

## بررسی اثر مدول الاستیسیته و فشار جانبی روی چقرمگی شکست مود I نمونه‌های گچی

مهدی حسینی<sup>۱\*</sup>، مهدیه جلالی پور<sup>۲</sup> و سودابه ملکی<sup>۳</sup>

۱، ۲ و ۳- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

نویسنده مسئول: meh\_hosseini18@yahoo.com \*

دریافت: ۹۵/۳/۱۶ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۹

### چکیده

سه مود جابجایی ترک وجود دارد. مود اول یا حالت بازشدگی که سطوح ترک در جهت عمود بر سطح ترک جدا می‌شوند. مود دوم یا حالت برشی که در این حالت جابجایی وجوه ترک در صفحه ترک ولی عمود بر جبهه ترک می‌باشد و مود سوم یا حالت لغزش و پاره‌شدگی است که در این حالت جابجایی وجوه ترک در صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است. برخی کاربردهای مکانیک شکست سنگ در شکست هیدرولیکی، برش و انفجار در سنگ، حفاری مکانیزه، پایداری شیروانی سنگی و خردایش مواد معدنی است. هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر مدول الاستیسیته و فشار جانبی بر روی چقرمگی شکست مود اول استوانه‌های توخالی جدار ضخیم گچی می‌باشد و چاه نفت در آزمایشگاه شبیه‌سازی می‌شود. برای انجام آزمایش روی نمونه‌های مصنوعی گچی به قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر دو ترک مصنوعی با ابعاد مشخص به صورت متقارن ایجاد شد. آنگاه بر روی نمونه‌ها تنش سه‌محوری اعمال و فشار لازم برای گسیختگی نمونه‌های دارای ترک‌های مصنوعی اندازه‌گیری شد. پنج آزمایش سه‌محوری برای بررسی اثر مدول الاستیسیته و شش آزمایش سه‌محوری برای بررسی اثر فشار جانبی بر روی چقرمگی شکست مود اول انجام گردید. نتایج تحقیق نشان می‌دهد چقرمگی شکست با افزایش مدول الاستیسیته و فشار جانبی افزایش می‌یابد، هم‌چنین تاثیر مدول الاستیسیته روی چقرمگی شکست بیش‌تر است. رابطه چقرمگی شکست با مدول الاستیسیته غیر خطی، و رابطه چقرمگی شکست با فشار جانبی خطی است.

واژه‌های کلیدی: چقرمگی شکست، مود I، مدول الاستیسیته، فشار جانبی، نمونه گچی

### ۱- مقدمه

محیطی، امکان جلوگیری از حرکت ترک‌ها و غیره می‌باشد. ترک‌ها و ناپیوستگی‌ها از ویژگی‌های متداول توده‌های سنگی می‌باشند و هر فعالیت تحریک کننده در توده‌های سنگی (مانند زلزله، انفجار سنگ در معادن، تخریب شیب‌های سنگی و...) ممکن است سبب جابجایی آن‌ها در امتداد شکست‌های موجود و یا پیدایش شکست‌های جدید گردد. از طرفی دیگر می‌توان به کمک پدیده شکست، فرایندهایی کاربردی بر روی سنگ‌ها انجام داد (مانند شکست‌های هیدرولیک، سوراخ کاری، برش، انفجار، آسیاب کردن و ...) رهیافت مکانیک شکست در مواد سنگی بطور عمده جوانه زنی و رشد ترک (یا ترک‌های) خاص را در مواد سنگی و تحت حوزه تنش معین مورد مطالعه قرار می‌دهد. این ترک (یا ترک‌های) خاص می‌تواند از پیش در نمونه سنگی موجود بوده و یا طی فرایند افزایش بار بوجود آید. رشد ترک اغلب ماهیتی ناگهانی و ناپایدار دارد. اولین کارهای انجام شده بر روی مکانیک شکست متعلق به گریفیث می‌باشد. او

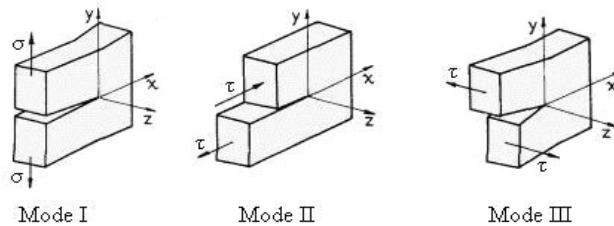
شکست زود هنگام قطعات و سازه‌های ترک‌دار منجر به پیدایش علم مکانیک شکست گردید. مکانیک شکست، بررسی فرآیند رشد ترک در یک محیط تحت حوزه معین تنش می‌باشد. مکانیک شکست در مهندسی سنگ برای ارزیابی پایداری، قابلیت شکست و حفاری در سازه‌های سنگی، به کار گرفته می‌شود.

