

## بررسی آزمایشگاهی اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن-سرد شدن سنگ بر روی چقرمگی شکست حالت I

احمد جباری، مهدی حسینی\*

گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۳ اسفند ۱۳۹۵  
بازنگری: ۵ تیر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۸ مرداد ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۴ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

چقرمگی شکست  
حالت I  
درجه حرارت  
خمش سه نقطه‌ای  
سیکل گرم شدن-سرد شدن

**چکیده:** در سنگ‌ها ترک‌های ریزی وجود دارد، هنگامی که سنگ‌ها تحت بارگذاری قرار می‌گیرند تنش‌ها در نوک ترک‌ها متمرکز شده و باعث گسیخته شدن سنگ قبل از رسیدن به مقاومت نهایی آن می‌شود. به مقدار بحرانی ضریب شدت تنش در نوک ترک، چقرمگی شکست گفته می‌شود. مقاومت کششی سنگ‌ها ضعیف است به همین دلیل، حالت I (حالت کششی) بحرانی‌ترین حالت بارگذاری است. در برخی مواقع سنگ‌ها به طور مداوم گرم‌شدن-سرد شدن را تجربه می‌کنند. از این رو تعیین اثر تعداد سیکل‌های گرم شدن-سرد شدن بر روی چقرمگی شکست حالت I که هدف این تحقیق است لازم و ضروری است. برای رسیدن به این هدف بر روی نمونه‌های نیم‌دایره‌ای سه نوع سنگ طبیعی شامل ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و آندزیت و همچنین نمونه‌های بتنی آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای تعیین چقرمگی شکست حالت I انجام گرفته است. برای شناخت ترکیب سنگ‌ها مطالعات سنگ‌شناسی و تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) نیز انجام شده است. نمونه‌ها ۱، ۵ و ۱۰ سیکل تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد گرم و سپس سرد شده‌اند. بر روی نمونه‌ها در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد)، یک سری آزمایش نیز انجام شده است. سرعت افزایش دما برای نمونه‌ها در کوره الکتریکی، ۱۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه و متناسب با افزایش دما در فرآیند آتش‌سوزی در نظر گرفته شده است. چقرمگی شکست برای نمونه سنگ آندزیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک تحت شرایط سیکلی کاهش می‌یابد. به این صورت که، بعد از اعمال سیکل‌های گرم شدن و سرد شدن، میکروتُرک‌ها در نمونه سنگ‌ها گسترش می‌یابد که این باعث افزایش تخلخل مؤثر و کاهش سرعت امواج P در نمونه سنگ‌ها می‌گردد.

### ۱- مقدمه

ترکیبی از این سه حالت اصلی تحت عنوان حالت ترکیبی شناخته می‌شود. چقرمگی شکست به عواملی چون: دما، نرخ بارگذاری، ترکیب ماده و ساختار میکروسکوپی به همراه اثرات هندسی بستگی دارد. تمامی سنگ‌ها در کشش ضعیف می‌باشند، به همین دلیل، حالت I (حالت کششی) بحرانی‌ترین حالت بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که سنگ‌ها در مواردی از قبیل انفجار، آتش‌سوزی، حفاری‌های عمیق، استحصال انرژی زمین‌گرمایی تحت حرارت قابل توجهی قرار می‌گیرند و این تغییرات حرارت بر پارامتر چقرمگی سنگ تأثیرگذار می‌باشد برای تعیین چقرمگی شکست حالت I، چهار آزمایش توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ استاندارد شده است. روش آزمایش روی نمونه استوانه‌ای کوتاه، روش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ترک چورون (chevron)، روش آزمایش روی دیسک برزلی با ترک چورون) و روش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه نیم‌دایره‌ای از جمله این آزمایش‌ها می‌باشد [۱۱-۴].

مطالعات زیادی در زمینه تأثیر حرارت بر روی چقرمگی شکست انجام گرفته است. مطالعات گذشته نشان می‌دهد نتایج آزمایشات چقرمگی شکست فقط به میزان دمای آزمایش بستگی ندارد، بلکه سرعت حرارت‌دهی، حداکثر حرارت ایجاد شده و تعداد سیکل حرارتی و از طرفی میزان تراکم

توده‌ی سنگ به طور روزافزون به عنوان بستر در محدوده‌ی وسیعی از فعالیت‌های انسانی به کار می‌رود. تاسیساتی مثل انبارهای ذخیره‌سازی، چاه‌ها، تونل‌ها و نیروگاه‌های زیرزمینی در بستر انواع سنگ‌های مختلف تحت شرایط مکانیک سنگی مختلف قرار می‌گیرند. مکانیک شکست را می‌توان برای طراحی شکست هیدرولیکی، انرژی زمین-گرمایی، استحصال نفت و گاز طبیعی و نیز برای آنالیز پایداری توده سنگ و مشخص ساختن خردشدگی سنگ با انفجار یا هر رویدادی مرتبط با انفجار سنگ، به کار برد [۱]. ضریب شدت تنش (K)، اندازه حدود تنش در نوک ترک را در فرآیند شکست کنترل می‌کند. چقرمگی شکست یکی از خواص ماده می‌باشد که به معنای حالت بحرانی ضریب شدت تنش است. این مقدار بحرانی را با  $K_c$  نشان می‌دهند. در طول بارگذاری وقتی ضریب شدت تنش به مقدار بحرانی می‌رسد ترک شروع به گسترش می‌کند [۲].

