

## مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی

عباس اکرمی<sup>۱</sup> و مهدی حسینی<sup>۲\*</sup>

۱ و ۲- گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

نویسنده مسئول: meh\_hosseini18@yahoo.com \*

دریافت: ۹۵/۶/۹ پذیرش: ۹۵/۱۰/۵

### چکیده

عملیات شکست هیدرولیکی دو کاربرد عمده و مهم دارد که از آن جمله می‌توان تعیین وضعیت تنش‌های برجای منطقه و افزایش بهره‌وری چاه‌های نفت به وسیله‌ی گسترش شکستگی‌های موجود در منطقه را نام برد. در صنعت نفت به منظور افزایش شاخص تولید و بازیافت از چاه‌هایی که به علت برداشت طولانی مدت، بازده آن‌ها کاهش یافته است یا سنگ‌های اطراف چاه میزان نفوذپذیری کمی دارند، از شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود. در این تحقیق به منظور مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، بر روی سلول سه‌محوری هوک تغییراتی داده شده است، تا برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی مناسب‌سازی گردد. نمونه‌های مورد مطالعه به شکل استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم، دارای قطر خارجی ۵۴/۷ میلی‌متر، قطر داخلی ۱۲ میلی‌متر، و ارتفاع ۱۰۸ میلی‌متر می‌باشد. این نمونه‌ها از سنگ‌های کربناته‌ی مخزن بنگستان واقع در جنوب غربی ایران تهیه شده‌اند. به کمک این سلول می‌توان قبل از انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در سایت، با مدل‌سازی آن در آزمایشگاه پمپ مناسب را انتخاب نمود. در تمام آزمایشات، شکستگی‌های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است. با افزایش تنش جانبی، فشار شکست گمانه نیز افزایش می‌یابد، ولی با تغییر تنش عمودی، فشار شکست تغییر چندانی نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: سلول سه‌محوری هوک، شکست هیدرولیکی، مدل‌سازی آزمایشگاهی

### مقدمه

برای استفاده در سلول‌های سه‌محوری واقعی که قابلیت اعمال دو تنش افقی را دارند مورد استفاده قرار می‌گیرند و نمونه‌های استوانه‌ای در سلول‌های سه‌محوری استفاده می‌شوند که تنش جانبی که توسط روغن اعمال می‌شود در دور تا دور نمونه یکسان می‌باشد. در ادامه تعدادی از مطالعات آزمایشگاهی که در گذشته بر روی عوامل مؤثر بر شکست هیدرولیکی انجام شده است ارائه می‌شود. دانشی<sup>۵</sup>، در سال ۱۹۷۳ مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای سه نوع نمونه با جنس‌های مختلف انجام داد. در این مدل‌سازی، تنش محصورکننده از ۱/۴ تا ۱۷/۲ مگاپاسکال متغیر بوده و فشار آب منفذی وجود نداشت. نمونه‌های مورد آزمایش مکعب مستطیلی‌هایی با ابعاد ۰/۲۵ × ۰/۱۵ × ۰/۱۵ متر بودند که حفره‌ای با قطر ۶/۳ میلی‌متر برای تزریق سیال در آن حفر شده بود. در این مدل‌سازی دو نوع حفره با آزمون‌های صفر و ۷۵ درجه و شیب ۲۴ و ۳۲ در نمونه‌ها ایجاد شد. در نهایت نویسنده سه نوع شکست را شناسایی کرد: شکست محوری، عمودی و مایل نسبت به محور سوراخ [۷].

تکنیک شکست هیدرولیکی بیانگر فرآیند شروع و گسترش شکستگی در سنگ، ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال شده توسط سیال است. این تکنیک توسط کلارک<sup>۱</sup> ابداع شد [۶] و سپس مطالعه روی شروع و گسترش شکست توسط همسون<sup>۲</sup> و فیرهارست<sup>۳</sup> توسعه یافت [۱۱]. هوبرت و ویلیس<sup>۴</sup> مطالعات کاملی را در زمینه مکانیک شکست هیدرولیکی و تعیین جهت و حالت تنش‌های اصلی با استفاده از فرایند شکست هیدرولیکی انجام دادند [۱۳]. از آن زمان، تحقیقات و مطالعات زیادی جهت بهبود عملیات و کنترل این روش انجام شده است. مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی عملیات شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه، نمونه‌های مکعبی یا مکعب مستطیلی یا نمونه‌های استوانه‌ای شکل می‌باشند. نمونه‌های مکعبی یا مکعب مستطیل شکل

