

بررسی تاثیر ابعاد نمونه بر رفتار مکانیکی سنگ بکر

مجتبی بهالدینی^{۱*}

استادیار بخش مهندسی معدن، مجتمع آموزش عالی زرنند، دانشگاه شهید باهنر کرمان

m_bahaaddini@uk.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۲/۳۱]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۶/۰۳]

چکیده

رایج‌ترین روش برای تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها، انجام آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی و تعمیم آن به خواص درجا است. اما چگونگی تعمیم خواص آزمایشگاهی به خواص درجا یا به عبارت دیگر تاثیر مقیاس، یکی از چالش‌های مهندسی ژئوتکنیک است. تعدادی از پژوهش‌های گذشته، حاکی از کاهش مقاومت با افزایش قطر بوده، درحالی‌که تعدادی دیگر افزایش مقاومت تا قطری خاص و یا عدم تاثیر مقیاس را گزارش نموده‌اند. در این مقاله، هدف بررسی تاثیر ابعاد نمونه بر رفتار مکانیکی سنگ بکر است. برای این منظور، حدود ۱۲۰ نمونه ماسه سنگ با قطر بین ۱۹ تا ۱۴۵ میلی‌متر و نسبت لاغری بین ۱ تا ۴ تهیه شد و این نمونه‌ها تحت بارگذاری تک محوره قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش قطر نمونه تا حدود ۵۰ میلی‌متر، مقاومت فشاری تک محوره افزایش و پس از آن، قطر نمونه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت ندارد. همچنین مشخص شد که قطر نمونه تاثیر چشم‌گیری بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ندارد. بنابراین کمینه قطر حدود ۵۰ میلی‌متر که توسط استانداردهای ISRM و ASTM برای آزمایش فشاری تک محوره پیشنهاد شده، قطری است که در آن تاثیر مقیاس مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج بررسی تاثیر نسبت لاغری نشان داد که با افزایش این نسبت تا حدود ۲/۵، مقاومت کاهش می‌یابد و پس از آن این تاثیر از بین می‌رود. برای بررسی دلیل این رفتار، مکانیزم شکست نمونه‌ها بررسی، و مشخص شد که در نسبت لاغری کم، مکانیزم شکست گسترش ترک‌های کششی قائم است که باعث ایجاد بالاترین مقاومت در نمونه‌ها می‌شود.

واژگان کلیدی: تاثیر مقیاس، ضریب لاغری، آزمایش فشاری تک محوره، مکانیزم شکست و سنگ بکر.

۱- مقدمه

قرن فعالیت و پژوهش از آن زمان، تعیین مقاومت توده‌سنگ یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های موجود در علم ژئوتکنیک و زمین‌شناس است. بخشی از این مشکل مربوط به پیچیدگی محیطی شامل سنگ بکر و ناپیوستگی، عدم توزیع یکنواخت ناپیوستگی‌ها و اندرکنش سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها است. بخش مهم دیگری از این مشکل، مربوط به تاثیر مقیاس بر خواص سنگ بکر، ناپیوستگی‌ها و توده سنگ است. روش متداول که امروزه برای تعیین مقاومت توده‌سنگ در پروژه‌های مختلف

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های موجود در علم ژئوتکنیک و مکانیک سنگ عدم توانایی تعیین خواص توده سنگ، بلاخص مقاومت توده سنگ است. لئوپولد مولر^۱ با بیان "تعیین مقاومت توده‌سنگ هنوز امکان‌پذیر نیست و بدین دلیل نیاز به انجمن بین المللی وجود دارد" انجمن بین المللی مکانیک سنگ را در تاریخ ۲۴ می ۱۹۶۲ بنا نهاد [1]. اما هنوز با گذشت بیش از نیم

1 Leopold Muller

بر خواص مکانیکی مانند مقاومت و مدول الاستیسیته نمونه است. بحث تاثیر مقیاس تنها محدود به مواد سنگی نبوده و در مواد شکننده و شبه شکننده مانند بتن و سرامیک نیز مشاهده شده است.

فعالیت‌های انجام شده در زمینه تاثیر مقیاس را می‌توان به چهار دسته کلی روش‌های احتمالاتی، انرژی شکست، چند فراکتال^۲ و روش‌های تجربی و شبه تجربی تقسیم‌بندی نمود. روش احتمالاتی در ابتدا به وسیله ویبال^۳ [3] ارائه شد که بعداً تحت عنوان مدل ضعیف‌ترین اتصال^۴ شناخته شد. ویبال فرض کرد که هر جسم جامد از تعدادی ریز ترک تشکیل شده که این ریز ترک‌ها تاثیر زیادی در مقاومت ماده دارند. بر اساس این مدل، برای دو نمونه با ابعاد مختلف، ولی با شکل هندسی یکسان، احتمال گسیختگی در نمونه بزرگتر که ریز ترک‌های بیشتری نسبت به نمونه کوچکتر دارد، بیشتر است. بنابراین، نمونه بزرگتر تحت مقاومت کمتری نسبت به نمونه کوچکتر خواهد شکست. فرم تعمیم یافته مدل ویبال به صورت زیر است:

$$m \log \left(\frac{p_f(\sigma)}{p_1(\sigma)} \right) = \log \left(\frac{V}{V_r} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه، V حجم نمونه، V_r حجم نمونه معرف، $p_f(\sigma)$ مقاومت ماده، $p_1(\sigma)$ مقاومت نمونه معرف و پارامتر m ثابت ماده یا مدول ویبال است.

پژوهشگران زیادی از روش‌های احتمالاتی برای بررسی تاثیر مقیاس بر رفتار مواد استفاده نموده‌اند [4-9]. بازان^۵ و همکاران [10] با بررسی مدل‌های آماری، نشان دادند که این مدل‌ها دارای محدودیت‌هایی بوده که قابلیت کاربرد آنها را برای مواد شکننده و شبه‌شکننده محدود می‌کند. بر اساس نتایج مطالعات انجام شده در سازه‌های بزرگ مقیاس، مشخص شده که مدل‌های آماری مقاومت را کمتر نشان می‌دهند. مکانیزم شکست و ساختار زمین‌شناسی مواد در مدل‌های آماری در نظر گرفته نشده و توزیع تنش در داخل نمونه، الاستیک و

انجام می‌گیرد، مبتنی بر انجام آزمایش‌ها در آزمایشگاه‌ها روی نمونه‌های کوچک مقیاس سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها است و سپس با استفاده از معیارهای تجربی، مقاومت توده‌سنگ بزرگ مقیاس تخمین زده می‌شود. درحالی‌که مطالعات بسیار زیاد انجام گرفته روی نمونه‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها نشان داده است که هم سنگ بکر و هم ناپیوستگی‌ها رفتارهای متفاوتی در مقیاس‌های مختلف دارند [2]. اما اینکه مقاومت سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها چگونه در مقیاس‌های مختلف تغییر می‌کنند و آیا مدل جامعی که بتواند تاثیر مقیاس بر مقاومت (سنگ بکر، ناپیوستگی و توده سنگ) را نشان دهد و همچنین دارای مقبولیت جهانی باشد، وجود دارد یا خیر، سوالاتی است که هنوز علم ژئومکانیک جواب قطعی برای آنها ندارد. اما نکته‌ای که به نظر واضح و آشکار است، این است که گام اولیه برای تعیین تاثیر مقیاس بر خواص توده سنگ، تعیین اثر اندازه بر خواص سنگ بکر است.

