



مقاله پژوهشی

اثر تنش حرارتی بر فشار شکست و تنش‌های اصلی در فرآیند ایجاد شکست هیدرولیکی در محیط سنگی

آرش شریعت زاده^۱؛ مهدی حسینی^{۲*}؛ مجید قدیری^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد؛ گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲. دانشیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۳. دانشیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2021.253861.1127

چکیده

میزان تولید چاه‌های نفتی تابع پارامترهای متعدد مخزنی از جمله تراوایی سنگ است. شکستگی-ها نقش مهمی در تراوایی سنگ دارند. چنانچه بتوان در سنگ مخزن شکستگی‌های مصنوعی ایجاد کرد تراوایی آن به شدت افزایش خواهد یافت. شکست هیدرولیکی مهم‌ترین روشی است که به منظور ایجاد شکستگی‌های مصنوعی و افزایش تولید نفت و گاز در چاه‌ها صورت می‌گیرد. در این تحقیق چاه نفت و محیط اطراف آن که در یک مخزن کربنات در مناطق نفت خیز جنوب ایران حفز شده در دو حالت بدون ایجاد تنش حرارتی و با در نظر گرفتن تنش حرارتی از طریق نرم *Abaqus* مدل‌سازی می‌شود و اثر تنش حرارتی بر فشار شکست و تنش‌های اصلی بررسی می‌شود. در نهایت پس از حل مدل، فشار شکست به دست می‌آید و اثر تنش حرارتی بر فشار شکست بررسی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد با ایجاد تنش حرارتی (ناشی از کاهش دما) می‌توان فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی را کاهش داد. همچنین تنش‌های اصلی نیز دچار تغییر می‌شوند به طوری که تنش کششی *S11* افزایش و تنش‌های فشاری *S22* و *S33* در لحظه شروع شکست کاهش می‌یابد. برای صحت سنجی مدل‌سازی عددی از داده‌های فشار شکست هیدرولیکی که از روش آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، کمک گرفته شد و نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

واژگان کلیدی

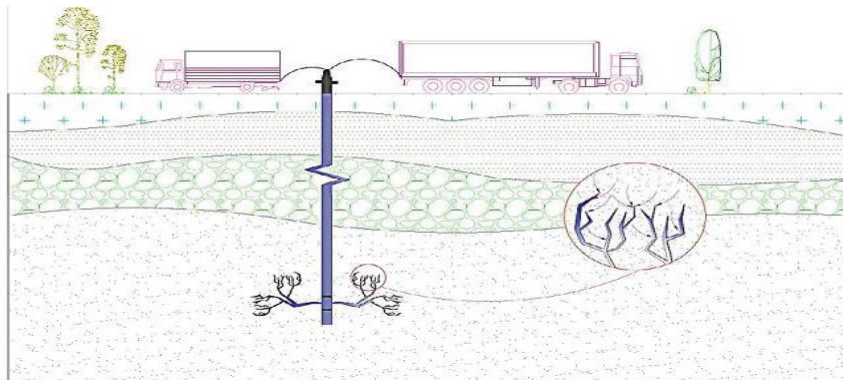
شکست هیدرولیکی
فشار شکست
تنش حرارتی
مدل‌سازی عددی
نرم‌افزار آباکوس

۱. پیش‌گفتار

مخازن با نفوذپذیری کم یا آسیب‌دیده است (*Alipour et al, 2012*).

نمایی از عملیات شکست هیدرولیکی در شکل ۱ نشان داده شده است. شکست هیدرولیکی مهم‌ترین روشی است که به منظور ایجاد شکستگی‌های مصنوعی و افزایش تولید نفت و گاز در چاه‌ها صورت می‌گیرد. 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. (*Alipour, 2003*).

با توجه به اینکه تعداد مخازن با نفوذپذیری بالا کمتر از گذشته شده است، مخازن با نفوذپذیری کم نیز باید مورد استفاده و بهره‌برداری قرار بگیرند. به همین خاطر باید از روش‌هایی برای بهبود بازده مخازن استفاده کرد. 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. عملیات شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین روش‌ها برای بهبود بازیابی از



شکل ۱. نمایی از عملیات شکست هیدرولیکی (Abdollahipour et al, 2016)

$$\text{Thermal Stress} = \frac{\alpha E \Delta T}{1 - \nu} \quad .2$$

در این رابطه، α ، E ، T و ν به ترتیب دما، مدول یانگ، ضریب انبساط حرارتی خطی و ضریب پواسون هستند. برای یک استوانه همگن و همسانگرد توخالی با شعاع داخلی a و شعاع خارجی b که دارای تقارن محوری است، معادلات ترموالاستیسیته مکانیکی غیر کوپله به صورت روابط ۳ تا ۱۱ هستند (شاهانی و شریفی ترکی):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r^2} u - \beta \frac{\partial \theta}{\partial r} = \gamma^2 \ddot{u} \quad .3$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{a^*} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad .4$$

$$\gamma^2 = \frac{\rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{E (1 - \nu)} \quad .5$$

$$\beta = \alpha \frac{(1 + \nu)}{(1 - \nu)} \quad .6$$

$$\alpha^* = \frac{k}{\rho c} \quad .7$$

که در آن ρ چگالی، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، α ضریب انبساط حرارتی، k ضریب هدایت حرارتی و c گرمای ویژه است. همچنین داریم:

$$\theta = T(r, t) - T_{\infty} \quad .8$$

هوبرت و ویلیس بیان کردند که شکست در امتداد تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل، شروع و گسترش می‌یابد. بر این اساس هوبرت و ویلیس برای تعیین فشار شروع شکست، رابطه (۱) را ارائه کردند (Hubbert and Willis):

$$P_b = 3\sigma_{hmin} - \sigma_{Hmax} + T + P_p \quad .1$$

در این رابطه، P_b ، σ_{hmin} ، σ_{Hmax} ، T و P_p به ترتیب فشار شروع شکست، تنش افقی حداقل، تنش افقی حداکثر، مقاومت کششی و فشار منفذی هستند.

کاربردهای مختلفی برای عملیات شکست هیدرولیکی وجود دارد که برخی عبارت‌اند از:

- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از مخازن با نفوذپذیری پایین
- افزایش نرخ جریان نفت و یا گاز از چاه‌هایی که دچار آسیب‌دیدگی شده‌اند.

- متصل کردن شکست‌های طبیعی موجود در اطراف چاه مورد بهره‌برداری (Bareer et al, 2002).

