

# بررسی آزمایشگاهی تاثیر تنش‌های حرارتی بر شکست سنگ مخزن یکی از میادین نفتی دریایی ایران

مهدی علی‌پور کله بستی<sup>۱\*</sup> و بهمن بهلولی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مخازن شرکت ملی نفت ایران، برنامه‌ریزی تلفیقی، منابع هیدروکربوری، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۹/۳/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۱/۱۰/۵)

## چکیده

در برخی از میادین نفتی تراوایی کم سنگ مخزن سبب تولید ناچیز چاه‌ها می‌شود. از جمله روش‌هایی که می‌توان برای افزایش تراوایی و در نهایت افزایش تولید چاه‌ها به کار گرفت، روش شکافت حرارتی در سنگ است. تنش حرارتی که در فرایند تزریق شاره سرد در مخزن ایجاد می‌شود در واقع بخشی از تنش لازم در فرایند شکافت هیدرولیکی است که سبب کاهش فشار شکست سنگ می‌شود. اگر این تنش به حد بحرانی برسد، موجب شکست سنگ می‌شود و با افزایش شکستگی‌ها، تراوایی توده سنگ مخزن زیاد می‌شود و تولید چاه افزایش می‌یابد. در این بررسی آزمایشگاهی، تاثیر اختلاف حرارت و تنش ایجاد شده در سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که امکان ایجاد شکستگی‌های ریز با اختلاف حرارتی ۹۰ درجه سلسیوس وجود دارد. بر این اساس دو نمونه از چهار نمونه آثاری از ریزشکستگی را نشان دادند. این شکستگی‌ها عمدتاً در بخش میانی نمونه‌ها روی داده است که علت این امر نحوه گسترش نیم‌رخ حرارتی (سرمایش) و تشکیل جبهه تنش در این بخش از نمونه‌ها است.

واژه‌های کلیدی: میادین نفتی، شکافت حرارتی، تنش حرارتی، فشار شکست، شکافت هیدرولیکی، شکستگی، تزریق

## Experimental study of the effect of thermal stresses on the failure of a carbonate rock, southern Iran

Alipour Kallehbasti, M.<sup>1</sup> and Bohloli, B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Senior Reservoir Engineer National Iranian Oil Company, Corporate Planning, Hydrocarbon Resources, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Iran

(Received: 08 Jun 2010, Accepted: 25 Dec 2012)

## Abstract

Productivity of an oil well is an important parameter in any oil field development. Low production rate of the wells, impose more production wells drilling which directly jeopardizes the economical feasibility of the project. Oil production rate in some of the wells is very low due to low permeability of the reservoir rock. Several practice like hydraulic fracturing and acid fracturing is very common in the oil industry. In these methods high pressure fluid (or acid) is injected into the reservoir and when the pressure exceeds the rock strength, it starts to fall apart. Thermal cracking is one of the methods used indirectly to increase rock mass permeability and consequently oil production. Thermal stress induced by injecting cold fluid into the reservoir is actually part of the stress needed to break down the reservoir rock during hydraulic fracturing process. If this exceeds the critical magnitude, the rock will fail leading to permeability and productivity enhancement. Effect of thermal stress in enhancement of injection well during water

flooding process and wellbore stability has been investigated and reported in several papers, however thermal stress as a method is not addressed and reported elsewhere.

In this experimental study effect of temperature gradient and induced thermal stress was investigated on one of the Iranian carbonate oil reservoir. The field is a carbonate reservoir with low permeability less than few mili-darcy. Well production is very small as low as 300 stb/day in some wells which makes the field a good candidate of stimulation job. Several samples have been taken from the reservoir and prepared for the experiments. The carbonate rock of the reservoir is very heterogeneous and contains layers of clay. Initial study on thin section shows that heterogeneous texture of the reservoir rock has the potential of thermal stress concentration. Three categories of fractures were distinguished in the reservoir rock which could be considered as weak surface in the process. Numerical simulation performed with FLAC simulator to understand how heat propagates with time in the rock sample. An experimental set up was designed for cooling the rock samples. The rock sample heated up to reservoir temperature which is almost 90°C and contained with a glass cap on its top. Hot water was circulated through the glass cap to keep the sample in the reservoir temperature during the experiment. Then the sample was cooled from one side to study the effect of temperature on the rock sample. The samples were CT scanned along and perpendicular to its axis before and after the experiment and each section was carefully analyzed for possible fracture. Experimental results showed that thermal cracking is feasible by imposing 90 °C degrees temperature variation. Experiments performed on four samples of which two showed induced tiny fractures. The mini-fractures were mostly in the middle part of the sample which is related to temperature profile and induced thermal stress front inside the sample. Our experiment shows that thermal stress effect could cause fracture initiation in the sample and may be used as a driving force of fracturing in conjunction with hydraulic fracturing process for well stimulation. The results also indicate that thermal stress is important and should be considered in process like wellbore stability.

