

بررسی اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود اول و مود دوم ماسه سنگ لوشان

نوید قنبری^۱، مهدی حسینی^{۲*}، مرتضی ثقفی یزدی^۳

دریافت مقاله: ۹۸/۰۱/۲۳ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۷/۰۲

چکیده

سنگ‌ها مواد طبیعی شکننده می‌باشند که تحت تاثیر عوامل محیطی زیادی از قبیل دما، فشار محصور کننده، رطوبت و فرسایش قرار دارند. از این بین، تاثیر درجه حرارت بر روی شکست سنگ در بیشتر زمینه‌های علوم مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این موارد می‌توان به تعیین مقاومت سازه‌های سنگی جهت انباشت ضایعات اتمی در مخازن زیرزمینی، فرآیند شکست هیدرولیکی جهت استخراج نفت و گاز از لایه‌های مختلف زمین و تحلیل پایداری معادن زیرزمینی اشاره کرد. در این مقاله به بررسی تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I و مود II ماسه‌سنگ لوشان، پرداخته شده است. جهت این بررسی، از دیسک برزیلی با ترک چورون استفاده شده است. در این پژوهش، برای بررسی اثر درجه حرارت، نمونه‌ها تحت درجه حرارت ۲۰ (دمای محیط)، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش درجه حرارت تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست مود I و II ماسه‌سنگ افزایش یافت.

کلید واژه‌ها: درجه حرارت، ماسه‌سنگ، چقرمگی شکست، مود اول، مود دوم.

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲. دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۳. استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

که در فرانکلین و همکاران (Franklin et al., 1988) آمده است عبارت‌اند از:

- SCB(Semi Circular Bend)
- SENRBB(Single Edge Notched Round Bar in Bending)
- CB(Chevron Bend)
- SR(Short Rod)
- CCNBD(Cracked Chevron Notch Brazilian Disc)
- PTS(Punch Through Shear method)

محققان زیادی به بررسی اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست پرداخته‌اند که به برخی از پژوهش‌های انجام شده اشاره می‌شود.

ال شای و همکاران (Al-Shayea et al., 2000) تاثیر درجه حرارت روی چقرمگی شکست مود I سنگ آهک را مورد بررسی قرار داده‌اند. طبق این پژوهش، چقرمگی شکست از $0.42 \text{ MPa}\sqrt{m}$ در دمای محیط به $0.52 \text{ MPa}\sqrt{m}$ در دمای ۱۱۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

فوناتسو و همکاران (Funatsu et al., 2004) تاثیر درجه حرارت را روی چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ کیمپاچی و توف مورد بررسی قرار دادند. چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ تا دمای ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد تغییر زیادی را نشان نمی‌دهد و تقریباً ثابت است. با افزایش دما (بالتر از ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد)، چقرمگی شکست نیز افزایش یافته به گونه ای که در دمای ۱۵۰ درجه، ۳۰٪ و در دمای ۲۰۰ درجه، ۴۰٪ افزایش می‌یابد. چقرمگی شکست مود I توف نیز با افزایش دما تا ۷۵ درجه، کاهش یافته و با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه و ۱۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

مردیس و اتکینسون (Meredith and Atkinson, 1985) تاثیر درجه حرارت روی چقرمگی شکست مود I دو بلوک از گابرو را مورد بررسی قرار داده‌اند. چقرمگی شکست هر دو بلوک گابرو با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه، افزایش و سپس از دمای ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش می‌یابد. فنگ و همکاران (Feng et al., 2017) برای بررسی تاثیر دما بر روی چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ، نمونه‌ها را در ۹ دمای ۲۰ (دمای محیط)، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ و

مکانیک شکست در تحلیل پایداری معادن سطحی و زیرزمینی، تعیین مقاومت سازه‌های سنگی جهت انباشت ضایعات اتمی در مخازن زیرزمینی برای دراز مدت و فرآیند شکست هیدرولیکی جهت استخراج نفت و گاز از لایه‌های مختلف زمین که تحت دما قرار دارند، کاربرد دارد.

