[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

مطالعهٔ آزمایشگاهی تأثیر شکل نمونه بر شکست هیدرولیکی، تحت شرایط تنش سه محوره

محمد داربر، هادی شاکری*

دانشگاه صنعتی سهند تبریز، دانشکدهٔ مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۹/۰۱/۱۶ پذیرش ۹۹/۰۶/۱۰

چکیده

شکست هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مصنوعی در سازندهایی با نفوذپذیری کم است. پارامترهای مختلفی مانند رژیم تنش‌ها، مقاومت کششی سنگ، مدول الاستیسیته، شدت جریان تزریق، نوع سیال شکست، ویسکوزیته سیال، فشار منفذی، مشبک‌کاری و تنش تفاضلی بر عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می گذارند. در بررسی‌های آزمایشگاهی، رژیم تنش‌ها و هندسه نمونه، از جمله عوامل مهم مؤثر بر شکست هیدرولیکی هستند. در این مقاله، پارامترهای مختلف عملیات شکست هیدرولیکی در ۳۹ نمونه مکعبی سیمانی و ۶۰ نمونه استوانه‌ای سیمانی تحت تنش‌های قائم و جانبی مختلف بررسی شده است. نتایج بررسی‌های آزمایشگاهی نشان داد، در هر دو نوع هندسه بررسی شده، تحت تنش تک‌محوره، با افزایش تنش قائم، ابتدا میانگین فشار شکست، افزایش و سپس کاهش می‌یابد. هم‌چنین، در نمونه استوانه‌ای تحت تنش سه‌محوره، با افزایش تنش قائم، ابتدا میانگین فشار شکست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد و در تنش‌های جانبی بالاتر، روند نزولی میانگین فشار شکست سریع تر رخ می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: شکست هیدرولیکی، تنش‌های برجا، هندسه نمونه، فشار شکست، هندسه شکست

مقدمه

شکست هیدرولیکی، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تحریک مخازن هیدروکربوری با نفوذپذیری کم است. این روش، به‌صورت صنعتی برای اولین بار در سال ۱۹۴۹ به‌وسیلهٔ کلارک معرفی شد [۱]. شکست هیدرولیکی، یک تکنیک رایج برای تخمین تنش‌های برجای

*نویسنده مسئول shakeri@sut.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

زمین و جهت آنها است [۲]. هم‌چنین، این روش، به‌صورت گسترده‌ای برای افزایش استفاده از انرژی ژئوترمال با ایجاد یا گسترش شبکه شکست در مخازن استفاده می‌شود [۳]. تحقیقات انجام شده نشان داده است، عملیات شکست هیدرولیکی، تولید چاه‌های نفتی را تا ۳۰ درصد و چاه‌های گازی را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهد [٤]. در حال حاضر، این عملیات، در حدود ٦۰ درصد تمام چاه‌های حفاری شده انجام می شود [٥].

پژوهش‌های زیادی روی عوامل مؤثر بر فشار شکست هیدرولیکی، شامل میدان تنش‌های برجا، درزه‌ها و شکستگی‌های طبیعی سازند، رئولوژی سیال، خواص مکانیکی سازند، شدت جریان سیال تزریقی و مشبک‌کاری انجام شده است. هایمسون و فیرهرست (۱۹٦۹)، با بررسی شکست هیدرولیکی روی نمونه‌های مصنوعی بلوکی از جنس هیدروستون (سیمان گچی) با تخلخل بالا نشان دادند که گسیختگی ایجاد شده در شکست هیدرولیکی از نوع کششی بوده است و با افزایش قطر چاه، فشار شکست کاهش یافته و نیز با افزایش نرخ فشار تزریق، فشار شکست افزایش می‌یابد [٦]. وارپینیسکی و همکاران (۱۹۸۲)، تأثیر تنش‌های برجا را بر نحوهٔ گسترش شکست بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد، در تنش محصور کنندهٔ پایین، فشار شکست کم بوده است و با افزایش تنش قائم برجا، فشار شکست افزایش می‌یابد و موجب گسترش شکست هیدرولیکی می‌شود [۷]. دوو و بویس (۱۹۸۹)، بررسی‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را روی نمونه‌های آماده شده از نمک با نسبت تنش برجای بین یک تا دو انجام دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که تنش انحرافی بر روی هندسه شکست مؤثر است [۸]. پاتر و همکاران (۲۰۰۰)، تأثیر پارامترهایی مانند شدت جریان سیال تزریقی، تنش تفاضلی، رژیم تنش و الگوی ناپیوستگی را روی شکست هیدرولیکی در بلوک‌های سیمانی با ناپیوستگی‌های مصنوعی بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد، با افزایش شدت جریان سیال تزریقی، هرزروی سیال کم‌تر می‌شود و هم‌چنین پیچاپیچی (*Tortuosity*) کم‌تری اتفاق می‌افتد. هم‌چنین، آنها نشان دادند که با افزایش تنش تفاضلی، شکاف ایجاد شده در راستای صفحه ترجیحی شکست (امتداد تنش افقی حداکثر) بوده است و برخورد کم‌تری با ناپیوستگی‌های مصنوعی دارد [۹]. بهلولی و پاتر (۲۰۰٦)، تأثیر تنش محصورکننده و رئولوژی سیال را بر شکست هیدرولیکی در سنگ‌های تحکیم نیافته بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد، در سیال نیوتونی ویسکوز و گل بنتونیت، هیچ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

