

مقاله علمی-پژوهشی*

تأثیر نرخ تزریق سیال در شکست هیدرولیکی سنگ‌های آهکی: مطالعه آزمایشگاهی

ابوالفضل هفت‌آبادی^۱، شکراله زارع^{۲*}، حمید سلطانیان^۳، یاسر پورمظاهری^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی شاهرود، abolfazl.haftabadi@gmail.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، zare@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار پژوهشکده مهندسی نفت، گروه حفاری و تکمیل چاه، پژوهشگاه صنعت نفت تهران، soltanianh@ripi.ir

۴- کارشناس ارشد طراحی چاه، پژوهشکده مهندسی نفت، گروه حفاری و تکمیل چاه، پژوهشگاه صنعت نفت تهران، yp.mazaheri@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۰ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۴)

چکیده

شکست هیدرولیکی مبتنی بر استفاده از سیال پایه آبی گوارگام با ویسکوزیته مناسب، به دلیل مزایای منحصر به فرد آن مانند هزینه‌های ارزان و ظرفیت حمل پروپانت، به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای استخراج نفت و گاز طبیعی از مخازن شناخته شده است. با این وجود، عدم آگاهی از شکستگی‌های این مخازن، استفاده از آن را در شرایط عملیاتی به چالش کشیده است. بنابراین، هدف از این مطالعه بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال در فشار شکست و هندسه شکستگی‌های ایجاد شده است. برای دستیابی به این اهداف، یک سری آزمایش شکست هیدرولیکی روی نمونه سنگ‌های آهکی، با استفاده از سیال پایه آبی گوارگام انجام شد. به‌منظور بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال، فناوری سی‌تی اسکن نیز برای توصیف پارامترهای هندسی شکستگی به‌کار گرفته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش نرخ جریان سیال تزریق شده از ۱ به ۶ میلی‌لیتر در دقیقه، فشار شکست و بازشدگی شکستگی افزایش می‌یابد. با افزایش حجم سیال مصرفی، زمان شکست کاهش پیدا می‌کند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که نرخ جریان پایین گوارگام می‌تواند یک شبکه شکستگی به هم پیوسته بهتری نسبت به نرخ جریان بالاتر ایجاد کند.

کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، سیال گوارگام، فشار شکست، نرخ تزریق، سی‌تی اسکن

* نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

میلی‌متر بودند. سیال (کف) با ویسکوزیته ۰/۰۶ پاسکال ثانیه، با نرخ‌های تزریق ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در نمونه‌ها تزریق شد. نتایج نشان داد، هنگامی که نرخ تزریق سیال از ۱۰ به ۷۰ میلی‌لیتر بر دقیقه افزایش می‌یابد، حجم سیال مصرفی حدود ۴۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین نرخ تزریق بالا (۷۰ میلی‌لیتر بر دقیقه) منجر به فشار شکست بیشتر نسبت به نرخ تزریق پایین (۱۰ میلی‌لیتر بر دقیقه) می‌شود [۹].

ژانگ^۸ و همکاران (۲۰۱۹) آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را برای بررسی شکستگی نمونه‌های شیل، با طول و قطر ۱۰۰ و ۵۰ میلی‌متر، با استفاده از سیال دی‌اکسید کربن با نرخ‌های تزریق ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌لیتر بر ثانیه انجام دادند. طول و قطر گمانه ایجاد شده برای تزریق سیال در وسط نمونه‌ها به ترتیب ۸ و ۱۰۰ میلی‌متر بود. فشار محصورکننده ۲۰ مگاپاسکال و تنش‌های محوری ۲۵، ۳۰ و ۳۵ مگاپاسکال به ترتیب روی نمونه‌ها اعمال شد. آن‌ها تأثیر فشار شکست و گسترش شکستگی‌ها را در لایه‌بندی با زاویه‌های صفر، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه نسبت به افق بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نرخ تزریق فشار شکست افزایش می‌یابد در صورتی که زاویه لایه‌بندی نمونه‌ها نسبت به افق زیاد شود. در هر دو نرخ تزریق (۰/۲ و ۰/۳ میلی‌لیتر بر ثانیه) فشار شکست با افزایش زاویه (افزایش زاویه نسبت به افق) لایه‌بندی نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۱۰].

ها^۹ و همکارانش با استفاده از سه سیال دی‌اکسید کربن، مایع، آب و روغن به مطالعه تأثیر نفوذ سیال بر فشار شکست و رفتار ترک پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های سیمانی همگن، که طول و قطر آن‌ها به ترتیب ۱۰۰ و ۵۶ میلی‌متر بود، انجام دادند. در آزمایش‌های انجام شده، میزان حجم سیال‌های نفوذ کرده به داخل نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. زمان و فشار شروع شکستگی‌ها توسط آزمایش انتشار آکوستیک^{۱۰} حین آزمایش شکست هیدرولیکی نیز اندازه‌گیری شد. نمونه‌های آزمایش شده با سه سیال بعد از آزمایش نیز سی‌تی اسکن شدند. نتایج بیان‌گر آن است که با افزایش ویسکوزیته، بازشدگی شکستگی ایجاد شده افزایش می‌یابد. سیال با ویسکوزیته بیشتر (روغن)، بیشترین عمق نفوذ و فشار شکست را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند [۱۱].

بیوگلسدایک^{۱۱} و همکارانش (۲۰۰۰) آزمایش‌های آزمایشگاهی مقیاس‌پذیر را برای بررسی تأثیر شکستگی‌های طبیعی در فرآیند شکست هیدرولیکی انجام دادند. این

یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی که در حال حاضر با آن رو به رو هستیم بحران انرژی است. این مساله همچنین به‌عنوان یک مشکل ادامه‌دار شناسایی شده است و انتظار می‌رود که بدترین حالت در آینده نزدیک باشد [۱،۲]. بنابراین توجه جهان به منابع انرژی تجدیدناپذیر و تجدیدپذیر جذب شده است. استخراج نفت و گاز طبیعی یک راه‌حل مناسب برای بحران انرژی است و به‌عنوان یک منبع انرژی برای چند دهه استفاده شده است [۳،۴]. با توجه به پایین بودن نفوذپذیری مخازن^۱، تکنیک‌های تحریک مانند شکست هیدرولیکی برای افزایش نفوذپذیری مخازن و داشتن نرخ تولید اقتصادی مورد نیاز است [۵،۶].

زوباک^۲ و همکارانش آزمایش‌های خود را روی دو فاکتور مؤثر بر فرآیند شکست هیدرولیکی به‌منظور تعیین تنش‌های برجا انجام دادند. آن‌ها نیز اثر نرخ تزریق سیال را روی فشار شکست، بررسی کردند. نتایج نشان داد که فشار شکست با نرخ اعمال فشار در ارتباط است. در نرخ‌های پایین‌تر اعمال فشار، مشاهده می‌شود که فشار شکست^۳ کاهش می‌یابد که این منجر به فرض یک مقدار بسیار کم، برای مقاومت کششی می‌شود [۷].

