بررسی تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی در آزمایش برزیلی

مجتبی بهاالدینی؛
دانشگاه شهید باهنر کرمان، مجتمع آموزش عالی زرند، بخش مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ٩٥/٠٨/١٥ **پذیرش** ٩٦/٠٤/٢٦

چکیده

یکی از چالش‌های مهندسان مکانیک‌سنگ، تغییر خواص مکانیکی سنگ‌ها با تغییر اندازهٔ نمونه، با عنوان تأثیر مقیاس است. در بحث تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی، پژوهش‌های انجام شده روی سنگ‌ها بسیار محدود است و غالباً روی بتن انجام گرفته است. نتایج تعدادی از تحقیقات گذشته حاکی از کاهش مقاومت با افزایش قطر است، در حالی‌که در تعدادی دیگر بی‌تأثیر بودن مقیاس یا افزایش مقاومت گزارش شده است. هم‌چنین، اغلب این آزمایش‌ها روی دامنهٔ کوچکی از قطر انجام شده و رابطه‌ای کلی که تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی سنگ‌ها را نشان دهد و دارای مقبولیت باشد، وجود ندارد. در این مقاله، تأثیر ابعاد نمونه بر مقاومت کششی برزیلی بررسی می‌شود. برای این منظور، نمونه‌های ماسه سنگ با قطر بین ١٩ تا ١٤٥ میلی‌متر تهیه و آزمایش برزیلی روی این نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قطر نمونه مقاومت کششی کاهش می‌یابد. در ادامه این بررسی، با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی و با استفاده از مدل‌های هوک و براون، قانون تأثیر مقیاس SEL و قانون مقیاس چند فراکتال MFSL، روابطی برای تخمین مقاومت کششی در قطرهای مختلف ارائه شده و مشخص شد مدل SEL تخمین بهتری از تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی ارائه می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آزمایش برزیلی، تأثیر مقیاس، سنگ بکر، مقاومت کششی، مکانیزم شکست.

* **نویسنده مسئول** m_bahaaddini@uk.ac.ir

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

مقدمه

اندازه‌گیری و تعیین خواص سنگ‌ها همواره از بزرگ‌ترین چالش‌های مهندسان زمین‌شناس بوده است. انجام آزمایش در مقیاس درجا غالباً به‌دلیل مشکلات آماده‌سازی نمونه، هزینهٔ زیاد، زمان‌بر بودن انجام آزمایش‌ها و تغییرپذیری زیاد نتایج خروجی، به‌ویژه در پروژه‌های کم اهمیت، کم‌تر استفاده می‌شود. روش رایج برای تعیین این خواص، انجام آزمایش در مقیاس آزمایشگاه و تعمیم این نتایج به خواص درجای سنگ است. بنا براین در مهندسی زمین‌شناسی، اختلاف اندازه بین نمونه‌های آزمایشگاهی و کاربرد صنعتی آن اجتناب‌ناپذیر است [۱]، [۲]. این اختلاف اندازه می‌تواند روی خواص مکانیکی سنگ تأثیرگذار باشد، که در اصطلاح به آن تأثیر مقیاس[1] می‌گویند. تأثیر مقیاس محدود به سنگ‌ها نیست و در مواد شکننده و شبه‌شکننده مانند بتن، سرامیک و سایر مصالح ساختمانی نیز گزارش شده است.

پژوهش‌های تحلیلی و عددی زیادی روی تأثیر مقیاس بر رفتار مکانیکی تودهٔ سنگ انجام شده است [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، اما نتایج این فعالیت‌ها به‌دلیل نبودن روش اعتبارسنجی مناسب، مقبولیتی پیدا نکرده‌اند. بدون شک، گام اصلی و مؤثر قبل از بررسی تأثیر مقیاس بر خواص تودهٔ سنگ، تعیین اثر مقیاس بر اجزاء تشکیل‌دهندهٔ تودهٔ سنگ (سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها) است [۷]، [۸]. پژوهش‌های بسیار زیادی در چند دههٔ گذشته روی تأثیر اندازه بر خواص مکانیکی سنگ بکر انجام شده است. در اکثر این بررسی‌ها، اثر مقیاس روی مقاومت فشاری تک محوره بررسی شده است [۹]، [۱۰]، [۱۱] و پژوهش‌های بسیار محدودی روی تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی سنگ انجام شده است.

آزمایش برزیلی روشی غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مواد شکننده مانند سنگ و بتن است که از زمان ارائه این روش به‌وسیلهٔ کارنیرو[2] [۱۲] و آکازاوا[3] [۱۳] در سال ۱۹٤۳، به‌طور گسترده‌ای استفاده شده است. آزمایش کششی مستقیم، با توجه به مقاومت کششی پایین مواد سنگی و هم‌چنین مشکلات تهیه نمونه و ایجاد اتصال مناسب در دو انتهای نمونه، زمان بر بودن و امکان ایجاد ممان بجای کشش خالص، امروزه چندان استفاده نمی‌شوند [۱٤]، [۱٥].

1. Scale Effect
2. Carneiro
3. Akazawa

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

در آزمایش برزیلی، دیسکی نازک به‌صورت قطری تحت فشار قرار می‌گیرد و این فشار باعث ایجاد کشش در امتداد عمود بر قطر بارگذاری شده و با فرض ایجاد ترک کششی در مرکز نمونه، مقاومت کششی σ_t به‌صورت رابطهٔ (۱) محاسبه می‌شود [۱٦].

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi D t} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، P بار لحظه شکست، D قطر نمونه و t ضخامت دیسک است. این آزمایش در سال ۱۹۷۸ به‌عنوان روش پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM شناخته شد. اعتبار این آزمایش، چنان‌که در استاندارد ISRM قید شده است، به‌دلیل این واقعیت است که اکثر سنگ‌ها در حالت تنش دو محوره درجا، نمونه در اثر کشش به‌گونه‌ای می‌شکنند که یکی از تنش‌های اصلی آن‌ها کششی و تنش اصلی دیگر فشاری، با مقداری کم‌تر از چند برابر تنش کششی اصلی است [۱۷].

یکی از پارامترهای مؤثر در مقاومت مکانیکی سنگ‌ها تحت کشش، اثر مقیاس است. این مقاله به بررسی تأثیر قطر نمونه بر مقاومت کششی برزیلی می‌پردازد. برای این منظور، در ابتدا به بررسی جامعی از پژوهش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی انجام شده در این خصوص پرداخته می‌شود. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که بعضی از پژوهش‌ها حاکی از کاهش مقاومت با افزایش قطر نمونه است و تعدادی دیگر بی‌تأثیر بودن یا افزایش مقاومت را نشان می‌دهند. هم‌چنین، فقدان مدلی که تأثیر اندازه روی مقاومت کششی سنگ‌ها را نشان دهد، بارز است. برای رفع مشکل فوق، آزمون‌هایی آزمایشگاهی روی نوعی ماسه‌سنگ با ابعاد مختلف انجام شده است و در ادامه با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی، مدل‌هایی برای تخمین مقاومت کششی در ابعاد مختلف ارائه می‌شود.