شکستی ایجاد نمی‌شود، هم‌چنین با افزایش تنش‌های محصورکننده، نسبت فشار شکست به تنش افقی، کاهش می‌یابد [۱۰]. السون و همکاران (۲۰۱۱)، بررسی‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای تعیین هندسه و مکانیزم شکست در سازندهای نرم انجام دادند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد، در تنش قائم بالا، مکانیزم شکست غالباً برشی و در تنش قائم پایین، مکانیزم شکست غالباً کششی است [۱۱]. دمنی و همکاران (۲۰۱۲)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های تفاضلی بر جهت و فشار شکست هیدرولیکی در ماسه سنگ‌ها پرداختند. نتایج نشان داد، زمانی که تنش‌های تفاضلی پایین باشد، فشار شکست بالا است و راستای شکاف ایجاد شده توسط بافت خود سازند کنترل می‌شود. همچنین، در تنش های افقی بالا، شکست غالب، از نوع برشی و در تنش‌های افقی پائین، شکست غالب از نوع کششی است [۱۲]. بهنیا و همکاران (۲۰۱۳)، بررسی‌های آزمایشگاهی بر روند انتشار ترک‌های مصنوعی در عملیات شکست هیدرولیکی در سنگ‌های لایه‌ای انجام دادند نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که نوع ناپیوستگی و پرشدگی آن، تأثیر زیادی بر روند رشد شکست هیدرولیکی دارد. هم‌چنین، تغییر ویژگی‌های الاستیک لایه‌ها نیز می‌تواند بر چگونگی رشد ترک و هندسه آن مؤثر باشد [۱۳]. چیترالا و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های تفاضلی بر گسترش شکست هیدرولیکی در نمونه‌های ماسه سنگ پرداختند. نتایج نشان داد، وقتی تنش افقی حداکثر بالا باشد، فشار شکست کاهش یافته و هندسه شکست به‌صورت صفحه نازک و متقارن است [۱٤]. گوا و همکاران (۲۰۱٤)، آزمایش شکست هیدرولیکی را روی بلوک‌های شیلی تهیه شده از رخنمون شیلی سیچووان انجام دادند. در این آزمایش‌ها به بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال شکست، ویسکوزیته سیال، ضریب تنش تفاضلی افقی، تنش تفاضلی افقی، شکاف‌های طبیعی و لایه‌بندی بر شکست هیدرولیکی در چاه افقی پرداخته شد [۱۵]. شفائی‌زاده و همکاران (۲۰۱٤)، نشان دادند، با افزایش اختلاف تنش‌های برجای افقی در سنگ مخزن بنگستان اهواز، فشار شکست کاهش می‌یابد [۱٦]. قنبری و شمس (۲۰۱۵)، یک معیار تجربی برای پیش‌بینی شکست هیدرولیکی در هسته سدهای خاکی ارائه کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، در خاک‌های ریزدانه، فشار آغاز شکست، وابسته به تنش اصلی کمینه خاک است. هم‌چنین، آنها نشان دادند، یک ارتباط خطی بین فشار شکست هیدرولیکی و فشار جانبی وجود دارد. به‌علاوه، در نمونه‌های اشباع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

