

## مطالعه آزمایشگاهی بررسی اثر ژئومتری ترک ایجاد شده در دیواره چاه، بر روی فشارشکست هیدرولیکی

صادق حصاری<sup>۱</sup> و مهدی حسینی<sup>۲\*</sup>

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

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

دریافت: ۹۷/۱/۲۵ پذیرش: ۹۷/۶/۱۰

### چکیده

اصطلاح شکست هیدرولیکی بیانگر فرآیند شروع و گسترش ترک در سنگ ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال شده توسط سیال است که روشی برجا برای ارزیابی وضعیت تنش‌های زمین و افزایش بهره‌وری از مخازن نفتی است. در این تحقیق با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، اثر ژئومتری ترک ایجاد شده در دیواره‌ی چاه بر روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی می‌شود. این بررسی از این جهت اهمیت دارد که شرکت‌های مجری عملیات شکست هیدرولیکی همواره سعی بر این دارند که هزینه‌ی ناشی از خرید پمپ را کاهش دهند. از این‌رو بررسی فشار می‌تواند در انتخاب علمی یک پمپ مناسب، مفید واقع شود. برای انجام آزمایش یک سری نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم از گچ با قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر و قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر آماده می‌شود، در این نمونه‌ها ترک‌های مصنوعی ایجاد کرده و اثر طول، ارتفاع و عرض ترک بر روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی می‌شود. این آزمایش را برای چند حالت مختلف انجام داده و در هر سری یکی از پارامترها را تغییر داده و دو پارامتر دیگر ثابت نگه داشته می‌شود و تاثیر هر یک از این پارامترها بر روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی می‌شود. برای ساخت نمونه‌های مصنوعی استوانه‌ای تو خالی قالبی ساخته شد تا این نمونه‌های ترک‌دار آماده شود. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که فشار شکست هیدرولیکی با افزایش طول و ارتفاع ترک، به صورت خطی کاهش می‌یابد و با افزایش عرض ترک، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. همچنین اثر طول ترک بر روی فشار شکست هیدرولیکی بیش‌تر از ارتفاع ترک و آن نیز بیش‌تر از عرض ترک است.

واژه‌های کلیدی: شکست هیدرولیکی، چاه، عرض ترک، طول ترک، ارتفاع ترک

### ۱- مقدمه

تولید و اقتصادی‌تر کردن برداشت محصول در این نوع ساختارها به کار می‌رود (بریر، ۲۰۰۲). بررسی محققین نشان می‌دهد عوامل مختلفی بر روی فشار شکست هیدرولیکی اثر دارند که شامل مدول یانگ (معظمی گودرزی و همکاران، ۱۳۹۳؛ شفاعی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۳)، نسبت پواسن (سیدسجادی، ۱۳۹۱؛ حسن‌پور و چوپانی، ۱۳۸۶؛ معظمی گودرزی و همکاران، ۱۳۹۳)، تخلخل (بداع‌آبادی و همکاران، ۱۳۸۷)، فشار منفذی (برهانی کودهی، ۱۳۹۰)، تنش‌ها (ناصحی و مرتضوی، ۲۰۱۳)، ناهمسانگردی توده سنگ (قربانی، ۱۳۹۴؛ ناصحی و مرتضوی، ۲۰۱۳)، اثر نفوذپذیری و نرخ تزریق (وانگ و همکاران، ۲۰۰۹)، ویسکوزیته سیال (دوپاتر و دانگ، ۲۰۰۷؛ براون و اکنماید، ۱۹۹۲) و درجه حرارت (علی‌پور کله بستی و بهلولی، ۱۳۹۱) می‌شود.

بسیاری از مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری بالا در نقاط مختلف جهان، در حال تمام شدن می‌باشند. از این‌رو، تأمین مواد خام اولیه‌ی مورد نیاز برای مصارف گوناگون صنعتی، از مخازن با نفوذپذیری پایین صورت می‌گیرد. برای بهره‌برداری بهینه از این مخازن، لازم است که عملیات اضافی روی این نوع مخازن صورت گیرد. این عملیات اضافی، افزایش بازده چاه را در پی دارد (آیت‌اللهی و همکاران، ۱۳۹۰). روش‌های گوناگونی برای افزایش بازده چاه‌های نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد که از دید برداشت به روش ایجاد شکاف در دیواره‌ی چاه یکی از این روش‌ها است (ویلکینسون و همکاران، ۲۰۰۶)، و فرآیند شکست هیدرولیکی که در ساختارهای با نفوذپذیری پایین به فراوانی کاربرد دارد از زیرشاخه‌های این روش می‌باشد که برای افزایش نرخ

چقرمگی شکست مود I در استوانه‌ی توخالی جدار ضخیم که در واقع شبیه‌سازی محیط چاه نفت در آزمایشگاه است، پرداخته شده است. نمونه‌ی مورد مطالعه، سنگ مارن تهیه شده از سازند بنگستان واقع در قسمت جنوب و جنوب‌غربی ایران است. برای انجام آزمایش در نمونه‌هایی به قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر، قطر داخلی ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر دو ترک مصنوعی با ابعاد مشخص به صورت متقارن ایجاد شده است. پس از آن نمونه تحت تنش سه‌محوره قرار گرفت و سپس میزان فشار لازم برای گسترش ترک‌های مصنوعی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که فشار شکست با افزایش عرض ترک، به صورت خطی و با افزایش طول ترک، به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد و با افزایش فشار محصورکننده، به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد (سدیفی و حسینی، ۲۰۱۵).

در تحقیق دیگری آیت‌اللهی و همکاران (۱۳۹۰) برای تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف از محل شکاف اولیه‌ی ایجاد شده در دیواره‌ی چاه مدلهایی را ارائه و مورد تحلیل قرار دادند. بدین منظور تعداد زیادی مدل المان محدود برای چاه ترک‌دار، در معرض بارگذاری‌های مختلف، مورد تحلیل قرار گرفته است. هم‌چنین تأثیر پارامترهای مختلف نظیر تنش‌های ساختاری، عمق نسبی ترک اولیه‌ی ایجاد شده در دیواره چاه و نیز زاویه‌ی چاه، بر حداقل فشار لازم برای آغاز و گسترش شکاف، مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی المان محدود عملیات شکست هیدرولیکی توسط نرم‌افزار ABAQUS انجام گردید (آیت‌اللهی و همکاران، ۱۳۹۰).

نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که با افزایش عمق نسبی ترک، فشار لازم برای آغاز شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. این کاهش فشار نرخ کند شونده‌ای دارد، به گونه‌ای که با افزایش عمق نسبی ترک (در نسبت‌های  $a/R$  بیش‌تر از  $1/6$ )، این نسبت تأثیر بسیار کمی بر فشار شکست سیال دارد.