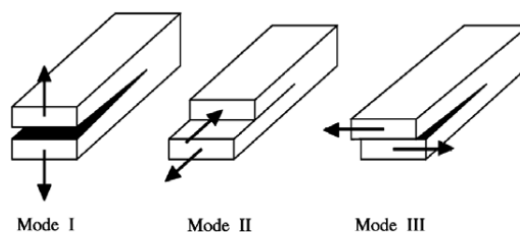
از آنجا که سنگ‌ها در طبیعت عموماً دارای درزه و شکاف و در دل زمین تحت تاثیر درجه حرارت می‌باشند، برای اجرای سازه‌های مختلف در سنگ، لازم است که رفتار سنگ در آزمایشگاه و تحت اثر دماهای مختلف و چگونگی تاثیر آن بر گسترش ترک بررسی شود تا بتوان رفتار واقعی سازه را مشخص کرد.

در علم مکانیک شکست شرایط بحرانی یک قطعه ترک‌دار با استفاده از شدت تنش موجود در نوک ترک تخمین زده می‌شود.

ضریب شدت تنش (k) مقدار تنش موضعی را در نوک ترک تعیین می‌کند که میزان بحرانی آن چقرمگی شکست نامیده می‌شود.

سه مود اصلی اعمال نیرو بر ترک وجود دارد (شکل ۱)، که عبارت‌اند از:

- مود یک یا مود بازشدگی
- مود دو یا مود برشی
- مود سه یا مود لغزش و پاره شدگی



شکل ۱. سه مود اصلی انتشار ترک برگرفته از چانگ و همکاران (Chang et al., 2002).

از جمله روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ برای تعیین چقرمگی شکست مود I و مود II

پژوهش ال شای و همکاران که روی دیسک برزیلی با ترک مستقیم انجام شده است اما در این پژوهش با آماده سازی دیسک های برزیلی دارای ترک چورون علاوه بر مود I، تغییرات چقرمگی شکست مود II تحت درجه حرارت بررسی شده است. در این پژوهش هدف بررسی اثر درجه حرارت تا حداکثر ۱۵۰ درجه سانتیگراد روی چقرمگی شکست مود اول و مود دوم ماسه سنگ است. در چاه های نفت حداکثر تا این درجه حرارت ثبت شده است.

۲. آزمایش روی دیسک برزیلی با ترک چورون

نمونه دیسک برزیلی اولین بار توسط چانگ و همکاران (Chang et al., 2002) در سال ۱۹۸۵ برای تعیین چقرمگی شکست سرامیک ها مورد استفاده قرار گرفت. نمونهی CKNBD (Cracked Chevron Notched Brazilian Disc) توسط انجمن بین المللی مکانیک سنگ ISRM (International Society for Rock Mechanics) در سال ۱۹۹۵ به عنوان یکی از روش های پیشنهادی برای تعیین چقرمگی شکست مود I معرفی شد. شکل (۲) هندسه و نحوه بارگذاری دیسک برزیلی دارای ترک چورون را نشان می دهد. پارامترهای بی بعد رابطه (۱) برای توصیف هندسه ترک چورون در مرکز نمونهی CKNBD به کار می رود.

$$\alpha_0 = \frac{a_0}{R} \quad \alpha_1 = \frac{a_1}{R} \quad \alpha_B = \frac{B}{R} \quad \alpha_S = \frac{D_S}{2 * R} \quad (1)$$

که در این روابط R شعاع دیسک، B ضخامت دیسک و D_S قطر تیغه‌ی دایره‌ای برش دهنده می باشد.

بنابر نظر ISRM، برای بدست آوردن چقرمگی شکست تحت شرایط کرنش صفحه‌ای با استفاده از نمونهی CKNBD، باید برخی از شرایط لازم هندسی برای ابعاد کلی دیسک و همچنین برای شیار ایجاد شده در دیسک تامین شود. شرایط لازم در شکل (۳) به صورت طرح وار نشان داده شده است.

۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده اند. برای انجام این آزمایش از نمونه‌های SCB استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در دمای ۲۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ به کندی افزایش می‌یابد که دلیل آن تبخیر آب موجود در سنگ و بسته شدن میکروتکرهای اولیه موجود در سنگ می‌باشد. در دمای ۱۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ کاهش می‌یابد که دلیل آن توسعه‌ی ترک‌های گرمایی است که به واسطه حرارت دادن به نمونه ایجاد می‌شود. در دمای ۵۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ به شدت کاهش می‌یابد که دلیل آن تغییر فاز کوارتز و ایجاد ترک‌هایی است که به دلیل حرارت دادن به نمونه ایجاد می‌شود.

