

بررسی تأثیر ابعاد نمونه بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی گرانیث با استفاده

از مدل‌سازی عددی دانه‌مبنا

مرضیه مرادی، ساسان قربانی*

دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

s.ghorbani@hut.ac.ir

چکیده

اثر مقیاس یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده رفتار مکانیکی سنگ‌ها محسوب می‌شود. در این پژوهش، اثر نسبت ارتفاع به قطر و آرایش دانه‌ای بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی گرانیث با استفاده از مدل‌سازی عددی مبتنی بر دانه بررسی شد. به همین منظور، نمونه‌های گرانیث با سه ساختار دانه‌ای شامل آرایش‌های نامنظم، نیمه‌منظم و تقریباً منظم تولید و برای نسبت‌های ارتفاع به قطر برابر $0/8$ ، $1/4$ و 2 تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ارتفاع به قطر از $0/8$ به 2 ، مقادیر میانگین مقاومت در تمامی ساختارها بین 17% تا 26% کاهش یافت؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار مقاومت در نمونه‌های بلندتر و دارای ساختار نامنظم مشاهده شد. در مقابل، ضریب ارتجاعی حساسیت کمتری نسبت به تغییر ابعاد نمونه نشان داد و کاهش آن بین 4% تا 8% برآورد شد. تحلیل اثر آرایش دانه‌ای نشان داد که ساختارهای نامنظم با پراکندگی زیاد مقادیر مقاومت، بیشترین حساسیت نسبت به اثر مقیاس را دارند، در حالی‌که شبکه‌های منظم‌تر به دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش، رفتار مکانیکی پایدارتری ایجاد می‌کنند. با هدف تحلیل کمی اثر مقیاس، روابط توانی میان پارامترهای مکانیکی و نسبت ارتفاع به قطر استخراج شد. تحلیل‌ها نشان دادند که ضریب حساسیت اثر مقیاس برای مقاومت به مراتب بزرگ‌تر از ضریب ارتجاعی است؛ به‌گونه‌ای که نسبت شدت اثر مقیاس مقاومت به ضریب ارتجاعی در ساختارهای نیمه‌منظم حدود $4/9$ برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که اثر مقیاس در گرانیث عمدتاً ماهیتی مقاومتی داشته و به شدت متأثر از ناهمگنی ریزساختاری و نحوه آرایش دانه‌ها می‌باشد.

کلمات کلیدی

ناهمگنی ریزساختاری، نسبت ارتفاع به قطر، مقاومت فشاری تک‌محوره، شدت اثر مقیاس، ضریب ارتجاعی

بررسی اثر مقیاس بر ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌ها همواره به عنوان یکی از موضوعات اساسی در مهندسی سنگ مطرح بوده است. به طور خاص، وابستگی مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS) و ضریب ارتجاعی (E) به ابعاد نمونه‌سنگ‌ها نقش بنیادینی در طراحی سازه‌های سنگی ایفا می‌کند [۱]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر با افزایش ابعاد نمونه کاهش می‌یابد. این پدیده عمدتاً ناشی از افزایش احتمال وجود ناپیوستگی‌ها و ضعف‌های پیش‌موجود در حجم‌های بزرگ‌تر سنگ است. با این حال، ماهیت دقیق اثر مقیاس به عوامل متعددی از جمله نوع سنگ، ترکیب کانی‌شناسی و میزان تخلخل وابسته است [۲ و ۳]. بنابراین، با توجه به تعدد پارامترهای مؤثر، بررسی اثر ابعاد نمونه بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی سنگ‌ها با استفاده از روش‌های مقرون‌به‌صرفه‌تر و کارآمدتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در سال‌های اخیر، روش‌های مختلف عددی به طور گسترده در تحقیقات مربوط به حوزه مکانیک سنگ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی، هر دو رویکردهای پیوسته و ناپیوسته برای مطالعه اثر اندازه دانه و ابعاد نمونه بر مقاومت و ضریب ارتجاعی سنگ‌ها به کار گرفته می‌شوند. در این میان، روش‌های پیشرفته‌ای نظیر مدل‌سازی مبتنی بر دانه^۱ توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. شبیه‌سازی دانه‌مبنا قابلیت بسیار بالایی در بازنمایی ویژگی‌های ناهمگن ریزساختاری سنگ‌ها، شامل کانی‌های منفرد و برهم‌کنش‌های بین‌دانه‌ای دارد [۴]. این ویژگی سبب شده است که روش دانه‌مبنا به طور ویژه برای مطالعه پدیده‌هایی مناسب باشد که در آن‌ها ویژگی‌های ریزمقیاس نقش مستقیمی در رفتار ماکروسکوپی از جمله اثر مقیاس بر مقاومت و ضریب ارتجاعی سنگ دارند. استفاده از چنین ابزارهای عددی پیشرفته‌ای امکان درک عمیق‌تر سازوکارهای حاکم بر وابستگی خواص مکانیکی سنگ به ابعاد نمونه را فراهم ساخته و در نهایت می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر رفتار سنگ و طراحی مطمئن‌تر سازه‌های مهندسی منجر شود.

پژوهشگران متعددی اثر ابعاد نمونه بر مقاومت سنگ‌های مختلف را با استفاده از روش‌های عددی گوناگون مورد بررسی قرار داده‌اند. هو و همکاران [۵] با استفاده از نرم‌افزار PFC2D تأثیر ناهمگنی‌های ذاتی سنگ، شامل ترک‌ها و حفرات، و همچنین ابعاد نمونه را بر ویژگی‌های مکانیکی و مکانیزم‌های شکست تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره بررسی کرده‌اند. نتایج اصلی پژوهش آن‌ها نشان داد که ابعاد نمونه تأثیر چشم‌گیری بر الگوی ترک‌خوردگی و ظرفیت باربری سنگ دارد؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های بزرگ‌تر و دارای نقص، در مقایسه با نمونه‌های کوچک‌تر و سالم، رفتار شکست متفاوتی از خود نشان داده و دارای مقاومت فشاری و انرژی ذخیره‌شده کمتری هستند. همچنین موقعیت مکانی نقص‌ها تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر مسیر گسترش ترک‌ها و در نتیجه مقاومت نهایی نمونه دارد. لیو و همکاران [۶] رفتار مکانیکی بازالت را با تمرکز بر تأثیر ناهمگنی‌های داخلی و همچنین اثر ابعاد نمونه بر مقاومت و سختی سنگ بررسی کردند. هدف اصلی مطالعه آن‌ها، تحلیل تأثیر فاکتورهای مذکور با استفاده از روش توده‌سنگ مصنوعی^۲ بود که مدل‌سازی شبکه شکستگی گسسته را با روش المان محدود گسسته ترکیب می‌کند. نتایج نشان داد که افزایش میزان آمیگدال‌ها موجب افزایش خطی ضریب ارتجاعی و کاهش نمایی یا لگاریتمی مقاومت فشاری تک‌محوره می‌شود. علاوه بر این، ناهمسانگردی قابل‌توجه در مقاومت و سختی زمانی مشاهده شد که جهت‌گیری آمیگدال‌ها بین صفر تا ۹۰ درجه قرار داشت. تیان و همکاران [۷] اثر ابعاد هندسی نمونه بر شکست سنگ تحت فشار تک‌محوره را با هدف رفع محدودیت‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار RFPA 2D شبیه‌سازی‌هایی را بر روی مدل‌های سنگی با قطر ۵۰ میلی‌متر و نسبت‌های مختلف ارتفاع به قطر (۱ تا ۳) انجام دادند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت ارتفاع به قطر، الگوی شکست از حالت پیچیده و عمدتاً محوری در نسبت‌های پایین به شکست برشی و ترکیبی در نسبت‌های بالاتر تغییر می‌کند. برابرک و همکاران [۸] روش تعمیم‌یافته جدیدی را برای کاهش اثر ابعاد نمونه، به ویژه نسبت طول به قطر، بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ ارائه کردند. این پژوهش با تأکید بر عدم قطعیت‌های موجود درباره اثر قطر نمونه و نادیده‌گرفتن مکرر آن، بر اصلاح اثر نسبت طول به قطر تمرکز دارد. انبینگ [۹] اثر مقیاس بر ویژگی‌های مکانیکی بازالت دارای ریزترک‌های پنهان را با استفاده از مدل سنگ مصنوعی مبتنی بر μ -DFN و روش FDEM بررسی کرد. نتایج نشان داد که افزایش ابعاد نمونه موجب تغییر رفتار منحنی‌های تنش-کرنش از حالت ترد تک‌قله‌ای در نمونه‌های کوچک به رفتار چندقله‌ای با تردی کمتر در ابعاد

