

## مطالعه تأثیر ویسکوزیته سیال و قطر چال بر فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی به کمک دستگاه آزمون سه محوره واقعی

حامد شیرازی<sup>۱\*</sup>؛ سید رحمان ترابی<sup>۲</sup>؛ حسین میرزایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی مقطع دکتری، دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استاد دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استادیار، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

پذیرش: ۹۶/۰۹

دریافت: ۹۶/۰۱

### چکیده

روش شکست هیدرولیکی بهترین روش شناخته شده برای تعیین مقدار و راستای تنش‌های اصلی برجای افقی در اعماق زمین می‌باشد؛ که مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرا و پارامترهای تأثیرگذار مانند قطر گمانه، طول بازه تحت فشار (اینتروال) و ویسکوزیته سیال شکستگی، بر روی نتایج حاصل از آن، انجام شده است. با این حال، نکات مبهم زیادی در مورد روش شکست هیدرولیکی وجود دارد. در نتیجه، به مطالعات بیشتری برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر روند روش مذکور نیاز است. این مطالعات نیازمند طراحی و ساخت تجهیزات و دستگاه‌هایی مانند دستگاه سه محوره واقعی می‌باشند. دستگاه آزمون سه محوره واقعی که قابلیت انجام آزمایش شکست هیدرولیکی را در مقیاس آزمایشگاهی داشته باشد در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شد. در راستای بررسی ارتباط فشار شکست با دو پارامتر ویسکوزیته سیال و قطر گمانه که می‌توانند نتایج حاصل از روش شکست هیدرولیکی را در مسیر تعیین تنش‌های برجای زمین تحت تأثیر قرار دهند، آزمایشات شکست هیدرولیکی به کمک این دستگاه انجام شد. به همین منظور نمونه‌های بتنی به ابعاد  $30 \times 30 \times 30$  cm که در مرکز آن‌ها سوراخ با قطرهای  $30$  mm،  $50$  mm و  $80$  mm ایجاد شده بود، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان داد که با افزایش قطر گمانه فشار سیال برای شکست سنگ کاهش می‌یابد. در قسمت دوم ۳ نوع روغن هیدرولیک با ویسکوزیته‌های متفاوت ( $46H$ ،  $68H$  و  $100H$ ) در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد.

دستگاه آزمون سه محوره واقعی، شکست هیدرولیکی، سیال تزریق، قطر گمانه، فشار شکست

واژگان کلیدی

## ۱- مقدمه

روش شکست هیدرولیکی بهترین روش شناخته شده برای تعیین مقدار و راستای تنش‌های اصلی برجای افقی در اعماق زمین می‌باشد. همچنین روش مذکور، روشی است که در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از میدان‌های نفتی و گازی، طراحی شیب چاه‌ها، موقعیت و روند تحریک آن‌ها استفاده می‌شود [۱]. اولین تحقیقات میدانی بر روی شکست هیدرولیکی در سال ۱۹۴۰ برای تحریک و افزایش تولید در میدان‌های نفتی از طریق گسترش درزه و شکاف‌های موجود و ایجاد شکستگی‌های جدید در سنگ مخزن نفت انجام شد [۲]. سپس، این روش با استفاده از فشار سیال تزریقی در طی بازه شکستن سنگ و توابع نظری حاکم بر این فرآیند، برای تعیین تنش‌های برجا مورداستفاده قرار گرفت. فیرهرست<sup>۱</sup> اولین کسی بود که استفاده از شکست هیدرولیکی را برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا، پیشنهاد نمود [۳].

امروزه علاوه بر آن که روش شکست هیدرولیکی به‌عنوان روشی برای تحریک چاه‌های نفتی بکار می‌رود، به‌عنوان یک روش محبوب برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا نیز شناخته می‌شود. از طرف دیگر، مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرای روش و پارامترهای تأثیرگذار مانند قطر گمانه، طول بازه تحت فشار (اینتروال) و ویسکوزیته سیال شکستگی، بر روی نتایج حاصل از آن، توسط محققین و دانشمندان مختلف، انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

تأثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست که توسط محققین، ایتو<sup>۲</sup> و هایاشی<sup>۳</sup> [۴]، هیمسون<sup>۴</sup> و ژائو<sup>۵</sup> [۵] و ایتو [۶] مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهند که با کاهش قطر گمانه، فشار شکست افزایش می‌یابد.

همچنین، مطالعات مربوط به تأثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست توسط بنور<sup>۶</sup> و همکارانش [۷] انجام شده است. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با کاهش ویسکوزیته سیال، فشار شکست روند خاصی را طی نمی‌نماید. ضمناً لهوم<sup>۷</sup> و همکارانش [۸] در مطالعاتشان دریافتند که فشار شکست به ویسکوزیته سیال ارتباطی ندارد.

علاوه بر این، مطالعات دیگری در این زمینه انجام شده است [۹-۱۱]. باین‌حال، نکات مبهم زیادی در مورد روش شکست هیدرولیکی وجود دارد؛ که از آن جمله می‌توان به تأثیر نوع سیال بر فشار شکست اشاره نمود. در نتیجه، به مطالعات بیشتری برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای مختلف بر روند روش مذکور نیاز است. این مطالعات نیازمند طراحی و ساخت تجهیزات و دستگاه‌هایی مانند دستگاه سه محوره واقعی می‌باشند.

