

# بررسی مکانیک شکست سنگ‌های مختلف

مسعود چراغی سیف آباد\*

## چکیده

مکانیک شکست، بررسی فرآیند رشد ترک در یک حوزه معین تنش است. میزان مقاومت ماده در برابر پیشرفت ترک، چقرمگی شکست نامیده می‌شود. در این تحقیق، نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی ترک‌دار برای تعیین چقرمگی<sup>۱</sup> سنگ‌های مختلف استفاده شد. از آنجائیکه انجمن بین المللی مکانیک سنگ<sup>۲</sup> بر اساس دو نوع آزمایش استوار است (میله کوتاه<sup>۳</sup>، آزمایش خمش سه نقطه‌ای<sup>۴</sup>) در اینجا آزمایش خمش سه نقطه‌ای انتخاب شده است و در این آزمایشها دو حالت مطرح است:

۱- هدایت بار<sup>۵</sup>

۲- هدایت جابه جایی<sup>۶</sup>، که برای دو نوع سنگ مختلف هدایت بار<sup>۵</sup> انتخاب شد.

## کلمات کلیدی

مکانیک شکست، چقرمگی سنگ، آزمایش خمش سه نقطه‌ای، ناهمسانگردی

## Fracture Mechanics of Different Rocks

Masoud Cheraghi Seifabad

### ABSTRACT

Fracture mechanics approach is to assess the process of crack propagation in a known stress field. The amount of material strength against the crack propagation is named fracture toughness. In this research, different cracked samples are used to determine the fracture toughness of different rocks. The methods proposed by ISRM (International Society for Rock Mechanics) are two tests; i.e. three point bend test and short rod. The present research is based on the three point bent test. Also, in these tests two levels are utilized, 1-load control 2-displacement control, but in the present tests the level I is chosen for two types of rocks.

### KEYWORDS

Fracture Mechanics, Fracture Toughness, Three Point Bend Test, Anisotropy

### ۱- مقدمه

تئوری در مکانیک شکست خطی<sup>۱</sup> به آغاز گسترش ترک در

یک ماده خطی که دارای شکاف از قبل است مربوط می‌شود. بدین منظور، بحث‌های اصلی معمول بر اساس در نظر گرفتن انرژی سامانه بر روی شدت تنش<sup>۲</sup> در اطراف نوک ترک است. سه حالت اصلی شکست نوک ترک عبارتند از: I باز شونده<sup>۳</sup>، II لغزشی<sup>۴</sup> و III پارگی<sup>۵</sup>. روش پیشنهادی ISRM [۹ و ۸] بر اساس روش I استوار است.

مکانیک شکست به صورت گسترده، در طراحی خردشدگی سنگ، حفاری زیرزمینی، شکست هیدرولیکی، آتشباری سنگ‌ها به کار رفته است. خواص شکست در ترکیب سنگ [۱۶]، مخازن ژئوترمال [۱] تشکیل درزه‌های سنگ [۱۷] و پایداری شیروانی [۲۱] مورد استفاده قرار گرفته است.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۱۳

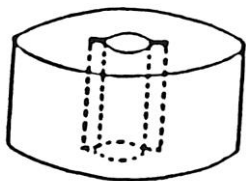
تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۹۰/۹/۱۶

\*نویسنده مسئول و استاد یار، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن، Email: cheraghi@cc.iut.ac.ir

در مقابل گسترش ترک که توانایی شبیه‌سازی شرایط محلی برای کاربردهای انفجار و شکست هیدرولیکی را داشته باشد، ارائه شد. شکل هندسی این نمونه در شکل (۲) نشان داده شده است. این نمونه از یک پیش شکاف در یک استوانه جدار ضخیم که در معرض فشارهای داخلی دیواره‌های یک گمانه قرار گیرد تشکیل شده است. پوشش داخلی در سوراخ مرکزی، مانع ایجاد فشار در دیواره‌های شکاف می‌شود. برتری این آزمایش به دلیل نمونه استوانه‌ای آن است و در عین حال عیوب آن عبارتند از:

(۱) اندازه طول شکاف مهم است که تعیین آن بسیار مشکل است.

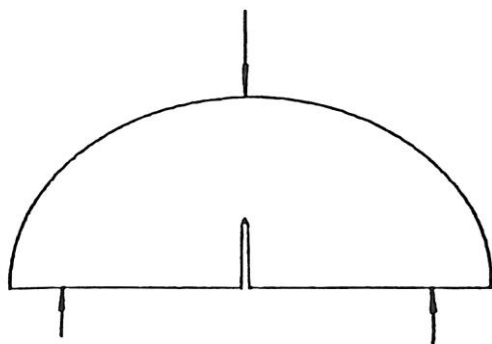
(۲) ایجاد شکاف‌های شعاعی که باید به وسیله ماشین ایجاد شوند، وقت‌گیر است زیرا به وسیله اره الماسی نیز نمی‌توانند بریده شوند.