<sup>1</sup> Clark

<sup>2</sup> Haimson

<sup>3</sup> Fairhurst

<sup>4</sup> Hubert and Willis

<sup>5</sup> Daneshy

بهلولی و دپاتر<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۰۶ آزمایش‌هایی در آزمایشگاه بخش علوم زمین دانشگاه دلفت هلند برای بررسی تاثیر 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 محصور کننده مختلف، انجام شد. در آزمایش از سلول سه‌محوره استفاده گردید. یک سری از پارامترهای مطالعه شده شامل تنش محصور کننده، نوع سیال تزریقی، برای پی بردن به تمایل شکست بر روی ماسه‌های فشرده، انجام شد [۴].

اتهاول و میسکی مینس<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۰۸ آزمایش‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را بر روی دو بلوک آماده شده انجام دادند. ابعاد دو بلوک به ترتیب  $11 \times 11 \times 15$  اینچ و  $11 \times 11 \times 11$  اینچ می‌باشد. بلوک اول دارای لایه‌بندی و ناهمگن و بلوک دوم همگن و از جنس سیمان است. 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 شده است [۳].

شیمیزو<sup>۱۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱، آنالیز شکست هیدرولیکی در سنگ سخت را با در نظر گرفتن ویسکوزیته سیال و توزیع اندازه ذره بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای همه نمونه‌ها، جهت شکست هیدرولیکی موازی با جهت تنش اصلی ماکزیمم می‌باشد. فشار شکست برای سیال با ویسکوزیته کم، پایین‌تر از مقدار آن برای سیال با ویسکوزیته بالا می‌باشد. سیال با ویسکوزیته پایین می‌تواند به آسانی در شکست نفوذ پیدا کند [۱۷].

ریبرو<sup>۱۳</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۹، به منظور مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، دستگاه سلول بارگذاری سه‌محوره‌ای را که دارای سیستم اعمال فشار داخل گمانه و سیستم ثبت کننده‌ی فشارهای مختلف بود، طراحی کردند. این سلول دارای ظرفیت ۲۱ مگاپاسکال برای بار محوری و  $10/5$  مگاپاسکال برای بار جانبی بود. نمونه‌های

چونگ<sup>۶</sup>، در سال ۱۹۹۰ مدل‌سازی فیزیکی بر روی نمونه‌های مکعبی فاقد شکستگی و نمونه‌های مکعبی دارای شکستگی طبیعی را که از دولومیت‌های نیاگارا تهیه شده بودند، انجام داد. هدف از این مدل‌سازی تعیین میزان تنش‌های برجای منطقه به عنوان تابعی از فشار شکست، فشار انسداد و فشار بازشدگی مجدد با توجه به مقاومت نمونه سنگ بود. این آزمایش‌ها در سلول فشار سه محوره با ظرفیت افقی ۹۰ مگاپاسکال و ظرفیت عمودی ۱۴۰ مگاپاسکال انجام شد [۵].

ماتسوناگا<sup>۷</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۱ آزمایش شکست هیدرولیکی را بر روی مکعب‌هایی از گرانیات، مرمر و آندزیت به ابعاد ۲۰ سانتی‌متر 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 [۱۴].

دپاتر و بیوگلسدایک<sup>۸</sup> در سال ۲۰۰۵ مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در سنگ شکافدار طبیعی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که در نرخ جریان پایین، تزریق همیشه منجر به جریان سیال در شکاف‌های طبیعی می‌شود. در نرخ جریان بالاتر، شکست‌های جدید می‌تواند گسترش یابد. نرخ جریان بالا یا ویسکوزیته بالا باعث ایجاد شکست می‌شود، در حالی که نرخ جریان پایین، شکستگی‌ها را باز کرده و فشار شکست کمتر می‌باشد [۸].

گو<sup>۹</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۵ آزمایشات شکست هیدرولیکی را در بلوک‌های ژئیس با ابعاد  $30.5 \times 30.5 \times 30.5$  میلی‌متر و  $610 \times 584 \times 30.5$  میلی‌متر به منظور بررسی اثرات تنش اصلی مینیمم و دبی تزریق سیال شکست هیدرولیکی، انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نرخ گسترش شکست با افزایش تنش اصلی مینیمم کاهش می‌یابد. دبی تزریق بالا، باعث افت سریع فشار شده و شکست‌های طولانی‌تری را ایجاد می‌کند. فشار شکست با افزایش دبی تزریق، افزایش یافته و معمولاً بیش‌تر از آنچه که در تئوری پیش‌بینی می‌شود، برآورد می‌گردد [۱۰].