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. 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 بر اساس رابطه (۲) تعریف می‌شود (Charlez, 1996):

گرانیت استفاده شد. مشخصات شکست هیدرولیکی و انتقال حرارت در این نمونه‌ها توسط کوپل فشار و دمای مختلف بررسی شد و تأثیر فشار و دما بر شکست نمونه آنالیز گردید. اصلی‌ترین نتایج در آزمایشهای بررسی اثر دما تحت فشار ثابت عبارت‌اند از: - ضریب هدایت هیدرولیکی با افزایش دمای سنگ افزایش می‌یابد.

- ویسکوزیته سیال با افزایش دمای سنگ کاهش می‌یابد. - نرخ انتقال حرارت با دمای سنگ رابطه مستقیم دارد.

چالال و همکاران (Chaalal et al., 2017) 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 ۱۵۰ و ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده‌اند، شکستگی‌های اولیه توسعه و گسترش می‌یابند. در ضمن در نمونه‌هایی که فاقد شکستگی بودند بعد از شوک حرارتی فشار شکست آن‌ها کاهش یافت. آزمایش‌ها روی استوانه توخالی جدار ضخیم انجام شده است.

طارق و همکاران (Tariq et al., 2019) به ارائه یک روش آزمایشگاهی جدید برای کاهش فشار شکست پرداختند. این روش مناسب سنگ‌هایی است که تحت تنش‌های بالا قرار گرفته‌اند. آزمایش شکست بر روی بلوک‌های مختلف انجام گرفت و برای حفره شبیه‌سازی شده در مرکز بلوک‌ها فشار شکست اندازه‌گیری شد. در این روش برای ایجاد ریزترک‌ها، سیال ترموشیمیایی تزریق شده است. این ریزترک‌ها باعث بهبود نفوذپذیری و تخلخل می‌شود. در این پژوهش برای شکست ترموشیمیایی از یک واکنش گرماده استفاده شده که با انجام این واکنش شیمیایی، گرما و گاز نیتروژن آزاد می‌شود. فشار ناشی از آزاد شدن گاز نیتروژن سبب ایجاد ریزترک‌ها می‌شود و در نتیجه فشار شکست را در عملیات شکست هیدرولیکی کاهش می‌دهد.

لی و همکاران (Li et al., 2020) طی عملیات آزمایشگاهی به بررسی تأثیر حرارت بر روی مشخصات فیزیکی و مکانیکی و همچنین شروع شکست نمونه گرانیتی پرداختند. در این عملیات آزمایشگاهی ابتدا نمونه‌ها تا دمای مورد نظر در کوره گرم شده و سپس در آزمایش شکست هیدرولیکی توسط سیال به‌طور ناگهانی سرد می‌شود و نتایج آزمایشگاهی ثبت می‌گردد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان تخلخل و

$$u = u(r, t) \quad ۹$$

که در آن T_{∞} دمای محیط است. همچنین روابط مربوط به تنش‌های محیطی و شعاعی به‌صورت زیر هستند:

$$\sigma_{rr} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[(1-\nu) \frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{r} \right] - \frac{E\alpha}{(1-2\nu)} \theta \quad ۱۰$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu \frac{\partial u}{\partial r} + (1-\nu) \frac{u}{r} \right] - \frac{E\alpha}{(1-2\nu)} \theta \quad ۱۱$$

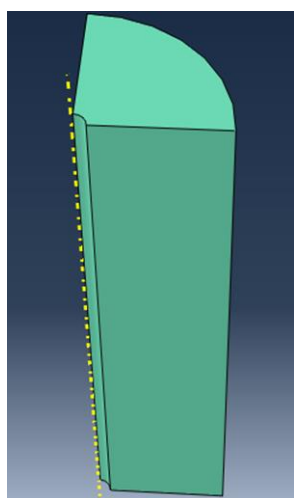
در گذشته پژوهش‌هایی در خصوص اثر تنش حرارتی بر عملیات شکست هیدرولیکی انجام شده است. برخی از این پژوهش‌ها در ادامه ارائه شده است.

عنایت پور و پاتزک (Enayatpour and Patzek, 2013) به‌صورت عددی به حل مسئله انتشار غیرخطی گاز پرداختند. این پژوهش به روش المان محدود انجام شده و هدف از این پژوهش بررسی اثر شکست حرارتی بر بهبود شکست هیدرولیکی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد تزریق سیال سرد به داخل ترک‌های ایجاد شده، موجب سرد شدن ناحیه ترک‌های هیدرولیکی شده و تنش حرارتی ایجاد می‌کند و در نتیجه ترک‌های حرارتی حاصل می‌شود. ترک‌های حرارتی در راستای عمود بر تنش افقی بیشینه ایجاد و گسترش می‌یابند.

کریگ و همکاران (Craig et al., 2014) به‌طور آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شوک هیدرولیکی و حرارتی بر مخازن شکننده پرداختند. در این آزمایش تزریق سیال سرد در محل دیواره چاه مخزن انجام می‌شود. ترک‌های هیدرولیکی ایجاد شده، همسو با تنش اصلی بیشینه افقی می‌باشد و ترک‌های ثانویه که به سبب عبور جریان سیال سرد پدید می‌آید، به‌صورت شکست‌های عمود بر تنش اصلی بیشینه افقی ایجاد می‌شود. هدف از انجام این آزمایش اثبات این مفهوم است که شکستگی‌های حرارتی در صفحه عمود بر تنش افقی بیشینه اتفاق می‌افتد و اینکه با ایجاد تنش حرارتی می‌توان سطح شکست را افزایش داد.