ایتو و هایشی^۴ آزمایش‌های خود را روی نمونه‌های مکعبی از آندزیت‌های Kofu برای اندازه‌گیری تنش‌های تکنونیکي انجام دادند. در این مطالعات آن‌ها فرض کرده‌اند که انتشار شکستگی‌ها زمانی آغاز می‌شود که تنش کششی مؤثر حداکثر، به مقاومت کششی در نقطه‌ای درون سنگ می‌رسد و روی سطح گمانه^۵ متمرکز نیست. همچنین آن‌ها نمونه‌های خود را ایزوتروپ و فاقد هر گونه فشار منفذی فرض کرده‌اند. ابعاد نمونه‌ها (۳۰×۳۰×۳۰) سانتی‌متر مکعب و در حالت خشک آزمایش شده‌اند. آب را به‌عنوان سیال شکست انتخاب و با نرخ‌های ثابت ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌لیتر بر دقیقه در گمانه‌هایی با قطر ۱۰، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متر تزریق کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که فشار شکست با افزایش قطر گمانه، کاهش و با افزایش نرخ فشارگذاری گمانه، افزایش می‌یابد [۸].

رنجیت^۶ و همکاران یک سری آزمایش شکست هیدرولیکی جامع، برای بررسی تأثیر نرخ تزریق در ایجاد شکستگی‌ها با سیال مبتنی بر کف^۷، روی نمونه‌های شیل انجام دادند. نمونه‌های شیل شکستگی‌های طبیعی داشتند، بنابراین قبل از آزمایش، مورد ارزیابی و میکرو سی‌تی اسکن قرار گرفتند. نمونه‌های سنگی مورد استفاده دارای طول و قطر ۱۰۰ و ۵۰

سیال، ضریب نشت، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون با استفاده از روش اجزای محدود و با تکنیک مدل ناحیه چسبنده، در نرم افزار آباکوس پرداخته‌اند. این مدل دارای ابعاد (۴۴۸×۶۸۹×۱۹۷) فوت مکعب بوده و از سه لایه (دو لایه در برگیرنده لایه نفتی و لایه نفتی) تشکیل شده است. آن‌ها نرخ تزریق ۲۰، ۴۰ و ۶۰ بشکه در دقیقه را بررسی کردند. با افزایش نرخ تزریق سیال بازشدگی شکستگی و ارتفاع شکست افزایش پیدا کرده است. [۱۹]. یائو^{۱۹} و همکاران (۲۰۱۰) به مطالعه اثر سختی شکست و مدول الاستیسیته سنگ، نرخ تزریق، ضریب نشت و لزجت سیال با استفاده از FEM با کمک نرم افزار آباکوس پرداختند. [۲۰]. محمدنژاد و خوئی (۲۰۱۳) به مطالعه اثر نفوذپذیری مطلق، دبی تزریق و لزجت سیال پرداخته‌اند [۲۱]. شین^{۲۰} (۲۰۱۳) با ارائه یک مدل عددی به بررسی اثر مدول الاستیسیته، فاصله سوراخ‌ها، تعداد سوراخ‌ها در هر مرحله مشبک‌کاری، دبی سیال ورودی و مدل رئولوژیک سیال ورودی پرداخت [۲۲]. با توجه به مطالعات انجام شده همگی به نتیجه مشترک رسیدند که با افزایش نرخ تزریق سیال طول و بازشدگی شکستگی افزایش می‌یابد.

در عملیات شکست هیدرولیکی، پس از انتخاب نوع سیال شکست، سیال با نرخ جریان ثابت تزریق می‌شود تا این‌که مخزن به فشار شکست خود برسد و شکستگی‌ها ایجاد شود. با این حال، در برخی موارد، در ابتدا از نرخ جریان بالاتری برای دستیابی به فشار بالاتر استفاده می‌شود و سپس نرخ جریان به تدریج کاهش می‌یابد، پس از شکست سازند در نهایت شبکه‌ای از شکستگی‌ها به دست می‌آید. شکستگی‌های ایجاد شده می‌تواند نفوذپذیری مخزن را تا چندین برابر افزایش دهد. در چنین مواردی، نرخ جریان با گذشت زمان به‌عنوان یک عملکرد مرحله‌ای می‌تواند تغییر کند [۲۳]. در این مطالعه آزمایش‌های شکست هیدرولیکی برای بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال، با سیال پایه آبی گوارگام^{۲۱}، در نمونه‌سنگ‌های آهک انجام شد. با توجه به این‌که شرکت نفت شلومبرژه از این سیال برای عملیات شکست هیدرولیکی در میدین نفت آمریکا استفاده کرده است و در تحقیقات گذشته از این سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی بهره گرفته نشده است؛ بنابراین در این تحقیق میسر شد که از این سیال برای بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال استفاده کرده که نوآوری تحقیق نیز می‌باشد و نتایج آن را ارائه دهیم. به منظور تزریق سیال گمانه‌ای در مرکز نمونه‌ها ایجاد گردید. سپس سیال گوارگام با ویسکوزیته ۸۰ سانتی‌پواز، با نرخ‌های تزریق مختلف ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌لیتر در دقیقه، در نمونه‌ها تزریق شد. در نهایت تأثیر نرخ تزریق سیال بر روی

آزمایش‌ها نشان داد که نرخ جریان بالای سیال دارای حداقل تعامل با شکستگی‌های طبیعی است، در حالی‌که نرخ جریان کم سیال تعامل بهتری با شکستگی‌های موجود دارد. نتایج همچنین نشان داد که در نرخ جریان کم تزریق سیال، با استفاده از سیال ویسکوزیته پایین (ویسکوزیته و نرخ جریان در حدود نانومتر) اثر نشت سیال^{۱۲} معنی‌دار بوده و نمی‌تواند به فشار شکست برسد. نشت سیال از طریق شکستگی‌های موجود اتفاق می‌افتد [۱۲].

ویجرس^{۱۳} (۱۹۹۵) آزمایش‌هایی را برای بررسی تأثیر ویسکوزیته سیال و نرخ جریان شکستگی بر ویژگی‌های شکست هیدرولیکی انجام داد. نتایج نشان داد که نرخ جریان بالا و تزریق سیال با ویسکوزیته‌های بالا، باعث ایجاد شکستگی براساس شرایط تنش اعمال شده می‌شود [۱۳].

هویو^{۱۴} و همکارانش (۲۰۱۸) برای درک بهتر اثر توزیع فشار منافذ بر رفتار شکستگی سنگ‌های مخزنی، آزمایش شکست هیدرولیکی را در نمونه‌های ماسه‌سنگی استوانه‌ای، با طول و قطر ۱۰۰ و ۵۴ میلی‌متر انجام دادند. آزمایش‌ها در دو نرخ فشار ۰/۲ و ۰/۰۷۵ مگاپاسکال بر ثانیه انجام شد. سپس فشار شکست و مورفولوژی شکستگی‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که فشار شکست با افزایش نرخ فشار گاز تزریق شده (نیترژن) افزایش می‌یابد [۱۴].