شکل (۲): نمونه استوانه انفجاری

### ۲-۳- نمونه نیم دایره ای<sup>۱۷</sup>

نمونه نیم دایره‌ای توسط چونگ و کروپا [۵] پیشنهاد شد. شکل هندسی و بارگذاری نمونه در شکل (۳) نشان داده شده است. نمونه می‌تواند از مغزه‌های سنگ تهیه شود و به وسیله ماشین آماده شود. وسیله بارگذاری مشابه وسایلی است که در آزمایش بار سه نقطه‌ای به کار می‌رود.



شکل (۳): نمونه نیم دایره‌ای

### ۲-۴- آزمایش بارگذاری قطری صفحه‌ای<sup>۱۸</sup>

در این آزمایش [۱۳] یک نمونه ورقه دایره‌ای شکل در

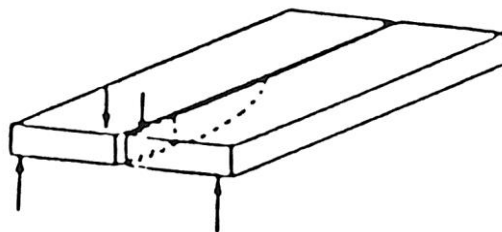
روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین چقرمگی سنگ شامل دو روش خمش سه نقطه‌ای و میله کوتاه است. این دو روش بر اساس روش اول مکانیک شکست است و دو حالت را شامل می‌شود: حالت اول که بر اساس هدایت بار<sup>۱۵</sup> است و حالت دوم که با هدایت جابه جایی<sup>۱۶</sup> است. اختلاف اساسی بین دو حالت (۱) و (۲) در زمان و هزینه است. تسهیلات موجود برای اندازه‌گیری چقرمگی سنگ در حالت (۲) به طور معمول در دسترس نیستند، بنابراین در این تحقیق حالت (۱) انتخاب شد.

### ۲- مروری بر تحقیقات گذشته

محققین برای اندازه‌گیری چقرمگی سنگ، آزمایش‌های مختلفی انجام دادند که در ادامه به آن اشاره خواهد شد.

### ۲-۱- روش آزمایش پیچشی دو طرفه<sup>۱۳</sup>

نمونه‌های پیچشی دو طرفه از بلوک‌های منفرد با استفاده از اره الماسی بریده می‌شوند. سطوح بالایی و پایینی با تقریب ۰/۰۲۵ میلی‌متر نسبت به هم صاف و موازی تهیه می‌شوند (شکل ۱). با استفاده از ماشین، یک شکاف مرکزی با باز شدگی حدود ۱ میلی‌متر و به عمق  $\frac{1}{3}$  ضخامت نمونه در طول نمونه ایجاد می‌شود. علاوه بر این یک شکاف به طول یک سانتی‌متر و باز شدگی یک میلی‌متر در هر طرف نمونه ایجاد خواهد شد. این عمل به این دلیل انجام می‌شود که هنگام بارگذاری، گسترش ترک از شکاف موازی طول نمونه ایجاد شود. هنری و همکاران [۶] با استفاده از این روش مقادیر بیشینه مقاومت را در حال گسترش ترک برای مرمر سنت پونز<sup>۱۴</sup> و میکریت فالارانز<sup>۱۵</sup> را به دست آوردند. ایشان ملاحظه نمودند که این نتایج با نتایج آزمایش بار سه نقطه‌ای (3PB) برابری دارد، اتکینسون [۳] نیز فقط اطلاعات مناسب را ارائه داد. از آنجا که تهیه نمونه در این روش بسیار پیچیده است در سال‌های اخیر، این روش کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

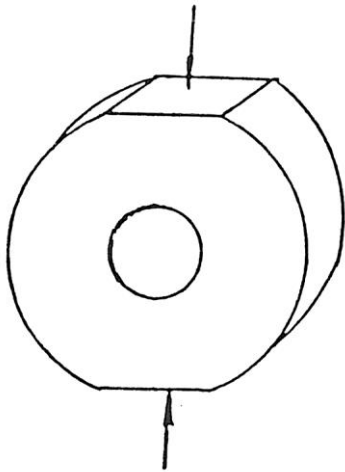


شکل (۱): آزمایش پیچشی دو طرفه

### ۲-۲- نمونه استوانه انفجاری<sup>۱۶</sup>

این روش به وسیله ابو سعید [۸] برای تعیین مقاومت سنگ

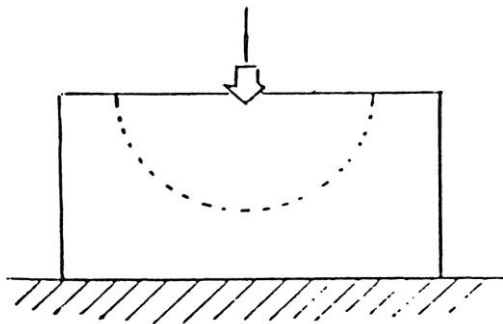
امتداد قطر شکاف دار می‌شود و به صورت قطری بریک سطح آن همان‌طوری که در شکل (۴) نشان داده شده است، راستای بارگذاری باید موازی شکاف باشد.



