

بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های محوری و محصورکننده بر شکست هیدرولیکی

مهدی زارعزاده* و هادی شاکری

دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۶

چکیده

شکست هیدرولیکی یک روش تحریک مخزن است که برای افزایش جریان به چاه در سازندهای با تراوایی پایین استفاده می‌شود. در این مقاله، یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی شکست هیدرولیکی با تمرکز بر روی عوامل اصلی مؤثر بر فشار شکست هیدرولیکی، صورت گرفته است. عوامل بررسی شده شامل تنش محوری و تنش محصورکننده است. از سیستم سلول سه محوره شکافت هیدرولیکی که در دانشگاه صنعتی سهند طراحی و ساخته شده است، استفاده گردید و ۳۱ نمونه سنگی شامل نمونه‌های مخزنی (ماسه سنگ آجاجاری، آهک آسماری و آهک سروک) و نمونه‌های غیرمخزنی (ماسه سنگ منطقه ورزقان) مورد آزمایش قرار گرفت. برای بررسی اثر سیال از سیال پایه آبی استفاده گردید برای افزایش ویسکوزیته به آن صمغ زانتان، صمغ گوار و پلیمر افزوده شد تنش محوری در سیستم استفاده شده از بالا و تنش محصورکننده از اطراف به نمونه وارد گردید. جهت شکست به وسیله تنش‌ها (تنش محوری و محصورکننده) تعیین شده است. با افزایش تنش محصورکننده، فشار شکست افزایش و با افزایش تنش محوری، فشار شکست تا تنش محوری ۱۰ مگاپاسکال افزایش و پس از آن کاهش یافت. شروع و گسترش شکست هیدرولیکی متأثر از نفوذپذیری و ویسکوزیته سیال شکست می‌باشد. فشار شکست برای سیال با ویسکوزیته پایین (آب)، کمتر از مقدار آن برای سیال با ویسکوزیته بالا (صمغ زانتان) است.

کلمات کلیدی: شکست هیدرولیکی، تنش محوری، تنش محصورکننده، سیال شکست و نفوذپذیری

مقدمه

عملیات و کنترل این روش انجام شده است. چندین مطالعه آزمایشگاهی بر روی عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی انجام شده است. هایمسون و فیرهرست شکست هیدرولیکی نمونه‌های نفوذپذیر متخلخل در شرایط متفاوت را آزمایش کرده و دریافتند که جهت شکست به وسیله تنش‌های تکتونیک کنترل می‌شود.

پس از اثبات کارایی روش شکست هیدرولیکی به صورت صنعتی توسط شرکت هالیبرتون، این روش برای اولین بار در سال ۱۹۷۴ متداول شد و از آن زمان، تحقیقات و مطالعات زیادی جهت بهبود

یا باعث ایجاد یک شکست جدید شود. آزمایش‌ها بر روی بلوک‌های شکاف‌دار انجام شد و از یک مدل عددی استفاده گردید. در نرخ جریان پایین، تزریق همیشه منجر به جریان سیال در شکاف‌های طبیعی می‌شود. در نرخ جریان بالاتر، شکست‌های جدید می‌تواند گسترش پیدا یابد. نرخ جریان بالا یا ویسکوزیته بالا باعث ایجاد شکست می‌شود، در حالی که نرخ جریان پایین شبکه شکست را باز کرده و فشار شکست کمتر می‌باشد [۴].

گو و همکارانش آزمایشات شکست هیدرولیکی را در بلوک‌های ژئیس با ابعاد $305 \times 305 \times 305$ mm و $610 \times 584 \times 305$ mm، به منظور بررسی اثرات تنش اصلی می‌نیمم و دبی تزریق شکست هیدرولیکی، انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که نرخ گسترش شکست با افزایش تنش اصلی می‌نیمم کاهش می‌یابد. دبی تزریق بالا، باعث افت فشار سریع شده و شکست‌های طولانی‌تری را ایجاد می‌کند. فشار شکست با افزایش دبی تزریق، افزایش یافته و معمولاً بیشتر از آنچه تئوری می‌تواند پیش‌بینی کند، برآورد می‌شود [۵].

بهلولی و دپاتر تأثیر آزمایشگاهی رئولوژی سیال و تنش محصور کننده بر شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. آزمایش شکست هیدرولیکی با تمرکز بر روی مکانیزم‌های شروع و انتشار شکست با استفاده از سیالات تزریق متفاوت در تنش‌های محصورکننده مختلف، انجام شد. در آزمایش از سیستم سلول سه محوره استفاده گردید. یک سری از پارامترهای مطالعه شده شامل تنش محصورکننده، نوع سیال تزریقی و هندسه بخش تزریقی، برای پی بردن به تمایل شکست بر روی ماسه‌های فشرده، انجام شد [۶].

دپاتر و دانگ تأثیر رئولوژی سیال را در نمونه‌های ماسه سنگی بررسی کردند.

فشار شکست حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای سنگ‌های نفوذناپذیر از مقادیر تئوری نتیجه شده، کمتر بود اما برای سنگ‌های نفوذپذیر، مقادیر فشار شکست آزمایشگاهی از مقادیر تئوری بیشتر بودند. به علاوه، با افزایش قطر چاه، فشار شکست کمتر و با افزایش فشار پمپاژ، فشار شکست بیشتر می‌شود [۱].