در این مقاله، هدف اصلی بررسی تاثیر ابعاد نمونه بر خواص مقاومتی سنگ بکر تحت آزمایش فشاری تک‌محوره است. برای این منظور، در بخش دوم مقاله به بررسی مطالعات انجام شده در طی چند دهه گذشته روی تاثیر اندازه بر رفتار مکانیکی سنگ بکر پرداخته شده است. بحث تاثیر اندازه نمونه را می‌توان از دو دیدگاه بررسی نمود. دیدگاه اول، بررسی مقاومت نمونه در یک بعد و یا به عبارت دیگر بررسی نسبت طول به قطر، تحت قطر ثابت می‌باشد. دیدگاه دوم، بررسی مقاومت نمونه در سه بعد، یا به عبارت دیگر بررسی تاثیر قطر نمونه، تحت نسبت طول به قطر ثابت می‌باشد. مطالعات انجام شده در این خصوص، در بخش دوم تحلیل و ارزیابی شده است. در بخش سوم، مراحل تهیه نمونه و انجام آزمایش‌ها تاثیر اندازه روی نمونه‌هایی از ماسه سنگ شرح داده شده و در ادامه، در بخش چهارم، نتایج این آزمایش‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۲- مروری بر مطالعات انجام شده

بطور کلی، واژه تاثیر مقیاس^۱ مربوط به تاثیر اندازه نمونه

2 Multi Fractality

3 Weibull

4 Weakest link model

5 Bazant

1 Scale Effect

و براون [17] است که از نظر شکل کلی، شبیه به مدل ویبال است.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{c50}} = \left(\frac{d}{50}\right)^{-0.18} \quad (2)$$

در این رابطه، σ_c و σ_{c50} به ترتیب مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌ای به قطر d و ۵۰ میلیمتر می‌باشند. اکثر مطالعات تجربی انجام شده در زمینه تاثیر ابعاد نمونه، مبتنی بر آزمایش فشاری تک محوره است که روشی رایج و مستقیم برای تعیین مقاومت تک محوره^۱ مواد شکننده و شبه شکننده است. بیشتر آزمایش تک محوره روی نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل انجام می‌گیرد، ولی امکان انجام آزمایش روی نمونه‌های مکعب مستطیلی نیز وجود دارد. بطور کلی دو نوع بررسی تاثیر اندازه در این آزمایش‌ها متداول است. در نوع اول که به آن تاثیر اندازه یک بعدی نیز گفته می‌شود، طول نمونه تنها متغیر است و سطح مقطع نمونه ثابت در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، نسبت طول به قطر (نسبت لاغری^۲) تغییر داده می‌شود. نوع دوم از تاثیر اندازه که تحت عنوان تاثیر سه بعدی شناخته می‌شود، حجم نمونه، با ثابت نگه داشتن نسبت طول به قطر، تغییر می‌کند. مطالعات انجام شده در این خصوص، در بخش‌های بعدی این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- بررسی تاثیر نسبت لاغری بر مقاومت

استانداردهای رایج برای تعیین خواص مکانیکی سنگ‌ها، استانداردهای ISRM و ASTM است. قطر نمونه در آزمایش تک محوره بر اساس استاندارد ISRM نباید از ۵۴ میلی‌متر و بر اساس استاندارد ASTM نباید کمتر از ۴۷ میلی‌متر باشد. همچنین نسبت طول به قطر (L/D) در استاندارد ASTM بین ۲-۲/۵ پیشنهاد شده، در حالی که در استاندارد ISRM، این نسبت بین ۲/۵-۳ پیشنهاد شده است. در نمونه‌های طویل، امکان خمیده شدن نمونه در طی پروسه بارگذاری وجود دارد و از طرف دیگر، در نمونه‌های کوتاه ممکن است گسیختگی در

یکنواخت فرض شده است. در حالیکه، در اثر توسعه ترک‌های بزرگ مقیاس در نمونه قبل از رسیدن به تنش بیشینه، تنش‌ها دارای توزیع نایکنواخت و ناهمگونی خواهند بود. علاوه بر موارد فوق، در مدل آماری ویبال همبستگی خواص متغیر مواد نادیده گرفته شده است. با وجود محدودیت‌های فوق، مدل‌های آماری بدلیل سادگی ذاتی، کاربرد بسیاری در مسائل تاثیر مقیاس، بلاخص در مهندسی ژئومکانیک پیدا کرده‌اند.

گروه دیگری از مدل‌های تاثیر مقیاس، مدل‌های انرژی شکست است. بر اساس مدل گریفیث [11] برای مواد شکننده، یک ترک زمانی رشد و گسترش می‌یابد که مقدار انرژی پتانسیل کل سیستم (نیروهای اعمالی و ماده) کاهش یابد و یا در پروسه افزایش طول ترک، مقدار انرژی پتانسیل ثابت بماند. در آزمایش فشاری یا کششی روی دو نمونه با ابعاد مختلف، ولی تحت مقدار تنش ثابت، مقدار انرژی الاستیک ذخیره شده در نمونه بزرگتر، بیش از نمونه کوچکتر است [12]. بنابراین، در زمان گسترش ترک، مقدار انرژی آزاد شده بیشتری برای نمونه بزرگتر انتظار می‌رود. این نرخ انرژی آزاد شده بیشتر برای نمونه بزرگتر، منجر به نیاز به مقدار تنش کمتری برای ایجاد ترک در نمونه بزرگتر می‌شود [13]. به عبارت دیگر، افزایش اندازه نمونه باعث کاهش مقاومت نمونه می‌شود.

در چند دهه اخیر، روش فراکتال برای درک بهتر خواص سنگ‌ها استفاده شده است. بر اساس خاصیت خود تشابه بودن ترک‌ها در ابعاد مختلف مواد، می‌توان آنها را فراکتال دانست [14,15]. کارپیتتری [16] با استفاده از بحث چند فراکتاله بودن در ابعاد مختلف، تاثیر مقیاس بر مقاومت مواد شکننده و شبه شکننده را مورد بررسی قرار داد و نشان داد که مقاومت مواد در اندازه‌های مختلف، در دو محدوده مقادیر فراکتال محلی و جامع قرار می‌گیرد. روش چند فراکتال نیز مشابه روش‌های آماری و انرژی شکست، کاهش مقاومت در محدوده محلی را نشان می‌دهد، ولی در مقیاس‌های بزرگتر بعد فراکتال به مقدار واحدی میل می‌کند.

روش‌های تجربی و شبه تجربی از روابط آماری منتج شده‌اند و یا روابطی شبیه به روش‌های آماری دارند. یکی از پرکاربردترین روابط تجربی تاثیر اندازه بر مقاومت، مدل هوک

1 Uniaxial Compression Strength; UCS
2 Slenderness Ratio

اما روند کاهشی مشاهده شده در این مطالعه، در مقایسه با مطالعات موگی، جان و هوکینز بارز نیست شکل (۲ ب). اولنو^۶ و یلماز^۷ [23] با انجام آزمایش روی نمونه‌هایی از سنگ‌های آذرین، رسوبی و نمونه‌هایی از بتن و گچ که دارای نسبت لاغری بین ۰/۵ تا ۳/۵ بودند، نشان دادند که نسبت طول به قطر تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت بیشتر نمونه‌ها نداشته، اما این نسبت روی مکانیزم شکست تاثیرگذار است.

