

## مطالعه آزمایشگاهی اثر تنش حرارتی بر فشار شکست هیدرولیکی ماسه‌سنگ لوشان

مهدی حسینی<sup>۱\*</sup>، پرمیدا افتخاری<sup>۲</sup>، پرستو شهریزاد<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

(دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۰۸، پذیرش ۱۳۹۷/۱۲/۱۲)

### چکیده

در صنعت نفت برای افزایش شاخص تولید و بازیافت از چاه‌هایی که به علت برداشت طولانی مدت، بازده آن کاهش یافته است یا سنگ‌های اطراف چاه میزان نفوذپذیری کمی دارند از شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود و چون عملیات شکست هیدرولیکی پرهزینه است، به دست آوردن فشار لازم برای شکست هیدرولیکی و تعیین پمپ مناسب برای این عملیات، برای مجریان پروژه اهمیت به سزایی دارد. در این تحقیق از نمونه‌های ماسه‌سنگ منطقه لوشان برای مطالعه استفاده شد و تاثیر تنش حرارتی روی فشار شکست هیدرولیکی ماسه سنگ مورد بررسی قرار گرفت. برای مدلسازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی بر روی سلول سه محوری هوک تغییراتی داده شده است تا برای مدلسازی شکست هیدرولیکی مناسب‌سازی شود. نمونه‌های مورد مطالعه به شکل استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم، دارای قطر خارجی ۵۴/۷، قطر داخلی ۱۲ و ارتفاع ۱۰۸ میلی‌مترند. برای بررسی اثر تنش حرارتی، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌هایی که ابتدا تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده و سپس در آب ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده‌اند، انجام شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با کاهش دمای سرد کردن نمونه‌ها، فشار شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در عملیات شکست هیدرولیکی این کاهش فشار شکست باعث می‌شود که پمپی با ظرفیت تولید فشار کمتری خریداری شود و در نتیجه هزینه‌های عملیات کاهش یابد. تغییرات فشار شکست هیدرولیکی در اثر تنش حرارتی با تغییرات سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک، مقاومت تراکم تک محوری و نفوذپذیری تطابق دارد. از تصاویر سی‌تی‌اسکن نیز برای بررسی تغییرات میکرو ترک‌ها استفاده شده است، مقدار سی‌تی از ۱۶۵۴ هانسفیلد به ۱۶۱۴ هانسفیلد کاهش پیدا کرد. مقدار سی‌تی محاسبه شده از این تصاویر نیز تغییرات فشار شکست هیدرولیکی را تایید می‌کند.

### کلمات کلیدی

ماسه‌سنگ، تنش حرارتی، شکست هیدرولیکی.

## ۱- مقدمه

مدل می‌شود [۴]. با توجه به اینکه تنش‌های برجا در اطراف چاه‌های نفت تنش‌های بالایی‌اند، برای مدلسازی آزمایشگاهی در این شرایط به جک‌هایی با ظرفیت بالا و پمپ‌های فشار بالا برای ایجاد شکست هیدرولیکی نیاز است. این محدودیت‌های مدلسازی آزمایشگاهی را به راحتی می‌توان با استفاده از روش مدلسازی عددی جبران کرد. در مدلسازی آزمایشگاهی از دو نوع سلول استفاده می‌شود که شامل سلول سه محوری واقعی که برای آزمایش روی نمونه‌های مکعبی طراحی شده است و امکان اعمال سه تنش متفاوت وجود دارد و سلول سه محوری که برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در مواقعی که تنش‌های افقی در چاه همسانگردند (تنش‌های افقی با هم برابرند) می‌شود.

بررسی محققان نشان می‌دهد که عوامل مختلفی شامل مدول یانگ [۶،۵]، ضریب پواسون [۸،۷]، تخلخل [۹]، فشار منفذی [۱۰]، تنش‌ها [۱۱]، ناهمسانگردی توده سنگ [۱۲،۱۱]، اثر نفوذپذیری و نرخ تزریق [۱۳]، گرانیروی سیال [۱۵،۱۴] و درجه حرارت [۱۶] بر روی فشار شکست هیدرولیکی اثر دارند.

در مخازن نفتی، سنگ مخزن طی فرآیندهای حفاری و بهره‌برداری به طور متوالی سرد و گرم می‌شود. علاوه بر این، می‌توان در زمان بهره‌برداری به طور مصنوعی شاره‌هایی به مخزن تزریق کرد تا سبب تغییر درجه حرارت سنگ مخزن شوند. بر اساس این نظریه، اگر ماده‌ای در یک میدان حرارتی قرار گیرد در آن تنش مکانیکی ایجاد می‌شود که به آن تنش حرارتی گفته می‌شود. سنگ‌ها در مخزن معمولاً دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند. وقتی در عملیات شکست هیدرولیکی سیال سرد به ناحیه مورد نظر تزریق شود در اثر اختلاف دمای ایجاد شده در سنگ مخزن تنش حرارتی ایجاد می‌شود که از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. اگر سنگ فاقد ترک باشد، ریزترک‌هایی در سنگ در اثر این تنش حرارتی ایجاد می‌شود که باعث می‌شود سنگ در فشار سیال کمتری دچار شکست هیدرولیکی شود. اگر سنگ دارای ترک‌های اولیه باشد در اثر تنش حرارتی ایجاد شده، تنش کششی در نوک ترک در ناحیه سرد شده ایجاد می‌شود. اگر مقدار این تنش کششی بیش از مقاومت کششی سنگ باشد، ترک‌های اولیه گسترش می‌یابند و ترک‌های ثانویه ایجاد می‌شوند و نفوذپذیری سنگ مخزن افزایش می‌یابد که باعث افزایش برداشت نفت و یا گاز از مخزن می‌شود.

بسیاری از مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری بالا در نقاط مختلف جهان، در حال تمام شدن است. از این رو، تامین مواد خام اولیه مورد نیاز برای مصارف گوناگون صنعتی از مخازن با نفوذپذیری پایین انجام می‌گیرد. برای بهره‌برداری بهینه از این مخازن، لازم است که عملیات اضافی روی این نوع مخازن انجام گیرد. این عملیات اضافی، افزایش بازده چاه را در پی دارد [۱]. روش‌های گوناگون برای افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد که ازدیاد برداشت به روش ایجاد شکاف در دیواره چاه یکی از این روش‌ها است [۲] و فرآیند شکست هیدرولیکی که در ساختارهای با نفوذپذیری پایین به فراوانی کاربرد دارد از زیر شاخه‌های این روش است که برای افزایش نرخ تولید و اقتصادی‌تر کردن برداشت محصول در این نوع ساختارها به کار می‌رود [۳].

شکست هیدرولیکی، فرآیندی است که در آن، سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا درون چاه پمپ می‌شود. عملیات پمپ کردن تا جایی ادامه می‌یابد که فشار به حدی برسد که باعث ایجاد و سپس گسترش شکست در دیواره چاه شود. در مدلسازی شکست هیدرولیکی از روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی استفاده می‌شود. در روش تحلیلی بر اساس تئوری الاستیک و پروالاستیک روابطی برای تعیین فشار شکست هیدرولیکی ارائه شده است. در مدلسازی عددی از روش‌های اجزا محدود، المان مرزی و تفاضل محدود برای مدلسازی شکست هیدرولیکی استفاده شده است. روش المان محدود توسعه‌یافته یکی از جدیدترین روش‌های مدلسازی مسایل مکانیک شکست است. این روش نسبت به روش‌های پیشین مزایای بسیاری دارد. مدل کردن ناپیوستگی‌ها مانند یک ترک با روش المان محدود معمولی و المان مرزی نیازمند آن است که مش از هندسه ناپیوستگی تبعیت کند در روش المان محدود یا المان مرزی از مش بسیار ریز و یا المان‌های تکین در نوک ترک استفاده می‌شود. مدل کردن یک ترک در حال رشد حتی پیچیده‌تر است زیرا همان‌طور که ترک رشد می‌کند مش نیز باید بتواند خود را با هندسه جدید ترک در هر گام رشد مطابقت دهد. روش المان محدود توسعه‌یافته بر مبنای روش المان محدود معمولی ساخته شده است و تنها توابع خاصی بر مبنای نوع ناپیوستگی به حل عددی استاندارد اضافه می‌شود. به این توابع خاص، توابع غنی‌سازی می‌گویند. در روش المان محدود توسعه‌یافته با افزودن درجه آزادی به گره‌های اطراف ترک، رشد ترک

مقدار تنش حرارتی در یک جسم الاستیک و همسانگرد بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\text{تنش حرارتی} = \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \quad (1)$$

که در آن:

$\alpha$ : ضریب انبساط حرارتی خطی

$\nu$ : ضریب پواسون

$E$ : مدول یانگ

$\Delta T$ : تغییر درجه حرارت است.

در ادامه تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در خصوص شکست هیدرولیکی ارایه می‌شود.