¹ Grain Based Model (GBM)

² Synthetic Rock Mass (SRM)

نزدیک به REV می‌شود. بحرانی و کایزر [۱۰] اثر ابعاد نمونه بر مقاومت فشاری سنگ‌های بکر و دارای نقص را با استفاده از مدل دانه‌مبنا (GBM) و شبکه شکستگی مجزا^۱ بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت سنگ بکر نسبت به اندازه نمونه وابستگی محدودی دارد، در حالی که سنگ‌های دارای نقص رفتار وابسته به مقیاس پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. بسته به جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها، مقاومت می‌تواند با افزایش ابعاد نمونه کاهش، افزایش یا نوسان داشته باشد. پولسن و آدیکاری [۳] با استفاده از مدل ذرات پیوندی^۲ اثر مقیاس بر مقاومت زغال‌سنگ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه مقاومت اوج در مقیاس آزمایشگاهی با افزایش حجم نمونه کاهش می‌یابد، اما در ابعاد بزرگ‌تر مقاومت به یک مقدار حدی نزدیک می‌شود که دارای تغییرپذیری بسیار اندکی است. وانگ و همکاران [۱۱] اثر مقیاس بر خواص مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار را با در نظر گرفتن تراکم شکستگی و موقعیت نمونه‌برداری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کاهش تراکم شکستگی موجب افزایش مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی شده و اثر مقیاس به نحوه نمونه‌برداری و ساختار مدل وابسته است. لیانگ و همکاران [۱۲] پدیده اثر معکوس مقیاس بر مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌های بلورین را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از مدلی که درزه‌ها و ریزشکاف‌ها را در نظر می‌گرفت، نشان دادند که مقاومت ابتدا با افزایش ابعاد نمونه افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. این رفتار به مسیر گسترش ترک‌ها، مقاومت بلورها و وجود ناپیوستگی‌های اولیه نسبت داده شد. چوراسیا و والتون [۱۳] نیز تأثیر نسبت عرض به ارتفاع بر رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری ستون‌های آهکی ضعیف و متخلخل را بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی و عددی آن‌ها نشان داد که پارامترهای مقاومتی شامل شروع ترک، آسیب ترک، مقاومت اوج و مقاومت باقیمانده همگی با افزایش نسبت عرض به ارتفاع افزایش می‌یابند. همچنین الگوی شکست از شکست برشی خالص در نمونه‌های باریک به شکست تدریجی در نمونه‌های کوتاه‌تر تغییر یافت. علاوه بر روش‌های عددی، مطالعات تجربی زیادی نیز با هدف بررسی تأثیر ابعاد بر خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها انجام شده است. کونگ و همکاران [۱۴] مجموعه‌ای از آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و کششی برزیلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با قطرهای مختلف از ۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول یانگ با افزایش اندازه نمونه کاهش می‌یابد، در حالی که مقاومت کششی در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. علاوه بر این، قابلیت کاربرد مدل‌های مختلف اثر اندازه بر داده‌های تجربی را ارزیابی کردند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که معادلات برازش UCS تقریباً یکسان هستند، در حالی که معادلات مقاومت کششی به طور قابل توجهی متفاوت است. ناصری و همکاران [۱۵] با آماده‌سازی نمونه‌های سنگی و بتنی استوانه‌ای با نسبت‌های طول به قطر ۲ (قطرهای ۳۵، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ میلی‌متر)، تأثیر ابعاد نمونه‌ها را بر مقادیر UCS و مدول الاستیک بررسی کردند. مطابق نتایج آن‌ها، تأثیر اندازه نمونه بر UCS برای بتن نسبت به سنگ قابل پیش‌بینی تر است. افزایش اندازه نمونه منجر به افزایش اولیه و به دنبال آن کاهش مقادیر UCS سنگ‌ها شد. علاوه بر این، بتن معمولاً با افزایش اندازه نمونه، کاهش مقادیر UCS را نشان می‌دهد. مقادیر UCS و مدول الاستیک ابتدا قبل از کاهش افزایش یافتند که نشان‌دهنده وجود یک اندازه نمونه با حداکثر UCS است. لی و همکاران [۱۶] با هدف بررسی اثرات مقیاس نمونه بر رفتارهای مکانیکی سنگ، آزمایش‌های فشاری تک‌محوری بر روی ۴۱ بعد هندسی مختلف از ماسه‌سنگ‌ها انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر UCS با افزایش نسبت طول به قطر کاهش می‌یابد و ضریب استاندارد UCS بین ۰/۷۱ و ۱/۱۷ است، که به معنی تغییر ۳۰- تا ۲۰+ درصد UCS با تغییر نسبت طول به قطر از ۱ به ۶/۷ است. همچنین مشخص شد که مدول یانگ با افزایش نسبت طول به قطر کمی افزایش می‌یابد. دورمکوا و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر اندازه نمونه‌ها با قطرهای ۲۰، ۳۵، ۵۰ و ۷۰ میلی‌متر بر مقادیر UCS چهار نوع سنگ گرانودیوریت، سنگ آهک، ماسه‌سنگ و آندزیت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نسبت لاغری نمونه، بهترین جنبه در مورد همه سنگ‌های مورد مطالعه بود؛ بطوریکه نسبت لاغری بالاتر، UCS پایین‌تری را نشان داد. سلیک [۱۸] تأثیر اندازه نمونه مکعبی بر مقادیر UCS برخی از سنگ‌های کربناته را بررسی کرده است. در مجموع ۲۹۹ نمونه مکعبی در پنج اندازه لبه مختلف (۳، ۵، ۷، ۹ و ۱۱ سانتی‌متر) از سنگ آهک، مرمر و تراورتن تهیه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش اندازه نمونه‌ها از ۳ به ۱۱ سانتی‌متر، مقادیر UCS متوسط برای سنگ‌های کربناته آزمایش شده حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد.

¹ Discrete Fracture Network (DFN)

² Bonded Particle Model (BPM)

با توجه به اهمیت اثر مقیاس در رفتار مکانیکی سنگ‌ها و نقش ناهمگنی ریزساختاری در کنترل این پدیده، هدف اصلی این پژوهش بررسی تأثیر نسبت ارتفاع به قطر نمونه (H/D) ^۱ و آرایش دانه‌ها بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی گرانیته با استفاده از مدل‌سازی عددی دانه‌مبنا است. در این راستا، تأثیر ساختارهای مختلف دانه‌ای بر شدت اثر مقیاس و پاسخ مکانیکی سنگ مورد ارزیابی قرار گرفته است تا درک بهتری از سازوکارهای مؤثر بر رفتار وابسته به مقیاس سنگ‌های بلورین فراهم شود.

۲- ساخت مدل مبتنی بر دانه و چارچوب شبیه‌سازی عددی

به منظور بررسی اثر ابعاد نمونه و آرایش دانه‌ای بر رفتار مکانیکی یک نوع سنگ گرانیته، از روش مدل‌سازی دانه‌مبنا در چارچوب روش المان محدود استفاده شد. در این رویکرد، ریزساختار سنگ به صورت مجموعه‌ای از دانه‌های مجزا و مرزهای بین‌دانه‌ای بازنمایی می‌شود تا رفتار ناهمگن و فرآیندهای شکست سنگ با دقت بیشتری شبیه‌سازی گردد. استفاده از مدل GBM این امکان را فراهم می‌کند که اثرات هندسه دانه‌ها، نحوه آرایش آن‌ها و برهم‌کنش‌های بین‌دانه‌ای بر پاسخ مکانیکی سنگ به صورت مستقیم مورد ارزیابی قرار گیرد [۱۹].

در این پژوهش، هندسه دانه‌ها با استفاده از روش تسهیم ورونوئی تولید شد تا ساختار ریزدانه‌ای گرانیته با واقع‌گرایی مناسبی مدل‌سازی شود. به منظور تحلیل تأثیر ناهمگنی ریزساختاری، سه نوع آرایش دانه‌ای شامل ساختارهای نامنظم، نیمه‌منظم و تقریباً منظم ایجاد گردید. در ساختار نامنظم، موقعیت و اندازه دانه‌ها دارای پراکندگی بیشتری بوده و شبکه‌ای با ناهمگنی بالاتر تشکیل می‌شود، در حالی که در ساختارهای تقریباً منظم، توزیع دانه‌ها یکنواخت‌تر و هندسه شبکه پایدارتر است.

