

مطالعه‌ی آزمایشگاهی اثر حرارت و اثر اندازه در مقاومت فشاری سنگ گرانیت

جواد نامداریان (کارشناس ارشد)

محمود یزدانی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰ (دردی ۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۱۴۷-۱۵۵، یادداشت شنی)

اکتشاف و استخراج منابع هیدروکربنی (نفت و گاز) و همچنین انرژی زمین‌گرمایی در اعماق زیاد لایه‌های سنگی، چالش‌هایی را برای پایداری دیواره‌ی چاه حفاری در دماهای بالا به وجود آورده است. از طرفی دفن زباله‌های هسته‌یی در اعماق زمین منجر به افزایش طولانی‌مدت دما در سنگ‌های اطراف می‌شود و خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین درک اثر دما در خصوصیات مکانیکی سنگ، اهمیت زیادی دارد. هدف مطالعه‌ی حاضر، بررسی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ گرانیت تحت حرارت است. بدین منظور نمونه‌های استوانه‌یی شکل با نسبت ارتفاع به قطر ۲ و با قطرهای ۲۸، ۵۴ و ۸۴ میلی‌متر تهیه و در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درجه‌ی حرارت، مقاومت فشاری تک‌محوره کاهش یافته است. مقدار کاهش مقاومت در دمای ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای قطر ۲۸ میلی‌متر برابر ۴۷٪، برای قطر ۵۴ میلی‌متر برابر ۵۳٪ و برای قطر ۸۴ میلی‌متر برابر ۵۶٪ به دست آمده است. همچنین در دمای ثابت، با افزایش قطر نمونه، مقاومت فشاری کاهش یافته است.

Javadnamdarian@modares.ac.ir
myazdani@modares.ac.ir

واژگان کلیدی: اثر حرارت، اثر اندازه، مقاومت فشاری تک‌محوری، گرانیت.

۱. مقدمه

لذا اکتشاف منابع زمین‌گرمایی، چالش‌های جدیدی را برای مهندسان و زمین‌شناسان به منظور مقابله با مشکلات مهندسی در دماهای بالا به وجود آورده است.^[۱] از دیگر موارد تأثیر حرارت می‌توان به حفاری‌های مکانیکی سنگ اشاره کرد، که دمای ناحیه‌ی حفاری تا $1000^{\circ}C$ نیز می‌رسد.^[۲] بنابراین بررسی رفتار مکانیکی سنگ‌ها تحت عملیات حرارتی، اهمیت زیادی دارد. مطالعات زیادی در مورد اثر حرارت در خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها صورت گرفته است. لیانگ^۱ و همکاران (۲۰۰۶) به صورت آزمایشگاهی اثر حرارت در خواص مکانیکی سنگ نمک را در محدوده‌ی دمایی 20° الی $240^{\circ}C$ درجه‌ی سانتی‌گراد بررسی کردند و دریافتند که مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش محوری با افزایش دما افزایش می‌یابد.^[۳] تیان^۲ و همکاران (۲۰۱۴)، رفتار مکانیکی رس سنگ را با استفاده از آزمایش تک‌محوری و سه‌محوری تحت اثر حرارت تا دمای $1000^{\circ}C$ مطالعه کردند و نمونه‌ها را به مدت ۲ ساعت در داخل کوره در دماهای مشخص و سپس در دمای اتاق قرار دادند تا سرد شوند و بعد بر روی آنها آزمایش انجام دادند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری نمونه‌ها در معرض عملیات حرارتی تا دمای $800^{\circ}C$ با افزایش دما افزایش یافته است، اما در دمای $1000^{\circ}C$ ، مقدار مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌هایی که در دمای اتاق قرار داشتند، کاهش یافته بود. انبساط حرارتی به عنوان عامل اصلی برای افزایش مقاومت در دماهای زیر $200^{\circ}C$ عنوان شده است. همچنین دلیل افزایش مقاومت تا دمای $800^{\circ}C$ تأثیر

سنگ‌ها عموماً ناهمگن و نقص‌هایی از قبیل مرزهای بین دانه‌یی، ریزترک‌ها و منافذ دارند.^[۱] سازه‌های سنگی بر اساس نوع کاربری خود تحت تأثیر مجموعه‌یی از بارهای استاتیکی و دینامیکی و شرایط محیطی مختلف قرار می‌گیرند. حرارت یکی از مهم‌ترین شرایط محیطی است که سنگ‌ها در معرض آن قرار می‌گیرند.^[۲] انبارهای دفن زباله‌های هسته‌یی اساساً گودال‌های زیرزمینی حفر شده برای قرار دادن زباله‌های دارای خاصیت رادیواکتیو هستند. زباله‌های هسته‌یی بعد از دفن، از خود گرما تولید می‌کنند و در درازمدت باعث افزایش دما در محدوده‌ی بین 100° تا $300^{\circ}C$ درجه‌ی سانتی‌گراد در سنگ‌های اطراف می‌شوند.^[۳] به علت اهمیت سوخت‌های فسیلی مخصوصاً نفت، چاه‌های عمیق نفت تا 8 کیلومتر حفاری می‌شوند. با توجه به افزایش دمای زمین به ازاء هر کیلومتر در حد $30^{\circ}C$ ، دمای ناحیه‌ی حفاری در چاه‌های عمیق نفت بعضاً به بیش از $250^{\circ}C$ می‌رسد.

امروزه استفاده از انرژی زمین‌گرمایی، که به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر شناخته می‌شود، به دلایل قابلیت اطمینان بالا، مزایای زیست‌محیطی و کمک به رشد و توسعه‌ی مناطق دور افتاده، در مقایسه با سایر منابع انرژی توصیه شده است.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۴/۳۰، اصلاحیه ۱۴۰۰/۲/۲۴، پذیرش ۱۴۰۰/۳/۲۳