**Key words:** Oil well, Hydraulic fracturing, Thermal cracking, Low permeability, Hot water, Well stimulation, Thermal stress, CT scan

## ۱ مقدمه

ادامه تزریق، شکاف ایجاد شده در سازند گسترش می‌یابد. تحقیقات آزمایشگاهی متعددی به منظور بررسی پارامترهای متفاوت موثر (به جز دما) در فشار شکست هیدرولیکی صورت گرفته است (علی‌پور، ۲۰۰۳). اما در کمتر مقاله‌ای اثر مستقیم حرارت در ایجاد شکستگی در متن ناهمگن سنگ با توجه به دامنه تغییر دما در مخزن به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد زیادی از محققان پدیده شکست حرارتی در سنگ را مورد بررسی قرار داده‌اند که بیشتر این بررسی‌ها بر محورهای زیر متمرکز بوده است:

- تحریک چاه‌های تولیدی با استفاده از تاثیر توانان

میزان تولید چاه‌های نفتی تابع پارامترهای متعدد مخزنی از جمله تراوایی سنگ است. تراوایی سنگ مخزن به دو بخش اولیه و ثانویه تقسیم می‌شود که شکستگی‌ها نقش بسیار مهمی در تراوایی ثانویه دارند. چنانچه بتوان در سنگ مخزن شکستگی‌های مصنوعی ایجاد کرد تراوایی آن به شدت افزایش خواهد یافت.

شکافت هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین روش‌هایی است که به منظور ایجاد شکستگی‌های مصنوعی و افزایش تولید نفت و گاز در چاه‌ها صورت می‌گیرد. در فرایند شکافت هیدرولیکی، شاره با فشار کافی به منظور شکست سنگ به سازند تزریق می‌شود؛ پس از ایجاد شکست و با

خواهد شد که به نوبه خود باعث کاهش اختلاف تنش‌های عمود و موازی شکاف می‌شود. با ادامه تزریق، گسترش شکاف در سازند به حدی می‌رسد که تنش موازی شکاف کمتر از تنش عمود بر شکاف می‌شود. در چنین شرایطی شکاف‌های عمود بر شکاف اولیه ایجاد می‌شود. چنین شکاف‌های ثانویه‌ای در چاه‌های زمین‌گرمایی نیز گزارش شده است.

## ۲ وضعیت توده‌سنگ در چاه شماره A-4

نمونه‌هایی از مغزه چاه A-4 در شکل شماره ۱ دیده می‌شود که شامل آهک و آهک ماری است. سنگ‌های رسوبی معمولاً از نظر خواص فیزیکی-مکانیکی و هیدرولیکی ناهمسانگرد هستند که این مسئله ناشی از شرایط تشکیل آنها است. این خاصیت در شکل ۱ به خوبی نمایان است. شکل مغزه‌ها در عمق ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۶/۵۰ متر به صورت دیسکی شکل است که نشان از جدایش مغزه در حین و یا پس از حفاری دارد (شکل ۱). علاوه بر دست‌خوردگی برای گرفتن مغزه، علت دیسکی‌شکل بودن مغزه‌ها می‌تواند وجود لایه‌های رُسی در سنگ باشد. به‌طور کلی ناهمسانگردی توده سنگ پارامتر بسیار مهمی است که پتانسیل ایجاد شکاف در آن را افزایش می‌دهد. این مسئله در مورد شکافت حرارتی بیشتر بروز پیدا می‌کند چون اختلاف تنش در نقاط متفاوت سنگ سبب ایجاد شکاف می‌شود. همچنین در فاصله عمقی ۲۰۶۷/۷۶ تا ۲۰۷۲/۲۱ سطوح ناپیوستگی فراوانی در راستای افقی دیده می‌شود. این سطوح در هنگام تزریق شاره سرد در حکم سطوح رسانای جریان شاره و همچنین دما عمل می‌کنند و جهت ایجاد شکستگی‌های حرارتی را تعیین خواهند کرد.

## ۱-۲ انواع شکستگی در چاه

تجزیه و تحلیل داده‌ها و تصاویر درون‌چاهی، وجود دو نوع شکستگی اصلی با منشأ زمین‌ساختی را نشان می‌دهد.

تنش حرارتی و فشار شاره تزریقی

- استفاده از اثر تنش‌های حرارتی در طراحی حداکثر فشار قابل حصول در سیلاب‌زنی چاه‌ها
- اثر توامان فشار تزریق و تنش‌های حرارتی حاصل در افزایش تزریق‌پذیری چاه‌ها
- ایجاد شکاف در مخازن زمین‌گرمایی (ژئوترمال)
- تاثیر تغییرات حرارت توده‌سنگ روی پایداری دیواره چاه
- تاثیر حرارت روی هرزروی گل حفاری

چارلز (۱۹۹۶) پدیده شکست القایی حرارتی ناشی از تزریق آب در یک مخزن را از طریق مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار دادند که در آن تحقیق ترک‌های حرارتی در اطراف چاه‌های تزریق مشاهده شد.

تانگ و لو (۱۹۹۸) اثر تنش‌های حرارتی را در پایداری چاه هنگام حفاری مورد بررسی قرار دادند.