اخیراً، دستگاه سه محوره واقعی با قابلیت شبیه‌سازی روش شکست هیدرولیکی در برخی دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی دنیا ساخته شده‌اند [۲۱-۱۲]. در همین راستا، یک دستگاه جدید که امکان شبیه‌سازی آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را در شرایط سه محوره واقعی فراهم می‌سازد در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شد. در این تحقیق که برای اولین بار در ایران با استفاده از دستگاه مذکور انجام شده است، تأثیر ویسکوزیته سیال و اندازه (قطر) گمانه بر روی فشار شکست مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- دستگاه آزمون سه محوره واقعی

دستگاه آزمون سه محوره واقعی ساخته شده برای این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم متشکل از یک محفظه اعمال فشار، واحد تزریق و واحد جمع‌آوری و نظارت بر داده‌ها می‌باشد.



شکل ۱- دستگاه سه محوره واقعی

یک نمونه مکعبی به ابعاد  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  را می‌توان در درون محفظه اعمال فشار قرار داد. در همین حال، دستگاه مذکور استفاده از سه تنش مستقل عمود بر هم  $\sigma_1$  (محوری)،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  (جانبی) را تسهیل می‌نماید.

<sup>1</sup> Fairhurst

<sup>2</sup> Ito

<sup>3</sup> Hayashi

<sup>4</sup> Haimson

<sup>5</sup> Zhao

<sup>6</sup> Bennour

<sup>7</sup> Lhomme

عمودی دستگاه دوران نموده و بر روی نمونه قرار بگیرد. لازم به ذکر است که این واحد، از جک قائم برای آببندی سوراخ تزریق استفاده می‌نماید. جک قائم، تنش در راستای محور  $Z$  را بر روی نمونه تأمین می‌نماید. درحالی که هم‌زمان، بخش بالایی سوراخ تزریق را نیز آببندی می‌نماید. در عمل، جک قائم بر روی واحد تزریق فشار می‌آورد و آن را به سمت نمونه حرکت می‌دهد. پس از اعمال فشار در راستای  $Z$  و آببندی سوراخ تزریق، واحد تزریق از طریق یک حفره ایجادشده بر روی دیواره جانبی آن، با سیال تزریقی پر می‌شود. سپس این سیال به داخل سوراخ مرکزی نمونه تزریق می‌گردد. در پایان این عملیات، سیستم تزریق توسط یک فنر از روی نمونه کنار رفته و به محل اولیه خود بازمی‌گردد.

## ۲-۲- واحد هیدرولیک

این واحد که دارای یک مخزن ۲۵۰ لیتری می‌باشد، وظیفه تزریق سیال (روغن هیدرولیک) به داخل سیلندر جکها را دارد. ازنجایی که ۴ جک افقی و ۱ جک قائم برای دستگاه طراحی شده است و جکهای افقی دوبه‌دو باهم در ارتباط هستند (جکهایی که مقابل هم قرار گرفته‌اند باید فشار یکسانی را به نمونه وارد کنند) لذا هر ۲ جک افقی یک فشارسنج دارد و مقدار فشار جکها توسط فشارسنجهایی که بر روی این واحد نصب شده، قابل کنترل می‌باشد. علاوه بر آن، مسیری برای هدایت سیال به سمت سامانه تزریق، بر روی واحد فوق تعبیه گردیده است. واحد مذکور دارای ۲ موتور  $3\text{ph}$  (۲۲۰۰w) و ۲ پمپ دوطبقه برای تزریق سیال به مسیرهای توضیح داده شده، است. لازم به ذکر است که تابلوی برق دستگاه نیز بر روی این واحد نصب گردیده است.

## ۲-۳- تجهیزات مربوط به تنظیم طول بازه تحت فشار و

### آببندی آن

به منظور تنظیم طول بازه تحت فشار (اینتروال) و آببندی آن در درون سوراخ مرکزی نمونه، سه انژکتور با سه قطر متفاوت (۳۰mm، ۵۰mm و ۸۰mm) طراحی و ساخته شدند که در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

تنش‌های افقی  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  توسط دو جفت جک هیدرولیکی دوبه‌دو مرتبط و متقارن در راستاهای  $X$  و  $Y$  که نیرویی معادل ۵۰ تن را بر روی نمونه اعمال می‌نمایند، تأمین می‌کنند. جک قائم نیز نیروی ۸۰ تنی را بر روی نمونه اعمال می‌نماید. باید به این نکته توجه شود که یکی از ویژگی‌های مهم جکهای هیدرولیکی بکار رفته، ویژگی خودتنظیمی<sup>۱</sup> آن‌ها است که با استفاده از مفاصل بین پیستون جکها و صفحات فلزی مرتبط با نمونه، امکان آن فراهم شده است. بدین معنی که در محل اتصال پیستون و صفحات انتهایی جکها که با نمونه در ارتباط هستند، مفاصلی نیم‌کره مانند قرار دارند که امکان حرکت جانبی صفحات انتهایی را فراهم می‌سازند. در حقیقت، این ویژگی کمک می‌کند تا در صورتی که صفحات جانبی نمونه از حالت موازی خارج شده بودند، تمرکز تنشی بر روی آن‌ها ایجاد نشود.

به منظور کاهش اصطکاک بین صفحات فلزی جکها و سطوح جانبی نمونه‌ها نیز ۶ ورق لاستیکی با ضخامت حدود ۵mm در بین نمونه و جکها قرار داده شد.