DOI:10.24200/J30.2021.56040.2795

آثار پخت است، در حالی که گسیخته شدن قابل توجه باعث کاهش مقاومت در دمای 1000°C شده است.^[۷] لوک‌لروی^۳ و همکاران (۲۰۱۷)، اثر آسیب حرارتی را در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ گنایس^۴ بررسی کردند. نمونه‌ها تا دمای مشخص گرم و سپس تا دمای اتاق سرد شدند و آزمایش‌های فشاری تک‌محوری و کشش برزیلی بر روی نمونه‌های سرد شده انجام شد. نتایج نشان دادند که از 200°C الی 200°C درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی برزیلی با افزایش دما کاهش یافته است، که به علت آغاز ترک‌های حرارتی و ایجاد ریزترک‌های جدید و باز شدن ترک‌های از پیش موجود است. از 200°C تا 400°C درجه‌ی سانتی‌گراد مقاومت‌ها افزایش یافته است، که بررسی‌های میکروسکوپی نشان داده است که فراوانی کانی‌هایی مانند فلدسپار و پیروکسن و تغییرات فاز کانی‌شناسی باعث شده است که سنگ به جای رفتار شکننده از خود رفتار خمیری نشان دهد و در مقابل حرارت مقاومت و بر ترک‌خوردگی غلبه کند. از 400°C تا 900°C درجه‌ی سانتی‌گراد، شدت ترک‌ها بیشتر و منجر به کاهش سریع مقاومت شده است.^[۸] کشاورز و همکاران (۲۰۱۰)، آزمایش فشاری تک‌محوری را روی نمونه‌های گابرو که تا دمای 1000°C حرارت دیده بودند، انجام دادند. از دمای اتاق تا 600°C ، مقاومت با یک نرخ ثابت و کم کاهش یافت، که به علت شروع ریزترک‌ها و تفاوت در ضریب انبساط حرارتی کریستال‌ها بوده است. در دمای 600°C تا 700°C درجه‌ی سانتی‌گراد، کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری تک‌محوری صورت گرفته است، که اکسیداسیون برخی مواد باعث کاهش اخیر شده است. از 700°C تا 1000°C درجه‌ی سانتی‌گراد در یک نرخ ثابت مقاومت کاهش یافته است.^[۹]

رانجیث^۵ و همکاران (۲۰۱۲)، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری را بر روی ماسه‌سنگ Hawkesbury برای دماهای 25°C تا 950°C درجه‌ی سانتی‌گراد انجام دادند و دریافتند که برای دماهای کمتر از 500°C ، مقاومت فشاری تک‌محوری با افزایش دما افزایش و برای دماهای بالاتر از 500°C ، با افزایش دما کاهش یافته است.^[۱۰] ژو^۶ و همکاران (۲۰۰۸)، اثر حرارت را در خصوصیات مکانیکی یک نوع سنگ گرانیت با استفاده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری در محدوده‌ی دمایی 25°C تا 1200°C درجه‌ی سانتی‌گراد مطالعه کردند و دریافتند که تا دمای 800°C ، با افزایش دما خصوصیات مکانیکی فقط مقدار کمی تغییر کرده است، اما در دماهای بالاتر از 800°C ، با افزایش دما مقاومت فشاری تک‌محوری به طور قابل ملاحظه‌ی کاهش یافته است.^[۱۱] گائوتام^۷ و همکاران (۲۰۱۸)، اثر دمای بالا را در مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت کششی گرانیت Jalore، برای محدوده‌ی دمایی 25°C تا 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد بررسی کردند و در آن مقاومت فشاری و کششی تا دمای 300°C افزایش، اما بالاتر از آن به شدت کاهش یافته است. مشخص شده است که دمای 300°C ، دمای بحرانی برای گرانیت Jalore است، که بالاتر از آن، رفتار مکانیکی به شدت کاهش می‌یابد. محدوده‌ی 300°C تا 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد، ناحیه‌ی انتقال ترد - شکل‌پذیر است و جایی است که گسیختگی گرانیت پیچیده‌تر است. در محدوده‌ی اخیر، افزایش اصطکاک بین دانه‌ها و ضعیف‌شدگی پیوند میان دانه‌های گرانیت در حین تغییر شکل خمیری با افزایش دما قابل مشاهده است.^[۱۲] توبینگ بین^۸ و همکاران (۲۰۱۵)، تأثیر عملیات حرارتی تا دمای 850°C را در مقاومت کششی برزیلی گرانیت Laurentian با استفاده از آزمایش کشش برزیلی به صورت استاتیکی و دینامیکی انجام دادند و دریافتند که مقاومت کششی استاتیکی با افزایش دما کاهش می‌یابد، در حالی که مقاومت کششی دینامیکی با یک افزایش خطی در نرخ بارگذاری، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هنگامی که عملیات حرارتی از 850°C بالاتر می‌رود، انتقال فاز کوآرتز منجر به افزایش ریزترک‌ها به دلیل انبساط متفاوت بین دانه‌های کوآرتز و دیگر کانی‌ها می‌شود، که دلیل اصلی کاهش در

مقاومت کششی است.^[۱۳] بروتس^۹ و همکاران (۲۰۱۳)، تأثیر دما در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی یک سنگ متخلخل به نام کلکارنیت از منطقه‌ی سن جولیان را در محدوده‌ی دمایی 105°C الی 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد بررسی کردند و دریافتند که مقاومت فشاری تک‌محوری و پارامترهای کشسان (به عنوان مثال مدول کشسان و نسبت پواسون)، با افزایش دما برای دامنه‌ی آزمایش انجام شده کاهش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری تک‌محوره تا 35°C و 50°C درصد به ترتیب در نمونه‌های خنک شده با هوا و خنک شده با آب مشاهده می‌شود.^[۱۴]

هونگ تیان^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۷)، اثر دمای بالا تا 1000°C را در خصوصیات مکانیکی دیوریت بررسی کردند و دریافتند که مقدار مقاومت فشاری تک‌محوره تا دمای 400°C تغییرات کمی داشته است (کمتر از 1%)، اما بعد از آن با افزایش دما مقدار آن کاهش یافته است. براساس منحنی‌های تنش - کرنش به دست آمده، دمای بحرانی انتقال فاز شکننده به شکل‌پذیر دیوریت حدود 600°C بوده است.^[۱۵] یوان ژانگ^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۱)، خصوصیات مکانیکی گل سنگ را تحت اثر حرارت بررسی کردند و دریافتند که از 25°C تا 200°C درجه‌ی سانتی‌گراد، مقاومت گل سنگ به طور قابل توجهی افزایش و بعد از آن مقاومت سنگ به تدریج از 200°C تا 400°C درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. وقتی دما به 400°C می‌رسد، گل سنگ مذکور در نتیجه‌ی تجزیه‌ی کاتولینیت و انبساط حرارتی مواد معدنی باوری مقاوم می‌شود. بالاتر از 600°C ، ترک‌خوردگی حرارتی به تدریج آغاز می‌شود، که منجر به کاهش مقاومت می‌شود.^[۱۶]

در بیشتر مطالعات انجام شده، نمونه‌ها را به سطح دمایی از قبل تعیین شده رسانده و سپس آنها را تا دمای آزمایشگاه سرد و سپس در دمای آزمایشگاه آزمایش کرده‌اند. از آنجایی که سنگ‌ها در مخازن زمین‌گرمایی و انبارهای دفن زباله‌های هسته‌یی و چاه‌های عمیق نفت در شرایط گرمایی پیوسته و مداوم قرار دارند، این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های پیش گرم شده، ممکن است شرایط دمایی برجا را به طور دقیق باز تولید نکنند. علاوه بر این، زمانی که نمونه‌های سنگی پیش گرم شده تا دمای آزمایشگاه سرد می‌شوند، ریزساختارها تغییر می‌کند و ریزترک‌های غیرقابل برگشت ایجاد شده می‌توانند رخ دهند. بنابراین نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر روی نمونه‌های پیش گرم شده در دمای آزمایشگاه برای نشان دادن خصوصیات ضروری سنگ‌ها در دمای بالا چندان مناسب نیست. هدف از پژوهش حاضر این است زمانی که نمونه‌ها هم‌زمان تحت بارگذاری حرارتی قرار دارند، به صورت فشاری بارگذاری و مقاومت فشاری تک‌محوری آنها در دماهای مختلف به دست آورده شود.