مروری بر پژوهش‌های پیشین

فعالیت‌های انجام شده در زمینه اثر مقیاس بر مقاومت مواد شکننده و شبه‌شکننده را می‌توان به چهار دسته کلی روش‌های احتمالاتی، انرژی شکست، چند فراکتال[4] و روش‌های تجربی تقسیم‌بندی کرد. روش احتمالاتی که در ابتدا ویبال[5] [۱۸] ارائه کرد، بعداً تحت عنوان

4. MultiFractality
5. Weibull

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

مدل ضعیف‌ترین اتصال[٦] شناخته شد. ویبال فرض کرد که هر جسم جامد از تعدادی ریزترک تشکیل شده که این ریزترک‌ها تأثیر به‌سزایی 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 دارای ریزترک‌های بیش‌تری نسبت به نمونه کوچک‌تر دارد، بیش‌تر است. بنا براین نمونه بزرگ‌تر تحت مقاومت کم‌تری نسبت به نمونه کوچک‌تر خواهد شکست. شکل تعمیم یافته مدل ویبال به‌صورت رابطه (۲) است:

$$m \log\left(\frac{p_f(\sigma)}{p_1(\sigma)}\right) = \log\left(\frac{V}{V_r}\right) \qquad (۲)$$

که در این رابطه، V حجم نمونه، V_r حجم معرف نمونه، $p_f(\sigma)$ مقاومت ماده و $p_1(\sigma)$ مقاومت نمونه معرف است. پارامتر m ثابت ماده یا مدول ویبال است [۱۸].

محققان زیادی از روش‌های احتمالاتی برای بررسی تأثیر مقیاس بر رفتار مواد استفاده کرده‌اند [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]،[۲۲]، [۲۳]، که با بررسی مدل‌های آماری، نشان دادند که مدل‌های آماری دارای محدودیت‌هایی هستند که قابلیت کاربرد آن‌ها را برای مواد شکننده و شبه‌شکننده محدود می‌کند. در مدل‌های آماری مکانیزم شکست و ساختار زمین‌شناسی مواد در نظر گرفته نشده و توزیع تنش در داخل نمونه الاستیک و یک‌نواخت فرض شده است. در حالی‌که، در اثر توسعه ترک‌های بزرگ مقیاس در نمونه قبل از رسیدن به تنش حداکثر، تنش‌ها دارای توزیع غیریک‌نواخت و ناهم‌گون هستند. در سازه‌های بزرگ مقیاس، مشخص شده که مدل‌های آماری غالباً مقاومت را کم‌تر نشان می‌دهند. علاوه بر موارد فوق، در مدل آماری ویبال هم‌بستگی خواص متغیر مواد نادیده گرفته شده است. با وجود محدویت‌های فوق، مدل‌های آماری به‌دلیل سادگی ذاتی آن‌ها، کاربرد بسیاری در مسائل مهندسی مکانیک سنگ پیدا کرده‌اند.

گروه دوم از مدل‌های تأثیر مقیاس، مدل‌های انرژی شکست هستند. بر اساس مدل گریفیث [٢٤] برای مواد شکننده، یک ترک زمانی گسترش می‌یابد که انرژی پتانسیل کل سیستم اعمال نیرو و ماده کاهش یافته یا با افزایش طول ترک ثابت بماند. در طی آزمایش فشاری یا کششی،

6. Weakest link model

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

برای دو نمونه با ابعاد مختلف ولی تحت سطح تنش ثابت، انرژی الاستیک ذخیره شده در نمونه بزرگ‌تر، بیش از نمونه کوچک‌تر است [۲۵]. بنا براین، آزاد شدن انرژی بیش‌تر برای نمونه بزرگ‌تر، در آغاز پروسه گسترش ترک انتظار می‌رود. در نتیجه، این انرژی آزاد شده بیش‌تر منجر به تنش ایجاد ترک کم‌تر در نمونه بزرگ‌تر می‌شود [۲٦]. به‌عبارت دیگر، افزایش اندازه نمونه باعث کاهش مقاومت نمونه می‌شود.

بازانت و همکاران [۲۷] بر اساس روش انرژی شکست مدلی پیشنهاد دادند که قانون تأثیر مقیاس[۷] (SEL) نامیده می‌شود. بر اساس این مدل که اساساً برای بتن ارائه شده است، مقاومت کششی در آزمایش برزیلی را می‌توان به‌صورت رابطهٔ (۳) تخمین زد:

$$\sigma_t = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\left(\frac{d}{\lambda_0 d\ \max}\right)}} \qquad (۳)$$

که در این رابطه σ_t مقاومت کششی نمونه با قطر مورد نظر، f_t مقاومت نمونه‌ای با قطر ناچیز که به آن مقاومت کششی ذاتی نیز گفته می‌شود، d قطر نمونه مورد نظر و d_{max} قطر بزرگ‌ترین دانه ماده، B و λ_0 پارامترهای بدون بعد ماده هستند.

در چند دههٔ اخیر، روش فراکتال برای درک بهتر خواص سنگ‌ها استفاده شده است. بر اساس خاصیت خود تشابه[۸] بودن ترک‌ها و هتروژنی داخل ماده در ابعاد مختلف، می‌توان آن‌ها را فراکتال دانست [۲۸]، [۲۹]. کارپینتری و همکاران [۳۰]، [۳۱] با استفاده از بحث چند فراکتاله[۹] بودن در ابعاد مختلف، تأثیر مقیاس بر مقاومت مواد شکننده و شبه‌شکننده را بررسی کردند. در واقعیت ذرات مواد تحت بار را می‌توان چند فراکتال دارای بعد ۱/۵ در مقیاس کوچک و بعد ۲ در مقیاس بزرگ فرض کرد. این بدان معنا است که در مقیاس‌های کوچک، توزیع خود تشابه ترک‌های گریفیث در ماده وجود دارد، در حالی‌که در مقیاس بزرگ‌تر این نامنظمی بارز نیست و اندازه ترک‌ها و هتروژنی ماده محدود می‌شود.

کارپینتری و همکاران [۳۱] با انجام آزمایش برزیلی روی نمونه‌های بتن، رابطهٔ (٤) را ارائه کردند که به آن قانون مقیاس چندفراکتال[۱۰] (MFSL)گفته می‌شود:

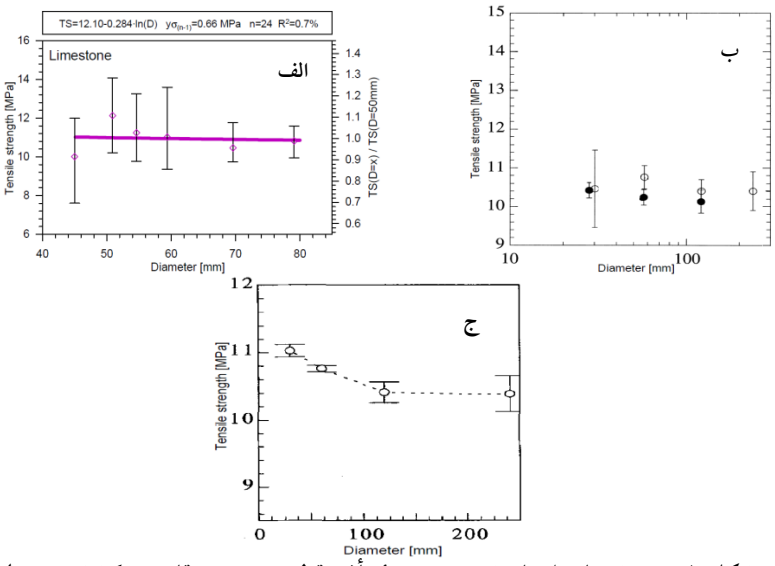
7. Size Effect Law
8. Self Similarity
9. Multifractal
10. Multifractal Scaling Law

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

$$\sigma_t = f_t \sqrt{1+\frac{\alpha d_{\max}}{d}} \qquad (٤)$$

که در این رابطه σ_t مقاومت کششی نمونه، f_t مقاومت کششی ذاتی، d قطر نمونه مورد نظر و d_{max} قطر بزرگ‌ترین دانه ماده، α پارامتر بدون بعد ماده هستند.