فنگ و همکاران (Feng et al., 2018) همچنین اثر درجه حرارت را بر روی چقرمگی شکست مود II ماسه‌سنگ در دماهای ۲۰ (دمای محیط)، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نمونه‌های SCB مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش دما از ۲۰ (دمای محیط) تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد چقرمگی شکست مود II تقریباً ثابت است و تغییر چندانی نمی‌کند. زمانی که دما از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز می‌کند، چقرمگی شکست مود II به شدت کاهش می‌یابد (۴۲/۵۵٪).

میر (Meier, 2009) برای بررسی اثر دما بر روی چقرمگی شکست مود II از آزمایش PTS استفاده کردند. در این آزمایش از ۳۰ نمونه گرانتیت استفاده شده و نمونه‌ها از دمای ۲۵ (دمای محیط) تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند. نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۵ (دمای محیط) تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست مود II تقریباً ثابت است. زمانی که دما از ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تجاوز می‌کند، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد (حدوداً ۱۰٪).

در پژوهش‌های گذشته اغلب تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I بررسی شده و در مود II روی نمونه های غیر از دیسک برزیلی تحقیق انجام شده است به جز

پس از انجام این کار تنش های اعمالی به محیط که شامل تنش افقی حداکثر و حداقل، تنش قائم و فشار سیال داخل گمانه می شد تعریف گردید که در شکل های ۲ تا ۵ قابل مشاهده هستند.

با استفاده از رابطه ی (۲) و (۳) می توان چقرمگی شکست مود I دیسک برزیلی با شکاف چورون را تعیین کرد.

$$k_I = \frac{P_{max}}{B\sqrt{D}} Y_{min}^* \quad (2)$$

که در این رابطه P_{max} نیروی گسیختگی، B ضخامت، D قطر نمونه و Y_{min}^* از طریق رابطه ی (۳) تعیین می شود.

$$Y_{min}^* = ue^{v\alpha_1} \quad (3)$$

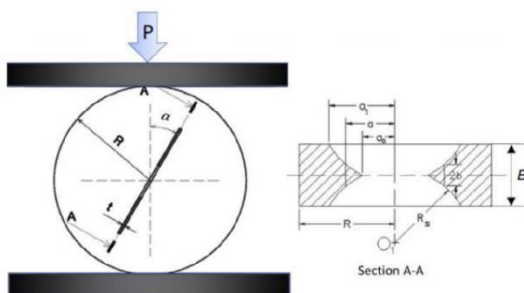
u و v پارامترهای ثابتی هستند که از مقادیر α_0 و α_B بدست می آیند.

برای حالت مود I خالص، راستای ترک باید هم راستا با فشار قطری اعمال شده باشد ($\beta=0$). شرایط مود II خالص برای نمونه ی CCNBD وقتی حاصل می شود که راستای ترک در زاویه ی خاصی نسبت به راستای بارگذاری تنظیم گردد. برخی از محققین این زاویه را برای نمونه دیسک برزیلی با استفاده از روش های تئوری و عددی مشخص کرده اند. علیها و آیت الهی (Aliha and Ayatollahi, 2014)، نمونه ی دیسک برزیلی را با استفاده از روش المان محدود، تحلیل کرده اند و زاویه شیب متناظر با مود II خالص را برای نسبت های $\frac{a}{R}$ مختلف تعیین کرده اند. تغییرات زاویه مود II خالص (α_{II}) نسبت به مقادیر مختلف $\frac{a}{R}$ در شکل (۴) نشان داده شده است.