فاتحی و همکاران نفوذپذیری وابسته به تنش در توده سنگ شکسته را با توجه به اثرات تغییر شکل عمودی غیرخطی و انقباض برشی شکستگی‌ها با استفاده از نرم‌افزار UDEC مورد بررسی قرار دادند [۱۸].

پهنیا و همکاران به بررسی تاثیر پارامترهای الاستیک لایه‌ها بر نحوه گسترش شکست هیدرولیکی با استفاده از روش ناپیوستگی- جابه‌جایی پرداختند. در این تحقیق با تغییر پارامترهای مقاومتی محیط دربرگیرنده شکست هیدرولیکی، فرآیند گسترش شکست هیدرولیکی در محیط‌های چند لایه (محیط نرم و سخت) و تحت تاثیر پارامترهای الاستیک را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان بازشدگی شکست هیدرولیکی به ویژگی‌های الاستیک لایه‌ها وابسته بوده است و تغییر ویژگی‌های الاستیک لایه‌ها می‌تواند هندسه شکستگی را تحت تاثیر قرار دهد [۱۹].

عبداللهی‌پور و همکاران به بررسی کاربرد مکانیک شکست در اندازه‌گیری تنش‌های برجا با آزمون شکست هیدرولیکی پرداختند. نتایج نشان داد، حداکثر تنش افقی در همه روش‌ها بر اساس چقرمگی شکست مود I، فشار بسته شدن، فشار سیال داخل چاه و طول ترک بدون بعد محاسبه می‌شود. در این روش‌ها فرض بر این است که ترک‌های اولیه موازی راستای حداکثر تنش افقی است [۲۰].

عبداللهی‌پور و همکاران پژوهشی بر روی شبیه‌سازی گسترش شکستگی‌های هیدرولیکی در یک چاه دایره‌ای شکل با استفاده از روش ناپیوستگی- جابه‌جایی انجام دادند. در این تحقیق اندرکنش چندین شکستگی بررسی شد. در این شبیه‌سازی‌ها انتشار، توقف و تداخل شکستگی‌های اولیه مشاهده شد و زوایای شیب بحرانی برای نتایج بهتر عملیات

شکست هیدرولیکی پیشنهاد شد [۲۱].

عبداللهی‌پور و همکاران به بررسی عددی تاثیر پارامترهای هندسی ترک بر فرآیند شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربنی پرداختند. پارامترهای هندسی متفاوت در ترک‌های اولیه شکست هیدرولیکی شامل الگو، فاصله‌داری، طول ترک و زاویه مشبک‌کاری با استفاده از روش ناپیوستگی- جابه‌جایی مرتبه بالاتر در چاه‌های افقی و قائم مدلسازی شدند [۲۲].

مرادی‌پور و همکاران در پژوهشی تاثیر دو پارامتر میزان رشد شکست هیدرولیکی و شعاع چاه نفت یا گاز را بر روی جابه‌جایی بازشدگی ترک به روش نیمه‌تحلیلی را مورد بررسی قرار دادند. در کنار بررسی اثر این دو پارامتر، ویژگی‌های مختلف مکانیکی مانند (مدول یانگ، ضریب پواسون، تنش‌های افقی حداکثر و حداکثر، نصف طول ترک، فشار داخلی و زاویه ترک با تنش افقی حداکثر نیز مورد توجه قرار گرفته است. روش عددی ناپیوستگی- جابه‌جایی برای بررسی میزان جابه‌جایی بازشدگی ترک در یک فرآیند شکست هیدرولیکی استفاده شد. نتایج نشان داد، مقدار جابه‌جایی بازشدگی ترک با انتشار شکست هیدرولیکی افزایش می‌یابد و همچنین ازدیاد شعاع چاه نیز باعث افزایش خطی مقدار بازشدگی ترک در حین شکست هیدرولیکی می‌شود. معادلات برازش داده شده بر روی نتایج حاکی از یک رابطه خطی میان پارامترهای یاد شده و میزان بازشدگی شکست است. این روابط می‌تواند در طراحی اولیه عملیات مشابه مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

ژانگ و چن گسترش شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها بر اساس مکانیزم شکست و تئوری‌های شکست هیدرولیکی، مدلی را برای مسیر گسترش شکست ارایه دادند که این مدل تاثیر تنش‌های مختلف را بر تغییر مسیر گسترش شکست نشان می‌دهد [۲۴].

هوبرت و ویلیس عنوان کردند که شکست در امتداد حداکثر تنش افقی ( $\sigma_H$ ) و عمود بر حداقل تنش افقی ( $\sigma_h$ )، شروع و گسترش می‌یابد و در نهایت منجر به ایجاد یک ترک بزرگ می‌شود. آن‌ها در واقع نخستین رابطه را برای محاسبه فشار شکست ارایه کردند [۲۵].

بلانتون با انجام مطالعات آزمایشگاهی اظهار داشت که تنش تفاضلی (اختلاف میان تنش افقی حداکثر و حداکثر) و زاویه برخورد میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی، فاکتورهای مهم و تاثیرگذار بر روی شکل و امتداد شکست است. آن‌ها

گرم شده‌اند، ایجاد می‌شوند شکستگی‌های اولیه توسعه و گسترش می‌یابند. در ضمن در نمونه‌هایی که فاقد شکستگی بودند بعد از شوک حرارتی فشار شکست آن‌ها کاهش یافت [۳۱]. در پژوهش ارائه شده آزمایش‌ها روی استوانه توخالی جدار ضخیم انجام شده است. بر اساس تئوری استوانه توخالی با استفاده از مختصات استوانه‌ای  $(r, \theta, z)$ ، تنش‌های  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  در هر نقطه از رابطه ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_r = \frac{P_0 R_0^2 - P_i R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} - \frac{(P_0 - P_i) R_i^2 R_0^2}{r^2 (R_0^2 - R_i^2)} \quad (2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_0 R_0^2 - P_i R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{(P_0 - P_i) R_i^2 R_0^2}{r^2 (R_0^2 - R_i^2)} \quad (3)$$

که در این روابط:

$r$ : فاصله شعاعی از مرکز نمونه در استوانه توخالی

$R_i$ : شعاع داخلی

$R_0$ : شعاع خارجی

$P_i$ : فشار داخل حفره مرکزی

$P_0$ : فشار جانبی

$P$ : نیروی محوری [۳۲]

و تنش محوری  $\sigma_z$  از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_0^2 - R_i^2} \quad (4)$$

اکثر پژوهش‌ها در مورد اثر تنش حرارتی روی گسترش ترک اولیه انجام شده است و در پژوهش کریگ و همکاران اثر تنش حرارتی بعد از شکست هیدرولیکی بررسی شده است. در پژوهش ارائه شده، اثر تنش حرارتی روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی شده است و از این لحاظ دارای نوآوری است، علاوه بر این از تصاویر سی‌تی‌اسکن نیز برای بررسی آسیب نمونه در اثر تنش حرارتی استفاده شده است که جزو مزیت‌های این پژوهش است.

## ۲- نمونه مورد مطالعه

نمونه مورد مطالعه در این تحقیق ماسه‌سنگ لوشان است. ماسه‌سنگ نوعی سنگ رسوبی است که در تمامی دوران‌های زمین‌شناسی تشکیل آن ادامه یافته و عمدتاً از ذرات گرد ماسه و کانی‌های مختلف تشکیل شده است و رنگ‌های متنوعی دارد.

یک معیار برای برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکافت طبیعی ارائه کردند [۲۶].

دانشی [۲۷]، در مطالعاتش به نتایجی که قبلاً توسط هوبرت و ویلیس [۲۵] ارائه شده بود، دست یافت اما این محقق عنوان کرد که شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند بر روی گسترش و توسعه شکافت هیدرولیکی تاثیرگذار است.

علی‌پور و همکاران در سال ۱۳۹۱ تعدادی مغزه از سنگ مخزن یکی از میادین دریایی کشور برای بررسی تاثیر تنش‌های حرارتی روی آن‌ها و امکان ایجاد شکستگی‌های حرارتی تهیه کردند. نمونه‌های مورد بررسی تا ۹۰ درجه سلسیوس در کوره حرارت داده شده و بلافاصله تا ۵ درجه سلسیوس سرد شدند. این عمل سبب القای تنش‌های حرارتی و تشکیل ریزشکستگی‌هایی در نمونه شد که با سی‌تی‌اسکن بررسی و نمایان شد [۱۶].

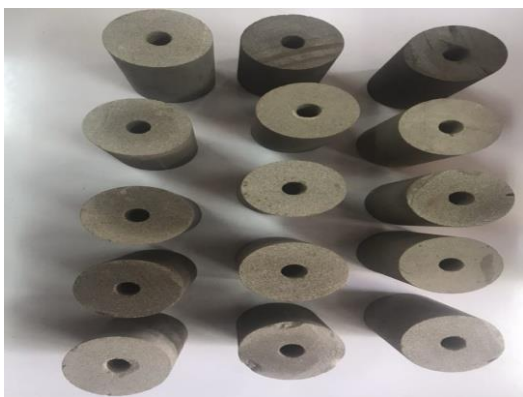
قاسمی و تاراسف پژوهش‌هایی در خصوص انتشار شکستگی در اثر تنش حرارتی در مخازن ژئوترمال انجام دادند. نتایج تحلیل‌های آن‌ها نشان داد که در اطراف سطح شکستگی سرد شده، تنش حرارتی بزرگی روی می‌دهد و باعث توسعه تنش کششی در سطح سرد شده می‌شود و شکستگی گسترش می‌یابد. پس سرد کردن سنگ، تنش‌هایی ایجاد می‌کند که باعث ایجاد شکستگی و گسترش شکستگی قبلی بعد از مدت زمانی از تزریق سیال و افزایش نفوذپذیری مخازن می‌شود [۲۹، ۲۸].

