴۹/۶۹	۱/۶۲
G_3	۳۹/۶	۲/۰۶

خطی که نقطه صفر تنش را به ۵۰ درصد مقاومت نهایی متصل می‌کند، به دست می‌آید نیز بین ۲۴/۲۵ و ۴۱/۲۴ با میانگین ۳۲/۸۵ تغییر می‌کند. جدول ۳ مقادیر مدول الاستیسیته را برای دانه‌بندی‌های مختلف و شکل‌های ۷ تا ۹ منحنی تنش-کرنش برای یکی از نمونه‌های G_1 ، G_2 و G_3 را نمایش می‌دهد.

جدول ۳- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌ها

شماره نمونه	مدول الاستیسیته (GPa)	
	میانگین	انحراف معیار
G_1	۴۰/۲۷	۰/۶۷
G_2	۳۲/۸۸	۰/۵۹
G_3	۲۵/۳۹	۰/۷۶



شکل ۶- نمونه‌های مقاومت فشاری تک‌محوری قبل و بعد از شکست

همچنین مدول الاستیسیته سکانتی که از محاسبه شیب

برزیلی نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها

شماره نمونه	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	میانگین	انحراف معیار
G1	۶/۳۹	۰/۴۴	
G2	۵/۷۴	۰/۲۳	
G3	۴/۹۶	۰/۱۹	



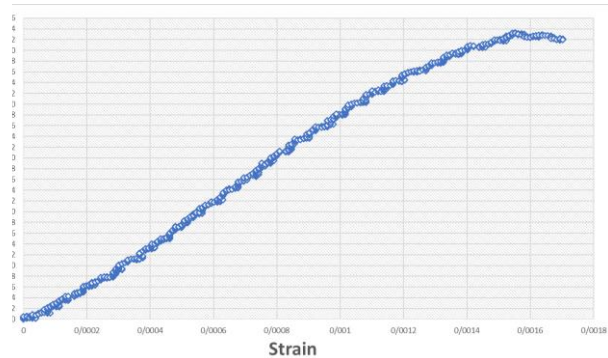
شکل ۱۰- ترک‌های کششی ایجاد شده ناشی از مقاومت کششی برزیلی

شکل‌های آزمایش چقرمگی شکست مود I برای نمونه‌ها در جدول ۵، از ۰/۳۵ تا ۰/۶۹ $MPa \cdot m^{0.5}$ متغیر بوده و بررسی نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط شاه و همکاران^۱ بیانگر این است که مقدار چقرمگی شکست مود I برای نمونه بتنی در بازه ۰/۱ تا ۱ $MPa \cdot m^{0.5}$ است [۲۳]. شکل ۱۱ نمونه‌های آزمایش را قبل و بعد از شکست نشان می‌دهد.

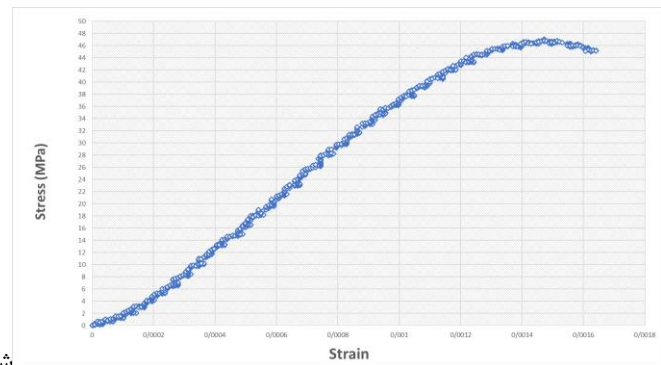
جدول ۵- نتایج آزمایش چقرمگی شکست مود I نمونه‌ها

شماره نمونه	چقرمگی شکست مود I ($MPa \cdot m^{0.5}$)	میانگین	انحراف معیار
G1	۰/۶	۰/۰۷	
G2	۰/۵۲	۰/۰۵	
G3	۰/۳۸	۰/۰۲	