سه حالت اصلی اعمال نیرو بر ترک وجود دارد. حالت یک (کشیدگی و باز شدگی)، حالت دو (برشی و لغزشی) و حالت سه (لغزشی و پاره شدگی) است. در شکل ۱ تصویر شماتیکی از این حالت‌ها نشان داده شده است. هر

\*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mahdi\_hosseini@ikiu.ac.ir

## ۲- مشخصات مواد

### ۲-۱- خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی سنگ می‌باشد که مقدار آن تأثیر زیادی بر پارامترهای مکانیکی سنگ دارد. تعیین چگالی و تخلخل مؤثر، مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی بر اساس استانداردهای (ISRM, 2007) انجام گرفته است [۱۴]. بر روی هر سه نوع سنگ آندزیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوره انجام شده است. هدف از این آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره، مدول یانگ و ضریب پواسون می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

### ۲-۲- مطالعات میکروسکوپی روی نمونه‌ها

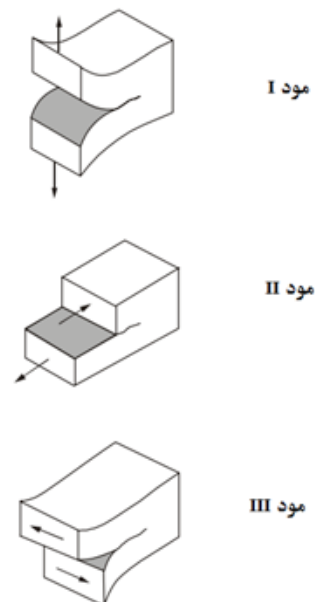
از سه نمونه آندزیت، ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک مقاطع نازک تهیه گردیده و از این مقاطع تصاویر میکروسکوپی تهیه شده است. در شکل ۲ تصویری از این مقاطع نشان داده شده است. نمونه (الف) ماسه‌سنگی آهکی و دارای بافت آهکی-سیلیسی، که نوع سیمان آن آهکی است، می‌باشد. از جمله کانی‌های اصلی و فرعی این سنگ می‌توان کلسیت، فلدسپار آلکان، کوارتز و کانی‌های اپک را نام برد. نمونه (ب) از نوع آهک و دارای زمینه و بافت کلسیت ریزبلور که بخشی از آن دچار تبلور مجدد شده، می‌باشد. از جمله کانی‌های اصلی آن می‌توان کلسیت را نام برد. و نمونه (ج) سنگی از نوع آندزیت و دارای بافت پورفیری می‌باشد. کانی اصلی آن پلاژیوکلاز و کانی‌های فرعی آن کوارتز، آمفیبول و کانی‌های اپک می‌باشد.

### ۲-۳- پراش‌نگاری اشعه‌ی ایکس (XRD) روی نمونه‌ها

تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD)، برای شناسایی ترکیب سنگ‌ها به کار گرفته شده است. تحلیل با موقعیت شروع [۲] برابر با ۱۰ درجه و موقعیت پایانی [۲] برابر با ۸۰ درجه با یک اندازه گام  $0.02^\circ$  انجام شده است. داده‌های حاصل از XRD با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت داده کاوی می‌شود. گراف‌های بدست آمده از پراش اشعه ایکس برای سه نمونه سنگ (ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و آندزیت) در شکل (۳) نشان داده شده است. نمونه ماسه-سنگ شامل کوارتز ( $\text{SiO}_2$ )، هاتروتیت ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ )، آنورتیت ( $[\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ )، پیروکسن ( $[\text{Ca-Na-Fe-Mg}(\text{Si}_2\text{O}_6)]$ ) و لارنیت ( $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_4$ )، نمونه سنگ‌آهک شامل کلسیت ( $\text{CaCO}_3$ ) و نمونه سنگ آندزیت شامل کوارتز ( $\text{SiO}_2$ )، لابرادوریت ( $(\text{Ca, Na})(\text{Al, Si})_4\text{O}_8$ ) و آلیت ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) می‌باشد.

میکروتترک‌ها در مواد مورد آزمایش قرار گرفته نیز بر نتایج آزمایشات تأثیر می‌گذارد [۱۲]. مطالعه‌ی اثر سیکل‌های حرارتی بر روی نمونه سنگ‌ها از اهمیت بالایی در تونل‌ها و سایر سازه‌ها برخوردار است. به طور مثال شاید یک تونل یا یک سازه پس از یک بار که در معرض آتش‌سوزی قرار بگیرد پایداری آن دچار مشکلی نشود ولی در آتش‌سوزی‌های بعدی با خطر جدی روبرو شود. برای حالت تأثیر سیکل‌های حرارتی بر روی چقرمگی شکست مطالعات زیادی انجام نشده است. یکی از مطالعات انجام شده تحقیق کیم و همکارانش در سال ۲۰۱۴ است. در این تحقیق تأثیر حرارت سیکلی بر روی چقرمگی شکست حالت I را به روش آزمایشگاهی و روش عددی مورد بررسی قرار داده است دو رفتار متفاوت در سنگ‌ها دیده شده است به طوری که در برخی حرارت سیکلی باعث کاهش چقرمگی و در حالت‌هایی نیز باعث افزایش چقرمگی شده است [۱۳].