محققان مختلف آزمایش‌های زیادی برای بررسی تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی انجام داده‌اند که نتایج مربوط به تعدادی از این تحقیقات روی تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی در شکل ۱ آورده شده است. هم‌چنین مروری جامع بر تاریخچهٔ این فعالیت‌ها در جدول ۱ آورده شده است. بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد که تعدادی از این آزمایش‌ها حاکی از کاهش مقاومت با افزایش قطر است و در تعدادی دیگر تأثیر معکوس یا تأثیر نداشتن قطر بر مقاومت کششی گزارش شده است. از طرف دیگر اکثر آزمایش‌ها انجام شده روی بتن است و فقط تعداد بسیار اندکی از این آزمایش‌ها روی سنگ انجام گرفته است. دامنه قطر مورد آزمایش نیز در اکثر این پژوهش‌ها محدود است. علاوه بر موارد ذکر شده، مدلی که روند تأثیر اندازه بر مقاومت کششی را نشان دهد و دارای مقبولیت عمومی باشد، وجود ندارد. بنا براین ضرورت تحقیق روی این زمینه آشکار به‌نظر می‌رسد.



شکل ۱. پژوهش‌های انجام شده در زمینهٔ تأثیر قطر نمونه بر مقاومت کششی برزیلی؛ الف) پژوهش‌های گویینی و همکاران [۳۹] روی نمونه‌های گرانیتی، ب) پژوهش‌های روکو و همکاران [۱٤] روی نمونه‌های گرانیتی، ج) پژوهش‌های تورو و همکاران [٤۲] روی نمونه‌های سنگ آهک

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

جدول ۱. مروری بر تحقیقات پیشین تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت کششی

محققان و سال تحقیق	مشخصات تحقیق و نمونه‌های آزمایشگاهی	نتیجه تحقیق
هوندرس، ۱۹۵۹ [۳۲]	آزمایش برزیلی روی نمونه‌های بتنی با قطر ۱۵۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر	افزایش مقاومت کششی با افزایش اندازه نمونه
لاندبورگ، ۱۹۶۷ [۳۳]	آزمایش برزیلی روی نمونه‌های گرانیت با قطر ۱۹ تا ۵۸ میلی‌متر	کاهش مقاومت با افزایش اندازه و ارائه مدلی بر اساس مفهوم مدل ویبال
ویجک و همکاران، ۱۹۷۸ [۳٤]	آزمایش کششی مستقیم روی نمونه‌هایی از گرانیت به قطر ۸ تا ٦۲ میلی‌متر و با نسبت طول به قطر مختلف	روند معنی‌دار در مقاومت کششی مشاهده نشد.
سابنیس و میرزا، ۱۹۷۹ [۳۵]	نمونه‌های بتن به قطر ۲۵ تا ۱۵۰ میلی‌متر	کاهش مقاومت کششی با افزایش اندازهٔ نمونه
چن و یوان، ۱۹۸۰ [۳٦]	نمونه‌های بتنی به قطر ۷٦ تا ۱۵۲ میلی‌متر	کاهش مقاومت کششی با افزایش اندازهٔ نمونه
هاسگاوا و همکاران، ۱۹۸۵ [۳۷]	نمونه‌های بتن به قطر ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌متر	در نمونه‌های کوچکتر، کاهش مقاومت را مشاهده نمودند و با افزایش قطر از حدی خاص، این روند معکوس شد.
نیومن و بنت، ۱۹۹۰ [۳۸]	نمونه‌های ماسه سنگ با نسبت ضخامت به قطر مختلف	تحلیل آماری نشان‌دهندهٔ تأثیر معنی‌دار نسبت ضخامت به قطر بود.
بازانت و همکارنش، ۱۹۹۱ [۲۷]	آزمایش برزیلی بر روی محدوده گسترده‌ای از نمونه‌های بتنی	با افزایش قطر نمونه‌ها تا قطری خاص، مقاومت کششی کاهش می‌یابد و با قانون تأثیر مقیاس بازانت هم‌خوانی دارد، اما برای قطرهای بزرگ‌تر تأثیر معکوس و یا ثابت شدن مقاومت مشاهده شد.
کارپینتری و فرو، ۱۹۹٤ [۳۱]	آزمایش کششی مستقیم بر روی نمونه‌های بتنی به قطر ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ٤۰۰ میلی‌متر	کاهش مقاومت کششی با افزایش اندازهٔ نمونه
گوینی و همکاران، ۲۰۰۰ [۳۹]	آزمایش برزیلی بر روی نمونه‌های بتنی و گرانیتی با قطر ۳۰، ٦۰، ۱۲۰ و ۲٤۰ میلی‌متر	در نمونه‌های بتنی، کاهش مقاومت با افزایش اندازهٔ نمونه مشاهده شد، در حالی‌که در نمونه‌های گرانیتی تأثیر مقیاس بارزی مشاهده نشد.
ون ولیت و ون میر، ۲۰۰۰ [۲۱]	آزمایش مقاومت کششی مستقیم بر نمونه‌هایی از ماسه‌سنگ و بتن به قطر ۵۰ تا ۱٦۰۰ میلی‌متری در دو حالت خشک و اشباع	در نمونه‌های بتن به استثنای قطر ۵۰ میلی‌متر، با افزایش قطر مقاومت کششی کاهش یافت، اما در نمونه‌های ماسه‌سنگ روند بارزی مشاهده نشد.
روکو و همکاران، ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱ [٤۰]، [٤۱]	آزمایش برزیلی روی نمونه‌های بتن به قطر ۱۷، ۳۸، ۷۵، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر و نمونه‌های گرانیت به قطر ۳۰، ٦۰، ۱۲۰ و ۲٤۰ میلی‌متر	کاهش مقاومت کششی با افزایش اندازهٔ نمونه
تورو و همکاران، ۲۰۰۱ [٤۲]	نمونه‌هایی از سنگ آهک به قطر ٤۵ تا ۸۰ میلی‌متر	هیچ روند افزایش یا کاهش بارزی مشاهده نشد
کادلیسیک و مودری، ۲۰۰۲ [٤۳]	نمونه‌هایی به قطر ۵۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر از بتن	کاهش تدریجی مقاومت کششی و ضریب تغییرات نتایج
یو و همکاران، ۲۰۰٦ [٤٤]	نمونه‌های گرانودیوریت با قطر ٤۹ میلی‌متر و نسبت ضخامت به قطر ۰/٤۵ تا ۱/۲۳ و هم‌چنین مدل‌سازی عددی سه بعدی المان محدود	با افزایش نسبت ضخامت به قطر، مقاومت کششی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