پژوهش دیگری توسط کریگ و همکاران انجام شده است. تحقیق ارائه شده به طور آزمایشگاهی بررسی می‌کند که چگونه برانگیختن هیدرولیکی و حرارتی بر مخازن شکننده تاثیر می‌گذارد. در این آزمایش، نمونه‌ها که دو بلوک اکریلیک‌اند. بلوک  $A_2$  و  $A_4$  تحت بارگذاری تک‌محوره قرار گرفتند و سپس فشار سیال در گمانه باعث ایجاد شکست‌های هیدرولیکی شد. سطح شکست در این حالت در دو بلوک  $A_2$  و  $A_4$  به ترتیب  $0.707$  و  $0.256$  اینچ مربع بود. در مرحله بعد شکستگی‌هایی که به صورت هیدرولیکی ایجاد شده بودند، تحت نیتروژن مایع به مدت ۳۰ دقیقه سرد شدند، سپس به علت تنش حرارتی سطح شکستگی‌ها در دو بلوک به ترتیب  $7.162$  و  $4.82$  اینچ مربع شد که حاکی از اثر مهم تنش حرارتی بود [۳۰].

چالال و همکاران به بررسی توسعه و گسترش شکستگی‌ها در تشکیلات کربناته تحت تنش‌های حرارتی و مکانیکی پرداختند. آن‌ها مشاهده کردند با ایجاد شوک حرارتی که در اثر سرد کردن نمونه‌هایی که تا  $150$  و  $200$  درجه سانتی‌گراد

### ۳- آماده سازی نمونه

ابتدا از بلوک سنگ مغزه‌گیری می‌شود که نمونه‌های استوانه‌ای حاصل قطری حدود ۵۴ میلی‌متر دارند، سپس نمونه‌ها برای رسیدن به طول مناسب برش داده می‌شوند. برای تزریق سیال به داخل نمونه‌ها باید حفره مرکزی در آن ایجاد شود. برای این منظور از مته‌ای به قطر ۱۲ میلی‌متر استفاده می‌شود. نمونه‌های استوانه‌ای توخالی آماده‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی آماده آزمایش

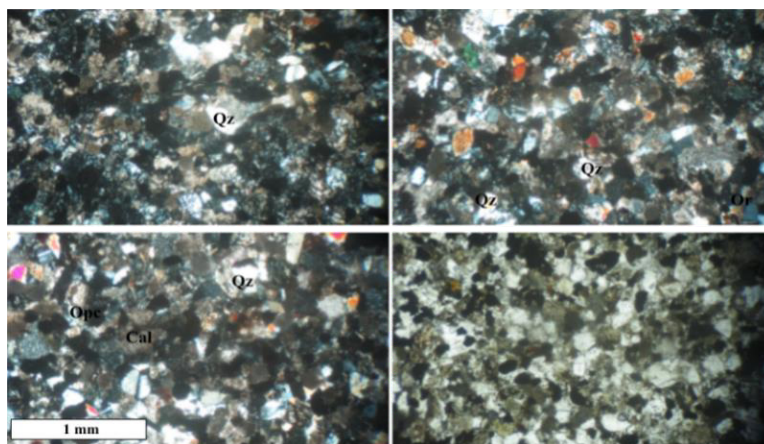
این سنگ در دریا‌های کم‌عمق، دلتاها، در امتداد سواحل و در بیابان‌های گرم تشکیل شده است و موادی چون رس‌ها و اکسید سیلیسیم در سیمانی کردن ذرات آن به یکدیگر نقش داشته‌اند [۳۳].

### ۱-۲- مطالعه میکروسکوپی

سنگ مورد مطالعه از نوع ماسه‌سنگ آهکی با سیمان آهکی است. این سنگ از ۱۵ درصد کوارتز، ۷ درصد فلدسپات، ۱۵ درصد کلسیت، ۸ درصد خرده سنگ‌هایی مانند چرت، ۷ درصد کانی‌های اوپک و ۴۸ درصد از خمیره این ماسه‌سنگ، از کوارتز و رس و فلدسپات تشکیل شده است (شکل ۱).

### ۲-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی

بر روی ماسه‌سنگ آزمایش برزیلی برای تعیین مقاومت کششی، آزمایش تراکم تک‌محوره برای تعیین مقاومت تراکم تک‌محوری، مدول الاستیسیته و ضریب پواسن انجام شده است. آزمایش‌هایی نیز برای تعیین تخلخل موثر و وزن مخصوص خشک انجام شده است (جدول ۱). همه آزمایش‌ها بر اساس استانداردهای جامعه بین‌المللی مکانیک سنگ که در سال ۲۰۰۷ رایج شده، انجام گرفته است [۳۴].



شکل ۱: تصویر میکروسکوپی از نمونه ماسه سنگ (Qz: کوارتز، Cal: کلسیت، Or: اور توکلار)

جدول ۱: خواص فیزیکی و مکانیکی ماسه سنگ لوشان

وزن مخصوص (KN/m <sup>3</sup> )	تخلخل موثر (درصد)	مقاومت تراکم تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسن
۲۱,۸۸	۱۰,۲۷	۷۲,۸	۴,۵۹	۱۷,۳۷	۰,۲۶

#### ۴- تجهیزات مورد استفاده

دستگاه مورد استفاده برای مدلسازی شکست هیدرولیکی در این تحقیق شامل چهار بخش مجزا است که شامل سلول آزمایش، جک اعمال بار محوری، پمپ اعمال کننده فشار جانبی و پمپ اعمال کننده فشار داخل گمانه است.

##### ۴-۱- سلول آزمایش

این سلول که در واقع سلول تغییر یافته هوک است، دارای دو درپوش فولادی و یک غشای انعطاف پذیر است، این غشا برای در بر گرفتن نمونه سنگ و اعمال فشار جانبی استفاده می شود. این سلول برای نمونه هایی با قطر ۵۴٫۷ میلی متر و دارای حفره مرکزی به قطر ۱۲ میلی متر مناسب است (شکل ۵).



شکل ۵: سلول هوک تغییر یافته

در مناسب سازی سلول برای مدلسازی شکست هیدرولیکی دو درپوش طراحی و ساخته شده است که در بالا و پایین نمونه قرار می گیرد. از یک درپوش، سیال برای ایجاد فشار هیدرولیکی در حفره مرکزی وارد می شود و از درپوش دیگر برای هواگیری حفره مرکزی استفاده می شود (شکل ۶).



شکل ۶: درپوش های ساخته شده برای مناسب سازی سلول هوک برای مدلسازی آزمایش شکست هیدرولیکی (در بالا و پایین نمونه قرار می گیرد).

سپس نمونه ها در کوره قرار داده می شود (شکل ۳). نرخ افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد، ۳ درجه سانتی گراد بر دقیقه است، سپس دمای ۱۰۰ درجه با کوره برای ۵ ساعت ثابت نگه داشته می شود.



شکل ۳: کوره

بعد از گذشت ۵ ساعت نمونه ها از کوره خارج می شود و در ظرفی که حاوی آب سرد است قرار می گیرد. در این تحقیق آزمایش ها روی سه سری نمونه انجام می شود که شامل: ۱- نمونه هایی که در آب ۵ درجه سانتی گراد سرد می شود، ۲- نمونه هایی که در آب ۱۰ درجه سانتی گراد سرد می شود و ۳- نمونه هایی که در آب ۱۵ درجه سانتی گراد سرد می شود (شکل ۴).



شکل ۴: سرد کردن نمونه ها در آب ۱۰ درجه سانتی گراد و کنترل دما با ترموکوپل

## ۴-۲- جک اعمال کننده بار محوری

این جک، برقی و دیجیتال نیمه خودکار با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن با قابلیت محاسبه و ثبت نتایج آزمایش و قابلیت اتصال به کامپیوتر برای نمایش نتایج است ( شکل ۷).



شکل ۷: جک بارگذاری محوری

## ۴-۴- پمپ اعمال کننده فشار داخل گمانه

این پمپ به یکی از دو صفحه بارگذاری که بر روی دو طرف نمونه داخل سلول قرار می‌گیرد، وصل می‌شود. در این تحقیق از روغن تلوس ۱۴۶ به عنوان سیال شکست استفاده شده است (شکل ۹).