لوو و همکاران (Lou et al., 2017) به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی مشخصات هیدرولیکی و انتقال حرارت برای دو گروه نمونه گرانیتی پرداختند. در این تحقیق از دو دسته نمونه

آزمایشگاهی به بررسی اثر شوک حرارتی در عملیات شکست هیدرولیکی نمونه گرانیته پرداخته شده است (Zhou et al., 2018). مدل سازی عددی با شرایط یادشده در آزمایش انجام و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نمونه ساخته شده برای آزمایش، استوانه‌ای به قطر ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر با حفره مرکزی به قطر ۱۸ میلی‌متر بود. برای صرفه‌جویی در زمان و هزینه و با توجه به متقارن بودن مدل، طبق شکل ۲ از یک چهارم مقطع در مدل سازی استفاده شد. داده‌های مورد استفاده برای مدل سازی عددی در جدول ۱ ارائه شده است. بعد از اینکه فشار محوری و فشار جانبی تا مقدار ۲۵ مگا پاسکال افزایش یافت، دمای نمونه افزایش یافته تا به دمای انجام آزمایش برسد. سپس نمونه به مدت ۲ ساعت در کوره باقی می ماند تا دمای مورد نظر تثبیت گردد. سپس پمپ فشار بالا شروع به تزریق آب با فشار بالا می کند. سیال سرد در تماس با دیواره چاه با دمای بالا باعث شوک حرارتی شده و تنش حرارتی کششی در سطح چاه ایجاد می کند. نتیجه فشار شکست حاصل از روش عددی و آزمایشگاهی در جدول ۲ و شکل ۳ با هم مقایسه شده است. همان طور که مشاهده شد نتایج روش عددی و روش آزمایشگاهی اختلاف بسیار کمی با یکدیگر دارند. این اختلاف کم، صحت نتایج روش عددی را تأیید می کند. نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی ژو و همکاران (Zhou et al., 2018) نشان می دهد که با افزایش دمای سنگ میزان تنش حرارتی افزایش یافته و این افزایش تنش باعث کاهش فشار شکست هیدرولیکی شده است که با نتایج مدل سازی عددی مطابقت دارد.



شکل ۲. مدل سازی یک چهارم مقطع نمونه آزمایشگاهی

نفوذپذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش دما مقاومت کششی و فشار شروع شکست کاهش می‌یابد. مقاومت کششی نمونه گرانیته ۱۱/۸۴ مگا پاسکال بوده که با افزایش دما تا ۵۰۰ درجه سلسیوس به مقدار ۴/۷۱ مگا پاسکال رسید و تقریباً ۶۰٪ کاهش داشته است. کاهش مقاومت کششی و فشار شکست نمونه گرانیته تا ۳۰۰ درجه سلسیوس با شیب ملایم اتفاق می‌افتد ولی بعد از دمای ۳۰۰ درجه این کاهش با شیب بیشتری صورت می‌گیرد.

پژوهش حاضر به کمک مدل سازی‌های عددی و تحلیل‌های آماری انجام شده است. در این تحقیق چاه نفت و محیط اطراف آن که در یک مخزن کربناته در مناطق نفت خیز جنوب حفر شده در دو حالت بدون ایجاد تنش حرارتی و با در نظر گرفتن تنش حرارتی از طریق نرم افزار *Abaqus* مدل سازی شده است. فشار شکست در دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی بررسی شده و تأثیر تنش حرارتی در فشار شکست مشخص شده در ضمن بررسی وضعیت تنش‌های اصلی در زمان عملیات شکست هیدرولیکی نیز انجام گرفته که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد پژوهشی در خصوص مدل سازی عددی اثر تنش حرارتی و اثر آن بر فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی در ایران انجام نشده است.

۲. مدل سازی عددی

۲.۱ صحت سنجی

یکی از پرکاربردترین نرم افزارها برای آنالیزهای اجزای محدود، نرم افزار *Abaqus* است. این نرم افزار در سال ۱۹۷۸ توسعه داده شد و در ابتدا برای حل مسائل انرژی هسته‌ای و مهندسی حفاری طراحی شده بود به این دلیل که در این شاخه‌ها به ابزاری برای مطالعه مسائل پیچیده و غیرخطی نیاز بود.

در بخش صحت سنجی، نتایج مدل سازی عددی استفاده شده، با داده‌های فشار شکست هیدرولیکی که از روش آزمایشگاهی به دست آمده‌اند، مقایسه شده است. این مقایسه برای اطمینان از صحت نتایج مدل سازی عددی است. پس از اطمینان از صحت مدل سازی عددی استفاده شده، مدل سازی عددی چاه نفت که هدف اصلی این پژوهش است انجام می‌شود.

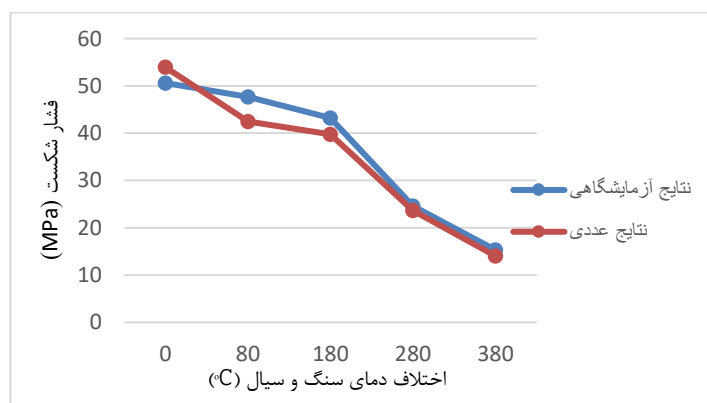
در این پژوهش که توسط ژو و همکاران انجام شده است. به صورت

جدول ۱. داده‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی فشار شکست هیدرولیکی (Zhou et al., 2018)

تنش محصور (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	دمای سیال (°C)	دمای سنگ (°C)
۲۵	۱۲/۸	۷۰	۰/۲۵	۲۰	۲۰
۲۵	۹/۲	۶۵	۰/۳۲	۲۰	۱۰۰
۲۵	۸/۷	۵۲	۰/۳۷	۲۰	۲۰۰
۲۵	۸/۵	۳۶/۵	۰/۴۲	۲۰	۳۰۰
۲۵	۸/۱	۲۶/۵	۰/۴۴	۲۰	۴۰۰

جدول ۲. داده‌ها و نتایج روش عددی و آزمایشگاهی

فشار شکست عددی (MPa)	فشار شکست آزمایشگاهی (MPa)	دمای سیال (°C)	دمای سنگ (°C)
۵۳/۹۴	۵۰/۱۶	۲۰	۲۰
۴۲/۴۹	۴۷/۷	۲۰	۱۰۰
۳۹/۷۵	۴۳/۲	۲۰	۲۰۰
۲۳/۶۳	۲۴/۶	۲۰	۳۰۰
۱۴/۰۲	۱۵/۳	۲۰	۴۰۰
۵۳/۹۴	۵۰/۱۶	۲۰	۲۰