۲. اثر اندازه

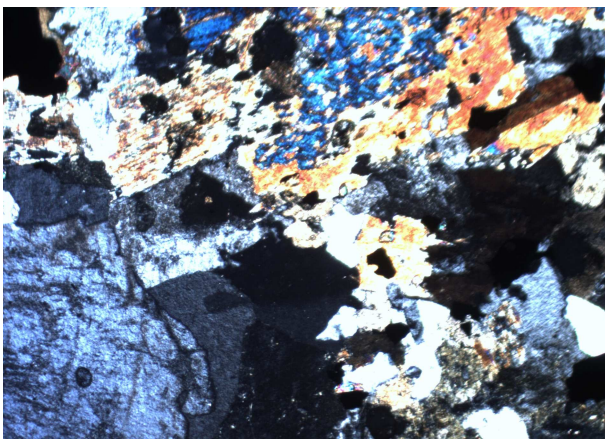
به طور کلی تغییر در خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها به وسیله‌ی اندازه‌ی نمونه، با عنوان اثر اندازه^{۱۲} شناخته می‌شود. یک توده سنگ از دو جزء سنگ بکر و ناپوستگی‌ها تشکیل شده است، که هر کدام اثر اندازه‌ی متفاوتی خواهند داشت.^[۱۷] در شکل ۱، یک مثال معمولی (نمودار) برای بیان وابستگی مقاومت فشاری سنگ بکر به اثر اندازه، که از نتایج آزمایشگاهی انواع مختلف سنگ جمع‌آوری شده است، مشاهده می‌شود.^[۱۸]

معادله‌ی نمودار اخیر از رابطه‌ی ۱ به دست آمده است:

$$\sigma_c = \sigma_{c,0} \left(\frac{d}{d_0} \right)^{-0.18} \quad (1)$$



شکل ۲. مغزه‌گیری از بلوک‌های سنگ با قطرهای مختلف.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپی مقطع نازک سنگ گرانیت خرمدره.

استفاده شد و مغزه‌هایی با قطر ۲۸، ۵۴ و ۸۴ میلی‌متر تهیه شدند. نمونه‌ها با نسبت ارتفاع به قطر ۲، بریده و سطوح انتهایی آنها پرداخت و برای آزمون‌های حرارتی آماده شدند. نمونه‌ها به وسیله‌ی دستگاه برش سنگ بریده و سپس سرو ته آنها با دستگاه ساب‌زنی صیقل داده شدند. دستگاه ساب‌زنی یک ۷ بلوک داشت، که نمونه روی آن قرار می‌گرفت و از بالا به وسیله‌ی محکم کردن پیچ‌ها ثابت و با جابو و عقب بردن ۷ بلوک مذکور، سطح نمونه با برخورد به صفحه‌ی برنجی در حال چرخش، ساییده و پرداخت می‌شد.

۲.۳. تشریح میکروسکوپی نمونه

به منظور تشریح میکروسکوپی نمونه‌ها، در ابتدا از آنها مقاطع نازکی تهیه شد شکل ۳ و سپس مقاطع مذکور به وسیله‌ی میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شدند. نتایج تشریح میکروسکوپی به این شرح بوده است:

ساخت: سنگ دانه‌ی درشت تا متوسط بلور با فرم عمیق؛

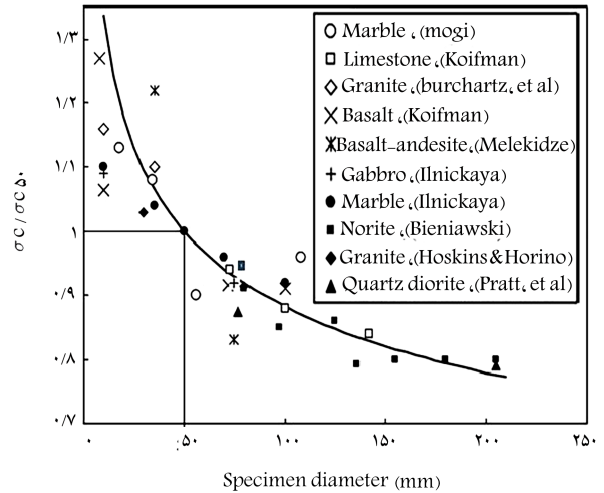
رنگ: ماگروسکوپی سفید استخوانی مایل به خاکستری؛

بافت: گرانولر مونوزونیتی؛

دانه‌ها و کانی‌های اصلی: فلدسپارهای پلاژیوکلاز (الیگوکلاز تا آندزین) و آلکالن

(پتاسیم دار) با نسبت تقریباً مساوی، کوارتز، آمفیبول و بیوتیت؛

دانه‌ها و کانی‌های فرعی: کانی‌های اپاک و کلینوپیرکسن.



شکل ۱. اثر اندازه در مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر. [۱۸]

که در آن، $\sigma_{c,50}$ مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ی استوانه‌ی با قطر ۵۰ میلی‌متر و σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه با قطر دلخواه (۱۰۰-۲۰۰ mm) است. نمونه‌ها با قطر تقریبی ۵۰ mm و نسبت ارتفاع به قطر ۲ به عنوان نمونه با اندازه‌ی استاندارد شناخته می‌شود. معادله‌ی ۱ نشان می‌دهد که با افزایش قطر نمونه، مقاومت فشاری نمونه کاهش می‌یابد. [۱۸]

جکسون و لاتو^{۱۳} (۱۹۹۰)، مطالعه‌ی بر روی اثر اندازه در مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ گرانیت انجام داده و در مجموع ۹۵ نمونه با قطرهای ۳۳ تا ۲۹۴ میلی‌متر با نسبت ارتفاع به قطر تقریباً ۲، آزمایش شده‌اند. نمونه‌های با قطر کمتر از ۶۳ میلی‌متر تغییرات زیادی داشتند و قابل تشخیص نبودند. در نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر از ۶۳ میلی‌متر، با افزایش قطر به وضوح مقاومت کاهش یافته بود. اگر معادله‌ی به دست آمده‌ی اخیر برای نمونه‌های با قطر بزرگ‌تر از ۶۳ میلی‌متر به کار برده شود، توان معادله ۱/۱۶ به دست می‌آید، که بسیار نزدیک به توان معادله‌ی ۱ است. [۱۹]