<sup>10</sup> Bohloli and De Parter

<sup>11</sup> Athavale and Miskimins

<sup>12</sup> Shimizu

<sup>13</sup> Ribeiro

<sup>6</sup> Cheung

<sup>7</sup> Matsunaga

<sup>8</sup> De Pater and Beugelsdijk

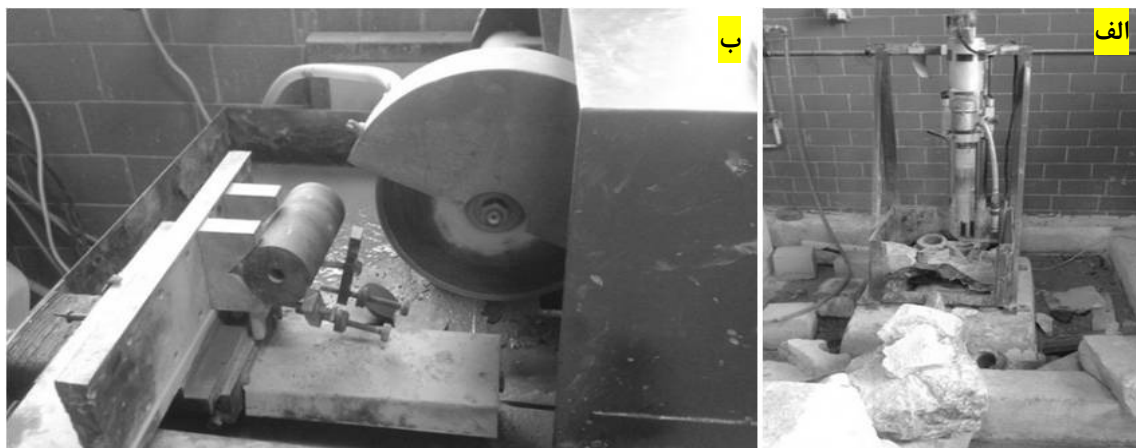
<sup>9</sup> Guo

### نمونه‌های مورد مطالعه

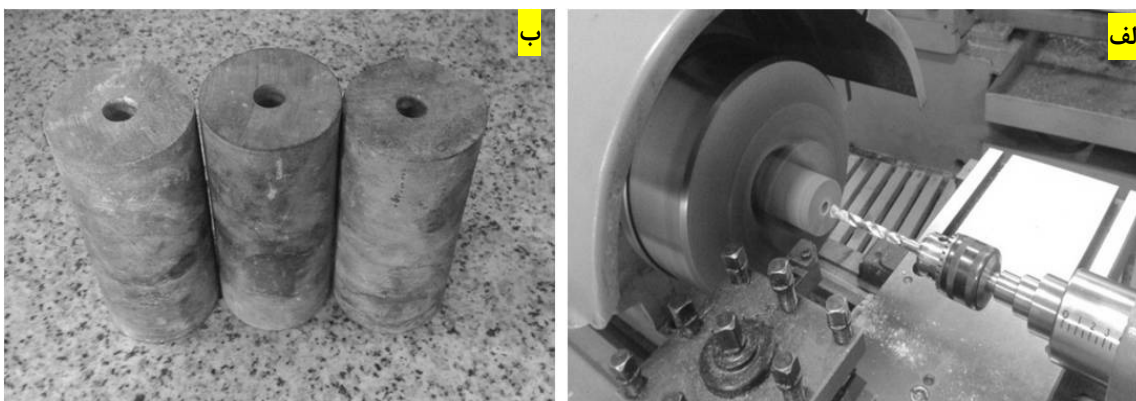
نمونه‌های مورد مطالعه که جنس آن کربناته می‌باشد از یکی از چاه‌های میدان نفتی اهواز واقع در جنوب غرب ایران که جهت تولید نفت از دامنه‌ی جنوبی مخزن بنگستان حفر گردیده، تهیه شده‌اند. ویژگی‌های این نمونه سنگ‌ها در جدول (۱) آورده شده است:

نمونه‌های مطلوب برای آزمایش شکست هیدرولیکی، به صورت استوانه‌ی توخالی جدار ضخیم بوده که قطر خارجی آن  $54/7$  میلی‌متر، ارتفاع آن  $108$  میلی‌متر بوده و دارای حفره‌ای مرکزی به قطر  $12$  میلی‌متر می‌باشد. چون مغزه‌های گرفته شده از چاه  $102$  میلی‌متر قطر داشت و برای آزمایش مناسب نبود نمونه‌ها در یک جعبه قرار داده شد و سپس توسط بتن قالب‌گیری شد بعد از آن مغزه‌های  $54/7$  میلی‌متر تهیه شد. شکل‌های ۱ و ۲ مربوط به مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها می‌باشد.

مورد مطالعه‌ی آن‌ها به صورت مکعبی و از جنس ژئوپس و در مقیاس کوچک  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر بود. نتایج بدست آمده توسط آن‌ها نشان‌دهنده‌ی کارایی مناسب این سلول برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی بود [۱۵]. در ایران در زمینه‌ی مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی به جز پژوهش کیوانی هزه بران و همکاران [۲] و زارع‌زاده و شاکری [۱] کار پژوهشی مهمی انجام نشده است. مروری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد اکثر کارهای آزمایشگاهی که محققین قبلی در دنیا انجام داده‌اند با استفاده از سلول سه‌محوری واقعی است تعداد این سلول‌ها در دنیا بسیار محدود هستند پژوهش حاضر از این لحاظ حائز اهمیت می‌باشد که سلول هوک در اکثر آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ موجود بوده و با اعمال تغییراتی روی این سلول می‌توان قبل از انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در سایت، با مدل‌سازی آن در آزمایشگاه و بدست آوردن فشار لازم برای شکست، پمپ مناسب برای این عملیات را انتخاب نمود.



شکل ۱. الف) حفاری با مته‌ی  $54/7$  میلی‌متری در بلوک، ب) نمونه‌ی استوانه‌ای در حال برش زدن



شکل ۲. الف) حفاری سوراخ مرکزی  $12$  میلی‌متری در مرکز نمونه‌ها، ب) نمونه‌های استوانه‌ای توخالی آماده شده برای آزمایش شکست هیدرولیکی

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه سنگ‌های مورد مطالعه

انرژی شکست (N/m)	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	تخلخل موثر (%)	دانسیته (KN/m <sup>3</sup> )
۲۰	۰/۲۹۴	۳۲/۴۳	۴/۳	۹۴/۲۷	۰/۸۱	۲۰/۹۱

در بر گرفتن نمونه سنگ و اعمال بار جانبی است. این سلول برای نمونه‌هایی با قطر ۵۴/۷ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر که دارای حفره مرکزی به قطر ۱۲ میلی‌متر هستند، مناسب می‌باشد (شکل ۳). برای مناسب سازی سلول برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی دو درپوش طراحی و ساخته شدند که در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرند. از یک درپوش، سیال برای ایجاد فشار هیدرولیکی در حفره مرکزی وارد می‌شود و از درپوش دیگر برای هواگیری حفره مرکزی استفاده می‌شود (شکل ۴).

### تجهیزات مورد استفاده

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

### سلول آزمایش

این سلول که در واقع سلول تغییر یافته‌ی هوک می‌باشد، دارای دو درپوش فولادی، یک غشای انعطاف‌پذیر جهت



شکل ۳. سلول هوک



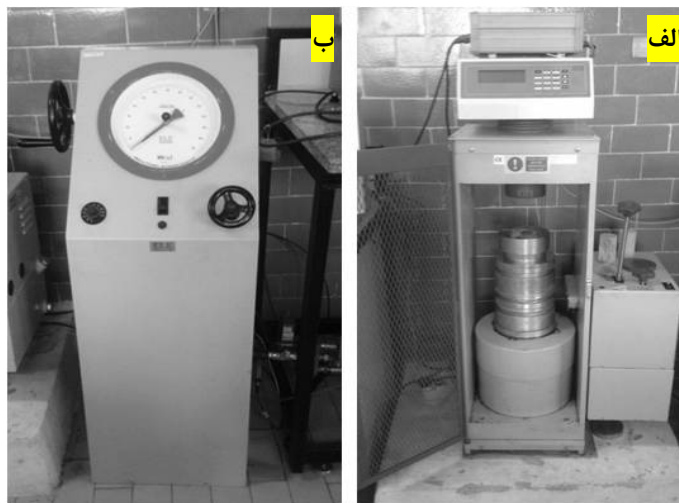
شکل ۴. درپوش‌های ساخته شده برای مناسب‌سازی سلول هوک برای مدل‌سازی آزمایش شکست هیدرولیکی که در بالا و پایین نمونه قرار می‌گیرد.