شکل (۵): آزمایش حلقه اصلاح شده

#### ۲-۶- آزمایش فروری مستقیم<sup>۲۰</sup>

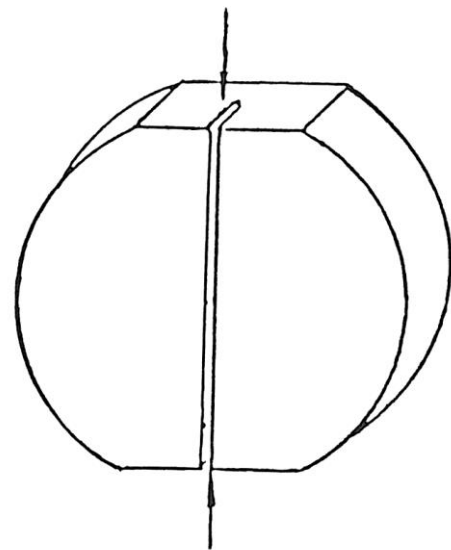
سوان ولون، [۲۰]، اتکینسون و اودیس [۴] این روش را برای اندازه‌گیری چقرمگی سنگ به‌کاربردند. شکل هندسی روش فروری مستقیم در شکل (۶) نشان داده شده است. برتری این آزمایش عبارت است از: ۱- آماده‌سازی نمونه خیلی ساده است و فقط یک سطح صاف لازم است ۲- وسیله آزمایش خیلی ساده و آزمایش بسیار سریع است.



شکل (۶): آزمایش فروری مستقیم

#### ۲-۷- نمونه میله کوتاه<sup>۲۱</sup>

علاوه بر آزمایش خمش سه نقطه‌ای، آزمایش دیگری که در انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ [۲] بسیار قابل قبول است، آزمایش میله کوتاه است<sup>۲۱</sup> که در ادامه به شرح آن پرداخته خواهد شد. این آزمایش برای اندازه‌گیری چقرمگی ماده سنگ به‌کار می‌رود. هدف اصلی استفاده از این خاصیت، طبقه‌بندی و تعیین مشخصه سنگ بکر بر اساس مقاومتی است که در مقابل گسترش ترک از خود نشان می‌دهد. موارد استفاده مهم دیگری نیز می‌تواند به عنوان شاخص خرد شدگی مانند ماشین حفار تمام مقطع یا در تحلیل شکست هیدرولیکی، انفجار و همچنین



شکل (۴): آزمایش بارگذاری صفحه‌ای

#### ۲-۵- آزمایش حلقه اصلاح شده<sup>۱۹</sup>

این آزمایش [۲۲] برای مطالعه اثر فشار جانبی بر روی چقرمگی سنگ به‌کار رفته است. آزمایش حلقه اصلاح شده، بر اساس استوانه‌ای تو خالی با دو سطح صاف برای بارگذاری طراحی شده است. شکل هندسی آزمایش حلقه اصلاح شده در شکل (۵) آورده شده است. این آزمایش دو برتری دارد.

به خصوص زمانی که فشار جانبی اعمال شود، ۱- نمونه به شکل مغزه است، به آسانی تهیه شود و ابعاد آن کوچک است، از این رو به آسانی در یک سلول سه محوری استاندارد می‌تواند قرار گیرد. ۲- در غیاب فشار جانبی، باری که در آن چقرمگی سنگ اندازه‌گیری می‌شود می‌تواند به وسیله منحنی بار - تغییر شکل معین شود، بدون آنکه نیازی به تعیین طول شکاف باشد.

جدول (۱): ابعاد نمونه برای آزمایش میله کوتاه

حدود تغییرات	مقدار	عامل هندسی
اندازه دانه‌ها $> 10 \times$	D	قطر نمونه (mm)
$\pm 0.02 D$	$1/45 D$	طول نمونه، W
$\pm 1^\circ$	$54/6^\circ$	زاویه شکاف و $\theta^\circ$
$\pm 0.02 D$	$0/48 D$	موقعیت نوک شکاف، $a_0$
$\pm 0.02 D$	$0/98 D$	طول شکاف، $a_1 - a_0$
هر کدام بزرگتر است	یا 1mm	پهنای شکاف، (mm)t
	$\leq 0.03 D$	

D = قطر نمونه استوانه کوتاه

W = طول نمونه  $1/45 D$

$\theta$  و زاویه شکاف  $54/6^\circ$

$a_0$  = فاصله نوک ترک از انتهای محل بارگذاری شده

a = طول شکاف

$a_1$  = حداکثر عمق شکاف

t = پهنای شکاف

A = سطح شور زده

F = بار اعمال شده بر روی نمونه

لاکوچه و همکاران [۱۱] آزمایش‌هایی برای اندازه‌گیری چقرمگی شیست انجام دادند. شیست متراکم و عاری از شکاف، دارای فقط یک صفحه مشخص کانی‌ها و یک صفحه شیستوزیته همسانگرد است و از یک بافت فوق العاده درشت و لیپوپلاستیک تشکیل شده است. نامبردگان یک تیر گیردار دو طرفه<sup>۲۲</sup> که ابعاد آن در شکل (۸) نشان داده شده است برای آزمایش در حالت I بکار رفته است که در آن یک شکاف به پهنای ۰/۵ میلی‌متر به وسیله اره دایره‌ای الماسی موازی صفحه شیستوزیته ایجاد شد. در این آزمایش‌ها نسبت  $\frac{a}{W}$  در بازه ۰/۲ تا ۰/۷ قرار دارد. چقرمگی سنگ از رابطه (۱)، کانین [۱۰] به دست می‌آید که در آن طول شکاف، B ضخامت، H، نصف ارتفاع نمونه،  $P_c$  بار بحرانی است.