کرمدیراتا و جونز^{۱۴} (۱۹۹۳)، اثر اندازه را برای ۴ نوع سنگ (بازالت، زغال سنگ، پورفیری و لاشه‌سنگ) بررسی کردند. مقاومت فشاری تمامی نمونه سنگ‌های ذکر شده با افزایش قطر کاهش یافته بود. با قرار دادن داده‌ها در معادله‌ی ۱، توان معادله برای سنگ‌های اشاره شده بین ۰/۲۹ تا ۰/۸۵ به دست آمد. [۲۰]

این نتایج منجر به بازنویسی معادله‌ی ۱ به صورت معادله‌ی عمومی با توان متغیر رابطه‌ی ۲ شده است:

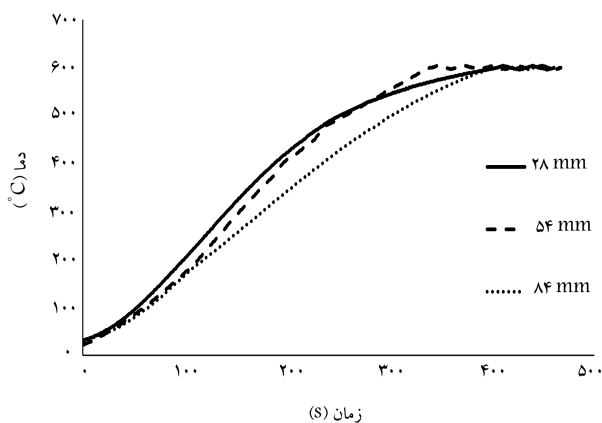
$$\sigma_c = \sigma_{c,50} \left(\frac{d}{50} \right)^{-k} \quad (2)$$

در پژوهش حاضر، برای بررسی خصوصیات مکانیکی سنگ‌ها تحت حرارت از سنگ گرانیت که یک سنگ معمول در پوسته‌ی زمین است، استفاده شده است. نمونه‌ی سنگ آزمایش، سنگ گرانیت معدن خرمدره‌ی زنجان است.

۳. برنامه‌ی آزمایش‌ها

۳.۱. آماده‌سازی نمونه‌های سنگ

به منظور تهیه‌ی نمونه برای انجام آزمایش، ابتدا از بلوک‌های سنگی اشاره شده، مغزه‌گیری به عمل آمد شکل ۲، که برای این کار از دستگاه مغزه‌گیر Hilty DD۲۰



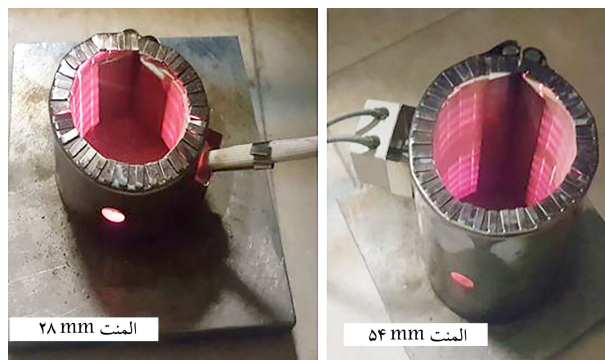
شکل ۵. نمودار دما بر حسب زمان برای المنت‌های سرامیکی حرارتی.



شکل ۶. انجام آزمایش فشاری تک‌محوری.

۴.۳. آزمایش فشاری تک‌محوری

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری یا نامحصور (UCS)، مرسوم‌ترین آزمون آزمایشگاهی برای مطالعات مکانیکی سنگ بکر است، که با وجود ظاهری ساده، انجام دقیق آن بسیار مشکل است. مقاومت فشاری تک‌محوری، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی سنگ جهت طراحی، آنالیز و مدل‌سازی بوده و توسط جامعه‌ی جهانی مکانیک سنگ ASTM D2938 و ISRM ۱۹۸۱ به صورت استاندارد تعریف شده است.^[۲۲] برای انجام آزمایش‌ها، از دستگاه UTM ۱۵ استفاده شده است، که ۱۰۰ تن ظرفیت دارد و عملکرد آن به صورت سروالکترومکانیکال است و جهت کنترل بار، از بازخورد لودسل و جابه‌جایی دقیق فک‌ها استفاده می‌شود. دقت کنترل دستگاه UTM، بالا و آزمایش‌ها در بازه‌ی گسترده‌ی سرعت (۱ mm/min - ۰/۰۰۱) انجام می‌شوند. دستگاه دو فک دارد، که فک پایینی ثابت و فک بالایی متحرک است. در پژوهش حاضر، در عین حال که نمونه در داخل المنت و زیر دستگاه قرار داشت، عملیات حرارت‌دهی به نمونه را آغاز کرده و به منظور رسیدن دمای سنگ و محیط اطراف آن به دمای مورد نظر، نمونه ۲ ساعت در آن دما مانده است. بعد از گذشت ۲ ساعت، آزمایش فشاری در حالی که نمونه در داخل المنت قرار داشت، انجام شده است شکل ۶ با توجه به استاندارد ISRM بار وارده به نمونه باید به طور پیوسته با یک نرخ ثابت وارد شود تا شکست در مدت ۵ الی ۱۰ دقیقه پس از اعمال بار اتفاق بیفتد. لذا نرخ بارگذاری ۳ mm/min / ۰ در نظر گرفته شد تا نمونه در مدت مذکور شکسته شود.



شکل ۴. المنت‌های حرارتی برای قطرهای مختلف.

۳.۳. نحوه‌ی حرارت‌دهی به نمونه‌ها

برای اعمال حرارت به نمونه‌های استوانه‌یی، از یک سری المنت سرامیکی استفاده شده است شکل ۴، که آنها بر اساس مقاومت تولید شده از جریان الکتریکی درون سرامیک از خود حرارت تولید می‌کردند.

اجزاء یک المنت سرامیکی حرارتی به این شرح است:

- ۱- عایق سرامیکی که مانع از دست دادن حرارت و در نتیجه کاهش هزینه‌های انرژی می‌شود؛
- ۲- سیم نیکل کروم با درجه‌ی حرارت؛
- ۳- غلاف استیل مقاوم در برابر زنگ‌زدگی و درجه‌ی حرارت بالا و پشتیبانی مکانیکی قوی.

المنت به ترموستات متصل و ترموکوبل داخل آن قرار گرفت. ترموستات روشن شد و دما شروع به افزایش کرد. با بالا رفتن دما، در هر لحظه درجه حرارت ثبت می‌شد. برای هر ۳ المنت سرامیکی این کار انجام شد و بر اساس داده‌های به دست آمده، نمودار دما بر حسب زمان به صورت شکل ۵ رسم شد.