### پمپ اعمال کننده فشار جانبی

این دستگاه برای اعمال و کنترل فشار جانبی بوده و دارای ظرفیت ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد (شکل ۵ ب). این دستگاه به سلول تغییر یافته‌ی هوک وصل شده و با پمپ کردن روغن به سلول، فشار به غشای انعطاف‌پذیر که در برگرفته‌ی نمونه است، اعمال می‌شود.

### جک اعمال کننده بار محوری

این جک، برقی و دیجیتالی نیمه‌خودکار با ظرفیت KN ۲۰۰۰ با قابلیت محاسبه و ثبت نتایج آزمایش و قابلیت اتصال به رایانه برای نمایش نتایج می‌باشد (شکل ۵ الف).



شکل ۵. الف) جک بارگذاری محوری، ب) پمپ اعمال فشار جانبی

جانبی به اندازه‌ی تنش جانبی اعمال شده در آزمایش شماره ۱ می‌باشد. در واقع این کار به منظور بررسی اثر تنش محوری بر روی فشار شکست انجام می‌شود. برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی، پس از آماده‌سازی نمونه، آن را در سلول آزمایش قرار داده و پس از قرار دادن درپوش‌های بالا و پایین بر روی نمونه، آن را در بین صفحات بارگذاری جک اعمال بار محوری قرار داده و سپس شیرهای فشار جانبی و فشار داخل گمانه به سلول متصل می‌شود. پس از آن تنش محوری و تنش جانبی را به اندازه‌ای که از قبل محاسبه شده بر روی نمونه اعمال می‌شود. پس از اینکه تنش‌های محوری و جانبی به مقدار برنامه‌ریزی شده رسیدند، فشار داخل گمانه به صورت صعودی اعمال می‌شود. این اعمال فشار تا زمانی ادامه دارد که فشار داخل گمانه افت کند. این افت فشار نشان از آن دارد که نمونه داخل سلول شکسته است (فشار ماکزیمم در این آزمایش همان فشار شکست گمانه است). شکل ۶ ب دستگاه آزمایش را در هنگام اجرای یکی از این آزمایشات نشان می‌دهد.



شکل ۶. الف) پمپ اعمال کننده‌ی فشار سیال به داخل گمانه، ب) دستگاه آزمایش در هنگام یکی از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

### پمپ اعمال کننده‌ی فشار به داخل گمانه

این پمپ به یکی از دو صفحه‌ی بارگذاری که بر روی دو طرف نمونه‌ی داخل سلول قرار می‌گیرد، وصل می‌شود. در این تحقیق از روغن تلوس ۴۶ (Tellus 46) به عنوان سیال شکست استفاده شده است (شکل ۶ الف).

### برنامه آزمایش

برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در این تحقیق چهار نمونه از سنگ‌های کربناته‌ی مخزن بنگستان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. این نمونه‌ها تحت تنش‌های محوری و محصور کننده‌ی مختلف قرار داده شده و فشار شکست‌های مختلف برای شرایط مختلف بدست آمده و هندسه‌ی شکستگی‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. مقادیر مختلف تنش جانبی و تنش محوری برنامه‌ریزی شده برای این آزمایشات در جدول (۲) ارائه شده است. در این آزمایش‌ها (سه آزمایش اول) نسبت تنش محوری به تنش جانبی ثابت و به مقدار تقریبی ۳/۵ می‌باشد. در آزمایش شماره ۴ تنش

جدول ۲. شرایط تنش‌های اعمال شده به نمونه‌های استوانه‌ای توخالی

شماره آزمایش	تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)
۱	۱۰/۵	۳
۲	۱۷	۵
۳	۱۹/۲	۶
۴	۱۳/۵	۳