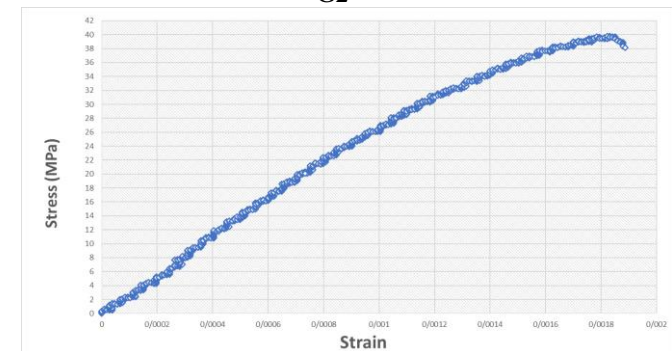
برای یافتن همبستگی و رابطه بین پارامترهای مطالعه شده و دانه‌بندی از روش رگرسیون خطی ساده استفاده گردید. ضرایب همبستگی میان دانه‌بندی و پارامترهای مکانیکی از



شکل ۷- منحنی تنش-کرنش برای یکی از نمونه‌های با اندازه دانه G1



شکل ۸- منحنی تنش-کرنش برای یکی از نمونه‌های با اندازه دانه G2

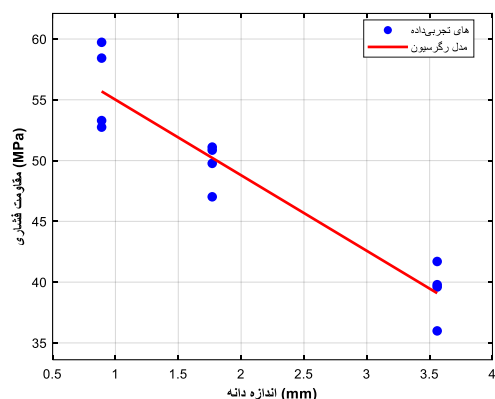


شکل ۹- منحنی تنش-کرنش برای یکی از نمونه‌های با اندازه دانه G3

مقادیر آزمایش مقاومت کششی برزیلی برای نمونه‌ها از ۴/۶۹ تا ۶/۹۷ مگاپاسکال در جدول ۴ متغیر است. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از ترک‌های ایجاد شده در آزمایش مقاومت کششی

¹ Shah et al

که در آن UCS مقاومت فشاری تک‌محوری برحسب مگاپاسکال و GS اندازه دانه برحسب میلی‌متر است.

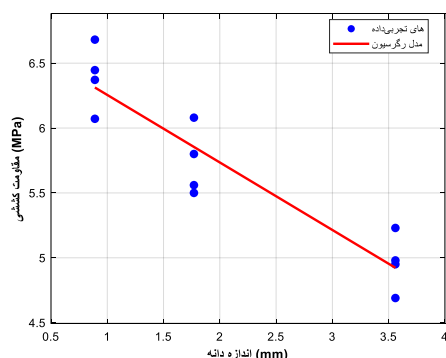


شکل ۱۲- همبستگی بین اندازه دانه و مقاومت فشاری تک‌محوری

همچنین، تحلیل رگرسیون خطی نشان‌دهنده یک همبستگی منفی قوی ($R=-0.93$) بین اندازه دانه و مقاومت کششی برزیلی است. همان‌طور که در منحنی شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، این دو پارامتر رابطه معکوسی با یکدیگر دارند. بر این اساس، می‌توان رابطه تجربی زیر را برای توصیف ارتباط بین اندازه دانه و مقاومت کششی برزیلی ارائه کرد:

$$BTS = -0.52 * GS + 6.8 \quad (4)$$

که در آن BTS مقاومت کششی برزیلی برحسب مگاپاسکال و GS اندازه دانه برحسب میلی‌متر است.



شکل ۱۳- همبستگی بین اندازه دانه و مقاومت کششی برزیلی

جمله مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی، مدول الاستیسیته و چقرمگی شکست مود I در جدول ۶ ارائه شده است.