ماتسونگا و همکارانش آزمایش شکست هیدرولیکی را در مکعب‌های بارگذاری شده گرانیت^۱، ماربل^۲ و آندزیت^۳ به طول ۲۰ cm با سیال شکست آب و نفت انجام دادند. با استفاده از گیرنده‌های صوتی برای آنالیز مکانیزم شکست، آنها به این نتیجه رسیدند که شروع و گسترش شکست هیدرولیکی متأثر از نفوذپذیری و ویسکوزیته سیال می‌باشد [۲].

زنگ و رئوجیرس بررسی آزمایشگاهی تأثیر نرخ تزریق بر رفتار شکست هیدرولیکی یک سازند ماسه سنگی را انجام دادند. سه آزمایش شکست هیدرولیکی کنترل شده با استفاده از نرخ‌های تزریق متفاوت انجام شد. این آزمایش‌ها نشان داد که نرخ تزریق بالاتر، فشار شکست پایین‌تری دارد و مدل‌های الاستیک^۴ و پروالاستیک^۵ قادر به پیش‌بینی فشار شکست نیستند. در آزمایشات انجام شده، شکست هیدرولیکی مشابه با رفتار میدانی با استفاده از نرخ‌های جریان ثابت کنترل گردید. به منظور مقایسه نتایج مشاهده شده با دیگر نرخ‌های فشار ثابت، میزان فشار در آزمایش‌ها با استفاده از نقاط متوسط ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ به ترتیب محاسبه شد. میزان فشار در نرخ تزریق متفاوت، ثابت نیست و در نرخ تزریق بالاتر، تغییرات بیشتری دارد. همچنین این حقیقت وجود دارد که نرخ فشار بالاتر، باعث فشار شکست پائین‌تر می‌شود [۳].

دپاتر و بیوگلسدایک آزمایش و شبیه‌سازی عددی شکست هیدرولیکی در سنگ شکاف‌دار طبیعی را انجام دادند. در سازندهای شکاف‌دار طبیعی، سیال تزریقی می‌تواند در شکاف‌های موجود جریان پیدا کرده

1. Granite
2. Marble
3. Andesite
4. Elastic
5. Poroelastic

ویسکوزیته بالا می‌باشد. سیال با ویسکوزیته پایین می‌تواند به آسانی در شکست نفوذ پیدا کند [۱۰]. در این مقاله با آزمایش‌های انجام شده، به بررسی تنش‌ها بر شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. در این بررسی عواملی مانند تنش محوری و تنش محصورکننده در نظر گرفته می‌شود.

روش کار

سیستم مورد استفاده در این پژوهش، از نوع سلول سه محوره می‌باشد که یک سلول سه محوره واقعی نیست. در سلول سه محوره واقعی، تنش افقی می‌نیمم و ماکزیمم با هم برابر نبوده و نمونه استفاده شده مکعبی می‌باشد. ولی در سلول موجود، تنش افقی می‌نیمم و ماکزیمم برابر بوده و نمونه‌های مورد استفاده استوانه‌ای شکل می‌شود. سیستم تزریق مشابه سیستم سلول سه محوره مکعبی شکل می‌باشد، که از یک سیستم با دبی ثابت استفاده شده است. مهم‌ترین قابلیت این سیستم امکان کاربرد مغزه‌های گرفته شده از مخزن می‌باشد که در سلول سه محوره واقعی نمی‌توان استفاده کرد. از سویی در اکثر مخازن نفتی تنش افقی می‌نیمم و ماکزیمم برابر بوده یا اختلاف کمی با هم دارند. لذا استفاده از این سلول مشکلی ایجاد نمی‌کند. شکل ۱ سلول سه محوره استفاده شده را نشان می‌دهد.

نمونه‌های سنگی دارای قطر NX (۵۴ mm) می‌باشد. برای تزریق سیال به داخل نمونه‌ها، باید حفرازی در آن‌ها ایجاد شود. برای این منظور با استفاده از مته‌های ۸ و ۱۱ mm، نمونه‌ها آماده گردید. در شکل ۲ شماتیکی از نمونه پس از سوراخ‌کاری نشان داده شده است.

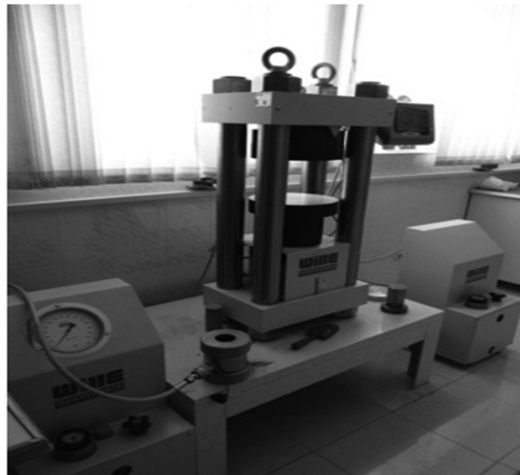
شماتیکی از سیستم شکست هیدرولیکی در شکل ۳ مشاهده می‌شود. اگر سیال شکست آب مقطر باشد، فقط از پمپ HPLC استفاده می‌شود و اگر سیال شکست غیر از آب مقطر باشد از آکومولاتور نیز باید استفاده گردد.