فنگ و گری^{۱۵} به مطالعه اثر زاویه مشبک‌کاری و با نرخ تزریق‌های مختلف به بررسی طول شکستگی پرداختند. [۱۵]. جیل^{۱۶} و همکاران مطالعات عددی را برای بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی از جمله نرخ جریان تزریق و ویسکوزیته سیال شکستگی در فرآیند شکست هیدرولیکی در سنگ‌های مخزن با شکستگی‌های طبیعی انجام دادند. نتایج نشان داد که بین میزان جریان تزریق و تعداد شکستگی‌های کششی ناشی از تزریق سیال ارتباط مستقیمی وجود دارد. آن‌ها مشاهده کردند که افزایش نرخ جریان تزریق باعث شکست کششی در مدل ارائه شده می‌شود. این امر در درجه اول به دلیل افزایش نرخ جریان، یعنی فشارهای تزریق بالاتر و ایجاد شکستگی‌های کششی بود. همچنین نرخ جریان تزریق پایین باعث شکست برشی در مقایسه با میزان جریان تزریق بالا می‌شود مطالعات خود را برای بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی از جمله نرخ جریان تزریق و ویسکوزیته سیال شکستگی در فرآیند شکست هیدرولیکی در سنگ‌های مخزن با شکستگی‌های طبیعی انجام دادند [۱۶]. ناچل^{۱۷} و همکاران [۱۷]، کرسه^{۱۸} و همکاران [۱۸]، حداد و سپهرنوری نیز به مطالعه اثر نرخ تزریق، لزجت



شکل ۱- تصویری از دستگاه (XRD) استفاده شده

جدول ۱- شرایط ابزار برای تجزیه و تحلیل XRD

مقدار پارامتر	پارامتر اندازه گیری شده
Cu K α 1.5406	نوع تابش
40 kV 0.7 mA	منبع تولید کننده
5°-65° 2 θ	محدوده زاویه ای
1s	زمان / مرحله
0.02° 2 θ	اندازه گام
0.5mm	ضخامت شکاف واگرایی
0.5°	درجه پراکندگی تابش
Fixed	نوع شکاف
120 rpm	سرعت دوران
25 °C	دما

در این پژوهش گام اول برای انجام آزمایش تهیه مغزه از بلوک سنگ است. بدین منظور با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر، موجود نمونه‌های سنگی تهیه شد. سپس به وسیله دستگاه برش مغزه نمونه‌هایی متناسب برای هر آزمایش تهیه شد. پس از انجام آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره و برزلی از پارامترهای الاستیک و مقاومتی نمونه‌ها و مقاومت کششی نمونه‌ها اندازه‌گیری، همچنین پارامترهای فیزیکی نمونه‌ها نیز تعیین شد. شایان ذکر است که تمامی نمونه‌ها در آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره دارای قطر ۳۸ و طول ۸۰ میلی‌متر بوده است. این طول و قطر در شرکت‌های نفتی استفاده می‌شود. همچنین در آزمایش برزلی برای تعیین مقاومت کششی نمونه‌ها قطر و طول نمونه به ترتیب ۳۸ و ۲۰ میلی‌متر بوده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

فشار و زمان شکست، حجم سیال مصرفی و هندسه شکستگی‌ها ارزیابی شد.

۲- روش کار

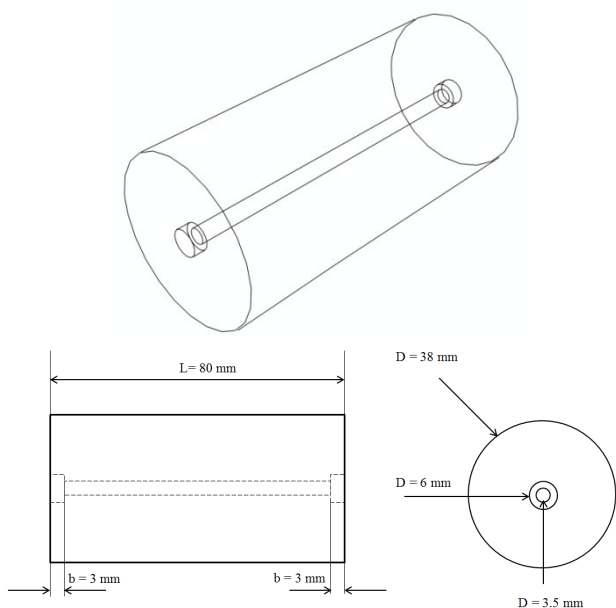
در ابتدا به تعیین مشخصات نمونه‌های آهکی با استفاده از مطالعات XRD، تعیین پارامترهای الاستیک (مقاومت فشاری تک محوره و نسبت پواسون)، پارامترهای مقاومتی (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) و پارامترهای فیزیکی و پتروفیزیکی، آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمایش شکست هیدرولیکی پرداخته می‌شود. سپس تجهیزات و وسایل آزمایش شکست هیدرولیکی تشریح می‌شود. در قسمت نتایج و بحث به تأثیر نرخ تزریق سیال در زمان و فشار شکست، حجم سیال تزریق شده و هندسه شکستگی‌های ایجاد شده در نرخ‌های تزریق مختلف سیال پرداخته خواهد شد. در پایان نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی ارائه می‌شود.

۲-۱- مشخصات نمونه‌های آهکی

نمونه سنگ‌های آهکی با شکستگی‌های طبیعی (اندازه شکستگی‌ها در حد نانو و میکرومتر بوده) از عمق ۱۰۰ متری یک معدن سنگ آهک واقع در استان کردستان، برای انجام آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه تهیه شده است. نمونه‌های سنگی استوانه‌ای از یک بلوک (۲۰*۲۰*۲۰) سانتی‌متر مکعب تهیه شده‌اند؛ بنابراین نمونه‌ها یکسان‌سازی شده است. در این مطالعه، نمونه‌های آهکی به‌منظور شبیه‌سازی سنگ مخزن دارای شرایط کاملاً مشابه هستند. باید در نظر داشت که پارامترهای پتروفیزیکی و الاستیکی نمونه‌هایی که از یک بلوک کوچک تهیه شده‌اند تقریباً یکسان است و در مقایسه با شرایط واقعی مخزن تفاوت ناچیزی دارند که قابل چشم‌پوشی است. این نمونه‌ها مقاومتی بیشتر از سنگ‌های مخزنی داشتند. علاوه بر این، باید توجه داشت که به‌دست آوردن نمونه سنگ‌های آهکی بدون شکستگی‌های طبیعی بسیار دشوار است. الگوهای شکستگی طبیعی با استفاده از سی‌تی اسکن بررسی و تصویرسازی شد. تجزیه و تحلیل پراش پرتو x (XRD) برای شناسایی کانی‌شناسی نمونه‌های انتخابی انجام شد. دستگاه (XRD) در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، شرایط ابزار انتخابی نیز برای تجزیه و تحلیل XRD در جدول ۱ آورده شده است. این نمونه سنگ از ۹۸ درصد دولومیت و ۲ درصد کانی‌های دیگر تشکیل شده است.

جدول ۲- پارامترهای مکانیکی، فیزیکی و پتروفیزیکی نمونه‌ها

مقدار آن	پارامترهای اندازه‌گیری شده
۱۴۴	مقاومت فشاری تک محوره (مگاپاسکال)
۰/۲۳	نسبت پواسون
۳۷	مدول یانگ (گیگاپاسکال)
۷/۵۱	چسبندگی (مگاپاسکال)
۴۹	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱۵/۱	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
۲/۷۰	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۴/۲۱	تخلخل (درصد)
۱	نفوذپذیری (میکرو داریسی)
۳۰۰	اندازه دانه‌ها (نانومتر)



شکل ۳- شماتیک نمونه برای آزمایش شکست هیدرولیکی

۲-۲- تهیه نمونه‌ها برای آزمایش شکست هیدرولیکی

تعداد ۴ نمونه به قطر ۳۸ میلی‌متر و طول ۸۰ میلی‌متر برای آزمایش شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ گروه حفاری و تکمیل چاه پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شد. به منظور شبیه‌سازی چاه و تزریق سیال، گمانه‌ای به قطر ۳/۵ میلی‌متر در مرکز هر نمونه، در امتداد محور نمونه حفر شد. قطر گمانه باید ۰/۱ قطر نمونه باشد [۲۴]. شکل ۲ حفر گمانه تزریق در نمونه‌های آهکی توسط دریل افقی ثابت و شکل ۳ شماتیک نمونه بعد از حفر گمانه را نشان می‌دهد.