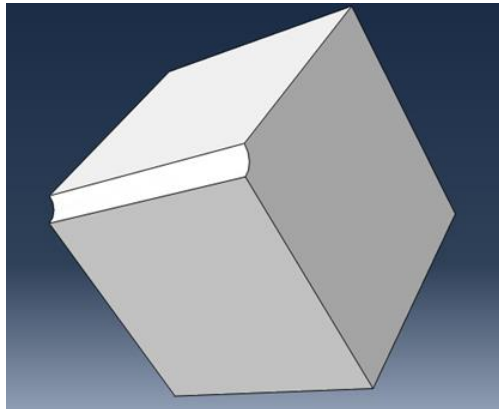
شکل ۳. نمودار تغییرات فشار شکست نسبت به اختلاف دمای سنگ و سیال

۲.۲ مدل‌سازی عددی چاه نفت

متر که چاهی به قطر ۳۰ سانتی‌متر در مرکز مکعب در نظر گرفته شده، بررسی شده است. با توجه به متقارن بودن مدل،

برای مدل‌سازی چاه نفت و محیط اطراف آن، مکعبی با ابعاد ۴

فراهم می‌شود (قیاس وند و محمدی، ۱۳۹۵).



شکل ۴. هندسه نهایی مدل ساخته شده

به منظور ساده‌سازی فقط در یک چهارم مخزن مدل‌سازی انجام شده است. در شکل ۴ هندسه نهایی مدل ساخته شده نشان داده شده است.

پس از ساخت مدل اولیه ویژگی‌های محیط مطابق جداول ۳ و ۴ تعریف شد. در مدل‌سازی‌ها در حالت بدون تنش حرارتی رفتار محیط، الاستیک فرض شد، سپس محیط گسترش ترک به روش المان محدود توسعه یافته، تعریف شد و در کل نمونه اجازه رشد ترک داده شد و مکان خاصی برای گسترش ترک در نظر گرفته نشد.

روش المان محدود توسعه یافته یکی از قوی‌ترین روش‌های عددی در مدل‌سازی ناپیوستگی بوده و بر پایه المان محدود می‌باشد. در این روش با غنی‌سازی گره‌ها و افزایش درجه آزادی آن‌ها از ۲ به ۴ و حتی در شرایط خاص به ۱۰ به‌طور مجازی و بدون نیاز به تطبیق مش با هندسه ناپیوستگی، امکان مدل‌سازی

جدول ۳. خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ (Akrami et al., 2018)

ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	دانسیته (Kg/m ³)	انرژی شکست (N/m)	مقاومت کششی سنگ (MPa)
۰/۲۹۴	۳۲/۴۳	۲۵۰۰	۲۰	$\frac{۳}{۴}$

جدول ۴. خواص حرارتی سنگ (Salimzadeh et al., 2016)

ضریب هدایت حرارتی (w/(m°C))	ضریب انبساط حرارتی (1/°C)	گرمای ویژه
۲/۱۲۵	۰/۰۰۰۰۱	۸۵۰

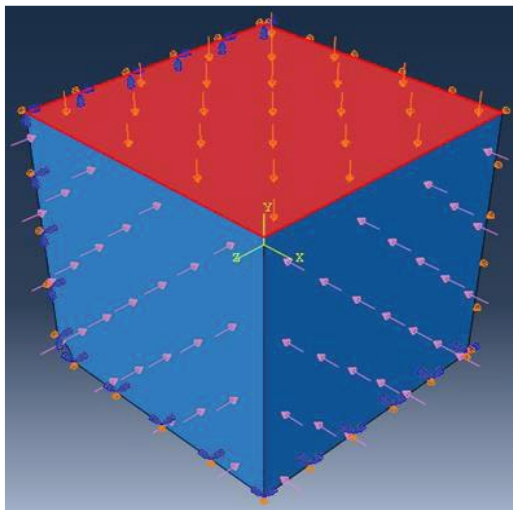
ثابت شده است و شرایط مرزی برای کف مدل به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در راستای عمود بر این صفحه امکان جابجایی وجود نداشته باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است.

تنش‌های اعمالی به محیط شامل تنش افقی حداکثر و حداقل، تنش قائم، فشار منفذی و فشار سیال طبق جدول ۵ تعریف شد که در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. از فشار منفذی برای تبدیل تنش‌های اعمالی به تنش مؤثر استفاده شده است. بار اعمال شده برای فشار سیال داخل گمانه به صورت خطی و صعودی تغییر می‌کند. این بار به کل مقطع مدل‌سازی شده که معادل فاصله پکرها در شرایط واقعی است، اعمال شده است.

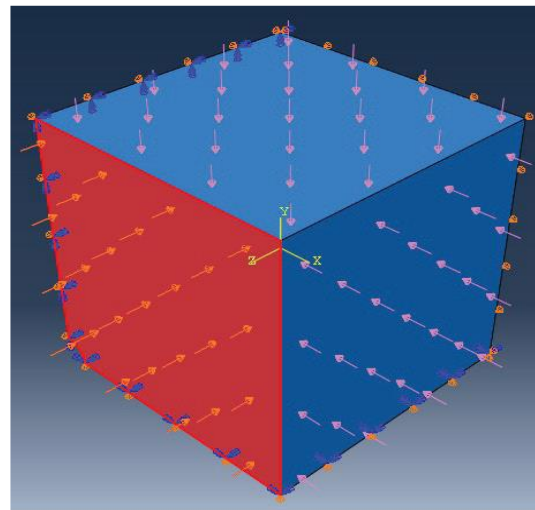
به علت تقارن، یک چهارم چاه و اطراف آن مدل‌سازی شده است در نتیجه شرایط مرزی برای دو سطح اطراف چاه به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که صفحات کناری چاه در جهت X و Y

جدول ۵. تنش‌های اعمال شده به مدل (آریا و همکاران، ۱۳۹۷)

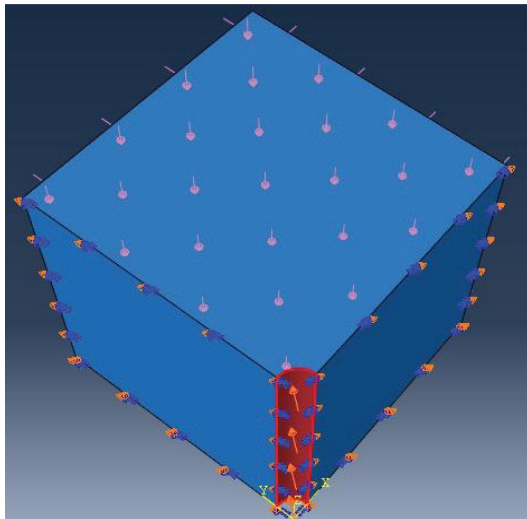
تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	حداکثر فشار سیال (MPa)	فشار مغذی (MPa)
۱۰۷/۸	۷۴/۶	۵۳/۵	۹۰	۲۰