نمونه‌هایی به ابعاد $0.4 \text{ m} \times 0.51 \text{ m}$ و سلول سه محوره به بررسی شکست هیدرولیکی در سنگ‌های نرم پرداختند که برای این منظور از سه سیال نفت ویسکوز، دوغاب بنتونایت و ژل پیوند یافته استفاده کردند. نتایج تحقیقات ایشان نشان می‌دهد که رئولوژی سیال تأثیر زیادی بر شکست دارد، به طوری که هر چه ویسکوزیته سیال شکست بیشتر باشد، باعث افزایش فشار شکست می‌گردد [۷].

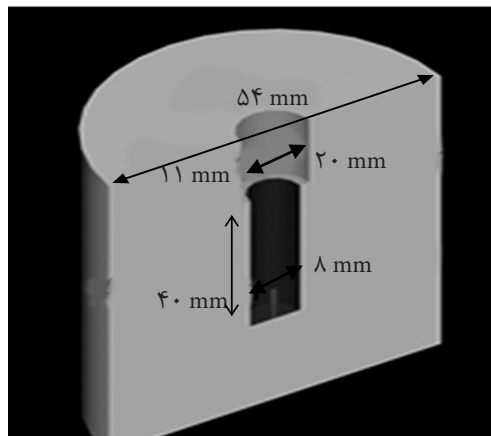
اتهاول و میسکی مینس تست‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را بر روی بلوک‌هایی با همگنی کم و دارای لایه‌بندی ظریف، انجام دادند. طراحی و مشاهدات آزمایشگاهی بر روی دو بلوک آماده شده ابعاد به $11 \times 11 \times 15$ اینچ مرکب لایه‌بندی شده و ابعاد $11 \times 11 \times 11$ اینچ سیمانی همگن انجام شد. پس از بارگذاری بلوک‌ها، سیال زانتان با ویسکوزیته بالا از پمپ در یک سیستم بسته تزریق شده و شکست هیدرولیکی ایجاد می‌شود. در بلوک لایه‌بندی شده، شکست‌های شاخه‌ای و در نمونه سیمانی، شکست صفحه‌ای مشاهده شد [۸].

ژانگ و چن گسترش شکست هیدرولیکی را بررسی کرده. بر اساس مکانیزم شکست و تئوری شکست هیدرولیکی، یک مدل برای مسیر گسترش شکست در طول شکست ارائه دادند که محاسبات تفاوت تنش و تغییر مسیر گسترش شکست را نشان می‌دهد. شکست جدید به تدریج جهت خود را تغییر می‌دهد تا در جهت ماکزیمم تنش افقی قرار گیرد. تفاوت تنش‌ها تأثیر آشکاری بر جهت شکست دارند. مسیرهای پیش‌بینی شده در تطابق با آزمایشات در مقیاس سه محوره می‌باشد [۹].

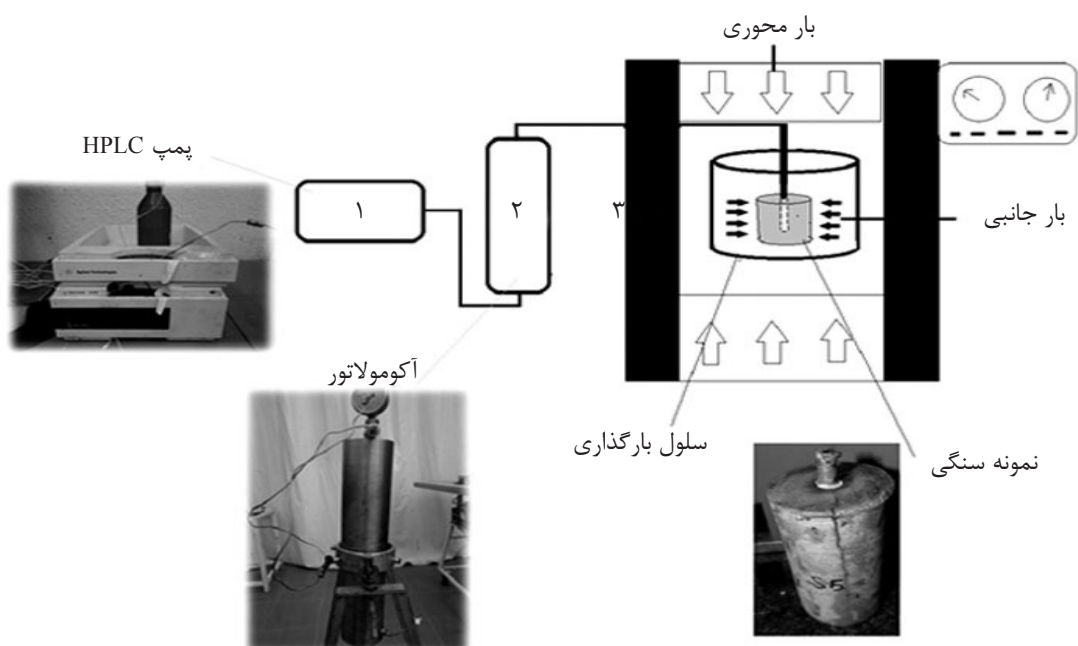
شیمیزو، آنالیز شکست هیدرولیکی در سنگ سخت را با در نظر گرفتن ویسکوزیته سیال و توزیع اندازه ذره بررسی کردند. برای همه نمونه‌ها، جهت شکست هیدرولیکی موازی با جهت ماکزیمم تنش اصلی فشار می‌باشد. فشار شکست برای سیال با ویسکوزیته کم، پایین‌تر از مقدار آن برای سیال با