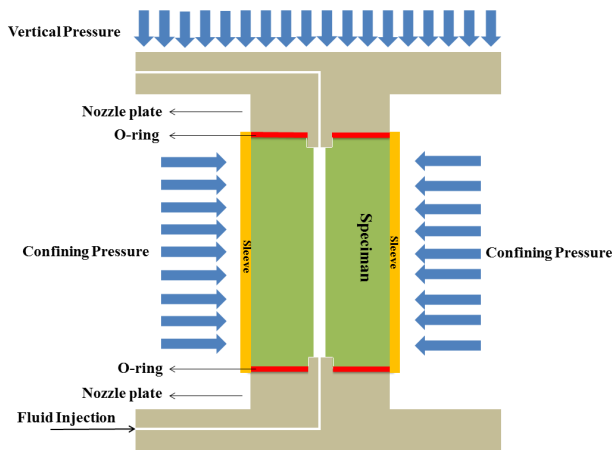


شکل ۲- ایجاد و حفر گمانه

۳-۲- آزمایش شکست هیدرولیکی

آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از دستگاه تست سه‌محوره فشار قوی موجود در آزمایشگاه مکانیک سنگ گروه حفاری و تکمیل چاه پژوهشگاه صنعت نفت انجام شد. دستگاه آزمایش سه‌محوری توانایی تأمین بارهای محوری تا ۱۲۰۰ کیلو نیوتن را دارد، پمپ تزریق سیال نیز می‌تواند سیال را تا فشار ۷۰ مگاپاسکال، با نرخ‌های تزریق ۰/۱ تا ۸۰ میلی‌لیتر در دقیقه با گام‌های ۰/۱ میلی‌لیتر در دقیقه تزریق کند. تنش جانبی نیز توسط پمپ دستی ENERPAC اعمال می‌شود. تنش جانبی در طی آزمایش توسط فشار روغن ایجاد شده توسط پمپ، بر پوشش لاستیکی و به تبع آن بر نمونه سنگ وارد می‌شود. بیشینه فشاری که این پمپ می‌تواند اعمال کند، ۷۰ مگاپاسکال است. طرح کلی کنار هم قرارگیری دستگاه‌ها به‌منظور انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در تمام ورودی‌های سیال (اعم از روغن هیدرولیک تزریق شده به جک اعمال‌کننده تنش محوری، سلول آزمایش و یا سیال شکست تزریق شده به داخل نمونه) سنسورهای فشار قرار داده شده است. تمام اطلاعات توسط سیستم دیتالاگر به سیستم کنترل اصلی منتقل می‌شود و اطلاعات به‌صورت یک فایل اکسل در سیستم ذخیره خواهد شد.

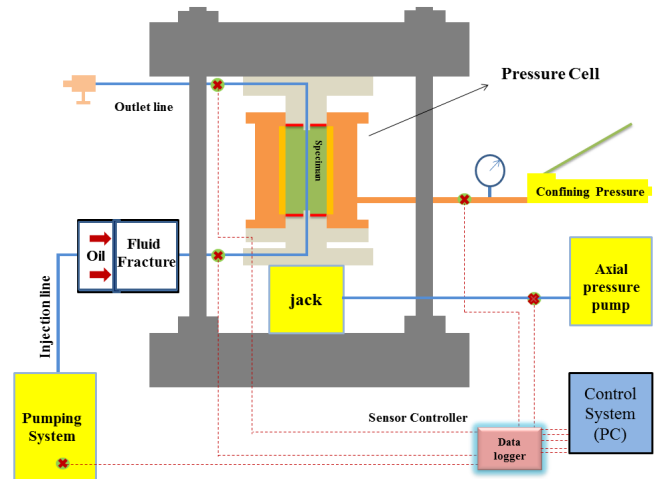
تنش محوری به ترتیب ۱۰ و ۳۵ مگاپاسکال اعمال شد. سپس سیال با نرخ‌های تزریق مختلف ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌لیتر در دقیقه، در نمونه‌ها تزریق می‌شود. شایان ذکر است که قبل از انجام آزمایش‌ها نمونه‌ها با آب اشباع شده‌اند. در ادامه به منظور بررسی تأثیر پارامتر نرخ تزریق سیال، به تهیه و ساخت سیال گوارگام پرداخته خواهد شد.



شکل ۵- نمایش نمونه در بین دو پایه نازل‌دار تحت تنش

۴-۲- تهیه و ساخت سیال گوارگام

موارد مهمی وجود دارد که در هنگام انتخاب سیال مناسب برای عملیات شکست هیدرولیکی باید مورد توجه قرار گیرد. استفاده از سیالی که سازگار با سنگ و سیال موجود در سازند باشد، به دلیل وارد شدن کمترین آسیب به مخزن، توانایی کافی سیال برای انتقال پروپانت، گرانیروی سیال به گونه‌ای باشد که پس از عملیات به راحتی کاهش یابد و تمیز شود، ملاحظات مالی و بحث اقتصادی بودن سیال از جمله مواردی هستند که در هنگام انتخاب سیال باید مدنظر قرار گیرند. در این پژوهش برای ساخت سیال از صمغ طبیعی گوارگام با درصد‌های وزنی- حجمی یک استفاده شده است. برای تهیه سیال، آب مقطر به همراه مقداری پودر (گوارگام) نیاز است. در ابتدا ۳۵۰ میلی‌لیتر آب را در ظرف فلزی (کاپ) ریخته و در داخل دستگاه میکسر (شکل ۶) گذاشته و سرعت ۹۵۰۰ دور در دقیقه اعمال می‌شود. در مدت ۱۵ ثانیه مقدار ۳/۵ گرم پودر را به آب اضافه کرده و مدت زمان ۲۰ دقیقه اجازه مخلوط داده می‌شود. شکل ۶ سیال گوارگام تهیه شده را نشان می‌دهد.

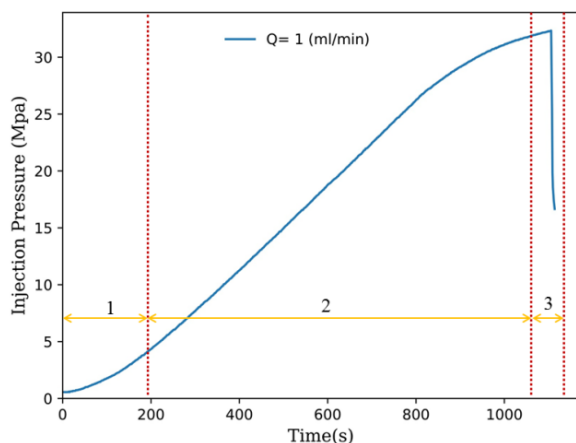


شکل ۴- طرح کلی از تجهیزات آزمایش شکست هیدرولیکی

بعد از آماده شدن نمونه برای آزمایش شکست هیدرولیکی، بین نمونه و پایه‌های دارای نازل از واشرهای لاستیکی برای آب‌بندی کامل نمونه، استفاده می‌شود، تا از نظر نشت نکردن سیال اطمینان بیشتری حاصل شود. نازل پایه‌های بالایی و پایینی دارای قطر ۵ و طول ۳ میلی‌متر هستند. شکل ۵ قرار گرفتن نمونه را در بین دو پایه نازل‌دار تحت تنش‌های جانبی و محوری و تزریق سیال نشان داده است. نازل‌ها در مجموع به اندازه ۶ میلی‌متر به داخل نمونه سنگ وارد می‌شوند. نمونه با نازل‌ها در تماس نبوده و به صورت قائم روی پایه قرار می‌گیرد.