$$K_{IC} = 2\sqrt{3} P_c a (1 + 0.64 H/a) (BH^{3/4}) \quad (1)$$

لاکوچه و همکاران پس از آزمایش یافتند که تغییرات قابل ملاحظه‌ای نسبت به طول شکاف وجود دارد، ولی به طور تقریب مقدار  $K_{IC}$  ثابت بوده و برابر است با:

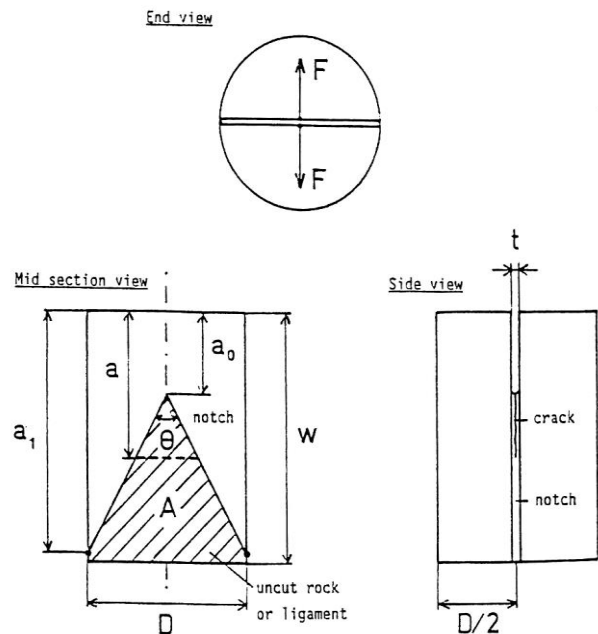
$$K_{IC} (MP_a \sqrt{m})$$

$$\text{mode I (DCB)} \quad 0.9 \pm 0.1$$

در این روش‌ها مقایسه محدود است، به این دلیل که شرایط آزمایش متنوع است و اطلاعات یکسان که به وسیله

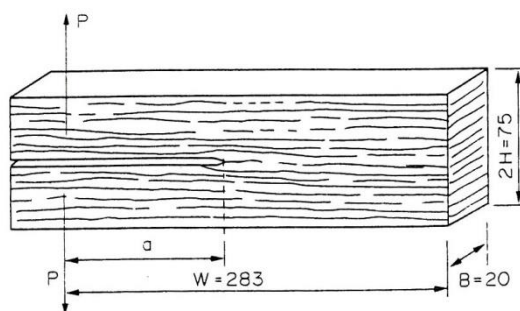
پایداری به‌کار رود. ماده سنگ به صورت نمونه‌های مغزه در آزمایش به‌کار می‌رود، محور نمونه باید موازی یا عمود بر هر صفحه ناهمسانگردی (سطوح ضعیف) باشد. روش حاضر، نمونه‌ای را مورد استفاده قرار می‌دهد که به آن میله کوتاه گفته می‌شود که یک شکاف در طول محور نمونه ایجاد می‌شود. این آزمایش شامل دو حالت است. حالت (۱) آزمایش فقط ثبت حداکثر بار را ایجاد می‌نماید. حالت (۲) اندازه‌گیری پیوسته بار و جا به‌جایی را در طول آزمایش نشان می‌دهد. شکل هندسی میله کوتاه در شکل (۷) نشان داده شده است. شکاف V شکل باعث گسترش ترک تا نوک ترک و سپس در طول محور نمونه به صورت پیوسته می‌شود تا زمانی که چقرمگی تعیین شود. ابعاد نمونه در جدول (۱) نشان داده شده است.

یک اره الماسی به کار برده می‌شود تا نمونه‌ها را با طول و شکاف لازم تهیه نماید. شکاف V شکل باید صاف باشد. حالت I بر اساس هدایت بار انجام می‌شود. بار باید ثبت شود و آزمایش تا زمانی که شکست اتفاق بیافتد ادامه دارد. نرخ متوسط شدت تنش در حین آزمایش نباید کمتر از  $10 \text{ MPa} \sqrt{m} / \text{sec}$  باشد، یا اینکه شکست در زمان ۱۰ ثانیه هنگام اعمال بار اولیه اتفاق بیافتد.



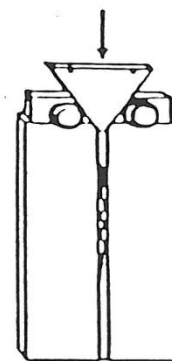
شکل (۷): نمونه میله کوتاه

آزمایش‌کننده در روش باز شونده انجام می‌شود وجود ندارد.