شکل ۱- سلول سه محوره شکافت هیدرولیکی



شکل ۲- شکل هندسی نمونه آماده شده برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی



شکل ۳- شماتیکی از سیستم تزریق و بارگذاری شکست هیدرولیکی

از آنجایی که درانتهای چاه از پکر یا چسب اپوکسی استفاده نشده است، به نظر می‌رسد که تمرکز تنش در نمونه HS۱۶ در گوشه‌های چاه بیشتر شده و نمونه ابتدا از این محل شکسته شده و سپس در اثر فشار سیال و غلبه پیدا کردن بر مقاومت کششی سنگ، نمونه از وسط شکسته شده است. همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود در نمونه HS۱۵، نمونه از جداره شکسته شده است. به نظر می‌رسد تفاوت بین فشار شکست نمونه‌های HS۱۶ و HS۱۵ به همین علت باشد. در مود I بارگذاری، شکست در راستای ترک اولیه به وجود آمده و رشد کرده است. بنابراین در شکست مود I، فرم گسیختگی هیدرولیکی ایجاد شده به صورت شکست مستقیم می‌باشد.

خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده است.

نتایج و بحث

عوامل متعددی بر شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. مهم‌ترین عامل شکست هیدرولیکی، فشار شکست می‌باشد که در این مقاله عوامل تنش محوری، محصورکننده و ویسکوزیته بر شکست هیدرولیکی بررسی شده است.

سناریوی افزایش تنش محوری

در این سناریو مطابق با جدول ۲ تنش محوری افزایش داده شد.

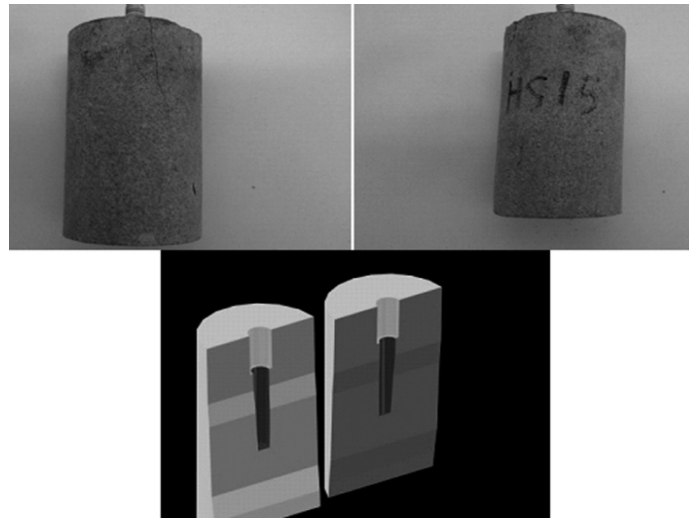
در بخش اول این سناریو از آب و در بخش دوم از زانتان به عنوان سیال شکست استفاده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها

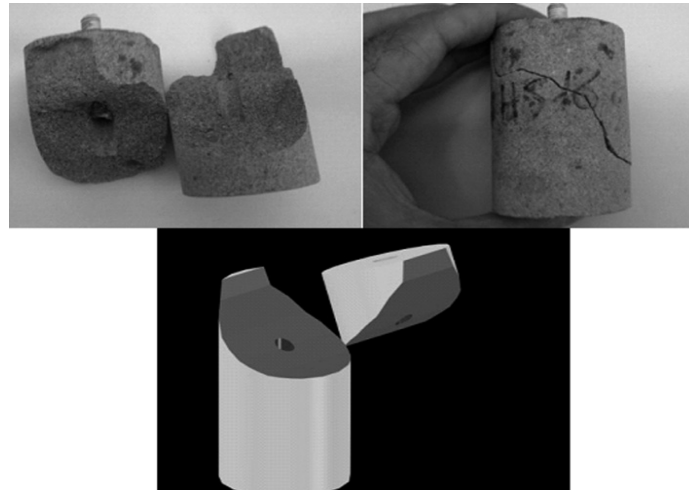
نمونه	علامت اختصاری	نفوذپذیری (md)	تخلخل	مدول یانگ (MPa)	مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
ماسه سنگ منطقه ورزقان نوع دو	HS	۵۴	۱۷	۲۰	۷۹/۲۴
ماسه سنگ منطقه ورزقان نوع یک	S	۶۱	۲۱	۱۹	۶۱/۶
ماسه سنگ آغاچاری	RS	۴۴	۱۴/۹۸	۲۱/۶۶۷	۱۰۶
آهک آسماری	L	۱/۱۹	۲/۱۱	۲۱/۶	۱۲۶
آهک سروک	H	۰/۵۴۳	۱/۶	۳۴/۷۵	۱۲۵