شکل ۲. بررسی نسبت لاغری بر مقاومت تک محوره: (a) مطالعات جان [20] و هاوکینز [21]، (b) مطالعات تور و همکاران [22] و (c) مطالعات تانکی و هاسانکب [26]

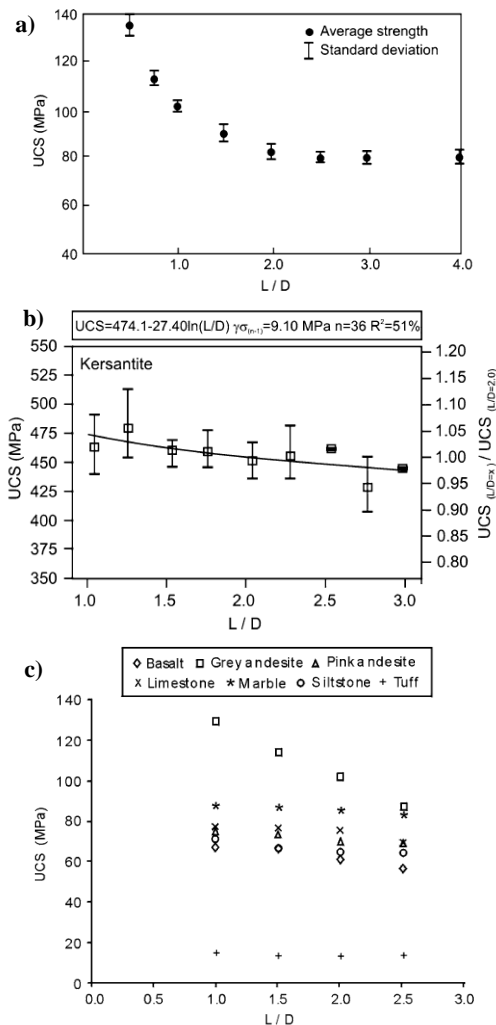


Fig. 2. Investigation of slenderness ratio on UCS: a) John [20] and Hawkins [21] studies, b) Thuro et al. [22] studies and c) Tuncay and Hasanceb [26] studies

راستای صفحات ضعیف شدگی^۱ رخ ندهد. پژوهشگران مختلفی بحث تاثیر نسبت لاغری بر مقاومت فشاری تک محوره را بررسی کردند. موگی^۲ [18,19] با انجام آزمایش روی نمونه‌هایی از دولومیت، گرانیت و تراکیت با نسبت طول به قطر ۱ تا ۴، که در شکل (۱) نشان داده شده، نشان داد که با افزایش نسبت لاغری از ۱ تا حدود ۲/۵ مقاومت تک محوره سنگ افزایش می‌یابد و پس از آن ثابت می‌ماند. مطالعات جان^۳ [20] و هاوکینز^۴ [21] نشان داد که مقاومت تک محوره نمونه‌هایی که دارای نسبت طول به قطر بیش از ۲ است، تقریباً ثابت است شکل (۲ الف). تور^۵ و همکاران [22] مطالعاتی روی نمونه‌هایی با نسبت L/D ۰/۵ تا ۳ انجام دادند و روندی کاهشی در مقاومت نمونه‌ها با افزایش نسبت لاغری مشاهده نمودند.

شکل ۱. تاثیر نسبت لاغری بر مقاومت تک محوره سه نمونه سنگ متفاوت انجام شده به وسیله موگی [18,19]

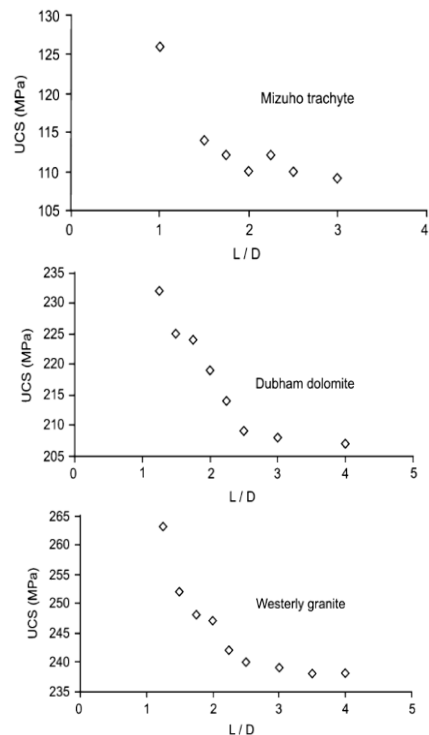


Fig. 1. Effect of slenderness ratio on the uniaxial compression strength of three different specimens [18, 19]

- 1 Plane of weakness
- 2 Mogi
- 3 John
- 4 Hawkins
- 5 Thuro

6 Unlu
7 Yilmaz

جدول ۱. مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی تاثیر اندازه نمونه (با نسبت لاغری ثابت) بر مقاومت فشاری تک محوره

Researcher and year of research	Type and dimesion of specimens	Results of study (with increase of size)
Mogi, 1962 [18]	Rectangular prisms of marble (20 -100 mm)	Decrease of strength and linear reduction relationship was developed
Lundborg, 1967 [27]	Granite specimens (D= 19-58 mm)	Reduction of strength and development of a model based on Weibull theory
Bieniawski, 1968 [28]	Cubical coal specimens (75-200 mm)	Reduction of strength and development of a semi-empirical model based on Weibull theory
Hoskins and Horino, 1969 [29]	Kansas limestone (D= 25-200 mm), Longmant sandstone (D= 25-100 mm), Carthage marble (D= 25-145 mm), Salida granite (D= 25-75 mm) and plaster of Paris (D= 25-150 mm)	Increase of strength in limestone, sandstone and marble specimens and decrease of strength in granite specimens
Nishimatsu et al., 1969 [30]	Saajome andesite (D=24-70 mm), Ogino tuff (D=17-70mm), Inada granite (D=13-70mm), Shinkomatsu andesite (D=13-70 mm) and Aoishi sandy tuff (D=13-70mm)	Increase of strength in andesite samples were observed while results of other samples were inconclusive.
Pratt et al., 1972 [31]	Rectangular prisms of diorite (53-1800 mm)	Decrease of strength
Dhir and Sangha, 1973 [32]	Arbuthnott sandstone and Garvock sandstone specimens (D=16-76 mm)	Increase of strength in Garvock samples were observed while results of Arbuthnott specimens were inconclusive.
Bieniawski, 1974 [33]	Sandstone, quartzite, Marikana norite and Belfast norite (D=21.5-54 mm)	Decrease of strength
Abou-Sayed et al., 1976, [13]	Cedar City quartz diorite (D= 25-150 mm)	Decrease of strength
Hoek and Brown, 1980 [17]	Marble, limestone, granite, basalt, andesite basalt, gabro, norite and quartzdiorite samples	Decrease of strength
Baecher and Einstein, 1981 [34]	Gypsum specimens (D=38-300 mm)	Decrease of strength
Natau et al., 1983 [35]	Yellow limestone (D=75-580 mm)	Decrease of strength
Jackson and Lau, 1990 [36]	Lac du Bonnet grey granite samples (D=33-294 mm)	Inconclusive results
Panek and Fannon, 1992 [37]	Metadiabase samples (D=28-145 mm) and Basalt samples (D= 21-145 mm)	Decrease of strength
da Silva and Hennies, 1993 [38]	Cubical samples of Manganese ore (10-200 mm) and Basalt samples (15-150 mm)	Decrease of strength
Kramadibrata and Jones, 1993 [39]	Basalt mafic (D= 36-75 mm), Porphyry (D=36-100 mm), GMD-U8 ore (D=20-150 mm) and GMD-U8 Mullock (D=30-150 mm)	Decrease of strength
Yuki et al., 1995 [40]	Welded tuff (D=30-150 mm)	Increase of strength
Hawkins, 1998 [21]	Pilton sandstone, Clifton Down limestone, Purbeck limestone, Pennant sandstone, Bath stone, Burrington Oolite limestone and Hollington sandstone samples with (D=12.5-150 mm)	Increase of strength with increase of diameter up to specific diameter and remaining constant or decrease of strength
Thuro et al., 2001 [22]	Limestone (D=45-80 mm) and granite (D=45-110 mm)	Inconclusive results
Pells, 2004 [41]	West Pymble sandstone (D=18-144 mm)	Inconclusive results
Simon and Deng, 2009 [42]	A typical hard rock (D=30-63 mm)	Decrease of strength
Darlington and Ranjith, 2011 [43]	Mortar (D=64-300 mm)	Decrease of strength
Masoumi, 2013 [44]	Sandstone, two types of granite and marble (D=19-145 mm)	Inconclusive results. Increase of strength with increase of diameter up to 60 mm and decrease of strength for greater size specimens while strength remained constant for granite specimens
Roshan et al., 2016 [45]	Shale specimens (D=19-145 mm)	Increase of strength