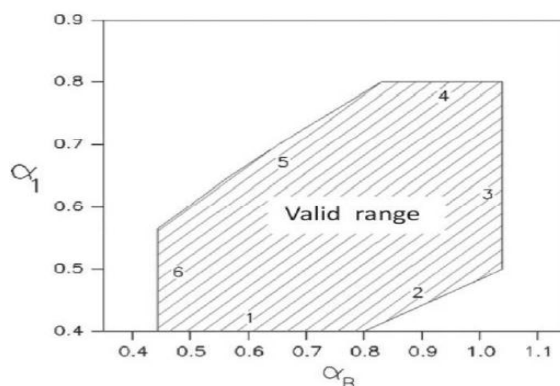
چقرمگی شکست مود II خالص دیسک برزیلی با شکاف چورون از رابطه (۴) بدست می آید.

$$K_{IIc} = \frac{P_{max}}{\sqrt{\pi RB}} \sqrt{\frac{a}{R}} \sqrt{\frac{a_1 - a_0}{a - a_0}} Y_{II} \quad (4)$$

Y_{II} ، فاکتور هندسی مود II خالص است که به مقدار نسبت طول ترک به شعاع دیسک در نمونه های دیسک برزیلی بستگی دارد.



شکل ۲. هندسه و نحوه بارگذاری نمونه ی CCNBD برگرفته از چانگ و همکاران (Chang et al., 2002).



شکل ۳. شرایط هندسی لازم برای نمونه ی CCNBD برگرفته از علیها و آیت الهی (Aliha and Ayatollahi, 2014).

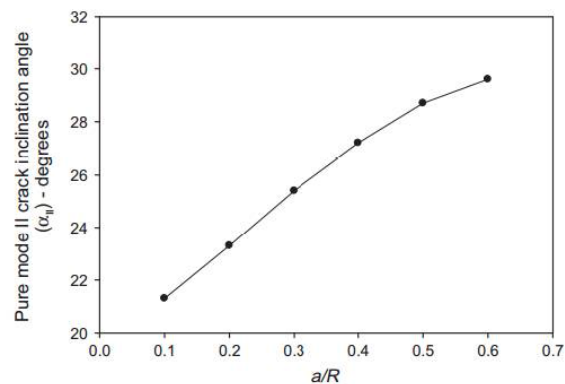
پس از ساخت مدل اولیه خصوصیات محیط بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۱ تعریف شد، سپس محیط گسترش ترک به روش المان محدود توسعه یافته تعریف شد و در کل نمونه اجازه ی رشد ترک داده شد و مکان خاصی برای گسترش ترک در نظر گرفته نشد. روش المان محدود توسعه یافته بر مبنای روش المان محدود معمولی ساخته شده و تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می شوند. به این توابع خاص، توابع غنی سازی می گویند. در روش المان محدود توسعه یافته با افزودن درجه آزادی به گره های اطراف ترک، رشد ترک مدل می شود.

۳. نمونه‌ی مورد مطالعه

برای تعیین اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I و مود II از نمونه‌های ماسه‌سنگ لوشان استفاده شده است پس از تهیه مقطع نازک از نمونه، با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان اقدام به مطالعه میکروسکوپی نمونه شد. مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهد که در این نمونه کلسیت با فراوانی ۱۵ درصد، فلدسپات آلکالن با فراوانی ۷ درصد، کوارتز با فراوانی ۱۵ درصد، کانی‌های اوپک با فراوانی ۷ درصد، خرده سنگ‌هایی مانند چرت با فراوانی ۸ درصد و خمیره ماسه سنگ با فراوانی ۴۸ درصد وجود دارد. خمیره ماسه سنگ از دانه‌های ریز کوارتز و رس (کانی کلریت) تشکیل شده است. دیاژنز این سنگ از نوع سریسیتی‌شدن، چرتی‌شدن و کلسیتی‌شدن است. برای شناخت مشخصات ژئومکانیکی نمونه‌های ماسه‌سنگ استفاده شده در این آزمایش، آزمون‌های ژئومکانیکی مطابق با استانداردهای ISRM بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج مشخصات ژئومکانیکی نمونه‌های ماسه‌سنگ در جدول (۱) آورده شده است.