جدول ۱. مروری بر تحقیقات پیشین تأثیر اندازه نمونه بر مقاومت کششی

محققان و سال تحقیق	مشخصات تحقیق و نمونه‌های آزمایشگاهی	نتیجه تحقیق
صاحب و همکاران، ۲۰۱۱ [٤٥]	انجام آزمون‌های برزیلی آزمایشگاهی و عددی	روند کاهشی در مقاومت کششی در نمونه‌های با قطر بیش از ۷۵ میلی‌متر
تولایی و ورورت، ۲۰۱۳ [٤٦]	نمونه‌های ماسه‌سنگ لایه‌دار مختلف با قطر ۳۰ تا ۱۱۵ میلی‌متر	تأثیر بارزی بر مکانیزم شکست و مقاومت مشاهده نشد.
آلنا و کلوزل، ۲۰۱٤ [٤٧]	نمونه‌های کورتیکال استخوان با قطر ٤ تا ۱۰ میلی‌متر	کاهش مقاومت کششی با افزایش اندازه
کاکلیس و همکاران، ۲۰۱۵ [٤٨]	آزمون کششی غیرمستقیم برزیلی را بر روی دو نمونه سنگ ساختمانی آلفاس و پرولیتوس به قطرهای ٥٤، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر	نمونه‌های پرولیتوس کاهش مقاومت با افزایش قطر را نشان داد، در حالی‌که هیچ روند خاصی در نمونه‌های آلفاس مشاهده نشد.
لین و همکاران، ۲۰۱٦ [٤۹]	بررسی نسبت قطر به ضخامت نمونه‌ها، با استفاده از نرم افزار FLAC3D	نسبت قطر به ضخامت نمونه‌ها، پارامتری مؤثر است و این پارامتر بایستی بین ۰/٥ تا ۰/۸ انتخاب شود.
سبیح و همکاران، ۲۰۱٦ [٥۰]	بررسی تأثیر قطر نمونه بر مقاومت کششی برزیلی را با استفاده از نرم افزار ABAQUS	با افزایش قطر نمونه تا قطری خاص، مقاومت کششی کاهش و پس از آن افزایش می‌یابد.
خسروی و همکاران، ۲۰۱۷ [٥۰]	بررسی تأثیر نسبت طول به قطر ۰/۲ تا ۱/٥ دیسک‌های برزیلی گابرو، میکروگابرو و بازالت روی مکانیزم شکست و زبری سطح گسیختگی	با افزایش نسبت طول به قطر در نمونه‌های گابرو و میکروگابرو زبری سطح کاهش یافت، درصورتی‌که در نمونه بازالت مقداری افزایش نشان داد.
لی، ۲۰۱۷ [٥۲]	سنگ‌های آبرفتی مالان با قطر ٤۰ تا ۸۰ میلی‌متر	افزایش قطر نمونه تأثیری بر مقاومت کششی نداشت.

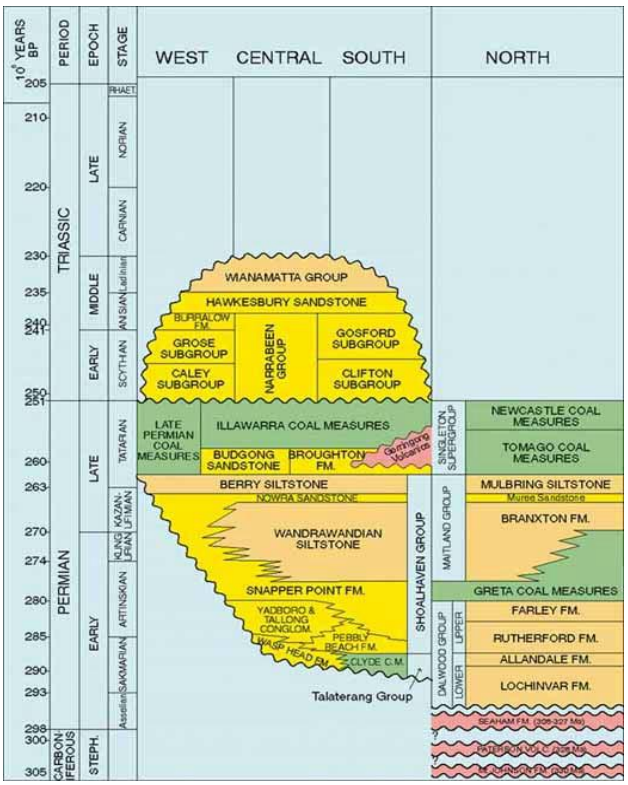
روش تحقیق

در این تحقیق، از نمونه‌های ماسه‌سنگ هوکزبری[11] استفاده شد. این ماسه‌سنگ، سنگ بستر شهر سیدنی استرالیا را تشکیل می‌دهد و سازه‌های مختلف عمرانی و معدنی در داخل یا روی آن ایجاد شده است. این سنگ از رسوبات دورهٔ تریاسه در حوضهٔ آبرفتی ساحل شرقی سیدنی، در ایالت نیوساوت ولز استرالیا است. ساختار چینه‌شناسی حوضهٔ رسوبی سیدنی در شکل ۱ نشان داده شده است. برای انجام آزمایش‌های برزیلی در قطرهای مختلف، بلوک‌هایی مکعب مستطیلی به‌طول ٦۰۰ میلی‌متر و عرض و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر از معدن کواری گاسفورد[12] از بخش سامرزبای[13] ایالت نیوساوت ولز استرالیا تهیه شد. در انتخاب نمونه‌ها سعی شد که تا حد امکان هموژن بوده، به‌گونه‌ای که فاقد نقصان‌های سنگی بزرگ مقیاس و

11. Hawkesbury Sandstone
12. Gosford
13. Somersby

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

هم‌چنین دارای رنگی یک‌نواخت باشند. بر اساس آنالیز سرندی انجام شده بر اساس استاندارد ASTM، ماکسیمم اندازه دانه ۰/۵ میلی‌متر تخمین زده شد. هم‌چنین آنالیز XRD انجام شده نشان داد که ۸۶ درصد از این ماسه‌سنگ از کوارتز (Sio_2)، ۷ درصد ایلیت ($Al_2H_2K_{0.7}O_{12}Si_4$)، ۶ درصد کائولینیت ($H_4Al_2O_9Si_2$) و ۱ درصد آناتاز (Tio_2) است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های ماسه‌سنگ در جدول ۲ خلاصه شده است. لازم به ذکر است که خواص مقاومتی سنگ بکر از طریق آزمایش‌های فشاری تک محوره و سه محوره برای نمونه‌هایی با قطر ۵۰ میلی‌متر تعیین شده‌اند.



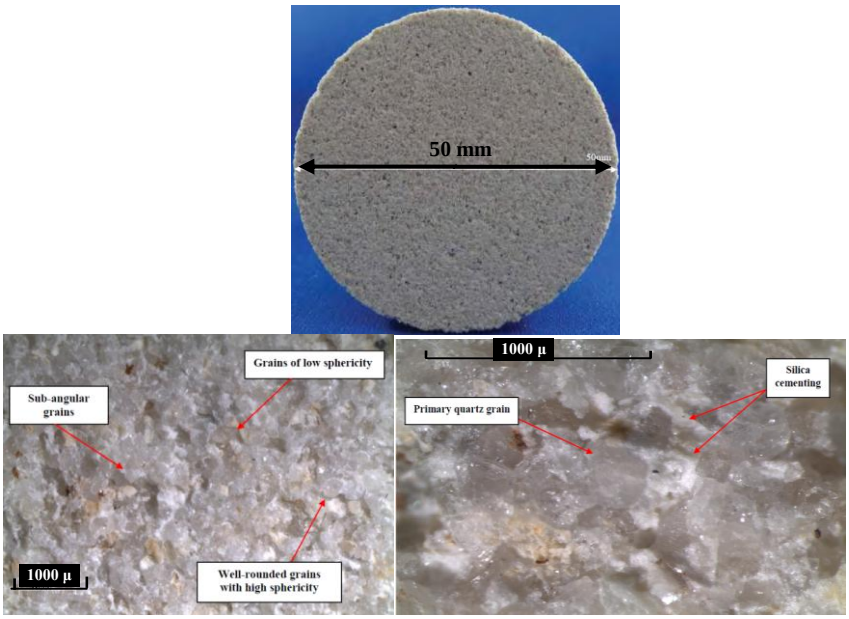
شکل ۲.جدول چینه‌شناسی حوضه رسوبی سیدنی [۵۳]

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌سنگ هوکزبری

دانسیته (kg/m^3)	تخلخل (٪)	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)	مدول الاستیسیته تانزانتی (GPa)	ضریب پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویهٔ اصطکاک (درجه)
۲۱۰۲	٤/٤	٥١/٨٦	١٤/٢٩	٠/٢٥	١٠/٥	٤٧