چنانچه نمونه‌ای دارای ترک اولیه باشد، معیارهای استحکام و شکست آن تحت بارگذاری‌های مختلف، توسط مباحث مکانیک شکست تعیین می‌شود. مکانیک شکست از جمله مباحث مهم در علوم مهندسی می‌باشد که به بررسی شرایط لازم برای استحکام قطعات ترک‌دار می‌پردازد.

در واقع مکانیزم شکست شرحی کمی بر فرایند شکست یک قطعه بکر توسط رشد ترک می‌باشد. حوزه مکانیک شکست دربرگیرنده روابط میان ماکزیمم تنش مجاز، اندازه و محل ترک، سرعت رشد ترک ناشی از اثرات

یک قطعه استوانه‌ای ترک‌دار را تحت بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای قرار داد و روشی را برای تعیین چقرمگی شکست مود اول ارائه داد [۴].

دسته‌بندی شکست بر اساس مود شکست از اصطلاحات قدیم مکانیک شکست است. سه مود شکست در مکانیک شکست امکان‌پذیر است که مود اول، مود دوم و مود سوم (شکل ۱) نامیده می‌شوند [۹ و ۱۰].



شکل ۱. مدهای شکست [۱]

شکل ۲ باشد در این ترک  $a_0$ : فاصله تا نوک ترک چورون  $0.15D$  و زاویه ترک چورون  $90^\circ$  درجه است)، آزمایش بارگذاری کششی بر نمونه استوانه کوتاه و آزمایش بارگذاری بر روی دیسک برزبلی دارای ترک چورون اشاره کرد [۷، ۱۱ و ۱۲]. هر چند در سال ۲۰۱۴ آزمایش بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های نیم دایره هم از سوی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ به عنوان یک روش استاندارد پذیرفته شده است [۸]. در جهان مطالعات آزمایشگاهی توسط چن<sup>۱</sup> بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی انجام شده است [۶]. با توجه به اینکه در نمونه‌ها ترک اولیه موازی محور حفره مرکزی می‌باشد. لذا وجوه ترک تنها در معرض بازشدگی قرار می‌گیرند و به همین دلیل فقط چقرمگی شکست مود اول بررسی می‌گردد.

دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسن در چقرمگی شکست موثرند. هدف از این تحقیق بررسی اثر مدول الاستیسیته و فشار جانبی روی چقرمگی شکست مود اول می‌باشد. این تحقیق بر پایه روش آزمایشگاهی استوار است. این مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی گچ انجام می‌شود. دو ترک متقارن در دو طرف نمونه به صورت مصنوعی ایجاد می‌شود و اثر مدول الاستیسیته و فشار جانبی روی چقرمگی شکست مود اول بررسی می‌گردد.

مطالعاتش را در حدود سال ۱۹۲۰ آغاز نمود. بعد از آن ایروین در سال‌های ۱۹۵۲ تا ۱۹۵۴ ضریبی به نام ضریب شدت تنش را تعریف کرد که مقدار تنش محلی را در اطراف نوک ترک نشان می‌دهد. تحقیقات اولیه در زمینه سنگ‌ها به کارهای هوک و بینیاوسکی در سال ۱۹۶۵ در آفریقای جنوبی بر می‌گردد. در زمینه چقرمگی شکست مود اول که موضوع این تحقیق است کارهای مختلفی انجام شده است از جمله کار اوچترونی که در سال ۱۹۸۱

چقرمگی شکست، مقاومت در مقابل شکست می‌باشد و هم‌چنین مقدار بحرانی ضریب شدت تنش نیز نامیده می‌شود. به طور کلی، چقرمگی شکست به عواملی چون: دما، محیط، نرخ بارگذاری، ترکیب ماده و ساختار میکروسکوپی به همراه اثرات هندسی بستگی دارد. چقرمگی شکست با علامت  $K_{Ic}$  نشان داده می‌شود [۳ و ۲].

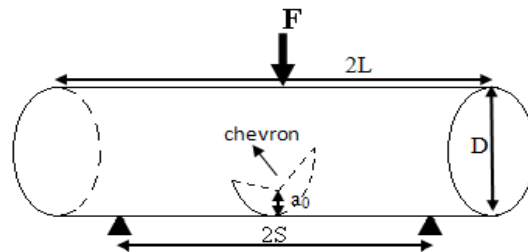
بسیاری از مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری بالا در نقاط مختلف جهان از جمله در ایران، در حال تمام شدن می‌باشد از این رو تامین مواد اولیه مورد نیاز برای مصارف گوناگون صنعتی از مخازن با نفوذپذیری پایین صورت می‌گیرد. برای بهره‌برداری بهینه از این مخازن، لازم است که عملیات اضافی روی این مخازن صورت گیرد. روش‌های گوناگونی برای افزایش بازده چاه نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد که یکی از این روش‌ها شکست هیدرولیکی می‌باشد. در زمینه بررسی چقرمگی شکست در عملیات شکست هیدرولیکی در ایران مطالعات آزمایشگاهی انجام نشده ولی در زمینه مدل‌سازی عددی پژوهش‌هایی توسط آیت‌اللهی انجام شده است [۱]. انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ آزمایش‌هایی را برای تعیین چقرمگی شکست مود اول سنگ پیشنهاد کرده است که می‌توان به آزمایش بارگذاری خمشی سه نقطه‌ای بر روی نمونه استوانه‌ای دارای ترک چورون (ترکی است که مشخصات آن مطابق