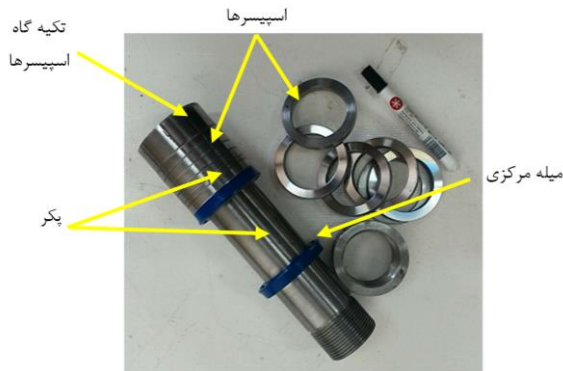
لازم به ذکر است، یکی دیگر از ویژگی‌های دستگاه مذکور آن است که علاوه بر آن که می‌توان آزمایش‌های شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 30\text{cm}$  انجام داد، می‌توان با اعمال تغییراتی در بخش محفظه استقرار نمونه، نمونه‌هایی با ابعاد  $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$  و  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$  را نیز مورد آزمایش قرار داد. نیروهایی که در سه راستای متعامد بر روی نمونه اعمال می‌شوند نیز به وسیله فشارسنج‌های نصب شده بر روی واحد هیدرولیک و همچنین از طریق سیستم اکتساب داده‌ها، کنترل می‌گردند. یادآور می‌شود قبل از انجام هر دسته آزمایش، سیستم اکتساب داده‌ها با استفاده از فشارسنج‌های دستگاه کالیبره شده است.

## ۲-۱- واحد تزریق

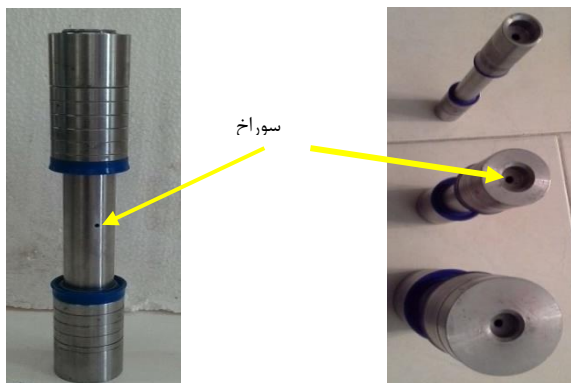
واحد تزریق که سیال را با نرخ تزریق حدود  $6\text{ cc/s}$  به درون نمونه تزریق می‌نماید شامل یک سیستم پانچ سیال است که فشار سیال داخل نمونه را تا  $2000\text{ bar}$  افزایش می‌دهد. سیال تزریق می‌تواند بدون توجه به چگالی و ویسکوزیته آن، هر نوع سیالی باشد. یادآور می‌شود که واحد تزریق به گونه‌ای طراحی شده است که می‌تواند حول یکی از ستون‌های اصلی

<sup>1</sup> self-alignment

استفاده از این تجهیزات وجود نداشت. دلیل آن هم این بود که با توجه به نمونه‌های بتنی مورد آزمایش، آب‌بندی فضای اینتروال با تجهیزات ساخته‌شده بسیار دشوار بود؛ به عبارت دیگر، استفاده از این تجهیزات مستلزم آن است که سطوح داخلی گمانه بسیار صاف و صیقلی باشند.



شکل ۳- واشر، اسپیسر، میله مرکزی و پکر لاستیکی



شکل ۴- سوراخ مرکزی

لازم به ذکر است که آزمایش بررسی اثر بازه تزریق با استفاده از دیگر دستگاه تزریق طراحی شده و با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای از جنس گچ با قطر  $NX$  و طول  $14\text{cm}$  انجام شد [۲۲].

### ۳- نمونه

نمونه‌های مکعبی از جنس بتن به ابعاد  $30 \times 30 \times 30\text{ cm}^3$  در این تحقیق ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۵). باید توجه داشت که برای تهیه بتن، ماسه، آهک و سیمان به نسبت ۳ به ۰٫۲۵ به ۱، باهم ترکیب شده‌اند. متوسط اندازه ذرات استفاده‌شده در ترکیب فوق  $3\text{mm}$  بوده است. ضمناً منحنی دانه‌بندی ذرات در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۲- سه انژکتور با سه قطر متفاوت

این انژکتورها نقش مجموعه پکرها در روش شکست هیدرولیکی را بازی می‌کنند و در داخل سوراخ مرکزی نمونه جانمایی می‌شوند. همچنین، قطعات مذکور شامل ۴ بخش هستند:

#### الف) میله مرکزی

میله مرکزی طولی برابر با طول نمونه ( $30\text{cm}$ ) دارد. همچنین، دو بخش بالایی و پایینی این میله‌ها که محل استقرار تکیه‌گاه اسپیسرها هستند، رزوه شده‌اند (شکل ۳). ضمناً، به منظور تزریق سیال به فضای موردنظر (فضای اینتروال)، یک سوراخ از سطح بالایی میله تا بخش میانی آن ایجاد شده است (شکل ۴).

#### ب) تکیه‌گاه اسپیسرها

هر انژکتور دارای دو تکیه‌گاه اسپیسر است که در بخش بالا و پایین میله مرکزی پیچ شده‌اند (شکل ۳). با باز و بسته کردن آن‌ها می‌توان تعداد اسپیسرها را تغییر داد و فاصله تزریق را تنظیم کرد. قطر خارجی این قطعات برابر با قطر سوراخ مرکزی نمونه می‌باشد.

#### ج) اسپیسرها

به منظور تغییر طول بازه تزریق، اسپیسرها مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۳). این حلقه‌ها بین تکیه‌گاه اسپیسر و پکرهای لاستیکی قرار می‌گیرند. قطر خارجی اسپیسرها هم برابر قطر گمانه می‌باشد.