Table 1. Review of previous studies of scale effect (with constant slenderness ratio) on UCS

شکل ۳. تاثیر قطر نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره: (a) مدل هوک و براون [17] و (b) مدل هاوکینز [21]

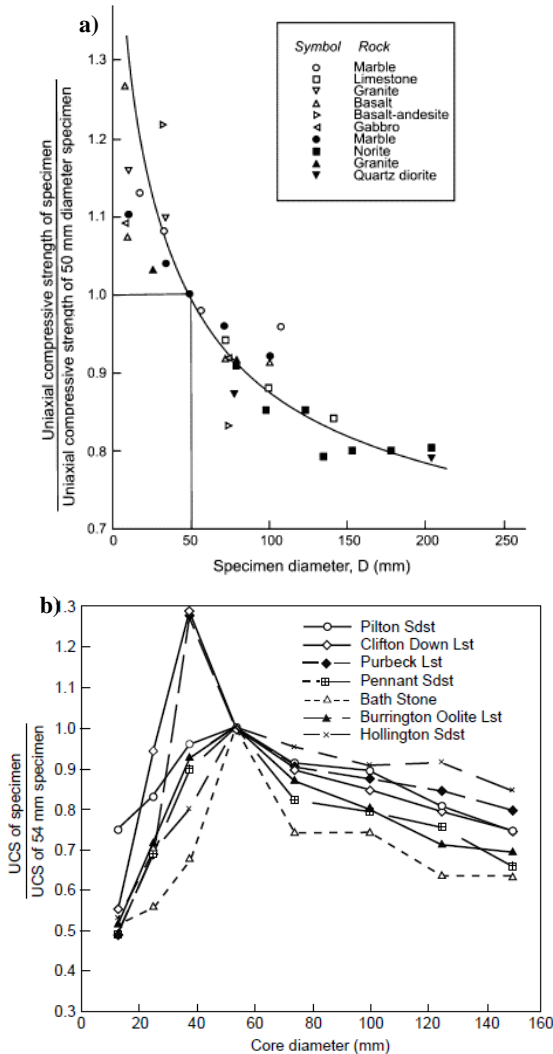


Fig. 3. Effect of specimen diameter on UCS: a) Hoek and Brown Model and b) Hawkins model

۳- روش تحقیق

در این پژوهش، از نمونه‌های ماسه‌سنگ هوکزبری^۴ استفاده شد. این ماسه‌سنگ، سنگ پی شهر سیدنی استرالیا را تشکیل می‌دهد و سازه‌های مختلف عمرانی و معدنی در داخل یا روی آن ایجاد شده است. رسوبات ماسه سنگی دارای وسعتی حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع و ضخامتی حدود ۲۹۰ متر در رسوبات دوره تریاسه حوضه آبرفتی سیدنی در ساحل شرقی سیدنی، در ایالت نیوساوت ولز استرالیا است. نمونه‌های آزمایشگاهی از معدن

ون میر^۱ [24,25] تعداد زیادی آزمایش روی استوانه‌ای بتن انجام داد و نشان داد که تقریباً مقاومت نمونه‌ها در نسبت لاغری‌های مختلف ثابت می‌ماند. پژوهش‌های تانکی^۲ و هاسانکب^۳ [26] روی نمونه‌هایی از بازالت، آندزیت، سیلت استون، سنگ آهک، مرمر و توف با نسبت لاغری بین ۱ تا ۲/۵ نشان داد که با افزایش نسبت لاغری، مقاومت تک محوره بیشتر نمونه‌ها کاهش می‌یابد، اما این روند برای نمونه‌های توف، سنگ آهک و مرمر به صورت بارز مشاهده نشد شکل (۲ ج). یکی از محدودیت‌های اصلی مطالعات تانکی و هاسانکب، عدم وجود آزمایش برای نسبت‌های طول به قطر بیش از ۲/۵ است که تشخیص روند کلی نتایج را با مشکل مواجه می‌کند.

۲-۲- بررسی تاثیر قطر بر مقاومت

مطالعات بسیار زیادی در طی پنج دهه گذشته روی تاثیر اندازه نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره انجام شده است. مروری جامع از پژوهش‌های انجام شده توسط پژوهشگران مختلف روی تاثیر اندازه (قطر نمونه) بر مقاومت فشاری تک محوره در جدول (۱) آورده شده است. در حالیکه بسیاری از این نتایج حاکی از کاهش مقاومت با افزایش قطر نمونه می‌باشند، اما در تعداد زیاد دیگری از این مطالعات عدم کاهش مقاومت نیز مشاهده می‌شود. در شکل (۳) مقایسه‌ای بین نتایج ارائه شده در مدل هوک و براون [17] و مدل هاوکینز [21] ارائه شده است.

در حالیکه مدل هوک و براون کاهش واضح مقاومت با افزایش قطر نمونه را نشان می‌دهد، مطالعات هاوکینز افزایش بارز مقاومت را تا قطری خاص نشان داده و پس از آن مقاومت کاهش یافته یا ثابت می‌شود. بررسی نتایج آزمایش‌های صورت گرفته توسط پژوهشگران مختلف در سالیان گذشته نشان می‌دهد که در این مطالعات نمی‌توان روند خاص و ثابتی را مشاهده نمود و مطالعات و پژوهش‌های بیشتری در این زمینه لازم است.

1 Van Mier
2 Tuncay
3 Hasanceb

4 Hawkesbury Sandstone

شکل ۴. مراحل تهیه نمونه‌های ماسه سنگ با قطر و نسبت طول به قطر مختلف. (a) مغزه‌گیری از بلوک‌های ماسه‌سنگ (b) نمایی از تعدادی مغزه‌های استوانه‌ای تهیه شده (c) برش نمونه‌ها با نسبت طول به قطر مورد نظر و (d) صیقل دادن سطوح انتهایی نمونه‌ها

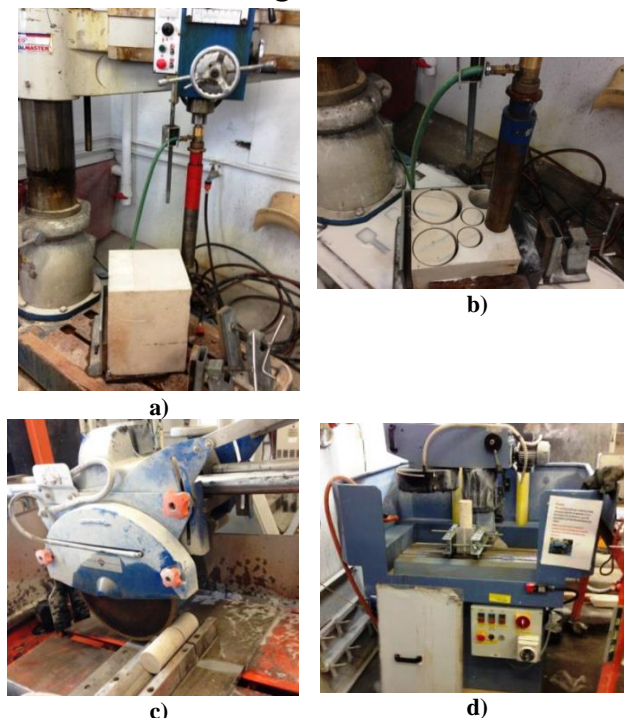
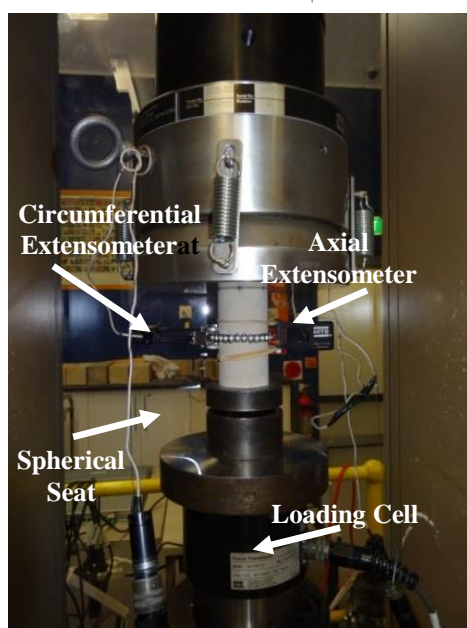