هدف در این تحقیق بررسی اثر ژئومتری ترک (طول، عرض و ارتفاع ترک) بر روی فشار شکست هیدرولیکی می‌باشد. این بررسی از این جهت اهمیت دارد که شرکت‌های مجری عملیات شکست هیدرولیکی همواره سعی بر این دارند که هزینه‌ی اقتصادی ناشی از خرید پمپ را کاهش دهند. از این‌رو بررسی فشار می‌تواند در

در ادامه مطالعات گذشته در مورد اثر ژئومتری ترک ایجاد شده در دیواره‌ی چاه بر روی فشار شکست هیدرولیکی که موضوع این تحقیق می‌باشد ارائه شده است.

چن و ژانگ (۲۰۰۴) برای تعیین چقرمگی شکست هیدرولیکی، نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم از جنس سنگ و سیمان با دو پیش ترک متقارن را آماده کردند. رابطه میان تنش موجود در نوک ترک و عرض شکستگی نشان داده شده که رابطه‌ی قدرتمندی بین آن‌ها وجود دارد. کاهش شدید با شیب زیاد تا تقریباً  $0/8$  میلی‌متر ادامه دارد. از این‌رو رابطه‌ی نزدیکی بین فشار شکست و عرض شکستگی وجود دارد به عبارت دیگر با تغییر عرض شکستگی میزان فشار شکست نیز تغییر می‌کند. میزان فشار شکستگی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در بیش‌تر از  $0/8$  میلی‌متر کاهش نیز می‌یابد (چن و ژانگ، ۲۰۰۴).

در مطالعه موبین و همکاران، آن‌ها دو نمونه سنگ که شامل شیل آنتریم و سنگ‌آهک می‌شوند را، مورد آزمایش قرار دادند. نمونه‌ها با حفر سوراخی به قطر  $12/7-10/16$  میلی‌متر در مرکز هر نمونه که قطر خارجی آن‌ها بین  $8/5-8/8$  میلی‌متر است، آماده شدند. قبل از آزمایش دو ترک شعاعی در نمونه‌ها ایجاد شده است نتایج نشان می‌دهد نمونه‌ها از قسمت ترک‌های اولیه و در امتداد محور گمانه شروع به شکست کردند. نمونه‌ها بعد از افت فشار سیال در گمانه‌ها، می‌شکنند و به دو قسمت تقسیم می‌شوند (موبین و کیم، ۱۹۸۵).

در مطالعه‌ی دیگری برن و همکاران (۲۰۱۳) آزمون‌های آزمایشگاهی را برای حالتی که گمانه بدون پوشش است و حالتی که گمانه پوشش دارد بر روی ۶ نوع سنگ مختلف انجام دادند و با استفاده از انتشار آوایی به تعیین فرایندهای شکست در نمونه‌ها پرداختند. برای انجام آزمایش، نمونه‌هایی که دارای قطرهای ۴۰ یا ۶۲ میلی‌متر است، استفاده شده است. نتایج نشان داد فشار تزریق بحرانی برای رشد شکستگی با افزایش طول ترک کاهش می‌یابد (برن و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعه آزمایشگاهی دیگری نیز توسط سدیفی و حسینی انجام گرفته است. در این تحقیق با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی به بررسی سه پارامتر مهم شامل طول، عرض ترک و نیز فشار محصورکننده بر روی فشار شکست و

روی آن‌ها انجام گرفته است. دستگاه برش و ساب با تیغی برش و تیغی مخصوص ساب در شکل (۱) نشان داده شده است.

### ۳- مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی اثر ژئومتری ترک ایجاد شده در دیواره چاه بر روی فشار شکست هیدرولیکی

در این بخش، ابتدا مراحل آماده‌سازی و ساخت نمونه‌های گچی استوانه‌ای توخالی ترک‌دار با استفاده از قالب مخصوص طراحی شده شرح داده می‌شود. سپس وسایل مورد استفاده در این تحقیق که از چهار بخش، شامل: سلول آزمایش، جک اعمال کننده بار محوری، پمپ اعمال کننده فشار محصورکننده و پمپ اعمال کننده فشار داخلی گمانه تشکیل شده است، توضیح داده می‌شود. در ادامه برنامه‌ی کلی آزمایش به صورت یک جدول ارائه شده است و برنامه‌ی آزمایش برای بررسی اثر عرض، طول و ارتفاع ترک به صورت جداگانه شرح داده شده است. همچنین نحوه‌ی انجام آزمایش به همراه شکل‌های مربوطه و در آخر این بخش تصویری از نمونه‌های شکسته شده گچی و بتنی ارائه شده است. در آخر این بخش نیز نتایج آزمایش که شامل نتایج حاصل از بررسی اثر عرض، طول و ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی می‌باشد، ارائه شده است.

#### ۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، برای تهیه‌ی نمونه‌های گچی نسبت اختلاط گچ به آب، پنج به سه در نظر گرفته شده است. نمونه‌ی مطلوب برای این آزمایش، نمونه‌ی استوانه‌ای با قطر ۷۳ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد که در مرکز آن حفره‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر وجود دارد. در مرکز نمونه و چسبیده به جدار حفره‌ی مرکزی، ترک با عرض، طول و ارتفاع مشخص وجود دارد. برای تهیه‌ی چنین نمونه‌ای از یک قالب مخصوص، که یک میله در مرکز آن برای ایجاد حفره‌ی مرکزی وجود دارد، استفاده شده است. در سطح میله و در قسمت مرکزی ارتفاع آن، محلی برای ایجاد ترک مصنوعی با استفاده از تیغه‌های مخصوص، تعبیه شده است. در شکل (۲) نمای بیرونی و

انتخاب علمی یک پمپ مناسب، مفید واقع شود. برای ساخت نمونه‌های مصنوعی استوانه‌ای توخالی قالبی ساخته شد تا این نمونه‌های ترک‌دار آماده شود. در ایران تاکنون پژوهش آزمایشگاهی با این شرایط در خصوص اثر ژئومتری ترک روی فشار شکست هیدرولیکی انجام نشده است.

#### ۲- نمونه مورد آزمایش

این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های گچی انجام شده است. برای تهیه‌ی نمونه‌های گچی، نسبت اختلاط گچ به آب، پنج به سه در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، آزمون‌های مطابق با استانداردهای 'ISRM بر روی آن‌ها انجام شد (انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، ۲۰۰۷).

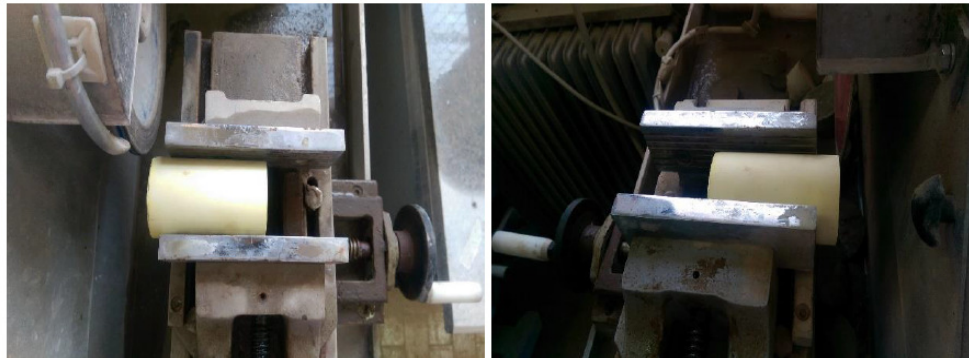
چگالی نمونه‌های تهیه شده در این تحقیق ۱/۲۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمده است.