شده نسبت به نمونه‌هایی که اشباع نشده‌اند، فشار شکست هیدرولیکی کم‌تر است [۱۷]. عبدالهی پور و همکاران (۲۰۱۷)، عملیات شکست هیدرولیکی را در یک سازند ماسه سنگی در میدان گازی هیوگوتون آمریکا طراحی کردند [۱۸]. اکرمی و حسینی (۲۰۱۷)، ضمن بررسی سنگ‌های کربناته یکی از چاه‌های میدان نفتی اهواز، نشان دادند با افزایش تنش جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد ولی با تغییر تنش قائم، فشار شکست تغییر چندانی نمی‌کند [۱۹]. تن و همکاران (۲۰۱۷)، آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را روی زغال و شیل با استفاده از تجهیزات سه‌محوره واقعی انجام دادند [۲۰]. هو و همکاران (۲۰۱۷)، هندسه شکست هیدرولیکی را تحت تنش‌های سه‌محوره بررسی کردند و نتیجه گرفتند رشد ترک‌های ثانویه موازی با چاه شبیه‌سازی شده است [۲۱]. لکی روحانی و فرخنده (۲۰۱۸)، پارامترهای مؤثر بر فشار شکست را در آزمون شکست هیدرولیکی در سنگ آهک بررسی کردند و نشان دادند، با افزایش تنش افقی بزرگ‌تر، فشار شکست به‌صورت خطی کاهش می‌یابد و با افزایش تنش انحرافی (تفاضل تنش‌های افقی)، نرخ کاهش فشار شکست افزایش می‌یابد. هم‌چنین، هنگامی که تنش‌های افقی با یک‌دیگر برابر هستند با افزایش تنش قائم، فشار شکست افزایش می‌یابد [۲۲]. لیو و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر تنش‌های مختلف را روی رشد ترک و توزیع سه‌بعدی آن در سنگ‌های ناهمگن بررسی کردند و نتیجه گرفتند، تنش‌های برجا، نقش مهمی در گسترش ترک‌های اولیه دارند [۲۳]. دووان و همکاران (۲۰۱۸)، تأثیر نرخ تزریق و تنش‌های برجا را روی پارامترهای مختلف شکست هیدرولیکی با استفاده از نمونه‌های مکعبی توخالی بررسی کردند و نتیجه گرفتند، در تنش‌های برجای بالاتر، زمان تزریق بایستی طولانی‌تر باشد و فشار شکست نیز بیش‌تر است [۲٤]. داربر و شاکری (۲۰۱۹)، تأثیر تنش‌های برجا را در دو چاه قائم و افقی روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج پژوهش‌های آنها نشان داد با افزایش تنش افقی حداکثر در چاه قائم، فشار شکست، یک روند افزایشی- کاهشی و در چاه افقی، یک روند تقریباً کاهشی دارد [۲۵]. پن و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر تنش‌های اصلی متوسط را روی شکست هیدرولیکی در گرانیت، تحت تنش‌های سه‌محوری بررسی کردند و نشان دادند، تنش اصلی متوسط بالاتر، باعث می‌شود، صفحه شکست مستقیم و صفحه‌ای باشد و هنگامی که تنش اصلی متوسط مساوی با تنش اصلی حداقل می‌شود، صفحه شکست متأثر از ناهمگنی سنگ است [

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

۲۶]. لیو و همکاران (۲۰۲۰)، تأثیر تنش‌های برجای سه‌محوره و نیز نرخ‌های تزریق را بر روی فشار شکست نمونه‌های مکعبی از جنس ماسه سنگ بررسی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، هر چقدر اختلاف تنش‌های افقی بیش‌تر می‌شود، فشار شکست کاهش بیش‌تری پیدا می‌کند [۲۷].