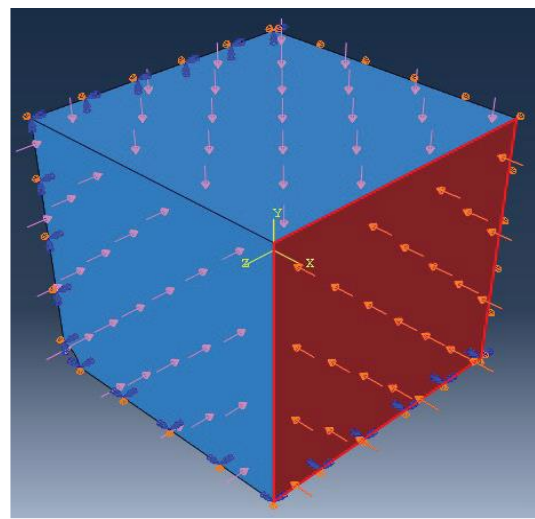
شکل ۷. سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداکثر



شکل ۵. سطح مورد نظر برای اعمال تنش قائم



شکل ۸. سطح مورد نظر برای اعمال فشار داخل گمانه



شکل ۶. سطح مورد نظر برای اعمال تنش افقی حداقل

قرار بگیرد (Abaqus 6.10 documentation, abaqus theory manual)

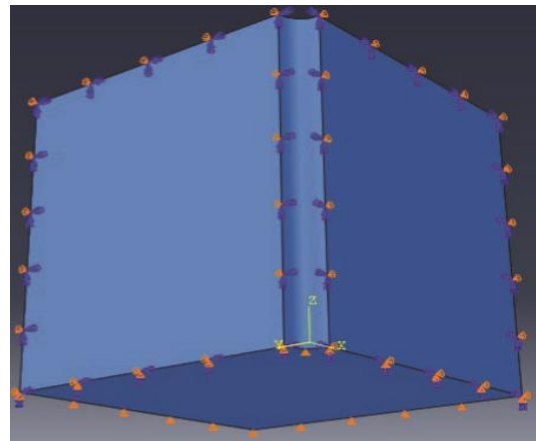
$$1.0 \leq f \leq 1.0 + (f_{tol}) \quad .13$$

۳.۲ نتایج مدل سازی

برای حل این مدل در حالت بدون تنش حرارتی، دو مرحله در نظر گرفته شد که از مرحله یک برای تعریف تنش‌های موجود در محیط و از مرحله دوم برای اعمال فشار سیال داخل گمانه استفاده شده است. فشار شکست در حالت بدون تنش حرارتی ۵۸/۵۷ مگا پاسکال به دست می‌آید. برای حل مدل در حالت وجود تنش حرارتی، سه مرحله در نظر گرفته شد که از مرحله یک برای تعریف تنش‌های موجود در محیط و از مرحله دوم برای ایجاد تنش حرارتی و از مرحله سوم برای اعمال فشار سیال داخل گمانه استفاده شده است. دمای محیط سنگ ۱۲۰°C در نظر گرفته شده که در تماس با سیال سرد قرار گرفته و باعث ایجاد تنش حرارتی شده است. در این پژوهش با پنج دمای مختلف سیال، مدل سازی انجام شده و فشار شکست استخراج شده و اثر تنش حرارتی بر فشار شکست بررسی شده است. برای به دست آوردن فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی، مقدار گام زمانی شروع شکست مدل در مقدار فشار معادل سیال که به دیواره چاه اعمال می‌شود، ضرب می‌شود. فشار ۹۰ مگا پاسکال حداکثر فشار سیال است که در مدل تعریف شده و معادل گام زمانی ۱ است. نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی در جدول ۶ نشان می‌دهد که با تزریق سیال سرد در عملیات شکست هیدرولیکی می‌توان فشار شکست را کاهش داد. مطابق جدول ۶ با تزریق سیال ۲۰°C در محیط سنگی دارای دمای ۱۲۰°C، میزان فشار شکست ۲۲/۰۴٪ کاهش یافت.

از مقایسه تصاویر نهایی عملیات شکست هیدرولیکی در حالت بدون تنش حرارتی و همراه با تنش حرارتی (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) می‌توان دریافت که میزان گسترش ترک در شکست هیدرولیکی همراه با تنش حرارتی بیشتر از حالت بدون تنش حرارتی می‌باشد.

با توجه به جدول ۷ و شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که با گذشت زمان حل مسئله و تماس سیال ۶۰ درجه سانتی‌گراد با دیواره چاه، انتقال حرارت صورت گرفته و دمای دیواره چاه از ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته و در پایان زمان حل مسئله

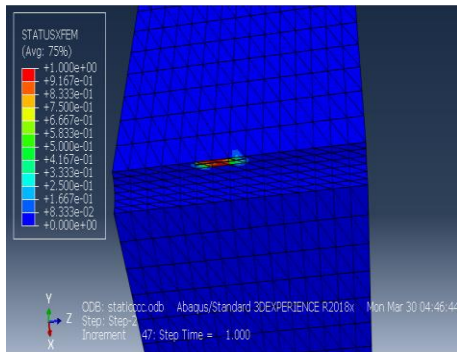


شکل ۹. شرایط مرزی اعمال شده به نمونه

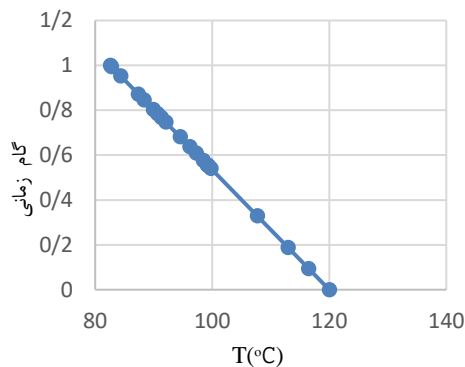
برای اعمال تنش حرارتی از ایجاد میدان دمایی استفاده می‌شود. در گام ابتدایی (initial) مدل سازی، برای کل گره‌ها دمای ۰°C در ۱۲۰ در نظر گرفته شده سپس در گام دوم (step-2) مدل سازی، برای دیواره چاه دماهای مختلف در نظر گرفته می‌شود. با توجه به خواص حرارتی که برای سنگ تعریف شد، دمای سنگ در دیواره چاه تغییر پیدا کرده و این اختلاف دما سبب ایجاد تنش حرارتی می‌شود. برای مش زنی مدل از المان‌های چهاروجهی Tet و تکنیک مش زنی از نوع Free استفاده شد تا مش از الگوی از پیش تعیین شده پیروی نکند. در این پژوهش برای پیش‌بینی مسیر شکست در مدل ساخته شده، از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه استفاده شده است. این معیار بر اساس رابطه (۱۲) تعریف می‌شود:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\langle \sigma_{max}^0 \rangle} \right\} \quad .12$$