جدول ۲- سناریوی افزایش تنش محوری

شماره نمونه	نوع سیال	تنش محوری (MPa)	تنش محصورکننده (MPa)	اختلاف تنش‌های محوری و محصورکننده (MPa)	فشار شکست (bar)
HS ۱۵	آب	۶	۴	۲	۱۷۴
HS ۱۶	آب	۶	۴	۲	۲۱۰
HS ۱۸	آب	۹	۴	۵	۲۱۲
HS ۱۹	آب	۹	۴	۵	۲۰۸
HS ۲۰	آب	۱۲	۴	۸	۱۸۰
HS ۲۱	آب	۱۲	۴	۸	۲۰۵
HS ۲۲	آب	۱۵	۴	۱۱	۱۰۰
HS ۲۳	آب	۱۵	۴	۱۱	۱۱۵
RS ۱۵	صمغ زانتان	۵	۵	۰	۱۳۵
RS ۱۹	صمغ زانتان	۱۰	۵	۵	۱۵۶
RS ۲۰	صمغ زانتان	۱۵	۵	۱۰	۲۷۰



شکل ۴- شکست نمونه HS15



شکل ۵- شکست نمونه HS16

مود شکست I می‌باشند. نمونه‌هایی که دارای فرم و مود شکست یکسانی هستند، اختلاف فشار شکست آنها با یکدیگر کم می‌باشد، مانند نمونه‌های HS18 و HS19 که دارای مود شکست I می‌باشند و هر دو نمونه از دیواره شکسته شده و اختلاف فشار شکست آنها کم می‌باشد. در نمونه RS15 به دلیل اینکه تنش محوری بر روی نمونه وجود نداشته است، شکست از انتهای چاه و به حالت کششی، سطح مقطع نمونه را قطع کرده است. نمونه‌های RS15 و RS19 دارای مود شکست I می‌باشند و مود شکست نمونه RS20 ترکیبی از I و II می‌باشد. در بخش دوم از سیال شکست صمغ زانتان استفاده شد.

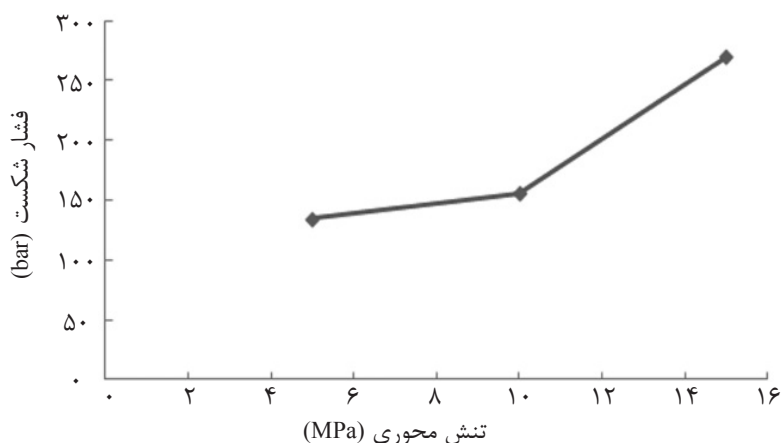
اما در شکست‌هایی که دارای فرم پیچیده‌ای هستند، به دلیل زاویه قرارگیری چاه نسبت به تنش‌های اصلی برجای منطقه و یا زاویه قرارگیری ترک در جداره چاه، رشد گسیختگی هیدرولیکی به واسطه مشارکت نیروهای کششی و برشی ایجاد می‌گردد. در این نمونه‌ها مود شکست III ایجاد نشده است، زیرا در مود شکست III وجوه ترک موازی با جبهه ترک می‌لغزند که در این نمونه‌ها اگر لغزشی وجود داشته در جهت عمود بر جبهه ترک می‌باشد. به عبارت دیگر فرآیند رشد ترک تحت تأثیر همزمان مود I و II بارگذاری می‌باشد [۱۱]. نمونه‌های HS16 و HS21 دارای مود شکست ترکیبی I و II و نمونه‌های HS15، HS18، HS19، HS20، HS22 و HS23 دارای

میکروترک‌ها شروع شده و از سوی دیگر فشار سیال نیز به گسترش آنها کمک می‌کند. بنابراین، در تنش‌های بالاتر از ۱۰ MPa، با فشار سیال کمتری، شکست روی می‌دهد. در حقیقت چون اختلاف تنش محوری و محصورکننده زیاد می‌شود، نمونه‌ها در اختلاف تنش‌های بالا تحت برش می‌شکنند. در مورد سیال صمغ زانتان، وضعیت این‌گونه نیست، که دلیل آن تأثیر ویسکوزیته صمغ زانتان می‌باشد که در سناریوی بررسی ویسکوزیته به آن پرداخته شده است.

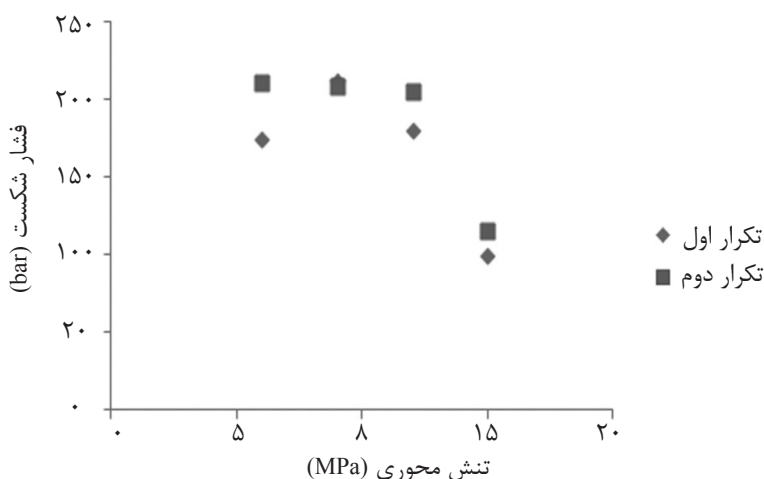
سناریوی افزایش تنش محصورکننده

در این سناریو مطابق با جدول ۳ تنش محصورکننده افزایش داده شد. نمونه‌های S۸، S۱۴ و S۱۵ دارای مود شکست ترکیبی I و II می‌باشند، ولی نمونه S۵ دارای مود شکست I می‌باشد.