Fig. 4. Procedure of sample preparation with different diameters and slenderness ratio: a) Coring from blocks, b) A view of prepared cylindrical cores, c) Cutting specimens to specified slenderness ratio and d) Grinding surface ends

شکل ۵. نمایی از دستگاه MTS 815 و قسمت‌های مختلف این دستگاه برای انجام آزمایش‌های فشاری تک محوره



کواری گاسفورد^۱ از بخش سامرزبای^۲ ایالت نیوساوت ولز استرالیا در قالب بلوک‌هایی مکعب مستطیلی به طول ۶۰۰ میلی‌متر و عرض و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر تهیه شدند. سپس، با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر هافکو^۳ RD900 همان‌گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است، نمونه‌هایی استوانه‌ای به قطر ۱۹، ۲۵، ۳۸، ۵۰، ۶۷، ۹۶، ۱۱۹ و ۱۴۵ میلی‌متر تهیه شد. سپس نمونه‌ها با نسبت طول به قطر ۱، ۲/۵، ۳ و ۴ بریده شدند و برای اطمینان از عمود بودن محور نمونه بر سطوح انتهایی نمونه، دو انتهای نمونه توسط دستگاه مخصوص صیقل داده شدند. بر اساس استاندارد JSRM، برای هر اندازه ۵ نمونه تهیه شد و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در خشک‌کن تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد خشک شدند.

آزمایش‌های تک محوره توسط دستگاه MTS 815 که نمایی از آن در شکل (۵) نشان داده شده است، انجام شدند. این دستگاه دارای ظرفیت باربری ۱۶۰۰ کیلونیوتن بوده و خودکنترل^۴ است. برای اندازه‌گیری تغییرات طول نمونه در طی پروسه بارگذاری، از دو روش استفاده شد. در روش اول، تغییر طول نمونه با اندازه‌گیری تغییر مکان فک متحرک دستگاه، ثبت شد و در روش دوم از اکستنسومتر طولی^۵، همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، استفاده شد. با توجه به اینکه در اکستنسومتر طولی، شرایط مرزی و تاثیر سطوح انتهایی نمونه بر نتایج تاثیرگذار نیست، نتایج دقیق‌تری برای تعیین کرنش محوری بدست می‌آید. برای تعیین مقدار کرنش جانبی در آزمایش‌ها، از اکستنسومتر محیطی^۶ شکل (۵) استفاده شد که بوسیله آن، تغییرات محیط نمونه در طول آزمایش ثبت شد. با توجه به محدودیت فاصله بین دو فک و همچنین ماکزیمم ظرفیت باربری دستگاه، تعدادی از آزمایش‌ها برای نمونه‌های با قطر زیاد و نسبت لاغری زیاد انجام نشد.

- 1 Gosford
- 2 Somersby
- 3 Hafco Metalmaster drilling machine RD-900
- 4 Servo-Control
- 5 Axial Extensometer
- 6 Circumferential Extensometer

مطالعات بسیار محدودی در زمینه تاثیر مقیاس روی مدول الاستیسیته انجام شده است. پرت [31] با مطالعه روی چند نوع سنگ گرانودیوریت نشان داد که قطر نمونه تاثیری بر مدول الاستیسیته ندارد. همچنین جکسون و لاو [36]، با مطالعه روی نمونه‌هایی از گرانیت کاهش در مدول الاستیسیته با افزایش قطر نمونه تا حدی خاص و سپس ثابت شدن مدول الاستیسیته را گزارش نمودند.

شکل ۶. بررسی تاثیر قطر نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره برای نسبت طول به قطر مختلف

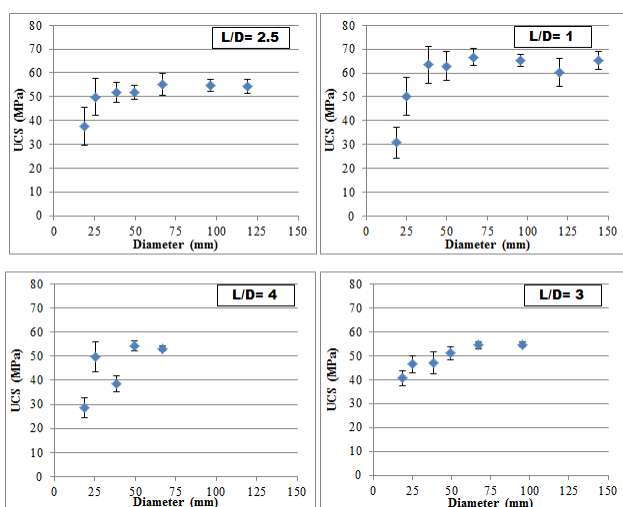


Fig. 6. Effect of specimen diameter on UCS at different slenderness ratio

شکل ۷. بررسی تاثیر قطر نمونه بر مدول الاستیسیته برای نسبت طول به قطر مختلف

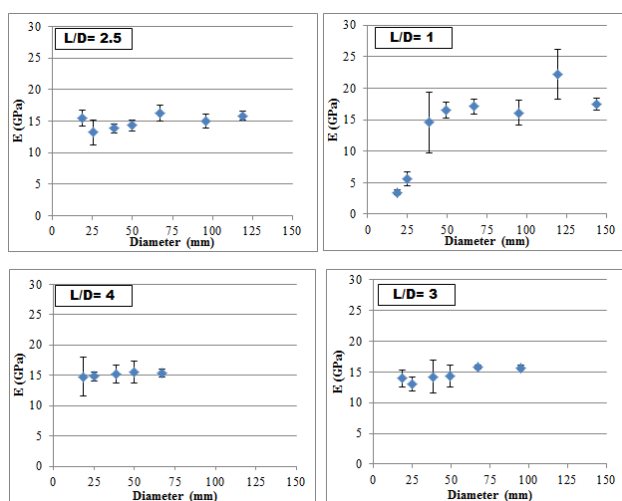


Fig. 7. Effect of specimen diameter on Elastic modulus at different slenderness ratio

نتایج تاثیر قطر نمونه بر مدول الاستیسیته برای نسبت طول به

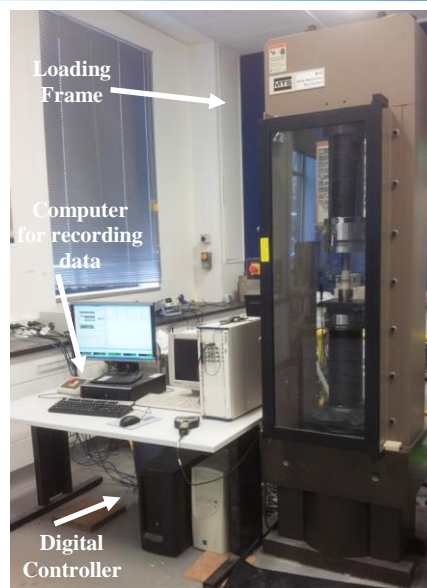


Fig. 5. A view of MTS 815 loading frame and its different parts for uniaxial compression test