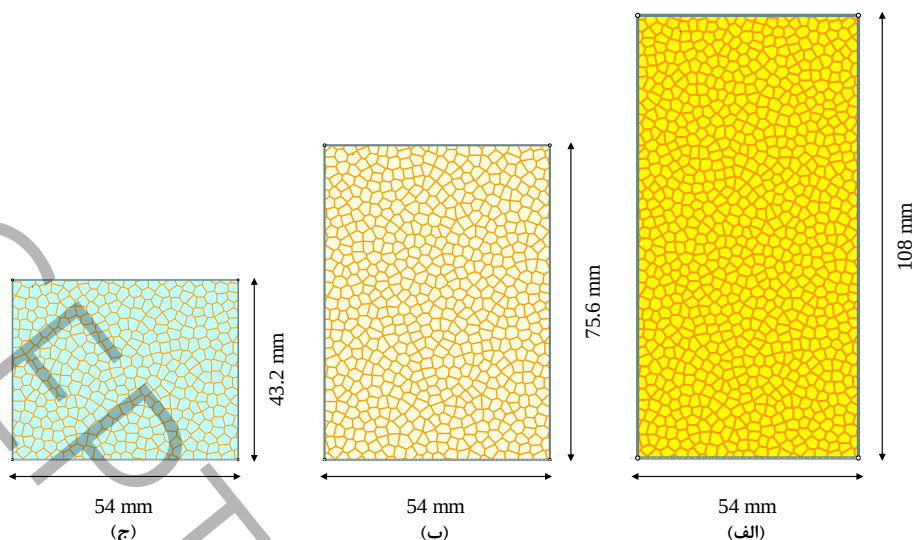
برای بررسی اثر مقیاس، نمونه‌های عددی با سه نسبت مختلف ارتفاع به قطر شامل $0/8$ ، $1/4$ و 2 تولید شدند. نسبت ارتفاع به قطر 2 به عنوان نسبت استاندارد مورد توصیه انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۲ برای آزمون مقاومت فشاری تک‌محوره انتخاب شد. همچنین نسبت‌های $0/8$ و $1/4$ به منظور بررسی تأثیر کاهش ارتفاع نمونه و ارزیابی تغییرات رفتار مکانیکی ناشی از هندسه نمونه در مقایسه با حالت استاندارد در نظر گرفته شدند. انتخاب این نسبت‌ها امکان بررسی روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی را در دامنه‌ای از نمونه‌های کوتاه تا نمونه‌های استاندارد فراهم می‌کند. تمامی مدل‌ها تحت شرایط بارگذاری فشاری تک‌محوره قرار گرفتند و فرآیند بارگذاری به صورت تدریجی تا وقوع شکست کامل ادامه یافت. پس از اتمام کل شبیه‌سازی‌ها، پارامترهای مکانیکی شامل تنش، کرنش، مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی استخراج و ثبت شدند.

به منظور بازنمایی مناسب رفتار شکست، برای مرزهای بین‌دانه‌ای معیار شکست کششی-برشی در نظر گرفته شد تا امکان آغاز، رشد و همگرایی ترک‌ها در مقیاس ریزساختاری فراهم شود. همچنین برای کاهش اثرات عددی ناشی از اندازه شبکه، تراکم مناسب المان‌ها در اطراف مرز دانه‌ها اعمال گردید تا تمرکز تنش و فرآیندهای آسیب با دقت بیشتری ثبت شوند.

شکل ۱ نمونه‌هایی از مدل‌های تولیدشده مبتنی بر دانه برای نسبت‌های مختلف H/D را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت H/D ، ارتفاع نمونه افزایش یافته و مسیرهای بالقوه گسترش ترک و نواحی تمرکز تنش گسترده‌تر می‌شوند. این موضوع می‌تواند نقش مهمی در تشدید اثر مقیاس و کاهش مقاومت نمونه‌های بزرگ‌تر ایفا کند.

¹ Height to Diameter (H/D)

² International Society of Rock Mechanics (ISRM)



شکل ۱: برخی از مدل‌های GBM تولیدی برای (الف) $H/D=2$ (ب) $H/D=1.4$ (ج) $H/D=0.8$
Fig. 1. Some of the generated GBMs for (a) $H/D = 2$, (b) $H/D = 1.4$, and (c) $H/D = 0.8$.

در مدل‌های Phase2-GBM، میکروپارامترها به هر دو بخش بلوک‌های مش و المان‌های درزه اختصاص داده می‌شوند و فرآیند کالیبراسیون مدل تا زمانی ادامه می‌یابد که ویژگی‌های ماکروسکوپی، شامل خصوصیات مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری با نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی انطباق یابد. شایان ذکر است که در شبیه‌سازی‌های آزمون فشار تک‌محوری، جابجایی 0.004 m به قسمت فوقانی مدل، در هر گام، تا زمان گسیختگی نمونه اعمال شد. همچنین، به منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از تصادفی بودن تولید شبکه‌ها، برای هر آرایش شبکه ۱۰ تصادفی ایجاد گردید.

به طور کلی، در مدل‌های دانه‌مبنای ورنوویی، ویژگی‌های تغییرشکل‌پذیری شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، سختی نرمال و سختی برشی، و نیز ویژگی‌های مقاومتی مربوط به بلوک‌ها و مرز بلوک‌ها شامل چسبندگی اوج و باقیمانده، زاویه اصطکاک اوج و باقیمانده، و مقاومت کششی اوج و باقیمانده، به بلوک‌های ورنوویی اختصاص داده می‌شوند [۲۰]. مشخصات کالیبره‌شده دانه‌ها و مرز دانه‌های سنگ گرانیت مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: پارامترهای کالیبره شده سنگ گرانیت شبیه‌سازی شده

Table 1. Calibrated parameters of the simulated granite rock.

E_g (GPa)	K_s (GPa/m)	K_n (GPa/m)	$\sigma_{tgp} / \sigma_{tgr}$ (MPa)	ϕ_{gp} / ϕ_{gr} (°)	C_{gp} / C_{gr} (MPa)	ویژگی‌ها
۸۰	–	–	۲۵ / ۰/۱	۶۵ / ۵۵	۸۵ / ۰/۱	دانه‌ها
–	۳۵۰۰۰	۲۵۰۰۰۰	۱۲ / ۰/۱	۶۰ / ۶۰	۶۰ / ۰/۱	مرز دانه‌ها

۳- استخراج مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی از شبکه‌های دانه‌مبنای تولید شده

شکل‌های ۲ تا ۴ منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی نمونه‌های گرانیتی با نسبت‌های مختلف H/D و آرایش‌های متفاوت دانه‌ای را نشان می‌دهند. این منحنی‌ها اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار الاستیک، شروع آسیب، تکامل ترک، ظرفیت باربری و نحوه شکست نمونه‌ها ارائه می‌کنند. به طور کلی، تمامی منحنی‌ها رفتار ترد مشخصی را برای گرانیت تحت بارگذاری تک‌محوره نشان می‌دهند، به گونه‌ای که ابتدا یک ناحیه الاستیک تقریباً خطی مشاهده شده و پس از رسیدن به تنش اوج، افت ناگهانی تنش رخ می‌دهد. این رفتار با ویژگی‌های مکانیکی شناخته‌شده گرانیت در آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره تطابق مناسبی دارد. اما تفاوت‌های قابل توجهی در شیب اولیه، مقدار تنش اوج، نرخ افت پس از اوج و نوسانات تنش میان ساختارهای مختلف مشاهده می‌شود.

¹ Realization

در تمامی نمونه‌ها، بخش ابتدایی منحنی‌ها تقریباً خطی بوده که بیانگر حاکم بودن رفتار الاستیک و توزیع نسبتاً یکنواخت تنش در مراحل اولیه بارگذاری است. شیب این ناحیه بیانگر ضریب ارتجاعی نمونه‌ها بوده و نتایج محاسبات نشان می‌دهد که شبکه‌های تقریباً منظم دارای شیب اولیه بزرگ‌تری هستند که نشان‌دهنده سختی الاستیک بیشتر این ساختارها است. در مقابل، ساختارهای نامنظم به دلیل وجود ناهمگنی بیشتر در هندسه دانه‌ها و تماس‌های بین‌دانه‌ای، شیب اولیه کمتری داشته و رفتار الاستیک آن‌ها با نوسانات موضعی بیشتری همراه است.