ابتدا بر اساس نظریه گرماکشان معادلات تنش حرارتی حاصل از تغییر دما در اطراف چاه مشخص شد سپس تنش حرارتی با تنش مکانیکی ترکیب شد و در پایان اثر تنش حرارتی در پایداری چاه با استفاده از معیار موهر-کلمب در شرایط حفاری بررسی شد.

بررسی تاریخیچه هرزروی گل حفاری به‌خصوص در آب‌های عمیق لزوم در نظر گرفتن اثرات دما در تنش سازند را در حکم یک علت احتمالی نشان می‌دهد. آزمایش‌ها و بررسی‌های صورت گرفته در چندین چاه نشان می‌دهد که ارتباط عمیقی میان دمای چاه و هرزروی گل حفاری وجود دارد.

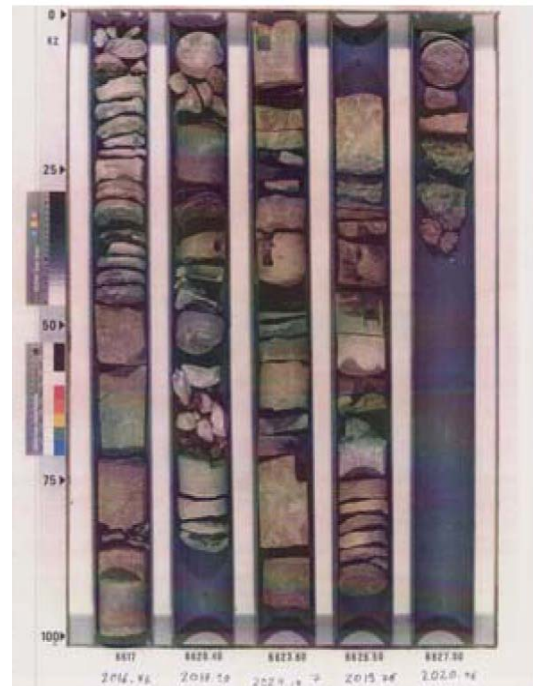
پرکینز و گزالس (۱۹۸۴، ۱۹۸۵) اثر گرادیان فشار و دما در تغییر تنش‌های اطراف چاه و اثر ناشی از این تنش‌ها در شکافت سنگ اطراف چاه‌های تزریقی را به صورت نظریه بررسی کردند. به اعتقاد آنها هنگام تزریق، وقتی فضای سرد گسترش می‌یابد، کاهش در تنش موازی با شکاف ( $\sigma_2$ ) بیشتر از کاهش تنش عمود بر شکاف

هستند. دسته سوم، شکستگی‌های پراکنده در جهت N130 هستند، این دسته فقط در یک چاه مشاهده می‌شوند و نمی‌توان آنها را به کل مخزن تعمیم داد.

## ۲-۲ بررسی مقاطع میکروسکوپی

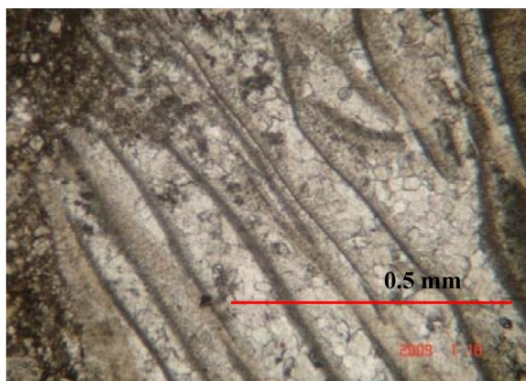
به منظور شناخت سنگ مخزن، تعدادی مقاطع نازک از نمونه‌های چاه A-4 تهیه شد. بررسی‌های میکروسکوپی مقاطع نشان داد که ناهمگنی زیادی در متن سنگ وجود دارد. علاوه بر این ریزشکستگی‌هایی در سنگ وجود دارد که عمدتاً طی مراحل بعدی با سیمان کلسیتی پر شده است.

وجود ناهمگنی سنگ‌شناسی نشان‌دهنده این است که سنگ می‌تواند در مقابل تغییرات حرارتی رفتار متفاوت در بخش‌های متفاوت داشته باشد و انتظار می‌رود ترک‌های حرارتی احتمالاً از محل سطح ضعف موجود در سنگ شروع شود. محل تلاقی درزها با متن سنگ و همچنین مرز فسیل‌های فراوان با سیمان می‌تواند در حکم نقاط ضعف محسوب شود و نقاط شروع شکستگی‌های میکروسکوپی باشد. شکل زیر دو نمونه از مقاطع میکروسکوپی سنگ مخزن را نشان می‌دهد.

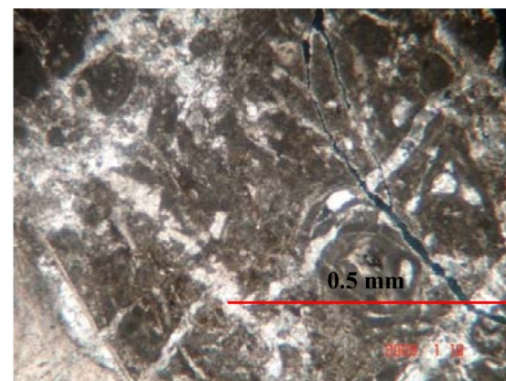


شکل ۱. مغزه‌های چاه A-4 در فاصله عمقی ۲۰۶۷/۷۶ تا ۲۰۷۲/۲۱ متر. سطوح ناپیوستگی و شکستگی در مغزه‌ها قابل مشاهده است.