در این تحقیق آزمایش‌های تراکم تک‌محوره، سه‌محوره، برزیلی و خمش سه‌نقطه‌ای به ترتیب برای تعیین مقاومت تراکم تک‌محوره و ثابت‌های الاستیک مانند مدول یانگ و نسبت پواسون، خصوصیات مقاومتی سنگ (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، مقاومت کششی و چقرمگی شکست مود I انجام شده است. میانگین نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است.

برای تهیه‌ی نمونه‌ها، گچ پس از اختلاط با آب به نسبت گفته شده، در قالب مخصوص ریخته شده و بعد از حدود ده دقیقه که سفت شد از قالب خارج می‌گردد. لازم به ذکر است زمانی که مخلوط گچ و آب داخل قالب ریخته می‌شود، توسط ضربه آن‌ها را به خوبی متراکم می‌کنیم. این کار توسط چوبی نازک در این تحقیق انجام شده است. در مرحله‌ی بعد بایستی نمونه‌ی استوانه‌ای توپر آماده شده در ابعاد مناسب برش داده شود تا نمونه‌ای مطلوب حاصل گردد. آخرین مرحله برای آماده‌سازی نمونه‌ی استوانه‌ای توپر، ساب و صیقل می‌باشد. برای این کار نیز نمونه در دستگاه برش قرار گرفته اما به جای استفاده از تیغی برش، از تیغی مخصوص ساب استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که کلیه‌ی اندازه‌گیری‌ها با کولیس با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر انجام می‌شود. در این تحقیق، هفت روز پس از قالب‌ریزی نمونه‌ها آزمایش بر

در شکل (۳)، تصویر شماتیکی از طول ترک (X)، عرض ترک (Y) و ارتفاع ترک (Z) نشان داده شده است.

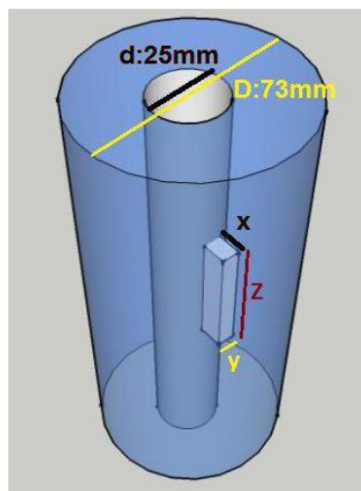
درونی قالب و محل تعبیه شده برای ایجاد ترک مصنوعی نشان داده شده است.



شکل ۱. دستگاه برش با تیغه‌ی برش و تیغه‌ی ساب



شکل ۲. نمای بیرونی و درونی قالب و محل تعبیه شده برای ایجاد ترک مصنوعی



شکل ۳. نمایی از نمونه و مشخص بودن طول، عرض و ارتفاع ترک

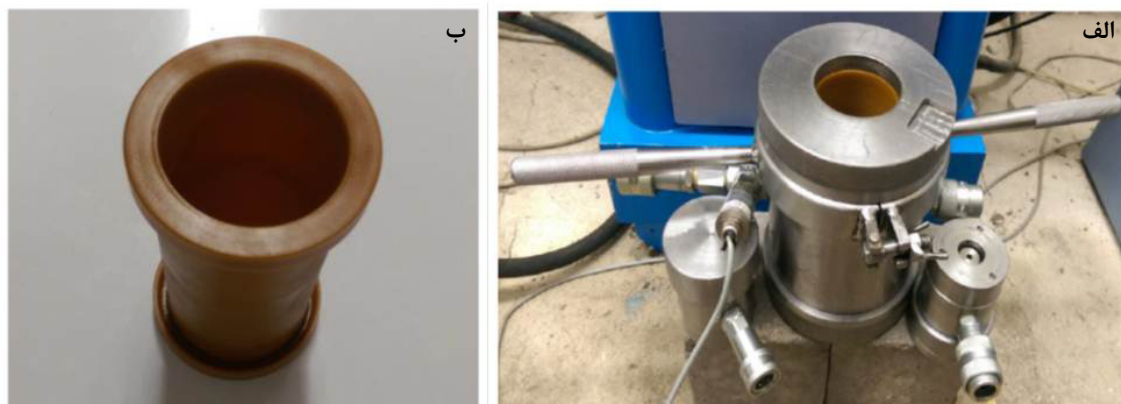
جدول ۱. میانگین خواص مکانیکی نمونه‌های سنگ

مقاومت تراکم تک‌محوری (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	نسبت پواسون	چسبندگی (مگاپاسکال)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	چقرمگی شکست مود I (مگاپاسکال در جذر متر)
۲۰/۷۴	۷/۴۶	۰/۲۳	۵/۱۶	۲۹/۲۷	۳/۵۷	۰/۳۶۶

## ۳-۲- وسایل آزمایش

وسایل مورد استفاده که از چهار بخش، شامل: سلول آزمایش، جک اعمال‌کننده بار محوری، پمپ اعمال‌کننده فشار محصورکننده و پمپ اعمال‌کننده فشار داخلی گمانه تشکیل شده است به ترتیب توضیح داده می‌شود. با توجه به اینکه سلول هوک برای آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای توپر با قطر ۵۴ میلی‌متر ساخته شده است و همچنین امکان اعمال فشار سیال داخل گمانه نیز در آن وجود ندارد در نتیجه برای انجام آزمایش‌ها سلولی جدید با ابعاد بزرگ‌تر که بر اساس طرح سلول هوک بود و قطعاتی به آن اضافه شده بود ساخته شد که تحت عنوان سلول تغییر یافته‌ی هوک نام‌گذاری شد. این سلول