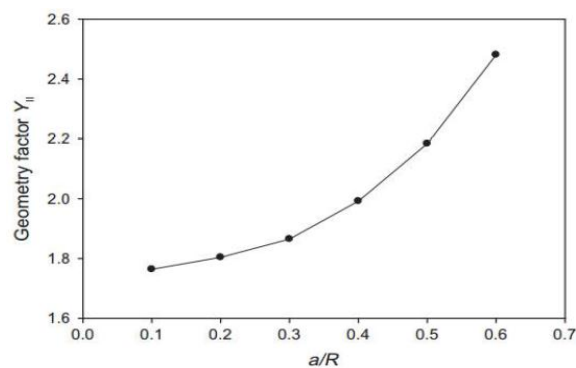
۴- آماده‌سازی نمونه‌های ماسه‌سنگ

در این روش از هندسه‌ی دیسک برزیلی استفاده شده و یک شکاف چورون در دیسک ایجاد می‌شود. برای ایجاد هندسه مناسب نمونه در این روش، پس از تهیه مغزه‌ها از بلوک سنگی، توسط کولیس، نمونه‌ها در ضخامت‌های مورد نظر علامت زده می‌شوند. سپس با استفاده از دستگاه برش، مغزه‌ها به دیسک‌هایی با ضخامت یکسان تقسیم می‌شوند. برای ایجاد شکاف‌های چورون ابتدا هر دو طرف دیسک در امتداد قطر علامت‌گذاری می‌شود تا نقاط کرانی را که ااره می‌تواند برش دهد، مشخص شوند. پس از آن دیسک برزیلی علامت‌گذاری شده به ااره دایره‌ای در حال چرخش (دستگاه فرز انگشتی) فشار داده می‌شود تا ااره به دو نقطه کرانی برسد. سپس دیسک را از ااره جدا کرده و نمونه را برمی‌گردانند و روی دیگر آن را به ااره نزدیک کرده و شکاف دیگری در آن ایجاد می‌کنند.



شکل ۴. زاویه برای حالت مود II خالص متناظر با a/R های مختلف برگرفته از علیها و آیت‌اللهی (Aliha and Ayatollahi, 2014).

این فاکتور هندسی را می‌توان از هر دو حالت تئوری و عددی با استفاده از مدل المان محدود بدست آورد. متغیرهای Y_{II} متناسب با a/R برای نمونه‌های دیسک برزیلی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵. تغییرات فاکتور هندسی مود II متناظر با a/R برای نمونه‌ی CCBND برگرفته از علیها و آیت‌اللهی (Aliha and Ayatollahi, 2014).

از مزایای این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌توان به سادگی آماده‌سازی نمونه، بارگذاری راحت‌تر و در نتیجه احتمال خطای کمتر و همچنین انعطاف‌پذیری روش برای ایجاد مود ترکیبی کشش-برش و همچنین مود برشی خالص توسط فاول و همکاران (Fowell et al., 2006) اشاره کرد.



شکل ۶. مراحل آماده‌سازی (الف) مغزه‌گیری از بلوک سنگی، (ب) مغزه‌های بدست آمده از بلوکهای ماسه‌سنگ، (ج) علامت زدن مغزه‌ها در ضخامت معین توسط کولیس، (د) برش مغزه به ضخامت مورد نظر توسط دستگاه برش و (ه) فرز انگشتی جهت ایجاد شکاف چورون.

با کامل شدن برش، این دو شکاف به هم می‌رسند و یک شکاف چورون در مرکز دیسک ایجاد می‌شود. در شکل (۶) مراحل ایجاد ترک چورون در نمونه‌های ماسه‌سنگ را ملاحظه می‌کنید. در جدول (۲) مشخصات دیسک برزلی دارای ترک چورون نمونه‌های ماسه‌سنگ آمده است.

۵- نحوه انجام آزمایش

برای بررسی اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست، محفظه‌ای ساخته شده است که بعد از قرار دادن نمونه در داخل محفظه، در اطراف آن ماسه ریخته‌گری، ریخته می‌شود و بعد از قرار دادن محفظه در داخل کوره دمای آن به حد مورد نظر می‌رسد. برای بررسی اثر درجه حرارت روی چقرمگی شکست این آزمایش در چهار درجه حرارت ۲۰ (دمای محیط)، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. بعد از رسیدن کوره به دمای مورد نظر، مدتی طول می‌کشد تا دمای نمونه داخل محفظه که در کوره قرار داده شده است به دمای مورد نظر برسد که این زمان با قرار دادن یک دماسنج در مجاورت نمونه و قرار دادن محفظه در داخل کوره بدست آمده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ.

