

## مطالعه آزمایشگاهی اثر طول بازه تحت فشار بر روی فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی

سید رحمان ترابی<sup>۱</sup>؛ حامد شیرازی<sup>۲</sup>؛ فرهنگ سرشکی<sup>۳</sup>؛ حسین میرزایی<sup>۳</sup>

۱- استاد، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشجوی مقطع دکتری، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

پذیرش: ۹۴/۱۲

دریافت: ۹۴/۰۱

### چکیده

شکست هیدرولیکی در مقایسه با دیگر روش‌های موجود، روشی ساده و سریع برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا است. این روش به منظور تعیین بزرگی و جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل در چاه‌های عمیق یا در چال‌های کم عمق که معمولاً با دیگر روش‌ها مقدر نیست، مورد استفاده قرار می‌گیرد. موضوع این مقاله، بررسی تاثیر فاصله بین پکرها بر روی فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی است. در این رابطه، یک مدل فیزیکی آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد و تعداد زیادی آزمایش انجام شد. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت طول بازه تحت فشار به قطر چاه تا حدود ۷، فشار شکست کاهش می‌یابد و از این مقدار به بعد، به سمت یک مقدار ثابت تمایل دارد.

### کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، پکر، بازه تحت فشار، فشار شکست



## ۱- مقدمه

به علت پیچیدگی نحوه توزیع تنش در توده سنگ، طراحی فضاهای زیرزمینی با طراحی سایر سازه‌ها متفاوت است. یک سازه زیرزمینی از ابتدا در معرض مجموعه‌ای از تنش‌های اولیه قرار دارد. در این حالت وضعیت تنش نهایی برآیندی از وضعیت تنش اولیه و تنش‌هایی است که در اثر حفاری ایجاد می‌شود.

از طرف دیگر، در سازه‌های سطحی، مقدار و نوع بار شناخته شده است و معمولا هندسه و کاربری سازه، تعیین‌کننده بارهای وارد بر آن هستند. وقتی یک فضای زیرزمینی در سنگ ایجاد می‌شود، وضعیت تنش اولیه توده سنگ دچار آشفتگی و تغییر شده و شرایط جدیدی ایجاد می‌شود. تنش‌های موجود آمده در چنین حالتی "تنش‌های القایی" یا "تنش‌های ثانویه" نامیده می‌شوند.

از آنجایی که تنش‌های القایی با تنش‌های اولیه (قبل از حفاری) رابطه مستقیم دارند، تعیین این‌گونه تنش‌ها نیز می‌تواند راهی برای دستیابی به میدان تنش اولیه توده سنگ باشد [۱]. همچنین باید به این نکته توجه کرد که تنش‌ها در زمین نمی‌توانند از مقاومت سنگ‌ها تجاوز نمایند، بنابراین اندازه‌گیری مقاومت سنگ می‌تواند برای تنظیم محدودیت تنش در زمین، مورد استفاده قرار گیرد [۲].

ضرورت تخمین صحیح حالت تنش اولیه در توده سنگ موجب شده که مطالعات قابل توجهی برای ساخت تجهیزات و ارایه روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا انجام گیرد. در این رابطه روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که در اکثر آن‌ها برای دسترسی به محل اندازه‌گیری، از حفر گمانه کمک گرفته می‌شود [۱].

در اندازه‌گیری تنش‌های برجا، روش شکست هیدرولیکی، راحت‌ترین روش بوده و سریع و آسان است. این روش به منظور تعیین بزرگی و جهت تنش افقی حداکثر و حداقل در چال‌های عمیق یا در چال‌های کم عمق که معمولا با دیگر روش‌ها مقذور نیست، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳، ۴].

## ۲- شکست هیدرولیکی

در روش شکست هیدرولیکی یک بخش از گمانه با استفاده از دو پکر لاستیکی قابل تورم، که به اندازه کافی تحت فشار (به طوری که به دیواره گمانه می‌چسبند) هستند، آب‌بندی می‌شود. سیال هیدرولیکی (معمولا آب) با یک آهنگ ثابت جریان در بخش مورد نظر پمپ می‌شود و به تدریج فشار روی دیواره گمانه افزایش می‌یابد تا جایی که یکشکستگی در سنگ ایجاد می‌شود. فشار در جایی که سنگ می‌شکند، فشار شکست<sup>۱</sup> نامیده می‌شود.

روند تزریق چندین بار تکرار می‌شود و فشار شکست، به عنوان فشار حداکثر بدست آمده از چرخه اول در نظر گرفته می‌شود. پس از آن که فشار به حداکثر مقدار خود رسید، حتی اگر عملیات پمپاژ با آهنگ جریان اولیه ادامه پیدا کند، فشار کاهش می‌یابد. سیکل افزایش فشار چندین بار با حفظ آهنگ جریان تکرار می‌شود. مقادیر کلیدی استفاده شده در محاسبه تنش‌های برجا از منحنی فشار- زمان برداشت می‌شود. برای مثال زمانی که شکستگی ایجاد می‌شود و یا شکستگی که از قبل وجود داشته، باز می‌شود عملیات پمپاژ متوقف می‌شود. در ادامه و بدون تخلیه سیال از گمانه، فشار افت می‌کند تا جایی که شکستگی القا شده بسته می‌شود. فشار در لحظه بسته شدن شکستگی، فشار انسداد<sup>۲</sup> نامیده می‌شود همچنین، فشار بازشدگی مجدد شکستگی نقطه‌ای بر روی بخش صعودی منحنی فشار- زمان، در سیکل‌های بعدی (معمولا دوم و یا سوم) است که شیب، شروع به کاهش یافتن می‌کند [۵]. سپس، می‌توان تنش‌های اصلی افقی حداکثر و حداقل، تنش قائم و مقاومت کششی سنگ را با توجه به روابط ارایه شده، تعیین کرد. لازم به ذکر است که جهت‌گیری شکستگی، به جهت تنش‌های اصلی مرتبط است [۵، ۶].

## ۲-۱- پیشینه مطالعات

درک ساز و کار شکست هیدرولیکی و سپس پیدا کردن راهی برای پیش‌بینی هندسه شکستگی القا شده هیدرولیکی و فشار آغاز شکست، برای اندازه‌گیری تنش مهم هستند [۷]. تاکنون،

مقاومت کششی، معمولاً به عنوان پارامتری تغییرپذیر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اغلب، بواسطه آرایه فشار بازشدگی مجدد شکستگی، از معادله شکست حذف می‌شود. از این مفهوم، معادله شکست طبق رابطه ۳ بدست آمده است [۱۴].

$$P_b = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} - P_0 \quad (3)$$

مدل دوم، مدل هیمسون<sup>۷</sup> و فیرهرست<sup>۸</sup> (۱۹۶۷) است و مفهومی مشابه مدل قبل، در این مدل پذیرفته می‌شود. برای مثال، زمانی که تنش موثر مماسی حداقل در دیواره چاه، به مقاومت کششی سنگ می‌رسد، شکست رخ می‌دهد. تفاوت آن‌ها در این است که مدل دوم، تنش سنگ را با استفاده از تئوری پروالاستیک<sup>۹</sup> بایوت<sup>۱۰</sup> تحلیل می‌نماید [۱۴].