در این رابطه σ_{max}^0 به معنای بیشترین تنش اصلی مجاز ماده بوده و σ_{max} به معنای بیشترین تنش وارد شده به محیط (مقاومت کششی) است. نماد $\langle \rangle$ به پرنانز ما کالای معروف است. هنگامی که آرگومان این تابع منفی شود، مقدار این تابع صفر می‌شود و هنگامی که مقدار آرگومان تابع مثبت شود، تابع برابر با مقدار آرگومانش می‌شود؛ بنابراین تنش فشاری باعث ایجاد آسیب نمی‌شود. آسیب زمانی ایجاد می‌شود که مقدار تابع به مقدار یک برسد. ترک ایجاد شده یا ترک اولیه هنگامی توسعه می‌یابد که پس از یک مرحله تعادل، معیار شکست با توجه به تلورانس مدنظر (f_{tol}) در محدوده مشخص شده در رابطه (۱۳)

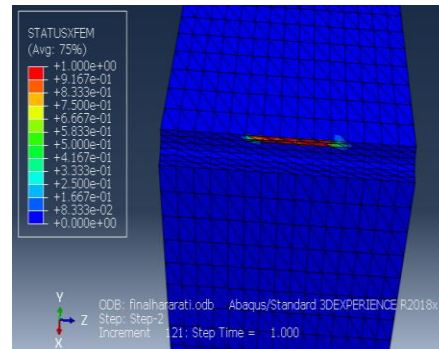


شکل ۱۱. تصویر نهایی شکست نمونه بدون تنش حرارتی



شکل ۱۲. نمودار تغییر دمای دیواره چاه با تزریق سیال ۶۰°C نسبت به زمان حل مسئله

به ۸۲/۵۸ درجه سانتی گراد رسیده است. این اختلاف دما باعث ایجاد تنش حرارتی می‌شود. تنش حرارتی ایجاد شده باعث کاهش فشار شکست هیدرولیکی می‌شود.



شکل ۱۰. تصویر نهایی شکست نمونه همراه با تنش حرارتی

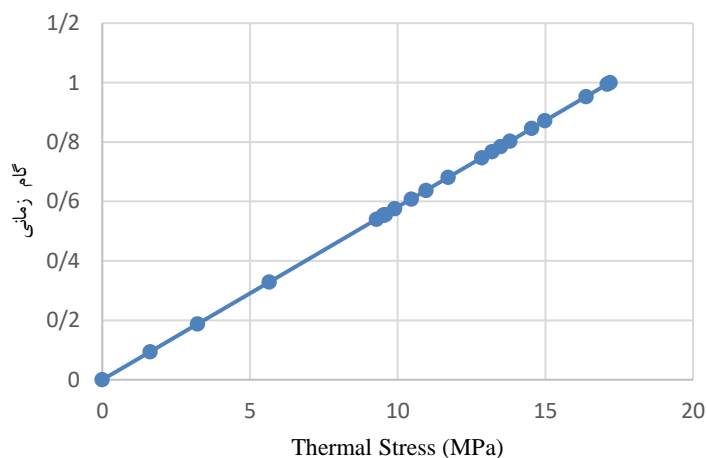
با توجه به نتایج مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف دمای سیال و محیط سنگی، میزان تنش حرارتی افزایش می‌یابد و در نهایت باعث کاهش فشار شکست هیدرولیکی می‌شود. در نتیجه می‌توان با کاهش دمای سیال تزریقی تنش حرارتی ایجاد کرد و به کمک آن فشار شکست هیدرولیکی را کاهش داد. نتایج به دست آمده در این پژوهش با نتایج موارد مشابه همخوانی داشته است. طبق پژوهش حسینی و همکاران (حسینی و همکاران، ۱۳۹۷) با کاهش دمای سنگ، تنش حرارتی افزایش یافته و در اثر این افزایش فشار شکست هیدرولیکی کاهش یافته است.

جدول ۶. نتایج مدل سازی عددی

درصد کاهش فشار شکست (%)	فشار شکست (MPa)	گام زمانی شروع شکست	حداکثر فشار سیال (MPa)	دما سیال (°C)	دما سنگ (°C)
۵/۳۹	۵۵/۴۱	۰/۶۱۵۶	۹۰	۱۰۰	۱۲۰
۱۰/۳۸	۵۲/۴۹	۰/۵۸۳۲	۹۰	۸۰	۱۲۰
۱۴/۸۰	۴۹/۹۵	۰/۵۵۵۱	۹۰	۶۰	۱۲۰
۱۸/۵۵	۴۷/۷	۰/۵۳	۹۰	۴۰	۱۲۰
۲۲/۰۴	۴۵/۶۶	۰/۵۰۷۳	۹۰	۲۰	۱۲۰

جدول ۷. نتایج تنش حرارتی ایجادشده با تزریق سیال ۶۰ °C

گام زمانی	دمای دیواره چاه (°C)	تنش حرارتی (MPa)
۰	۱۲۰	۰
۰/۰۹۳۹	۱۱۶/۴۸	۱/۶۱۶۹
۰/۱۸۷۹	۱۱۲/۹۷	۳/۲۲۹۲
۰/۳۲۸۸	۱۰۷/۶۹	۵/۶۵۴۵
۰/۵۴۰۱	۹۹/۷۹	۹/۲۸۳۴
۰/۵۵۵۱	۹۹/۲۲	۹/۵۴۵۲
۰/۶۰۸۴	۹۷/۲۳	۱۰/۴۵۹۳
۰/۶۸۱۳	۹۴/۵۰	۱۱/۷۱۳۳
۰/۷۴۷۰	۹۲/۰۴	۱۲/۸۴۳۳
۰/۸۰۳۰	۸۹/۹۵	۱۳/۸۰۳۴
۰/۸۴۶۰	۸۸/۳۴	۱۴/۵۴۲۹
۰/۸۷۱۷	۸۷/۳۸	۱۴/۹۸۳۹
۰/۹۵۳۰	۸۴/۳۴	۱۶/۳۸۰۳
۰/۹۹۴۷	۸۲/۷۸	۱۷/۰۹۶۹
۱	۸۲/۵۸	۱۷/۱۸۸۸