شکل ۱۱- نمونه‌های SCB قبل و بعد از شکست

جدول ۶- ضرایب همبستگی خطی بین اندازه دانه و پارامترهای مکانیکی

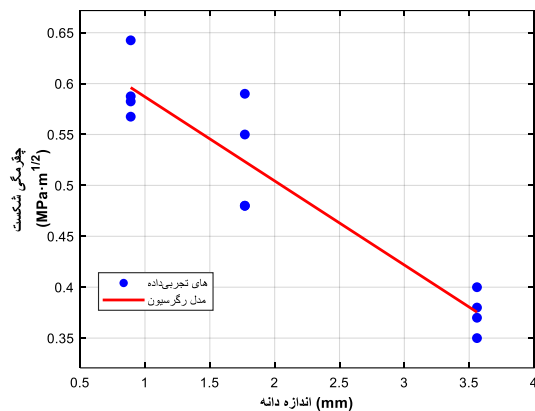
پارامتر	R	R^2
مقاومت فشاری تک‌محوری	-۰/۹۵	۰/۹۰
مقاومت کششی برزیلی	-۰/۹۳	۰/۸۶
چقرمگی شکست مود I	-۰/۹۴	۰/۸۸
مدول الاستیسیته	-۰/۹۸	۰/۹۵

بر اساس تحلیل رگرسیون خطی که انجام گرفته، همبستگی منفی بسیار قوی‌ای با ضریب ($R=-0.95$) بین اندازه دانه و مقاومت فشاری تک‌محوری برقرار است. طبق منحنی شکل ۱۲، مقاومت فشاری تک‌محوری و دانه‌بندی دارای نسبت معکوس بوده و رابطه زیر را برای ارتباط بین این دو پارامتر می‌توان ارائه داد:

$$UCS = -6.22 * GS + 61.23 \quad (3)$$

دانه به عنوان یک پارامتر ریزساختاری مهم، تأثیر چشمگیری بر روی پارامترهای مقاومتی سنگ دارد. همان طور که ملاحظه می شود، با افزایش اندازه دانه ها، پارامترهای مقاومتی (شامل مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته) به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابند. این روند نشان می دهد که ساختار دانه ای سنگ به طور مستقیم در تعیین رفتار مکانیکی آن نقش دارد.

از آنجا که پارامترهای مکانیکی سنگ با یکدیگر ارتباط درونی و همبستگی دارند، انتظار می رود که تأثیر اندازه دانه بر هر یک از این پارامترها، به طور غیرمستقیم بر سایر پارامترها نیز اثرگذار باشد. به عنوان مثال، کاهش مقاومت فشاری ناشی از افزایش اندازه دانه ها می تواند تغییراتی در مدول الاستیسیته ایجاد کند و این تغییرات به نوبه ی خود بر چقرمگی شکست اثرگذار باشد.



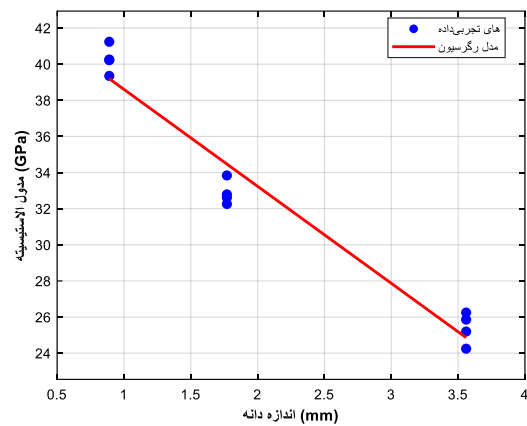
شکل ۱۵- همبستگی بین اندازه دانه و چقرمگی شکست مود I

رابطه چقرمگی شکست با سایر پارامترهای مکانیکی بدون لحاظ اندازه دانه همراه با میزان ضریب تعیین و خطای مربوطه در جدول ۷ آمده است و نشان دهنده ارتباط قابل توجه این کمیت با سایر پارامترهای مکانیکی است. با این حال، به منظور بررسی دقیق تر اثر اندازه دانه بر چقرمگی شکست، مدل های قبل هنگامی که اندازه دانه نیز به مدل افزوده می شود مورد بررسی قرار گرفتند که نتایج آنها در جدول ۸ ارائه شده است.

نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی نشان می دهد که بین اندازه دانه و مدول الاستیسیته نیز همبستگی منفی با ضریب $(R=-0.98)$ وجود دارد. همان طور که در منحنی شکل ۱۴ دیده می شود، افزایش اندازه دانه با کاهش مدول الاستیسیته همراه است. بر این اساس، می توان یک رابطه تجربی برای توصیف این وابستگی ارائه کرد:

$$E = -5.37 * GS + 43.98 \quad (5)$$

که در آن E مدول الاستیسیته سکانتی برحسب GPa و GS اندازه دانه برحسب میلی متر است.