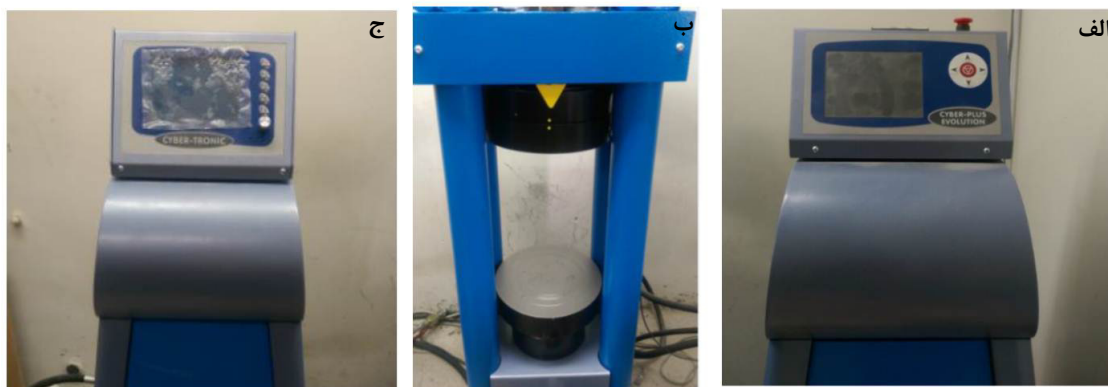
برای نمونه‌هایی با قطر خارجی ۷۳ میلی‌متر که دارای گمانه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر در وسط خود می‌باشند، طراحی شده است. همچنین ارتفاع مناسب برای نمونه‌هایی که در داخل این سلول قرار می‌گیرند، ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. این سلول دارای دو صفحه‌ی بارگذاری، یک غشای انعطاف‌پذیر جهت در بر گرفتن نمونه و اعمال فشار محصورکننده است. این سلول مجهز به سنسورهای است که مقدار فشار محصورکننده را اندازه‌گیری کرده و با وصل شدن به دستگاه ثبت داده‌ها، مقدار آن‌ها را در رایانه ذخیره می‌کند. در شکل ۴ الف سلول تغییر یافته‌ی به همراه صفحات بارگذاری و در شکل ۴ ب غشای انعطاف‌پذیر نشان داده است.



شکل ۴. الف) سلول تغییر یافته‌ی هوک به همراه صفحات بارگذاری، ب) غشای انعطاف‌پذیر

بار محوری در این آزمایش، توسط جک بارگذاری کمپانی Matest ایتالیا مدل C089PM با قابلیت بارگذاری ۲۰۰۰ کیلونیوتن اعمال می‌گردد. سیستم کنترل جک بارگذاری، سیستم Cyber Plus Evolution می‌باشد. این دستگاه به دستگاه ثبت داده‌ها متصل بوده و نرخ بارگذاری را در رایانه ذخیره می‌کند. عملکرد این دستگاه بدین صورت است که قبل از شروع آزمایش، بار بسیار کمی برای برقراری درگیری کامل بین نمونه و صفحات بارگذاری، اعمال می‌شود. در مرحله‌ی بعد، با توجه به برنامه‌ریزی که در سیستم کنترل دستگاه انجام شده است، بار

محوری هم‌زمان با اعمال فشار محصورکننده اعمال می‌گردد (شکل ۵ الف و ب). توسط دستگاه سرو کنترل ساخت شرکت Matest ایتالیا فشار محصورکننده به نمونه اعمال می‌گردد. سیستم کنترل، سیستم Cyber Tronic مدل Servo Plus می‌باشد. این دستگاه دارای ظرفیت ۶۰ مگاپاسکال می‌باشد که در شکل ۵ ج نشان داده شده است. این دستگاه به سلول تغییر یافته‌ی هوک وصل شده و با پمپ کردن روغن به سلول و هواگیری آن، فشار محصورکننده به غشای انعطاف‌پذیر که در برگزیده‌ی نمونه است، اعمال می‌گردد.



شکل ۵. الف) نمای دستگاه اعمال کننده بار محوری، ب) صفحات بارگذاری، ج) پمپ اعمال کننده فشار محصورکننده

پمپ اعمال کننده فشار داخلی به داخل گمانه پمپ می‌شود، خارج نگردد و بتوان عملیات صحرائی شکست هیدرولیکی را در آزمایش به صورت مطلوب شبیه‌سازی نمود. در شکل ۶ ب صفحات بارگذاری و کفپوش‌ها نشان داده شده است.

پمپ اعمال کننده فشار داخل گمانه که در شکل ۶ الف نشان داده شده است به یکی از دو صفحه‌ی بارگذاری وصل می‌شود. این دو صفحه‌ی بارگذاری با استفاده از دو کفپوش طراحی شده، بر روی دو طرف نمونه که در داخل سلول است، قرار می‌گیرد. کفپوش‌ها دارای دو عدد O-Ring می‌باشند که باعث می‌شود روغنی که توسط



شکل ۶. الف) پمپ اعمال کننده فشار داخلی گمانه، ب) کفپوش‌ها و صفحات بارگذاری طراحی شده

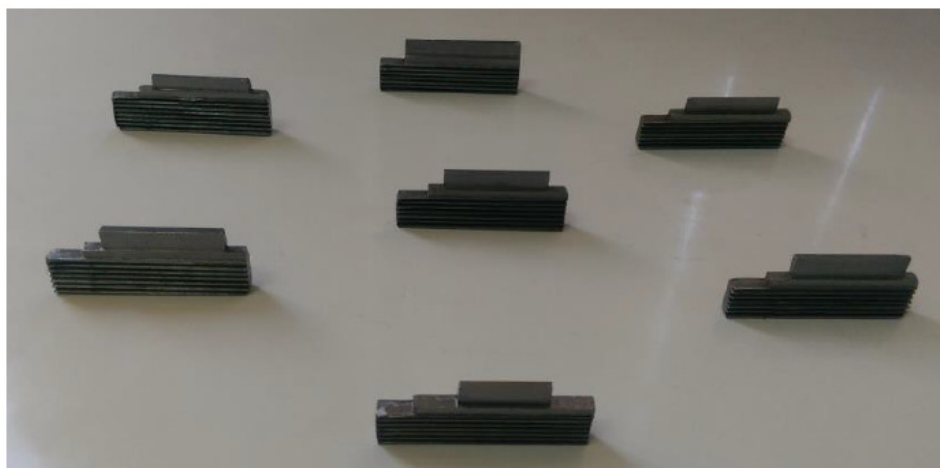
برنامه‌ی آزمایش شامل بررسی اثر عرض ترک، طول ترک و ارتفاع ترک ایجاد شده در استوانه‌ی توخالی جدار ضخیم، بر روی فشار شکست هیدرولیکی می‌باشد که در ادامه به شرح هر یک از پارامترهای ذکر شده پرداخته شده است. در شکل ۷ نمایی کلی از تیغه‌های طراحی شده برای ایجاد ترک مصنوعی در استوانه‌ی توخالی نشان داده شده است.