#### د) پکرهای پلاستیکی

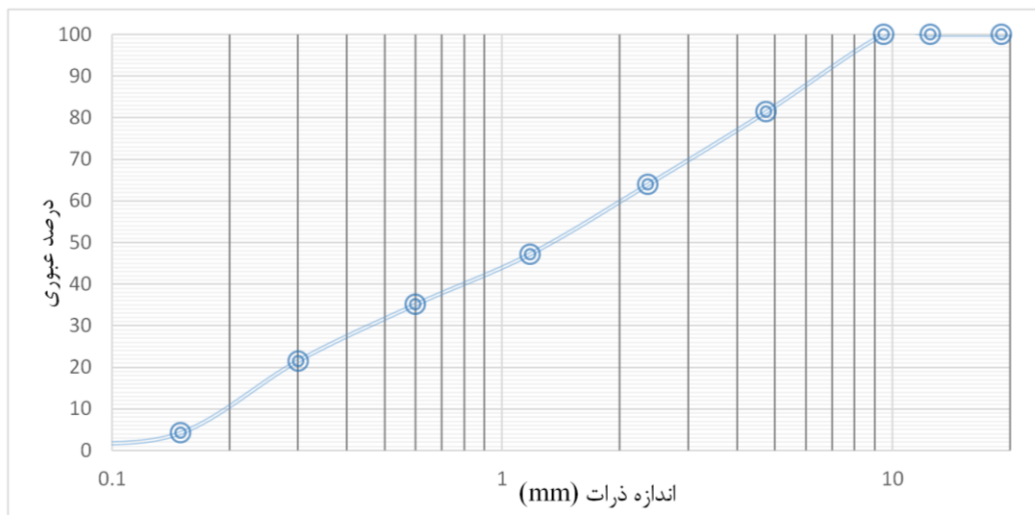
وظیفه این قطعات، آب‌بندی فضای اینتروال می‌باشد (شکل ۳). آن‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با افزایش فشار سیال داخل گمانه مرکزی نمونه، به دیواره گمانه می‌چسبند و از نشت سیال داخل فضای اینتروال به بیرون جلوگیری می‌نمایند.

هدف از طراحی و ساخت ۳ انژکتور با ۳ قطر متفاوت، ارزیابی تأثیر طول فضای اینتروال در شرایط استفاده از سه قطر گمانه متفاوت بر روی فشار شکست بوده است؛ اما در عمل، امکان

با توجه به افزایش آهک، میانگین مقاومت فشاری تک‌محوره نمونه در مدت‌زمان ۲۸ روزه به  $18\text{MPa}$  رسید. لازم به ذکر است که وزن آب اضافه‌شده به ترکیب حدود ۲۳٪ ماسه و جرم مخصوص نمونه‌ها به‌طور متوسط  $1670\text{Kg/m}^3$  بوده است. به‌منظور شبیه‌سازی گمانه، سه میله فولادی با قطرهای  $30\text{mm}$ ،  $50\text{mm}$  و  $80\text{mm}$  ساخته و مورد استفاده قرار گرفتند. این میله‌ها در مرکز قالب، جانمایی شده و پس از اتمام مرحله بتن‌ریزی و با شروع خودگیری بتن، به آرامی از داخل آن خارج گردیدند. همچنین، برای خروج حباب موجود در نمونه بتن نیز عملیات ایجاد ارتعاش به‌وسیله یک میله و بر اساس استانداردهای *ASTM* انجام شد.



شکل ۵- نمونه بتنی



شکل ۶- منحنی دانه‌بندی

تزریقی در هر آزمایش متفاوت بود.

برای روغن هیدرولیک  $46\text{cSt}$  (۴۶)، روغن هیدرولیک  $68\text{H}$  ( $68\text{cSt}$ ) و روغن هیدرولیک  $100\text{H}$  ( $100\text{cSt}$ )، به ترتیب ۷، ۱۰ و ۶ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

یادآور می‌شود، واحد فیزیکی *cgs* برای ویسکوزیته جنبشی استوکس (*St*) و گاهی اوقات در قالب سانتی استوکس (*cSt*) می‌باشد. این طبقه‌بندی، درجه گرانیروی را در دمای  $40^\circ\text{C}$  تعریف می‌کند [۲۳].

لازم به ذکر است تعدادی آزمایش ناموفق به دلایل مختلف نظیر تنظیمات دستگاه، نامناسب بودن نمونه و نشت سیال و غیره انجام شد که در تحلیل نتایج منظور نشده‌اند. همچنین اضافه می‌نمایند انجام هر آزمایش با توجه به لزوم رعایت نکات

#### ۴- نمونه‌ها و فشار محصور

همان‌طور که در بخش ۳ توضیح داده شد، نمونه‌های بتنی مکعبی شکل، به‌عنوان نمونه‌های مورد آزمایش استفاده شدند و آزمایش‌ها به دو گروه تقسیم شدند. در گروه اول، نمونه‌هایی با گمانه‌های مرکزی با قطرهای مختلف، مورد آزمایش قرار گرفتند و فشار سیال داخل گمانه تا زمان وقوع شکست هیدرولیکی افزایش یافت. لازم به ذکر است در این آزمایش‌ها، نرخ تزریق سیال ثابت بود. برای هر سه گمانه (گمانه‌های با قطر  $30\text{mm}$ ،  $50\text{mm}$  و  $80\text{mm}$ )، ۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت. در این گروه، نوع سیال ثابت و تغییری در نوع سیال ایجاد نشد.