با توجه به نمودار اخیر، مشخص است که بارگذاری حرارتی نمونه‌ها در هر ۳ المنت سرامیکی، روند خطی داشته و نمونه‌ها به صورت یکنواخت تحت عملیات حرارتی قرار گرفته‌اند. بر اساس نوشتارهایی در ادبیات فنی، نرخ بارگذاری حرارتی باید به گونه‌یی باشد که مانع از ایجاد شوک حرارتی به نمونه شود. انتخاب مناسب نرخ بارگذاری حرارتی بسته به نوع سنگ باید به گونه‌یی باشد که سنگ به آرامی گرم شود و به دمای مدنظر برسد. نرخ بارگذاری حرارتی برای نمونه‌ها، $90^{\circ}C/min$ انتخاب شده است.^[۲۱]

۴. نتایج

نتایج آزمایش به صورت نمودارهای تنش - کرنش و برای قطرهای مختلف (۲۸، ۵۴ و ۸۴ میلی‌متر) در دماهای مختلف در شکل‌های ۷ الی ۹ مشاهده می‌شود. نمودارهای رسم شده‌ی تنش - کرنش مرتبط شامل ۳ مرحله هستند:

مرحله اول، مرحله‌ی فشردگی است، که ریزترک‌ها تحت بار فشاری خارجی بسته می‌شوند. مرحله دوم، مرحله‌ی کشسان است، که در آن نمودار تنش - کرنش تقریباً خطی است و تنش به مقدار بیشینه خود در انتهای این مرحله می‌رسد. مرحله آخر، مرحله‌ی نرم‌شوندگی است، که نمودار تنش - کرنش با یک شیب تند سقوط می‌کند و نمونه‌ی سنگ به سرعت گسیخته می‌شود. مدت زمان مرحله‌ی گسیختگی (مرحله‌ی سوم) با افزایش دما، افزایش می‌یابد.

بر اساس نمودارهای تنش - کرنش به دست آمده، دو نوع رفتار برای آنها بعد از مقاومت بیشینه‌شان اتفاق افتاده است. اولین رفتار مربوط به نمودارهای تنش - کرنش برای دماهای آزمایشگاه، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد است، که یک افزایش خطی در مقادیر تنش همراه با افزایش کرنش را تا مقاومت بیشینه نشان می‌دهد و سپس یک افت ناگهانی در مقدار تنش اتفاق افتاده است. رفتار دیگر مربوط به نمودارها در دمای ۶۰۰^oC است، که تا مقاومت بیشینه، مقادیر تنش و کرنش به صورت خطی افزایش یافته و سپس یک کاهش تدریجی در مقدار تنش بعد از مقاومت بیشینه همراه با افزایش کرنش گسیختگی اتفاق افتاده است. شکست سنگ تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری، به گونه‌ی است که در ابتدای بارگذاری، انرژی موجود صرف ایجاد ترک کششی و تضعیف چسبندگی در نمونه می‌شود و در مرحله‌ی بعدی ترک‌های مذکور به یکدیگر متصل می‌شوند و تشکیل ترک بزرگ می‌دهند و در نهایت موجب شکست نمونه می‌شوند. حرارت باعث اتصال ریزترک‌های موجود به نمونه می‌شود و نمونه در سطح بار کمتری می‌شکند.

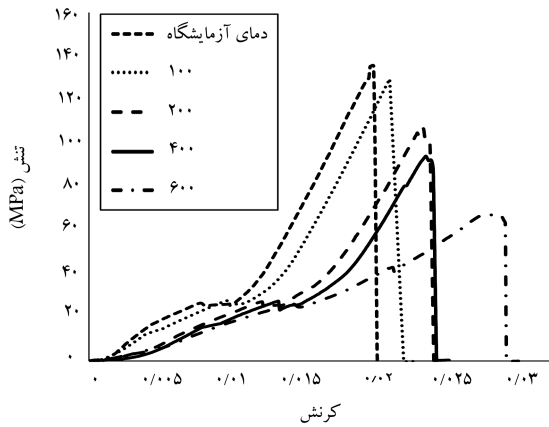
۱.۴. نتایج مقاومت فشاری بیشینه

آزمایش فشاری تک‌محوره هم‌زمان با اعمال بارگذاری حرارتی برای تمامی قطرها (۲۸، ۵۴ و ۸۴ میلی‌متر) در دماهای مدنظر صورت گرفته و مقدار مقاومت بیشینه‌ی هر آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

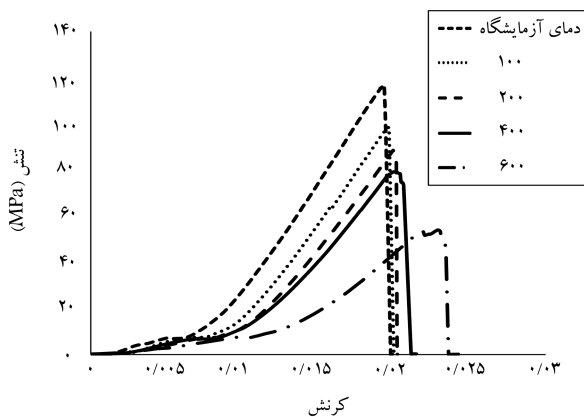
حال با توجه به جدول ۱، نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوره نسبت به دما برای قطرهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، مقاومت فشاری تک‌محوره با افزایش دما برای

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های فشاری تک‌محوری (مگاپاسکال).

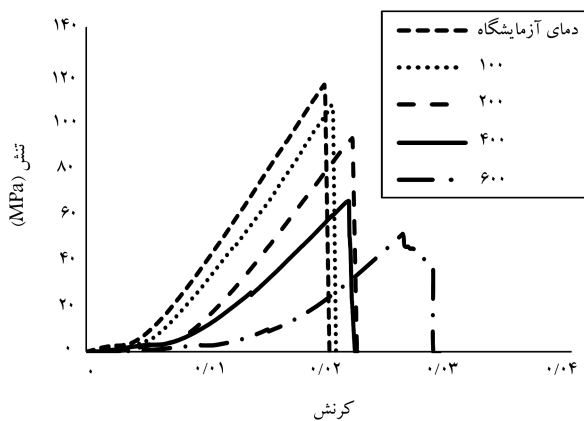
قطر (میلی‌متر)	۲۸	۵۴	۸۴
دما (درجه سانتی‌گراد)			
۲۵	۱۲۰/۶۵	۱۱۶/۳	۱۰۷/۷
۱۰۰	۱۱۱/۸	۱۰۵/۶	۱۰۱
۲۰۰	۱۰۲/۴	۹۲/۱	۸۷
۴۰۰	۹۰/۲	۷۵/۹	۶۵
۶۰۰	۶۳/۸	۵۵	۴۷/۶



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش برای نمونه با قطر ۲۸ میلی‌متر در دماهای مختلف.