<sup>۱</sup>. Chen

## ۲- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌ها استفاده شده نیز مطابق با جدول ۱ است. یک هفته نمونه‌ها در محیط آزمایشگاه خشک شدند سپس با استفاده از دستگاه ساب (شکل ۳ ب) نمونه‌ها صیقل داده شد. برای ساخت استوانه‌های توخالی از قالب‌های پلاستیکی دو تکه مطابق شکل ۴ و برای ایجاد ترک در نمونه از تیغه‌ای به ضخامت ۱ میلی‌متر، عرض ۵ میلی‌متر (شکل ۴) استفاده می‌شود. شکل ۵ قالب استوانه‌ای تو خالی بعد از ریختن گچ در قالب را نشان می‌دهد. مقادیر گچ و آب مورد نیاز برای ساخت نمونه‌های با نسبت‌های مختلف گچ به آب در جدول ۲ ارائه شده است. نمونه‌ها بعد از یک هفته خشک شدن در محیط آزمایشگاه صیقل داده می‌شوند.

در این پژوهش دو سری نمونه از ترکیب آب و گچ با نسبت‌های متفاوت و ابعاد مختلف ساخته شد، استوانه‌های توپر برای تعیین خواص مکانیکی سنگ و نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی ترک‌دار برای بررسی اثر مدول الاستیسیته و فشار جانبی روی چقرمگی شکست مورد اول استفاده قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است در این پژوهش ۶ نمونه استوانه‌ای توپر و ۱۰ نمونه استوانه‌ای توخالی آماده شده است. نمونه‌های استوانه‌ای توپر برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های مصنوعی با استفاده از قالب‌هایی که در شکل ۳ الف نشان داده شده، ساخته شده است. نسبت جرمی گچ به آب که در تهیه



شکل ۲. ترک چورون در نمونه استوانه‌ای



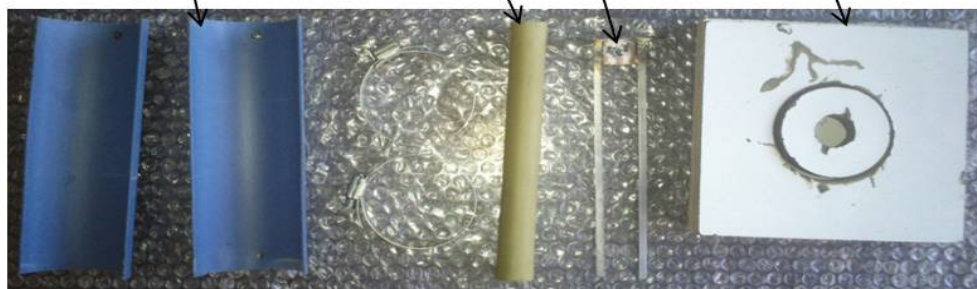
شکل ۳. الف) قالب نمونه‌های استوانه توپر، ب) دستگاه ساب و برش

اوله برای ساخت استوانه

پایه جهت استقرار وسایل روی آن

تیغه برای ایجاد ترک

اوله برای ایجاد حفره مرکزی



شکل ۴. اجزای قالب استوانه‌های تو خالی



شکل ۵. قالب استوانه‌ای تو خالی بعد از ریختن گچ در قالب

جدول ۱. جرم گچ و آب برای ساخت استوانه‌های توپر

جرم آب (gr)	جرم گچ (gr)	نسبت جرمی گچ به سیمان
۱۸۳/۳۳	۳۶۶/۶۶	۶/۳
۲۰۶/۲۵	۳۴۳/۷۵	۵/۳
۲۳۵/۷۱	۳۱۴/۲۸	۴/۳

جدول ۲. جرم گچ و آب برای ساخت استوانه‌های توخالی

وزن آب (gr)	وزن گچ (gr)	نسبت جرم گچ به آب
۴۲۵	۸۵۰	۶/۳
۴۸۲	۸۰۰	۵/۳
۵۴۸	۷۳۰	۳/۴

محاسبه، نمایش، پردازش و ثبت نتایج آزمایش به صورت خودکار و قابلیت اتصال به رایانه و چاپگر جهت نمایش نتایج می‌باشد.