۴- بررسی نتایج آزمایش‌ها و بحث

نتایج بررسی تاثیر قطر نمونه بر مقاومت فشاری تک محوره برای نسبت طول به قطر مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. برای نسبت طول به قطر ۱، با افزایش قطر نمونه تا حدود ۵۰ میلی‌متر، مقاومت فشاری تک محوره افزایش می‌یابد و پس از آن تغییر بارزی در مقاومت سنگ دیده نمی‌شود. برای نسبت طول به قطر ۲/۵، ۳، و ۴ نیز افزایش مقاومت تا قطر حدود ۵۰ میلی‌متر مشاهده می‌شود، اما نرخ افزایش مقاومت به مانند حالت نسبت لاغری ۱ تند نیست، که دلیل آن مکانیزم شکست متفاوت است که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. مروری بر پژوهش‌های انجام شده گذشته، که در بخش دوم این مقاله به آنها پرداخته شد، نشان می‌دهد که در مطالعات قبلی دو گروه از نتایج وجود دارد. گروه اول، کاهش مقاومت با افزایش قطر نمونه را نشان می‌دهند (مانند مطالعات هوک و براون و ...) و گروه دوم افزایش مقاومت سنگ تا قطری خاص را نشان می‌دهند (مانند مطالعات هاوکینز و ...). نتایج آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، مطالعات هوکینز را تایید می‌کند. در مدل هوک و براون، رابطه‌ای کلی برای کلیه سنگ‌ها در نظر گرفته شده و طبیعت زمین شناسی و چگونگی تشکیل آنها نادیده گرفته شده است. مطالعات معصومی [44] نیز این نکته را تایید می‌کند که برای هر نوع سنگ، ماهیت تشکیل آن می‌تواند تاثیر متفاوتی بر اثر مقیاس آن داشته باشد.

تک محوره ملاحظه نمی‌شود. نتایج بدست آمده در این پژوهش، نتایج مطالعات موگی [19]، جان [20]، هاو کینز [21]، تورو و همکاران [22] و تانکی و هاسانکب [26] را تایید می‌کند.

تاثیر نسبت لاغری بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که نسبت لاغری تاثیر بارزی بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ندارد.

شکل ۹. بررسی تاثیر نسبت لاغری بر مقاومت فشاری تک محوره

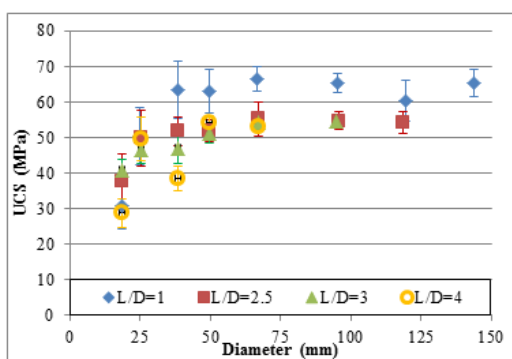


Fig. 9. Effect of slenderness ratio on UCS

شکل ۱۰. بررسی تاثیر نسبت لاغری بر مدول الاستیسیته

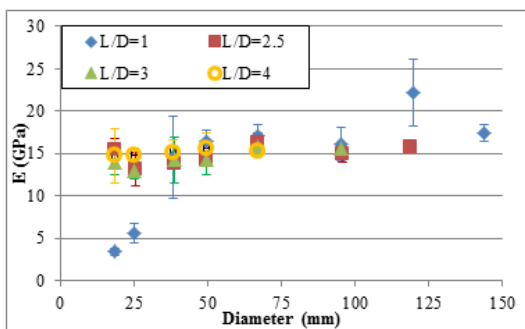


Fig. 10. Effect of slenderness ratio on Elastic modulus

شکل ۱۱. بررسی تاثیر نسبت لاغری بر ضریب پواسون

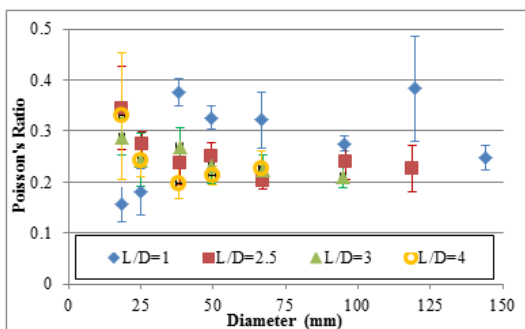


Fig. 11. Effect of slenderness ratio on Poisson's ratio

مکانیزم شکست نمونه‌ها می‌تواند معرف خوبی برای

قطر مختلف، در شکل (۷) نشان داده شده است. مدول الاستیسیته محاسبه شده، مدول متوسط است که معرف شیب قسمت خطی منحنی تنش - کرنش است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که برای کلیه نسبت لاغری‌های مختلف به استثنای نسبت ۱، قطر نمونه تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مدول الاستیسیته ندارد. دلیل رفتار متفاوت نمونه‌ها در نسبت لاغری ۱ را می‌توان مکانیزم شکست متفاوت آنها نسبت به سایر نمونه‌ها دانست.

نتایج بررسی تاثیر قطر نمونه بر ضریب پواسون برای نسبت طول به قطر مختلف در شکل (۸) آورده شده است. به استثنای نسبت لاغری ۱ که روند خاصی را نشان نمی‌دهد، در سایر موارد روند کاهشی در مدول الاستیسیته با افزایش قطر نمونه مشاهده می‌شود. البته این روند با توجه به انحراف معیار نتایج بارز نیست. در مطالعات پرت [31] و جکسون و لاو [36] نیز این روند کاهشی مشاهده شده، اما در این نتایج نیز بدلیل ضریب تغییرات بالای مقادیر ضرایب پواسون، روند کاهشی از نظر آماری بارز نیست.

شکل ۸. بررسی تاثیر قطر نمونه بر ضریب پواسون برای نسبت طول به قطر

مختلف

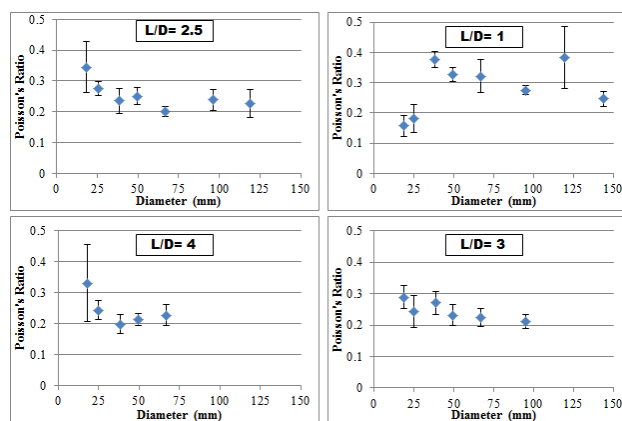


Fig. 8. Effect of specimen diameter on Poisson's ratio at different slenderness ratio

شکل (۹) تاثیر نسبت لاغری بر مقاومت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. مقاومت فشاری تک محوره در نسبت لاغری ۱، بطور قابل ملاحظه‌ای بیش از نسبت لاغری‌های ۲/۵، ۳ و ۴ نیست. بنابراین، با افزایش ضریب لاغری، مقاومت فشاری تک محوره کاهش می‌یابد و برای نسبت لاغری بیش از ۲/۵ تغییر بارزی در مقاومت فشاری

شکل ۱۳. مکانیزم شکست نمونه‌ها در قطرهای مختلف و با نسبت لاغری

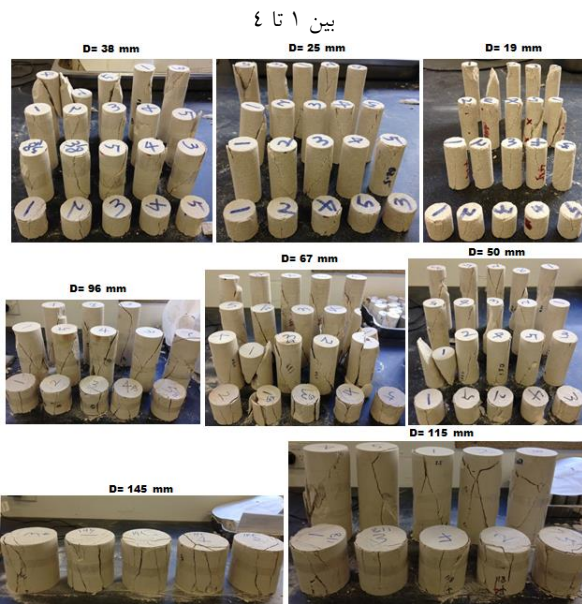


Fig. 13. Failure mechanism of specimens at different diameters with slenderness ratio between 1 to 4