در گروه دوم آزمایش‌ها، قطر گمانه‌ها ثابت بود و نوع سیال



شکل ۹- پر کردن گمانه با سیال تزریق



شکل ۱۰- جانمایی واحد تزریق بر روی نمونه و اعمال بار قائم



شکل ۱۱- شکستگی ایجادشده بر روی نمونه



شکل ۱۲- شکستگی ایجادشده بر روی نمونه

لازم در ساختن نمونه‌های بتنی کاملاً مشابه از نظر ترکیب، زمان و شرایط گیرش و با توجه به وزن هر نمونه (حدود ۴۵ kg) و لزوم استقرار صحیح آن در محفظه مربوطه و شرایط فضای محدود برای کار بر روی دستگاه، انجام هر تست با مشکلات و محدودیت‌های فراوان همراه بود. تمامی آزمایش‌ها در فشارهای سه محوره واقعی  $\sigma_1=12,1MPa$ ،  $\sigma_2=2,5MPa$  و  $\sigma_3=1,4MPa$  انجام شدند.

### ۵- روند آزمایش

روند آزمایش شکست هیدرولیکی که بر روی نمونه‌های بتنی انجام شده است به‌طور خلاصه در ادامه ارائه گردیده و نتایج حاصله در جدول ۱ قابل مشاهده می‌باشد:

- قرار دادن نمونه در داخل محفظه فشار (شکل ۷)
- اعمال بارهای جانبی بر روی نمونه (شکل ۸)
- پر کردن گمانه با سیال تزریق (شکل ۹)
- جانمایی واحد تزریق بر روی نمونه و اعمال بار قائم (شکل ۱۰)
- پر کردن واحد تزریق با سیال تزریق
- تزریق سیال داخل واحد تزریق به درون گمانه تا زمان وقوع شکست (شکل‌های ۱۱ و ۱۲)



شکل ۷- آماده‌سازی نمونه



شکل ۸- اعمال بارهای جانبی بر روی نمونه

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های انجام‌شده

شماره آزمایش	کد نمونه	قطر گمانه (mm)	سیال (روغن هیدرولیک)	فشار شکست (MPa)
۱	Conc. 1	۸۰	H۴۶	۱۴,۳۸
۲	Conc. 2	۸۰	H۶۸	۱۰,۰۵
۳	Conc. 3	۸۰	H۱۰۰	۱۱,۶۲
۴	Conc.4	۵۰	H۶۸	۱۴,۴۵
۵	Conc.5	۳۰	H۴۶	۱۷,۵۱
۶	Conc.6	۳۰	H۶۸	۱۷,۳۰
۷	Conc.7	۵۰	H۶۸	۱۴,۱۴
۸	Conc.8	۵۰	H۴۶	۱۴,۲۹
۹	Conc.9	۵۰	H۴۶	۱۳,۳۴
۱۰	Conc.10	۳۰	H۴۶	۱۳,۶۸
۱۱	Conc.11	۵۰	H۶۸	۱۲,۲۴
۱۲	Conc.12	۳۰	H۶۸	۱۷,۱۳
۱۳	Conc.13	۳۰	H۱۰۰	۱۲,۷۴
۱۴	Conc.14	۳۰	H۶۸	۱۲,۵۸
۱۵	Conc.15	۵۰	H۱۰۰	۱۳,۴۳
۱۶	Conc.16	۵۰	H۱۰۰	۱۱,۹۴
۱۷	Conc.17	۵۰	H۶۸	۱۲,۶۰
۱۸	Conc.18	۸۰	H۴۶	۱۴,۳۲
۱۹	Conc.19	۸۰	H۶۸	۱۳,۳۰
۲۰	Conc.20	۸۰	H۱۰۰	۱۳,۶۵
۲۱	Conc.21	۳۰	H۱۰۰	۱۵,۶۵
۲۲	Conc.22	۸۰	H۶۸	۱۴,۵۲
۲۳	Conc.23	۸۰	H۴۶	۱۱,۵۹

## ۶- نتایج آزمایش‌ها

نتایج آزمایش‌ها به دو بخش تقسیم می‌شوند:

- تأثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ۳ نوع روغن هیدرولیک به داخل گمانه‌های با قطرهای مختلف تزریق گردیدند. در عمل، برای هر سه گمانه با قطرهای مختلف، ۳ نوع روغن هیدرولیک استفاده شد. با دسته‌بندی نتایج، می‌توان تصور کرد که قطر گمانه‌ها ثابت بودند و نوع سیال تزریقی تغییر می‌یافت و برعکس. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده‌شده‌اند.

همان‌طور که در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ نشان داده‌شده است، رابطه‌ای معکوس بین فشار شکست و ویسکوزیته سیال وجود دارد؛ به عبارت دیگر، با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد. در این خصوص می‌توان استدلال کرد که به شرط ثابت بودن نرخ تزریق سیال، اگر سیالی با ویسکوزیته کم به عنوان سیال شکستگی استفاده شود، افزایش فشار سیال باعث نفوذ آن به درون نمونه می‌گردد. در نتیجه فشار شکست افزایش می‌یابد. در حالی که یک سیال با ویسکوزیته بالاتر، به طور مؤثرتری می‌تواند فشار را به محیط اطراف منتقل نماید و قبل از نفوذ قابل توجه سیال به درون نمونه، باعث وقوع شکست گردد.

- تأثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست

همان‌طور که در بخش ۴ ذکر شد، چندین نمونه با سوراخ مرکزی (گمانه) دارای قطرهای مختلف، به منظور مطالعه تأثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست مورد آزمایش قرار گرفتند. لازم به ذکر است، این آزمایش‌ها برای هر سه نوع روغن هیدرولیک تکرار گردیدند. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۶، ۱۷ و ۱۸ نشان داده‌شده‌اند. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، با افزایش قطر گمانه، فشار شکست کاهش می‌یابد و این روند در تمامی آزمایش‌هایی که با سیال‌های مختلف انجام شده، قابل مشاهده می‌باشد.