دستگاه اعمال و کنترل فشار جانبی ساخت شرکت Matest ایتالیا بوده و دارای ظرفیت ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد. این دستگاه به سلول تغییر یافته هوک وصل شده و با پمپ کردن روغن به سلول، فشار به غشای انعطاف‌پذیر که در برگیرنده نمونه است، اعمال می‌گردد. این پمپ به یکی از دو صفحه بارگذاری نشان داده شده در شکل ۶ ب وصل می‌شود. این دو صفحه بارگذاری بر روی دو طرف نمونه که در داخل سلول است، قرار می‌گیرد. غشای انعطاف‌پذیر در داخل حفره مرکزی رفته و از دو انتها در داخل صفحات بارگذاری محکم می‌گردد، مطابق شکل ۶ ج که یکی از صفحات بارگذاری به غشای انعطاف‌پذیر متصل است، سپس با اعمال فشار و پمپ شدن روغن به داخل غشا و باز شدن آن، ترک رشد کرده و در نهایت سنگ دچار شکست می‌شود.

### ۳- دستگاه آزمایش

دستگاه مورد استفاده برای مطالعه چقرمگی شکست در این تحقیق از چهار بخش مجزا، شامل: سلول آزمایش، جک اعمال کننده بار محوری، پمپ اعمال کننده فشار جانبی و پمپ اعمال کننده فشار داخل حفره مرکزی تشکیل می‌شود که در ادامه به توضیح هر بخش به صورت جداگانه پرداخته می‌شود.

سلول آزمایش مورد استفاده در این تحقیق، سلول تغییر یافته هوک می‌باشد که در شکل ۶ الف به تصویر کشیده شده است. این سلول دارای دو درپوش فولادی، یک غشای انعطاف‌پذیر برای در بر گرفتن نمونه سنگ و اعمال فشار جانبی است. این سلول برای نمونه‌هایی با قطر ۷۳ میلی‌متر طراحی شده است که دارای حفره مرکزی به قطر ۲۵ میلی‌متر در وسط خود می‌باشند. ارتفاع مناسب نمونه‌هایی که در داخل این سلول قرار می‌گیرند ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

جک اعمال کننده بار محوری یک جک فشاری برقی و دیجیتالی تمام خودکار با ظرفیت ۲۰۰۰ KN با قابلیت



شکل ۶. الف) نمای کلی از سلول تغییر یافته هوک، ب) صفحات بارگذاری، غشای انعطاف‌پذیر و کف‌پوش‌ها، ج) غشا انعطاف‌پذیر در داخل نمونه و متصل به صفحه بارگذاری

شده است که برای تعیین مدول الاستیسیته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نتایج این آزمایش را در جدول ۳ مشاهده می‌کنید. برای هر نسبت جرمی گچ به آب روی ۲ نمونه آزمایش انجام شده که در جدول ۳ میانگین نتایج برای هر حالت ذکر شده است.

برای محاسبه‌ی چقرمگی شکست در نمونه‌های استوانه‌های توخالی از رابطه (۱) استفاده می‌شود [۶]:

$$K_{Ic} = \frac{1 + \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2}{1 - \left(\frac{R_i}{R_o}\right)^2} p \sqrt{\pi a} K^* \quad (1)$$

در این رابطه:  $K_{Ic}$ : چقرمگی شکست مود I،  $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$

$R_i$ : قطر داخلی (mm)

$R_o$ : قطر خارجی (mm)

$a$ : ترک طول (m)

$p$ : فشار داخلی بر روی سطح داخلی نمونه (MPa)

$K^*$ : ضریب تعیین شده توسط  $R_o/R_i$  و  $a/(R_o-R_i)$  از روی شکل ۸. تعیین  $K^*$  از روی شکل ۱۱ با توجه به جدول ۴ و مشخص شدن  $R_w = R_o/R_i \cong 3$  و  $a/(R_o-R_i)$

انجام می‌گیرد، به طوریکه مقدار معلوم  $a/(R_o-R_i)$  را روی محور افقی تعیین کرده از این نقطه یک عمود اخراج کرده تا منحنی  $R_w = 3$  را قطع کند سپس از روی منحنی  $R_w$  بر محور قائم، عمود کرده تا مقدار  $K^*$  به دست می‌آید. برای بررسی اثر مدول الاستیسیته روی چقرمگی شکست ۶ آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی انجام شده است در تمام این آزمایش‌ها فشار جانبی ۱/۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. با توجه به اینکه

#### ۴- برنامه آزمایش

در این تحقیق روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر برای تعیین مدول الاستیسیته و فشار جانبی و روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی برای تعیین چقرمگی شکست مود I آزمایش انجام می‌شود. روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر فقط آزمایش تراکم تک‌محوری انجام می‌شود. مراحل انجام آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی به شرح ذیل است:

(۱) نمونه در داخل سلول هوک قرار می‌گیرد. پس از آن غشای انعطاف‌پذیر که در صفحه بارگذاری قرار گرفته و محکم شده است، در داخل حفره مرکزی رفته و به همراه سلول بین صفحات قرار می‌گیرد.