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر اندازه نمونه بر رفتار نوعی ماسه سنگ تحت آزمایش فشاری تک محوره مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شکل متداول استوانه‌ای نمونه‌ها در این آزمایش، تاثیر اندازه از دو جنبه تاثیر طول نمونه (اثر مقیاس یک بعدی) و تاثیر قطر با نسبت لاغری ثابت (اثر مقیاس سه بعدی) مطرح است و در این پژوهش تاثیر هر دو نوع مقیاس بررسی شد. برای این منظور، حدود ۱۲۰ نمونه با قطرهای ۱۹، ۲۵، ۳۸.۵۰، ۶۷، ۹۶، ۱۱۹ و ۱۴۵ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر ۱، ۲/۵، ۳ و ۴ تهیه شد و این نمونه‌ها تحت آزمایش فشاری تک محوره قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش قطر نمونه تا حدود ۵۰ میلی‌متر، مقاومت فشاری تک محوره افزایش و پس از آن ثابت می‌شود. بنابراین کمینه قطر پیشنهاد شده توسط استانداردهای ASTM و ISRM برای آزمایش فشاری تک محوره که به ترتیب ۵۴ و ۴۷ میلی‌متر است، قطری است که در اندازه‌های بیشتر از آن، اثر مقیاس چشمگیری وجود ندارد. همچنین بررسی انجام شده نشان داد که قطر نمونه تاثیر بارزی بر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ندارد. بررسی تاثیر نسبت لاغری انجام شده نشان داد که با افزایش

توصیف رفتار و خواص مکانیکی سنگ‌ها باشد. سوئدزیسکی^۱ و شامو^۲ [46] چگونگی شکست نمونه‌های سنگ بکر را به چهار گروه کلی تقسیم بندی نمود. این گروه‌ها عبارتند از:

- (I) صفحه برشی زاویه دار نسبت به امتداد بارگذاری
- (II) دو سطح برش همراه با مقاومتی نسبتاً بالا
- (III) چندین ترک در مرکز نمونه با مقاومتی بالا و
- (IV) گسیختگی قائم در راستای محور بارگذاری که دارای بالاترین مقاومت می‌باشد.

در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، چهار نوع گسیختگی ذکر شده مشاهده شد، که در شکل (۱۲) نشان داده شده‌اند. سازوکار گسیختگی برای نمونه‌ها با قطرهای مختلف و نسبت لاغری مختلف در شکل (۱۳) نشان داده شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که در تمامی قطرها، در نسبت لاغری ۱، مکانیزم شکست همراه با گسترش ترک‌ها در راستای محور نمونه (نوع IV) بوده، که براساس مطالعات سوئدزیسکی و شامو در این نوع گسیختگی بالاترین مقاومت رخ می‌دهد. این نوع گسیختگی فقط در نمونه‌ها با نسبت لاغری ۱ مشاهده شده و بنابراین دلیل مقاومت بالاتر در این نسبت لاغری نسبت به سایر نسبت‌ها، مکانیزم شکست متفاوت آن است.

شکل ۱۲. انواع گسیختگی‌های مشاهده شده در نمونه‌ها. (a) یک سطح برش (نوع I)، (b) دو سطح برش متقاطع (نوع II)، (c) سطح برش به همراه چندین ترک در مرکز نمونه (نوع III) و (d) ترک‌هایی قائم در راستای محور نمونه (نوع IV)

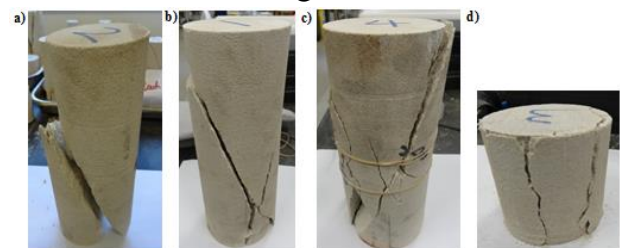


Fig. 12. Different types of failure modes in specimens: a) Simple shear (type I), b) multiple shear (type II), c) Multiple fracture (type III) and d) Vertical splitting (type IV)

- [11] Griffith A. A. 1924 The Theory of Rupture. *In proceeding of 1st International Congress of Applied Mechanics*, Delf, Netherlands.
- [12] Hudson J. A., Crouch S.L. & Fairhurst, C. 1972 Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure. *Engineering Geology*, **6**, 155-189.
- [13] Abou-Sayed A. S., Brechtel C. E. & Terra Tek I. 1976 Experimental investigation of the effects of size on the uniaxial compressive strength of cedar city quartz diorite. *In proceeding of The 17th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, US.
- [14] Carpinteri A. 1994 Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mechanics of Materials*, **18**, 89-101.
- [15] Borodich F. M. 1999 Fractals and fractal scaling in fracture mechanics. *International Journal of Fracture*, **95**, 239-259.
- [16] Carpinteri A., Chiaia B. & Ferro G. 1995 Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder. *Materials and Structures*, **28**, 311-317.
- [17] Hoek E. & Brown E. 1980 *Underground excavations in Rock*, Hertford, London.
- [18] Mogi K. 1966 Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive stress. *Felsmechanik und Ingenieurgeologie* **4**, 41-55.
- [19] Mogi K. 2007 *Experimental rock mechanics*. Taylor & Francis, London.
- [20] John M. 1972 *The influence of length to diameter ratio on rock properties in uniaxial compression: a contribution to standardization in rock mechanics testing*. Rep S Afr CSIR No ME1083/5.
- [21] Hawkins A. B. 1998 Aspects of rock strength. *Bulletin of Engineering Geology Environment*, **57**, 17-30.
- [22] Thuro K., Plinninger R. J. Zah S. & Schutz S. 2001 Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test. *In: ISRM regional symposium, EUROCK 2001*, Finland, 169-174.
- [23] Unlu T. & Yilmaz O. 2008 Investigation of the shape effect on the uniaxial compressive strength of the intact rock. *9th regional rock mechanics symposium*, Izmir, Turkey, 121-141.
- [24] Van Mier J. G. M. 2008 Framework for a generalized four-stage fracture model of cement-based materials. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**(18), 5072-5086.
- [25] Van Mier J. G. M. & Man H. K. 2009 Some notes on microcracking, softening, localization, and size effects. *International Journal of Damage Mechanics*, **18**(3); 283-309.
- [26] Tuncay E. & Hasancebi N. 2009 The effect of length to diameter ratio of test specimens on the uniaxial compressive strength of rock. *Bulletin of Engineering Geology Environment*, **68**(4), 491-497.

نسبت لاغری، مقاومت سنگ کاهش می‌یابد و در نسبت لاغری بیش از ۲/۵، تاثیر ضریب لاغری معنی‌دار نیست. برای بررسی بالا بودن مقاومت سنگ در ضریب لاغری ۱، مکانیزم شکست نمونه‌ها بررسی و مشخص شد در این نسبت، مکانیزم شکست گسترش ترک‌های کششی در راستای محور نمونه است که منجر به بالاترین مقاومت در نمونه‌ها می‌شود.