Sample	UCS(MPa)	σ_c (MPa)	Velocity of longitudinal waves(m/s)	E(GPa)	Poisson's ratio	effective porosity (%)	dry unit weight (KN/m ³)
Mortar	58.8	5.40	3494	14.67	0.26	13.31	21.63

جدول ۲. مشخصات دیسک برزلی دارای ترک چورون نمونه‌های ماسه‌سنگ.

Sample	Diameter	Thickness	α_1	Length of Chevron Notch	Depth of Drill Penetration	Angle of Pure Mode II	Diameter of Cutting Disk
Sandstone	74	24	18.50	26	13.50	26.50	40

قرار می‌گیرد تا بار شکست تعیین شود. برای تعیین چقرمگی شکست مود II، نمونه طوری در محفظه قرار می‌گیرد که راستای بارگذاری با راستای ترک زاویه ۲۶/۵

این مدت برای دمای ۶۰ درجه ۸/۵ ساعت، ۱۰۰ درجه ۱۴ ساعت و ۱۵۰ درجه ۱۶ ساعت می‌باشد. سپس محفظه از کوره خارج می‌شود و در زیر دستگاه بارگذاری محوری



شکل ۸. تصاویر تعدادی از نمونه های ماسه سنگ دارای ترک چورون پس از شکست (ردیف اول: مود I، ردیف دوم: مود II).

برای بررسی اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I و مود II، نمونه‌ها در چهار دمای ۲۰ (دمای محیط)، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شده‌اند. برای اطمینان از نتیجه آزمایش در هر دما از سه نمونه استفاده شد. سپس چقرمگی شکست در هر دما از طریق میانگین‌گیری بین اعداد بدست آمده، تعیین شد.

در شکل (۹) و (۱۰) تغییرات چقرمگی شکست مود I و مود II نمونه‌های ماسه‌سنگ دارای ترک چورون با درجه حرارت، حاصل از میانگین‌گیری در هر دما، آمده است.

همانطور که ملاحظه می‌شود، تغییرات چقرمگی شکست مود II ماسه‌سنگ تحت درجه حرارت، مشابه تغییرات چقرمگی شکست مود I می‌باشد. با افزایش دما از ۲۰ (دمای محیط) تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، چقرمگی شکست افزایش می‌یابد.

جهت تحلیل تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ، تغییرات کرنش ماسه‌سنگ در دماهای ذکر شده از طریق نصب یک کرنش سنج الکتریکی، اندازه‌گیری شد (شکل ۱۱). همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش دما، ذرات ماسه سنگ فشرده شده و با توجه به افزایش چقرمگی شکست می‌توان نتیجه گرفت که این انبساط حرارتی سبب بسته شدن میکروتراک‌های موجود در نمونه ماسه‌سنگ شده است.

درجه بسازد. در شکل (۷) مراحل آزمایش بررسی اثر درجه حرارت روی چقرمگی شکست مودهای I و II ماسه‌سنگ را ملاحظه می‌کنید.



شکل ۷. مراحل انجام آزمایش (الف) قرار دادن نمونه در داخل محفظه و پر کردن اطراف آن توسط ماسه ریخته‌گری، (ب) اندازه‌گیری دمای نمونه داخل محفظه توسط دماسنج، (ج) قرار دادن محفظه در داخل کوره و (د) قرار دادن محفظه حاوی نمونه در زیر دستگاه بارگذاری تک محوری.