(۲) سلول در زیر دستگاه بارگذاری محوری قرار می‌گیرد.  
(۳) دستگاه اعمال فشار جانبی و فشار داخل حفره مرکزی به سلول متصل می‌شود و روشن می‌گردد و سلول با روغن پر شده و از طریق دریچه هواگیری هوای سلول خارج می‌شود.

(۴) بار محوری و فشار جانبی به طور همزمان افزایش یافته تا اینکه فشار جانبی و بار محوری به حد مطلوب برسد و سپس با ثابت نگه داشتن بار محوری و فشار جانبی، فشار داخل حفره مرکزی افزایش می‌یابد تا نمونه دچار شکست شود (شکل ۷).

#### ۵- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر که آزمایش تراکم تک محوری انجام می‌شود، یک کرنش‌سنج الکتریکی نصب

جدول‌های ۴ و ۵ به علت آنکه ابعاد هندسی نمونه‌ها و نتایج آزمایش‌ها در حالت نسبت جرمی گچ به آب ۵/۳ دو نمونه یکسان بود فقط نتایج یک نمونه ذکر شده است. حال با توجه به رابطه (۱) چقرمگی شکست مود I محاسبه می‌شود (جدول ۵).

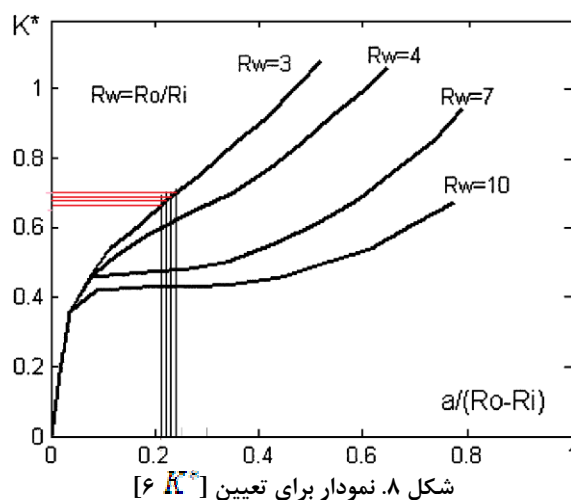
نمونه‌ها مصنوعی است نتایج برای دو نمونه مربوط به هر نسبت جرمی گچ به آب بسیار به هم نزدیک است و مانند نمونه‌های طبیعی نیست که به علت ناهمگن بودن نمونه‌ها، اختلاف نتایج زیاد است. لذا برای هر حالت آزمایش روی دو نمونه کفایت می‌کند. در ضمن در



شکل ۷. سلول سه محوری بعد از متصل کردن پمپ‌ها به ورودی‌های سلول

جدول ۳. مقدار مدول الاستیسیته

نسبت جرمی گچ به آب	مدول الاستیسیته (GPa)
۴/۳	۲/۱
۵/۳	۳/۲۵
۶/۳	۸



شکل ۸. نمودار برای تعیین  $K^*$

جدول ۴. پارامترهای نمونه‌های استوانه‌ای توخالی

$K^*$	$a/(R_o-R_i)$	a	$R_o/R_i$	قطر داخلی	قطر خارجی	نسبت جرم گچ به آب
۰/۷	۰/۲۴	۵/۷۶	۲/۸۹	۲۴/۷	۷۱/۴	۶/۳a
۰/۶۷۵	۰/۲۲	۵/۳	۲/۹۳	۲۴/۶	۷۲	۶/۳b
۰/۷	۰/۲۴	۵/۶	۲/۸۹	۲۴/۸	۷۱/۶	۵/۳a
۰/۶۸۷۵	۰/۲۳	۵/۲	۲/۸۳	۲۴/۹	۷۰/۵	۴/۳a
۰/۶۶۲۵	۰/۲۱	۵	۲/۹۵	۲۴/۵	۷۲/۳	۴/۳b

جدول ۵. چقرمگی شکست نمونه‌ها

$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K^*$	a(mm)	P(MPa)	$(Ri/Ro)^2$	نسبت جرم گچ به آب
۰/۷۰۶	۰/۷	۵/۷۶	۵/۹۷	۰/۱۲	۶/۳a
۰/۶۴۴	۰/۶۷۵	۵/۳	۵/۸۵	۰/۱۱۷	۶/۳b
۰/۴۲۵	۰/۷	۵/۶	۳/۵۹	۰/۱۲	۵/۳a
۰/۲۸۴	۰/۶۸۷۵	۵/۲	۲/۵۱	۰/۱۲۵	۴/۳a
۰/۲۶۴	۰/۶۶۲۵	۵	۲/۵۳	۰/۱۱۵	۴/۳b

۳ بین چقرمگی شکست مود I با مدول الاستیسیته برقرار است [۵]. همانطور که مشاهده می‌شود یک رابطه مستقیم و غیر خطی بین چقرمگی شکست مود I و مدول الاستیسیته برقرار است که با نتایج آزمایش‌ها مطابقت دارد.

$$K_{Ic}^2 = G_{Ic} \cdot E \quad (3)$$

در این رابطه:  $G_{Ic}$ : انرژی شکست و  $E$ : مدول الاستیسیته می‌باشد.