شکل ۹: پمپ اعمال کننده فشار سیال به داخل گمانه

## ۵- برنامه آزمایش

برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی، پس از آماده‌سازی نمونه، آن را در سلول آزمایش قرار می‌دهند و پس از قرار دادن درپوش‌های بالا و پایین بر روی نمونه، آن را در بین صفحات بارگذاری جک اعمال بار محوری قرار می‌دهند، سپس شلنگ‌های دستگاه فشار جانبی و پمپ اعمال فشار داخل گمانه به سلول متصل می‌شود. پس از آن تنش محوری و تنش جانبی بر روی نمونه اعمال می‌شود. پس از اینکه تنش‌های محوری و جانبی به مقدار مورد نظر رسید، فشار داخل گمانه افزایش داده می‌شود. این اعمال فشار تا زمانی ادامه دارد که فشار داخل گمانه افت کند. این افت فشار نشان از آن دارد که نمونه داخل سلول شکسته است. شکل ۱۰ نمونه‌ها بعد از شکست را نشان می‌دهد. شکستگی‌ها در راستای قائم (راستای محور نمونه) است. تنش محوری و فشار جانبی اعمال شده به نمونه‌های مورد آزمایش همچنین دمای گرمایش و سرمایش نمونه‌ها در دماهای ۵، ۱۰، ۱۵ درجه سانتی‌گراد در جدول ۲ آورده شده است. آزمایش‌هایی نیز بر روی نمونه‌هایی که در کوره قرار داده نشده‌اند در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام شده است. شکل ۱۱ دستگاه آزمایش را در هنگام اجرای یکی از این آزمایش‌ها نشان می‌دهد.

## ۴-۳- پمپ اعمال کننده فشار جانبی

این دستگاه برای اعمال و کنترل فشار جانبی و دارای ظرفیت ۶۰ مگاپاسکال است (شکل ۸). 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 می‌شود.



شکل ۸: پمپ اعمال فشار جانبی

### ۶- نتایج آزمایش

میانگین فشار شکست حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی در شکل ۱۲ ارایه شده است. میانگین فشار شکست نمونه‌هایی که در کوره گرم نشده‌اند و در دمای محیط آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آزمایش شده‌اند ۱۶۶۱ مگاپاسکال است. میانگین فشارهای شکست برای چهار نمونه که تا ۱۰۰ درجه گرم و تا ۵ درجه سرد شده‌اند، ۱۲۹۹ مگاپاسکال، برای سه نمونه که تا ۱۰۰ درجه گرم و تا ۱۰ درجه سرد شده ۱۴۱۷ مگاپاسکال و برای سه نمونه که تا ۱۰۰ درجه گرم و تا ۱۵ درجه سرد شده ۱۴۵۱ مگاپاسکال است و به دلیل اینکه نتایج آزمایش‌ها نزدیک به هم بود در هر حالت ۳ آزمایش انجام شد.



شکل ۱۰: نمونه‌ها پس از شکست

### ۷- تحلیل نتایج

با افزایش دمای سرمایش نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده‌اند، فشار شکست افزایش می‌یابد (شکل ۱۲). در مرحله گرمایش نمونه‌ها تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده‌اند در این مرحله نمونه‌ها منبسط و در مرحله سرمایش نمونه‌ها منقبض می‌شوند بر اساس رابطه ۱ می‌توان گفت تنش حرارتی در حالتی که نمونه‌ها در ۵ درجه سرد می‌شوند نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است زیرا در این حالت اختلاف درجه حرارت ۹۵ درجه سانتی‌گراد می‌شود و در اثر انبساط



شکل ۱۱: دستگاه آزمایش در هنگام انجام آزمایش شکست هیدرولیکی

جدول ۲: تنش محوری و فشار جانبی اعمال شده به نمونه‌ها

شماره نمونه	تنش محوری (مگاپاسکال)	فشار جانبی (مگاپاسکال)	دمای سرمایش نمونه (درجه سانتی‌گراد)	دمای گرمایش نمونه (درجه سانتی‌گراد)
۲-۲-۱	۷	۵	۱۵	۱۰۰
۲-۸-۲	۷	۵	۲۵	-
۴-۳-۱	۷	۵	۵	۱۰۰
۲-۷-۱	۷	۵	۱۰	۱۰۰
۴-۱-۲	۷	۵	۵	۱۰۰
۴-۱-۱	۷	۵	۵	۱۰۰
۴-۲-۱	۷	۵	۱۵	۱۰۰
۴-۲-۲	۷	۵	۱۰	۱۰۰
۳-۷-۱	۷	۵	۲۵	-
۲-۳-۱	۷	۵	۵	۱۰۰
۳-۷-۲	۷	۵	۵	۱۰۰
۳-۴-۲	۷	۵	۱۰	۱۰۰
۲-۴-۱	۷	۵	۱۵	۱۰۰
۲-۸-۱	۷	۵	۱۰	۱۰۰
۲-۸-۳	۱۶	۵	۱۵	۱۰۰

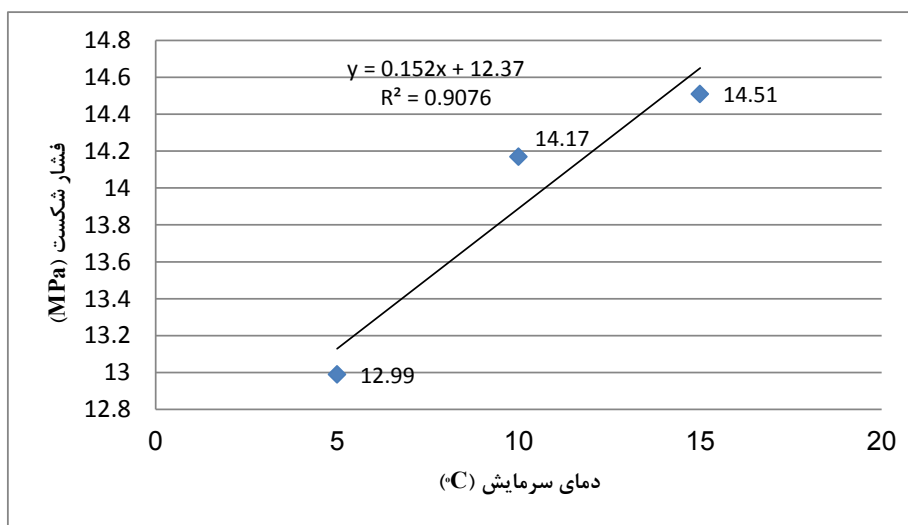


روند تغییرات فشار شکست در آزمایش شکست هیدرولیکی است. مقاومت تراکم تک‌محوری نمونه‌ها در حالت‌های سرمایه‌ش ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به مقاومت تراکم تک‌محوری نمونه‌هایی که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط شکسته شده‌اند به ترتیب ۲۱/۶۸، ۲۱/۲۱ و ۱۵/۳ درصد کاهش نشان می‌دهد.

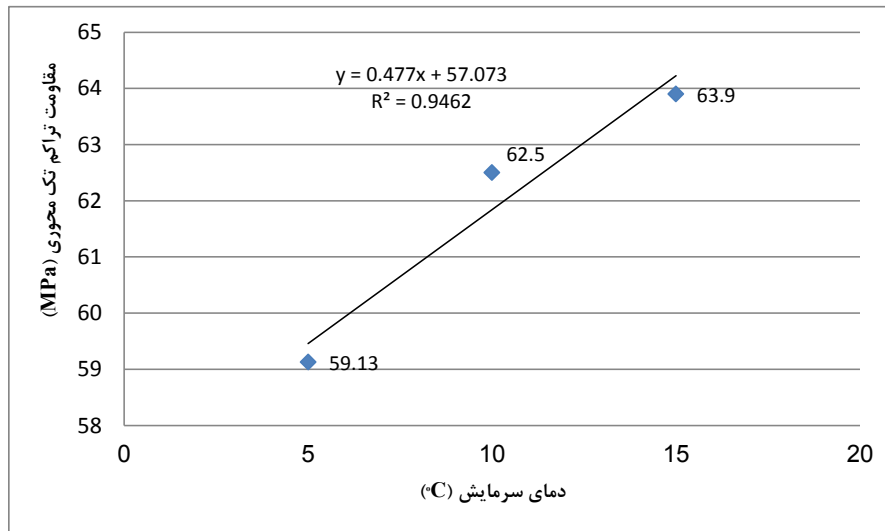
این تغییرات با تغییرات وزن مخصوص خشک و سرعت امواج طولی که در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شده است مطابقت دارد. تغییرات سرعت امواج طولی با دمای سرمایه‌ش در شکل ۱۴ و تغییرات وزن مخصوص خشک با دمای سرمایه‌ش در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با افزایش دمای سرمایه‌ش نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده‌اند، سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک افزایش می‌یابد. در نمونه‌های گرم شده‌ای که تا دمای ۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده‌اند در اثر شوک حرارتی که در اثر تنش حرارتی ایجاد می‌شود میکروترک‌هایی ایجاد می‌شود که موجب می‌شود، این نمونه‌ها کمترین سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک را داشته باشند زیرا تنش حرارتی در این حالت نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. میانگین سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک برای نمونه‌هایی که در کوره گرم نشده‌اند و در دمای محیط آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آزمایش شده‌اند به ترتیب ۳۳۰۰ متر بر ثانیه و ۲۱/۵۹ کیلونیوتن بر مترمکعب است. سرعت امواج طولی نمونه‌ها در حالت‌های سرمایه‌ش ۵، ۱۰ و