به‌طور کلی می‌توان شکستگی‌های موجود را به سه دسته تقسیم کرد: دسته اول شرقی-غربی، دسته دوم شمالی-جنوبی و دسته سوم شکستگی‌های پراکنده. شکستگی‌های دسته اول و دوم تقریباً در همه چاه‌ها قابل تشخیص و محصول رژیم تنش زمین‌ساختی منطقه



(ب)



(الف)

شکل ۲. مقاطع میکروسکوپی سنگ مخزن چاه A-4.

### ۳ روش کار

#### ۱-۳ تئوری شکست حرارتی

در مخازن نفتی، سنگ مخزن طی فرایندهای حفاری و بهره‌برداری به‌طور متوالی سرد و گرم می‌شود. علاوه بر این، می‌توان در زمان بهره‌برداری به‌طور مصنوعی شاره‌هایی به مخزن تزریق کرد تا سبب تغییر درجه حرارت سنگ مخزن شوند. براساس نظریه، اگر ماده‌ای در یک میدان حرارتی قرار گیرد در آن تنش مکانیکی ایجاد خواهد شد که به آن تنش حرارتی گفته می‌شود. اگر مقدار این تنش بیش از مقاومت سنگ باشد، سبب شکست آن می‌شود. مقدار تنش حرارتی براساس فرمول زیر محاسبه می‌شود (چارلز، ۱۹۹۶):

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

در این رابطه،  $\alpha$ ،  $\nu$ ،  $E$  و  $T$  به ترتیب ضریب انبساط حرارتی خطی، ضریب پواسون، مدول یانگ و دما هستند. براساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته و مقادیر استاندارد پارامترها (جدول ۱) در فرمول فوق مقدار تنش حرارتی حاصل به‌ازای هر ۱۰ درجه سلسیوس تغییر، حدود ۴/VMPa خواهد بود. با توجه به اینکه تغییر دما در هنگام تزریق در مخزن به بیش از ۵۰ درجه می‌رسد، انتظار می‌رود سنگ مخزن در مقاطع ضعیف خود دچار شکست شود. به همین جهت، برای سنجش رفتار سنگ مخزن در مقابل چنین تغییراتی، آزمون‌های حرارتی آزمایشگاهی طراحی شد. هدف از آزمایش‌های حرارتی، مشخص کردن رفتار نمونه‌های سنگی در بازه‌ای از تغییرات حرارتی است که ممکن است در مخازن نفتی روی دهد.

#### ۲-۳ مدل‌سازی تنش حرارتی در سنگ

جهت طراحی روش آزمایشگاهی مناسب ابتدا یک مجموعه آزمایش‌های راهنما و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار FLAC برای گرم کردن و سرد کردن نمونه‌ها صورت گرفت.

شرایط گرم کردن نمونه و هم‌دما شدن مرکز نمونه :

۱. نمونه دارای دمای محیط است.
  ۲. نمونه در کوره قرار می‌گیرد و تا حرارت ۹۰ درجه گرم می‌شود.
  ۳. گرما از همه طرف نفوذ می‌کند.
- شبیه‌سازی این گرمایش نشان می‌دهد که مرکز نمونه موردنظر بعد از حدود ۸ ساعت به دمای ۹۰ درجه می‌رسد.

شرایط سرد کردن نمونه گرم:

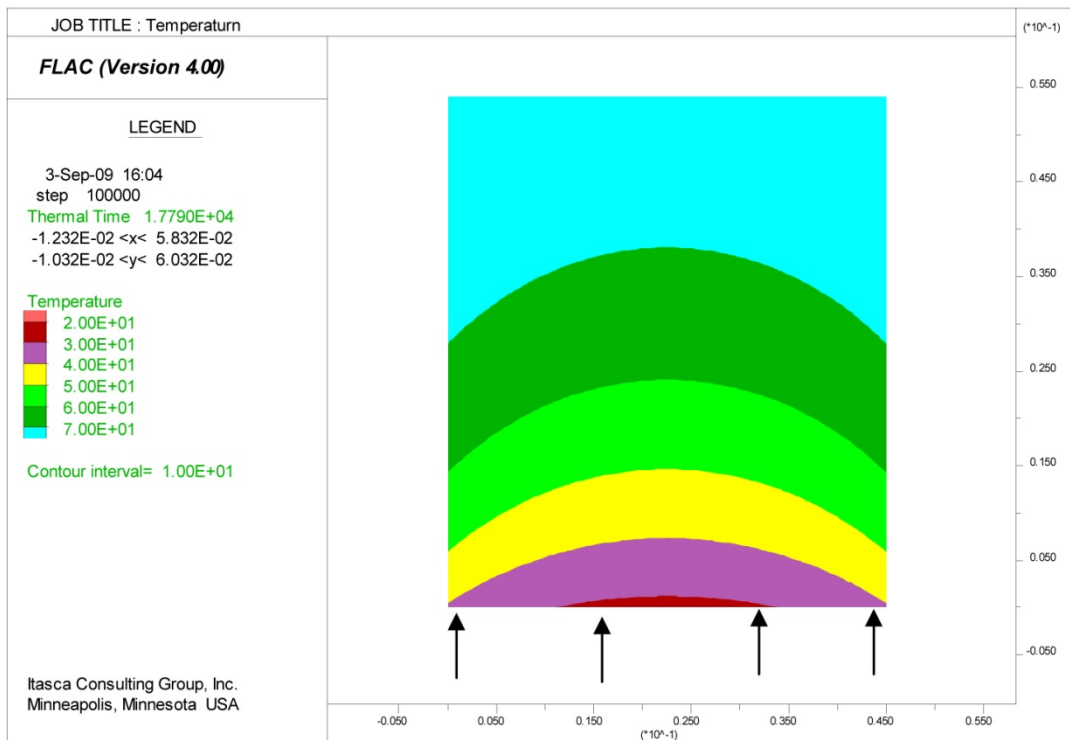
۱. سنگ مخزن دارای درجه حرارت ثابت ۹۰ درجه سلسیوس است.
۲. سنگ از یک طرف در تماس با شاره سرد با درجه حرارت ۵ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد.

ورودی‌های نرم‌افزار به‌منظور ساخت مدل دو بُعدی نمونه، براساس آزمایش‌های صورت گرفته و استانداردهای موجود برای سنگ‌های کربناته به شرح جدول زیر انتخاب شد.

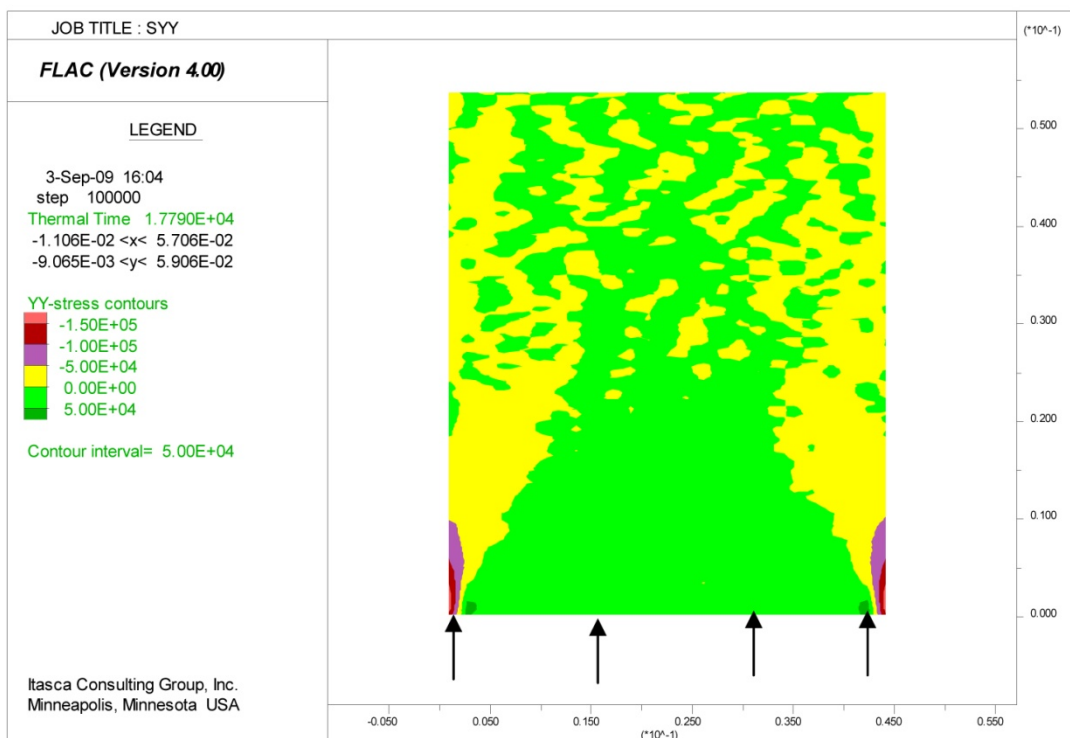
شکل ۳ تغییر دمای نمونه و تنش حاصل از سرمایش نمونه گرم به ابعاد  $5 \times 3.2 \times 2$  سانتی‌متر با شبکه‌بندی  $100 \times 25$  که از یک طرف در معرض منبع سرمایش (پیکان‌های شکل ۳) قرار گرفته را نشان می‌دهد.