## تحلیل نتایج

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی نمونه‌های شکسته شده در آزمایش‌های ۱ تا ۴ می‌باشند. همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی مشخص شد که شکست هیدرولیکی از لحاظ هندسه‌ی شکست به گونه‌ای است که راستای شکستگی‌ها، اغلب در راستای قائم (راستای محور نمونه) می‌باشد. با توجه به اینکه در این چهار آزمایش تنش محوری اعمال شده بیش‌تر از تنش جانبی اعمالی می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که راستای شکستگی‌ها همواره موازی تنش اصلی ماکزیمم و عمود بر تنش افقی می‌باشد. این موضوع با تئوری‌های ارائه شده توسط هوبرت ویلیس کاملاً همخوانی دارد. هم‌چنین بر اساس معیار گریفیث، در سنگ‌های یکنواخت و همسانگرد، در صورتی که محور گمانه موازی با یکی از تنش‌های اصلی باشد، شکستگی‌های حاصل از شکست هیدرولیکی، موازی با تنش اصلی ماکزیمم و عمود بر تنش افقی گسترش می‌یابد. فشار شکست‌های بدست آمده از این چهار آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش تنش جانبی، فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. در آزمایشات ۱ و ۴ که در آن‌ها تنش جانبی ثابت می‌باشد، علی‌رغم اینکه تفاوت تنش محوری در این دو آزمایش چشمگیر می‌باشد (۳ مگاپاسکال) ولی فشار شکست‌های مربوط به آن‌ها اختلاف ناچیزی با هم دارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فشار شکست حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی اغلب متأثر از تنش جانبی می‌باشد و تنش محوری بر آن تاثیر کمی دارد. نتایج بدست آمده با نتایج محققین قبلی مطابقت دارد به عنوان مثال، ساتوه و یاماگوچی<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۹ به بررسی رابطه‌ی بین فشار شکست و تنش جانبی پرداخته است. این محققین مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای

مصالح مورد استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی انجام دادند. آن‌ها نموداری را ارائه کردند که نمایانگر رابطه بین فشار شکست  $P_f$  و فشار محصور کننده  $\sigma_3$  برای تست‌های شکست هیدرولیکی در مصالح هسته‌ی سدهای خاکی با قطر ذرات مختلف می‌باشد. آن‌ها یک سری روابط خطی بین فشار شکست و تنش جانبی ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد با افزایش تنش جانبی، فشار شکست نیز افزایش می‌یابد [۱۶].

علت افزایش فشار شکست بر اثر افزایش تنش جانبی را با استفاده از توزیع تنش در استوانه‌ی توخالی نیز می‌توان توضیح داد. یک نمونه‌ی استوانه‌ی توخالی که دارای شعاع داخلی  $R_i$ ، شعاع خارجی  $R_o$ ، فشار داخلی یکنواخت  $P_i$ ، فشار جانبی  $P_o$  و نیروی محوری  $F$  می‌باشد در شکل (۹) نشان داده شده است. با استفاده از مختصات استوانه‌ای  $(r, \theta, z)$  تنش‌های  $\sigma_r$  و  $\sigma_\theta$  در هر نقطه با فاصله شعاعی  $(r)$  از مرکز نمونه از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند [۱۲]:

$$\sigma_r = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} - \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_o R_o^2 - P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{(P_o - P_i) R_i^2 R_o^2}{r^2 (R_o^2 - R_i^2)} \quad (2)$$

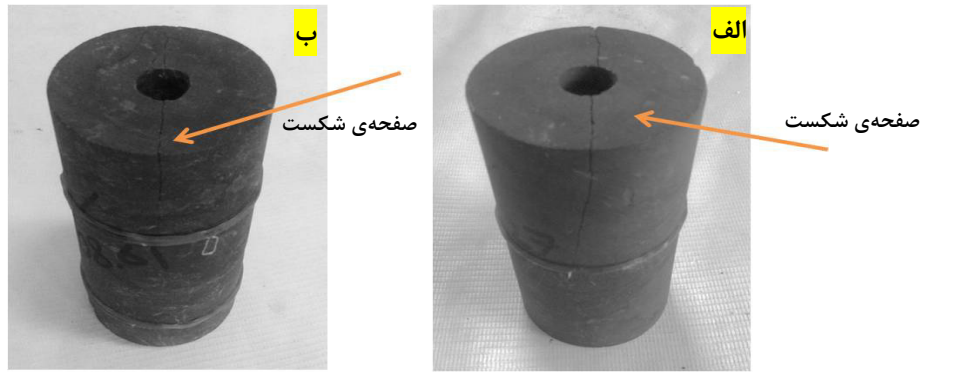
و برای شرایط حاضر تنش محوری  $\sigma_z$  از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$\sigma_z = \frac{F}{\pi (R_o^2 - R_i^2)} - \frac{P_i R_i^2}{R_o^2 - R_i^2} \quad (3)$$