### ۳-۳- برنامه آزمایش

به‌طور کلی برنامه‌ی آزمایش شامل هفت آزمایش اصلی می‌باشد. در آزمایش‌ها برای بررسی اثر یک پارامتر بر روی فشار شکست هیدرولیکی، دیگر پارامترها را ثابت در نظر گرفته و تنها پارامتر مدنظر تغییر داده می‌شود. اندازه‌ی ترک‌ها بر اساس مطالعات محققین قبلی انتخاب شده است. در جدول (۲) برنامه‌ی کلی آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول ۲. برنامه‌ی کلی آزمایش‌ها

پارامتر متغیر	مقدار حداقل (mm)	مقدار میانی (mm)	مقدار حداکثر (mm)
عرض ترک	۱	۲	۳
طول ترک	۴	۵	۶
ارتفاع ترک	۲۰	۳۰	۴۰



شکل ۷. نمای کلی از تیغه‌های طراحی شده برای ایجاد ترک مصنوعی

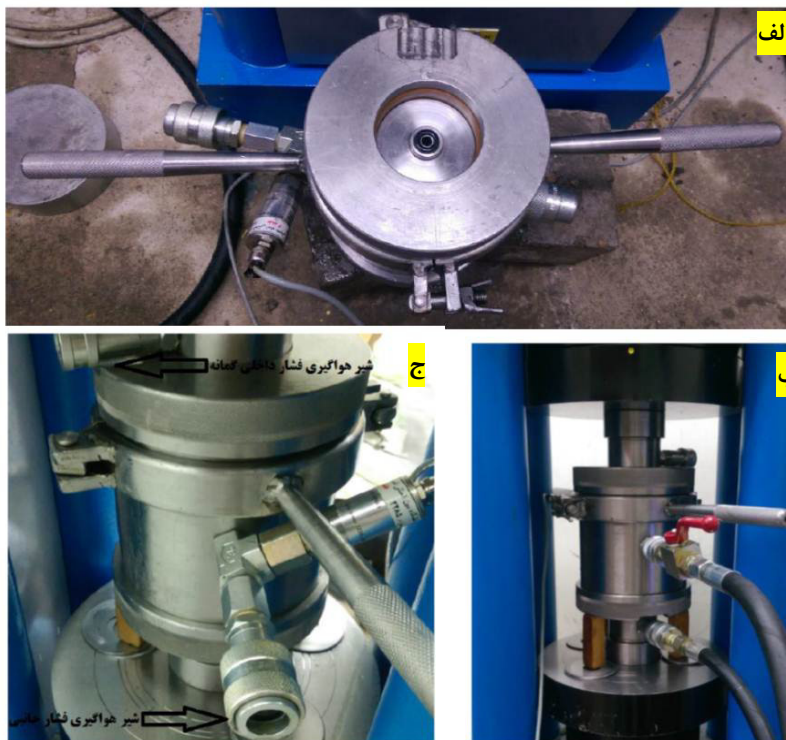
#### ۳-۴- نحوه انجام آزمایش

پس از آماده‌سازی نمونه، سر و ته نمونه توسط کف‌پوش‌ها پوشیده شده و داخل غشا انعطاف‌پذیر جاگذاری می‌شود سپس غشا به همراه نمونه داخل سلول تغییر یافته‌ی هوک قرار داده می‌شود (شکل ۸ الف).

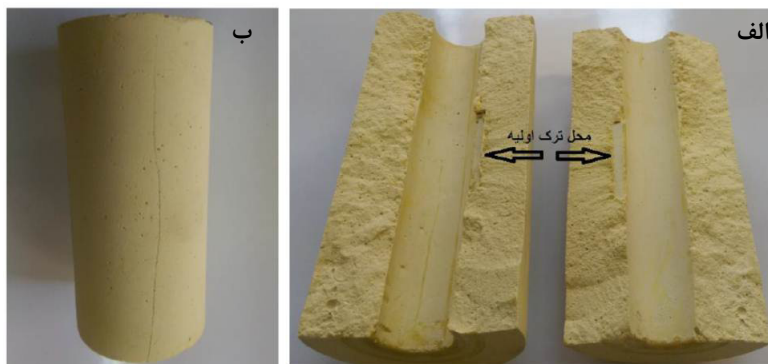
حال صفحه‌ی بارگذاری را روی مرکز صفحه‌ی بارگذاری پایینی قرار داده و چهار تکه چوب نیز با فواصل مشخص روی صفحه‌ی بارگذاری قرار داده می‌شود و سلول بر روی صفحه‌ی بارگذاری سوار می‌شود. در صورتی که این چوب‌ها نباشند، ممکن است سلول کج شده و بر روی شیرهای ورودی بیفتد و آسیب بزند. حال نوبت به اتصال شیر فشار محصورکننده و شیر فشار داخلی گمانه می‌رسد. شیر فشار محصورکننده به سلول تغییر یافته‌ی هوک و شیر فشار داخلی گمانه به صفحه‌ی بارگذاری پایینی وصل می‌گردد. در مرحله‌ی بعد صفحه‌ی بارگذاری بالایی قرار می‌گیرد (شکل ۸ ب).

حال نوبت به باردهی به دستگاه می‌رسد. بار محوری قابلیت برنامه‌ریزی و مرحله‌بندی را دارد که با نرخ معین ۰/۱ کیلونیوتن بر ثانیه بار به مقدار معینی می‌رسد و سپس با توجه به زمان مشخص شده ثابت باقی می‌ماند. با توجه به امکانات آزمایشگاهی برای این نمونه مقدار بار

۱۱۰۰۰ نیوتن بر سطح مقطعی به مساحت ۳۶۹۴/۵ میلی‌متر مربع اعمال می‌شود که برابر با تنش محوری ۳ مگاپاسکال می‌باشد. پس از ثابت شدن سلول تغییر یافته‌ی هوک در زیر جک بارگذاری و رسیدن بار محوری به ۱۱ کیلونیوتن، فشار محصورکننده ۱/۵ مگاپاسکال بر نمونه وارد می‌شود. پس از اعمال و ثابت شدن بار محوری و فشار محصورکننده، 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 در داخل سلول شکسته است (فشار ماکزیمم در این آزمایش همان فشار شکست نمونه است). در طول آزمایش دو بار هواگیری انجام می‌شود. یک‌بار بلافاصله بعد از اعمال فشار محصورکننده و یک‌بار بلافاصله بعد از اعمال فشار داخلی گمانه که در این مراحل هواگیری به ترتیب از سلول تغییر یافته‌ی هوک و صفحه‌ی بارگذاری بالایی انجام می‌گیرد. در شکل ۸ ج محل‌های هواگیری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹ تصویری از نمونه‌های شکسته شده گچی که ترک در امتداد شکاف اولیه گسترش یافته است را مشاهده می‌کنید.



شکل ۸. الف) غشا دربرگیرنده نمونه در داخل سلول تغییر یافته‌ی هوک، ب) سلول آماده انجام آزمایش، ج) محل‌های هواگیری



شکل ۹. الف) نمونه‌ی شکسته شده گچی به صورت باز شده، ب) نمونه‌ی شکسته شده گچی

### ۳-۵- نتایج آزمایش

برای حصول اطمینان بیش‌تر از صحت نتایج آزمایش، برای هر کدام از هفت تیغه‌ی طراحی شده، دو نمونه تهیه و آزمایش شده است و سپس میانگین نتایج به‌دست آمده به عنوان نتیجه‌ی آزمایش در نظر گرفته شده است. لازم به‌ذکر است که دو نمونه نیز بدون ترک تهیه و آزمایش شده است. در ادامه به طور جداگانه نتایج مربوط به اثر عرض، طول و ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی ارائه شده است. در تمامی آزمایشات تنش محوری ۳ مگاپاسکال و فشار محصورکننده ۱/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

### ۳-۵-۱- نتایج مربوط به اثر عرض ترک ایجاد شده

#### روی فشار شکست هیدرولیکی

نتایج اثر عرض ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم گچ در جدول (۳) ارائه شده است.