هیمسون و فیرهرست، به سنگ اجازه می‌دهند که متخلخل و نفوذپذیر باشد. در این روش، مدل الاستیک، برای سیال نافذ (سنگ نفوذ پذیر) اصلاح شده است و معیار شکست هیدرولیکی پروالاستیک با استفاده از رابطه ۴ حاصل می‌شود [۱۲].

$$P_b = \frac{3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} + \sigma_t - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu} P_0}{2 - \alpha \frac{1-2\nu}{1-\nu}} \quad (4)$$

که در آن:

$\nu$  ضریب پواسون

$\alpha$  ضریب بایوت

مدل دیگر بر اساس مکانیک شکست است. مدل مذکور فرض می‌کند که شکست زمانی رخ می‌دهد که شکستگی شروع به انتشار ناپایدار می‌نماید. دیگر مدل جالب توجه، مدل تنش نقطه‌ای ایتو<sup>۱۱</sup> است، این مدل فرض می‌کند که آغاز شکستگی زمانی است که تنش موثر حداقل سنگ در نقطه‌ای که آن نقطه روی سطح دیواره چاه نیست و در اطراف چاه قرار دارد به مقاومت کششی سنگ می‌رسد. فاصله بین نقطه مذکور و نقطه تمرکز تنش، به نوع سنگ بستگی دارد. معیار دیگر، معیار شکست برشی است که برای پیش‌بینی فشار شکست استفاده می‌شود. این مدل فرض می‌کند که زمانی که تنش در دیواره چاه به مقاومت برشی سنگ می‌رسد شکست رخ می‌دهد [۱۴].

## ۲-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی

اجرای دقیق آزمایش شکست هیدرولیکی تحت تاثیر چندین

بسیاری از محققان در مورد جنبه‌های مختلف روش شکست هیدرولیکی مطالعه کرده‌اند. به عنوان مثال، مکانیزم شروع و انتشار شکستگی مورد بررسی قرار گرفت [۱۳، ۸]. در ضمن، به منظور تعیین و اندازه‌گیری فشار شکست و تنش برجا، چندین نظریه (معیار شکست) توسط محققان توسعه یافته است [۱۵، ۱۴، ۱۰].

نظریه کلاسیک شکست هیدرولیکی که توسط هوبرت<sup>۳</sup> و ویلیس<sup>۴</sup> در سال ۱۹۵۷ آرایه شده است مستلزم وجود سنگ الاستیک، همگن و نفوذناپذیر است که در داخل زمین در معرض ۳ تنش اصلی قرار دارد [۱۲]. گاهی اوقات توسعه رابطه کلاسیک شکست هیدرولیکی توسط آن‌ها تایید می‌شود که صحیح نیست زیرا آن‌ها هرگز اصطلاح مقاومت کششی را در معادلات خود معرفی نکرده‌اند. مدل کلاسیک براساس راه حل کرش<sup>۵</sup> (۱۸۹۸)، برای توزیع تنش در اطراف یک گمانه گرد در سنگ همگن، همسانگرد، خشک، الاستیک خطی و بدون شکستگی و در معرض فشار خارجی است. در این روش، فرض می‌شود که امتداد گمانه، موازی با یکی از مولفه‌های اصلی میدان تنش ژئواستاتیک است که معمولاً این فرض برای چال‌های قائمی که از سطح زمین حفر شده‌اند، معتبر است. شکستگی در یک چاه حفر شده رخ می‌دهد و یک صفحه قائم موازی با تنش افقی بزرگتر است [۱۵]. اولین بار، شیدگر<sup>۶</sup> (۱۹۶۲)، مقاومت کششی سنگ را به منظور تعیین سه تنش اصلی از طریق شکست هیدرولیکی در گمانه، در معادله بالا معرفی نمود (رابطه ۱) [۱۲].

$$P_b = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} + \sigma_t \quad (1)$$

در صورتی که فشار منفذی اولیه در سنگ وجود داشته

باشد، فشار شکست از رابطه ۲ بدست می‌آید:

$$P_b = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{hmax} + \sigma_t - P_0 \quad (2)$$

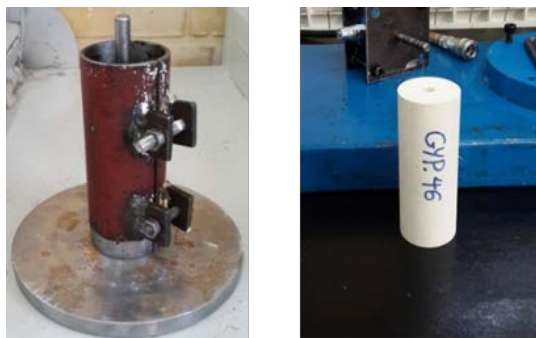
که در آن:

$P_b$  فشار شکست

$\sigma_t$  مقاومت کششی سنگ

$P_0$  فشار منفذی اولیه

$\sigma_{hmin}$  تنش افقی حداقل و  $\sigma_{hmax}$  تنش افقی حداکثر



شکل ۱: نمونه گچی و قالب به کار رفته برای ساخت آن

### ۳- تجهیزات

به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، تهیه دستگاه‌ها و تجهیزات مناسب لازم و ضروری بود. در این رابطه یک پمپ تزریق سیال با نرخ تزریق مناسب و فشار سیال کنترل شده، تجهیزات مربوط به تنظیم طول فضای تزریق سیال (بازه تحت فشار) و آب‌بندی فضای مذکور و دستگاهی برای اعمال بار قائم ثابت طراحی و ساخته شد. توضیح مختصری از این دستگاه‌ها به شرح زیر است.

#### ۳-۱- پمپ تزریق سیال

به منظور به دست آوردن فشار شکست به عنوان تابعی از طول بازه تحت فشار در آزمایشگاه، دستگاهی (شکل ۲) برای تزریق سیال (روغن هیدرولیک) به داخل فضای (بازه) مورد نظر با قابلیت آهنگ افزایش فشار کنترل شده، طراحی و ساخته شد که مشخصات آن در جدول ۱ به پیوست مقاله ارایه شده است. برای خواندن فشار شکست، دستگاه اندازه‌گیری فشار، بر روی نقطه شکست نمونه متوقف می‌شود. همچنین، دستگاه فوق این امکان را فراهم می‌کند که اپراتور بتواند حداکثر مقدار فشار قابل اندازه‌گیری را کم یا زیاد نماید. به عبارت دیگر به کمک یک شیر دستی تعبیه شده بر روی دستگاه می‌توان میزان حداکثر فشار تزریق را کنترل کرد.

پارامتر است. یکی از آن‌ها، فاصله بین پکرها است. این پارامتر تاثیر قابل توجهی بر فشار شکست دارد. بنابراین، مطالعاتی بر روی آن انجام شده است.

به عنوان مثال، *ASTM* و *ISRM* پیشنهاد می‌کنند که فاصله بین دو پکر حداقل ۶ برابر قطر چال باشد [۵] و [۱۶]. در این تحقیق به منظور ارزیابی و بررسی تاثیر فاصله بین دو پکر لاستیکی بر روی فشار شکست و ارایه یک رابطه دقیق تلاش شده است.

با توجه به این واقعیت که انجام آزمون‌های میدانی برای نشان دادن تاثیر پارامتر مذکور بر روی فشار شکست دشوار است و آزمون‌های آزمایشگاهی که تاکنون انجام شده‌اند چنین آزمونی را شامل نمی‌شوند، تصمیم گرفته شد که آزمایش‌های مذکور در مقیاس آزمایشگاهی انجام شوند.

#### ۳-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، پس از بررسی نمونه‌های طبیعی و مصنوعی و با توجه به محدوده فشار مورد نیاز، تصمیم بر استفاده از نمونه مصنوعی از جنس گچ ساختمانی گرفته شد. در نتیجه گچ سرنده شده با مش ۳۵ و با نسبت وزنی آب به گچ ۳۰۰ به ۴۸۰ برای ساخت نمونه مورد استفاده قرار گرفت. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک قالب با ارتفاع ۱۴ سانتی‌متر و قطر ۵/۴ سانتی‌متر با یک میله با قطر یک سانتی‌متر برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل و شبیه‌سازی گمانه در مرکز آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت. همچنین یک نمونه در شکل مذکور نشان داده شده است. لازم به ذکر است که برای تکمیل شدن فرآیند گیرش گچ، ۱۰ روز در نظر گرفته شد.