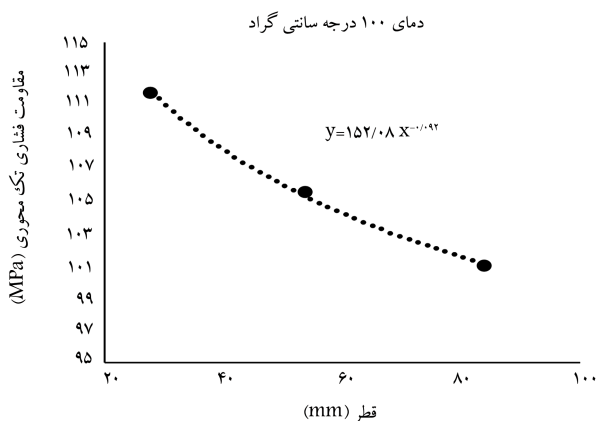


شکل ۸. نمودار تنش - کرنش برای نمونه با قطر ۵۴ میلی‌متر در دماهای مختلف.

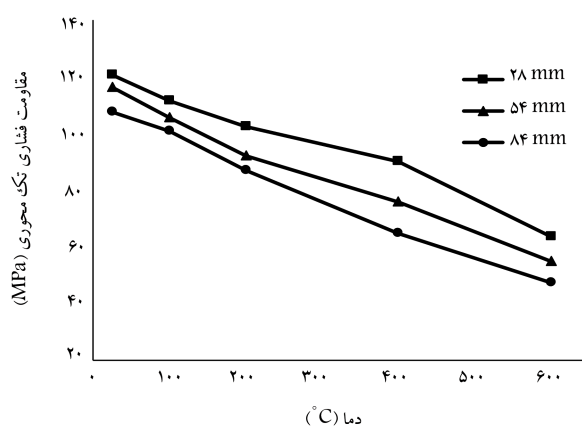


شکل ۹. نمودار تنش - کرنش برای نمونه با قطر ۸۴ میلی‌متر در دماهای مختلف.

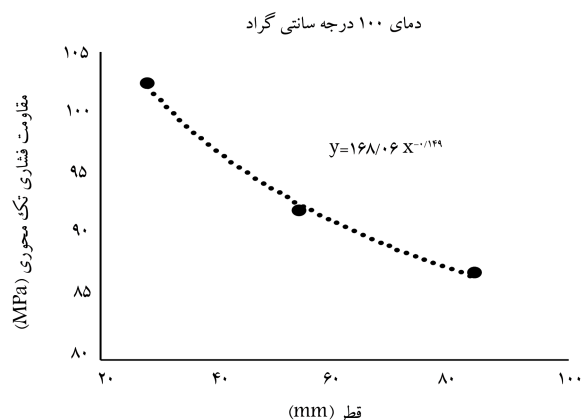
تمامی قطرها کاهش یافته است. سنگ‌ها تحت عملیات حرارتی با دمای بالا، تغییرات فیزیکی و شیمیایی را تجربه خواهند کرد. تغییرات فیزیکی عمدتاً شامل از دست دادن آب داخل سنگ، تغییر جرم و حجم، شروع و انتشار ترک‌هاست. تغییرات شیمیایی عمدتاً شامل انتقال فاز کریستال‌ها و تغییر ترکیب کانی‌هاست. زمانی که دمای گرمادهی نسبتاً پایین است، تغییرات اصلی عمدتاً تغییرات فیزیکی است. تغییرات شیمیایی عمدتاً در دمای حرارت‌دهی بالا اتفاق می‌افتند. این عمل باعث ایجاد یک فشار هوای بزرگ می‌شود و شکل‌گیری و گسترش (انبساط) ترک‌ها و



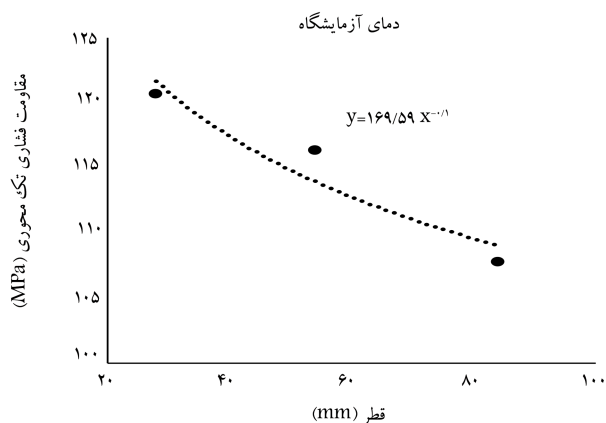
شکل ۱۲. نمودارهای مقارنت فشاری تک‌محوری بر حسب قطر نمونه برای دمای $100^{\circ}C$.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به دما.



شکل ۱۳. نمودارهای مقارنت فشاری تک‌محوری بر حسب قطر نمونه برای دمای $200^{\circ}C$.



شکل ۱۱. نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به قطر نمونه برای دمای آزمایشگاه.

جدول ۲. نتایج مقادیر k و $\sigma_{c,50}$ برای دماهای مختلف.

دما (درجه‌ی سانتی‌گراد)	$\sigma_{c,50} (MPa)$	k
۲۵	۱۱۴/۶۸	۰/۱
۱۰۰	۱۰۶/۱۱	۰/۰۹۲
۲۰۰	۹۳/۸۲	۰/۱۴۹
۴۰۰	۷۶/۳۲	۰/۲۹۶
۶۰۰	۵۵/۱	۰/۲۶۳

معادله‌ی ۲ بازنویسی شود، داریم:

$$\sigma_c = 16975.9(d^{-0.92}) \Rightarrow \sigma_c = 11468\left(\frac{d}{50}\right)^{-0.92}$$

$$\sigma_c = \sigma_{c,50}\left(\frac{d}{50}\right)^{-k}$$

بنابراین مقدار $\sigma_{c,50} = 114/68 MPa$ و $k=0/1$ به دست می‌آید.

حال برای به دست آوردن رابطه مقاومت فشاری تک‌محوره و قطر برای سایر دماها، کافی است نمودار آن برای دمای مورد نظر رسم شود (شکل‌های ۱۲ الی ۱۵).

مقادیر به دست آمده برای $\sigma_{c,50}$ و k برای دماهای مختلف محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌اند:

نمودار تغییرات ضریب k بر حسب دما در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود:

منافذ را شدت می‌بخشد و باعث افزایش ترک‌ها می‌شود. در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری تا دمای $200^{\circ}C$ شده است. در محدوده‌ی 200° تا 400° درجه‌ی سانتی‌گراد، شدت ریزترک‌های ذکر شده بیشتر و باعث کاهش مقاومت نمونه شده است.

در شرایط دمای بالا، حالت‌های مختلف آب در سنگ متناظر با دما، بخار آب را تشکیل می‌دهند. در دمای زیر $200^{\circ}C$ ، آب با یک سرعت نسبی آرام، شروع به تبخیر شدن و فرار از بین ترک‌ها می‌کند.