۶- نتایج آزمایش و تحلیل

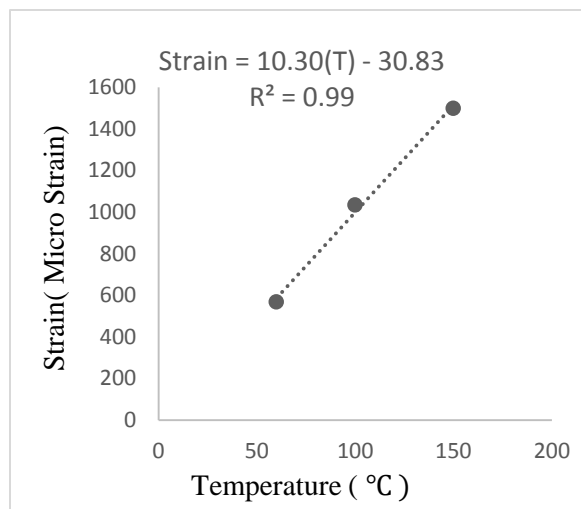
برای محاسبه چقرمگی شکست مود I نمونه‌های ماسه‌سنگ دارای ترک چورون از رابطه‌ی (۲) و (۳) و برای محاسبه چقرمگی شکست مود II از رابطه (۴) استفاده شد. جدول (۳) و (۴) به ترتیب نتایج حاصل از اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I و مود II ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد. در شکل (۸) تصویر تعدادی از نمونه‌های ماسه‌سنگ پس از شکست، نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ.

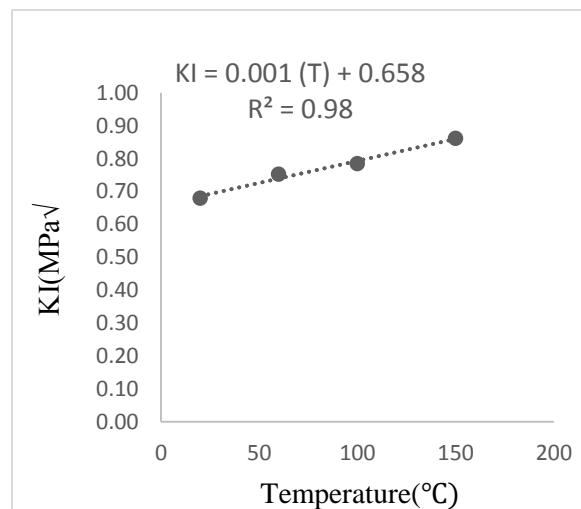
2R (mm)	B (mm)	α_1	temperature (°C)	u	v	P_{max} (KN)	Y_{min}^*	K_{IC} (MPa√m)
74	23.86	0.51	20	0.26	1.76	6.8	0.660	0.692
74	24.01	0.50	20	0.26	1.77	7.6	0.658	0.765
74	23.27	0.49	20	0.26	1.76	5.7	0.647	0.583
74	22.64	0.51	60	0.26	1.76	7.1	0.662	0.731
74	24.83	0.52	60	0.26	1.76	7.4	0.676	0.740
74	23.44	0.51	60	0.26	1.77	7.5	0.668	0.786
74	23.68	0.50	100	0.26	1.76	7	0.650	0.706
74	23.06	0.49	100	0.26	1.76	8.6	0.648	0.888
74	22.84	0.49	100	0.26	1.76	7.3	0.645	0.758
74	24.59	0.51	150	0.26	1.76	9	0.659	0.887
74	24.58	0.51	150	0.26	1.76	8.1	0.665	0.806
74	23.36	0.50	150	0.26	1.76	8.7	0.652	0.892

جدول ۴. نتایج حاصل از اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود II ماسه سنگ.

2R (mm)	B (mm)	a_0 (mm)	a_1 (mm)	a (mm)	temperature (°C)	Y_{II}	P_{max} (KN)	K_{IIC} (MPa√m)
74	23.74	6.93	19.08	12.54	20	1.91	6.2	1.20
74	24.02	6.24	19.17	12.71	60	1.93	7.9	1.54
74	24.45	8.24	19.16	13.70	60	1.96	7	1.43
74	24.03	7.2	18.86	13.03	60	1.94	7.2	1.43
74	23.50	7.41	18.78	13.09	100	1.94	7.4	1.50
74	24.39	7.05	19	13.02	100	1.94	7	1.37
74	23.49	6.80	18.92	12.86	100	1.93	8.1	1.62
74	24.51	6.89	18.72	12.34	150	1.91	8.6	1.60
74	24.22	8.32	18.91	13.61	150	1.95	7.6	1.54
74	23.64	9.56	19.50	14.53	150	1.97	6.4	1.38



شکل ۱۱. تغییرات کرنش در مقابل دمای ماسه سنگ.



شکل ۹. تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ.