(شکل ۴) که توسط دیگر محققین [۱۷] طراحی و ساخته شده بود با ایجاد برخی تغییرات، به کار گرفته شد. دستگاه *CLA* از قانون اهرمها تبعیت می‌نماید و تغییرات اعمال شده بر روی آن شامل اضافه کردن تکیه‌گاهی برای استقرار انژکتور پایینی و همچنین ایجاد مسیر تخلیه هوا است. بار وارد بر نمونه از طریق دستگاه مذکور ۲۰ برابر وزنه‌ای است که بر روی کفه نگهدارنده وزنه قرار می‌گیرد.



شکل ۴: دستگاه اعمال بار ثابت (*CLA*)

#### ۴- مراحل آزمایش

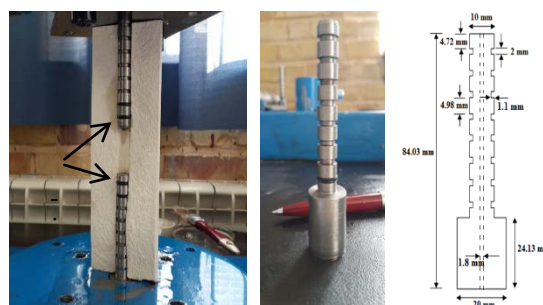
ابتدا، برای ایجاد طول مناسب در بازه تحت فشار، اورینگ‌ها در داخل شیارهای تعبیه شده بر روی انژکتورهای بالایی و پایینی قرار می‌گیرند (شکل ۳). طول بازه تحت فشار می‌تواند از حداکثر ۱۳/۵ تا حداقل ۰/۵ سانتی‌متر تغییر کند که با توجه به جدول ۱، برای تنظیم فواصل کمتر از ۴/۶ سانتی‌متر، در حالیکه اورینگ بالایی در داخل پایین‌ترین شیار قرار می‌گیرد، به جای انژکتور پایینی، از پکرهای *PVC* طراحی شده استفاده می‌شود. در مرحله دوم، نمونه در جای مناسب خود که بر روی دستگاه بار ثابت تعبیه شده است قرار می‌گیرد و از طریق یک شلنگ فشار بالا به پمپ تزریق سیال متصل می‌شود. به منظور تخلیه هوا از مسیر جریان روغن، یک پیچ بر روی تکیه‌گاه نمونه جانمایی شده است که برای تخلیه هوا، آن را باز کرده و روغن تزریق می‌شود. عملیات تزریق تا جایی ادامه می‌یابد که حباب‌های هوا در سیال مشاهده نشوند. در این زمان پیچ بسته می‌شود. یک بار ثابت ۷/۵ کیلوگرمی که متناسب است با *KPa* ۳۴ فشار بر روی نمونه، از طریق تنظیم اهرمها و اتصالات در دستگاه بار ثابت، بر نمونه اعمال می‌شود. در مرحله آخر، فشار



شکل ۲: تصویری از دستگاه طراحی شده برای تزریق سیال در داخل سنگ

#### ۳-۲- تجهیزات مربوط به تنظیم طول بازه تحت فشار و آب بندی فضای مذکور

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، به منظور تنظیم طول بازه تحت فشار و آب‌بندی آن در داخل سنگ، دو انژکتور طراحی و ساخته شد. این انژکتورها در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرند. برای آن که اورینگ‌های مناسب، به منظور تنظیم طول بازه تحت فشار، در موقعیت‌های خود قرار گیرند، شیارهای متعددی بر روی بدنه انژکتورها ایجاد شد. به عبارت دیگر، با جابجا کردن اورینگ‌ها در داخل شیارها، طول بازه تحت فشار می‌تواند تغییر یابد. در واقع، در این شرایط، اورینگ‌ها نقش پکرها را در آزمایش شکست هیدرولیکی بازی می‌کنند. سوراخ‌های تعبیه شده در انژکتور بالایی و پایینی، به ترتیب وظیفه تزریق سیال به بازه تحت فشار و تخلیه هوا از بخش مورد نظر را بر عهده دارند.