شکل (۸): تیر گیردار دو طرفه (نوع کششی)

از آنجا که سنگ یک ماده ناهمگن است، برخی اختلافات در مقادیر اندازه‌گیری شده قابل پیش‌بینی است. برای یک ماده الاستیک خطی، همسان همگن بارگذاری و ترکیب نمونه نباید بر روی اندازه‌گیری چقرمگی اثر گذارد. برای سنگ که چنین ماده‌ای نیست، چقرمگی سنگ ممکن است مستقل از بارگذاری و شکل هندسی نمونه نباشد. به طور مثال، زاویه گوه در تئوری و آزمایش تیر دو سر گیر دار (شکل ۹) نباید خواص سنگ را تحت اثر قرار دهد، در حالی که چنین نیست. برای مثال هنگامی که زاویه گوه از  $100^\circ$  به  $10^\circ$  کاهش می‌یابد، انرژی شکست ۲۰ درصد افزایش پیدا می‌یابد [۱۸]. برعکس چقرمگی، سنگ آهک ایندیانا<sup>۲۳</sup> در آزمایش‌های انفجار<sup>۱۶</sup> تحت تنش محوری تا ۷ MPa بدون اثر باقی می‌ماند [۲].



شکل (۹): تیر گیر دو طرفه (نوع گوه)

همچنین بیشتر سنگ‌ها دارای ناهمسانگردی هستند که ممکن است مقادیر اندازه‌گیری شده چقرمگی را تحت اثر قرار دهد. مشخص‌ترین اثر عبارتند از:

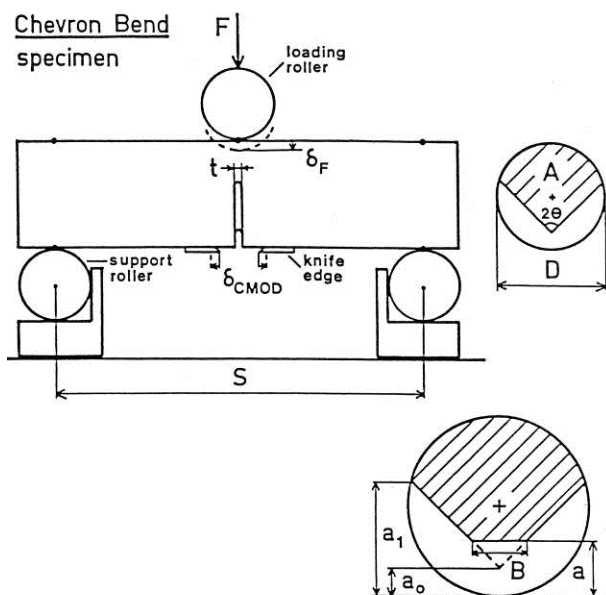
- سطوح لایه‌بندی اولیه و ساخت ورقه‌ای
- نوارهای دگرگونی و ساختمان نواری (فولیاسیون<sup>۲۴</sup>)
- مجموعه ریز درزه و ریز ترک صفحه‌ای

در سنگ‌های زیر، مقدار چقرمگی در صفحه لایه‌بندی کم‌ترین است و در دو صفحه عمود بر هم که بر صفحه لایه‌بندی عمود است مقادیر چقرمگی بیش‌ترین هستند.  
 ۱ - ۳۰٪ و ۴۰٪ در شیل نفتی انویل پوینتس<sup>۲۵</sup> [۱۹]  
 ۲ - ۱۷٪ و ۶۵٪ در ماسه سنگ‌بری<sup>۲۶</sup>، ۲۰٪ و ۸۶٪ در سنگ آهک سالم<sup>۲۷</sup> [۷].

کم‌ترین مقدار چقرمگی در سنگ مرمر سنپونز برای ترک‌هایی است که در صفحه‌های نواری (فولیاسیون) دگرگونی گسترش یافته است. مقادیر چقرمگی برای سطوح عمود بر هم که بر سطح نواری (فولیاسیون) عمود هستند ۲۳٪ و ۳۷٪ بیش‌تر هستند [۶].

### ۳- آزمایش خمش سه نقطه‌ای<sup>۴</sup>

یکی از روش‌هایی که توسط ISRM معرفی شد آزمایش سه نقطه‌ای بر روی ترک گوه‌ای شکل است. بارگذاری در سه نقطه باعث می‌شود که گسترش ترک در نوک این شکاف گوه‌ای شروع شود و به سمت محور نمونه در حالت یکنواخت پیشرفت نماید تا زمانی که چقرمگی سنگ ( $K_{IC}$ ) با استفاده از بیش‌ترین بار ( $F_{max}$ ) تعیین شود (شکل ۱).



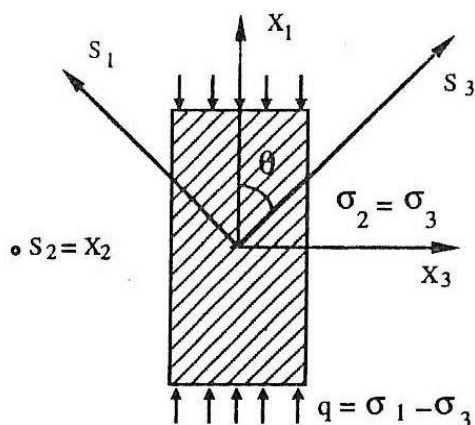
شکل (۱۰): موقعیت هندسی آزمایش بار سه نقطه‌ای

با استفاده از راهنمای‌هایی که توسط ISRM انجام شده است (جدول ۱)، ابعاد زیر انتخاب شد:

جدول (۲): آزمایش بار سه نقطه‌ای

استفاده شد.