در این پژوهش برای تعیین چقرمگی شکست حالت I، از روش خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه نیم‌دایره‌ای استفاده شده است سه نوع سنگ آندزیت، ماسه-سنگ، سنگ‌آهک و همچنین یک نمونه بتنی ساخته شده در آزمایشگاه، نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر سنگ، ۳ حالت متفاوت (۱) سیکل، ۵ سیکل، ۱۰ سیکل) گرم شدن تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس سرد شدن تا دمای محیط، انجام شد. یک سری آزمایش نیز بر روی نمونه‌های حرارت ندیده انجام شده است.



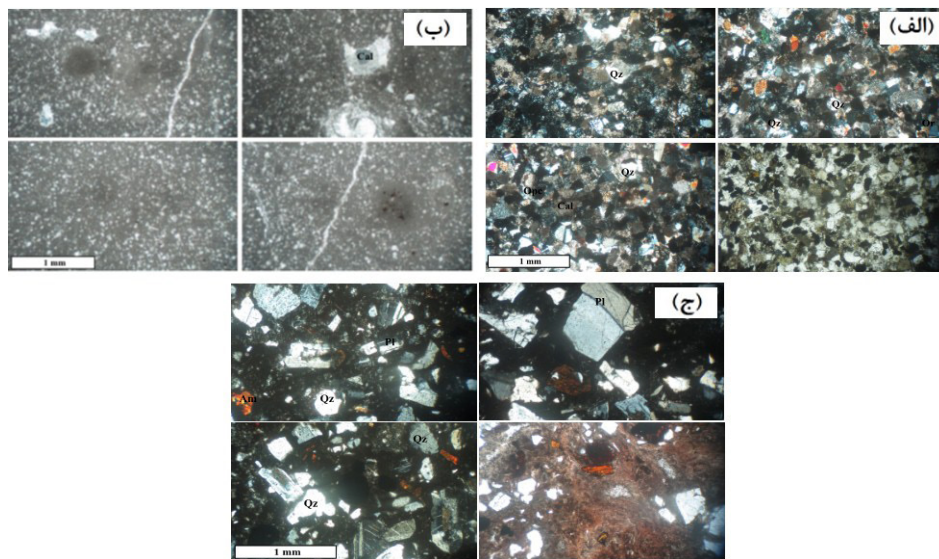
شکل ۱: حالت‌های اصلی شکست ۳

Fig. 1. The main fracture modes

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

Table 1. The physical and mechanical properties of the specimens

نمونه سنگ	مقاومت تک محوره (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	تخلخل مؤثر (%)
ماسه سنگ	۷۷/۶۲	۸/۳۴	۳۲/۷۷	۰/۲۵	۲/۳۸	۱۱/۲۶
سنگ آهک	۱۴۵/۴۵	۱۰/۲۹	۷۶/۴۹	۰/۴۱	۲/۶۹	۰/۲۷
آندزیت	۱۴۳/۷۳	۱۰/۶۹	۳۴/۵۵	۰/۲	۲/۲۳	۳/۶۰



شکل ۲: تصاویر میکروسکوپی سه نمونه سنگ (الف) ماسه سنگ (ب) سنگ آهک (ج) آندزیت

Fig. 2. Microscopic images of three rock specimens, a) sandstone, b) limestone and c) andesite

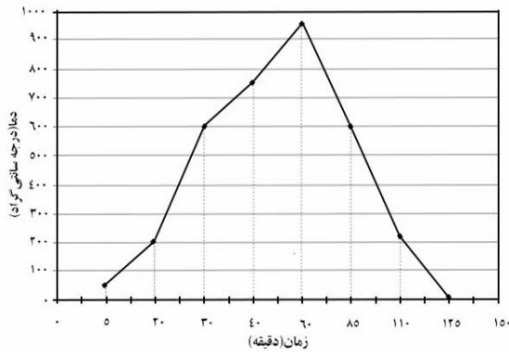
### ۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

مغزه بیشتر از ۰/۵ درجه انحراف داشته باشد [۱۱]. پس از تهیه این دیسک‌ها، آنها می‌بایست از وسط به دو نیم دیسک مساوی تقسیم شود. این کار با یک اره برشی با تیغه نسبتاً نازک انجام شده است. برای برش دیسک‌ها قالب خاصی طراحی شده است. مرحله آخر، ایجاد ترک مصنوعی بر روی نمونه‌ی نیم‌دایره‌ای می‌باشد که به منظور جلوگیری از اثر حرارت بر ترک ایجاد شده، این کار پس از اعمال حرارت بر نمونه انجام گرفته است. فرآیند ایجاد ترک با استفاده از یک تیغه‌ی نازک برش‌کاری انجام شده است. کنترل عمود بودن ترک با تراز کردن نمونه صورت گرفته است. طول ترک با احتساب مقدار برش خورده ۱۵ میلی‌متر اختیار شد. در نهایت نمونه‌ها در یک مکان نگهداری می‌شود تا شرایط محیطی یکسان از نظر رطوبت برای همه‌ی نمونه‌ها بوجود آید. مراحل آماده‌سازی نمونه به صورت طرح‌وار در شکل ۴ نشان داده شده است.