برای بررسی اثر فشار جانبی بر روی چقرمگی شکست مود I نیز ۶ آزمایش در فشارهای جانبی ۰/۵، ۱/۲۵ و ۱/۷۵ مگاپاسکال انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. در سری دوم آزمایش‌ها نسبت جرم گچ به آب ۶/۳ است.

برای بررسی اثر مدول الاستیسیته بر روی چقرمگی شکست مود I به کمک اطلاعات نتایج آزمایش که در جدول ۶ ارائه شده نمودار چقرمگی شکست  $K_{Ic}$  (میانگین چقرمگی دو نمونه a و b می‌باشد) در مقابل مدول الاستیسیته  $E$  رسم شده است (شکل ۹).

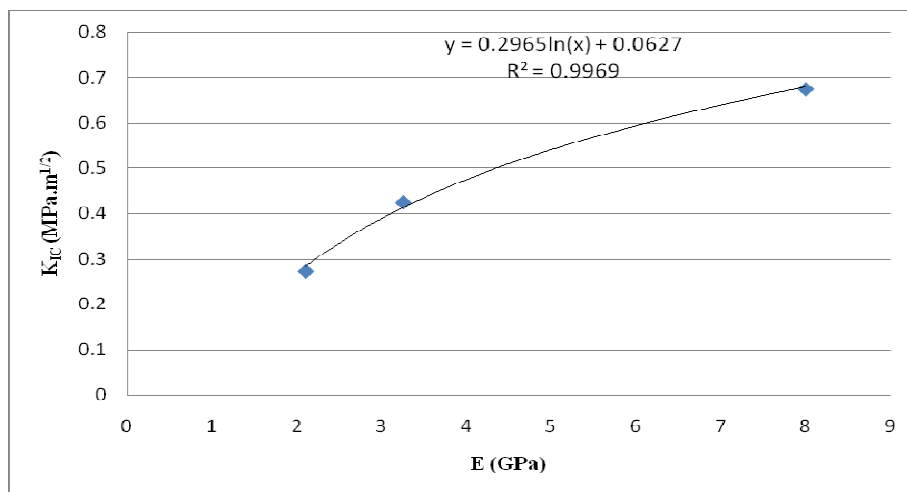
با توجه به شکل ۹ رابطه‌ی (۲) بین چقرمگی شکست و مدول الاستیسیته برقرار می‌باشد:

$$K_{Ic} = 0.2965 \ln(E) + 0.0627 \quad (2)$$

در این رابطه:

$E$ : مدول الاستیسیته با واحد (GPa) و  $K_{Ic}$ : چقرمگی شکست مود I با واحد (MPa.m<sup>1/2</sup>).

با توجه به شکل ۹ می‌توان گفت رابطه چقرمگی شکست با مدول الاستیسیته غیر خطی و ضریب تعیین آن ۰/۹۹۶۹ است. در مکانیک شکست الاستیک خطی رابطه



شکل ۹. نمودار چقرمگی شکست - مدول الاستیسیته

جدول ۶. نتایج آزمایش

$K_{Ic}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت جرم گچ به آب
۰/۶۷۵	۸	۶/۳
۰/۴۲۵	۳/۲۵	۵/۳
۰/۲۷۴	۲/۱	۴/۳

جدول ۷. چقرمگی شکست نمونه‌ها

$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	$K^*$	a(mm)	P(MPa)	$(R_i/R_o)^2$	فشار جانبی (MPa)
۰/۴۲۵	۰/۷	۵/۶	۳/۵۹	۰/۱۲	۰/۵
۰/۳۹۳	۰/۶۸۷۵	۵/۲	۳/۴۸	۰/۱۲۵	۰/۵
۰/۶۴۴	۰/۶۷۵	۵/۳	۵/۸۵	۰/۱۱۷	۱/۲۵
۰/۷۰۶	۰/۷	۵/۷۶	۵/۹۷	۰/۱۲	۱/۲۵
۰/۷۶۳	۰/۶۶۲۵	۵	۷/۳	۰/۱۱۵	۱/۷۵
۰/۸۰۲	۰/۶۸۷۵	۵/۲	۷/۱	۰/۱۲۵	۱/۷۵

نمونه‌های سیمانی ترک‌دار انجام شده است و همانطور که رابطه ۴ نشان می‌دهد با افزایش فشار جانبی، چقرمگی شکست مود I نیز افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده مطابقت نتایج این تحقیق با مطالعات چن می‌باشد [۶].

$$K_{IC} = 0.2544P_c + 0.2336 \quad (5)$$

برای انجام آنالیز حساسیت، در نمونه ۳ مربوط به نسبت جرمی گچ به آب ۵/۳ مقدار مدول الاستیسیته ۲۰ درصد کاهش داده شده است و درصد تغییرات چقرمگی شکست بررسی می‌شود. این مقادیر در جدول (۹) آمده است.