اگر آزمایش‌ها بر روی موادی از جنس‌های دیگر هم انجام شود، این رفتار که همان "تأثیر اندازه چال"<sup>۱</sup> می‌باشد، تکرار خواهد شد [۶]. نتایج به دست آمده در این تحقیق، بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده توسط ایتو و هاباشی<sup>۲</sup> [۴]، هیمسون<sup>۳</sup> و ژائو<sup>۴</sup> [۵] و ایتو<sup>۵</sup> [۶] بوده و به نحوی می‌تواند به عنوان تأیید نتایج آن‌ها در نظر گرفته شود.

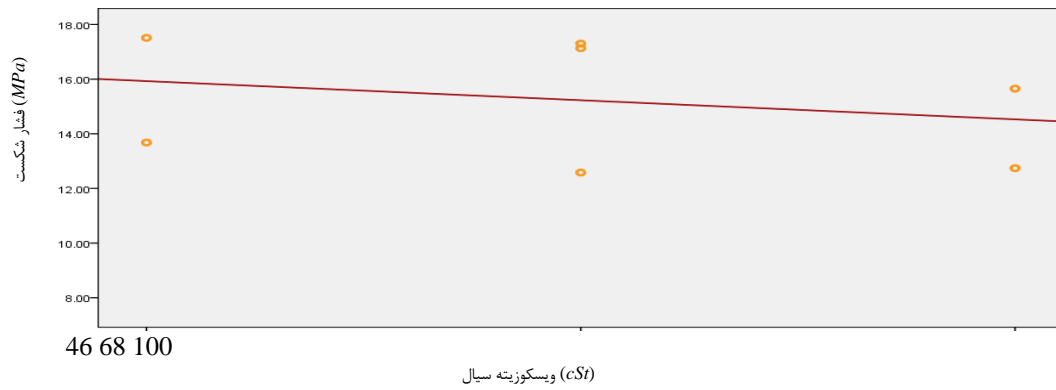
<sup>1</sup>Hole Size Effect

<sup>2</sup>Hayashi

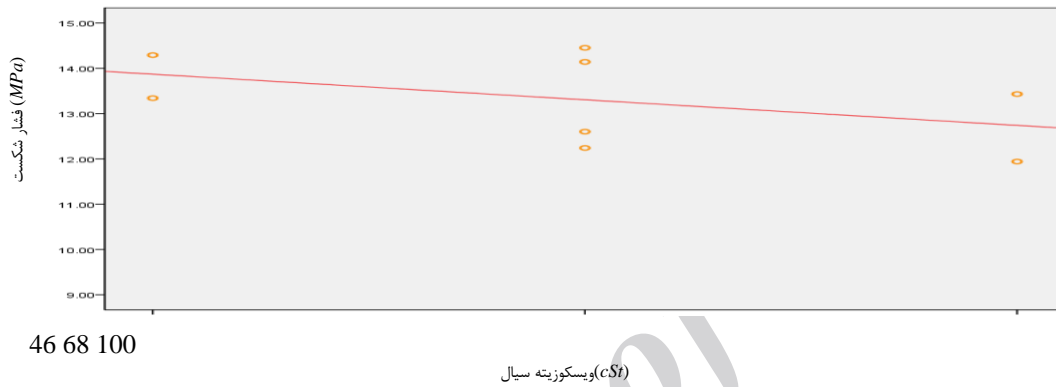
<sup>3</sup>Haimson

<sup>4</sup>Zhao

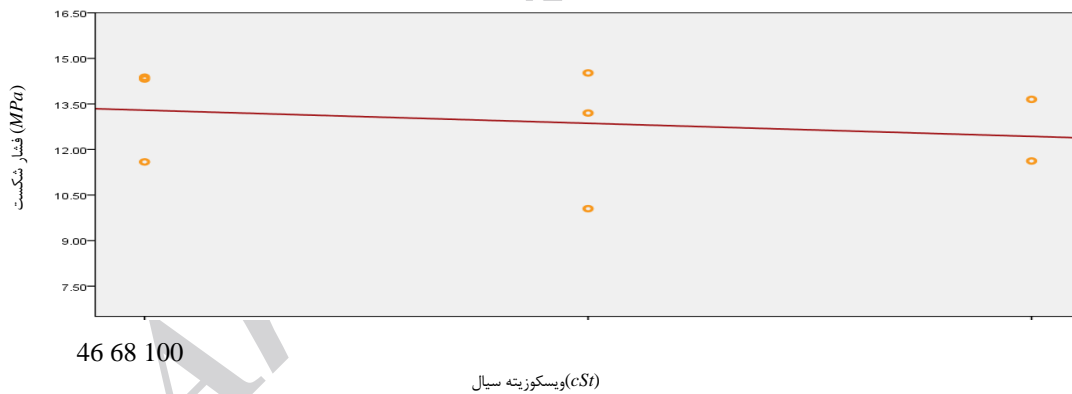
<sup>5</sup>Ito



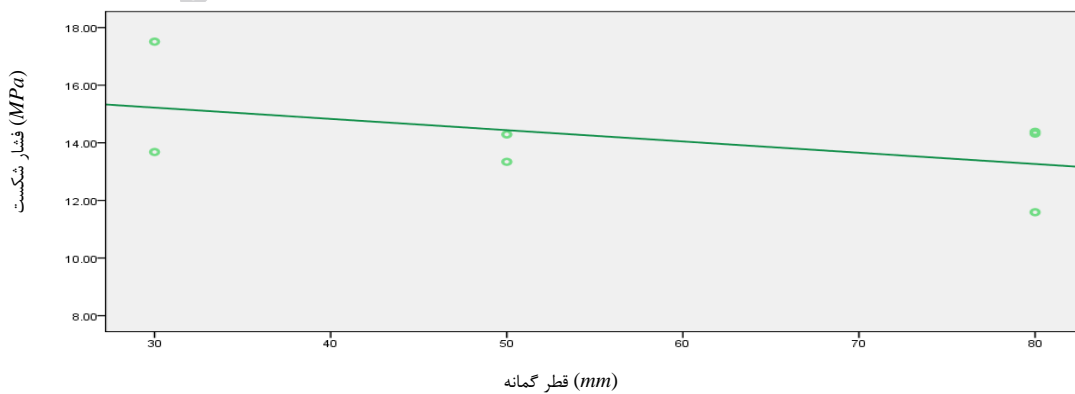
شکل ۱۳- رابطه فشار شکست با ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۳۰mm



شکل ۱۴- رابطه فشار شکست با ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۵۰mm

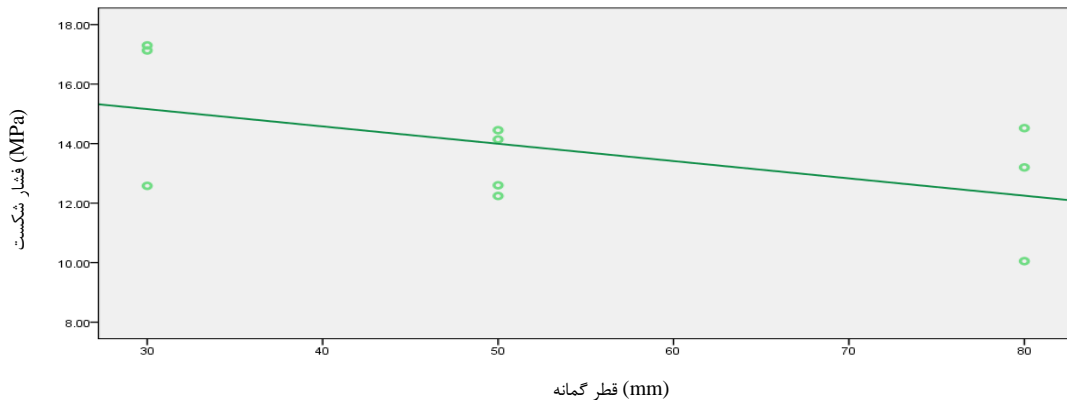


شکل ۱۵- رابطه فشار شکست با ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۸۰mm

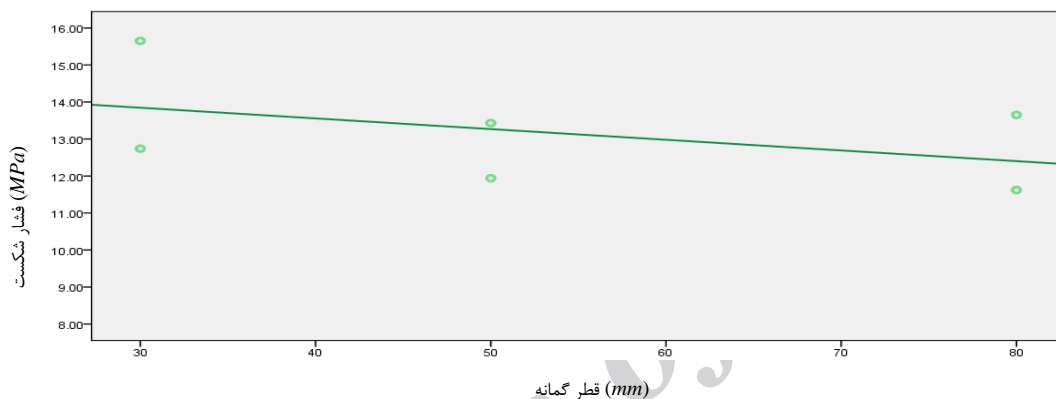


شکل ۱۶- رابطه فشار شکست با قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۴۶H