مغزه‌های سنگی به قطر ۷۳ میلی‌متر از سه بلوک سنگی شامل آندزیت، سنگ آهک و ماسه‌سنگ که از معادن اطراف قزوین تهیه گردیده، آماده شده است. مغزه‌های استاندارد با نهایت احتیاط و به صورت آرام تهیه شده و همچنین جهت خنک‌سازی سنگ در حین حفاری از آب استفاده شده تا آسیبی به نمونه و دستگاه وارد نگردد. یک سری نمونه استوانه‌ای بتنی نیز با قطر ۷۱ میلی‌متر و نسبت آب به سیمان ۰/۵ که مقدار ماسه و سیمان آن مساوی در نظر گرفته شده است، به صورت قالبی آماده‌سازی شده است. دیگر فرایند آماده‌سازی نمونه‌های بتنی مشابه نمونه‌های سنگی می‌باشد. بر روی مغزه‌های تهیه شده یک خط کشیده می‌شود تا همه‌ی نمونه‌ها در یک راستا بارگذاری شود و اثر آنیزوتروپی سنگ‌ها به حداقل برسد. مغزه‌ها با ضخامت ۳۰ میلی‌متر با استفاده از یک اره با تیغه‌ی الماسه، برش داده می‌شود. نهایت احتیاط انجام گرفته تا این برش عمود بر محور مغزه باشد. در فرآیند برش، صفحه‌ی حاصل از برش دیسک‌ها نباید از حالت عمود بر محور

همکارانش پیرامون آتش‌سوزی مجتمع تجاری صدف در قشم بدست آمده است (شکل ۵) [۱۵].

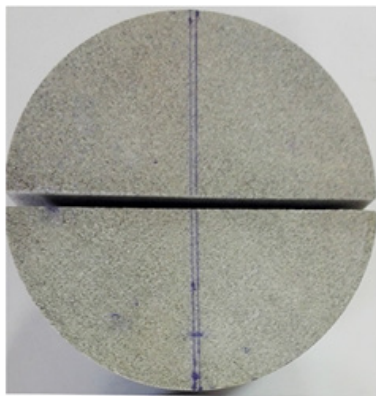
پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، نوبت به انجام آزمایش می‌رسد. آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های حرارت دیده به صورت سیکلی تحت دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. یک سری از نمونه‌ها ۱ سیکل تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه حرارت داده شده و سپس از کوره خارج شده تا دمای نمونه‌ها با دمای محیط به تعادل برسد.



شکل ۵: نمودار درجه حرارت به زمان [۱۵]

Fig. 5. Chart of temperature - time

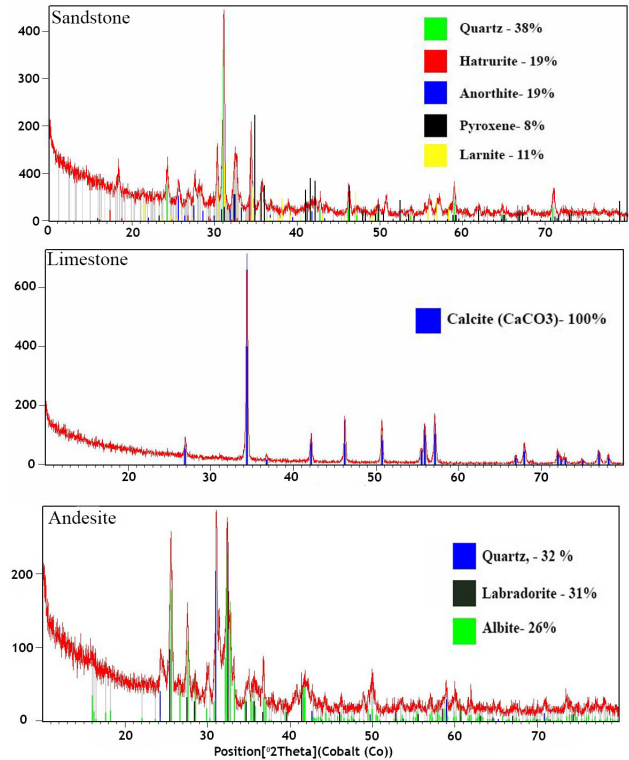
سری دوم و سوم نمونه‌ها به ترتیب ۵ و ۱۰ سیکل تا ۷۰۰ گرم و سپس سرد شده‌اند. یک سری از نمونه‌ها هم تحت حرارت قرار نگرفته است. در شکل ۶ نمونه آماده‌سازی شده جهت اعمال حرارت نشان داده شده است.