### ۳-۵-۲- نتایج مربوط به اثر طول ترک ایجاد شده

#### روی فشار شکست هیدرولیکی

نتایج اثر طول ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های استوانه‌ای تو خالی جدار ضخیم گچ در جدول (۴) ارائه شده است.



### ۳-۵-۳- نتایج مربوط به اثر ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی

نتایج اثر ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم گچ در جدول (۵) ارائه شده است. هم‌چنین همان‌طور که ذکر شد، دو نمونه‌ی استوانه‌ای توخالی گچی بدون ترک

نیز ساخته و آزمایش بر روی آن‌ها انجام شد که مقدار فشار شکست میانگین برابر ۱۲/۹۳۷ مگاپاسکال به‌دست آمد. بدیهی است که به علت نداشتن ترک مصنوعی مقادیر فشار شکست به‌دست آمده از این دو نمونه، بیش‌تر از سایر نمونه‌هایی است که در آن‌ها ترک مصنوعی ایجاد شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از بررسی اثر عرض ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی

عرض ترک (mm)	طول ترک (mm)	ارتفاع ترک (mm)	فشار شکست (MPa)	میانگین
۱	۵	۳۰	۱۱/۸۳۸ ۱۱/۵۹۶	۱۱/۷۱۷
۲	۵	۳۰	۱۱/۱۳۴ ۱۱/۳۱۸	۱۱/۲۲۶
۳	۵	۳۰	۱۰/۹۹۲ ۱۱/۰۳۸	۱۱/۰۱۵

جدول ۴. نتایج حاصل از بررسی اثر طول ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی

عرض ترک (mm)	طول ترک (mm)	ارتفاع ترک (mm)	فشار شکست (MPa)	میانگین
۲	۴	۳۰	۱۲/۰۸۳ ۱۲/۲۸۰	۱۲/۱۸۱۵
۲	۵	۳۰	۱۱/۱۳۴ ۱۱/۳۱۸	۱۱/۲۲۶
۲	۶	۳۰	۱۰/۳۰۵ ۱۰/۱۵۰	۱۰/۲۲۷۵

جدول ۵. نتایج حاصل از بررسی اثر ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی

عرض ترک (mm)	طول ترک (mm)	ارتفاع ترک (mm)	فشار شکست (MPa)	میانگین
۲	۵	۲۰	۱۲/۲۸۱ ۱۱/۸۱۸	۱۲/۰۴۹۵
۲	۵	۳۰	۱۱/۱۳۴ ۱۱/۳۱۸	۱۱/۲۲۶
۲	۵	۴۰	۱۰/۱۵۲ ۱۰/۰۴۶	۱۰/۰۹۹

### ۳-۶-۳- تحلیل نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج مربوط به اثر عرض، طول و ارتفاع ترک ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. این تحلیل با استفاده از نمودارهای به‌دست آمده از بررسی نتایج آزمایش‌ها انجام شده است. هم‌چنین در انتها بخش نیز مقایسه‌ای بین نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه صورت گرفته است.

### ۳-۶-۱- تحلیل نتایج مربوط به اثر عرض ترک

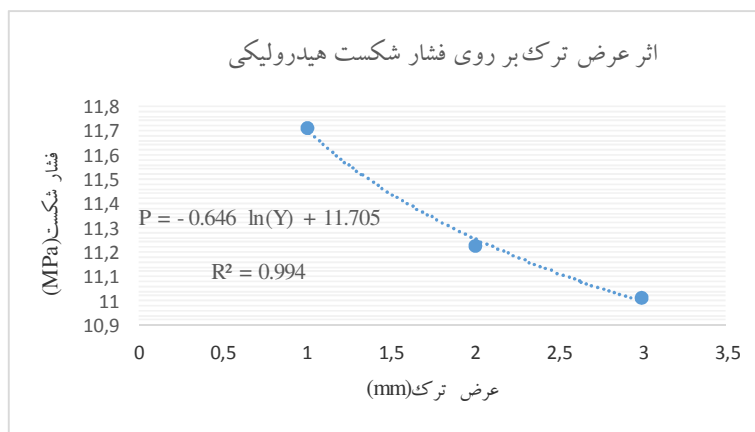
ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی با ثابت ماندن طول ترک و ارتفاع ترک، و تغییر در عرض ترک دیده می‌شود که عرض ترک رابطه‌ی معکوس و غیرخطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد. با بیش‌تر شدن عرض ترک، فشار کمتری برای گسترش ترک مصنوعی نیاز است. در این حالت غشا انعطاف‌پذیر قسمت

بگیریم، با ثابت ماندن طول و ارتفاع ترک و تغییر ۲۰ درصدی در عرض ترک فشار شکست هیدرولیکی در حدود ۱/۲ درصد نسبت به حالت مینا تغییر پیدا می‌کند که مقدار بسیار ناچیزی است. نمودار تغییرات فشار شکست هیدرولیکی در اثر تغییر در عرض ترک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

بیش‌تری از سطوح ترک را پوشش می‌دهد و به همین دلیل فشار شکست کاهش می‌یابد. رابطه‌ی (۱) که معادله‌ای بین فشار شکست هیدرولیکی و عرض ترک می‌باشد از نرم‌افزار Excel به‌دست آمده است.

$$P = -0.646 \ln(Y) + 11.705 \quad (R^2 = 0.9942) \quad (1)$$

اگر حالت، عرض ترک ۲ میلی‌متر، طول ترک ۵ میلی‌متر و ارتفاع ترک ۳۰ میلی‌متر را به عنوان مینا در نظر



شکل ۱۰. تغییرات فشار شکست با عرض ترک

### ۳-۶-۳- تحلیل نتایج مربوط به اثر ارتفاع ترک

#### ایجاد شده روی فشار شکست هیدرولیکی

با ثابت ماندن عرض ترک و طول ترک، و تغییر در ارتفاع ترک دیده می‌شود که ارتفاع ترک رابطه‌ی معکوس و خطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد. با افزایش ارتفاع ترک و نیز کمتر شدن ارتفاع قسمتی که در نمونه ترک باید رشد کند تا نمونه بشکند، فشار کمتری برای گسترش ترک مصنوعی نیاز است و فشار شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. رابطه‌ی (۳) که معادله‌ای بین فشار شکست هیدرولیکی و ارتفاع ترک می‌باشد از نرم‌افزار Excel به‌دست آمده است.

$$P = -0.0975 Z + 14.051 \quad (R^2 = 0.992) \quad (3)$$

اگر حالت، عرض ترک ۲ میلی‌متر، طول ترک ۵ میلی‌متر و ارتفاع ترک ۳۰ میلی‌متر را به عنوان مینا در نظر بگیریم، با ثابت ماندن عرض و طول ترک و تغییر ۲۰ درصدی در ارتفاع ترک فشار شکست هیدرولیکی ۵/۲۶ درصد نسبت به حالت مینا تغییر پیدا می‌کند. نمودار تغییرات فشار شکست هیدرولیکی در اثر تغییر در ارتفاع ترک در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