برای انجام آنالیز حساسیت، فشار جانبی در نمونه‌ای که تحت فشار جانبی ۱/۲۵ مگاپاسکال قرار گرفته ۲۰ درصد کاهش داده شده است و درصد تغییرات چقرمگی شکست بررسی می‌شود. این مقادیر در جدول (۱۰) آمده است.

برای بررسی اثر فشار جانبی بر روی چقرمگی شکست مود I به کمک اطلاعات نتایج آزمایش که در جدول ۸ ارائه شده نمودار چقرمگی شکست  $K_{IC}$  (میانگین چقرمگی دو نمونه در هر فشار جانبی می‌باشد) در مقابل فشار جانبی رسم شده است (شکل ۱۰).

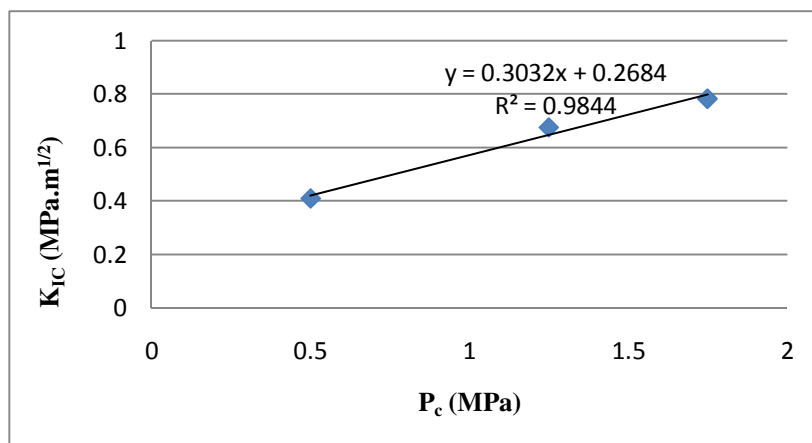
با توجه به شکل ۱۰ رابطه‌ی (۴) بین چقرمگی شکست و فشار جانبی برقرار می‌باشد:

$$K_{IC} = 0.3032P_c + 0.2684 \quad (4)$$

در این رابطه:  $K_{IC}$ : چقرمگی شکست مود I با واحد (MPa.m<sup>1/2</sup>) و  $P_c$ : فشار جانبی با واحد (MPa).

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان گفت رابطه چقرمگی شکست با فشار جانبی خطی و ضریب تعیین آن ۰/۹۸۴۴ است.

تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۴ توسط چن و همکارانش نیز انجام شد نشان داد رابطه بین چقرمگی شکست و فشار جانبی رابطه خطی (رابطه ۵) است. این آزمایش‌ها روی



شکل ۱۰. نمودار چقرمگی شکست - فشار جانبی

جدول ۸. نتایج آزمایش

$K_{IC}$ (MPa.m <sup>1/2</sup> )	فشار جانبی (MPa)
۰/۴۰۹	۰/۵
۰/۶۷۵	۱/۲۵
۰/۷۸۲۵	۱/۷۵



جدول ۹. ۲۰٪ کاهش مدول الاستیسیته برای نمونه ۵/۳

$K_{Ic,AE}$	$K_{Ic}(MPa.m^{1/2})$	$\sigma/AE$	E(GPa)	نسبت جرم گچ به آب
۰/۳۴۶	۰/۴۲۵	۲/۶	۳/۲۵	اعداد
-۰/۱۸/۵	-	٪۲۰	-	درصد کاهش

جدول ۱۰. ۲۰٪ کاهش فشار جانبی برای فشار جانبی ۱/۲۵ مگاپاسکال

$K_{Ic,APc}$	$K_{Ic}(MPa.m^{1/2})$	$\sigma/APc$	Pc (MPa)	نسبت جرم گچ به آب
۰/۵۷۱۶	۰/۶۷۵	۱	۱/۲۵	اعداد
-۰/۱۵/۳	-	٪۲۰	-	درصد کاهش

همانطور که مشاهده می‌شود اثر مدول الاستیسیته روی چقرمگی شکست مد I بیش‌تر از فشار جانبی است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های گچی با نسبت گچ به آب متفاوت برای بررسی تاثیر مدول الاستیسیته و فشار جانبی بر چقرمگی شکست مد یک انجام گرفته است.

از اعداد به دست آمده از آزمایش‌ها و همچنین تحلیل‌های انجام شده روی این اعداد و نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت:

۱- چقرمگی شکست با توجه به رابطه‌ی ۲ که دارای ضریب تعیین ۰/۹۹۶۹ با مدول الاستیسیته رابطه دارد.

۲- رابطه چقرمگی شکست با مدول الاستیسیته غیرخطی و دارای ضریب تعیین ۰/۹۹۶۹ است.

۳- چقرمگی شکست با کاهش مدول الاستیسیته، کاهش و با افزایش آن افزایش می‌یابد.