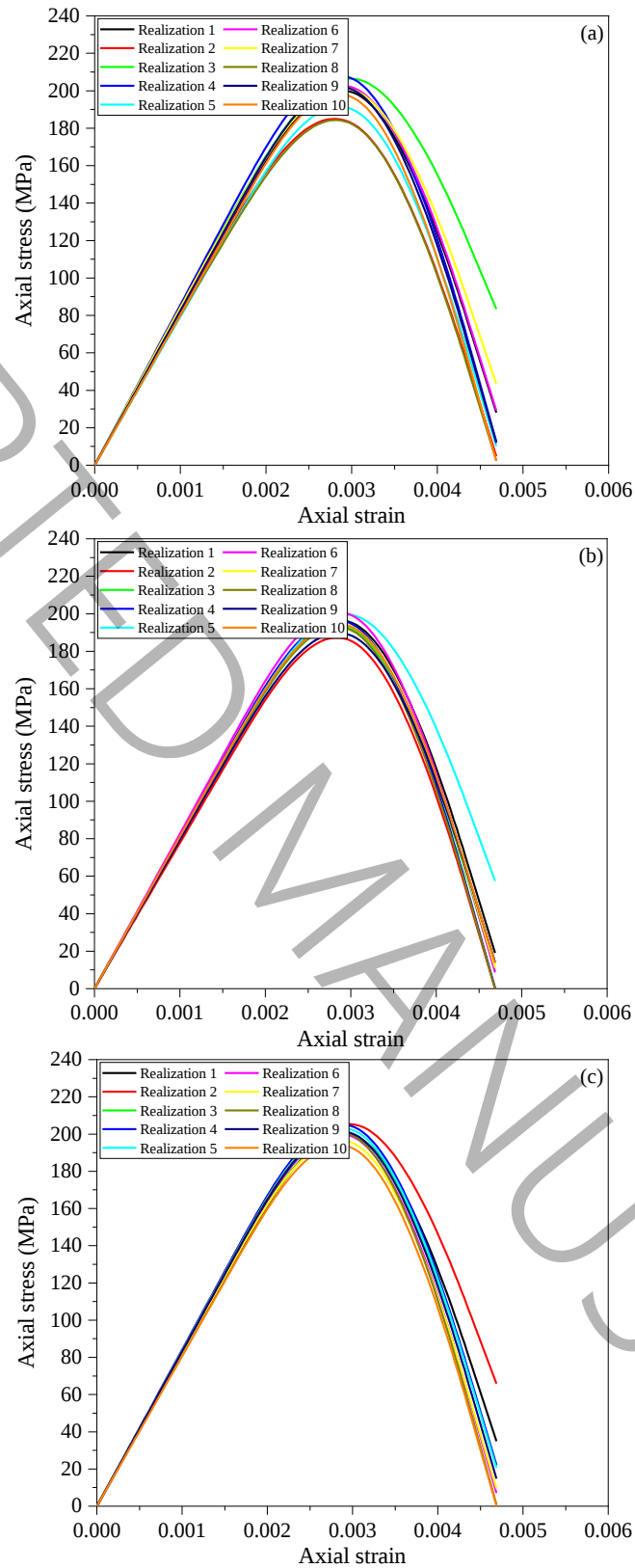
بررسی منحنی‌های تنش-کرنش نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای نسبت H/D کمتر، در تمامی آرایش‌های دانه‌ای، از مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های بلندتر برخوردار هستند. به بیان دیگر، با افزایش نسبت ارتفاع به قطر نمونه، مقدار تنش اوج به طور محسوسی کاهش یافته است. این موضوع بیانگر وجود اثر مقیاس قابل توجه بر مقاومت فشاری تک‌محوره گرانی است. به ویژه، نمونه‌های دارای نسبت H/D برابر 0.8 بیشترین مقدار مقاومت را نشان داده‌اند، در حالی که نمونه‌های با نسبت H/D برابر 2 کمترین مقادیر مقاومت فشاری را از خود بروز داده‌اند.

مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره حاصل از تمامی تکرارهای شبیه‌سازی در جدول ۲ ارائه شده‌اند. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که میانگین مقاومت فشاری در تمامی ساختارهای دانه‌ای با افزایش نسبت H/D روندی کاهشی دارد. برای مثال، در ساختارهای نیمه‌منظم، مقدار میانگین UCS از حدود 250 MPa در نسبت H/D برابر 0.8 به حدود 189.7 MPa در نسبت H/D معادل 2 کاهش یافته است که بیانگر افت قابل توجه مقاومت در اثر افزایش ابعاد نمونه است. روند مشابهی نیز در ساختارهای نامنظم و تقریباً منظم مشاهده می‌شود. این کاهش مقاومت را می‌توان ناشی از افزایش احتمال فعال شدن ناپیوستگی‌های ریز، تمرکز تنش و گسترش ترک‌های ناپایدار در نمونه‌های بزرگ‌تر دانست. با افزایش ابعاد نمونه، احتمال حضور مسیرهای ضعیف بحرانی و همچنین تشکیل و همگرایی ترک‌های ریز افزایش یافته و در نتیجه شکست در تنش‌های پایین‌تری رخ می‌دهد. این موضوع با نظریه‌های کلاسیک اثر مقیاس در سنگ‌ها و محیط‌های ترد همخوانی دارد.

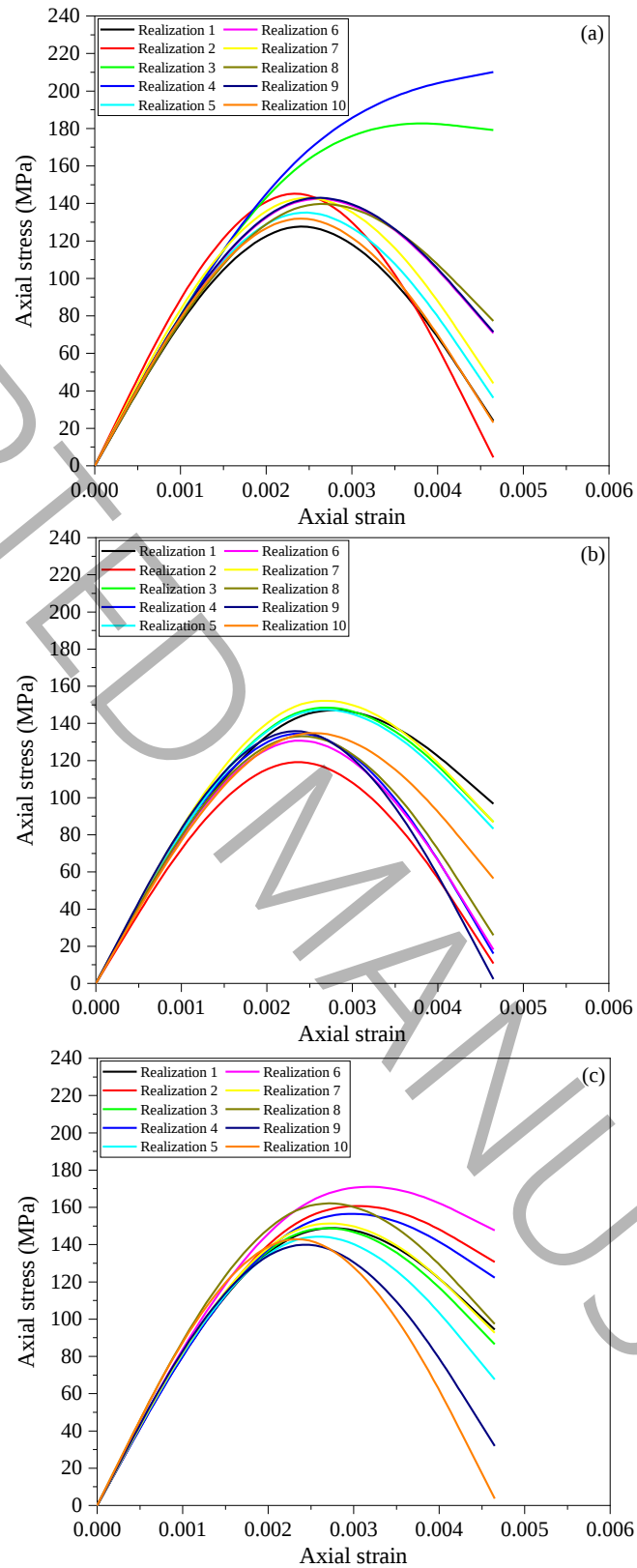
از سوی دیگر، پراکندگی مقادیر مقاومت فشاری در هر H/D معین، برای ساختارهای نامنظم نسبت به شبکه‌های نیمه‌منظم و تقریباً منظم بیشتر بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که ناهمگنی هندسی دانه‌ها موجب ایجاد توزیع‌های تنش غیریکنواخت و رفتار شکست غیرقابل پیش‌بینی‌تری می‌شود. در مقابل، در ساختارهای تقریباً منظم، به دلیل یکنواختی بیشتر در آرایش دانه‌ها و نحوه انتقال تنش میان آن‌ها، رفتار مکانیکی پایدارتر و پراکندگی نتایج کمتر مشاهده شده است.