شکل ۱۳. نمودار تنش حرارتی ایجادشده با تزریق سیال ۶۰ °C نسبت به زمان حل مسئله

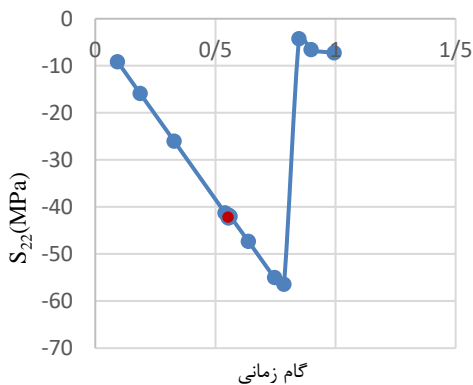
سیال ۶۰ °C می‌باشد. تنش حرارتی ایجادشده کششی بوده و با گذشت زمان حل مسئله مقدار آن افزایش یافته و بر تنش‌های اصلی تأثیر می‌گذارد و باعث افزایش تنش کششی S_{11} و کاهش تنش‌های فشاری S_{22} و S_{33} در لحظه شروع شکست می‌شود. لحظه شروع شکست در شکل‌های ۱۴ تا ۱۹ با رنگ قرمز نشان داده شده است.

۳. تحلیل وضعیت تنش‌های اصلی

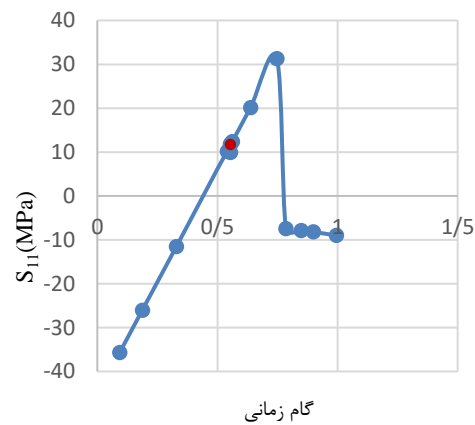
در این بخش به بررسی وضعیت تنش‌های اصلی (S_{22} , S_{33}) در دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی پرداخته شده است. مقادیر تنش‌های اصلی در لحظه شروع شکست بوده و این مقادیر برای المانی می‌باشد که شروع شکست در آن اتفاق افتاده است. تنش حرارتی ایجادشده حاصل از تزریق

۱.۳ تحلیل وضعیت تنش S_{11}

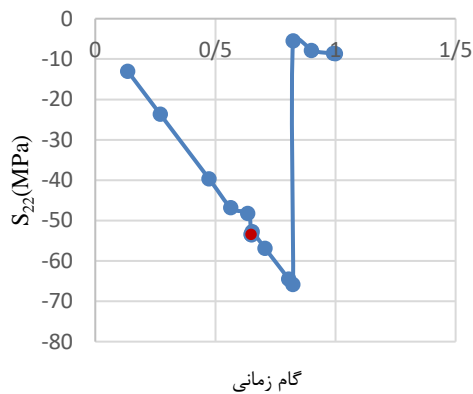
با مقایسه شکل‌های ۱۴ و ۱۵ و بررسی تغییرات تنش‌های اصلی در دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی می‌توان به این نکته پی برد که تنش S_{11} در هر دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی با تنش فشاری شروع شده و با گذشت زمان حل مسئله مقدار تنش کاهش یافته و سپس به تنش کششی تبدیل شده و مقدار آن افزایش یافته است. در حالتی که مسئله همراه با تنش حرارتی بررسی شود، نمودار شیب بیشتری داشته و سریع‌تر وارد بخش کششی شده و میزان تنش کششی نیز بیشتر است.



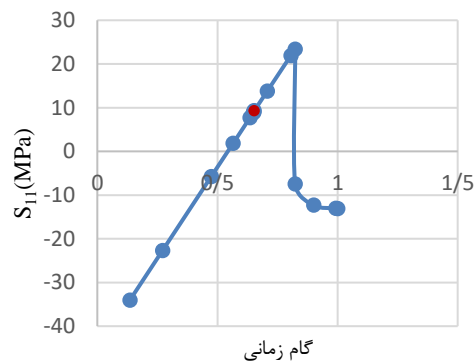
شکل ۱۶. روند تغییرات تنش S_{22} همراه با تنش حرارتی



شکل ۱۴. روند تغییرات تنش S_{11} همراه با تنش حرارتی



شکل ۱۷. روند تغییرات تنش S_{22} بدون تنش حرارتی



شکل ۱۵. روند تغییرات تنش S_{11} بدون تنش حرارتی

۳.۳ تحلیل وضعیت تنش S_{33}

با مقایسه شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و بررسی تغییرات تنش‌های اصلی در دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی می‌توان به این نکته پی برد که تنش S_{33} در هر دو حالت همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی از نوع فشاری بوده است. در حالت

۲.۳ تحلیل وضعیت تنش S_{22}

با مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ و بررسی تغییرات تنش‌های اصلی

اثر تنش حرارتی بر فشار شکست ...

همراه با تنش حرارتی و بدون تنش حرارتی با استفاده از نرم افزار *Abaqus* به دست آمد و سپس تأثیر تنش حرارتی بر فشار شکست هیدرولیکی بررسی شد. در نهایت وضعیت تنش های اصلی در عملیات شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایجی که از این تحقیق حاصل شد به شرح زیر است:

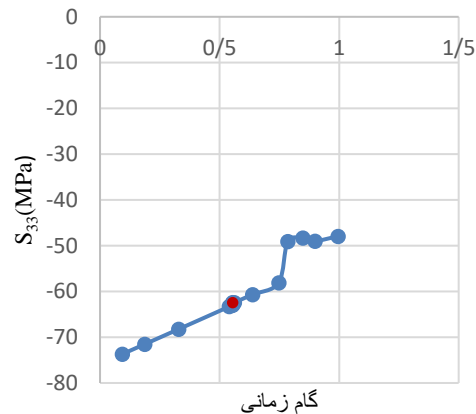
- بر اساس مدل سازی انجام شده با ایجاد تنش حرارتی در عملیات شکست هیدرولیکی، فشار شکست کاهش می یابد.
- نتایج حاصل از مدل سازی شکست هیدرولیکی همراه با تنش حرارتی نشان می دهد که با 100°C کاهش دمای سیال، فشار شکست ۲۲٪ کاهش می یابد.
- بر اساس مدل سازی انجام شده با ایجاد تنش حرارتی در عملیات شکست هیدرولیکی، تنش های اصلی دچار تغییر می شود در اثر آن تنش کششی S_{II} افزایش و تنش های فشاری S_{22} و S_{33} در لحظه شروع شکست کاهش می یابند.
- می توان با تغییر دمای سیال در عملیات شکست هیدرولیکی، تنش حرارتی ایجاد کرد. با تزریق سیال 60°C ، $17/18$ مگا پاسکال تنش حرارتی ایجاد می شود.
- طول ترک ایجاد شده در حالتی که تنش حرارتی وجود دارد بیشتر از حالت بدون تنش حرارتی است.

۵. سیاهه ی نمادها

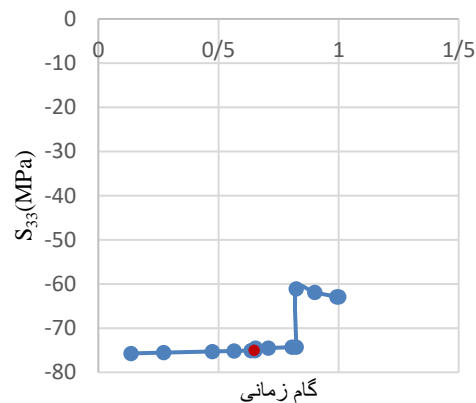
جدول ۸. سیاهه ی نمادها

نماد	واحد	شرح
σ	MPa	تنش
T	$^{\circ}\text{C}$	دما
E	GPa	مدول یانگ
ν	-	ضریب پواسون
α	$1/(^{\circ}\text{C})$	ضریب انبساط حرارتی

بدون تنش حرارتی مقدار تنش S_{33} تقریباً تغییری نداشته اما در حالتی که مسئله همراه با تنش حرارتی بررسی شده، چون تنش حرارتی ایجاد شده کششی می باشد، تنش S_{33} روند کاهش پیدا می کند.



شکل ۱۸. روند تغییرات تنش S_{33} همراه با تنش حرارتی



شکل ۱۹. روند تغییرات تنش S_{33} بدون تنش حرارتی

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش ابتدا فشار شکست هیدرولیکی برای دو حالت

۶. مراجع

Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A., and Gholamnejad, J. (2016). DEM simulation of confining pressure effects on crack opening displacement in hydraulic fracturing. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26: 577-561.

Akrami, A., Hosseini, M., Sodeifi, H., (2018). Numerical modeling of hydraulic fracturing in carbonate rocks of bangestan reservoir. *Journal of mining and environment*, Vol. 9, No.1, pp 117-126.

Bareer R. D., Fisher M. K., and Woodroof R. A. (2002). *A practical guide to hydraulic fracture ng diagnostic technologies*.

SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 29 September-2 October, San Antonio, Texas, 10-15.

Charlez, P. (1996). Thermally induced fracturing: analysis of a field case in North Sea. SPE no.36916.

Craig. S., Udell. K., and Moore. J.(2014). An Experimental Study of Thermal and Hydraulic Geothermal Reservoir Stimulation of Brittle Impermeable Material. Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014 SGP-TR-202.

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.

Enayatpour, S. J., and Patzek, T. (2013). Thermal Shock in Reservoir Rock Enhances the Hydraulic Fracturing of Gas Shales. SPE no. 1620617.

Hubbert, M. K. and Willis, D. G. (1957). Mechanics of hydraulic fracturing *Petr. Trans. AIME*, 210, 153–163. Lou, J., Zhu, Y., Guo, Q., Tan, L., Zhuang, Y., Liu, M., Zhang, C., Xiang, W & Rohn, J. (2016). Experimental investigation of the hydraulic and heat-transfer properties of artificially fractured granite. *Journal of Scientific Reports*, 7:39882, DOI: 10.1038, srep39882.

Li, N., Ma, X., Zhang, S., Zou, Y., Wu, S., Li, S., Zhang, ZH., & Cao, T.(2020). Thermal Effects on the Physical and Mechanical Properties and Fracture Initiation of Laizhou Granite During Hydraulic Fracturing. Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature 2020.

Salimzadeh, S., Paluszny, A., and Zimmerman, R. W. (2016). Thermal Effects during Hydraulic Fracturing in Low- Permeability Brittle Rocks.

Tariq. Z., Mahmoud. M., and BaTaweel. M.(2019). An Experimental Study to Reduce the Fracture Pressure of High Strength Rocks Using a Novel Thermochemical Fracturing Approach. *Hindawi, Geofluids*, Volume 2019, Article ID 1904565.

Zhou, Ch., Wan, Zh., Zhang, Y., Gu, B., (2018). Experimental study on hydraulic fracturing of granite under thermal shock. *Journal of Elsevier, Geothermics* 71 (2018) 146–155.

آریا، م. حسینی، م. فلاح، ا. (۱۳۹۷). ارائه مدلی برای تخمین فشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های کربناته چاه‌های نفت ایران
نشریه مهندسی معدن، دوره سوم، شماره ۱، ص ۱۳-۲۸.

حسینی، م. افتخاری، پ. شهریزاد، پ. (۱۳۹۷). مطالعه آزمایشگاهی اثر تنش حرارتی بر فشار شکست هیدرولیکی ماسه‌سنگ
لوشان. نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره چهارم، شماره ۲، ص ۷۳-۹۱.

شاهانی، ا.م. شریفی ترکی، ح. (۱۳۹۵). حل تحلیلی مسئله ترموالاستیسیته در استوانه جدار ضخیم تحت بار حرارتی گذرا. دوره
۱۶ شماره ۱۰، ص ۱۴۷-۱۵۴.

قیاس وند، س. محمدی، ب. (۱۳۹۵). تحلیل مود مختلط رشد ترک خستگی پنل‌های آلومینیومی حاوی ترک ترمیم‌شده با
وصله‌های کامپوزیتی به روش المان محدود توسعه‌یافته. نشریه علمی-پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، جلد ۳، شماره ۴، ص
۳۲۱-۳۳۲.