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

آنـالیز میکرسـکوپی نمونـه‌هـای ماسـه‌سـنگ بـا اسـتفاده از میکرسـکوپ Leica M205C binocular و دوربین دیجیتال Leica DFC290 انجام گرفت. میکرسکوپ مـذکور دارای توانـایی بزرگ‌نمایی ۳۲۰ برابر با ۵۲۵۱ پیکسل بر میلـی‌متـر وضـوح اسـت. مقطعـی از نمونـه بـا قطـر ۵۰ میلی‌متر در شکل ۳ الف نشان داده شده است. آنالیز میکرسکوپی نشان داد که دانه‌های کواتز اولیـه دارای اندازه بین ۲۵۰ تا ۵۰۰ میکرون است و می‌توان آن‌ها را دانه‌ریز تا دانـه درشـت طبقـه‌بنـدی کرد. دانه‌های کوارتز چنان‌که در شـکل ۳ ب نشـان داده شـده، نوعـاً دارای گردشـدگی خـوب تـا تقریباً زاویه‌دار هستند. کانی‌زایی ثانویه بین ذرات اولیه کوارتز وجود دارد که کـانی‌هـا اولیـه را بـه یک‌دیگر سیمانه کرده است. در شکل ۳ ج سیمان‌شدگی سیلیکاته بین ذرات نشان داده شده است.



شکل ۳. الف) مقطعی از نمونه تهیه شده به قطر ۵۰ میلی‌متر، ب) نمایش توزیع و شکل دانه‌های اولیه کوارتز با مقیاس ۱۰۰۰ میکرون و ج) سیمان‌شدگی سیلیکاته دانه‌های اولیه با مقیاس ۱۰۰۰ میکرون

مراحل تهیه نمونه برای انجام آزمون‌هـای برزیلـی در شـکل ٤ نشـان داده شـده اسـت. از بلوک‌های ارسالی از معـدن، بـا اسـتفاده از دسـتگاه مغـزه‌گیـر هـافکو RD900[14]، نمونـه‌هـایی استوانه‌ای به قطر ۱۹، ۲۵، ۳۸، ۵۰، ٦٦، ۹٦، ۱۱۸ و ۱٤۵ میلی‌متر تهیه شد. بر اساس اسـتاندارد

14. Metalmaster drilling machine RD-900 Hafco

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

ASTM، نسبت ضخامت به قطر نمونه‌های برزیلی بین ۰/۲ تا ۰/۷۵ پیشنهاد شده است [۱٦]. بنا براین، نمونه‌ها با نسبت ضخامت به قطر ۰/۵ بریده شدند و با استفاده از هدایت‌گر دستگاه برش، از عمود بودن سطوح برش بر محور نمونه اطمینان حاصل شد. بر اساس استاندارد ISRM، برای هر اندازه قطر، تعداد ۵ نمونه تهیه شد و نمونه‌ها به‌مدت ۲٤ ساعت در خشک‌کن تحت دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد خشک شدند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه MTS 815 انجام شدند. این دستگاه دارای ظرفیت باربری ۱٦۰۰ کیلونیوتن بوده و خودکنترل[۱۵] است. با توجه به کم بودن مقدار بار اعمالی در لحظه شکست نمونه‌ها، از بارسنجی[۱٦] خاص استفاده شد که دارای ظرفیت نهایی ۵۰ کیلونیوتن است و تغییرات بار را با دقت صدم کیلونیوتن ثبت می‌کرد. بارگذاری به‌وسیلهٔ صفحات بارگذاری در راستای قطر نمونه بر اساس استاندارد ASTM به‌گونه‌ای اعمال شد که نمونه در فاصلهٔ زمانی بین ۱ تا ۱۰ دقیقه شکسته و مقدار بار اعمالی و جابه‌جایی صفحات در فاصله زمانی نیم ثانیه ثبت شد.

الف ب ج

شکل ٤. مراحل تهیه نمونه‌های آزمایش برزیلی؛ الف) مغزه‌گیری ب) تهیه نمونه‌هایی استوانه‌ای با قطرهای مختلف و ج) برش نمونه‌ها با نسبت ضخامت به قطر مشخص

نتایج و بحث

آزمایش‌های برزیلی بر نمونه‌های دیسکی شکل، چنان‌که در بخش ۳ توضیح داده شد، انجام شد و مقادیر بار اعمالی و جابه‌جایی بین دو فک با دستگاه MTS 815 ثبت شد. مقدار

15. Servo-Control
16. Load Cell

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

ماکزیمم بار اعمالی از این گراف‌ها استخراج و بر اساس رابطهٔ (۱) مقاومت کششی محاسبه شد. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است. مقدار ضریب تغییرات که برابر با نسبت انحراف معیار به مقدار متوسط است، در تمامی آزمایش‌ها کم‌تر از ۱۵٪ است، که نشان‌دهندهٔ پراکندگی کم نتایج و نزدیکی مقادیر آزمایش‌های هر قطر به مقدار متوسط آن است.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های برزیلی بر نمونه‌هایی با قطرهای مختلف

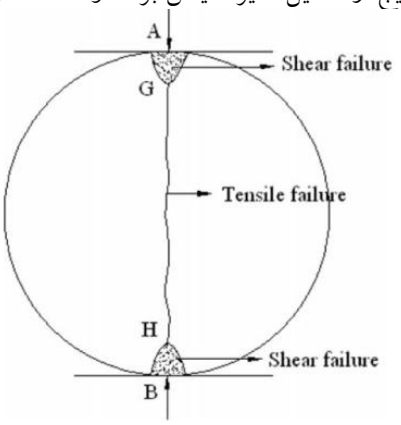
قطر نمونه (mm)	مقاومت کششی متوسط (MPa)	انحراف معیار	ضریب تغیرات (٪)
۱۹	۳/٤۰	۰/٤۱	۱۲/۰۸
۲۵	۳/۷۵	۰/٤۳	۱۱/۳۵
۳۸	۳/۱۵	۰/۲٦	۸/۱٦
۵۰	۳/۰۹	۰/۱۳	٤/۳۳
٦٦	۲/۸۳	۰/۳۸	۱۳/۵۲
۹٦	۲/٤۷	۰/۱۹	۷/۵٤
۱۱۸	۲/٤۷	۰/۲۵	۹/۹۸
۱٤۵	۳/٤۳	۰/۱۳	۳/۹۲

یکی از مسائلی که در تفسیر نتایج آزمایش برزیلی باید به‌آن توجه شود، مکانیسم شکست نمونه‌ها است که به‌نحوی اعتبار نتایج را مشخص می‌کند. در آزمایش برزیلی فرض بر آن است که ترک کششی در مرکز نمونه آغاز شده و گسترش می‌یابد. چنان‌که در شکل ۵ نشان داده شده، در صورتی که زون برشی در محل اتصال صفحه بارگذاری و نمونه تشکیل شود، انتقالی بین مکانیسم شکست برشی و شکست کششی وجود دارد. ترکی که به‌صورت قائم در مرکز نمونه و به‌صورت منفرد (خط GH در شکل ۵) تشکیل می‌شود، معرف مکانیسم شکست کششی است. اما درصورت وجود زون برشی یا گسترش چند ترک در محل اتصال نمونه با صفحه بارگذاری، قضاوت در مورد این‌که مکانیسم شکست کششی است و ترک از مرکز نمونه ایجاد شده و تا سطح نمونه گسترش یافته است، مشکل‌ساز بوده است و نتایج قابل اعتماد نیست [۱٤]، [۵۲].