مقادیر ضریب ارتجاعی استخراج‌شده از شبیه‌سازی‌ها نیز در جدول ۳ ارائه شده‌اند. برخلاف مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی وابستگی ضعیف‌تری به ابعاد نمونه نشان داده است. اگرچه با افزایش نسبت H/D کاهش ملایمی در ضریب ارتجاعی مشاهده می‌شود، اما میزان این کاهش در مقایسه با افت مقاومت فشاری بسیار محدودتر است. این رفتار نشان می‌دهد که سختی الاستیک سنگ بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های ذاتی کانی‌ها و سختی تماس‌های بین‌دانه‌ای قرار دارد، در حالی که مقاومت فشاری عمدتاً تابع فرآیندهای آغاز و رشد ترک است.

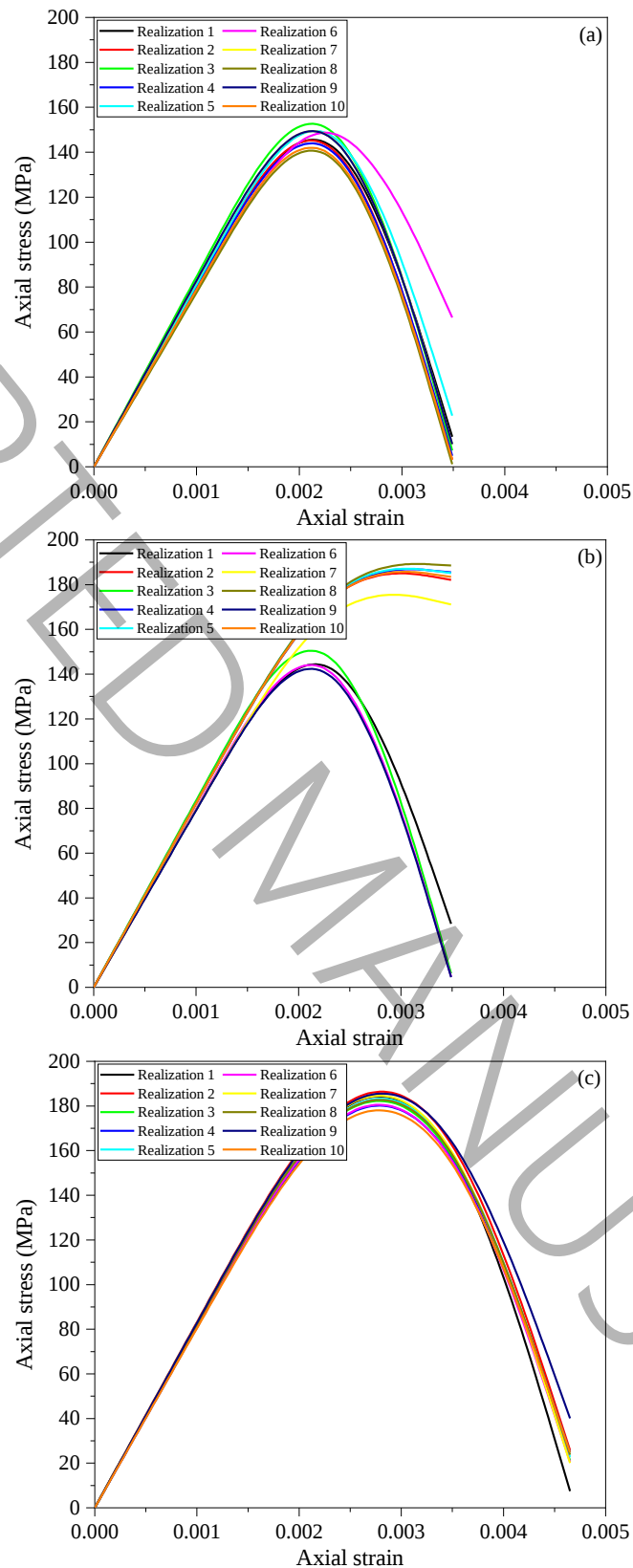
علاوه بر این مطابق جدول ۳ مشاهده می‌شود که ساختارهای تقریباً منظم در اغلب موارد بیشترین مقادیر میانگین ضریب ارتجاعی را تولید کرده‌اند. این نتیجه را می‌توان به انتقال یکنواخت‌تر تنش و کاهش نواحی تمرکز تنش در این نوع آرایش دانه‌ای نسبت داد. در مجموع، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی بیانگر آن است که هم هندسه نمونه و هم نحوه آرایش دانه‌ها تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر رفتار مکانیکی گرانیات دارند و اثر مقیاس بر مقاومت فشاری بسیار محسوس‌تر از ضریب ارتجاعی است.



شکل ۲: منحنی‌های تنش-کرنش گرانیت با $H/D=0.8$ برای (الف) شبکه‌های نامنظم (ب) شبکه‌های نیمه منظم، (ج) شبکه‌های تقریباً منظم
Fig. 2. Stress-strain curves of granite with $H/D = 0.8$ for (a) irregular networks, (b) medium-regular networks, and (c) almost-regular networks.



شکل ۳: منحنی‌های تنش-کرنش گرانیت با $H/D=1.4$ برای (الف) شبکه‌های نامنظم (ب) شبکه‌های نیمه‌منظم، (ج) شبکه‌های تقریباً منظم
Fig. 3. Stress-strain curves of granite with $H/D = 1.4$ for (a) irregular networks, (b) medium-regular networks, and (c) almost-regular networks.



شکل ۴: منحنی‌های تنش-کرنش گرانیت با $H/D=2$ برای (الف) شبکه‌های نامنظم (ب) شبکه‌های نیمه‌منظم، (ج) شبکه‌های تقریباً منظم
Fig. 4. Stress-strain curves of granite with $H/D = 2$ for (a) irregular networks, (b) medium-regular networks, and (c) almost-regular networks.

جدول ۲: مقادیر UCS (MPa) در هر تحقق

Table 2. UCS values (MPa) for each realization.

انحراف معیار	میانگین	تحقق										H/D	آرایش
		۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۰/۲	۲۲۶/۶	۲۵۷/۵	۲۶۰/۹	۲۳۵/۴	۲۵۳/۱	۲۵۸/۸	۲۴۶/۶	۲۶۷/۹	۲۵۳/۸	۲۳۴/۴	۲۵۵/۵	۰/۸	نامنظم
۹/۷	۱۹۶/۳	۱۹۱/۸	۱۹۳/۴	۱۸۶/۲	۲۰۲/۴	۱۹۲/۷	۱۹۲/۹	۲۱۰/۲	۱۹۱/۵	۲۱۶/۷	۱۸۵	۱/۴	
۴/۵	۱۸۸/۲	۱۸۳/۵	۱۹۲/۱	۱۸۲/۷	۱۹۲/۳	۱۸۳/۱	۱۹۱/۳	۱۸۵/۶	۱۹۶/۹	۱۸۷/۶	۱۸۶/۸	۲	
۴/۶	۲۵۰	۲۴۹/۳	۲۴۳	۲۵۰	۲۵۰/۴	۲۵۹/۱	۲۵۰/۴	۲۵۴/۷	۲۴۹/۳	۲۴۲/۴	۲۵۲	۰/۸	نیمه منظم
۷/۵	۱۹۳	۱۸۶	۲۰۳/۱	۱۹۲/۸	۲۰۱/۹	۱۹۱/۴	۱۹۵/۷	۱۹۷/۶	۱۹۶	۱۷۶	۱۸۹/۶	۱/۴	
۴/۴	۱۸۹/۷	۱۹۱/۱	۱۸۳/۸	۱۹۱/۵	۱۸۳/۵	۱۹۶/۱	۱۹۲	۱۹۰/۶	۱۹۴/۱	۱۹۱/۴	۱۸۳/۱	۲	
۳/۵	۲۵۷/۳	۲۵۱/۲	۲۵۹/۱	۲۶۰	۲۵۲/۸	۲۵۸/۲	۲۶۰/۷	۲۶۳	۲۵۷/۱	۲۵۶/۹	۲۵۴	۰/۸	تقریباً منظم
۷/۲	۲۰۰	۲۱۳/۵	۲۰۱/۴	۲۱۳	۱۹۸/۲	۲۰۰/۸	۱۹۶/۸	۱۹۲/۲	۱۹۶/۷	۱۹۴/۲	۱۹۳/۵	۱/۴	
۲	۱۹۰/۲	۱۸۶	۱۹۲/۲	۱۹۰/۱	۱۹۲	۱۸۸/۵	۱۹۰/۲	۱۸۸	۱۹۰/۲	۱۹۲/۹	۱۹۱/۶	۲	

جدول ۳: مقادیر ضریب ارتجاعی (GPa) در هر تحقق

Table 3. Elastic modulus values (GPa) for each realization.