شکل ۶: نمونه آماده‌سازی شده برای اعمال حرارت

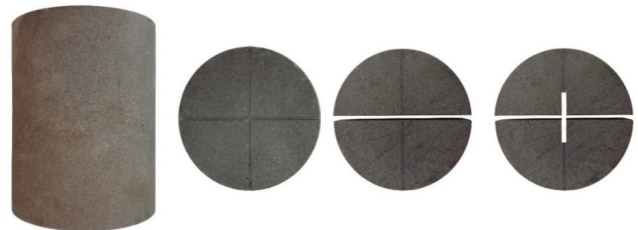
Fig. 6. The Sample prepared for heat treatment

۴-۲- انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه نیم‌دایره‌ای در شکل ۷، تجهیزات بارگذاری بر روی نمونه (Semi-Circular Specimen) نشان داده شده است.



شکل ۳: گراف پراش اشعه ایکس برای سه نمونه سنگ (الف) ماسه‌سنگ (ب) سنگ آهک (ج) آندزیت

Fig. 3. XRD patterns of for three rock samples, a) sandstone, b) limestone and c) andesite



شکل ۴: مراحل آماده‌سازی نمونه (Semi-Circular Specimen) SCB

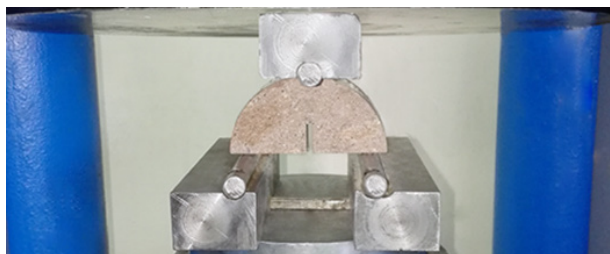
Fig. 4. Preparation of the SCB specimen (Semi Circular Specimen)

#### ۴- انجام آزمایش

##### ۴-۱- اعمال حرارت

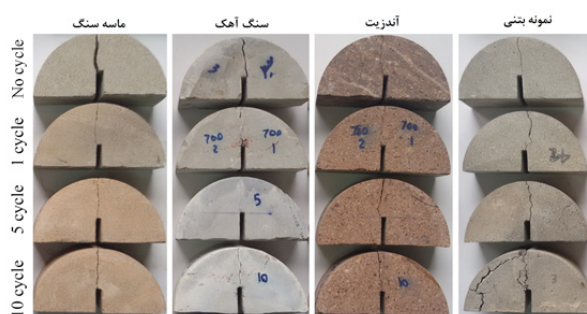
آزمایشات شامل دو مرحله عملیات حرارتی و انجام آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه نیم‌دایره‌ای می‌باشد. در کلیه آزمایشات، سرعت حرارت‌دهی کوره الکتریکی متناسب با ۱۵ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه تنظیم شده است. دلیل انتخاب این سرعت اعمال حرارت، شبیه‌سازی آتش‌سوزی برای نمونه سنگ می‌باشد و از مطالعات صورت گرفته توسط مهندسی و

طوریکه هرچه سنگ دانه ریزتر باشد تراکم ترک‌های مرزدانه‌ای بیشتر است و بالعکس. نوع مواد سازنده‌ی کانی‌ها هم که بواسطه‌ی پراش اشعه‌ی ایکس مشخص گردیده است نیز در تغییرات چقرمگی شکست مؤثر است. نتایج آزمایشات در جدول ۲ ارائه گردیده است.



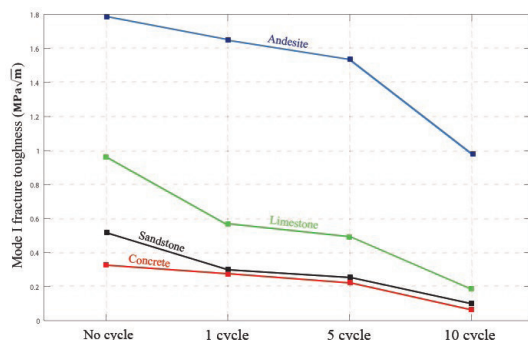
شکل ۷: تجهیزات بارگذاری بر روی نمونه SCB (Semi-Circular Specimen)

Fig. 7. Loading equipment on SCB (Semi-Circular) Specimen



شکل ۸: نمونه‌های مورد آزمایش قرارگرفته

Fig. 8. The rock specimens used in the tests



شکل ۹: مقایسه‌ای بین تغییرات چقرمگی شکست حالت I سه نمونه سنگ آندزیت، سنگ-آهک و ماسه-سنگ و نمونه بتنی در شرایط حرارت ندیده، ۱ سیکل، ۵ سیکل و ۱۰ سیکل گرم شدن (تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) - سرد شدن

Fig. 9. A comparison between mode I fracture toughness of three specimens of andesite, limestone and concrete samples in various -heating (up to 700 °C)-cooling cycles (no heating cooling, 1, 5 and 10 cycles)

چقرمگی شکست حالت  $I_c(K_{Ic})$ ، از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۲].

$$K_{Ic} = Y' \frac{P_{max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (1)$$

$Y'$ : فاکتور هندسی نمونه،  $P_{max}$ : فشار شکست،  $a$ : طول ترک،  $R$ : شعاع نمونه و  $B$ : ضخامت نمونه است.