و انقباض نمونه، میکروترک‌ها افزایش می‌یابد. مقدار تنش محوری و فشار جانبی در همه آزمایش‌ها یکسان است، بنابراین قبل از اعمال فشار داخل گمانه، تنش مماسی که فشاری است بر طبق رابطه ۳ یکسان است. برای اینکه تنش مماسی در جداره داخلی استوانه به حالت کششی تبدیل شده و شکست هیدرولیکی در جداره ایجاد شود، نیاز به فشار سیال داخل گمانه است چون تنش حرارتی در حالتی که نمونه‌ها در ۵ درجه سرد می‌شوند بیشتر است، میکروترک‌ها در این حالت نسبت به دو حالت دیگر بیشتر و مقاومت کششی نمونه‌ها در این حالت نسبت به دو حالت دیگر کمتر است در نتیجه فشار شکست هیدرولیکی در حالتی که که نمونه‌ها در ۵ درجه سرد می‌شوند، کمتر است.

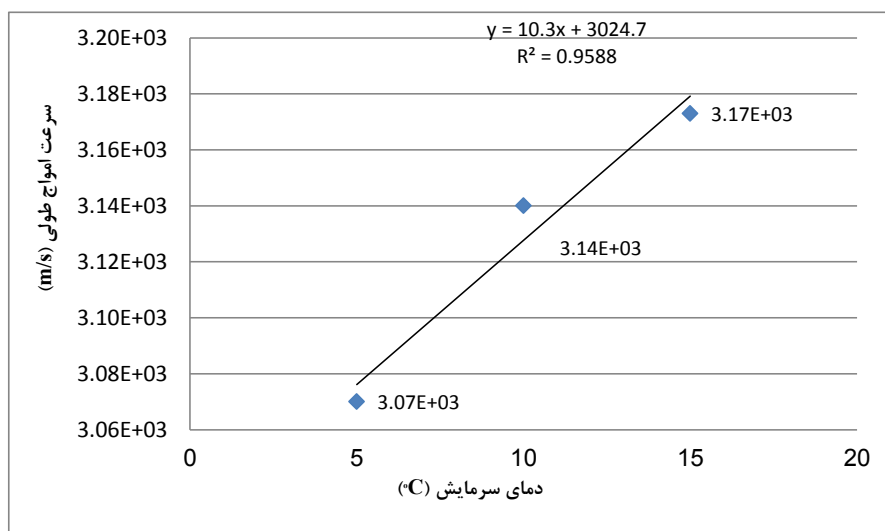
فشار شکست نمونه‌ها در حالت‌های سرمایه‌ش ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به فشار شکست نمونه‌های استوانه توخالی که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط شکسته شده‌اند به ترتیب ۲۱/۸، ۱۴/۶۷ و ۱۲/۶۱ درصد کاهش را نشان می‌دهند. این کاهش نشان از اثر تنش حرارتی روی فشار شکست هیدرولیکی در آزمایش شکست هیدرولیکی است. همچنین بر روی ۵ نمونه در هر حالت آزمایش تراکم تک‌محوری انجام شده که متوسط نتایج در شکل ۱۳ ارائه شده است. میانگین مقاومت تراکم تک‌محوری برای دو نمونه‌ای که در کوره گرم نشده‌اند و در دمای محیط آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی‌گراد) آزمایش شده‌اند، ۷۵/۵ مگاپاسکال است. تغییرات مقاومت تراکم تک‌محوری نسبت به دمای سرمایه‌ش مطابق با



شکل ۱۴: تغییرات فشار شکست با دمای سرمایه‌ش (نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده‌اند).



شکل ۱۳: تغییرات مقاومت تراکم تک محوری با دمای سرمایش (نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده‌اند).



شکل ۱۴: تغییرات سرعت امواج طولی با دمای سرمایش (نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده‌اند).

که در آن:

$\mu$ : گرانروی دینامیکی سیال (آب) (مگاپاسکال / ثانیه)

$q$ : شدت جریان (مترمکعب / ثانیه)

$L$ : طول نمونه (متر)

$A$ : سطح مقطع نمونه (مترمربع)

$\Delta p$ : اختلاف فشار سیال بین ورودی و خروجی (مگاپاسکال)

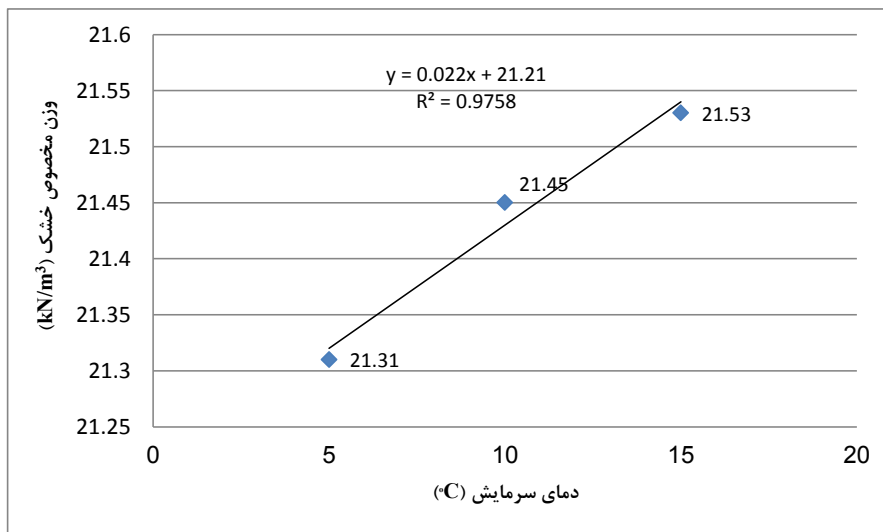
است.

بر اساس رابطه ۶ نفوذپذیری در حالت‌های مختلف تعیین شده است. مقادیر نفوذپذیری برای دماهای مختلف سرمایش

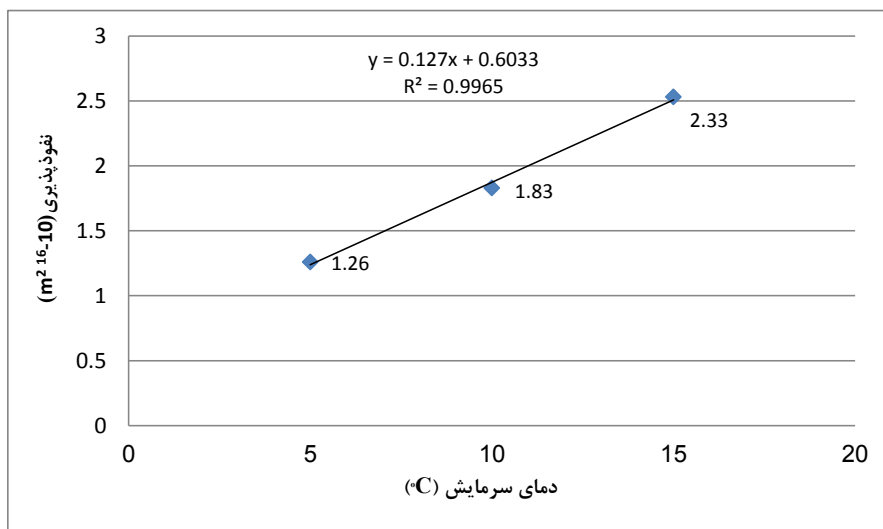
۱۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به سرعت امواج طولی نمونه‌هایی که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط شکسته شده‌اند به ترتیب ۶،۹۶، ۴،۸۴ و ۳،۸۵ درصد و برای وزن مخصوص خشک به ترتیب ۱،۳، ۰،۶۸ و ۰،۲۸ کاهش را نشان می‌دهد.

برای محاسبه نفوذپذیری از رابطه ۵ استفاده شده است [۳۵]. این رابطه برای تعیین نفوذپذیری در حالتی که جریان سیال یکنواخت است معتبر است.

$$k = \frac{\mu q L}{\Delta p A} \quad (5)$$



شکل ۱۵: تغییرات وزن مخصوص خشک با دمای سرمایش (نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده‌اند).



شکل ۱۶: تغییرات نفوذپذیری با دمای سرمایش (نمونه‌هایی که تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره گرم شده‌اند).