شکل ۳: نمایی از انژکتور طراحی شده

#### ۳-۳- دستگاه اعمال بار قائم

با توجه به اهداف تعریف شده در این تحقیق آزمایشگاهی، نیازی به اعمال تنش‌های افقی نبود. اما به منظور اعمال بار قائم ثابت، یک دستگاه مخصوص به نام دستگاه بار ثابت (*CLA*<sup>۱۲</sup>)

بین فشار شکست و طول بازه تحت فشار را می‌توان با استفاده از رابطه ۵ بیان کرد:

$$P_b = 53.616 \times L^{-0.211} \quad (5)$$

که در آن:

$P_b$  فشار شکست (bar)

$L$  طول بازه تحت فشار

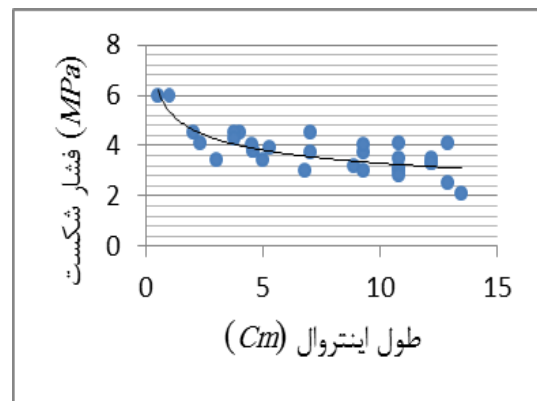
این نتیجه‌گیری، به استانداردهای ASTM و ISRM برای آزمون‌های شکست هیدرولیکی که مقدار ۶ را برای حداقل نسبت طول بازه تحت فشار به گمانه پیشنهاد می‌کنند، نزدیک است [۵] و [۱۶].

### ۵- نتیجه‌گیری

یکی از موارد قابل تامل در اندازه‌گیری تنش‌های برجا به روش شکست هیدرولیکی، تعیین فاصله بین پکرها است. در طول یک پروژه انجام شده در دانشگاه صنعتی شاهرود، نمونه‌های گچی برای آزمایش اثر طول بازه تحت فشار بر فشار شکست مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش طول بازه تحت فشار، فشار شکست کاهش می‌یابد و برای فواصل بیش از حدود ۷ سانتی‌متر و یا نسبت طول به قطر بیش از حدود ۷، تاثیر آن (طول بازه تحت فشار) ناچیز است. این در حالی است که استانداردهای ASTM و ISRM، مقدار ۶ را برای حداقل نسبت طول بازه تحت فشار به قطر گمانه پیشنهاد می‌کنند.

سیال داخل نمونه با یک آهنگ ثابت و با استفاده از دستگیره‌ها و کلیدهای پمپ افزایش می‌یابد تا جایی که شکست رخ می‌دهد.

با توجه به مراحل طی شده، ۴۳ آزمایش انجام شد که به علت انحراف زیاد از مقدار متوسط، ۱۲ آزمایش غیر قابل قبول در نظر گرفته شد. نتایج در جدول ۲ (پیوست مقاله) و شکل ۵ ارائه شده‌اند.



شکل ۵: تغییرات فشار شکست نسبت به طول بازه تحت فشار

با توجه به منحنی رسم شده در شکل ۵، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) دو متغیر فشار شکست و طول بازه تحت فشار برابر ۰٫۵۶۴۶ محاسبه شد.