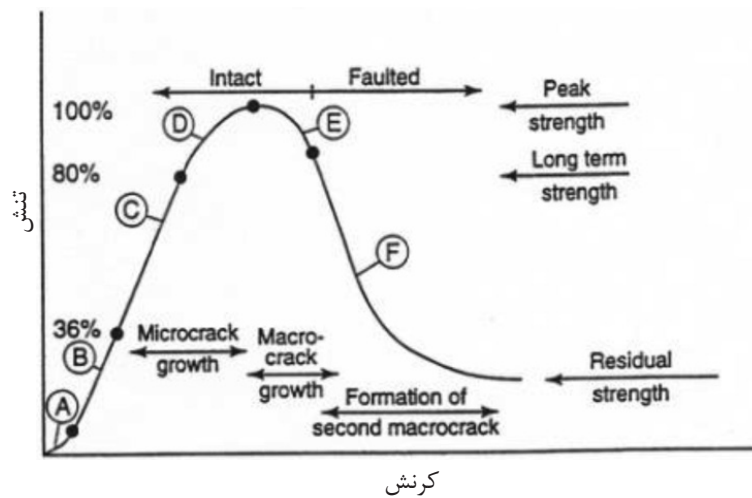
همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با افزایش تنش محوری، فشار شکست افزایش می‌یابد. در مورد نمونه‌های غیرمخزنی با آب، فشار شکست مطابق شکل ۷ افزایش یافته است، ولی از تنش محوری حدود ۱۰ MPa به بعد با افزایش تنش محوری، فشار شکست کاهش یافته است. به نظر می‌رسد، با افزایش تنش محوری، کرنش عرضی (قطری) افزایش می‌یابد، ولی تنش محصورکننده تا حدی جلوی این افزایش قطر را می‌گیرد. زمانی که تنش محوری از یک حدی بالاتر می‌رود، دیگر تنش محصورکننده قادر به مقابله با افزایش کرنش قطری نیست، این افزایش کرنش باعث می‌شود که در داخل سنگ ریزترک‌هایی ایجاد شده و مطابق شکل ۸ (تنش-کرنش) وضعیت سنگ در ناحیه c قرار می‌گیرد. در این ناحیه رشد



شکل ۶- فشار شکست در تنش‌های محوری مختلف (سیال شکست زانتان)



شکل ۷- فشار شکست در تنش‌های محوری مختلف (سیال شکست آب)



شکل ۸- نمودار تنش- کرنش [۱۲]

جدول ۳- سناریوی افزایش تنش محصورکننده

شماره نمونه	نوع سیال	تنش محوری (MPa)	تنش محصورکننده (MPa)	اختلاف تنش‌های محوری و محصورکننده (MPa)	فشار شکست (bar)
S ۵	آب	۱۲	۴	۸	۱۹۸
S ۸	آب	۱۲	۶	۶	۲۲۵
S ۱۴	آب	۱۲	۸	۴	۲۶۲
S ۱۵	آب	۱۲	۱۰	۲	۲۹۰

سناریوی بررسی ویسکوزیته سیال شکست

در این سناریو به بررسی اثر ویسکوزیته سیال بر شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. در اینجا چهار سیال آب، صمغ زانتان، صمغ گوار و پلیمر (XC Polymer) در نظر گرفته شده است.

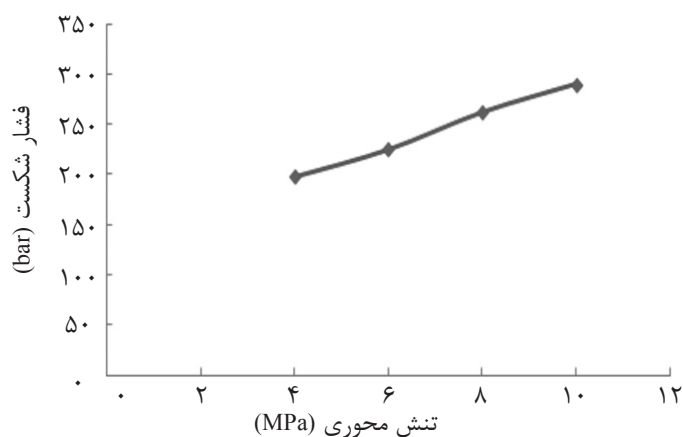
به دلیل تأثیر تنش بر روی نمونه‌ها و فشار شکست، این وضعیت را در شرایط بدون تنش، انجام دادیم. ۱۶ نمونه سنگی از ۴ جنس مختلف، برای بررسی اثر سیال مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۴ نشان داده شده است. ویسکوزیته سیالات با ویسکومتر لوله موئین اندازه گرفته شد که در جدول ۵ ارائه شده است.