۶- تشکر و قدردانی

بدینوسیله از بخش مهندسی معدن دانشگاه نیوساوت ولز استرالیا بدلیل همکاری در انجام آزمایش‌های صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

References

۷- مراجع

- [1] Ad Hoc committee 2012 *An Assessment of the Deep Underground Science and Engineering Laboratory*, The National Academies Press, Washington DC, USA.
- [2] Bahaaddini M., Hagan P. C., Mitra R. & Hebblewhite B. K. 2014 Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study. *Engineering Geology*, **181**, 212-23.
- [3] Weibull W. 1939 A statistical theory of the strength of materials. *In proceeding of Royal Swedish Academy of Engineering Science*, Stockholm, Sweden, 1-45.
- [4] Bazant Z.P. 1997 Scaling of quasibrittle fracture: asymptotic analysis. *International Journal of Fracture*, **83**, 19-40.
- [5] Van Vliet M. R. A. & Van Mier J. G. M. 2000 Experimental investigation of size effect in concrete and sandstone under uniaxial tension. *Engineering Fracture Mechanics*, **65**, 165-188.
- [6] Carpinteri A., Ferro G. & Monetto I. 1999 Scale effects in uniaxially compressed concrete specimens. *Magazine of Concrete Research*, **51**(3), 217-225.
- [7] Wong T. F., Wong R. H. C., Chau K. T. & Tang, C. A. 2006 Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock. *Mechanics of Materials*, **28**, 664-681.
- [8] Yoshinaka R., Osada M., Park H., Sasaki T. & Sasaki K. 2008 Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect. *Engineering Geology*, **96** (3-4), 173-186.
- [9] Zhang Q., Zhu H., Zhang L. & Ding X. 2011 Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **48**, 1320-1328.
- [10] Bazant Z. P. & Xi Y. 1991 Statistical size effect in quasi-brittle structures: II. Nonlocal theory. *Journal of Engineering Mechanics*, **117**(11), Paper No. 26347.

- [37] Panek L. A. & Fannon T. A. 1992 Size and shape effects in point load tests of irregular rock fragments. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **25**, 109-140.
- [38] Da Silva L. A. & Hennies W. T. 1993 A methodology for rock mass compressive strength characterization from laboratory tests. *In proceeding of Scale Effects in Rock Mass*, Lisbon, Portugal. Balkema, 217-224.
- [39] Kramadibrata S. & Jones I. O. 1993 Size effect on strength and deformability of brittle intact rock. *In proceeding of Scale Effect in Rock Masses*, Lisbon, Portugal. Balkema, 277-284.
- [40] Yuki N., Aoto S. & Ogata Y. 1995 The scale and creep effects on strength of welded tuff. *In proceeding of Rock Foundation*, Balkema, Rotterdam.
- [41] Pells, P. 2004 On the absence of size effects for substance strength of Hawkesbury sandstone. *Australian Geomechanics*, **39**(1), 79-83.
- [42] Simon R. & Deng D. 2009 Estimation of scale effects of intact rock using dilatometer tests results. *In proceeding of 62nd Canadian Geotechnical Conference*, Halifax, 481-488.
- [43] Darlington W. J. & Ranjith, P. G. 2011 The effect of specimen size on strength and other properties in laboratory testing of rock and rock-like cementitious brittle materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **44**, 513-529.
- [44] Masoumi M. 2013 *Investigation into the mechanical behaviour of intact rock at different sizes*, PhD thesis, UNSW Australia.
- [45] Roshan H., Masoumi H. & Hagan P. C. 2016 On size-dependent uniaxial compressive strength of sedimentary rocks in reservoir geomechanics. *ARMA 2016*, Houston, Texas.
- [46] Szwedzicki T. & Shamu W. 1997 The effect of material discontinuities on strength of rock samples. *in Australasian Institute of Mining and Metallurgy*.
- [27] Lundborg N. 1967 The strength-size relation of granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **4**, 269-272.
- [28] Bieniawski Z. T. 1968 The effect of specimen size on the compressive strength of coal. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **6**, 325-335.
- [29] Hoskins J. R. & Horino F. G. 1969 Influence of spherical head size and specimen diameters on the uniaxial compressive strength of rocks. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Mines, Washington, US.
- [30] Nishimatsu Y., Yamagushi U., Motosugi K. & Morita M. 1969 The size effect and experimental error of the strength of rocks. *Journal of Mining and Material Process Institute of Japan*, **18**, 1019-1025, (In Japanese).
- [31] Pratt H. R., Black A. D., Brown W. S. & Brace W. F. 1972 The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **9**, 513-529.
- [32] Dhir R. K. & Sangha C. M. 1973 Relationships between size, deformation and strength for cylindrical specimens loaded in uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **10**, 699-712.
- [33] Bieniawski Z. T. 1974 Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, **74**, 312-320.
- [34] Baecher G. B. & Einstein, H. H. 1981 Size effect in rock testing. *Geophysical Research Letter*, **8**(7), 671-674.
- [35] Natau O., Frolich B. O. & Mutschler T. O. 1983 Recent development of large scale triaxial test. *In proceeding of ISRM Congress*, Melbourne, 65-74.
- [36] Jackson R. & Lau J. S. O. 1990 The effect of specimen size on the laboratory mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite. *In proceeding of Scale effects in rock masses*, Balkema, Rotterdam.

Size effect on the mechanical behavior of intact rock

M. Bahaaddini^{1*}

1- Assistant Prof., Department of Mining Engineering, Higher Education Complex of Zarand, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

*m_bahaaddini@uk.ac.ir

Abstract:

Determination of the rock mass strength is a challenge for geotechnical engineers. Some part of this problem is related to complex interaction of rock mass components, intact rock and discontinuities, and the other part is related to difficulty in determination of the mechanical properties of intact rock and discontinuities. The common approach to determine the mechanical properties of rocks is undertaking laboratory experiments and extrapolate the insitu properties based on these laboratory experiments. This extrapolation, or in the other word size effect, has been remained as a challenge for practical rock engineers for decades. Size effect studies can be divided into two groups of one dimensional scale effect, in which the diameter of samples is fixed and the length of samples are changed, and three dimensional scale effect, in which the ratio of length to diameter, called slenderness ratio, is fixed and the diameter is changed. Review of previous studies on the effect of slenderness ratio on the strength of intact rock shows that in some studies as the slenderness increases up to specific value, the strength decreases while in other studies the slenderness ratio has no significant effect on the strength. Results of previous studies on the effect of sample diameter on the strength of intact rock are also inconclusive. Some studies show that as the diameter of sample increases, the strength decreases while other studies show the increase of strength up to specific diameter or no scale effect. This paper aims to study both one dimensional and three dimensional size effect on intact rock properties. To this end, around 120 sandstone samples with diameter between 19 to 145 mm and slenderness ratio of 1 to 4 were prepared and uniaxial compression tests were carried out on these samples. Uniaxial compression tests were carried out using MTS 815 loading frame. Axial and circumferential extensometers were used to measure deformation of samples during experiments. Results of this study show that the increase of diameter up to 50 mm resulted in the increase of uniaxial compressive strength and no scale effect was observed for diameters greater than 50 mm. This trend was observed for all slenderness ratios. No scale effect was observed on the elastic modulus and the Poisson's ratio. Therefore, the minimum diameter of around 50 mm, which is suggested by ISRM and ASTM standards, is the size that scale has no effect on the results of uniaxial compression tests. It was found that the increase of slenderness ratio up to 2.5 results in the decrease of strength and no significant effect was observed for greater slenderness ratios. To find out the reason of observed behavior, failure mechanisms of samples at different slenderness ratios were studied. Four types of failure mode were observed in the experiments; generation of a single shear plane, multiple shear planes, shear plane with some cracks in the center of specimens and tensile cracks parallel to the loading direction. It was found that at low slenderness ratios, samples are failed by propagation of tensile cracks which results in higher strength compared to the other failure modes. Therefore, the higher strength of samples with slenderness ratio of 1 is related to this failure mechanism.

Keywords: Scale effect, Slenderness ratio, Uniaxial compression test, Failure mechanism, Intact rock.