همچنین نتایج آزمایشات (شکل ۵) نشان می‌دهند که با افزایش طول بازه

تحت فشار، مقدار فشار شکست کاهش می‌یابد و برای فواصل بیش از حدود ۷ سانتی‌متر و یا نسبت طول به قطر بیش از حدود ۷، تاثیر آن (طول بازه تحت فشار) ناچیز است. ارتباط

### مراجع

Application For Hydro-Electric Projects—An Indian Experience in The Himalayas. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No. 3, 2004.

[4] Jinsong Huang, D. V. Griffiths and Sau-Wai Wong, In situ stress determination from inversion of hydraulic fracturing data. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 48, 476–481, 2011.

[5] Haimson, B.C. and F.H. Cornet ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 1011–1020, 2003.

[6] Meng Wen, Chen Qun-Ce, Du Jian-Jun, Feng

[۱] فهیمی فر احمد، سروش حامد (۱۳۸۹) آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها، جلد دوم، آزمون‌های صحرایی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[2] Brace, W. F., and D. L. Kohlstedt, Limits on Lithospheric Stress Imposed by Laboratory Experiments, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, No. B11, pages 6248-6252, November 10, 1980.

[3] Kumar, N., A. Varughese, V. K. Kapoor and A. K. Dhawan, In Situ Stress Measurement and Its

- Stress Field of the Earth's Crust, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, ISBN 978-1-4020-8443-0, 2009.
- [13] Choi Sung O, Numerical Study on the Estimation of the Shut-in Pressure in Hydraulic Fracturing Test, *Geosystem Eng.*, 6(3), 55-62, September, 2003.
- [14] Guo, F., N. R. Morgenstern and J. D. Scott, Interpretation of Hydraulic Fracturing Breakdown Pressure, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 30, No. 6, pp. 617-626, 1993.
- [15] Nawrocki P. A., Alterations of Breakdown Pressures in Rocks Exhibiting Stress-dependent Mechanical Properties, The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1-6 October, Goa, India, 2008.
- [16] American Society For Testing and Materials, Standard Test Method for Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method, 1997.
- [17] Hosseini, S.M.A., Sereshki, F., Shariati, M., Jalali, S.M.E and Cortogino, F., Development of a new creep testing equipment to obtain long-term deformation parameters of salt, *Journal of mining & Environment*, Vol.3, No.1, 27-32, 2012.
- Cheng-Jun, Qin Xiang-Hui and An Qi-Mei, In-Situ Stress Measurements in Singapore. *Chinese Journal of Geophysics* Vol.55, No.4, 2012, pp: 429-437, 2012.
- [7] Yang, T. H., L. G. Tham, C. A. Tang, Z. Z. Liang and Y. Tsui, Influence of Heterogeneity of Mechanical Properties on Hydraulic Fracturing in Permeable Rocks, October 1, 2003.
- [8] Wang, S.Y., L. Sun, A.S.K. Au, T.H. Yang and C.A. Tang, 2D-numerical analysis of hydraulic fracturing in heterogeneous geo-materials, *Construction and Building Materials* 23, 2196-2206, 2009.
- [9] Hiroyuki Shimizu, Sumihiko Murata and Tsuyoshi Ishida, The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, 712-727, 2011.
- [10] Haimson, B and C. Fairhurst, In-Situ Stress Determination at Great Depth By Means Of Hydraulic Fracturing, *Rock Mechanics-Theory and Practice*, chapter 28, 1969.
- [11] Jian Zhou, Yan Jin and Mian Chen, Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, P. 1193-1199, 2010.
- [12] Zang Arno, OveStephansson and BezalelHaimson,

---

<sup>1</sup>Fracture pressure or Breakdown pressure (Pb)

<sup>2</sup> Shut-in pressure (Ps)

<sup>3</sup> Hubbert

<sup>4</sup> Willis

<sup>5</sup> Kirsch

<sup>6</sup> Scheidegger

<sup>7</sup> Haimson

<sup>8</sup> Fairhurst

<sup>9</sup> Poroelastic

<sup>10</sup> Biot

<sup>11</sup> Ito

<sup>12</sup> Constant load apparatus