#### ۳-۳ دستگاه آزمایش سرمایش

دستگاه آزمایش متشکل از سه بخش مطابق شکل ۴ طراحی است. بخش اول مخزن آب گرم و ترموپمپ موجود در آن است که ضمن گرم کردن آب تا حرارت دلخواه، موجب چرخش آب در دستگاه می‌شود. بخش دوم شامل سلول شیشه‌ای دوجداره است که نمونه در داخل آن قرار می‌گیرد و آب گرم در اطراف آن می‌چرخد و دمای ثابت بالا و اطراف نمونه را تأمین می‌کند. بخش سوم ظرف یخ و استوانه آلومینیومی داخل آن است که نمونه روی آن قرار می‌گیرد و سبب سرد شدن نمونه از یک طرف می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۳. (الف) نمودار توزیع دما در نمونه و (ب) تنش YY در پایان آزمایش.

جدول ۱. خواص فیزیکی مکانیکی نمونه.

واحد	مقدار	خواص
J/(kg.k)	۸۴۰	ظرفیت گرمایی ویژه
W/(m.k)	۱,۳	ضریب رسانش حرارت
W/(m2.k)	۱۰۰	ضریب انتقال حرارتی آب
W/(m2.k)	۲۰	ضریب انتقال حرارتی هوا
۱/C	۱e-۵	ضریب انبساط حرارتی خطی
pa	۳۵e۹	مدول یانگ
-	۰,۲۵	نسبت پواسون
kg/m <sup>۳</sup>	۲۸۰۰	چگالی

### ۳ بررسی نتایج آزمایش با استفاده از CT-Scan

چهار نمونه مورد بررسی عبارتند از A۳، B۱، B۲ و S۱ (شکل ۴). از هر نمونه ۱۰ برش CT-Scan قبل و ۱۰ برش پس از آزمایش ها گرفته شد. برش های متناظر در دو مرحله، به دقت با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج بیانگر آن است که در ۲ نمونه از ۴ نمونه تغییراتی در داخل نمونه ها قابل مشاهده است (B۱ و B۲). نمونه S۱ احتمالاً به دلیل کوچک تر بودن قطر و همگن بودن، متحمل تغییرات قابل رویتی نشده است. در نمونه A۳ نیز تغییری در نمونه قبل و بعد از آزمایش دیده نمی شود که ممکن است علت آن سنگ شناسی و پُرفسیل بودن و فضاهای خالی موجود در آن باشد.

#### • شکستگی در نمونه B۱

نمونه B۱ دارای شکستگی های نسبتاً کمی است، با این حال مقایسه برش ها قبل و بعد از اجرای آزمایش های حرارتی نمایانگر تغییراتی در آنها است. این نمونه در

### ۳-۴ آماده سازی نمونه ها

تعداد ۲ نمونه از مغزه کامل به طول حدود ۴۵ سانتی متر که در راستای طولی به دو نیم تقسیم شده بود در اختیار قرار گرفت. ابتدا آزمایش غیر مخرب فراصوتی روی نمونه ها صورت گرفت تا از روی آن ضرایب کشسان سنگ محاسبه شود. پس از اجرای آزمایش های فراصوتی، از مغزه ها، پلاگ هایی مطابق استانداردهای مکانیک سنگ (ISRM) با قطر حدود ۵۰ میلی متر به منظور آزمایش های حرارتی تهیه شد (شکل ۴).

### ۳-۵ روش آزمایش ها

مطابق نتایج شبیه سازی عددی با نرم افزار FLAC افزایش دمای نمونه مورد بررسی از دمای محیط (حدود ۲۰ درجه) به ۹۰ درجه حدود ۸ ساعت به طول می انجامد. با توجه به اینکه امکان فراهم آوردن همه شرایط واقعی مخزن در شبیه سازی میسر نیست، نمونه بیش از ۱۲ ساعت داخل کوره قرار گرفت تا از تعادل دمای نمونه اطمینان حاصل شود. پس از آن نمونه روی پایه آلومینیومی که داخل ظرف محتوی یخ قرار دارد، مستقر می شود. سپس کلاهک شیشه ای دو جداره که به منظور چرخش جریان آب گرم طراحی شده، روی نمونه قرار می گیرد و جریان آب گرم با کمک ترموپمپ به دور نمونه می چرخد. در طول آزمایش سعی بر آن شد که دور نمونه (بجز محل سرمایش) عایق باشد و دمای اطراف به طور ثابت ۹۰ درجه نگه داشته شود (شکل ۵-الف و ۵-ب).



شکل ۴. نمونه های پلاگ آزمایش شده.



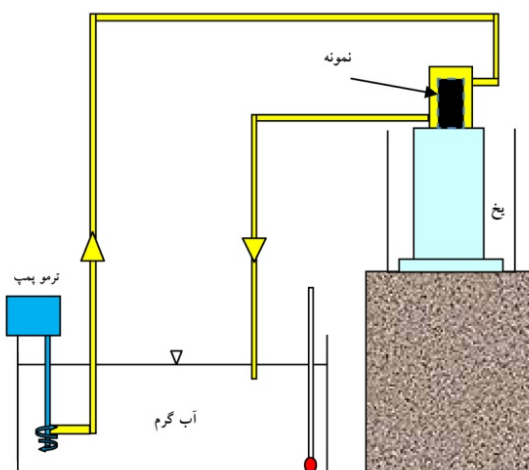
ناپیوسته در شکل سمت چپ نیز قابل رویت است. لازم به ذکر است که حلقه تیره در شکل نشان‌دهنده تغییرات سنگ‌شناسی است که به صورت نوارهایی قهوه‌ای تا سیاه‌رنگ با چشم غیر مسلح نیز در نمونه‌ها قابل مشاهده است.