شکل ۱۴- همبستگی بین اندازه دانه و مدول الاستیسیته

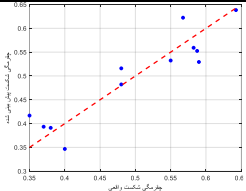
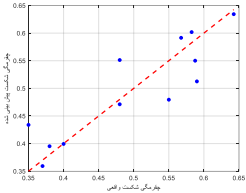
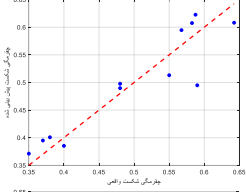
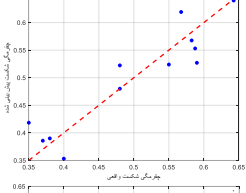
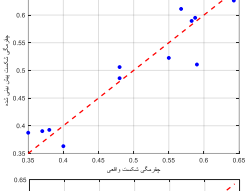
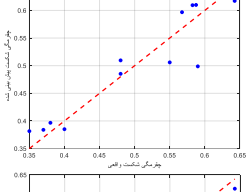
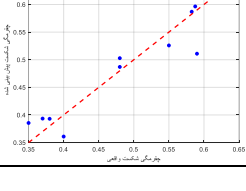
بر اساس تحلیل رگرسیون خطی که انجام گرفته، همبستگی منفی با ضریب $(R=-0.94)$ بین دانه بندی و چقرمگی شکست مود I برقرار است. طبق منحنی شکل ۱۵، چقرمگی شکست مود I و دانه بندی دارای نسبت معکوس بوده و رابطه تجربی زیر را برای ارتباط بین این دو پارامتر می توان ارائه داد:

$$K_{IC} = -0.08 * GS + 0.67 \quad (6)$$

که در آن K_{IC} چقرمگی شکست مود I برحسب $MPa.m^{0.5}$ و GS اندازه دانه برحسب میلی متر است.

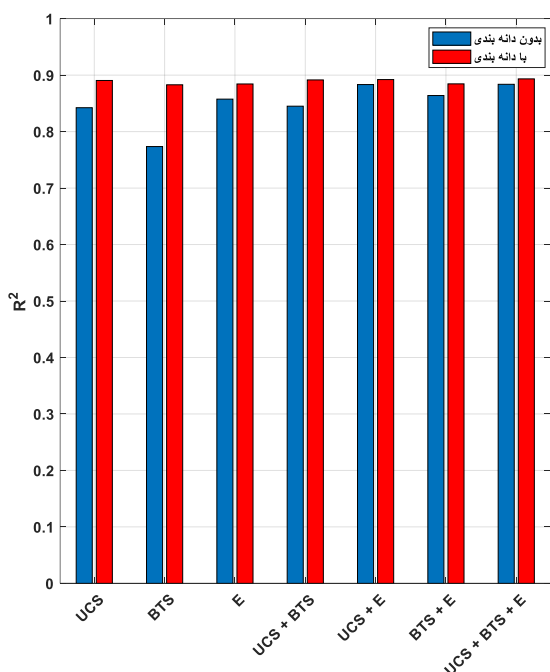
بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش ها نشان می دهد که اندازه

جدول ۷- ارتباط چقرمگی شکست با پارامترهای مختلف از طریق مدل‌های رگرسیونی بدون لحاظ اندازه دانه