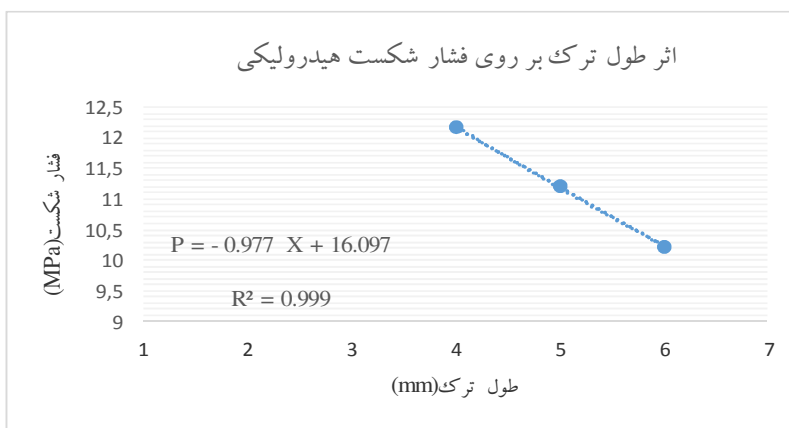
### ۳-۶-۲- تحلیل نتایج مربوط به اثر طول ترک ایجاد

#### شده روی فشار شکست هیدرولیکی

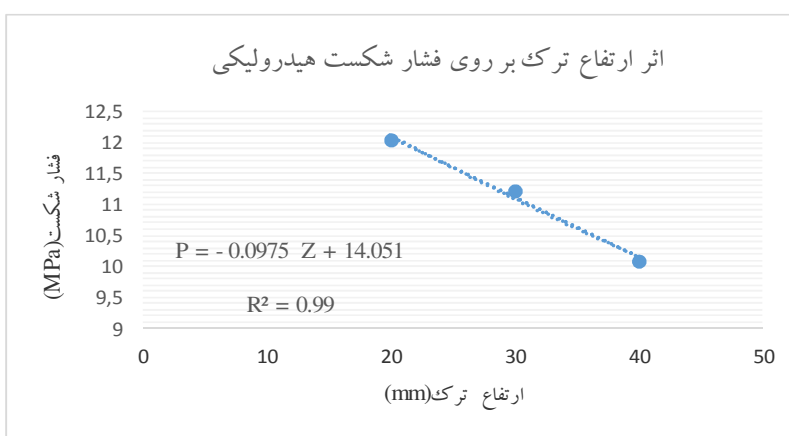
با ثابت ماندن عرض ترک و ارتفاع ترک، و تغییر در طول ترک دیده می‌شود که طول ترک رابطه‌ی معکوس و خطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد. زمانی که طول ترک افزایش می‌یابد، طول قسمتی که باید ترک در نمونه رشد کند تا منجر به شکست نمونه شود کم می‌شود در نتیجه فشار کمتری برای گسترش ترک مصنوعی نیاز است و فشار شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. رابطه‌ی (۲) که معادله‌ای بین فشار شکست هیدرولیکی و طول ترک می‌باشد از نرم‌افزار Excel به‌دست آمده است.

$$P = -0.977 X + 16.097 \quad (R^2 = 0.9998) \quad (2)$$

اگر حالت، عرض ترک ۲ میلی‌متر، طول ترک ۵ میلی‌متر و ارتفاع ترک ۳۰ میلی‌متر را به عنوان مینا در نظر بگیریم، با ثابت ماندن عرض و ارتفاع ترک و تغییر ۲۰ درصدی در طول ترک فشار شکست هیدرولیکی ۸/۷۱ درصد نسبت به حالت مینا تغییر پیدا می‌کند. نمودار تغییرات فشار شکست هیدرولیکی در اثر تغییر در طول ترک در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. تغییرات فشار شکست با طول ترک



شکل ۱۲. تغییرات فشار شکست با ارتفاع ترک

هم‌چنین آیت‌اللہی و همکاران (آیت‌اللہی و همکاران، ۱۳۹۰) با ارائه‌ی مدل‌های گوناگون و تحلیل آن‌ها به این نتیجه رسیدند که عمیق‌ترین نقطه واقع بر جبهه ترک، بحرانی‌ترین نقطه است که این نتیجه در این تحقیق نیز به‌دست آمد. با افزایش عمق نسبی ترک (طول ترک)، فشار لازم برای آغاز شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. البته این کاهش فشار نرخ کند شونده‌ای دارد، به گونه‌ای که با افزایش عمق نسبی ترک (در نسبت‌های  $a/R$  بیش‌تر از  $1/6$ )، این نسبت تأثیر بسیار کمی بر فشار شکست سیال دارد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثر ژئومتری ترک ایجاد شده در دیواره‌ی چاه بر روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی شده است. برای این منظور یک سری نمونه‌های استوانه‌ای توخالی جدار ضخیم گچی ترک‌دار آماده شد و اثر طول ترک، ارتفاع ترک و ضخامت ترک بر روی فشار شکست

#### ۳-۶-۴- مقایسه نتایج این تحقیق با تحقیقات مشابه

در پژوهشی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای توخالی موبین و کیم (موبین و کیم، ۱۹۸۵) به نتایجی دست یافتند از جمله این‌که اکثر نمونه‌های مورد آزمایش در راستای درزه‌های مصنوعی ایجاد شده و در اثر گسترش ترک‌ها به‌صورت قطری دچار شکست می‌شوند. در آزمایش‌های این تحقیق نیز این اتفاق بر روی نمونه‌های گچی افتاد، هم‌چنین از نتایج پژوهش موبین و کیم این است که نمونه‌ها بعد از افت فشار سیال در گمانه‌ها می‌شکنند که در این آزمایش نیز زمانی فشار داخلی گمانه افت می‌کرد که نمونه شکسته بود.

چن و ژانگ (چن و ژانگ، ۲۰۰۴) نیز به‌طور خلاصه به این نتایج رسیدند که با افزایش عرض ترک، چقرمگی و فشار شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد که این نتیجه در مورد فشار شکست هیدرولیکی در این تحقیق نیز به دست آمده است.

برهانی کودهی، ه (۱۳۹۰) تعیین خواص ژئومکانیکی مخزن با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی و بررسی بهبود تولید با استفاده از بهینه‌سازی شکست هیدرولیکی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.

حسن‌پور، ر. ا. و چوپانی، ن. ع (۱۳۸۶) اندازه‌گیری چقرمگی شکست سنگ و بررسی خصوصیات شکست آن تحت شرایط بارگذاری مرکب با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر-تهران-ایران.

سید سجادی، ش (۱۳۹۱) تحلیل مطالعات ژئومکانیکی مخازن کشورهای حوزه‌ی خلیج‌فارس جهت تحلیل و اعمال روش و یافته‌ها در میداین هیدروکربوری ایران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی.