شکل ۷ نشان‌دهنده شواهد شکستگی و بهم پیوستگی شکستگی موجود در نمونه پس از آزمایش است که به وضوح در شکل سمت راست دیده می‌شود. برای تطبیق دو شکل ۷-الف و ۷-ب باید یکی از آنها ۱۸۰ درجه حول محور افقی چرخانده شود.

هنگام سی‌تی‌اسکن مرحله دوم، ۱۸۰ درجه چرخیده است. به همین دلیل پی‌گیری روند تغییرات، کمی مشکل به نظر می‌رسد. از این رو، بخش‌های متناظر مقاطع که باید با یکدیگر مقایسه شوند در شکل‌ها مشخص می‌شود. در شکل ۶ شکستگی که تقریباً موازی حاشیه نمونه است در هر دو شکل دیده می‌شود. ولی شکستگی دوم که عمود بر شکستگی اول و به صورت شعاعی در شکل سمت ظاهر شده است، در شکل سمت چپ چندان واضح نیست. گرچه آثاری از نقاط با چگالی کمتر ولی به طور

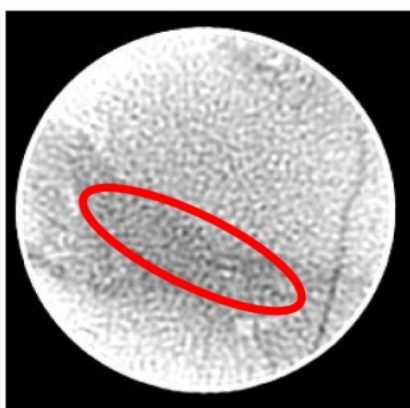


(ب)

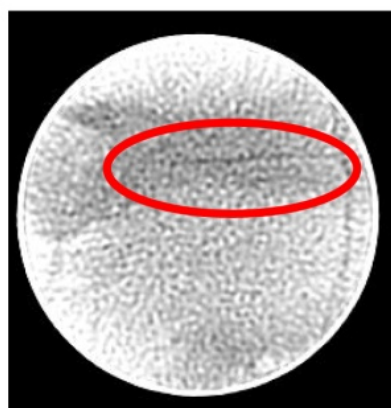


(الف)

شکل ۵. (الف) طرح اجمالی و (ب) واقعی دستگاه آزمایش حرارتی.



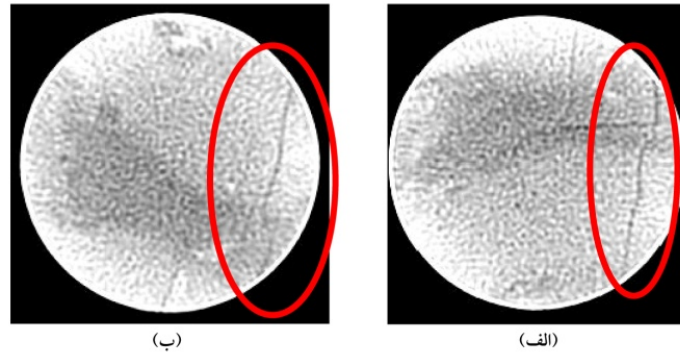
(ب)



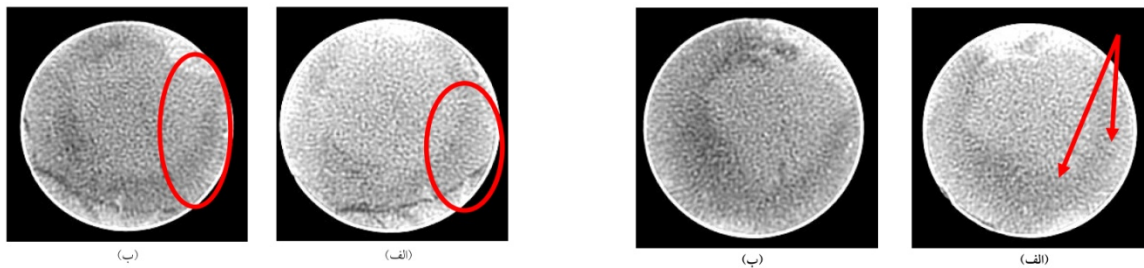
(الف)

شکل ۶. مقایسه برش پنجم از نمونه B1. (الف) قبل و (ب) بعد از آزمایش‌های حرارتی.





شکل ۷. مقایسه دو برش متناظر از نمونه B۱ (الف) قبل از آزمایش و (ب) پس از آزمایش‌های حرارتی است که گسترش شکستگی در آن دیده می‌شود.



شکل ۸. مقایسه برش پنجم از نمونه B۲. (الف) قبل و (ب) بعد از آزمایش‌های حرارتی.

شکل ۹. مقایسه برش ششم از نمونه B۲. (الف) قبل و (ب) بعد از آزمایش‌های حرارتی.