بعد از قرارگیری نمونه در سلول آزمایش، به منظور اعمال شرایط مختلف درون زمین، در ابتدا تنش‌های جانبی و محوری به نمونه مطابق با برنامه آزمایش وارد می‌شود. پس از آن سیال با نرخ ثابت، از طریق پایه نازل‌دار پایینی در طول آزمایش به درون نمونه تزریق خواهد شد. در اینجا ذکر این نکته مهم است که سیال از پایه نازل‌دار پایینی وارد نمونه شده و از طریق پایه نازل‌دار بالایی خارج می‌شود. در انتهای مسیر شیری قرار دارد که پس از عمل هواگیری مسیر، شیر بسته می‌شود. شیرهای قرار گرفته در ابتدا و انتهای نمونه به هم نزدیک بوده و فشار در طول نمونه سنگ اعمال می‌شود. بنابراین فشار سیال داخل گمانه افزایش می‌یابد، پس از غلبه بر تنش جانبی و مقاومت کششی نمونه سنگ، شکست هیدرولیکی اتفاق می‌افتد. در تمام آزمایش‌ها روند کار به همین صورت است و فقط نرخ تزریق سیال تغییر پیدا می‌کند. چون این آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر نرخ تزریق در آزمایش شکست هیدرولیکی است، تمام پارامترها به جز نرخ تزریق در طول آزمایش‌ها ثابت نگه داشته شده است. بنابراین، برای همه نمونه‌ها، تنش جانبی و

مطابق شکل ۷ زمان لازم برای دستیابی به فشار شکست با کاهش مقدار نرخ تزریق، افزایش می‌یابد. نرخ ایجاد فشار در نمونه‌ها متناسب با نرخ تزریق سیال است. با افزایش نرخ تزریق سیال، فشار شکست نمونه‌ها افزایش می‌یابد. شکل ۸ سه منطقه اصلی در ایجاد فشار تزریق را بدون توجه به نرخ‌های تزریق سیال نشان می‌دهد. در مرحله اول سیال منافذ نزدیک گمانه را پر می‌کند. با این حال، در مرحله دوم بیشتر منافذ مجاور گمانه پر و اشباع شده‌اند. بنابراین، سیال تزریق شده نمی‌تواند به راحتی وارد منافذ شود و فشار افزایش پیدا می‌کند. در مرحله سوم، شکست در نمونه رخ داده و یک افت فشار ناگهانی ایجاد می‌شود، زیرا سیال وارد شکستگی شده و مسیر برای جریان سیال باز شده است.



شکل ۸- سه مرحله در تولید فشار شکست هیدرولیکی

اندازه فشار سیال ایجاد شده در گمانه به دو فاکتور بستگی دارد: (۱) ساختار منافذ سنگ، (۲) مدت زمانی که فشار اعمال می‌شود. فاکتور اول برای هر چهار آزمایش انجام شده مشابه است، چراکه یک نوع سنگ برای آزمایش‌ها استفاده شده است. با این حال، فاکتور دوم مدت زمان فشار وارده به دیواره چاه شبیه‌سازی شده، به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر نرخ تزریق سیال قرار می‌گیرد. بنابراین، در نرخ تزریق کمتر (۱ میلی‌لیتر در دقیقه) منطقه تحت فشار به دلیل نفوذ سیال به منافذ، بسیار بیشتر است. در نتیجه فشار شکست نمونه، پایین‌تر است. برعکس، در نرخ تزریق بالاتر (۶ میلی‌لیتر در دقیقه)، منطقه تحت فشار نسبت به نرخ تزریق کمتر (۱ میلی‌لیتر در دقیقه)، کوچکتر است. در نرخ تزریق بالاتر سیال فرصت نفوذ به درون سنگ را ندارد. در نتیجه فشار شکست بیشتری ایجاد می‌کند. علاوه بر این، به‌منظور ارزیابی میزان مصرف سیال در هنگام شکست و زمان لازم برای دستیابی به فشار شکست در شکل

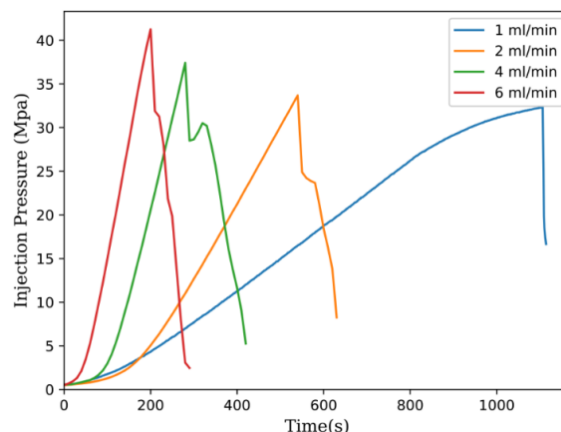


شکل ۶- دستگاه میکسر سیال

۳- نتایج و بحث

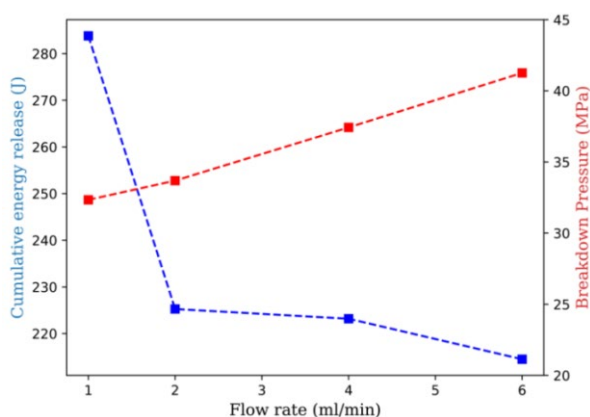
۳-۱- تأثیر نرخ جریان سیال

همان‌طور که اشاره شد، به‌منظور تعیین تأثیر نرخ تزریق سیال در آزمایش شکست هیدرولیکی، نمونه‌های آهکی با استفاده از نرخ‌های تزریق مختلف (۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌لیتر در دقیقه) آزمایش شدند. دلیل انتخاب نرخ‌های تزریق ذکر شده با تعدادی آزمایش به دست آمده است. به‌عنوان مثال در نرخ‌های تزریق کمتر از ۱ میلی‌لیتر در دقیقه شکست در سنگ رخ نداده و سیال نشت می‌کند. نرخ‌های تزریق بیشتر از ۶ میلی‌لیتر در دقیقه باعث شکست سریع نمونه شده و فرصت ذخیره اطاعات نبوده و نمونه کاملاً خرد شده است. در تحقیقات انجام شده توسط دیگر محققین نمونه‌های بزرگ‌تر استفاده شده و یا نمونه موردنظر دارای مقاومت بسیار بیشتری از نمونه‌های آهکی آزمایش شده در این مطالعه است. بنابراین انتخاب نرخ تزریق بایستی با شرایط هر مخزن و نمونه سنگ کاملاً همخوانی داشته باشد. شکل ۷ تغییرات فشار تزریق نسبت به زمان برای چهار نرخ جریان تزریق انتخاب شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، نرخ جریان تأثیر قابل توجهی بر فشار شکست نمونه‌های آهکی دارد.