در شکل ۱۶ نشان داده شده است. نفوذپذیری نمونه‌ای که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط آزمایش شده  $1.83 \times 10^{-16}$  مترمربع بوده است که بعد از گرم شدن در کوره و سرد شدن در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد نفوذپذیری به  $1.26 \times 10^{-16}$  مترمربع می‌رسد، در این در این حالت نفوذپذیری ۷۹ درصد کاهش می‌یابد. علت این کاهش را می‌توان چنین بیان کرد که با سرد کردن، نمونه‌ها منقبض می‌شوند، هر چقدر دمای سرد کردن کمتر باشد، تنش حرارتی بیشتر و انقباض نمونه بیشتر می‌شود، این انقباض باعث آسیب زدن به مسیرهایی می‌شود که قبل از سرد کردن نمونه مسیر عبور سیال را به عهده داشتند. کاهش

می‌یابد و در نهایت نفوذپذیری اولیه نمونه‌ای که  $2.53 \times 10^{-16}$  مترمربع بوده است، بعد از گرم شدن در کوره و سرد شدن در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد به  $1.83 \times 10^{-16}$  مترمربع می‌رسد، در این حالت نفوذپذیری ۳۱ درصد کاهش می‌یابد. نفوذپذیری اولیه نمونه‌ای که  $2.33 \times 10^{-16}$  مترمربع بوده است بعد از گرم شدن در کوره و سرد شدن در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد به  $1.83 \times 10^{-16}$  مترمربع می‌رسد، در این حالت نفوذپذیری ۱۶٫۸ درصد کاهش

$$D = \frac{H_0 - H}{H_0} \quad (6)$$

که در آن:

$D$ : متغیر آسیب

$H$ : مقدار متوسط CT برای نمونه‌ای که شوک حرارتی را تحمل کرده است.

$H_0$ : مقدار متوسط CT برای نمونه‌ای که شوک حرارتی را تحمل نکرده است.

مقادیر محاسبه شده متغیر آسیب در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر متغیر آسیب ماسه‌سنگ با افزایش تنش حرارتی که با کاهش دمای سرد کردن نمونه‌ها اتفاق می‌افتد، افزایش می‌یابد. مقادیر سی‌تی از طریق نرم‌افزار eFilm Workstation (نسخه ۴.۲.۲) محاسبه شده است.

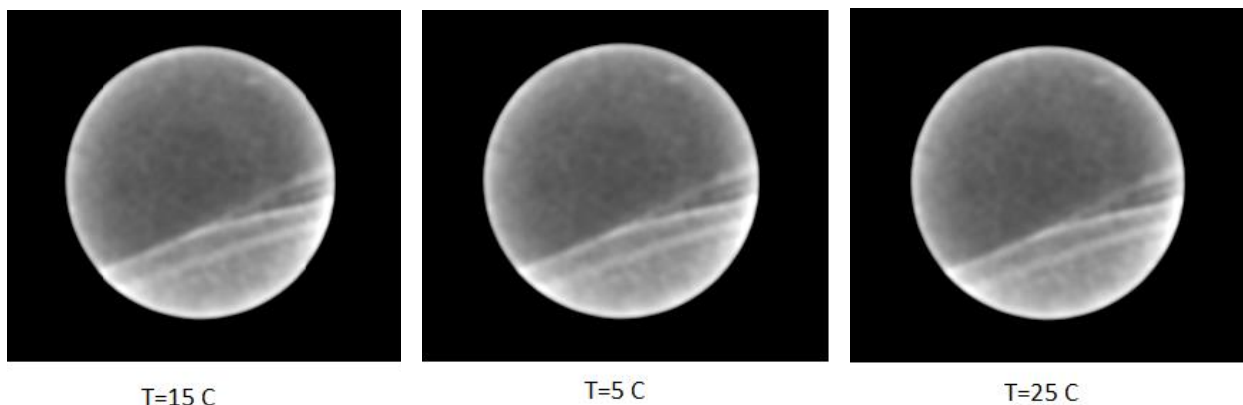
#### ۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی اثر تنش حرارتی روی فشار شکست هیدرولیکی آزمایش‌های شکست هیدرولیکی به وسیله سلول هوک تغییر یافته روی ماسه‌سنگ لوشان انجام شده است. برای تحلیل نتایج علاوه بر آزمایش شکست هیدرولیکی

نفوذپذیری در حالتی که نمونه‌ها تا ۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده‌اند به دلیل تنش حرارتی بیشتر و آسیب بیشتر مسیرها نسبت به دو حالت دیگر بیشتر است. این نتیجه با نتیجه پژوهش چالال و همکاران [۳۱] مطابقت دارد.

تصاویر سی‌تی‌اسکن نیز برای بررسی میزان آسیب ناشی از شوک حرارتی بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ استفاده شده است. تصاویر سی‌تی‌اسکن نمونه‌ای از ماسه‌سنگ تحت دماهای مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این روش ناحیه تیره‌تر نشان‌دهنده مواد با چگالی پایین‌تر و ناحیه روشن‌تر نشان‌دهنده مواد با تراکم بالاتر است. در شکل ۱۷ هیچ تفاوت قابل مشاهده‌ای بین این تصاویر وجود ندارد. بنابراین، یک پارامتر مناسب برای اندازه‌گیری وضعیت آسیب نمونه مورد نیاز است. این پارامتر مقدار سی‌تی است. واحد این اعداد به دست آمده به احترام هانسفیلد که در ابداع سی‌تی‌اسکن نقش بسیار مهمی داشته است، واحد هانسفیلد (Hu) نامیده می‌شود. مقدار سی‌تی نمونه، ترکیب و ساختار در ماده را بازتاب می‌دهد [۳۶].

از متغیر آسیب برای توصیف آسیب ناشی از عملیات حرارتی بر اساس میانگین سی‌تی استفاده می‌شود [۳۷].



شکل ۱۷: تصاویر سی‌تی‌اسکن نمونه ماسه‌سنگ (برای نمونه‌ای که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط ۲۵ درجه از آن عکس گرفته شده و دو نمونه دیگر که بعد از گرم شدن در کوره تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد در آب ۵ و ۱۵ درجه سانتی‌گراد سرد شده‌اند).

جدول ۳: مقدار سی‌تی و متغیر آسیب در دماهای مختلف

متغیر آسیب (%)	مقدار سی‌تی (Hu)	دما سرمایش (°C)	دمای گرمایش نمونه‌ها (°C)
۰	۱۶۵۴	۲۵	-
۲,۴۸	۱۶۱۴	۵	۱۰۰
۰,۷۳	۱۶۴۲	۱۵	۱۰۰

[3] Bareer, R. D., Fisher, M. K., and Woodroof, R. A. (2002). "A practical guide to hydraulic fracturing diagnostic technologies". SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 10-15.

[4] حسینی، م.، اکرمی، ع.، جعفری، ا.؛ ۱۳۹۷؛ "مدلسازی آزمایشگاهی و عددی شکست هیدرولیکی در ماسه سنگ های لوشان". نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد دوازدهم، شماره ۳، ص ۴۴۸-۴۲۹.

[5] معظمی گودرزی، ح.، آهنگری، ک.، شیخ ذکریایی، س. ج.؛ ۱۳۹۳؛ "تاثیر نسبت پواسون بر فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی". دومین همایش ملی نفت و گاز ایران.

[6] شفیعی زاده، ا.، فروزان، م.، فرامرزی، ل.؛ ۱۳۹۳؛ "شبیه سازی جوانه و رشد ترک در عملیات شکست هیدرولیکی چاه نفت با استفاده از معیار آسیب تنش اصلی پیشینه". مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره چهاردهم، شماره ۵، ص ۱۷۴-۱۶۴.

[7] سید سجادی، ش.؛ ۱۳۹۱؛ "تحلیل مطالعات ژئومکانیکی مخازن کشورهای حوزه خلیج فارس جهت تحلیل و اعمال روش و یافته ها در میدان هیدروکربن و روی ایران". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ص ۹۹.

[8] حسن پور، ر. ا.، چوپانی، ن. ع.؛ ۱۳۸۶؛ "اندازه گیری چقرمگی شکست سنگ و بررسی خصوصیات شکست آن تحت شرایط بارگذاری مرکب با استفاده از روش های عددی و آزمایشگاهی". سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، ص ۲۰-۱۵.

[9] بداغ آبادی، س.، فولاد چی، س.، موسوی، س. ج.؛ ۱۳۸۷؛ "تعیین پارامترهای مقاومتی سازندهای ماسه سنگی با استفاده از تخلخل". دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.

[10] برهانی کودهی، ه.؛ ۱۳۹۰؛ "تعیین خواص ژئومکانیکی مخزن با استفاده از داده های پتروفیزیکی و بررسی بهبود تولید با استفاده از بهینه سازی شکست هیدرولیکی". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ص ۱۱۴.

[11] Nasehi, M. J., and Mortazavi, A. (2013). "Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing". Journal of Petroleum Science and Engineering, 108: 211-221.

[12] قربانی، ا.؛ ۱۳۹۴؛ "پارامترهای موثر بر نتیجه عملیات شکست هیدرولیکی". ماهنامه علمی ترویجی اکتشاف و تولید، شماره ۱۲۳، ص ۸۰-۷۲.