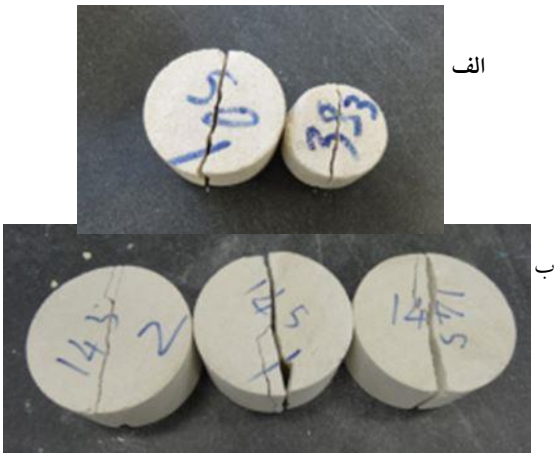
در ادامه مکانیسم شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمایش بررسی شد. مقایسه‌ای بین

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

مکانیسم شکست نمونه‌های با قطر ۱٤٥ میلی‌متر و سایر نمونه‌ها در شکل ٦ آورده شده است. در تمامی نمونه‌ها به استثناء قطر ۱٤٥ میلی‌متر، ترکی قائم در راستای محور بارگذاری تشکیل شده، در حالی‌که برای تمامی نمونه‌های با قطر ۱٤٥ میلی‌متر ابتدا ترک‌هایی در زیر صفحه بارگذاری تشکیل شده و با گسترش این ترک‌ها نمونه‌ها گسیخته می‌شوند. بنا براین، با توجه به این‌که مکانیسم شکست نمونه‌های با قطر ۱٤٥ میلی‌متر ایجاد ترک در مرکز نمونه و گسترش آن‌ها نیست، این نتایج از تحلیل تأثیر مقیاس بر مقاومت کششی حذف شدند.



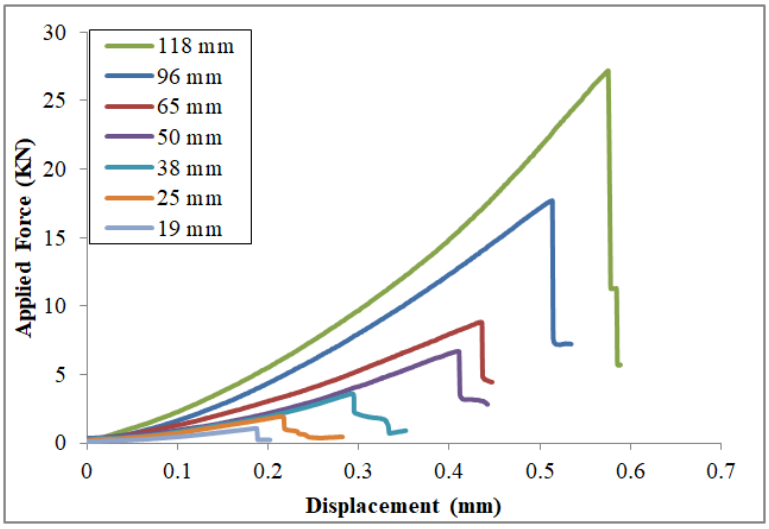
شکل ٥. مکانیسم شکستی در آزمایش برزیلی که حالت انتقال بین کشش و برش وجود دارد [۱٤]



شکل ٦. بررسی مکانیسم شکست نمونه‌ها در آزمایش برزیلی الف) نمونه‌های با قطر ۱٤٥ میلی‌متر و ب) دو نمونه با قطرهای ۳۸ و ٥۰ میلی‌متری

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

منحنی نیرو- جابه‌جایی برای نمونه‌ها با قطرهای مختلف در شکل ۷ آورده شده است. مطابق با شکل ۵، با افزایش قطر نمونه، شیب منحنی نیرو- جابه‌جایی که معرف صلبیت سیستم در آزمایش برزیلی است، افزایش یافته است. نتایج بررسی تأثیر قطر نمونه بر مقاومت کششی در شکل ۸ آورده شده است. بر اساس این نتایج، روندی کاهشی در مقاومت کششی با افزایش قطر نمونه مشاهده می‌شود. در نمونه‌های کوچک‌تر این کاهش بارزتر است و برای نمونه‌ها بزرگ‌تر از ۹٦ میلی‌متر مقاومت به‌سمت مقدار واحدی میل می‌کند. هم‌چنین مقایسهٔ نتایج تأثیر قطر بر مقاومت نرمالیزه شده نسبت به قطر ۵۰ میلی‌متر در شکل ۹ آورده شده است. این بررسی نشان می‌دهد در قطرهای بزرگ‌تر از ۹٦ میلی‌متر، مقاومت حدود ۲۰ درصد نسبت به قطر استاندارد آزمایشگاهی کاهش می‌یابد. روند کاهشی مقاومت کششی با افزایش قطر همان‌طورکه در جدول ۳ نیز اشاره شد، با پژوهش‌های بازانت [۲۷]، کارپینتری و فرو [۳۱]، رکو و همکاران [٤۰]، [٤۱] و کادلیچک و مودری [٤۳] هم‌خوانی دارد.



شکل ۷. منحنی نیرو- جابه‌جایی برای نمونه‌ها با قطرهای مختلف

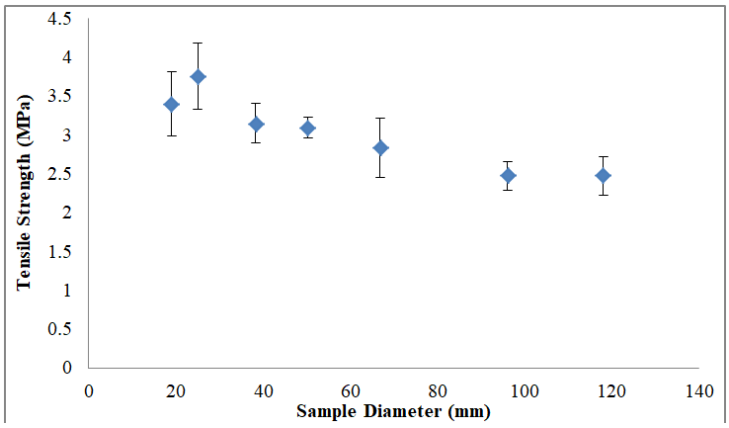
از آن‌جاکه مقاومت کششی پارامتری بسیار مهم در طراحی سازه‌های سنگی است، ارائه رابطه‌ای که بتواند تأثیر اندازه بر مقاومت کششی را ارائه دهد، می‌تواند برای مهندسان زمین‌شناس بسیار مفید باشد. رابطه‌ای که به‌طور گسترده برای بررسی تأثیر اندازه بر مقاومت

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

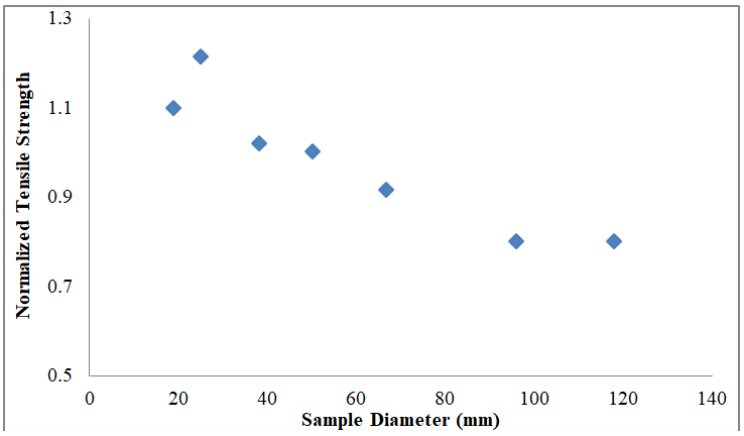
فشاری تک محوره استفاده می‌شود، رابطهٔ هوک و براون [۵۵] است. این رابطه بر اساس مدل آماری ویبال گسترش یافته و شکل کلی آن به‌صورت رابطهٔ (۵) است:

$$\sigma_c = \sigma_{c50}(50/d)^k \tag{۵}$$

که در این رابطه σ_c و σ_{c50} مقاومت فشاری تک محوره نمونه‌هایی با قطر مورد نظر d و قطر ۵۰ میلی‌متر هستند. k ثابت هوک و بروان است که بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی چندین نوع سنگ، مقدار ۰/۱۸ پیشنهاد داده شده است.