از خصوصیات ویژه شیل، ناهمسانگردی آن است. آزمایش سه محوری بر روی تور نمیر شیل<sup>۲۸</sup> انجام شده است [۱۲]. نمونه‌ها با قطر ۳۷mm و ارتفاع ۷۵mm هستند. به نظر می‌رسد که این نمونه‌ها نسبت به ناهمگنی سنگ ریزدانه مناسب باشند. موقعیت بارگذاری بر اساس زاویه  $\theta$ ، زاویه بین صفحات لایه‌بندی و تنش محوری  $\sigma_1$  (شکل ۱۲) تعیین شده است.



شکل (۱۲) موقعیت جهت بارگذاری

موقعیت‌های مختلف بارگذاری و فشارهای جانبی به این دلیل که اطلاعاتی کامل پایه برای مطالعه شیل هستند، مورد توجه قرار گرفت. موقعیت و فشارهای جانبی عبارتند از:

$$\theta = 0^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$$

$$\sigma_3 = 1, 5, 10, 20, 30, 40, 50 \text{ MPa}$$

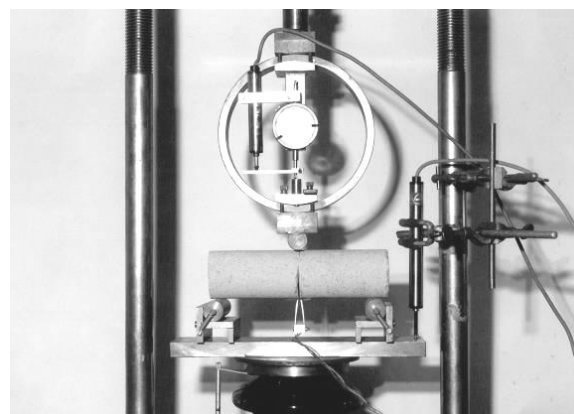
مقاومت ناهمسانگردی به نحوه شکست در شیل ارتباط دارد. یک طرح از روش‌های اصلی شکست شیل که تابعی از موقعیت و فشار جانبی است، در شکل (۱۳) نشان داده شده است. به طور کلی زاویه شکست تا حد زیادی تابعی از موقعیت بارگذاری علاوه بر فشار جانبی است.

عامل هندسی	مقدار	حدود تغییرات
قطر نمونه (mm)	D	اندازه دانه‌ها $> 10 \times$
طول نمونه (mm)	۴D	$> 3/5 D$
زاویه شکاف و $\theta^\circ$	۳/۳۳D	$\pm 1$
موقعیت نوک شکاف، $a_0$	۹۰	$\pm 1^\circ$
پهنای شکاف، (mm)t	۰/۱۵D	$\pm 0/1D$
	۱mm یا ۰/۰۳D	هر کدام بزرگتر است
	$\leq$	

$$D = 71 \text{ mm}, \quad a_0 = 11 \text{ mm}, \quad a = 21 \text{ mm}$$

$$D = 48 \text{ mm}, \quad a_0 = 7 \text{ mm}, \quad a = 14 \text{ mm}$$

یک نمونه استوانه‌ای به قطرهای مختلف و طول‌های مختلف انتخاب شده است (شکل ۱۱).



شکل (۱۱): نحوه آزمایش بار سه نقطه‌ای

شکاف باید با فواصل مساوی از انتهای نمونه قرار بگیرد. تنظیم به وسیله وسایل مخصوص انجام می‌شود تا تعیین موقعیت دقیق نمونه برای بارگذاری آسان شود. در درجه اول باید غلتک‌های تکیه‌گاه نسبت به غلتک بالایی (بارگذاری) تنظیم شود. در مرحله بعد، محور نمونه باید عمود بر غلتک‌ها قرار گیرد. در مرحله سوم، مرکز شکاف نسبت به غلتک‌ها تنظیم شود. زمانی که غلتک بارگذاری و دو غلتک تکیه‌گاه به صورت موازی قرار گرفتند، این مجموعه برای انجام آزمایش‌ها آماده هستند و نیازی به هیچگونه حرکتی نیست. وسیله کمکی دیگری که برای تنظیم به کار می‌رود یک صفحه فلزی است که بر روی آن سطح تراز واقع شده است که می‌تواند برای سطح مرجع ماشین آزمایش به کار رود.