انحراف معیار	میانگین	تحقق*										H/D	آرایش
		۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۳/۸	۸۳/۵	۸۲/۵	۸۳/۲	۸۰	۸۷	۸۲/۹	۸۲/۹	۸۱/۵	۸۲/۳	۹۳/۲	۷۹/۶	۰/۸	نامنظم
۲/۸	۸۱/۳	۸۲/۴	۸۴/۵	۸۰/۸	۷۷/۲	۸۳/۱	۷۸/۳	۸۵/۷	۷۷/۲	۸۳/۲	۸۱/۴	۱/۴	
۱/۶	۷۹/۹	۷۸/۷	۸۲/۲	۷۹/۹	۸۲/۶	۷۹/۲	۸۰/۷	۷۹/۲	۷۶/۶	۸۰/۲	۸۰	۲	
۳/۲	۸۳	۸۰	۸۷/۳	۸۲/۹	۸۶/۸	۸۲/۳	۸۴/۱	۸۴/۹	۸۴/۳	۷۵/۷	۸۱/۵	۰/۸	نیمه منظم
۲	۷۹/۴	۷۸/۲	۷۵/۷	۷۹/۹	۷۹/۸	۸۳/۲	۷۹/۳	۸۱/۷	۷۹/۳	۷۷/۳	۸۰/۱	۱/۴	
۳/۸	۷۸/۳	۷۰/۸	۷۸/۹	۷۲/۷	۷۶/۷	۸۰	۸۱/۳	۸۱/۶	۸۳/۴	۸۰	۷۷/۹	۲	
۳/۱	۸۶	۹۱/۸	۸۶/۶	۹۱/۶	۸۵/۲	۸۶/۳	۸۴/۶	۸۲/۶	۸۴/۶	۸۳/۵	۸۳/۲	۰/۸	تقریباً منظم
۱/۵	۸۱/۹	۸۰	۸۲/۶	۸۲/۹	۷۹	۸۲/۳	۸۳/۲	۸۴/۲	۸۱/۶	۸۱/۸	۸۱	۱/۴	
۲/۵	۷۸/۸	۷۹/۸	۷۵/۵	۸۱/۴	۷۵/۸	۸۰/۴	۸۱/۸	۸۰/۶	۸۱	۷۵/۲	۷۵/۲	۲	

* منظور از «تحقق»، یک نمونه عددی مستقل با مجموعه پارامترهای یکسان و آرایش متفاوت دانه‌ها است که به منظور لحاظ کردن اثرات ناشی از تغییرات ریزساختاری و کاهش تأثیر تصادفی بودن شبکه دانه‌ای در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

۴- تحلیل اثر مقیاس بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی گرانی

روابط آماری میان نسبت H/D و پارامترهای مکانیکی گرانی در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. نتایج حاصل به وضوح نشان می‌دهد که نسبت ارتفاع به قطر نمونه تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت فشاری تک‌محوره و تا حدودی بر ضریب ارتجاعی سنگ دارد. بر اساس شکل ۵، مقاومت فشاری تک‌محوره در تمامی ساختارهای دانه‌ای با افزایش نسبت H/D روندی کاهشی و غیرخطی از خود نشان می‌دهد. بیشترین نرخ کاهش مقاومت مربوط به بازه نسبت H/D از ۰/۸ به ۱/۴ است، در حالی که از H/D برابر ۱/۴ تا ۲ شدت کاهش مقاومت کمتر می‌شود. این رفتار بیانگر آن است که اثر مقیاس در ابعاد کوچک‌تر شدیدتر بوده و با افزایش اندازه نمونه به تدریج به سمت یک رفتار مکانیکی پایدارتر میل می‌کند. به عبارت دیگر، در ابعاد بزرگ‌تر احتمال نزدیک‌شدن رفتار مکانیکی به حجم نماینده (REV) افزایش می‌یابد.

در میان ساختارهای مورد بررسی، شبکه‌های نامنظم بیشترین حساسیت را نسبت به اثر مقیاس نشان داده‌اند. مقادیر نسبتاً بالاتر مقاومت در نمونه‌های کوچک‌تر این ساختار احتمالاً ناشی از وجود مکانیزم‌های موضعی انتقال تنش و اثرات قفل‌شدگی میان دانه‌ها است. با این حال، با افزایش ابعاد نمونه، نقش نواحی ضعیف و ناهمگنی‌های تنش پرنرنگ‌تر شده و افت مقاومت شدیدتری رخ می‌دهد. در مقابل، ساختارهای تقریباً منظم روند کاهش مقاومت هموارتر و پراکندگی کمتری را نشان داده‌اند. یکنواختی بیشتر در توزیع دانه‌ها

موجب کاهش تمرکزهای شدید تنش و کنترل بهتر فرآیند رشد ترک شده و در نتیجه رفتار شکست پایدارتر و قابل پیش‌بینی‌تری ایجاد کرده است.

شکل ۶ نیز رابطه میان نسبت H/D و ضریب ارتجاعی را نشان می‌دهد. برخلاف مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی وابستگی ضعیف‌تری به اثر مقیاس دارد. اگرچه روندی کاهشی با افزایش نسبت H/D مشاهده می‌شود، اما دامنه تغییرات ضریب ارتجاعی در تمامی آرایش‌های دانه‌ای محدود است. این مسئله نشان می‌دهد که رفتار الاستیک سنگ عمدتاً تحت کنترل سختی ذاتی سیستم دانه-پیوند قرار دارد و کمتر از فرآیندهای گسترش ترک تأثیر می‌پذیرد. همچنین، نتایج نشانگر آن است که آرایش دانه‌ها بر رفتار سختی و مقاومت تأثیرات متفاوتی دارد. در حالی که شبکه‌های نامنظم باعث افزایش پراکندگی در مقادیر ضریب ارتجاعی شده‌اند، ساختارهای تقریباً منظم پاسخ‌های الاستیک پایدارتر و یکنواخت‌تری را در تمامی ابعاد نمونه ایجاد کرده‌اند.

به طور کلی، نتایج این پژوهش با مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین [۸ و ۲۱] در زمینه اثر مقیاس در سنگ‌های بلورین همخوانی مناسبی دارد و تأیید می‌کند که کاهش مقاومت در اثر افزایش ابعاد عمدتاً ناشی از فرآیندهای آغاز ترک، رشد ترک و توزیع ناپیوستگی‌ها در مقیاس ریزساختاری است.

به منظور ارزیابی کمی اثر مقیاس بر رفتار مکانیکی گرانیت، روابط آماری بین نسبت ارتفاع به قطر نمونه و پارامترهای مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی نیز مورد تحلیل قرار گرفت. بر اساس شکل ۵، روند تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره در تمامی آرایش‌های دانه‌ای دارای رفتار نزولی غیرخطی است. با افزایش نسبت H/D ، مقدار UCS کاهش یافته و این کاهش در نمونه‌های دارای ساختار نامنظم شدیدتر از سایر آرایش‌ها مشاهده می‌شود. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین UCS و نسبت H/D را می‌توان به صورت یک تابع کاهشی توانی تقریب زد. فرم کلی این رابطه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$UCS = \alpha(H/D)^{-\beta} \quad (1)$$

که در آن:

α ضریب وابسته به ساختار دانه‌ای و β ضریب شدت اثر مقیاس است.

مقادیر به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با افزایش نسبت H/D از ۰/۸ به ۲، مقاومت فشاری در شبکه‌های تقریباً منظم حدود ۲۶ درصد کاهش یافته است، در حالی که این کاهش در شبکه‌های نامنظم حدود ۱۷ درصد بوده است. این مسئله نشان‌دهنده حساسیت آرایش ساختارهای داخلی سنگ نسبت به اثر مقیاس است.