هندسه نمونه، یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که باید در بررسی‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی بررسی شود. پژوهش‌های کمی، تأثیر شکل نمونه را تحت تنش‌های قائم تک‌محوره و تنش‌های سه‌محوره بر شکست هیدرولیکی بررسی کرده‌اند. در این مقاله، تأثیر شکل نمونه و رژیم تنش‌ها بر فشار و هندسه شکست هیدرولیکی بررسی شده است. بدین منظور، ۳۹ نمونه مکعبی سیمانی با اندازه ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و ٦۰ نمونه استوانه‌ای سیمانی با قطر ٥٤ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر ساخته شد و تأثیر هندسه نمونه و تنش‌های قائم و افقی حداکثر بر پارامترهای مختلف عملیات شکست هیدرولیکی شامل فشار شکست، هندسه شکست هیدرولیکی و نحوهٔ گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع بررسی شد.

تئوری شکست هیدرولیکی

در فرآیند شکست هیدرولیکی، برای غلبه بر تنش‌های برجا و مقاومت کششی سنگ، سیال شکست به داخل چاه تزریق می‌شود و با اعمال فشار، سبب ایجاد شکاف در سنگ مخزن می‌شود. این شکاف‌ها، مسیری را برای عبور هیدروکربن از سازند کم‌تراوا به داخل چاه ایجاد می‌کنند. بنابراین، فرآیند شروع شکست هیدرولیکی عمدتاً به فشار سیال چاه، خواص مکانیکی سازند، غالب شدن بر رژیم تنش‌های برجای سازند و جهت چاه بستگی دارد [۲۸]. تنش‌های برجا در سازندها را می‌توان به‌وسیلهٔ سه تنش متعامد σ_v در راستای قائم و σ_H و σ_h به‌ترتیب حداکثر و حداقل در راستاهای افقی متقابل دوگانه و متعامد، تعریف کرد. شکل ۱، سیستم تنش‌های برجا را در یک چاه شیب‌دار نشان می‌دهد. فشار لازم برای ایجاد شکاف در سازند، فشار شکست سازند نامیده می‌شود. این فشار، یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی عملیات شکست هیدرولیکی است. برای شکست سازند، باید بر تنش حداقل و مقاومت کششی سازند غلبه شود [۲۹]. معیار کلی برای شروع شکست کششی در سازند، عبارت است از:

$$\sigma_\theta - P_P = -T_0 \quad (۱)$$

که σ_θ: تنش مماسی، P_P: فشار منفذی و T_0: مقاومت کششی سازند است. فشار شکست سازند در چاه قائم از رابطهٔ (۲) به‌دست می‌آید [۲۸]:

$$P_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_P + T_0 \quad (۲)$$

که P_{wf}: فشار شکست سازند، σ_h: تنش افقی حداقل و σ_H: تنش افقی حداکثر است. معادله مذکور، مرز بالایی تخمین فشار شکست سازند را نشان می‌دهد. نفوذ سیال به داخل سازند، سبب افزایش فشار منفذی در مجاورت چاه می‌شود. افزایش فشار منفذی، تنش‌های مؤثر و فشار شکست سازند را کاهش می‌دهد. این فشار به‌عنوان مرز پایین فشار شکست تعریف می‌شود [۲۸]:

$$P_{wf,lower} = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - 2\eta P_P + T_0}{2(1-\eta)} \quad (۳)$$

که $P_{wf,lower}$: مرز پائین فشار شکست است و η: پارامتر وابسته به ضریب ثابت پروالاستیک α است و از رابطهٔ (٤) به‌دست می‌آید [۲۸]:

$$\eta = \frac{\alpha(1-2v)}{2(1-v)} \quad (٤)$$

که v: ضریب پواسون است. مقدار η به‌طور معمول ۰/۲۵ است و برای سنگ‌هایی با تخلخل مؤثر پایین، صفر است. استفاده از سیالات با ویسکوزیته پایین و یا تزریق سیال با شدت جریان پایین، سبب نفوذ سیال در سازند و کاهش فشار شروع شکست می‌شود.