شکل ۷- تغییرات فشار تزریق- زمان در نرخ‌های مختلف تزریق

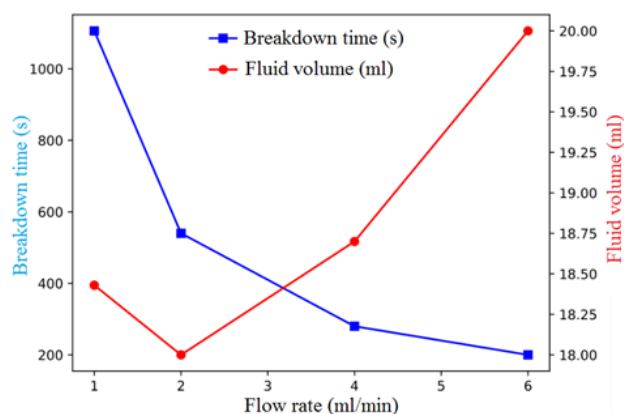
تزریق سیال برقرار است. علاوه بر این، انتشار آکوستیک یک پارامتر مهم است، که به‌عنوان یک روش امیدوارکننده برای تعیین کمیت انرژی آزاد شده در هنگام شکست هیدرولیکی شناخته شده است [۲۵]. در مطالعه حاضر، میزان انتشار انرژی بررسی شده و نتایج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، آشکار است که انتشار انرژی تجمعی آزاد شده با افزایش نرخ جریان تزریق کاهش می‌یابد. با این حال، به نظر می‌رسد تغییر انتشار انرژی تجمعی با نرخ جریان رابطه غیرخطی دارد.



شکل ۱۰- انتشار انرژی تجمعی و فشار شکست برای نرخ تزریق مختلف

در شکل ۱۰ به‌عنوان مثال، هنگامی که نرخ جریان از ۱ به ۲، ۲ به ۴ و ۴ به ۶ میلی‌لیتر در دقیقه افزایش می‌یابد، کاهش انتشار انرژی تجمعی به ترتیب در حدود ۲۰/۶۳، ۰/۹۳ و ۲۴/۴۲ درصد است. جالب اینجاست که روندها نشان می‌دهد که انتشار انرژی تجمعی و فشار شکست با یکدیگر رابطه‌ای عکس دارند. به‌طور کلی فشارهای شکست بالاتر منجر به آزاد شدن انرژی بیشتر و بالعکس می‌شود. با این حال، انتشار انرژی در هنگام شکست هیدرولیکی به‌طور قابل توجهی به ایجاد شکستگی نیز بستگی دارد. هنگامی که شکست هیدرولیکی ایجاد شده به اندازه کافی بزرگ است، انرژی بالاتری را منتشر می‌کند. بنابراین در ابتدا می‌توان از نرخ جریان بالاتری استفاده کرد و هنگامی که فشار سیال به اندازه کافی بالا باشد، می‌توان نرخ جریان را به‌صورت گام به گام کاهش داد تا شبکه‌ای از شکستگی‌ها ایجاد شود. وانگ ۲۲ و همکاران (۲۰۱۶) یک مطالعه در مورد میزان نرخ تزریق سیال متغیر انجام داده‌اند نتایج آن‌ها تایید می‌کند که با استفاده از روش نرخ تزریق متغیر، شکستگی‌های بیشتری ایجاد خواهد شد [۲۶]. شکل ۱۱ نمونه سنگ‌های آهک پس از آزمایش شکست هیدرولیکی که در نرخ‌های تزریق مختلف آزمایش شده‌اند را نمایش می‌دهد.

۹ تغییرات حجم سیال و زمان شکست در برابر نرخ تزریق سیال ترسیم شده است.

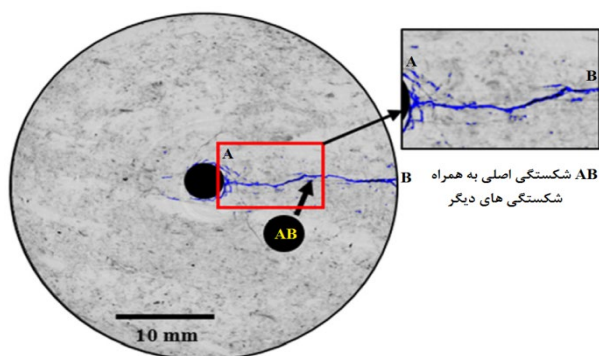


شکل ۹- تغییرات زمان فشار شکست و حجم سیال با نرخ تزریق

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود و قبلاً نیز توضیح داده شد، زمان دست‌یابی به فشار شکست با نرخ تزریق سیال رابطه عکس دارد. به‌عنوان مثال، هنگامی که نرخ تزریق از ۱ به ۶ میلی‌لیتر در دقیقه افزایش می‌یابد، مدت زمان شکست حدود ۸۲ درصد کاهش می‌یابد. این امر اغلب به دلیل افزایش فشار بیشتر در نتیجه نرخ تزریق بالاتر است. براساس زمان شکست و نرخ تزریق، می‌توان میزان مصرف سیال برای فرآیند شکست هیدرولیکی را نیز محاسبه کرد. با افزایش نرخ تزریق، زمان شکست کاهش می‌یابد، اما حجم سیال تزریقی افزایش پیدا می‌کند. این مشاهدات حاکی از آن است که در این مطالعه زمان شکست و حجم سیال با یکدیگر رابطه‌ای عکس دارند. در حقیقت، هنگامی که نرخ تزریق سیال از ۱ به ۶ میلی‌لیتر در دقیقه افزایش می‌یابد، حجم سیال مصرفی حدود ۱۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. نرخ تزریق بالاتر منجر به فشار شکست بیشتر و همچنین مصرف بیشتر سیال می‌شود. هر دو پارامتر به‌طور قابل توجهی بر جنبه‌های هزینه‌ای عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند.

در شرایط عملیات، برای دست‌یابی به نرخ تزریق بالاتر به پمپ‌های صنعتی احتیاج است که باز هم هزینه بیشتری را برای تحریک مخزن اضافه می‌کند. با این حال، مطابق شکل ۹ هنگامی که نرخ تزریق سیال از ۱ به ۶ میلی‌لیتر در دقیقه افزایش می‌یابد، نرخ فشار افزایش یافته و زمان رسیدن به شکست حدود ۹۰۶ ثانیه کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۰ تغییرات فشار شکست و انرژی تجمعی آزاد شده در نرخ‌های تزریق مختلف ۱، ۲، ۴ و ۶ میلی‌لیتر در دقیقه، را در نمونه‌های آهکی نشان می‌دهد. رابطه‌ای خطی بین فشار شکست و نرخ

از این که شکستگی ایجاد شود و اجازه دهد تا سیال در آن نفوذ کند، هر چند که سیال در نمونه نفوذ کرده و شبکه شکستگی بهتری ایجاد می‌کند. با توجه به این که امکان میکروسی تی اسکن نمونه‌ها را نداشته و این آزمایش هزینه زیادی را به خود اختصاص می‌دهد. شکل ۱۳ نمونه سی تی اسکن شده بعد از آزمایش در نرخ تزریق ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد و توضیحات ذکر شده را اثبات می‌کند. مقطع عرضی که از وسط نمونه شکسته شده در نرخ تزریق ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه در شکل ۱۳ نمایش داده است.