۴- رابطه چقرمگی شکست با فشار جانبی خطی و دارای ضریب تعیین ۰/۹۸۴۴ است.

۵- چقرمگی شکست با کاهش فشار جانبی کاهش و با افزایش آن افزایش می‌یابد.

۶- اثر مدول الاستیسیته روی چقرمگی شکست بیش‌تر از فشار جانبی است.

## منابع

- [1] آیت‌اللهی، م.، و سید موسوی، م (۱۳۸۷) بررسی اثرات فشار جانبی در عمق زمین بر روی ضرایب شدت تنش حالت ترکیبی اول و دوم. نشریه علمی - پژوهشی مهندسی معدن، دوره سوم، شماره پنجم، ۲۱ تا ۳۲.
- [2] Alkılıçgil, Ç (2010) Development of Specimen Geometries For Mode I Fracture Toughness Testing With Disc Type Rock Specimens. Doctoral Dissertation, Department of Mining Engineering, Middle East Technical University.
- [3] Alkılıçgil, Ç (2006) Development Of A New Method For Mode I Fracture Toughness Test On Disc Type Rock Specimens. Master Of Science Dissertation, Department of Mining Engineering, Middle East Technical University.
- [4] Alpay, C (2008) Investigation of Geometrical Factors for Determining Fracture Toughness With the Modified Ring Test. Master Of Science Dissertation, Department of Mining Engineering, Middle East Technical University.
- [5] Bazant, Z.P., and Kazemi, M.T (1990) Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete International Journal of Fracture, 44: 111-131.
- [6] Chen, M. and Zhang, G.-Q (2004) Laboratory Measurement And Interpretation Of The Fracture Toughness Of Formation Rocks At Great Depth. Journal of Petroleum Science and Engineering, 41: 221-231.
- [7] Ke, C.-C., Chen, C.-S., Tu, C.-H (2008) Determination Of Fracture Toughness Of Anisotropic Rocks By Boundary Element Method. Rock Mechanics and Rock Engineering, 41: 509-538.
- [8] Kuruppu, M.D., Obara, Y., Ayatollahi, M. R., Chong, K. P., Funatsu, T (2014) ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47: 267-274.
- [9] Perez, N (2004) Fracture Mechanics. Boston. Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [10] Qiuhua Rao., Zongqisun., Stephanson, O., Chunlin Li., and Stillborg B (2003) Shear fracture (Mode II) of brittle rock. International Journal of rock Mechanics and Mining Sciences, 355-375.
- [11] Tutluoglu, L., Keles, C (2012) Effects of Geometric Factors on Mode I Fracture Toughness for Modified Ring Tests. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 51: 149-161.

- [12] Wang, Q.Z., Jia, X. M., Wu, L.Z (2004) Wide-range Stress Intensity Factors For The ISRM Suggested Method Using CCNBD Specimens For Rock Fracture Toughness Tests. International Journal of Rock Mechanics And Mining Sciences, 41: 709-716.

## Considering effect of modulus of elasticity and confining pressure on mode-I fracture toughness of chalky specimens

M. Hosseini<sup>\*1</sup>, M. Jalalypour<sup>2</sup> and S. Maleky<sup>3</sup>

1, 2, 3- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

\*meh\_hosseini18@yahoo.com

Received: 2016/6/5 Accepted: 2017/1/8

### Abstract

There are three notch displacement modes including the Mode I or opening mode where the notch displacement is perpendicular to the notch front, Mode II or shear mode where notch dimensions are displaced in the notch plane and the Mode III or tear mode where the notch dimensions are displaced in the notch plane parallel to the notch front. Some application areas of rock fracture mechanics can be listed as hydraulic fracturing, rock blasting, rock cutting, mechanized drilling, rock slope stability and comminution in mineral processing. The aim of the present study was to examine the effect parameter of modulus of elasticity and confining pressure on the mode I Critical Stress Intensity Factor (Critical SIF) using a thick-walled hollow cylindrical chalky specimen and the oil well environment was simulated in the laboratory. To perform the tests on artificial chalky specimens, two artificial symmetrical notches with certain dimensions were created in specimens with an outer diameter (OD) of 73 mm, an inner diameter (ID) of 25 mm and a height of 150 mm. A triaxial stress was applied on the specimen and the pressure required for the propagation of the artificial notches was measured. Five tests were conducted to investigate the effect of modulus of elasticity and six tests to investigate the effect of confining pressure on the mode I Critical SIF. By conducting five tests, it was concluded that with increasing modulus of elasticity, mode I Critical SIF increases and with increasing Poisson's ratio mode I Critical SIF decreases, also, effect of modulus of elasticity on mode I Critical SIF is more. Meanwhile, it was found that the mode I Critical SIF nonlinearly increased with an increase in modulus of elasticity and it linearly increased with an increase in confining pressure.

**Keywords:** fracture toughness, mode I, modulus of elasticity, confining pressure, chalky specimen.