از دیدگاه آماری، شیب منفی منحنی‌ها بیانگر وجود همبستگی معکوس میان ابعاد نمونه و مقاومت فشاری است. همچنین، پراکندگی بیشتر داده‌ها در شبکه‌های نامنظم نشان می‌دهد که ناهمگنی ریزساختاری موجب افزایش انحراف معیار نتایج مکانیکی می‌شود. در مقابل، ساختارهای تقریباً منظم دارای روندی یکنواخت‌تر و پراکندگی آماری کمتری هستند که بیانگر پایداری بیشتر پاسخ مکانیکی در این نوع شبکه‌ها است. علاوه بر این، رفتار غیرخطی منحنی‌ها نشان می‌دهد که نرخ کاهش مقاومت در ابعاد کوچک‌تر شدیدتر بوده و با افزایش اندازه نمونه به تدریج کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر نزدیک‌شدن رفتار مکانیکی سنگ به یک مقدار حدی یا حجم نماینده در ابعاد بزرگ‌تر است.

نتایج شکل ۶ نیز بیانگر آن است که مدول یانگ روندی کاهشی نسبت به افزایش H/D دارد، اما شدت این کاهش به مراتب کمتر از مقاومت فشاری است. رابطه تغییرات ضریب ارتجاعی را نیز می‌توان به صورت یک تابع توانی بیان کرد:

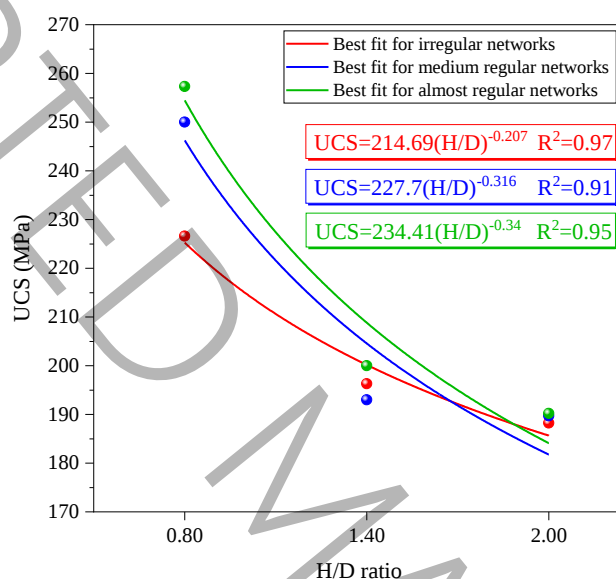
$$E = \delta(H/D)^{-\lambda} \quad (2)$$

که در آن:

δ ضریب وابسته به نوع ساختار دانه‌ای و λ ضریب شدت اثر مقیاس است.

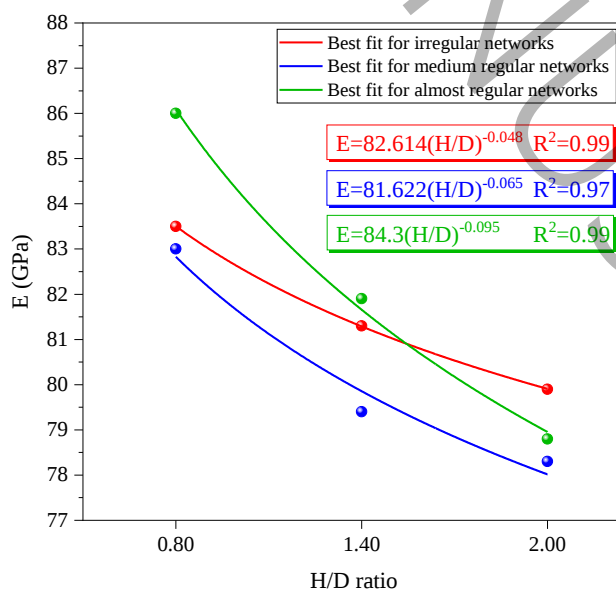
نتایج نشان می‌دهد که مقدار ضریب شدت اثر مقیاس ضریب ارتجاعی در تمامی ساختارها کوچک‌تر از ضریب متناظر در روابط UCS است که این موضوع بیانگر حساسیت کمتر ضریب ارتجاعی نسبت به تغییر ابعاد نمونه می‌باشد. به عبارت دیگر، ضریب ارتجاعی سنگ عمدتاً تحت کنترل خواص ذاتی دانه‌ها و پیوندهای بین‌دانه‌ای قرار دارد، در حالی که مقاومت فشاری بیشتر به فرآیندهای آغاز ترک، رشد ترک و گسترش ناپیوستگی‌ها وابسته است. نتایج محاسبات مربوط به نسبت ضرایب شدت اثر مقیاس روابط آماری UCS به E (β_{UCS} / λ_E) در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، کمترین و بیشترین نسبت β_{UCS} / λ_E به

ترتیب معادل ۳/۶ و ۴/۹ برای ساختارهای تقریباً منظم و نیمه منظم بدست آمده‌اند. این نتیجه نشان می‌دهد نسبت β_{UCS} / λ_E در ساختارهای منظم‌تر مقادیر بیشتری نسبت به ساختارهای نامنظم‌تر داشته و حساسیت اثر مقیاس مقاومتی در ساختارهای منظم‌تر تأثیرگذارتر از اثر مقیاس ضریب ارتجاعی می‌باشد. همچنین کاهش محدود ضریب ارتجاعی در نمونه‌های بزرگ‌تر را می‌توان ناشی از افزایش تعداد نواحی تمرکز تنش و توزیع غیریکنواخت کرنش در مقیاس‌های بزرگ‌تر دانست. با این حال، به دلیل آنکه رفتار الاستیک پیش از شروع آسیب گسترده رخ می‌دهد، اثر مقیاس بر ضریب ارتجاعی نسبتاً محدود باقی می‌ماند. به طور کلی، تحلیل‌های آماری و ریاضی انجام‌شده نشان می‌دهد که اثر مقیاس در گرانیته عمدتاً بر پارامترهای مقاومتی تأثیرگذار است و شدت این اثر به میزان ناهمگنی ریزساختاری و نحوه آرایش دانه‌ها وابسته است. نتایج حاصل همچنین بیانگر آن است که مدل‌سازی مبتنی بر دانه قادر است روابط غیرخطی و رفتار آماری پیچیده ناشی از اثر مقیاس را با دقت مناسبی بازتولید کند.



شکل ۵: رابطه آماری بین نسبت H/D و UCS گرانیته در شبکه‌هایی با آرایش‌های مختلف

Fig. 5. Statistical relationship between the H/D ratio and the UCS of granite in networks with different arrangements.



شکل ۶: رابطه آماری بین نسبت H/D و ضریب ارتجاعی گرانیته در شبکه‌هایی با آرایش‌های مختلف

Fig. 6. Statistical relationship between the H/D ratio and the Young's modulus of granite in networks with different arrangements.

جدول ۴: نسبت ضرایب شدت اثر مقیاس (β_{UCS} / λ_E)

Table 4. Ratios of the size effect coefficients (β_{UCS} / λ_E).

آرایش	مقدار β	مقدار λ	β_{UCS} / λ_E
نامنظم	۰/۲۰۷	۰/۰۴۸	۴/۳
نیمه منظم	۰/۳۱۶	۰/۰۶۵	۴/۹
تقریباً منظم	۰/۳۴۰	۰/۰۹۵	۳/۶

۵- تفسیر نتایج

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی عددی مبتنی بر دانه، چارچوبی کارآمد و قابل‌اعتماد برای بررسی رفتار مکانیکی وابسته به مقیاس در سنگ‌های بلورین فراهم می‌کند. کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره با افزایش نسبت H/D را می‌توان عمدتاً ناشی از افزایش احتمال فعال شدن ریزترک‌ها، تمرکز تنش و توسعه مسیرهای شکست ناپایدار در نمونه‌های بزرگ‌تر دانست. با افزایش ابعاد نمونه، احتمال وجود نواحی بحرانی ضعیف و همچنین تشکیل مسیرهای پیوسته برای همگرایی ترک‌ها افزایش می‌یابد. در نتیجه، شکست در تنش‌های پایین‌تری رخ داده و مقاومت کلی نمونه کاهش پیدا می‌کند. این رفتار به خوبی با نظریه‌های آماری شکست و مکانیک محیط‌های ناهمگن مطابقت دارد.