[13] Wang, S. Y., Sun, L., Au, A. S. K., Yang, T. H. and Tang, C. A. (2009). "2D-numerical analysis of hydraulic fracturing in heterogeneous geo-materials". Construction and Building Materials, 23: 2196-2206.

[14] De pater, C. J., and Dong, Y. (2007). "Experimental study of hydraulic fracturing in sand as a function of

آزمایش هایی برای تعیین سرعت امواج طولی، وزن مخصوص خشک، مقاومت تراکم تک محوری و نفوذپذیری نیز انجام شده است. نتایج این آزمایش ها به شرح زیر است:

- فشار شکست هیدرولیکی در اثر افزایش تنش حرارتی کاهش می یابد. افزایش تنش حرارتی در اثر کاهش دمای سرد کردن نمونه ها اتفاق می افتد. این تنش حرارتی باعث افزایش میکروترک ها می شود، در اثر افزایش میکروترک ها مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد و رابطه هوک و ویلیس نیز نشان می دهد که در اثر کاهش مقاومت کششی فشار شکست هیدرولیکی کاهش می یابد.

- فشار شکست نمونه های ۱۰۰ درجه سانتی گراد که در دماهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درجه سانتی گراد سرد شده اند نسبت به فشار شکست نمونه های استوانه توخالی که بدون گرم شدن در کوره در دمای محیط شکسته شده اند به ترتیب ۲،۱/۸، ۱۴/۶۷ و ۱۲/۶۱ درصد کاهش یافت.

- سرعت امواج طولی و وزن مخصوص خشک در اثر افزایش تنش حرارتی کم شد.

- مقاومت تراکم تک محوری در اثر افزایش تنش حرارتی کاهش یافت.

- با افزایش تنش حرارتی از میزان نفوذپذیری کاسته شد که به علت آسیب دیدن مسیرهایی است که قبل از سرد کردن نمونه مسیر عبور سیال را به عهده داشتند و به واسطه انقباض نمونه ها این مسیرها آسیب دیده است.

- مقادیر سی تی که از تصاویر سی تی اسکن به دست آمده است، نشان داد متغیر آسیب با افزایش تنش حرارتی افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش میکروترک ها است.

## ۹- سپاس گذاری

از مسوولین دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) که این پژوهش با حمایت مالی آن ها انجام گرفته است، تقدیر و تشکر می شود.

## ۱۰- مراجع

[۱] آیت الهی، م.، پور کاویان، م. ح.، محمد علیها، م. ر.؛ ۱۳۹۰؛ "تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد ترک، در عملیات شکست هیدرولیکی". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ششم، شماره ۱۲، ص ۷۰-۶۱.

[2] Wilkinson, J. R., Teletzke, G. F., and King, K. C. (2006). "Opportunities and Challenges for Enhanced Recover in Middle East". SPE Monograph, 22: 15-20.

- [25] Hubbert M. K., and Willis, D. G. (1957). "Mechanics of hydraulic fracturing". Journal of American Association of Petroleum Geologists, 12(18): 239-257.
- [26] Blanton, T. L. (1986). "Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs". SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium, Louisville, May 18-21.
- [27] Daneshy, A. A. (1974). "Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness". Paper SPE 4852 Presented at the SPE European Spring Meeting, Amsterdam, the Netherlands, May 29-30.
- [28] Ghassemi, A., and Tarasovs, S. (2015). "Analysis of Fracture Propagation under Thermal Stress in Geothermal Reservoirs". Proceedings World Geothermal Congress 2015 Melbourne, Australia, 19-25 April.
- [29] Tarasovs, S., and Ghassemi, A. (2010). "A study of propagation of cooled cracks in a geothermal reservoir". In Geothermal Resources Council Annual Meeting, Sacramento, 34: 428-431.
- [30] Craig, S. L., Udell, K. S., McLennan, J., and Moore, J. (2014). "An experimental study of thermal and hydraulic geothermal reservoir stimulation of brittle impermeable material". In Thirty-Ninth workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, 50-55.
- [31] Chaalal, O., Islam, M. R., and Zekri, Y. A. (2017). "A Comprehensive Study of Thermal Stress on Limestone Rocks". Journal of Petrochemistry and Research, 1(1): 19-25.
- [32] Hoek, E., and Franklin, J. A. (1967). "A simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock". Imperial College of Science and Technology, University of London, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, 77: 22- 26.
- [33] Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R. (1987). "Sand and Sandstone". New York Springer-Verlag, pp. 553.
- [34] Ulusay, R., and Hudson, J. A. (2007). "The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006". ISRM Turkish National Group, pp. 628.
- [35] Boulin, P. F., Bretonnier, P., Gland, N., and Lombard, J. M. (2012). "Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media". Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles, 67(3): 387-401.
- [36] Yao, W., Liu, H. W., Xu, Y., Xia, K., and Zhu, J. (2017). "stress and fluid rheology". SPE 105620, Presented at the 2007 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference held in College Station, Texas, USA.
- [15] Brown, J. E., and Econmides, M. J. (1992). "practical considerations in Fracture Treatmeant Design". Elsevier, Amsterdm, Developments in Petroleum Science, 34: 1-88.
- [۱۶] علی پور کله بستی، م. بهلولی، ب.؛ ۱۳۹۱؛ "بررسی آزمایشگاهی تاثیر تنش های حرارتی بر شکست سنگ مخزن یکی از میادین نفتی دریایی ایران". مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۴، ص ۳۹-۴۸.
- [17] Charlez, P. (1996). "Thermally induced fracturing: analysis of a field case in North Sea". SPE no. 36916.
- [18] Fatehi, M., Pashapour, A., and Gholamnejad, J. (2012). "Relationship between fracture dip angle, aperture and fluid flow in the fractured rock masses". Journal of Mining and Environment, 2(2): 136-145.
- [۱۹] بهنیا، م، گشتاسبی، ک، فاتحی مرجی، م، گلشنی ع. ا؛ ۱۳۹۱؛ "تاثیر پارامترهای الاستیک لایه ها بر نحوه گسترش شکست هیدرولیکی با استفاده از روش ناپیوستگی - جابه جایی". نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، دوره دوم، شماره ۳، ص ۱۳-۱.
- [20] Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., and Yarahmadi-Bafghi, A. R. (2013). "A fracture mechanics concept of in-situ stress measurement by hydraulic fracturing test". In The 6th international symposium on in-situ rock stress. ISRM, Sendai, Japan Google Scholar.
- [21] Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A. R., and Gholamnejad, J. (2016). "Numerical investigation of effect of crack geometrical parameters on hydraulic fracturing process of hydrocarbon reservoirs". Journal of Mining and Environment, 7(2): 205-214.
- [22] Abdollahipour, A., Marji, M. F., Bafghi, A. Y., and Gholamnejad, J. (2015). "Simulating the propagation of hydraulic fractures from a circular wellbore using the Displacement Discontinuity Method". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 80: 281-291.
- [23] Moradi, A., Tokhmechi, B., Rasolui, V., and Fatehi Marji, M. (2018). "Displacement discontinuity analysis of the effects of various hydraulic fracturing parameters on the crack opening displacement (COD)". Journal of Petroleum Science and Technology, 8(3): 3-13.
- [24] 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.

---

*“Thermal degradation of dynamic compressive strength for two mortars”*. Construction and Building Materials, 136: 139-152.

[37] Huang, S., and Xia, K. (2015). *“Effect of heat-treatment on the dynamic compressive strength of Longyou sandstone”*. Engineering Geology, 191: 1-7.

---

<sup>1</sup> Tellus 46



DOI: 10.30479/jmre.2019.9861.1208

## Experimental Study of Thermal Stress Effect on Hydraulic Fracturing Pressure of Lushan Sandstone

Hosseini M.<sup>1\*</sup>, Eftekhari P.<sup>2</sup>, Shahrizad P.<sup>3</sup>

- 1- Associate Professor, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin, Iran  
meh\_hosseini18@yahoo.com
- 2- B.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin, Iran  
parmidaef@gmail.com
- 3- B.Sc Student, Dept. of Mining Engineering, Imam Khomeini International university, Qazvin, Iran  
parastoo.sh76@yahoo.com

(Received: 29 Dec. 2018, Accepted: 03 Mar. 2019)

**Abstract:** Hydraulic fracturing is used in the oil industry in order to increase the index of production and processing in wells whose efficiencies have been dropped due to long-term harvest or the rocks around the well are low permeable. Since the hydraulic fracturing operation is costly, it is of special importance to determine the pressure required for hydraulic fracturing and the suitable pump for this operation to the project managers. In this research, sandstone specimens of Lushan area were used and investigated the effect of thermal stress on hydraulic fracturing pressure of sandstone. The Hoek triaxial cell was adapted for a laboratory modelling of hydraulic fracturing. The specimens under study are in the shape of thick-walled hollow cylinders with an external diameter of 54.7 mm, an internal diameter of 12 mm, and a height of 108 mm. To study the effect of thermal stress, the tests were conducted on the specimens that heated up to 100 °C in the furnace at heating process and then cooled in water 5, 10 and 15 °C. Results indicated that hydraulic fracturing pressure reduced with decreasing Cooling temperature of samples. In hydraulic fracturing operations, this decreasing fracture pressure causes the pump to be purchased at a lower pressure production capacity, resulting in lower operating costs. Hydraulic fracturing pressure changes in the effect of thermal stress were consistent with the variations of velocity of longitudinal waves, dry unit weight, uniaxial compressive strength and permeability. CT scan images were used to examine micro cracks changes in the effect of thermal stress and the CT value calculated by the images confirms hydraulic fracturing pressure variations.