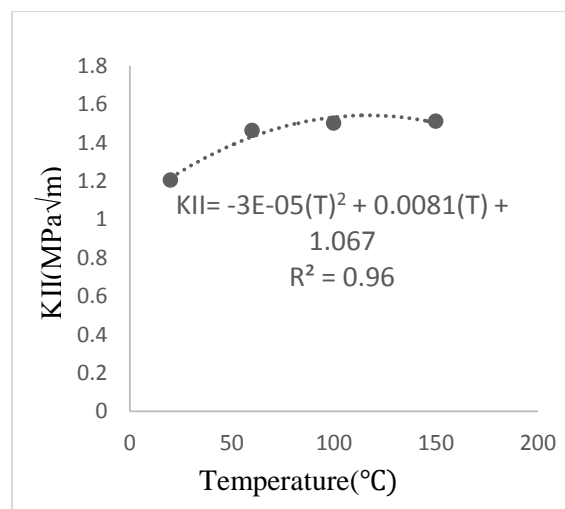
۷- نتیجه گیری

در این پژوهش اثر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود I و II نمونه‌های ماسه سنگ لو شان بررسی شد. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های دیسک برزلی دارای ترک چورون انجام شده است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شده است:

چقرمگی شکست مود I ماسه سنگ با افزایش دما از ۲۰ (دمای محیط) تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به صورت خطی افزایش می‌یابد (۲۶/۴۷٪ افزایش).

چقرمگی شکست مود II ماسه سنگ با افزایش دما از ۲۰ (دمای محیط) تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش می‌یابد (۲۱/۶۶٪ افزایش) و سپس با افزایش دما از ۶۰ درجه تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد چقرمگی شکست به میزان جزئی افزایش می‌یابد.

تغییرات کرنش ماسه سنگ در دماهای ذکر شده نشان داد که با افزایش دما، ذرات ماسه سنگ فشرده شده می‌شود و با توجه به افزایش چقرمگی شکست می‌توان نتیجه گرفت که این انبساط حرارتی سبب بسته شدن میکروترک‌های موجود در نمونه ماسه سنگ شده است.



شکل ۱۰. تاثیر درجه حرارت بر روی چقرمگی شکست مود II ماسه سنگ.

منابع

- Al-Shayea, N. A., Khan, K., Abduljawad, S. N., 2000. Effects of confining pressure and temperature on mixed-mode (I-II) fracture toughness of a limestone rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4): 629-643.
- Aliha, M. R. M., and Ayatollahi, M. R., 2014. Rock fracture toughness study using cracked chevron notched Brazilian disc specimen under pure modes I and II loading—A statistical approach, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 69:17-25.
- Chang, S. H., Lee, C. I., Jeon, S., 2002. Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens, *Engineering geology*, 66(1-2): 79-97.
- Feng, G., Kang, Y., Meng, T., Hu, Y. Q., Li, X. H., 2017. The influence of temperature on mode I fracture toughness and fracture characteristics of sandstone, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(8): 2007-2019.
- Feng, G., Kang, Y., Chen, F., Liu, Y. W., Wang, X. C., 2018. The influence of temperatures on mixed-mode (I+ II) and mode-II fracture toughness of sandstone, *Engineering Fracture Mechanics*, 189: 51-63.
- Fowell, R. J., Xu, C., Dowd, P. A., 2006. An update on the fracture toughness testing methods related to the cracked chevron-notched Brazilian disk (CCNBD) specimen, *pure and applied geophysics*, 163(5-6): 1047-1057.
- Franklin, J. A., ZONGQI, S., Atkinson, B. K., Meredith, P. C., Rummel, F., Mueller, W., Nishimatsu Y, Takahashi H, Costin LS, Ingraffea AR, Bobrov, G. F., 1988. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(2): 71-96.
- Funatsu, T., Seto, M., Shimada, H., Matsui, K., Kuruppu, M., 2004. Combined effects of increasing temperature and confining pressure on the fracture toughness of clay bearing rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(6): 927-938.
- Meredith, P. G., and Atkinson, B. K., 1985. Fracture toughness and subcritical crack growth during high-temperature tensile deformation of Westerly granite and Black gabbro, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 39(1): 33-51.
- Meier, T., 2009. The influence of temperature on Mode II fracture toughness using the Punch-Through Shear with Confining Pressure experiment, in 71st EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2009.