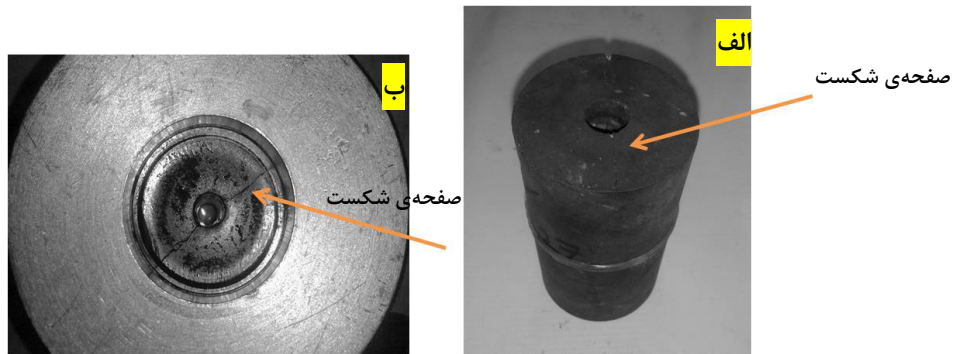
با توجه به رابطه‌ی (۲) می‌توان گفت با افزایش فشار جانبی ( $P_o$ ) تنش مماسی ( $\sigma_\theta$ ) نیز افزایش یافته و بیش‌تر به حالت فشاری تمایل دارد، پس برای اینکه تنش مماسی در جداره‌ی داخلی استوانه به حالت کششی تبدیل شده و جداره بشکند، نیاز به فشار سیال داخل گمانه‌ی بیش‌تری می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود تنش محوری ( $\sigma_z$ ) بر تنش مماسی و در نتیجه فشار شکست تاثیر ندارد.

<sup>1</sup> Satoh & Yamaguchi

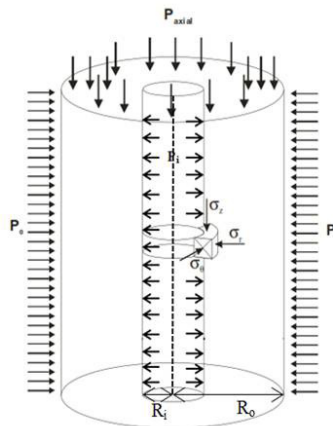




شکل ۷. الف) نمای جانبی نمونه‌ی اول پس از شکست، ب) نمای جانبی نمونه‌ی دوم پس از شکست



شکل ۸. الف) نمای جانبی نمونه‌ی سوم پس از شکست، ب) نمونه‌ی چهارم پس از شکست درون سلول



شکل ۹. نمایی از یک نمونه‌ی استوانه‌ای جدار ضخیم تحت فشار داخلی، فشار جانبی و تنش محوری [۹]

جدول ۳. فشار شکست‌های بدست آمده از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

شماره آزمایش	تنش محوری (MPa)	تنش جانبی (MPa)	فشار شکست (MPa)
۱	۱۰/۵	۳	۸/۴۳
۲	۱۷	۵	۱۵
۳	۱۹/۲	۶	۱۶/۴۹
۴	۱۳/۵	۳	۸/۴۱

از کارایی مناسب این سلول برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی می‌باشد. به کمک این سلول می‌توان قبل از انجام آزمایش شکست هیدرولیکی در سایت، با مدل‌سازی آن در آزمایشگاه، پمپ مناسب را انتخاب نمود.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با طراحی و ساخت قطعاتی، سلول سه‌محوره هوک برای مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی استفاده شده است. نتایج بدست آمده حاکی

- [12] Hoek, E. & Franklin, J. A (1967) A simple triaxial cell for field or laboratory testing of rock, Imperial College of Science and Technology, University of London.
- [13] Hubbert, M. K. and Willis, D.G (1957) Mechanics of hydraulic fracturing, Trans. AIME 210, 153- 166.
- [14] Matsunaga, I., Kobayashi, H., Sasaki, S. and Ishida T (2001) Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission monitoring, Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Abstr., Vol. 30, No.7, 909-912.
- [15] Ribeiro, P.R. de Oliveira e Sousa, J, L, A. Fernandes, P.D. Caldas Leite, V,L (1999) Hydraulic fracturing physical simulation, 15<sup>th</sup> Brazilian congress of mechanical engineering, November 22-26, Sao Paulo.
- [16] Satoh. H, S & Yamaguchi, Y (2009) Laboratory Hydraulic Fracturing Tests For Core Materials Using Large Size Hollow Cylindrical Specimens, The 1st International Symposium on Rockfill Dams.
- [17] Shimizu, H., Murata, S., and Ishida, T (2011) The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution, J. Rock Mech. Min. Sci. No. 48.