$Y'$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$Y' = -\alpha \left( \frac{s}{2R} \right) + \left( 1.071 + 34.401 \left( \frac{s}{2R} \right) \right) \beta^2$$

$S$ : فاصله تکیه گاهی و  $\beta = a/R$  می‌باشد.

## ۵- نتیجه و بحث

در شکل ۸، تصویری از نمونه‌های مورد آزمایش قرار گرفته نشان داده شده است. برای نمونه سنگ-آهک، آندزیت و ماسه-سنگ، چقرمگی شکست حالت I در شرایط دمایی محیطی، یک سیکل، ۵ سیکل و ۱۰ سیکل گرم شدن تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و سپس سرد شدن تا دمای محیط تعیین شده است. چقرمگی شکست برای نمونه‌های حرارت‌دیده در شرایط ۱ سیکل گرم شدن - سرد شدن، نسبت به مقدار چقرمگی شکست حالت I نمونه‌هایی که تحت حرارت قرار نگرفته برای نمونه سنگ-آهک، آندزیت و ماسه سنگ، به ترتیب به مقدار ۴۱، ۹/۵ و ۴۲ درصد کاهش یافته است. چقرمگی شکست برای نمونه‌های حرارت‌دیده در شرایط ۵ سیکل گرم شدن - سرد شدن، نسبت به چقرمگی شکست نمونه‌های حرارت‌دیده در شرایط ۱ سیکل گرم شدن - سرد شدن برای سنگ-آهک، آندزیت و ماسه سنگ به ترتیب به مقدار ۱۲/۵، ۷ و ۱۳ درصد کاهش یافته است.

چقرمگی شکست برای نمونه‌های حرارت‌دیده در شرایط ۱۰ سیکل گرم شدن - سرد شدن، نسبت به مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها در شرایط ۵ سیکل برای نمونه سنگ-آهک، آندزیت و ماسه-سنگ به ترتیب به مقدار ۶۱ و ۳۶ درصد کاهش یافته است.

نمودار تغییرات چقرمگی شکست در شرایط سیکل‌های متفاوت برای ۳ نوع سنگ آندزیت، سنگ-آهک و ماسه-سنگ در شکل ۹ نشان داده شده است. در اثر افزایش درجه حرارت در سنگ تنش حرارتی ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه ضریب انبساط حرارتی کانی‌های مختلف متفاوت است این تنش‌ها در مرز کانی‌های مختلف متمرکز می‌شود و اگر از مقاومت کششی و یا برشی سنگ‌ها بیشتر شود ترک‌های جدید ایجاد می‌شود و یا ترک‌های قبلی افزایش می‌یابد [۱۶]. علاوه بر این در طی مرحله خنک شدن نمونه‌ها نیز ترک‌های جدیدی در اثر انقباض نمونه خصوصاً در مرز دانه‌های کانی‌های مختلف شکل می‌گیرد بنابراین در مجموع دانسیته ترک‌ها افزایش می‌یابد [۱۶]. مطالعات میکروسکوپی و پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها نیز نشان داد که سنگ‌ها از کانیها و ترکیبات متفاوتی تشکیل شده است و به این واسطه چگالی ترک‌ها در نمونه‌ها بعد از حرارت دیدن افزایش یافته است. تراکم این ترک‌ها نسبت عکس با اندازه‌ی دانه‌های کانی‌ها دارد به

جدول ۲: نتایج آزمایش چقرمگی شکست حالت I، تخلخل مؤثر و سرعت امواج P برای نمونه‌های بدون سیکل، با ۱ سیکل، ۵ سیکل و ۱۰ سیکل گرم و سرد شدن

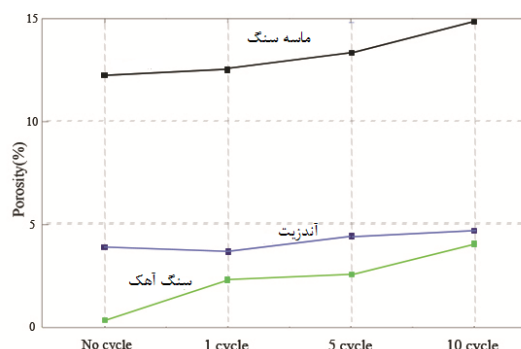
Table 2. The results of the mode I fracture toughness test, effective porosity and the velocity of longitudinal waves in in various heating (up to 700 °C)-cooling cycles (no heating-cooling, 1, 5 and 10 cycles)