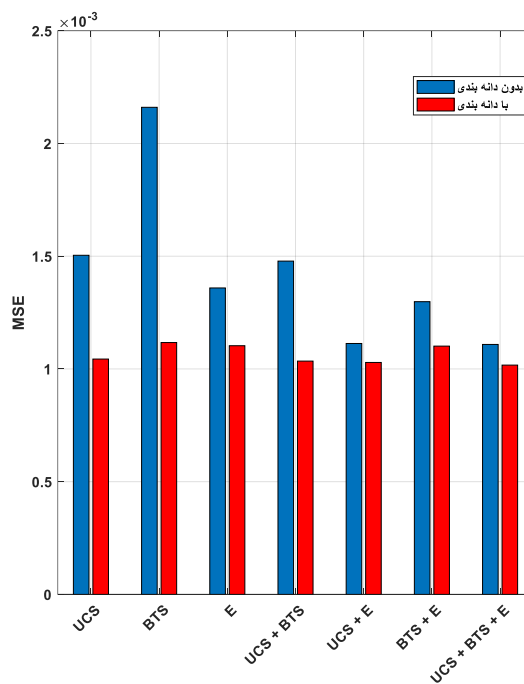
	VAF (%)	MSE	R ²	رابطه رگرسیون	مدل
	84.24	0.0015	0.84	$K_{IC} = -0.0953 + 0.0123 \text{ UCS}$	UCS
	77.36	0.0022	0.77	$K_{IC} = -0.2884 + 0.1381 \text{ BTS}$	BTS
	85.75	0.0014	0.86	$K_{IC} = 0.0122 + 0.0148 \text{ E}$	E
	84.51	0.0015	0.85	$K_{IC} = -0.1387 + 0.0104 \text{ UCS} + 0.0237 \text{ BTS}$	UCS + BTS
	88.34	0.0011	0.88	$K_{IC} = -0.0560 + 0.0057 \text{ UCS} + 0.0085 \text{ E}$	UCS + E
	86.39	0.0013	0.86	$K_{IC} = -0.0698 + 0.0311 \text{ BTS} + 0.0119 \text{ E}$	BTS + E
	88.38	0.0011	0.88	$K_{IC} = -0.0356 + 0.0062 \text{ UCS} - 0.0103 \text{ BTS} + 0.0089 \text{ E}$	UCS + BTS + E

جدول ۸- ارتباط چقرمگی شکست با پارامترهای مختلف از طریق مدل‌های رگرسیونی با لحاظ اندازه دانه

مدل	رابطه رگرسیون	R ²	MSE	VAF (%)
UCS + GS	$K_{IC}=0.4434+0.0037 UCS-0.0596 GS$	0.89	0.0010	89.06
BTS + GS	$K_{IC}=0.6185+0.0075 BTS-0.0787 GS$	0.88	0.0011	88.29
E + GS	$K_{IC}=0.5333+0.0031 E-0.0660 GS$	0.88	0.0011	88.44
UCS + BTS + GS	$K_{IC}=0.5011+0.0044 UCS-0.011 BTS-0.0630 GS$	0.89	0.0010	89.15
UCS + E + GS	$K_{IC}=0.3182+0.0036 UCS+0.0029 E-0.0443 GS$	0.89	0.0010	89.22
BTS + E + GS	$K_{IC}=0.4986+0.0058 BTS+0.0030 E-0.0635 GS$	0.88	0.0011	88.46
UCS + BTS + E + GS	$K_{IC}=0.3728+0.0045 UCS-0.0173 BTS+0.0032 E-0.0467 GS$	0.89	0.0010	89.34



(الف)



(ب)

شکل ۱۶- مقایسه مدل‌های پیش‌بینی چقرمگی شکست با و بدون در نظر گرفتن اندازه دانه (الف) ضریب تعیین (ب) خطای MSE

تعیین افزایش و مقدار خطا کاهش یافته است. لازم به ذکر است که مدلی که تنها با مقاومت کششی ایجاد شده بود در حالت بدون در نظر گرفتن اندازه دانه بود کمتر دقت را داشته و با اضافه کردن دانه بندی این مدل نیز دقت قابل قبولی

به منظور مقایسه نتایج مدل‌های با و بدون در نظر گرفتن اندازه دانه، نتایج آن‌ها به صورت مقایسه‌ای در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در نظر گرفتن اندازه دانه باعث بهبود در تمام مدل‌ها شده به طوریکه ضریب

خواص مکانیکی ایجاد کرد. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن است که افزایش اندازه دانه‌ها منجر به کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته می‌شود. همچنین، چقرمگی شکست که یک پارامتر کلیدی در ارزیابی رفتار شکست سنگ است، نه تنها تحت تأثیر این پارامترهای مکانیکی قرار دارد، بلکه اندازه دانه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در آن ایفا می‌کند.