با توجه به شکل نمونه‌ها، مود شکست نمونه‌های RS۲، RS۱۷، RS۶، RS۵، L۳، L۴، H۱، H۴، S۲۳، S۱۶، S۲۱ و S۱۳ از نوع I و مود شکست نمونه‌های L۵، L۸، H۲ و H۳ از نوع ترکیبی I و II می‌باشد. سیال شکست یکی از مهم‌ترین اجزاء یک عملیات شکست هیدرولیکی می‌باشد.

وقتی که زاویه ترک نسبت به چاه برابر صفر است، حالت مود I بارگذاری ایجاد می‌شود ($K_{II} = 0$). با افزایش زاویه ترک از صفر علاوه بر بازشدگی ترک، لغزش داخل صفحه‌ای لبه‌های ترک نیز در تغییر فرم ترک به وجود می‌آید. بنابراین هر دو ضریب شدت تنش مود I و مود II در فرآیند شکست هیدرولیکی دخیل هستند [۱۱]. با توجه به شکل ۹ با افزایش تنش محصورکننده در حالی که تنش محوری ثابت می‌باشد، فشار شکست کاهش یافته است، زیرا با افزایش تنش محصورکننده، سیال شکست باید علاوه بر مقاومت کششی سنگ بر تنش محصورکننده نیز غلبه کند. فشار شکست زمانی که چاه عمودی و شکست عمودی باشد، از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$P_b = 2\sigma_H - P + T \quad (1)$$

P فشار منفذی می‌باشد. همان‌طور که در رابطه بالا دیده می‌شود، با افزایش تنش محصورکننده (σ_H)، فشار شکست (P_b) افزایش می‌یابد.



شکل ۹- فشار شکست در تنش‌های محصور کننده مختلف

جدول ۴- سناریوی بررسی ویسکوزیته سیال شکست

شماره نمونه	نوع سیال	فشار شکست (bar)
RS۲	آب	۲۳۰
RS۱۷	صمغ زانتان	۲۸۵
RS۶	صمغ گوار	۲۶۲
RS۵	پلیمر (XC Polymer)	۲۷۰
L۵	آب	۲۷۲
L۳	صمغ زانتان	۳۸۶
L۴	صمغ گوار	۳۳۰
L۸	پلیمر (XC Polymer)	۳۶۴
H۱	آب	۲۵۸
H۲	صمغ زانتان	۳۵۵
H۳	صمغ گوار	۲۹۵
H۴	پلیمر (XC Polymer)	۳۳۲
S۲۳	آب	۸۰
S۱۶	صمغ زانتان	۱۶۸
S۲۱	صمغ گوار	۱۰۰
S۱۳	پلیمر (XC Polymer)	۱۳۵

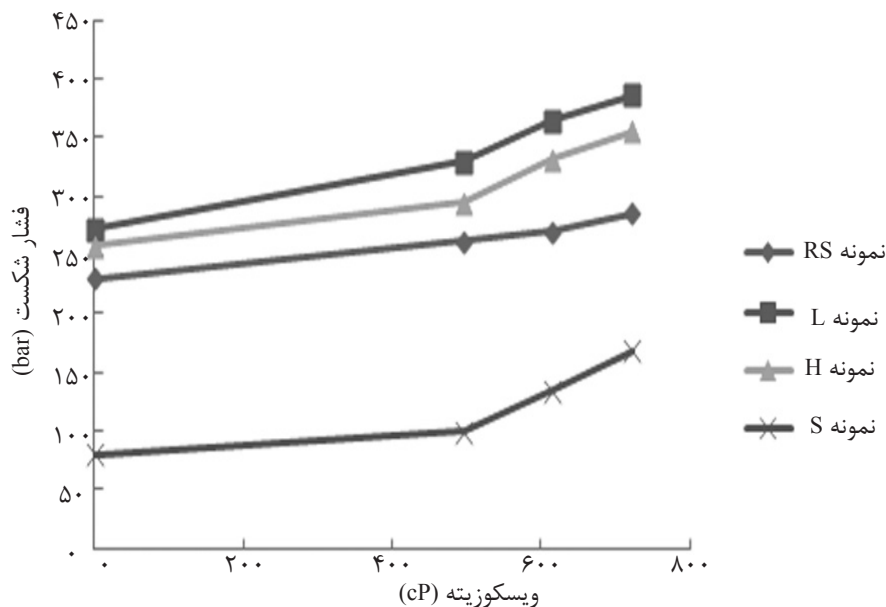
جدول ۵- ویسکوزیته سیالات شکست

نوع سیال	ویسکوزیته (cP)
آب	۱/۰۰۳
صمغ زانتان	۷۲۲
صمغ گوار	۴۹۷
XC Polymer	۶۱۵

منفذی در اطراف چاه می‌شود. یک چنین افزایشی در فشار منفذی باعث می‌شود که تنش مؤثر در اطراف چاه کاهش یافته و باعث ایجاد ریزترک‌ها می‌شود. بنابراین، فشار شروع شکست با ویسکوزیته پائین کمتر از مقدار آن با ویسکوزیته بالا می‌باشد. سیال با ویسکوزیته پایین می‌تواند به آسانی در شکست نفوذ پیدا کند و فشار سیال در سرتاسر سطح شکست اعمال می‌شود. به عبارت دیگر، زمانی که سیال با ویسکوزیته بالا استفاده می‌شود، فشار سیال فقط به بخشی از سطح شکست اعمال می‌شود.