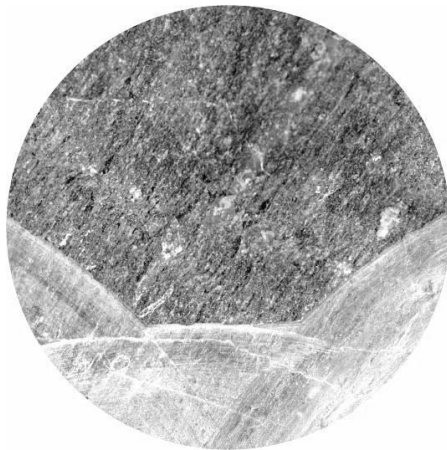
## ۴- نتایج

در این تحقیق از دو نمونه سنگ یعنی شیل و دولومیت





شکل (۱۴): نمونه دولومیت پس از شکست



شکل (۱۵): نمونه شیل پس از شکست

جدول (۳): مقدار چقرمگی سنگ‌های مختلف

شماره نمونه	قطر نمونه (mm)	F <sub>max</sub> (kN)	K <sub>IC</sub> (MPa√m)
A <sub>1</sub>	۴۸	۱/۵	۱/۴۸
A <sub>2</sub>	۴۸	۴	۳/۹۶
A <sub>3</sub>	۴۸	۳/۲	۳/۱۷
A <sub>4</sub>	۴۸	۳/۶	۳/۵۶
A <sub>5</sub>	۴۸	۰/۲۶	۱/۱۸
B <sub>1</sub>	۴۸	۴/۰۴	۳/۹۹
C <sub>11</sub>	۷۱	۱۷/۲	۹/۴۶
C <sub>2</sub>	۷۱	۲۵/۶	۱۴/۰۸
C <sub>31</sub>	۷۱	۱۷/۲	۵/۲۰
C <sub>41</sub>	۷۱	۱۰/۳	۵/۶۶
C <sub>5</sub>	۷۱	۱۹/۳	۱۰/۶۱
D <sub>1</sub>	۴۸	۴/۷۶	۴/۷۱
D <sub>2</sub>	۴۸	۳/۸۳	۳/۷۹
D <sub>3</sub>	۴۸	۴/۵۳	۴/۴۸
E <sub>1</sub>	۴۸	۴/۷۹	۴/۷۴
E <sub>2</sub>	۴۸	۷/۲۵	۷/۲۸
E <sub>3</sub>	۴۸	۳/۸۳	۳/۷۹

	فشار جانبی کم	فشار جانبی زیاد
$0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$		
$15^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$		
$65^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$		

شکل (۱۳): وضعیت حالت‌های اصلی شکست

هدف از آوردن این مطالب در مورد شیل آن است که یک دید کلی نسبت به شیل ارائه شود. قبلاً هم توسط ISRM [۸] چقرمگی شیل اندازه‌گیری شده است.

هم‌چنین برای مطالعه بیشتر، روش‌های عددی نیز به کار گرفته شدند [۱۵]. نکته‌ای که در مورد شیل باید به آن اشاره نمود مربوط به شیب‌توزیته آن است که در بعضی شرایط غیر قابل تشخیص است و به صورت یکپارچه در آمده است. آزمایش چقرمگی بر روی شیل و دولومیت با قطرهای مختلف انجام شد و نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است. بر اساس استاندارد ISRM مقدار چقرمگی طبق رابطه (۲) به دست می‌آید.

$$K_{IC} = A_{\min} \frac{F_{\max}}{D^{3/2}} \Rightarrow K_{IC} = 10/42 \frac{F_{\max}}{D^{3/2}} \quad (2)$$

$$A_{\min} = 10/42$$

نمونه‌های مربوط به شیل (A، B و C) و نمونه‌های D و E مربوط به دولومیت هستند. نکات زیادی در مورد شیل می‌توان گفت ولی مهم‌ترین آن‌ها، صفحه ناپیوستگی یا شیب‌توزیته آن است، به طوریکه نمونه A<sub>4</sub> از روی صفحه شیب‌توزیته شکسته شد، هم‌چنین نمونه A<sub>3</sub> به دلیل آنکه یک رگه کلسیت در آن قرار داشت مقدارش درست نیست. نمونه A<sub>5</sub> از روی صفحه شیب‌توزیته شکست و به مقاومت نهایی نرسید. نمونه C<sub>31</sub> و C<sub>41</sub> در محل صفحه شکست و نمونه B<sub>1</sub> در جهت شیب‌توزیته منجر به شکست شد. نمونه‌های دولومیت و شیل در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.

هزینه طرح پژوهشی فوق توسط دانشگاه صنعتی اصفهان پرداخت شده است، بدین لحاظ کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از آقای مهندس بهشتی کارشناس ارشد آزمایشگاه مکانیک سنگ به منظور همکاری بی دریغش در انجام این پروژه قدردانی می‌کنم. لازم میدانم از آقای دکتر وفاییان که در ویرایش این مقاله کمک نمودند، تشکر نمایم.

چقرمگی دو نوع سنگ (شیل و دولومیت) بر اساس آزمون خمشی سه نقطه و مبتنی بر استاندارد انجمن بین المللی مکانیک سنگ انجام شد. برای بررسی کامل تر رفتار شیل، باید تحقیق بیشتری در ارتباط با جهت صفحات شیستوزیته انجام شود و نحوه شکست مورد بررسی قرار گیرد.