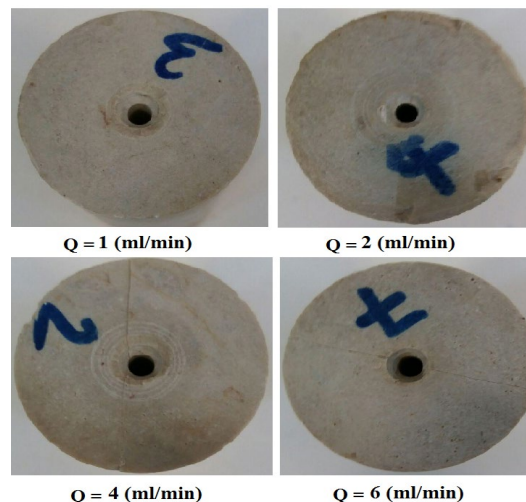


شکل ۱۳- تصویر سی تی اسکن، نمونه شکسته شده در نرخ تزریق ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه

پس از پیدایش اولین شکستگی‌های القایی در اطراف چاه در ابتدای مرحله انتشار شکست، وابستگی بیشتری نسبت به خواص مکانیک سنگ وجود دارد (که به‌عنوان رژیم چقرمگی - غالب شناخته می‌شود). اما به زودی این حالت تغییر کرده و توسط گرانروی (ویسکوزیته) سیال شکست (تحت عنوان رژیم گرانروی - غالب) برای قسمت بیشتر زمان انتشار - قبل از آن که دوباره به حالت چقرمگی غالب در مراحل پایانی انتشار برسد، کنترل می‌شود. با اضافه کردن پتانسیل احتمال نشت سیال شکست، حالت‌های مختلفی از رژیم‌های انتشار که در عمل به رژیم‌های چقرمگی یا گرانروی غالب وابسته هستند، و یا نشت و ذخیره‌سازی سیال شکست درون صفحات شکستگی‌ها، ممکن است ایجاد شود.

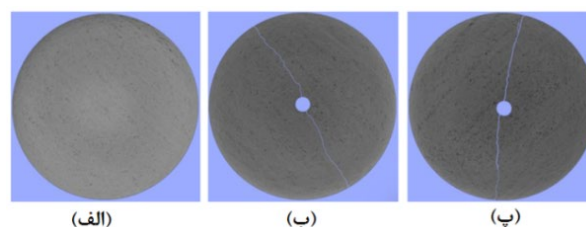
۴- نتیجه‌گیری

شکست هیدرولیکی به‌عنوان یک روش امیدوار کننده برای استخراج نفت و گاز طبیعی از مخازن با نفوذپذیری کم و غیرمتعارف در اعماق زمین شناخته شده است. با این حال، ویژگی‌های شکستگی و نفوذپذیری تا حد زیادی به نوع سیال و شرایط شکستگی بستگی دارد. بنابراین، در این مطالعه، تأثیر میزان جریان تزریق در شکست هیدرولیکی مبتنی بر سیال



شکل ۱۱- نمونه‌های شکسته شده در نرخ‌های تزریق مختلف

شکل ۱۲ نمونه‌های سی تی اسکن شده قبل و بعد از آزمایش در نرخ‌های تزریق ۱ و ۶ میلی‌لیتر بر دقیقه را نشان داده است. نمونه‌ها بعد از آزمایش به‌طور کامل جدا نشده‌اند؛ بنابراین برای اندازه‌گیری بازشدگی شکستگی‌های ایجاد شده آن‌ها را به آزمایشگاه سی تی اسکن انتقال داده و بازشدگی با استفاده از این آزمایش محاسبه شده است. نتایج بیان‌گر آن است که با افزایش نرخ تزریق، بازشدگی شکستگی ایجاد شده افزایش می‌یابد. مقدار بازشدگی شکستگی‌ها در نرخ‌های تزریق مختلف ۱ و ۶ میلی‌لیتر بر دقیقه به ترتیب ۰/۲ و ۱/۳۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد.



شکل ۱۲- تصاویر سی تی اسکن (الف) نمونه سالم، (ب) نمونه‌های شکسته شده، (پ) نرخ تزریق ۱ میلی‌لیتر بر دقیقه، (ب) نرخ تزریق ۶ میلی‌لیتر بر دقیقه

با افزایش نرخ تزریق سیال، تعداد کل شکستگی‌ها پس از شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این را می‌توان براساس نتایج شکل ۱۱ توضیح داد. با افزایش نرخ تزریق، انرژی تجمعی آزاد شده نیز کاهش می‌یابد. این نتایج حاکی از آن است که استفاده از نرخ جریان پایین تزریق در شکست هیدرولیکی، تعداد بیشتری شکستگی ایجاد می‌کند و این به معنای ایجاد یک شبکه بهتر از شکستگی‌ها است. بنابراین، همان‌طور که قبلاً گفته شد، بهتر است در مرحله اولیه تزریق از نرخ تزریق بالاتری استفاده شود و بعد نرخ تزریق سیال را کاهش داد، قبل

مرتضوی‌پور، داوود فاضلی، سعید حسینی، به خاطر کمک‌های ایشان تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. Reservoir permeability | 12. Leak-off fluid |
| 2. Zobak | 13. Weijers |
| 3. Breakdown pressure | 14. Hou |
| 4. Ito and Hayashi | 15. Feng and gray |
| 5. Borehole | 16. Gil |
| 6. Ranjith | 17. Nagel |
| 7. Foam | 18. Kresse |
| 8. Zhang | 19. Yao |
| 9. Ha | 20. Shin |
| 10. Acoustic | 21. Guar Gum |
| 11. Beugelsdijk | 22. Wang |

مراجع

- [1] Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M.M., Gohari, M., Majid, M.Z.A., 2015. "A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries)". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43, 843–862.
- [2] Bilgen, S., 2014. "Structure and environmental impact of global energy consumption". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38, 890–902
- [3] Wang, Q., Chen, X., Jha, A.N., Rogers, H., 2014. "Natural gas from shale formation – the evolution, evidences and challenges of shale gas revolution in United States". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 30, 1–28.
- [4] Hendry, M.J., Schmeling, E.E., Barbour, S.L., Huang, M., Mundle, S.O., 2017. "Fate and transport of shale-derived, biogenic methane". *Sci. Rep.* 7.
- [5] Wu, Y.-S., Li, J., Ding, D., Wang, C., Di, Y., 2014. "A generalized framework model for the simulation of gas production in unconventional gas reservoirs". *SPE J.* 845–857.
- [6] Wanniarachchi, W.A.M., Ranjith, P.G., Perera, M.S.A., Lashin, A., AL Arifi, N., Li, J.C., 2015. "Current opinions on foam-based hydro-fracturing in deep geological reservoirs". *Geomech. Geophys. Geo-Energy and Geo-Resources* 1, 121–134.
- [7] Zoback, M. D., Rummel, F., Jung, R., & Raleigh, C. B. (1977, March). "Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock". In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 14, No. 2, pp. 49-58). Pergamon.
- [8] Ito, T., & Hayashi, K. (1991, July). "Physical background to the breakdown pressure in hydraulic