شکل ۱۷- رابطه فشار شکست با قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۶۸H



شکل ۱۸- رابطه فشار شکست با قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۱۰۰H

## ۷- نتیجه گیری

چندین آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از سه نوع سیال تزریق (روغن هیدرولیک ۴۶H، ۶۸H و ۱۰۰H) بر روی نمونه‌های مکعبی از جنس بتن در شرایط سه محوره واقعی انجام شد. هریک از نمونه‌ها نیز دارای سوراخ مرکزی (گمانه) بودند و با توجه به قطر گمانه (۳ قطر متفاوت) به سه نوع تقسیم شدند. در این آزمایش‌ها، ارتباط بین ویسکوزیته سیال و قطر گمانه با فشار شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر می‌باشند:

- فشار شکست و ویسکوزیته سیال رابطه‌ای معکوس با یکدیگر دارند و با افزایش ویسکوزیته، فشار شکست کاهش می‌یابد.

در یک نرخ ثابت تزریق، افزایش فشار شکست در نتیجه‌ی کاهش ویسکوزیته را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که

سیال با ویسکوزیته پایین راحت‌تر به درون نمونه نفوذ می‌کند.

به همین دلیل برای جبران افت فشار ایجاد شده ناشی از نفوذ سیال به درون نمونه، به فشار بالاتری نیاز است. در مقابل، یک سیال با ویسکوزیته بالاتر با نفوذ کمتر به درون نمونه و به‌طور مؤثرتری می‌تواند فشار را با هدف ایجاد شکست در نمونه، به محیط اطراف خود منتقل نماید.