شکل ۸. مقایسهٔ نتایج آزمون‌های برزیلی در قطرهای مختلف



شکل ۹. تأثیر قطر نمونه بر مقاومت کششی نرمالیزه شده نسبت به قطر ۵۰ میلی‌متر

در این تحقیق، سعی شد رابطه‌ای مشابه مدل هوک و براون ارائه و ثابت هوک و براون

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

تعیین شود. برای این منظور از آنالیز رگرسیون غیرخطی و نـرم‌افـزار Datafit ورژن ۹ اسـتفاده گردید. رابطهٔ پیشنهادی بدین‌صورت است:

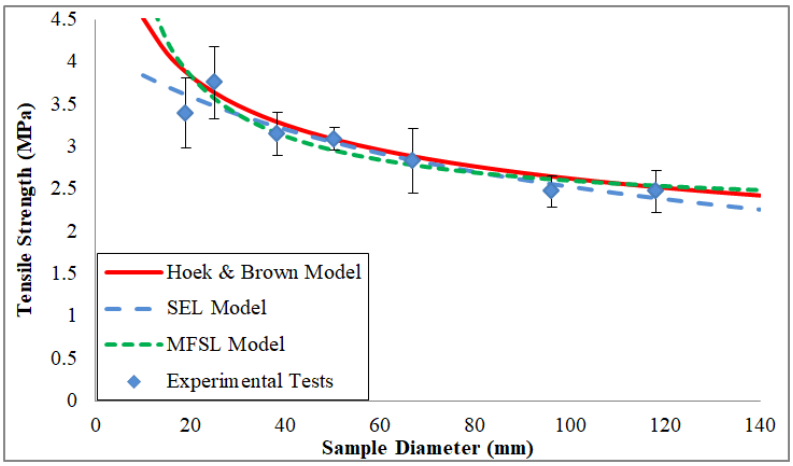
$$\sigma_t = \sigma_{t50}(50/d)^{0.236} \qquad R^2 = 0.835 \qquad (٦)$$

هم‌چنین از مدل‌های SEL و MFSL که به‌ترتیب بر مبنای مدل‌های تأثیر مقیاس انرژی شکست و قانون تأثیر مقیاس چند فراکتال هستند، استفاده شد. روابط پیشنهادی بر اساس آنالیز رگرسیون غیرخطی به‌صورت (۷) و (۸) است:

$$\sigma_t = \frac{4.19}{\sqrt{1+(d/58.46)}} \qquad R^2 = 0.928 \qquad (۷)$$

$$\sigma_t = 2.18\sqrt{1+(42.09/d)} \qquad R^2 = 0.795 \qquad (۸)$$

مقایسه‌ای بین نتایج مدل‌های پیشنهادی و نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی در شکل ۱۰ آورده شده است. با توجه به ضریب هم‌بستگی بالاتر به‌دست آمده در روش SEL، این روش تخمین مناسب‌تری از مقاومت کششی برای قطرهای مختلف ارائه می‌دهد.



شکل ۱۰. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های هوک و براون، SEL و MFSL

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر اندازه نمونه بر مقاومـت کششـی برزیلـی بررسـی شـد. مـروری بـر

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر ابعاد نمونه بر مقاومت کششی نشان داد که بررسی‌ها روی مواد سنگی بسیار محدود است و اکثراً روی بتن انجام شده‌اند. هم‌چنین اکثر این آزمایش‌ها روی دامنهٔ کوچکی از قطرها صورت گرفته است. تعدادی از این بررسی‌ها کاهش مقاومت با افزایش قطر نمونه را نشان می‌دهند، درحالی‌که تعدادی دیگر نبود تأثیر مقیاس و یا افزایش مقاومت را نشان می‌دهند. هم‌چنین رابطه‌ای که بتواند تأثیر اندازهٔ نمونه بر مقاومت کششی را تخمین زده و دارای مقبولیت عمومی باشد، موجود نیست. برای حل این مشکل، نمونه‌های دیسکی شکل از ماسه‌سنگ با قطرهای ۱۹، ۲۵، ۳۸،۵۰، ٦٦، ۹٦، ۱۱۸ و ۱٤٥ میلی‌متر تهیه شد و نمونه‌ها تحت آزمایش برزیلی قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش قطر نمونه مقاومت کششی کاهش می‌یابد و در قطرهای بیش از ۹٦ میلی‌متر، مقاومت به‌سمت مقدار واحدی میل می‌کند. با استفاده از آنالیز رگرسیون غیرخطی، روابطی بر اساس مدل‌های تأثیر مقیاس هوک و براون، انرژی شکست SEL و مدل چندفراکتال MFSL ارائه شد و مشخص شد که مدل SEL تخمین بهتری از مقاومت کششی در قطرهای مختلف ارائه می‌دهد. هم‌چنین نتایج آزمایش‌ها برزیلی نشان داد که با افزایش قطر نمونه، صلبیت نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه این تحقیق توصیه می‌شود که بررسی‌های ذکر شده، بر روی انواع دیگری از سنگ‌ها با شرایط زمین‌شناسی مختلف انجام گیرد تا بتوان رابطه‌ای جامع‌تر و عمومیت یافته‌تر برای محدودهٔ گسترده‌تری از سنگ‌ها ارائه کرد.

تشکر و قدردانی

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

منابع

1. Levin M., "Determination of rock mass properties by in situ tests in the Gilboa pumped storage project", Vietrock2015, 12-13 March 2015, Hanoi, Vietnam (2015) S041.
2. Palmström A., Singh R., "The deformation modulus of rock masses-

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

comparisons between in situ tests and indirect estimates", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 16 (3) (2001) 115-131.

3. Cundall P. A., Pierce M. E., Mas Ivars D., "Quantifying the size effect of rock mass strength", SHIRMS 2008, Australian Centre for Geomechanics Perth, Western Australia, vol. 2 (2008) 3-15.
4. Mas Ivars D., Pierce M. E., Darcel C., Reyes-Montes J., Potyondy D. O., Young R. P., Cundall P. A., "The synthetic rock mass approach for jointed rock mass modeling", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, vol. 48(2) (2011) 219-244.
5. Esmaieli K., Hadjigeorgiou J., Grenon, M., "Estimating geometrical and mechanical REV based on synthetic rock mass models at Brunswick Mine", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 47 (6) (2010) 915-926.
6. Wang P., Yang T., Xu T., Cai M., Li C., "Numerical analysis on scale effect of elasticity, strength and failure patterns of jointed rock masses", Geosciences Journal, vol. 20(4) (2016) 539-549.
7. Yoshinaka R., Osada M., Park H., Sasaki T., Sasaki K., "Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect", Engineering Geology, vol. 96 (2008) 173-186
8. Bahaaddini M., Hagan P. C., Mitra R., Hebblewhite B. K., "Scale effect on the shear behaviour of rock joints based on a numerical study", Engineering Geology, vol. 181 (2014) 212-23.
9. Darlington W. J., Ranjith P. G., "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, vol. 44 (2011) 513-529.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