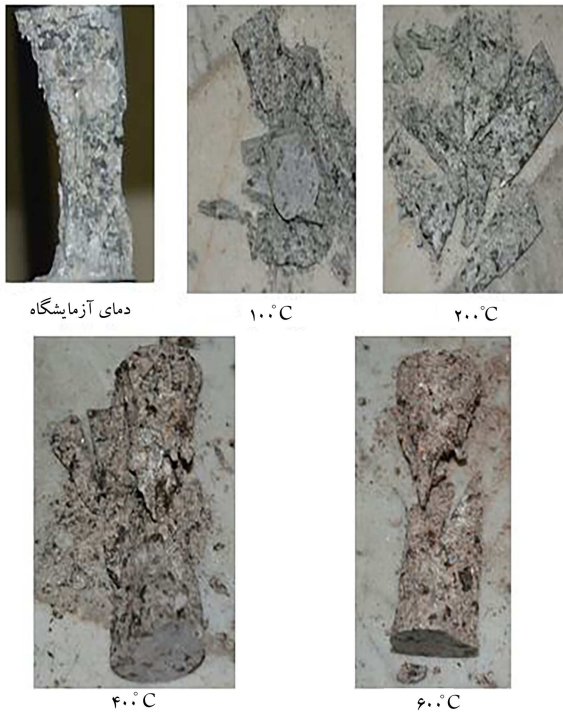
هنگامی که دما از $400^{\circ}C$ بالاتر می‌رود، تغییرات شیمیایی در سنگ رخ می‌دهد، که تغییر رنگ نمونه می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این موضوع باشد. انتقال فاز کوارتز منجر به افزایش ریزترک‌ها به دلیل انبساط متفاوت بین دانه‌های کوارتز و دیگر کانی‌ها می‌شود، که این یکی از دلایل کاهش مقاومت در محدوده‌ی بین 400° تا 600° درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است.

۲.۴. اثر اندازه در مقاومت فشاری تک‌محوره و تأثیر حرارت در اثر

اندازه

در شکل ۱۱، نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب تغییرات قطر مشاهده می‌شود، که مطابق آن با افزایش اندازه‌ی نمونه، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش یافته است.

اگر معادله‌ی تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نسبت به قطر بر اساس



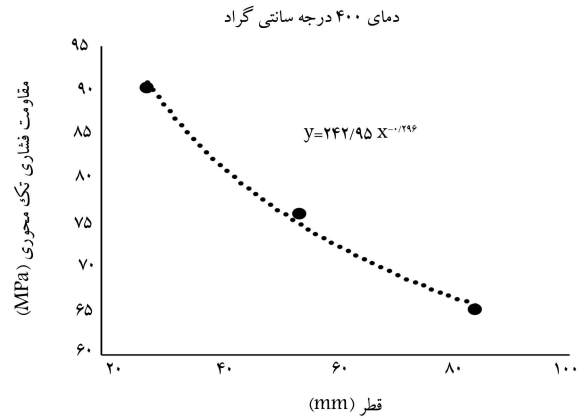
شکل ۱۷. تصاویر شکست نمونه‌ها.

قطری بوده و نمونه‌ها به تعدادی قطعه‌ی کوچک‌تر تقسیم شده‌اند (شکل ۱۷). برای گرانیته آزمایش شده در پژوهش حاضر، تغییر رنگ برای نمونه‌ها در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد مشهود است. نمونه‌ها در دمای اتاق، به رنگ سفید استخوانی مایل به خاکستری بودند، اما بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، تبدیل به سفید مایل به قهوه‌یی شدند. تغییر رنگ ممکن است ناشی از واکنش‌های شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ بوده باشد.

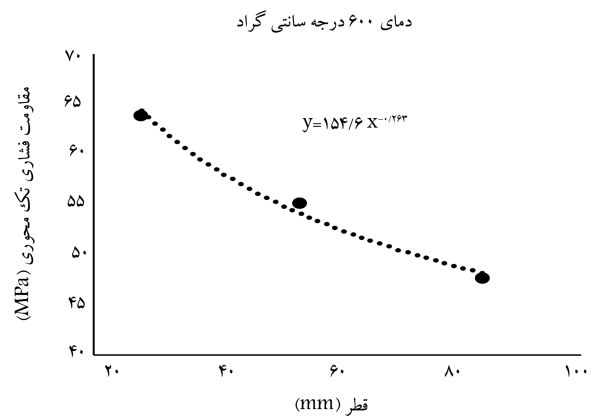
۵. نتیجه‌گیری

بر اساس نمودارهای تنش - کرنش، دو نوع رفتار برای نمونه‌های سنگ‌های گرانیته بعد از مقاومت پیشینه‌شان اتفاق افتاده است. اولین رفتار مربوط به نمودارهای تنش - کرنش برای دماهای آزمایشگاه، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بوده است، که یک افزایش خطی در مقادیر تنش همراه با افزایش کرنش را تا مقاومت پیشینه نشان می‌دهد و سپس یک افت ناگهانی در مقدار تنش اتفاق افتاده است. رفتار دیگر مربوط به نمودارها در دمای ۶۰۰°C است، که تا مقاومت پیشینه مقادیر تنش و کرنش به صورت خطی افزایش یافته و سپس یک کاهش تدریجی در مقدار تنش بعد از مقاومت پیشینه همراه با افزایش کرنش گسیختگی مشاهده شده است.

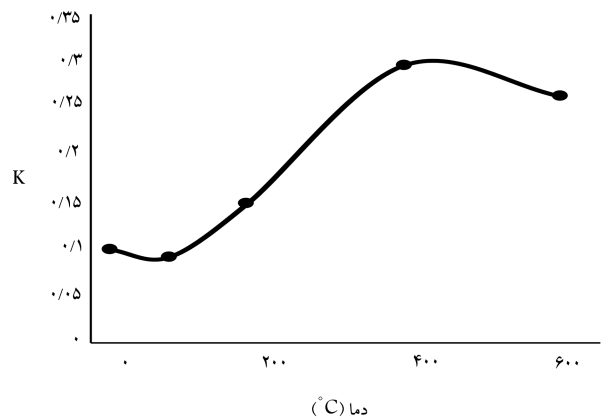
مقاومت فشاری تک‌محوره با افزایش دما برای تمامی قطرها کاهش یافته است. در دمای زیر ۲۰۰°C، آب با یک سرعت نسبی آرام، شروع به تبخیر شدن و فرار از بین ترک‌ها کرد. این عمل باعث ایجاد یک فشار هوای بزرگ شد و شکل‌گیری و گسترش (انبساط) ترک‌ها و منافذ را شدت بخشید و باعث افزایش ترک‌ها شد. در نتیجه باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری تا دمای ۲۰۰°C شده است. در محدوده‌ی ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، شدت ریزترک‌های مذکور بیشتر



شکل ۱۴. نمودارهای مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب قطر نمونه برای دمای ۴۰۰°C.



شکل ۱۵. نمودارهای مقاومت فشاری تک‌محوری بر حسب قطر نمونه برای دمای ۶۰۰°C.



شکل ۱۶. نمودار تغییرات ضریب k بر حسب دما.