در نتیجه، می‌توان پیش‌بینی کرد که اگر یک سیال با ویسکوزیته پایین به‌عنوان سیال شکستگی استفاده شود باید نرخ تزریق به‌اندازه کافی بالا باشد.

- فشار شکست و قطر گمانه رابطه‌ای معکوس با یکدیگر دارند و با افزایش قطر گمانه، فشار شکست کاهش می‌یابد. این رفتار که در نمونه از جنس دیگر نیز قابل مشاهده می‌باشد بنام "تأثیر اندازه چال" معروف است.

## ۸- منابع

- "Experimental sanding analysis: thick walled cylinder versus true triaxial tests." In Proceedings of 2nd southern hemisphere international rock mechanics symposium (SHIRMS), Sun City, South Africa. 2012.
- [13] Rasouli, V. "A true triaxial stress cell to simulate deep downhole drilling conditions." SPE News, 2011.
- [14] Zhang, Guang-Qing, and Tiegang Fan. "A high-stress tri-axial cell with pore pressure for measuring rock properties and simulating hydraulic fracturing." Measurement 49 (2014): 236-245.
- [15] Aoyagi Kazuhei, Ishida Tsuyoshi, Murata Sumihiko, Yamamoto Koji, Sekine Kotaro. "Experiments to investigate effects of the intermediate principal stress on the borehole breakout development." 6<sup>th</sup> Int. Symp. On In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 2013.
- [16] Kizaki Akihisa, Tanaka Hiroharu and Sakaguchi Kiyotoshi. "Effects of Pore Water on Hydraulic Fracture Propagation using Super Critical Carbon Dioxide as Fracturing Fluid." 6<sup>th</sup> Int. Symp. On In-Situ Rock Stress, 20-22 August 2013, Sendai, Japan, 2013.
- [17] Haimson Bezalel and Chang Chandong. "A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 37 (2000) 285-296.
- [18] Frash, Luke P., Marte Gutierrez, and Jesse Hampton. "True-triaxial apparatus for simulation of hydraulically fractured multi-borehole hot dry rock reservoirs." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 70 (2014): 496-506.
- [19] Huang, Bingxiang, Changyou Liu, Junhui Fu, and Hui Guan. "Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48, no. 6 (2011): 976-983.
- [20] Cheon, D. S., S. JEON, C. Park, and C. Ryu. "An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions." Tunnelling and Underground Space Technology 21, no. 3-4 (2006).
- [21] Ito, T., Narita, H. "Laboratory study for pore water effect on hydraulically-induced fracture behavior in unconsolidated sands." 48<sup>th</sup> US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium held in Minneapolis, MN, USA, 1-4 June, 2014.
- [22] Shirazi, H., Torabi, S.R., Sereshki, F., Mirzaei, H. "Analysis of the effect of interval length on the fracture pressure in the hydraulic fracturing technique." 5<sup>th</sup> Iranian Rock Mechanics Conference. 17-18 May 2014, Tarbiat Modares University, Iran.
- [23] [http://www.engineeringtoolbox.com/iso-grade-oil-d\\_1207.html](http://www.engineeringtoolbox.com/iso-grade-oil-d_1207.html)
- [1] Hayashi, Kazuo and Bezalel C. Haimson. "Characteristics of shut-in curves in hydraulic fracturing stress measurements and determination of in situ minimum compressive stress." Journal of Geophysics Research: Solid Earth 96.B11 (1991): 18311-18321.
- [2] Montgomery C and Smith M, Hydraulic Fracturing. NSI Technologies, December, 2010.
- [3] Manthei, G., J. Eisenblatter and P. Kamlot, Stress Measurements in salt mines using a special hydraulic fracturing borehole tool, Geotechnical Measurements and Modelling, Natau, Fecker & Pimental (eds), ISBN 90 5809 603 3, 2003.
- [4] Ito, T., and K. Hayashi. "Physical background to the breakdown pressure in hydraulic fracturing tectonic stress measurements." International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts. Vol. 28. No. 4. Pergamon, 1991.
- [5] Haimson, Bezalel C., and Zhongliang Zhao. "Effect of borehole size and pressurization rate on hydraulic fracturing breakdown pressure." The 32nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1991.
- [6] Ito, Takatoshi. "Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media: Rock." Engineering Fracture Mechanics 75.7 (2008): 1753-1762.
- [7] Bennour, Z., T. Ishida, Y. Nagaya, Y. Nara, Y. Chen, Q. Chen, Y. Nakayama, K. Sekine, and Y. Nagano. "Fracture development and mechanism in shale cores by viscous oil, water and L-CO 2 injection." In 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2014.
- [8] Lhomme, T. P., C. J. de Pater, and P. H. Helfferich. "Experimental study of hydraulic fracture initiation in Colton sandstone." SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. Society of Petroleum Engineers, 2002.
- [9] Detournay, Emmanuel E., and Alex E. Cheng. "Influence of pressurization rate on the magnitude of the breakdown pressure." The 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association, 1992.
- [10] Inui, S., T. Ishida, Y. Nagaya, Y. Nara, Y. Chen, and Q. Chen. "AE monitoring of hydraulic fracturing experiments in granite blocks using supercritical CO<sub>2</sub>, water and viscous oil." In 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2014.
- [11] Ishida, Tsuyoshi, Qu Chen, Yoshiaki Mizuta, and Jean-Claude Roegiers. "Influence of fluid viscosity on the hydraulic fracturing mechanism." Journal of energy resources technology 126, no. 3 (2004): 190-200.
- [12] Younessi, A., V. Rasouli, and B. Wu.