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه، نقش تعیین‌کننده آرایش دانه‌ها در شدت اثر مقیاس است. ساختارهای دانه‌ای نامنظم به دلیل ناهمگنی بیشتر در شکل و توزیع دانه‌ها، باعث ایجاد میدان‌های تنش پیچیده‌تر و موضعی‌تر می‌شوند. این شرایط، آغاز و انتشار ترک‌های کششی موضعی را تسهیل کرده و در نهایت منجر به رفتار شکست ناپایدارتر و پراکندگی بیشتر نتایج مکانیکی می‌شود. در مقابل، ساختارهای تقریباً منظم موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش و کاهش تمرکزهای موضعی می‌شوند. این موضوع سبب کنترل بهتر فرآیند رشد ترک و افزایش پایداری مکانیکی سیستم می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هندسه و نحوه چیدمان دانه‌ها نقش بسیار مهمی در پاسخ ماکروسکوپی سنگ‌های بلورین ایفا می‌کنند.

همچنین بر اساس یافته‌های حاصل از این پژوهش مشخص شد که ضریب ارتجاعی حساسیت بسیار کمتری نسبت به اثر مقیاس دارد. این رفتار بیانگر آن است که پاسخ الاستیک سنگ عمدتاً تابع سختی ذاتی کانی‌ها و پیوندهای بین‌دانه‌ای است، در حالی که مقاومت فشاری به شدت تحت تأثیر فرآیندهای آسیب، آغاز ترک و گسترش شکست قرار دارد.

نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین انجام‌شده در زمینه اثر مقیاس در سنگ‌ها همخوانی مطلوبی دارد. برای مثال، مطالعات انجام شده توسط لی و همکاران [۱۶] و دورمکوا و همکاران [۱۷] نشان از کاهش مقادیر مقاومت سنگ‌ها با افزایش نسبت ارتفاع به قطر نمونه‌ها داشته که با نتایج حاصل از این مطالعه مطابقت دارند. با این حال، ویژگی متمایز پژوهش حاضر استفاده هم‌زمان از مدل مبتنی بر دانه با در نظر گرفتن هم‌زمان تأثیر نسبت‌های H/D و ساختارهای مختلف آرایش دانه‌ای است که امکان تحلیل دقیق‌تر منشأ ریزمکانیکی اثر مقیاس را فراهم ساخته است. در مجموع، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که در تحلیل رفتار مکانیکی سنگ‌های بلورین، توجه هم‌زمان به ابعاد نمونه و ناهمگنی ریزساختاری ضروری است و بی‌توجهی به این عوامل می‌تواند منجر به برآوردهای غیرواقع‌بینانه از مقاومت و سختی سنگ شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر نسبت ارتفاع به قطر (H/D) بر مقاومت فشاری تک‌محوره و ضریب ارتجاعی یک نوع سنگ گرانیت با استفاده از مدل‌سازی عددی مبتنی بر دانه و با در نظر گرفتن آرایش‌های مختلف دانه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به شرح زیر است:

- به طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اثر مقیاس و ناهمگنی ریزساختاری از عوامل کلیدی کنترل‌کننده رفتار مکانیکی سنگ‌های بلورین هستند و در تحلیل‌های مهندسی سنگ و طراحی سازه‌های سنگی باید به صورت دقیق مورد توجه قرار گیرند.

- مقاومت فشاری تک‌محوره گرانیته با افزایش نسبت H/D از $0/8$ به 2 در تمامی آرایش‌های دانه‌ای کاهش یافت. این کاهش برای شبکه نامنظم، نیمه‌منظم و تقریباً منظم به‌ترتیب برابر با $16/9\%$ ، $24/1\%$ و 26% بود که نشان‌دهنده تأثیر معنادار اثر مقیاس بر رفتار مقاومتی گرانیته است.
- بیشترین نرخ کاهش UCS در بازه H/D معادل $0/8$ تا $1/4$ و در ساختارهای نیمه‌منظم و تقریباً منظم مشاهده شد، در حالی که در ابعاد بزرگ‌تر شدت اثر مقیاس کاهش یافت.
- ساختارهای دانه‌ای تقریباً منظم بیشترین حساسیت را نسبت به اثر مقیاس با مقادیر ضرایب شدت اثر مقیاس معادل $\beta = 0.340$ و $\lambda = 0.095$ نشان دادند.
- ضریب ارتجاعی نسبت به مقاومت فشاری وابستگی بسیار کمتری به ابعاد نمونه نشان داد و تنها کاهش محدودی در حدود 4 تا 8 درصد با افزایش نسبت H/D مشاهده شد.

منابع

- [1] H. Masoumi, K.J. Douglas, A.R. Russell, A bounding surface plasticity model for intact rock exhibiting size-dependent behavior, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(2016) 47-62.
- [2] R. Yoshinaka, M. Osada, H. Park, T. Sasaki, K. Sasaki, Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect, *Engineering Geology*, 96(2008) 173-186.
- [3] B.A. Poulsen, D.P. Adhikary, A numerical study of the scale effect in coal strength, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 63(2013) 62-71.
- [4] S. Ghorbani, Effect of grain network structure on macroproperties and strain energy of marble under unconfined compression using 2D continuum based Voronoi models, *Scientific Reports*, 16(2026) 3727.
- [5] Z. Hu, L. Xie, Y. Qin, X. Liu, J. Qian, Numerical simulation of size effect of defective rock under compression condition, *Scientific Reports*, 13(2023) 420.
- [6] Z. Liu, C. Zhang, C. Zhang, H. Wang, H. Zhou, B. Zhou, Effects of amygdale heterogeneity and sample size on the mechanical properties of basalt, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(2022) 93-107.
- [7] Z. Tian, C. Tang, H. Li, H. Xing, X. Ning, Numerical Simulation of Rock Uniaxial Compressive Strength and Deformation Failure Law under Different Size Conditions, *Advances in Civil Engineering*, 2021(2021) 1-11.
- [8] M. Brabec, J. Štetiar, L. Krmíček, Mitigating the effect of specimen size on uniaxial compressive rock strength using a generalised correction and experimental testing method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 84(2025) 470.
- [9] Y. Enbing, FDEM numerical simulation of size effect on mechanical properties of basalts with hidden microcracks, *Scientific Reports*, 15(2025) 7246.
- [10] N. Bahrani, P. Kaiser, Numerical investigation of the influence of specimen size on the unconfined strength of defected rocks, *Computers and Geotechnics*, 77(2016) 56-67.

- [11] X. Wang, W. Yuan, Y. Yan, X. Zhang, Scale effect of mechanical properties of jointed rock mass: A numerical study based on particle flow code, *Geomechanics and Engineering*, 21(2020) 259-268.
- [12] Q. Liang, H. Lan, Y. Zhou, B. Li, W. Sun, S. Liu, W. Lv, Reverse Size Effect of the Unconfined Compressive Strength of Crystalline Rock: A Grain-Scale Perspective, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 58(2025) 1651-1669.
- [13] A. Chaurasia, G. Walton, Laboratory and Numerical Modeling of the Effects of Width-to-Height Ratio on the Strength and Deformation Behavior of Pillars Composed of Porous, Weak Limestone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 57(2024) 719-738.
- [14] X. Kong, Q. Liu, H. Lu, Effects of rock specimen size on mechanical properties in laboratory testing, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(2021) 04021013.
- [15] A. Naseri, B. Maleki, T. Asheghi Mehmamdar, A. Tohidi, A. Fahimifar, Investigating the influence of Sample geometric variations on mechanical characterization in rock and concrete, *Journal of Mining and Environment*, 16(2025) 1089-1107.
- [16] H. Li, K. Song, M. Tang, M. Qin, Z. Liu, M. Qu, B. Li, Y. Li, Determination of scale effects on mechanical properties of Berea Sandstone, *Geofluids*, 2021(2021) 6637371.
- [17] T. Durmeková, M. Bednarik, P. Dikejová, R. Adamcová, Influence of specimen size and shape on the uniaxial compressive strength values of selected Western Carpathians rocks, *Environmental Earth Sciences*, 81(2022) 247.
- [18] S.B. Çelik, The effect of cubic specimen size on uniaxial compressive strength of carbonate rocks from Western Turkey, *Arabian Journal of Geosciences*, 10(2017) 426.
- [19] S. Ghorbani, M. Moradi, Numerical Investigation of the Effect of Grain Geometrical Arrangement on the Results of the Brazilian Tensile Strength Test of Marble Using the Grain-Based Model, *Journal of Mineral Resources Engineering*, 11(2026) 79-98.
- [20] S. Ghorbani, Analysis of Damage Parameters of Marble Under Uniaxial Compressive Loading Using Grain-Based Finite Element Simulation and a Damage Constitutive Model, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 16(2026) 3727.
- [21] E. Hoek, *Rock Engineering Course Notes by Evert Hoek*, (2009).