10. Masoumi M., "Investigation into the mechanical behaviour of intact rock at different sizes", PhD thesis, UNSW Australia (2013).
11. Roshan H., Masoumi H., Hagan P.C., "On size-dependent uniaxial compressive strength of sedimentary rocks in reservoir geomechanics", ARMA 2016, Houston, Texas (2016).
12. Carneiro F.L.L.B., "A new method to determine the tensile strength of concrete", Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules (Associac¸a˜o Brasileire de Normas Te´cnicas ABNT), 3d. Section (1943).
13. Akazawa T., "New test method for evaluating internal stress due to compression of concrete: the splitting tension test", Journal of Japan Society if Civil Engineers, vol. 29 (1943) 777-787.
14. Li D., Wong L.N.Y., "The brazilian disc test for rock mechanics applications: review and new insights", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 46 (2013) 269-287.
15. Briševac Z., Kujundžić T., Čajić S., "Current cognition of rock tensile strength testing by brazilian test", The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin (2015) 101-114.
16. ASTM, "Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens: ASTM D 3967", ASTM International, United States (2008).
17. Ulusay R., Hudson J. A., "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006", International Society of Rock Mechanics. Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group (2007).
18. Weibull W., "A statistical theory of the strength of materials", Proceeding

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

of Royal Swedish Academy of Engineering Science, Stockholm, Sweden, (1939) 1-45.

19. Bazant Z. P., "Scaling of quasibrittle fracture: asymptotic analysis", International Journal of Fracture, vol. 83 (1997) 19-40.
20. Bazant Z.P., Xi Y., "Statistical size effect in quasi-brittle structures: II. Nonlocal theory", Journal of Engineering Mechanics, vol. 117 (11) (1991) Paper No. 26347.
21. Van Vliet M. R. A., Van Mier J. G.M., "Experimental investigation of size effect in concrete and sandstone under uniaxial tension", Engineering Fracture Mechanics, vol. 65 (2000) 165-188.
22. Wong T. F., Wong R. H. C., Chau K. T., Tang C. A., "Microcrack statistics, Weibull distribution and micromechanical modeling of compressive failure in rock", Mechanics of Materials, vpl. 28 (2006) 664-681.
23. Zhang Q., Zhu H., Zhang L., Ding X., "Study of scale effect on intact rock strength using particle flow modeling", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 48 (2011) 1320-1328.
24. Griffith A. A., "The Theory of Rupture", In proceeding of 1st International Congress of Applied Mechanics, Delf, Netherlands (1924).
25. Hudson J. A., Crouch S. L., Fairhurst C., "Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure", Engineering Geology, vol. 6 (1972) 155-189.
26. Abou-Sayed A. S., Brechtel C. E., Terra T. I., "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, Utah, USA (1976) ARMA-76-0527.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

27. Bazant Z. P., Kazemi M. T., Hasegawa T., "Size effect in brazilian splitcylinder tests: measurements and fracture analysis", ACI Material Journal, vol. 88 (1991) 325-332.
28. Carpinteri A., "Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties", Mechanics of Materials, vol. 18, (1994) 89-101.
29. Borodich F. M., "Fractals and fractal scaling in fracture mechanics", International Journal of Fracture, vol. 95 (1999) 239-259.
30. Carpinteri A., Chiaia B., Ferro G., "Size effects on nominal tensile strength of concrete structures: multifractality of material ligaments and dimensional transition from order to disorder", Materials and Structures, vol. 28 (1995) 311-317.
31. Carpinteri A., Ferro G., "Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure", Materials and Structures, vol. 27(10), (1994) 563-571.
32. Hondros G., "The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete", Australian Journal of Applied Science, vol. 10(3) (1959) 243-268.
33. Lundborg N., "The strength-size relation of granite", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 4 (1967) 269-272.
34. Wijk G., Rehbinder G., Logdstrom G., "Relation between the uniaxial tensile strength and the sample size for Bohus granite", Rock Mechanics vol. 10 (1978) 201-219.
35. Sabnis G. M., Mirza S. M., "Size effects in model concretes?", Journal of Structural Division, ASCE 105 (ST6) (1979) 1007-1020.

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

36. Chen W. F., Yuan R. L., "Tensile strength of concrete: the double punch tests", Journal of the Structural Division, ASCE 106 (ST8) (1980) 1673-1693.

37. Hasegawa T., Shioya T., Okada T., "Size effect on splitting tensile strength of concrete", Proceedings Japan Concrete Institute 7th Conference, June 1985 (1985) 309-312.

38. Newman D. A., Bennett D. G., "The effect of specimen size and stress rate for the Brazilian test-a statistical analysis", Rock Mechanics and Rock Engineering, vol. 23 (2) (1990) 123-134.

39. Guinea G. V., Elices M., Planas J., "Assessment of the tensile strength through size effect curves", Journal of Engineering Fracture Mechanics, vol. 65 (2000) 189-207.

40. Rocco C., Guinea G. V., Planas J., Elices M., "Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: experimental verification", Materials and Structures, vol. 32 (1999) 210-217.

41. Rocco C., Guinea G. V., Planas J., Elices M., "Review of the splitting-test standards from a fracture mechanics point of view", Cement and Concrete Research, vol. 31 (2001) 73-82.

42. Thuro K., Plinninger R. J., Zah S., Schutz S., "Scale effects in rock strength properties. Part 1: Unconfined compressive test and Brazilian test", ISRM regional symposium, EUROCK 2001, Finland, (2001) 169-174.

43. Kadlecek V., Modry S., "Size effect of test specimens on tensile splitting strength of concrete: general relation", Journal of Materials and structures, vol. 35, (2002) 28-34.

44. YuY., Yin J., Zhong Z., "Shape effects in the Brazilian tensile strength

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

test and a 3D FEM correction", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol.43(4) (2006) 623-627.

45. Es-Saheb M. H., Albedah A., Benyahia F., "Diametral compression test: validation using finite element analysis", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 57 (5-8) (2011) 501-509.
46. Tavallali A., Vervoort A., "Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: Layer orientation and shape effects", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering vol.5, (2013) 366-377.
47. Allena R. Cluzel C., "Identification of anisotropic tensile strength of cortical bone using Brazilian test", Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials vol.38 (2014) 134-142.
48. Kaklis K. N., Maurigiannakis S. P., Agioutantis Z. G., Stathogianni F. K., Steiakakis E. K., "Experimental investigation of the size effect on the mechanical properties on two natural building stones", 8th GRACM International Congress on Computational Mechanics, 12-15 July 2015, Volos, Greece (2015).
49. Lin H., Xiong W., Yan Q., "Three-dimensional effect of tensile strength in the standard Brazilian test considering contact length", Geotechnical Testing Journal, vol. 39(1) (2016) 137-143.
50. Sabih G., Paneru L. P., Tarefder R. A., "Simulation of the Brazilian test on concrete discs to verify the size effect law", Geo-China 2016 (2016) 18-25.
51. Khosravi A., Simon R., Rivard P., "The shape effect on the morphology of the fracture surface induced by the Brazilian test", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences vol. 93 (2017) 201-209.
52. Li, Y., "A review of shear and tensile strengths of the Malan Loess in

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]

China", Engineering Geology, (2017) doi: 10.1016/j., enggeo (2017) 02.023.

53. Sharrock G. B., Akram M. S., Mitra R., "Application of synthetic rock mass modeling to estimate the strength of jointed sandstone", 43rd U.S. Rock Mechanics Symposium & 4th U.S. - Canada Rock Mechanics Symposium, Asheville, North Carolina (2009).
54. Hobbs D. W., "The tensile strength of rocks, International Journal of Rock Mechanics", Mining Sciences and Geomechanical Abstracts, vol. 1(3) (1964) 385-396.
55. Hoek E., Brown E., "Underground excavations in rock", Hertford, London (1980).

[Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-04-26]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.5.8]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.319]