البته با توجه به رابطه ۱، این مطلب نیز قابل اثبات است. هر چه ویسکوزیته سیال کمتر باشد، راحت‌تر در سنگ نفوذ کرده و باعث افزایش فشار منفذی (P) و در نتیجه کاهش فشار شکست می‌شود.

مهم‌ترین اثر سیال باز کردن شکاف، گسترش شکاف و انتقال دادن پروپاننت به درون شکاف می‌باشد. از بین تمام ویژگی‌های گفته شده برای سیال شکست، مهم‌ترین آن ویسکوزیته سیال شکست می‌باشد. سیالات استفاده شده در این پروژه سیالات پایه آبی هستند که برای افزایش ویسکوزیته سیالات به آنها صمغ گوار، صمغ زانتان و پلیمر (XC Polymer) اضافه شده است. از بین این سیالات آب و گوار نیوتنی و زانتان و پلیمر غیرنیوتنی هستند. با توجه به جدول ۵ و شکل ۱۰، دیده می‌شود که بدون در نظر گرفتن نوع سنگ، هر چه ویسکوزیته سیال شکست بیشتر شود، فشار شکست افزایش می‌یابد. سیال شکست با ویسکوزیته پایین به آسانی در سوراخ‌های به هم وصل شده در یک سنگ از دیواره چاه نفوذ پیدا کرده و نفوذ سیال باعث افزایش فشار



شکل ۱۰- فشار شکست در ویسکوزیته سیالات مختلف

افزایش تنش محصورکننده، باعث افزایش فشار شکست می‌شود. زیرا فشار شکست باید علاوه بر مقاومت کششی سنگ، بر تنش محصورکننده نیز غلبه کند.

در مطالعه تأثیر نوع سیال، اثر ویسکوزیته سیال بررسی شد و این نتیجه مشخص گردید که سیال شکست با ویسکوزیته پایین، باعث افزایش فشار

نتیجه‌گیری

با بررسی شرایط افزایش تنش محوری مشخص گردید که تا تنش محوری ۱۰ MPa، افزایش تنش محوری باعث افزایش فشار شکست می‌شود، ولی از تنش محوری ۱۰ MPa به بعد (که این تنش به جنس نمونه و سیال شکست بستگی دارد)، فشار شکست کاهش یافته است.

<p>L: آهک آسماری</p> <p>H: آهک سروک</p> <p>P: فشار منفذی (MPa)</p> <p>T: مقاومت کششی سنگ (MPa)</p> <p>σ_H: تنش افقی (MPa)</p> <p>I: مود شکست نوع یک</p> <p>II: مود شکست نوع دو</p> <p>III: مود شکست نوع سه</p>	<p>منفذی در ناحیه شکست شده و فشار شکست کاهش یافته است. سیال با ویسکوزیته پایین می‌تواند به آسانی در شکست نفوذ پیدا کند و فشار سیال در سرتاسر سطح شکست اعمال می‌شود.</p>
---	---

علائم و نشانه‌ها

HS : ماسه سنگ ورزقان نوع دو
S : ماسه سنگ ورزقان نوع یک
RS : ماسه سنگ آغاچاری

مراجع

- [1]. Haimson B. and Fairhurst C., "Hydraulic fracturing in porous-permeable materials", Journal of Petroleum Technolog, pp. 811-817. 1969.
- [2]. Matsunaga I., Kobayashi H., Sasaki S. and Ishida T., "Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring", Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Abstr., Vol. 30, No. 7, pp. 909-912, 2001.
- [3]. Zeng Z. and Roegiers J., "Modeling of packer influence on hydraulic fracture initiation in laboratory tests", Rock Mechanics in the National Interest, Proc. 38th US Rock Mech. symp. 2002.
- [4]. De pater C. J. and Beugelsdijk L. J. L., "Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock" presented at Alaska Rocks, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics. 2005.
- [5]. Guo F., Morgenstem N. R., and Scott J. D.; "An experimental investigation into hydraulic fracture propagation" Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Abstr., Vol. 30, No.3, 177-188. 2005.
- [6]. Bohlooli B, De pater C. J., "Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: influence of fluid rheology and confining stress", J.Petroleum Science and Engineering .USA. No. 53, 2006.
- [7]. De pater C. J and Dong Y; "Experimental study of hydraulic fracturing in sand as a function of stress and fluid rheology", SPE 105620, Presented at the 2007 SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference held in College Station, Texas. USA. 2007.
- [8]. Athavale A. S. and Miskimins, Laboratory hydraulic fracturing tests on small homogeneous and; aminated blocks, ARMA-08-067, 2008.
- [9]. Zhang. G, Chen M., "Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing", J. Petroleum Science and Engineering .USA. No. 70. 2010.
- [10]. Shimizu. H, Murata. S., and Ishida.T., "The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution", J. Rock Mech. Min. Sci. No. 48. 2011.
- [11]. Ching. Y., Mechanics of hydraulic fracturing, Book, Gulf Publishing Company. 1997.
- [12]. Guo F., Morgenstem N. R. and Scott J. D., "An experimental investigation into hydraulic fracture propagation" Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Abstr., Vol. 30, No. 3, 177-188. 2005.