افزودن اندازه دانه به مدل‌های پیش‌بینی‌کننده چقرمگی شکست باعث بهبود دقت مدل‌ها شده است، به‌گونه‌ای که ضریب تعیین افزایش و میزان خطا کاهش یافته است. این موضوع بیانگر آن است که اندازه دانه به‌عنوان یک پارامتر کلیدی ریزساختاری، تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار مکانیکی سنگ داشته و باید در تحلیل‌های مکانیکی و مدل‌های پیش‌بینی رفتار سنگ مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، در مطالعات آینده، در نظر گرفتن تأثیر متقابل اندازه دانه با سایر ویژگی‌های ریزساختاری نظیر نوع و درصد کانی‌ها و نحوه تماس دانه‌ها، می‌تواند به درک جامع‌تری از رفتار مکانیکی سنگ‌ها منجر شود.

کسب کرده است. این موضوع بیانگر آن است که نه تنها چقرمگی شکست به‌طور مستقیم از پارامترهای مکانیکی تأثیر می‌پذیرد، بلکه اندازه دانه نیز به‌عنوان یک عامل کلیدی در این رابطه مؤثر است. به بیان دیگر، تغییرات چقرمگی شکست تنها به عوامل مکانیکی محدود نمی‌شود، بلکه تحت تأثیر ویژگی‌های ریزساختاری سنگ نیز قرار دارد زیرا این عوامل از جمله اندازه دانه می‌توانند بر مکانیزم شکست و نحوه گسترش ترک در نمونه‌های ترک‌دار تأثیر بگذارند. چنین رفتار پیچیده‌ای نشان‌دهنده‌ی آن است که در تحلیل‌های مکانیکی سنگ، نمی‌توان نقش اندازه دانه را نادیده گرفت و لازم است که در مدل‌های پیش‌بینی رفتار سنگ، این پارامتر نیز به‌طور ویژه مورد توجه قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که تأثیر اندازه دانه بر ویژگی‌های مکانیکی سنگ، بسته به نوع سنگ و سایر پارامترهای ریزساختاری، می‌تواند متغیر باشد. در این تحقیق، از نمونه‌های سنگ مصنوعی استفاده شد تا بتوان با کنترل بهتر متغیرهای تأثیرگذار، رابطه‌ای مشخص بین اندازه دانه و

۵- منابع

1. FRANKLIN, B. and M. Dusseault, *Engineerin*. 1989: McGraw—Hill Publishing Company New York.
2. Lakirouhani, A., et al., *Physical and mechanical properties of sandstones from Southern Zanjan, north-western Iran*. Baltica, 2022. **35**(1).
3. Palchik, V. and Y.H. Hatzor, *Correlation between mechanical strength and microstructural parameters of dolomites and limestones in the Judea group, Israel*. Israel Journal of Earth Sciences, 2000. **49**(2): p. 65-79.
4. Přikryl, R., *Some microstructural aspects of strength variation in rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001. **38**(5): p. 671-682.
5. Meng, Z. and J. Pan, *Correlation between petrographic characteristics and failure duration in clastic rocks*. Engineering geology, 2007. **89**(3-4): p. 258-265.
6. Sousa, L.M., *The influence of the characteristics of quartz and mineral deterioration on the strength of granitic dimensional stones*. Environmental earth sciences, 2013. **69**: p. 1333-1346.
7. Ajalloelian, R., H. Mansouri, and E. Baradaran, *Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017. **76**: p. 295-307.
8. Lakirouhani, A., et al., *Physical parameters, tensile and compressive strength of dolomite rock samples: Influence of grain size*. Journal of Civil Engineering and Management, 2020. **26**(8): p. 789-799.
9. Alneasan, M. and M. Behnia, *An experimental investigation on tensile fracturing of brittle rocks*