پایه آبی با استفاده از نمونه‌های آهکی طبیعی بررسی شد. آزمایش شکستگی و مطالعات جریان برای بررسی خصوصیات شکستگی انجام شد. علاوه بر این، از فناوری سی‌تی اسکن برای توصیف الگوهای شکستگی و خواص آن استفاده شد. در این آزمایش‌ها دما و تأثیر آن بررسی نشده اما با در نظر گرفتن دما می‌توان شرایط واقعی مخزن را بهتر شبیه‌سازی کرد. شایان ذکر است که این آزمایش‌ها روی نمونه‌های سیمانی در شرایط یکسان نیز انجام شده است و نتایج مشابه با این مطالعه را داشته است. در نهایت مطالعه انجام شده نتیجه‌های زیر را در پی داشته است:

در فرآیند شکست هیدرولیکی مبتنی بر استفاده از سیال پایه آبی گوارگام، فشار شکست نمونه‌های آهکی با افزایش نرخ جریان تزریق شده افزایش می‌یابد. نرخ جریان کم تزریق باعث می‌شود که سیال زمان کافی برای نفوذ به اعماق داخل نمونه را داشته و فشار بیشتر بخش‌های سنگ بزرگ‌تر باشد و منجر به فشار شکست پایین‌تری شود.

با افزایش نرخ تزریق سیال، زمان شکست کاهش می‌یابد در حالی که حجم کل سیال مورد استفاده برای شکستگی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، هنگامی که نرخ جریان سیال از ۱ به ۶ میلی لیتر در دقیقه افزایش می‌یابد، مدت زمان شکست حدود ۸۲ درصد کاهش پیدا می‌کند؛ در حالی که حجم سیال حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. هر کدام از این پارامترها بر جنبه‌های هزینه‌ای عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر منفی دارند، چراکه برای بالا بردن نرخ تزریق به پمپ‌های با ظرفیت بالاتر و حجم بیشتری از سیال شکست نیاز خواهیم داشت.

افزایش فشار تزریق قابل توجه است و به دلیل نفوذپذیری کم (۱ میکرو داری) نمونه‌های آهک رخ داده است، نرخ‌های تزریق (۱، ۲، ۴ و ۶ میلی لیتر در دقیقه) بسیار بیشتر از سرعت نفوذ سیال از طریق ماتریکس و منافذ موجود در نمونه‌های آهک است. بنابراین فشار سیال افزایش می‌یابد تا فشار شکست ایجاد شود.

نرخ تزریق سیال و فشار شکست دارای رابطه‌ای مستقیم و خطی هستند؛ اما نرخ تزریق و انرژی تجمعی آزاد شده رابطه عکس دارند. فشار شکست و انرژی تجمعی نیز رابطه‌ای عکس داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه صنعت نفت تشکر و قدردانی می‌کنیم. از آقایان مهندس علی حسینی، محمد مهدی قندهاری، سید ایمان

- fracturing in real fractured rocks-overcjavascript: Iterm oming the limits of pseudo3D models*". In SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. Society of Petroleum Engineers.
- [18] Kresse, O., Weng, X., Gu, H., & Wu, R. (2013). "Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations". Rock mechanics and rock engineering, 46(3), 555-568.
- [19] Haddad, M., & Sepehrnoori, K. (2014, August). "Simulation of multiple-stage fracturing in quasibrittle shale formations using pore pressure cohesive zone model". In Unconventional Resources Technology Conference, Denver, Colorado, 25-27 August 2014 (pp. 1777-1792). Society of Exploration Geophysicists, American Association of Petroleum Geologists, Society of Petroleum Engineers.
- [20] Yao, Y., Gosavi, S. V., Searles, K. H., & Ellison, T. K. (2010, January). "Cohesive fracture mechanics based analysis to model ductile rock fracture". In 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- [21] Mohammadnejad, T., & Khoei, A. R. (2013). "An extended finite element method for hydraulic fracture propagation in deformable porous media with the cohesive crack model". Finite Elements in Analysis and Design, 73, 77-95.
- [22] Shin, D. H. (2013). "Simultaneous propagation of multiple fractures in a horizontal well". Ph.D.thesis, University of Texas at Austin.
- [23] Nolte, K. G., & Economides, M. J. (Eds.). (2000). "Reservoir stimulation". Chichester, NY: John Wiley & Sons.
- [24] Haimson, B. C. (1989). "Standard test method for determination of the in-situ stress in rock using the hydraulic fracturing method". Annual Book of ASTM Standards, 4, 851-856.
- [25] Ishida, T., 2001. "Acoustic emission monitoring of hydraulic fracturing in laboratory and field". Construct. Build. Mater. 15, 283-295.
- [26] Wang, Y., Li, X., Tang, C., 2016. "Effect of injection rate on hydraulic fracturing in naturally fractured shale formations: a numerical study". Environ. Earth Sci. 75, 935.
- fracturing tectonic stress measurements*". In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 28, No. 4, pp. 285-293). Pergamon.
- [9] Ranjith, P. G., Wanniarachchi, W. A. M., Perera, M. S. A., & Rathnaweera, T. D. (2018). "Investigation of the effect of foam flow rate on foam-based hydraulic fracturing of shale reservoir rocks with natural fractures: An experimental study". Journal of Petroleum Science and Engineering, 169, 518-531.
- [10] Zhang, Y., He, J., Li, X., & Lin, C. (2019). "Experimental study on the supercritical CO₂ fracturing of shale considering anisotropic effects". Journal of Petroleum Science and Engineering, 173, 932-940.
- [11] Ha, S. J., Choo, J., & Yun, T. S. (2018). "Liquid CO₂ Fracturing: Effect of Fluid Permeation on the Breakdown Pressure and Cracking Behavior". Rock Mechanics and Rock Engineering, 51(11), 3407-3420.
- [12] Beugelsdijk, L. J. L., De Pater, C. J., & Sato, K. (2000, January). "Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium. In SPE Asia Pacific conference on integrated modelling for asset management". Society of Petroleum Engineers.
- [13] Weijers, L. (1995). "The near-wellbore geometry of hydraulic fractures initiated from horizontal and deviated wells".
- [14] Hou, P., Gao, F., Gao, Y., Yang, Y., & Cai, C. (2018). "Changes in breakdown pressure and fracture morphology of sandstone induced by nitrogen gas fracturing with different pore pressure distributions". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 109, 84-90.
- [15] Feng, Y., & Gray, K. E. (2017, August). "Modeling near-wellbore hydraulic fracture complexity using coupled pore pressure extended finite element method". In 51st US rock mechanics/geomechanics symposium. American Rock Mechanics Association.
- [16] Gil, I., Nagel, N., Sanchez-Nagel, M., & Damjanac, B. (2011, January). "The effect of operational parameters on hydraulic fracture propagation in naturally fractured reservoirs-getting control of the fracture optimization process". In 45th US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- [17] Nagel, N. B., Gil, I., Sanchez-Nagel, M., & Damjanac, B. (2011, January). "Simulating hydraulic