که مقدار k از رابطه‌ی در $\sigma_c = \sigma_{c,50} \left(\frac{d}{50}\right)^{-k}$ در دمای ۱۰۰°C نسبت به دمای اتاق کاهش یافته است. از دمای ۱۰۰ تا دمای ۴۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، مقدار ضریب k افزایش یافته و سپس در ۶۰۰°C، دوباره کاهش یافته است.

۳.۴. نحوه‌ی شکست نمونه‌ها و تغییر رنگ در اثر حرارت

تصاویر مربوط به شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که الگوی شکست تقریباً به صورت

سپس در 600°C دوباره کاهش یافته است. بیشترین تأثیر در دمای 400°C اتفاق افتاده است.

همچنین تصاویر مربوط به شکست نمونه‌ها نشان می‌دهد که الگوی شکست تقریباً به صورت قطری است. همچنین برای گرانیب آزمایش شده در پژوهش حاضر، تغییر رنگ برای نمونه‌ها در دماهای 400°C و 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد مشهود است. نمونه‌ها در دمای اتاق، رنگ سفید استخوانی مایل به خاکستری داشتند، اما بعد از عملیات حرارتی در دمای 400°C و 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد تبدیل به سفید مایل به قهوه‌یی شدند، که تغییر رنگ ممکن است ناشی از واکنش‌های شیمیایی کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ باشد.

شده و نسبت به محدوده‌ی دمای آزمایشگاه تا 200°C مقاومت کاهش بیشتری داشته است. هنگامی که دما از 400°C بالاتر رفته است، تغییرات شیمیایی در سنگ رخ داد، که تغییر رنگ نمونه می‌تواند نشان‌دهنده‌ی این موضوع باشد. انتقال فاز کوارتز منجر به افزایش ریزترک‌ها به دلیل انبساط متفاوت بین دانه‌های کوارتز و دیگر کانی‌ها می‌شود، که این یکی از دلایل کاهش مقاومت در محدوده‌ی بین 400°C تا 600°C درجه‌ی سانتی‌گراد است.

با افزایش قطر نمونه، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش یافته است. اثر درجه حرارت در اثر اندازه با توجه به معادله‌ی مربوط به اثر اندازه نشان می‌دهد که با افزایش دما، ابتدا ضریب k در 100°C کاهش یافته و سپس تا 400°C افزایش یافته و

پانویس‌ها

1. Liang
2. Tian
3. Luc Leroy
4. Gneiss
5. Ranjith
6. Xu
7. Gautam
8. Tubing Yin
9. Brotons
10. Hong Tian
11. Yuan Zhang
12. size effect
13. Jackson and Lau
14. Krmadibrata and Jones
15. Universal test machine

منابع (References)

1. Darot, M. and Reuschlé, T. "Acoustic wave velocity and permeability evolution during pressure cycles on a thermally cracked granite", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **37**(7), pp. 1019-1026 (2000).
2. Chaki, S., Takarli, M. and Agbodjan, W.P. "Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions", *Constr. Build. Mater.*, **22**(7), pp. 1456-1461 (2008).
3. Tsang, C.-F. "Linking thermal, hydrological, and mechanical processes in Fractured Rocks", *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **27**(1), pp. 359-384 (1999).
4. Gallup, D.L. "Production engineering in geothermal technology: A review", *Geothermics*, **38**(3), pp. 326-334 (2009).
5. Heuze, F.E. "High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks- A review", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **20**(1), pp. 3-10 (1983).
6. Liang, W.G., Xu, S.G. and Zhao, Y.S. "Experimental study of temperature effects on physical and mechanical characteristics of salt rock", *Rock Mech. Rock Eng.*, **39**(5), pp. 469-482 (2006).
7. Tian, H., Ziegler, M. and Kempka, T. "Physical and mechanical behavior of claystone exposed to temperatures up to 1000°C ", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **7**, pp. 144-153 (2014).
8. Luc Leroy, N.M., Joseph, N.D.O.P. and Bienvenu, J.M. "Investigations of thermal damage on the physical and mechanical properties of gneiss rock specimen", *J. Powder Metall. Min.*, pp.3-6 (2017).
9. Keshavarz, M., Pellet, F.L. and Loret, B. "Damage and changes in mechanical properties of a gabbro thermally loaded up to $1,000^{\circ}\text{C}$ ", *Pure Appl. Geophys.*, **167**(12), pp. 1511-1523 (2010).
10. Ranjith, P.G., Viete, D.R., Chen, B.J. and et al. "Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behavior of Hawkesbury sandstone at atmospheric pressure", *Eng. Geol.*, **151**, pp. 120-127 (2012).
11. Xu, X.L., Gao, F., Shen, X.M. and et al. "Mechanical characteristics and microcosmic mechanisms of granite under temperature loads", *J. China Univ. Min. Technol.*, **18**(3), pp. 413-417 (2008).
12. Gautam, A.K., Maheshwar, S. and Singh, T.N. "Effect of high temperature on physical and mechanical properties of granite", *Journal of Applied Geophysics*, **159**, pp. 460-474 (2018).
13. Yin, T., Li, X., Cao, W. and et al. "Effects of thermal treatment on tensile strength of laurentian granite using brazilian test", *Rock Mech. Rock Eng.*, **48**(6), pp. 2213-2223 (2015).
14. Brotons, V., Tomaás, R., Ivorra, S. and et al. "Temperature influence on the physical and mechanical properties of a porous rock: San Julian's calcarenite", *Eng. Geol.*, **167**, pp. 117-127 (2013).
15. Tian, H., Mei, G. and Qin, Y. "High-temperature influence on mechanical properties of diorite", *Rock Mech. Rock Eng.*, **50**, pp. 1661-1666 (2017).
16. Zhang, Y., Wan, Z., McLennan, J. and et al. "Influence of temperature on physical and mechanical properties of a sedimentary rock coal measure mydstone", *Thermal Science*, **25**(1A), pp. 159-169 (2021).

17. Yoshinaka, R., Osada, M. Park, H. and et al. "Practical determination of mechanical design parameters of intact rock considering scale effect", *Eng. Geol.*, **96**(3-4), pp. 173-186 (2008).
18. Hoek, E. and Brown, E.T. "Practical estimates of rock mass strength", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **34**(8), pp. 1165-1186 (1997).
19. Jackson, J.S. and Lau, R. "The effect of specimen size on the laboratory mechanical properties of Lac du Bonnet grey granite", *Cunha, P.*, **28**, pp. 165-174 (1990).
20. Krmadibrata, I. and Jones, S. "Size effect on strength and deformability of brittle intact rock", *Cunha, P.*, pp.4-8 (1993).
21. Wu, D., Liu, G., Chen, Sh. and et al. "An experimental investigation on heating rate effect in the thermal behavior of perhydrous bituminous coal during pyrolysis", *J. Thermal Anal. Calorim.*, **119**(3), pp. 2195-2203 (2015).
22. ISRM, "Suggested methods for determining compressive strength and deformability suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock", *Int. Soc. Rock Mech.*, pp. 0-3 (Dec 1977).