نمونه‌ها	مقدار حرارت (C°)	تخلخل مؤثر (%)	سرعت امواج طولی (km/Sec)	چقرمگی شکست حالت I (MPa m <sup>1/2</sup> )
ماسه سنگ	بدون سیکل	۱۲/۲۴	۳/۱۷	۰/۵۲
	۱ سیکل	۱۲/۵۳	۳/۰۵	۰/۳۰
	۵ سیکل	۱۳/۳۳	۲/۰۳	۰/۲۶
	۱۰ سیکل	۱۴/۸۳	۱/۸۸	۰/۱۰
آندزیت	بدون سیکل	۳/۶	-	۱/۸۱
	۱ سیکل	۳/۷۱	-	۱/۶۴
	۵ سیکل	۴/۴۱	-	۱/۵۲
	۱۰ سیکل	۴/۷۲	-	۰/۹۷
سنگ آهک	بدون سیکل	۰/۳۳	-	۰/۹۵
	۱ سیکل	۲/۲۷	-	۰/۵۶
	۵ سیکل	۲/۵۷	-	۰/۴۹
	۱۰ سیکل	۴/۰۷	-	۰/۱۹
نمونه بتنی	بدون سیکل	-	۳/۶۶	۰/۳۲
	۱ سیکل	-	۲/۸۴	۰/۲۶
	۵ سیکل	-	۰/۲۷	۰/۲۴
	۱۰ سیکل	-	۰/۰۷	۰/۰۷

در شکل ۱۰، تغییرات تخلخل مؤثر برای نمونه آندزیت، سنگ آهک و ماسه سنگ در شرایط بدون سیکل، ۱ سیکل، ۵ سیکل و ۱۰ سیکل نشان داده شده است.

در نمونه سنگ‌ها بعد از اعمال سیکل‌های گرم شدن و سرد شدن، میکروتترک‌ها ایجاد و گسترش می‌یابند که این باعث افزایش تخلخل در سنگ می‌گردد [۱۷]. ترک‌های ناشی از اعمال حرارت به صورت سیکلی، به دلیل عدم مطابقت در ضریب انبساط حرارتی کانی‌ها در یک ناحیه حرارتی همگن می‌باشد [۱۸].

وقتی نمونه سنگ تحت حرارت قرار می‌گیرد دو عامل باعث تغییر چقرمگی شکست می‌شود عامل اول عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی در بین ذرات کانی‌ها و تمرکز تنش در مرز کانی‌ها است و عامل دوم تغییرات در کانی‌شناسی سنگ و تبدیل برخی مواد به یکدیگر در اثر حرارت می‌باشد.



شکل ۱۰: تغییرات تخلخل مؤثر برای نمونه‌های آندزیت، سنگ آهک و ماسه سنگ در شرایط سیکل‌های متفاوت

Fig. 10. The changes in effective porosity of sandstone, andesite and limestone at different heating-cooling cycles

انجام گرفته است که به دلیل کمبود نمونه، این آزمایشات فقط بر روی ماسه سنگ و نمونه بتنی انجام گرفته است. نمونه‌های آماده‌سازی شده برای تعیین سرعت امواج طولی برای نمونه‌های ماسه سنگ و نمونه‌های بتنی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج این آزمایشات نیز در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

کاهش سرعت امواج طولی در نمونه ماسه سنگ و نمونه بتنی بیانگر افزایش تخلخل ناشی از ترک‌ها و میکروتُرک‌های حاصل از کرنش‌های حرارتی در نمونه‌ها می‌باشد. این ترک‌ها در نمونه بتنی قابل مشاهده است (شکل ۱۱). به طوری که بعد از حالت ۵ سیکل و ۱۰ سیکل حرارت دادن و سرد شدن پوسته خارجی نمونه در آستانه گسیخته شدن قرار می‌گیرد.

چقرمگی شکست، نمونه بتنی در حالت ۱ سیکل نسبت به نمونه حرارت ندیده ۱۹ درصد کاهش یافته است. چقرمگی شکست نمونه بتنی در حالت ۵ سیکل نسبت به حالت ۱ سیکل ۸ درصد کاهش و در حالت ۱۰ سیکل نسبت به حالت ۵ سیکل ۷۱ درصد کاهش یافته است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد چقرمگی شکست بتن بعد از آتش سوزی کاهش می‌یابد که این مقدار بعد از چندین سیکل گرم شدن - سرد شدن که نشان دهنده دفعات آتش سوزی است بسیار کاهش می‌یابد و در نمونه‌ها ترک‌های فراوانی به وجود می‌آید که نشان می‌دهد در صورت آتش سوزی در تونل چقرمگی شکست پوشش‌های بتنی تونل به شدت کاهش می‌یابد. برای توجیه بهتر رفتار سنگ، آزمایشاتی برای تعیین سرعت امواج طولی



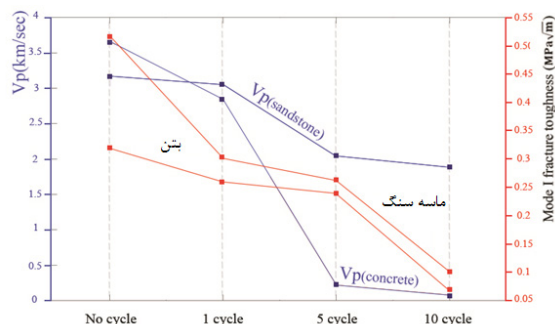
شکل ۱۱: نمونه‌های آماده‌سازی شده جهت اندازه‌گیری سرعت امواج طولی در سیکل‌های گرم شدن (تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) - سرد شدن