شفائی‌زاده، ا.، فروزان، م. ر. و فرامرز، ل (۱۳۹۳) شبیه‌سازی جوانه‌زنی و رشد ترک در عملیات شکست هیدرولیکی چاه نفت با استفاده از معیار آسیب تنش اصلی بیشینه، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۴ شماره ۵ صفحه ۱۶۴ تا ۱۷۴.

علی‌پور کله بستی، م. و بهلولی، ب (۱۳۹۱) بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های حرارتی بر شکست سنگ مخزن یکی از میداین نفتی دریایی ایران، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۸، شماره ۴، صفحه ۳۹ تا ۴۸.

قربانی، ا (۱۳۹۴) پارامترهای موثر بر نتیجه‌ی عملیات شکست هیدرولیکی، ماهنامه‌ی علمی-ترویجی اکتشاف و تولید، شماره‌ی ۱۲۳، صفحه ۷۲ تا ۸۰.

معظمی‌گودرزی، ح.، آهنگری، ک. و شیخ‌ذکریایی، س. ج (۱۳۹۳) تأثیر نسبت پواسون بر فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی، دومین همایش ملی نفت و گاز ایران.

Bareer, R. D., Fisher, M.K. and Woodroof, R. A (2002) A practical guide to hydraulic fracturing diagnostic technologies. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, pp. 10-15.

Brenne, S., Molenda, M., Stöckhert, F. and Alber, M (2013) Hydraulic and Sleeve Fracturing Laboratory Experiments on 6 Rock Types. Chapter 20 from the book Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing.

Brown, J.E. and Economides, M. J (1992) practical considerations in Fracture Treatment Design. Elsevier, Amsterdam.

Chen, M. and Zhang, G-Q (2004) Laboratory Measurement and Interpretation of the Fracture Toughness of Formation Rocks At Great Depth. Journal of Petroleum Science and Engineering, 41: 221-231.

هیدرولیکی بررسی شد. آزمایش‌ها برای چند حالت مختلف انجام شده و در هر حالت یکی از پارامترها را تغییر داده و دو پارامتر دیگر ثابت نگه داشته شده است و تأثیر هر یک از این پارامترها بر روی فشار شکست هیدرولیکی بررسی شد. برای ساخت نمونه‌های مصنوعی استوانه‌ای توخالی قالبی ساخته شد تا این نمونه‌های ترک‌دار آماده شود. این بررسی از این جهت اهمیت داشت که شرکت‌های مجری عملیات شکست هیدرولیکی همواره سعی بر این دارند که هزینه‌ی اقتصادی ناشی از خرید پمپ را کاهش دهند. از این‌رو بررسی فشار می‌تواند در انتخاب علمی یک پمپ مناسب، مفید واقع شود.

نتایج زیر ماحصل این تحقیق می‌باشد:

- نمونه‌های مورد آزمایش در راستای درزه‌های مصنوعی ایجاد شده و در اثر گسترش ترک‌ها به صورت قطری دچار شکست شدند.
- در هنگام شکست نمونه افت فشار داخل گمانه اتفاق می‌افتد.
- عرض ترک رابطه‌ی معکوس و غیرخطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد.
- طول ترک رابطه‌ی معکوس و خطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد.
- ارتفاع ترک رابطه‌ی معکوس و خطی با فشار شکست هیدرولیکی دارد.
- اثر طول ترک بر روی فشار شکست هیدرولیکی بیش‌تر از ارتفاع ترک و آن نیز بیش‌تر از عرض ترک است. به طوری که با تغییر ۲۰ درصدی هر یک از پارامترها و ثابت ماندن دو پارامتر دیگر طول ترک ۸/۷۱ درصد، ارتفاع ترک ۵/۲۶ درصد و عرض ترک ۱/۲ درصد تغییر می‌کند.

## منابع

- آیت‌اللهی، م. ر.، پور کاویان، م. ح. و محمد علیها، م. ر (۱۳۹۰) تعیین حداقل فشار لازم برای آغاز رشد ترک، در عملیات شکست هیدرولیکی، نشریه‌ی علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ششم، شماره دوازدهم، صفحه ۶۱ تا ۷۰.
- بداع‌آبادی، س.، فولادچی، س. و موسوی، س. ج (۱۳۸۷) تعیین پارامترهای مقاومتی سازندهای ماسه‌سنگی با استفاده از تخلخل، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تهران.

- De pater, C. J. and Dong, Y (2007) 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.
- International Society for Rock Mechanics and Ulusay, R (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. International Soc. for Rock Mechanics, Commission on Testing Methods.
- Mubeen, A. and Kim, K (1985) CYLINDRICAL SPECIMENS FOR K<sub>IC</sub> OF ROCKS. *Int. J. Mech. Sci.*, 27: 711-715.
- Nasehi, M. J and Mortazavi, A (2013) Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing.
- Sodeifi, H and Hosseini, M (2015) Experimental and numerical studies for determining the mode I critical stress intensity factor using thick walled hollow cylindrical marly specimens. *Arab J Geosci*, DOI 10.1007/s12517-015-1774-y.
- Wang, S.Y., Sun, L., Au, A.S.K., Yang, T.H. and Tang, C.A (2009) 2D-numerical analysis of hydraulic fracturing in heterogeneous geomaterials. *Construction and Building Materials*, 23: 2196-2206.
- Wilkinson, J.R., Teletzke, G.F. and King, K.C (2006) Opportunities and Challenges for Enhanced Recover in Middle East. *SPE Monograph*, 22: 15-20.

## Experimental study of investigating effect of crack geometry in well wall on hydraulic fracturing pressure

S. Hesari<sup>1</sup> and M. Hosseini\*<sup>2</sup>

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

\* meh\_hosseini18@yahoo.com

Received: 2018/4/14 Accepted: 2018/9/1

### Abstract

The term hydraulic fracturing expresses process of beginning and expanding the crack in the rock that caused by hydraulic pressure exerted by the fluid which is a way for assessing state of tensions in the ground and increase the efficiency of oil reservoirs. In this study, by carrying out laboratory test, the effect of the geometry of cracking created in the wall of the well is investigated on hydraulic fracture pressure. This investigation is important because the companies that perform the hydraulic fracture are always trying to decrease cost of pump purchase. So pressure investigation can be useful in selecting suitable pump. For testing, a series cylindrical and hollow samples with a 73 mm external diameter, 25 mm inner diameter and 150 mm height are provided. In these samples, artificial cracks were created and the effect of length, height and crack thickness on hydraulic pressure was investigated. These tests are carried out for several different modes that in each series one of the parameters is changed and two other parameters are fixed and the effect of each parameters on the hydraulic fracture pressure is investigated. For the production of cylindrical samples, a mold was made to prepare cracked sample. The experimental results indicate that hydraulic fracturing pressure linearly decreases with a increasing in the length and height of the crack. This pressure nonlinearly decreases with a increasing in the crack width. Also, crack length have more effect than crack height on the hydraulic fracture pressure and is also greater than the crack width.

**Keywords:** hydraulic fracturing, well, crack width, crack length, crack height