- by considering the effect of grain size and mineralogical composition. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021. **137**: p. 104570.
10. Zhang, T., et al., *Influence of grain size and basic element size on rock mechanical characteristics: insights from grain-based numerical analysis*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022. **81**(9): p. 347.
 11. Shahsavari, M.H. and M. Shakiba, *An experimental insight into the influence of sand grain size distribution on the petrophysical and geomechanical properties of artificially made sandstones*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. **215**: p. 110632.
 12. Emami Meybodi, E. and F. Taajobian, *Analysis of Grain Size Effect on Mechanical Properties of Sandstone with Experimental and Numerical Methods*. Journal of Mining and Environment, 2023. **14**(2): p. 713-730.
 13. قزوینیان، ع.، صدیری، م.، نجاتی، ح.، بررسی آزمایشگاهی اثر دانه بندی محیط های ناهمگن بر گسترش ترک، مجله علمی-پژوهشی عمران مدرس، ۱۳۹۴، دوره ۱۵.
 14. ISRM, *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1979. **2**: p. 135-141.
 15. Bieniawski, Z. and I. Hawkes, *Suggested methods for determining tensile strength of rock materials*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978. **15**(3): p. 99-103.
 16. Bazant, Z.P. and J. Planas, *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. 2019: Routledge.
 17. Shah, S.P., S.E. Swartz, and C. Ouyang, *Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*. 1995: John Wiley & Sons.
 18. Alkılıçgil, Ç., *Development of specimen geometries for mode I fracture toughness testing with disc type rock specimens*. 2010.
 19. Eftekhari, M., A. Baghbanan, and H. Hashemolhosseini, *Fracture propagation in a cracked semicircular bend specimen under mixed mode loading using extended finite element method*. Arabian Journal of Geosciences, 2015. **8**: p. 9635-9646.
 20. Bui, H.H. and M. Saleh, *Effects of specimen size and loading conditions on the fracture behaviour of asphalt concretes in the SCB test*. Engineering Fracture Mechanics, 2021. **242**: p. 107452.
 21. Kuruppu, M., *ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013. **47**(1): p. 267-274.
 22. Geology, I.A.o.E., *Classification of rocks and soils for engineering geological mapping: part I: rock and soil materials*. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1979. **19**: p. 364-371.
 23. Hudson, J.A. and J.P. Harrison, *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. 2000: Elsevier.



Experimental Investigation of the Effect of Grain Size on the Mechanical Parameters and Mode I Fracture Toughness of Rock-Like Materials

Ali Doostan¹; Seyed Mosleh Eftekhari^{1*}; Morteza Ahmadi
1 Faculty of Mining and Materials, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 07 July 2024 Accepted: 19 September 2024
(*Corresponding Author: mosleh.eftekhari@modares.ac.ir)

Keywords

Grain size
Uniaxial compressive strength
Brazilian tensile strength
Fracture toughness mode I

Final English Extended Abstract

Summary

The mechanical properties of rocks are significantly influenced by their petrographic characteristics, microstructure, and texture. Among these factors, grain size is a crucial microstructural parameter whose effect on rock strength has been debated due to the varying influence of other factors such as density and porosity. This study investigates the impact of grain size on the mechanical parameters and mode I fracture toughness of artificial rock samples while keeping other microstructural factors constant. The results demonstrate that grain size significantly affects rock strength, as an increase in grain size leads

to a decrease in uniaxial compressive strength (UCS), Brazilian tensile strength (BTS), and elastic modulus, while mode I fracture toughness exhibits a strong negative correlation with grain size.

Introduction

Rock mechanical properties are determined by various factors, including petrographic characteristics, microstructure, and texture. Among these, grain size plays a critical role in governing rock strength and fracture behavior. However, previous studies on natural rock samples have reported inconsistent results due to the simultaneous influence of other microstructural parameters such as density and porosity. To isolate the effect of grain size, this study focuses on artificial rock samples with controlled composition and uniform microstructural conditions. The objective is to evaluate the role of grain size in determining rock strength and fracture toughness, which has implications for geomechanics and rock engineering applications.

Methodology and Approaches

Three groups of artificial rock samples with identical composition but different grain sizes were prepared to isolate the effect of grain size on mechanical behavior. Physical properties, including density and porosity, were measured, followed by mechanical tests such as UCS, BTS, and mode I fracture toughness. By maintaining all other microstructural factors constant, the study aimed to establish a direct correlation between grain size and rock strength parameters, providing insights into fracture behavior and mechanical performance.

Results and Conclusions

The experimental results indicate that, when other microstructural factors such as density, porosity, and material composition remain constant, grain size has a substantial effect on mechanical properties. An increase in grain size leads to a reduction in UCS, BTS, and elastic modulus, while mode I fracture toughness also exhibits a strong negative correlation with grain size. The correlation coefficients between grain size and UCS ($R=-0.95$), BTS ($R=-0.93$), elastic modulus ($R=-0.98$), and mode I fracture toughness ($R=-0.94$) confirm the strong influence of grain size on these properties. Additionally, considering grain size in fracture toughness prediction models improves their accuracy. These findings emphasize the importance of grain size in rock mechanical analyses and predictive models of fracture behavior, contributing to a better understanding of rock strength.