Fig. 11. The samples prepared to measure the velocity of longitudinal waves in heating (up to 700 °C) – Cooling cycles

درجه گرم و سپس سرد شده‌اند. نتایج این تحقیق در ذیل ارائه شده است: با افزایش سیکل‌های گرم شدن - سرد شدن سنگ، چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. چقرمگی شکست با تخلخل رابطه عکس دارد به طوری که با افزایش تخلخل، چقرمگی کاهش یافته است. تأثیر سیکل‌های گرم شدن - سرد شدن بر روی نمونه‌های بتنی بیشتر از سنگ‌ها است به طوری که پس از چندین سیکل، در نمونه‌های بتنی ترک‌های بزرگی ایجاد شده است. با افزایش تعداد سیکل‌های حرارتی اعمال شده بر نمونه، سرعت امواج طولی در نمونه‌ها کاهش می‌یابد که این کاهش در نمونه بتنی بسیار شدید است.

#### منابع

- [1] O. Stephansson, Recent rock fracture mechanics developments, in: 1st Iranian rock mechanics conference, 2002, pp. 675-698.
- [2] D. Brock, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Kluwer Academic pub, 1989.
- [3] J. Hudson, J. Harrison, Engineering rock mechanics.



شکل ۱۲: تغییرات چقرمگی شکست و تغییرات سرعت امواج طولی برای نمونه بتنی و نمونه ماسه سنگ تحت سیکل‌های حرارتی متفاوت

Fig. 12. The changes in mode I fracture toughness and effective porosity of concrete and sandstone at different heating-cooling cycles

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر سیکل‌های گرم شدن - سرد شدن بر روی چقرمگی شکست حالت I، برای سه نوع سنگ شامل ماسه سنگ، سنگ آهک و آندزیت و همچنین بتن بررسی شده است نمونه‌ها ۱، ۵ و ۱۰ سیکل تا ۷۰۰

- abstracts, Elsevier, 1994, pp. 185-197.
- [11] M. Kuruppu, Y. Obara, M. Ayatollahi, K. Chong, T. Funatsu, ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen, in: *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*, Springer, 2013, pp. 107-114.
- [12] P. Meredith, B. Atkinson, Stress corrosion and acoustic emission during tensile crack propagation in Whin Sill dolerite and other basic rocks, *Geophysical Journal International*, 75(1) (1983) 1-21.
- [13] K. Kim, J. Kemeny, M. Nickerson, Effect of rapid thermal cooling on mechanical rock properties, *Rock mechanics and rock engineering*, 47(6) (2014) 2005-2019.
- [14] R. Ulusay, J.A. Hudson, *The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*, Compilation arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 2007.
- [15] V.R. Mohtadi, A.R. Mohtadi, The results of ultrasonic testing on the concrete structure damaged in a fire accident, *Sadaf Commercial Complex, Qeshm, Civil Journal, Retrofitting and Improvement*, (31) (2015) 79-83.
- [16] Z. Zhao, Thermal influence on mechanical properties of granite: a microcracking perspective, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(3) (2016) 747-762.
- [17] D. Jansen, S. Carlson, R. Young, D. Hutchins, Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 98(B12) (1993) 22231-22243.
- [18] Z. Zomeni, Thermally induced microfracturing in quartzite, Masters of Science dissertation, Mining and Geological Engineering, the University of Arizona, Tucson, 199 (1997).
- An introduction to the principles. Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, UK, in, Pergamon. Elsevier Science Ltd, 1997.
- [4] L. Barker, A simplified method for measuring plane strain fracture toughness, *Engineering Fracture Mechanics*, 9(2) (1977) 361-369.
- [5] K. Matsuki, S. Hasibuan, H. Takahashi, Specimen size requirements for determining the inherent fracture toughness of rocks according to the ISRM suggested methods, in: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, Elsevier, 1991, pp. 365-374.
- [6] F. Ouchterlony, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock, *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 25(2) (1988).
- [7] D.K. Sheity, A.R. Rosenfield, W.H. Duckworth, Fracture toughness of ceramics measured by a chevron-notch diametral-compression test, *Journal of the American Ceramic Society*, 68(12) (1985) C-325-C-327.
- [8] R. Fowell, J. Hudson, C. Xu, X. Zhao, Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1995, pp. 322A.
- [9] F. Ouchterlony, On the background to the formulae and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens, in: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Elsevier, 1989, pp. 13-23.
- [10] I. Lim, I. Johnston, S. Choi, J. Boland, Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 1—mode I, in: *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics*

Please cite this article using:

A. Jabari, M. Hosseini, The Experimental Investigation of the Effect of Heating-Cooling Cycle Number of Rock on Mode I Fracture Toughness, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(4) (2018) 793-800.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12659.5245

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