برای طراحی شرایط حدی آزمایش‌ها از شبیه‌سازی فرایندهای آزمایش در نرم‌افزار FLAC استفاده شد. در نهایت دستگاهی مطابق شرایط آزمایش طراحی و ساخته شد، 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 شدند.

نتایج، روشن ساخت که دو نمونه از چهار نمونه مورد بررسی، آثاری از ریزشکستگی را نشان می‌دهند. این شکستگی‌ها عمدتاً در بخش میانی نمونه‌ها روی داده است. جهت شکستگی‌های ایجاد شده عمود بر شکستگی‌های موجود در نمونه‌ها است. علت این امر به نحوه گسترش نیم‌رخ حرارتی و تشکیل جبهه تنش در این بخش از نمونه‌ها باز می‌گردد. در مقاطع محوری نمونه‌ها

#### • شکستگی در نمونه B۲

در برش‌های وسط این نمونه آثار تغییر و ریزشکستگی دیده می‌شود. در شکل ۸-الف قبل از آزمایش گرفته شده است که در آن آثاری از شکستگی دیده نمی‌شود؛ درحالی‌که در برش سمت راست خطوط تیره در وسط و حاشیه آن ظاهر می‌شوند. این خطوط در مقاطع بعدی وضوح بیشتری پیدا می‌کنند (شکل ۹). این شکل برش ششم از نمونه B۲ است که در آن شکاف حاشیه نمونه با وضوح بیشتری دیده می‌شود.

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق تعدادی مغزه از سنگ مخزن یکی از میادین دریایی کشور به منظور بررسی تأثیر تنش‌های حرارتی روی آنها و امکان ایجاد شکستگی‌های حرارتی مورد تحقیق قرار گرفتند.

- poroelastic effect on wellbore stability, SPE no. 89039.
- Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F., 1997, Support of underground excavations in rock, Balkema. Rotterdam.
- Irwin, GR., 1957, Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics, **24**, 361-364.
- Kocabas, L., 2004, An analytical model of temperature and stress fields during cold water injection into an oil reservoir, SPE no. 88762.
- Longuemare, P., 2001, Numerical modeling of fracture propagation induced by water injection/re-injection, SPE no. 68974.
- Murphy, D. H., 1978, Thermal stress cracking and the enhancement of heat extraction from fractured geothermal reservoirs, NIOC, (1999, 2000) Report on Field Development of offshore oil field, Internal Report.
- Perkins, T. K. and Gonzales, J. A., 1984, Changes in Earth stresses around a wellbore caused by radially symmetrical pressure and temperature gradients, SPE no. 10080.
- Perkins, T. K., Gonzales, J. A., 1985, The effect of Thermo-elastic stresses on injection well fracturing, SPE no. 11332.
- Slevinsky, B. A., 2002, A model for analysis of injection well thermal fracture, SPE no. 77568
- Stephens, G. and Voight, B., 1982, Hydraulic fracturing theory for condition of thermal stress, International Journal of Rock Mechanics.
- Tang, L. and Luo, P., 1998, The effect of the thermal stress on wellbore stability, SPE no. 39505.
- Williams, M. L., 1957, On the stress distribution at the base of a stationary crack. Journal of Applied Mechanics, **24**, 109-114.
- Yu, M., Chen, G. and Sharma, M. M., 2001, Chemical and thermal effects on wellbore stability of shale formation, SPE no. 713666.
- هیچ تغییری در نمونه های متفاوت دیده نشد. علت این امر را می توان به کمبود مقاطع محوری نسبت داد.
- منابع**
- فهمی فر، ا.، ۱۳۷۶، سازه های زیرزمینی در سنگ، انتشارات فنی و مکانیک خاک وزارت راه و ترابری.
- وفائیان، م.، ۱۳۸۴، خواص مهندسی سنگ ها- نظریه ها و کاربردهای اجرایی، انتشارات ارکان، ۴۲۴ص.
- Alipour, M., 2003, Hydraulic fracturing of soft rock, M. Sc. Thesis, Department of Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1984, Conduction of heat in solids, Thetford Press.
- Charlez, P., 1996, Thermally induced fracturing: analysis of a field case in North Sea, SPE no. 36916.
- Charlez, P. A., 1997, Rock mechanics, petroleum applications. Editions Technip, **2**.
- Chen, G. and Ewy, R., 2005, Thermo-poroelastic effect on wellbore stability, SPE no. 89039.
- Clifford, P. J., 1991, Modeling the vertical confinement of injection-well thermal fractures, SPE no. 20741.
- Farahani, H. S., 2006, Modeling Transient Thermo-poroelastic effects on 3D wellbore stability, SPE no. 103159.
- Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, P., Raaen, A. M. and Risens, R., 1992, Petroleum related rock mechanics, Elsevier, Amsterdam.
- Ghassemi, A., 2007, Stress and pore pressure distribution around a pressurized, cooled crack in low permeability rock, proceedings of 32<sup>nd</sup> workshop on geothermal reservoir engineering.
- Guizhong, chen, Rusell, T. Ewy, 2005, Thermo-