در تمام آزمایشات، شکستگی‌های ایجاد شده در راستای قائم (راستای محور نمونه) یا نزدیک به قائم است. با افزایش تنش جانبی، فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. ولی با تغییر تنش محوری فشار شکست تغییر چندانی نمی‌کند.

## منابع

- [۱] زارع‌زاده، م. شاکری، ه (۱۳۹۳) بررسی آزمایشگاهی تاثیر تنش‌های محوری و محصور کننده بر شکست هیدرولیکی، نشریه پژوهش نفت، شماره ۸۱.
- [۲] کیوانی هزه بران، ه. همزبان قراملکی، م، ت. شاکری، ه (۱۳۹۳) مدل‌سازی آزمایشگاهی جهت ترک‌های ایجاد شده به روش شکست هیدرولیکی، پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، انجمن مکانیک سنگ ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- [3] Athavale A. S. and Miskimins (2008) Laboratory hydraulic fracturing tests on small homogeneous and laminated Blocks, ARMA-08-067.
- [4] Bohlooli B, De pater C. J (2006) Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: influence of fluid rheology and confining stress, J.Petroleum Science and Engineering .USA. No. 53.
- [5] Cheung, L.S (1990) Laboratory Simulated Hydraulic Fracturing Stress Measurements in Intact and Prefractured Rocks, Ph.D. dissertation, U. of Wisconsin, Madison, WI.
- [6] Clarck, J.B (1949) A Hydraulic process for increasing the productivity of wells, Petroleum Division Fall Meeting, Dallas, Texas.
- [7] Daneshy, A.A (1973) A Study of Inclined Hydraulic Fractures, Soc. Petroleum Engineers J. 13, No. 2, 61-68.
- [8] De pater, C. J. and Beugelsdijk, L. J. L (2005) Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock, presented at Alaska Rocks, The 40th U.S. Symposium on Rock Mechanics.
- [9] Elkadi, A. & Van Mier, J (2004) Scaled hollow-cylinder tests for studying size effect in fracture processes of concrete, . fracture mechanics of concrete structures, 1, 229-236.
- [10] Guo, F., Morgenstem, N. R., and Scott, J. D (2005) An experimental investigation into hydraulic fracture propagation, Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Abstr., Vol. 30, No.3, 177-188.
- [11] Haimson, B. C. and Fairhurst, C (1967) Initiation and extension of hydraulic fracturing in rocks, Soc. Petrol. Engrs. J. Sept., 310-318.



## Laboratory Modeling of Hydraulic Fracturing

A. Akrami<sup>1</sup> and M. Hosseini<sup>\*2</sup>

1, 2- Dept., of Mining Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin

\*meh\_hosseini18@yahoo.com

Recieved: 2016/8/30 Accepted: 2016/12/25

### Abstract

Hydraulic fracturing has two major applications: 1. determining the in-situ stress state of a site; 2. increasing the productivity of oil wells by propagating the existing fractures at the site. Hydraulic fracturing is used in the oil industry in order to increase the index of production and processing in wells whose efficiency has been dropped due to long-term harvest or the rocks around the well are low permeable. In this study, the Hoek triaxial cell was adapted for a laboratory modeling of hydraulic fracturing. The specimens under study are in the shape of thick-walled hollow cylinders with an external diameter of 54.7 mm, an internal diameter of 12 mm, and a height of 108 mm. These specimens were taken from the carbonate rocks of the Bangestan reservoir, located in the southwest of Iran. By using the cell, the hydraulic fracturing experiment can be modeled in the laboratory before being conducted at the site, so that a suitable pump can be selected. In all the experiments, the fractures are created with a vertical (along the sample axis) or near-vertical orientation. Borehole breakdown pressure increases with an increase in lateral stress but does not change much with a change in vertical stress.

**Keywords:** Hoek triaxial cell, Hydraulic fracturing, Experimental modeling