۷- مراجع

- [۱] Takahashi, H. Application of rock fracture mechanics to HDR geothermal reservoir design. Fracture toughness and fracture energy, pp 591-610 (1989).
- [۲] Abou-Sayed A.S., An experimental technique for measuring the fracture toughness of rock under downhole stress conditions, VDI-Berichte, Nr. 313, pp 819-824 (1978).
- [۳] Athkinson B.K., Fracture toughness of Tennessee sandstone and Carra marble using the Double Torsion Method. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 16, pp 49-53 (1979).
- [۴] Athkinson B.K., Avdis V., Fracture mechanics parameters of some rock-forming minerals determined using an indentation technique. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 17, pp 383-386 (1980).
- [۵] Chong K.P., Kruppa M.D. New specimen for fracture toughness determination of rock and other materials. . Int. J. Fract. 26, R59-R62 (1984).
- [۶] Henry J.P., Paquet J. and Tancrez J.P. Experimental study of crack propagation in calcite rocks. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 14, pp 85-91 (1977).
- [۷] Hoagland R. G., Hahn R. G. and Rosenfield, A. R. Influence of microstructure on fracture propagation in rock, Rock Mechanics, Vol. 5, pp 77-106 (1973).
- [۸] ISRM suggested method for determining the fracture toughness of rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol 25, No.2, pp73-96 (1988).
- [۹] ISRM on the background to the formulae and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstr. Vol 26, No.1, pp. 13-23 (1989).
- [۱۰] Kannien M. F., An Augmented double cantilever beam model of studying crack propagation and arrest. Int. J. Fract. 9(1), 83-92 (1973).
- [۱۱] Laqueche H., Rousseau A. and Valentin G. Crack propagation under Mode I and II loading in slate schist. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 23, pp 347-354 (1986).
- [۱۲] Niandou H., Shao J. F., Henry J.P. and Fourmaintraux D. Laboratory investigation of the mechanical behaviour of Tournemire Shale. Int. J. Rock Mech Min Sci. Vol 34 No.1 pp 3-16 (1997).
- [۱۳] Singh R.N., Pathan A.G. Fracture toughness of some british rocks by diametral loading of discs. Mining Science and Technology, 6 pp 179-190 (1987).
- [۱۴] Swain M.V., Lawn B.R., Indentation fracture in brittle rocks and glasses. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 13, pp 85-91 (1976).
- [۱۵] Cheraghi Seifabad, M. Fracture toughness evaluation and the mechanical cutting characteristics, 8<sup>th</sup> international IAEG Congress, Vancouver, Canada, pp 3577-3582 (1998).
- [۱۶] Fairhurst, C. and Cornet, F. H. Rock fracture and fragmentation, rock mechanics from research to applications, 2<sup>nd</sup> US Symp. Rock. Mech., Massachusetts Institute of Technology (1981).
- [۱۷] Kemeny, J and Cook, N.G.W. Formation and stability of steeply joint sets. 26<sup>th</sup> US Symposium on rock mechanics, pp 471-479 (1985).
- [۱۸] Peck l., Cording R. P. The effect of compressive stress on the fracture energy of Sioux Quartzite, Geophysical Research Letters, Volume 9, No.3, pp 186-189.
- [۱۹] Schmidh, R. A., Fracture mechanics of oil shale-unconfined fracture toughness, stress corrosion cracking, and tension test results. In proc. 18<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mech., pp 2A2-1 2A2-6 (1977).
- [۲۰] Swain M.V., Lawn B.R., Indentation fracture in brittle rocks and glasses. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Vol 13, pp 85-91 (1976).
- [۲۱] Tharp, T.M and Coffin D.I. Field application of fracture mechanics analysis to small rock samples, 26<sup>th</sup> US symposium on rock mechanics, pp 667-674 (1985).
- [۲۲] Thiercelin M., Roegiers. Fracture toughness determinations wth modified ring test. Proc. 27<sup>th</sup> US sympo. on Rock Mechanics, H. L. Hartman ed., SME Co, pp 615-622. (1986).



- <sup>1</sup> Fracture Toughness
- <sup>2</sup> ISRM, International Society for Rock Mechanics
- <sup>3</sup> Short rod
- <sup>4</sup> Three Point Bend Test
- <sup>5</sup> Load Control
- <sup>6</sup> Displacemnet Control
- <sup>7</sup> Level I
- <sup>8</sup> Linear Elastic Fracture Mechanics
- <sup>9</sup> Stress Intensity, K
- <sup>10</sup> Opening Mode
- <sup>11</sup> Sliding Mode
- <sup>12</sup> Tearing Mode
- <sup>13</sup> Double Torsion Method
- <sup>14</sup> St. Pons marble
- <sup>15</sup> Fallerans micrite
- <sup>16</sup> The Burst Cylinder Specimen
- <sup>17</sup> Semi-Circular Specimen
- <sup>18</sup> Disc Diametral Loading Test
- <sup>19</sup> Modified Ring Test
- <sup>20</sup> Direct Indentation Test
- <sup>21</sup> Short Rod Specimen
- <sup>22</sup> Double Cantilever Beam
- <sup>23</sup> Indiana limestone
- <sup>24</sup> Foliation
- <sup>25</sup> Anvil Points oil shale
- <sup>26</sup> Berea sandstone
- <sup>27</sup> Salem limesoton
- <sup>28</sup> Tournemire shale