**Keywords:** Sandstone, Thermal stress, Hydraulic fracturing.

### INTRODUCTION

In petroleum reservoirs, source rock is heated and cooled constantly during drilling and extraction processes. In addition, throughout the extraction process fluids can be pumped artificially into the reservoir to cause changes in the source rock temperature. According to the theory, if a material is placed in a thermal



field, a form of mechanical stress is created in it that is called thermal stress. The rocks in the reservoir usually have a temperature above 100 C. When a cold fluid is injected into the mentioned area during hydraulic fracturing, thermal stress is created due to the changes in temperature which is calculated based on Eq. (1).

If there are no cracks in the rock, micro-cracks are formed in the rock due to this thermal stress, causing a hydraulic fracture to occur under smaller fluid pressure. If the rock has initial cracks, as a result of the thermal stress, tensile stress is generated at the crack tip in the cooled region. If the amount of this tensile stress is greater than the tensile strength of the rock, the initial cracks are propagated and the secondary cracks are formed and the permeability of the source rock increases which leads to an increase in the oil or gas extraction from the reservoir.

The amount of thermal stress is calculated in an elastic and isotropic material based on Eq. (1) [1]:

$$\text{Thermal stress} = \frac{\alpha E \Delta T}{1-\nu} \quad (1)$$

Where  $\alpha$ ,  $\nu$ ,  $E$ , and  $\Delta T$  represent the coefficient of linear thermal expansion, Poisson's ratio, Young's modulus, and temperature change respectively.

The majority of the studies have been conducted on the effect of thermal stress on initial crack propagation, and in the study of Craig et al. [2] the effect of thermal stress was investigated after hydraulic fracturing. In this study, the effect of thermal stress on hydraulic fracturing pressure has been investigated, and in this respect, it can be considered a new investigation. Also, the CT scan has been used to study specimen damage under thermal stress, which is counted among the advantages of this study.

### Materials studied and the method of experiment

The Sandstone block samples from Lushan were transferred to the laboratory. For microscopic examination, a thin section was prepared from the specimen and examined under a microscope.

The physical and mechanical properties of the specimen including effective porosity, dry weight, uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, modulus of elasticity, Poisson's ratio and cohesive were determined using the methods proposed by the International Society of Rock Mechanics [2]. To determine the uniaxial compressive strength, the modulus of elasticity and the Brazilian tensile strength, cores with a diameter of 54 mm and a length/diameter ratio of 2 were used with a strain gauge for uniaxial compressive strength and a diameter-to-thickness ratio of 2 for the Brazilian tensile strength. The triaxial tensile test was carried out to determine cohesion and internal friction angle with the help of Rock Lab Software. Saturation and immersion methods were used to determine the dry weight and effective porosity of the specimen (Table 1).

**Table 1.** Physical and mechanical properties of sandstone

Dry unit weight (KN/m <sup>3</sup> )	Effective porosity (%)	Poisson's ratio	Elastic modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Uniaxial compressive strength (MPa)
21.88	10.27	0.26	17.37	4.59	72.8

To perform a hydraulic fracture test, after specimen preparation, it is placed in the test cell. After placing the top and bottom caps on the specimen, it is placed in load plates of the jack to apply the axial load. Then, the tubes of the lateral pressure device and the pressure pump inside the borehole are attached to the cell. After that, the axial stress and lateral stress are applied to the specimen. After the axial and lateral stress reached the desired amount, the pressure inside the bore is increased. This pressure is applied until the pressure inside the borehole drops. This pressure drop indicates that the specimen inside the cell has fractured. Fig.1 shows the specimens after the fracturing. Fractures are propagated along the vertical axis of the specimen. Axial stress and lateral pressure applied to the specimens tested as well as heating and

cooling temperature of specimens at temperatures of 5, 10, 15 °C . Experiments are also performed at ambient temperature (25 °C) on specimens that were not put in the furnace.



Figure 1. The specimens after fracture

## RESULTS

In Figure 2, the mean of fracture pressure from hydraulic fracturing test is presented. The mean of the fracture pressure of the specimen that was not heated in the furnace and tested at the temperature of the lab environment (25 °C) is 16.61 MPa. The mean of fracture pressures for four specimens that was heated up to 100 °C and cooled down to 5 °C is 12.99 MPa, for three specimens that were heated up to 100 °C and cooled down to 10 °C is 14.17 MPa, and for the three specimens that were heated up to 100 °C, and cooled down to 15 °C is 14.51 MPa. It should be noted that there were 3 experiments conducted in each case as the experimental results were close together.

As shown in Figure 2, the fracture pressure increases with the increase in cooling temperature of the specimens heated up to 100 C. In the heating phase, the specimens were heated up to 100 C. At this stage, the specimens expanded and then contracted during the cooling phase. Based on Eq. (1), it can be said that thermal stress is higher in the case where specimens are cooled at 5 °C in comparison with the other two cases, as in this case, the temperature difference becomes 95 °C. Also, because of the specimen expansion and contraction, the number of micro-cracks increase. The amount of axial stress and lateral pressure is the same in all experiments. The tangential stress is compressive before the pressure is applied inside the bore. The fluid pressure inside the bore is necessary for the tangential stress on the inner wall of the cylinder to transform into tensile stress and hydraulic fracture to occur in the wall. Since the thermal stress is higher in the case of specimens cooled at 5 °C, the number of micro-cracks of specimens, in this case, is higher while the tensile strength of specimens is lower compared to two other modes, hence the pressure of hydraulic fracture lower with the specimens cooled at 5 °C.

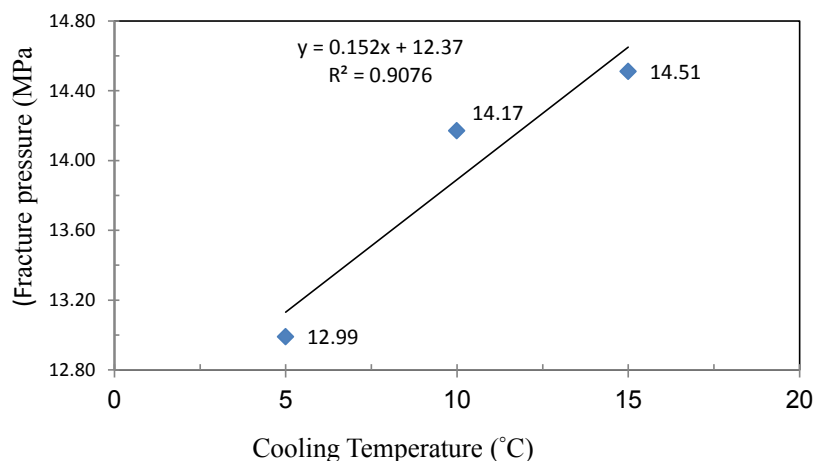


Figure 2. The mean of fracture pressure from hydraulic fracturing test

## CONCLUSION

The results can be concluded as follows:

- The hydraulic fracturing pressure decreased as a result of the increase in the thermal stress. The increase in thermal stress occurs due to the reduction in the cooling temperature of the specimen. This thermal stress increases the number of micro-cracks. Due to the increase of the micro-cracks, the tensile strength of the specimens decreases. Moreover, Hooke and Willis's equation also shows that due to the decrease in tensile strength, hydraulic fracturing pressure is decreased.
- The fracture pressures of 100 °C specimens, cooled at temperatures 5, 10 and 15 degrees Celsius, was reduced by 8.21 %, 14.67 %, and 12.61% respectively, compared to the fracturing pressure of hollow cylinder specimens that fractured at ambient temperature without heating in the furnace.
- The velocity of the longitudinal wave and the dry unit weight was reduced due to the increased thermal stress.
- Uniaxial compressive strength was decreased by increasing thermal stress.
- With increasing thermal stress the permeability was decreased due to the damage to the paths that directed the fluid flow before cooling the specimen. These paths were affected as a result of the contraction of the specimens.
- The CT values obtained from images of the CT scan showed that the damage variable increased with increased thermal stress, indicating the increase in the number of micro-cracks.

## REFERENCES

- [1] Charlez, P. (1996). *“Thermally Induced Fracturing: Analysis of a Field Case in North Sea”*. SPE no. 36916.
- [2] Craig, S. L., Udell, K. S., McLennan, J., and Moore, J. (2014). *“An experimental study of thermal and hydraulic geothermal reservoir stimulation of brittle impermeable material”*. In Thirty-Ninth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, 50-55.
- [3] International Society for Rock Mechanics, and Ulusay, R. (2007). *“The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006”*. International Soc. For Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.