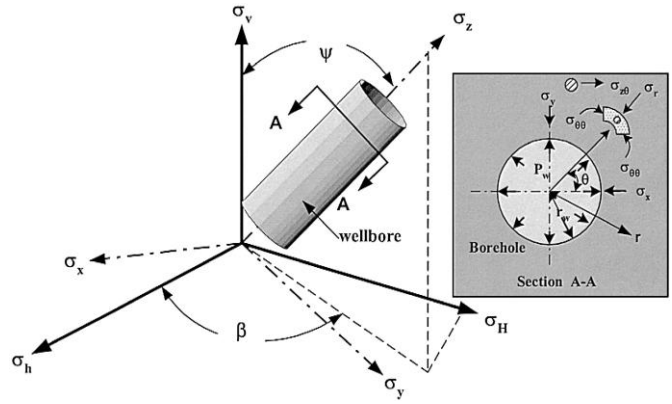
تنش‌های القایی مماسی که در دیواره چاه ایجاد می‌شوند، دارای مقادیر حداقل و حداکثر هستند. تنش مماسی حداقل در راستای تنش افقی حداکثر و عمود بر تنش افقی حداقل ایجاد می‌شود و تنش مماسی حداکثر در راستای تنش افقی حداقل و عمود بر راستای تنش افقی حداکثر ایجاد می‌شود. به همین علت رشد شکاف در راستای تنش افقی حداکثر و گسترش شکاف، عمود بر تنش افقی حداقل است. روابط تنش القایی مماسی بدین‌صورت است [۲۹]:

$$\sigma_{\theta,max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \qquad \theta = 90 \quad (۵)$$

$$\sigma_{\theta,min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \qquad \theta = 0 \quad (٦)$$

که $\sigma_{\theta,max}$: تنش مماسی حداکثر و $\sigma_{\theta,min}$: تنش مماسی حداقل و P_w: فشار سیال داخل چاه است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]



شکل ۱. سیستم تنش‌های برجا در یک چاه شیب دار (ψ: زاویه شیب چاه، β: زاویه انحراف چاه و θ: زاویهٔ بین محور x با تنش شعاعی) [۲۸]

علاوه بر روش‌های تئوری و آزمایشگاهی، روش‌های عددی المان مرزی (BEM)، المان مجزا (DEM) و ناپیوستگی جابه‌جایی (DDM)، نیز می‌توانند برای شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک در نمونه‌های سنگی و بتنی استفاده شوند. هم‌چنین، مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)، پیشنهاد شده به‌وسیلهٔ ایروین [۳۰] می تواند برای بررسی مکانیزم گسترش ترک در این نمونه‌ها استفاده شود. بر همین اساس، سه معیار شکست تنش مماسی حداکثر (معیار σ)، شدت انرژی حداقل (معیار S) و نرخ آزاد شدن انرژی حداکثر (معیار G)، یا شکل تصحیح شده آنها، می‌توانند برای بررسی شروع و گسترش ترک تحت شرایط بارگذاری مود I و II، که در بحث مکانیک شکست سنگ پرکاربردتر هستند، استفاده شوند. روش ناپیوستگی جابه‌جایی با مرتبهٔ بالا که جزء روش‌های المان مرزی غیرمستقیم است، یکی از روش‌های پرکاربرد برای بررسی گسترش ترک و مکانیزم شکست آن در مباحث شکست هیدرولیکی با شرایط مرزی خاص است [۳۱]، [۳۲].

مدل‌سازی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی

قبل از اجرای عملیات شکست هیدرولیکی، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف با استفاده از آزمایش های آزمایشگاهی، بسیار مفید است. برای این هدف، قبل از استفاده از نمونه‌های سنگی واقعی که ممکن است به‌راحتی در دسترس نباشند، بررسی‌های آزمایشگاهی، می‌تواند

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

روی نمونه‌های مصنوعی هدایت شود. در این تحقیق، به‌منظور بررسی تأثیر هندسه نمونه و رژیم تنش‌ها بر فشار و جهت شکست هیدرولیکی از نمونه‌های مصنوعی سیمانی استفاده شد. بدین‌منظور، ۳۹ نمونه مکعبی و ٦۰ نمونه استوانه‌ای سیمانی با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ و ماسه بادی با نسبت اختلاط ماسه به سیمان ۲ به ۱ ساخته شد.

۱. روش تهیه نمونه ها

برای تهیهٔ ۹۹ نمونه سیمانی از قالب‌های پلاستیکی مکعبی ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و قالب‌های پلی اتیلنی استوانه‌ای با قطر ٥٤ میلی‌متر و ارتفاع ۱٤۰ میلی‌متر استفاده شد. برای جلوگیری از تشکیل حباب در نمونه‌ها، مخلوط بتن در سه مرحله داخل قالب ریخته شد و در هر مرحله ۲٥ کوبش انجام شد. سپس نمونه‌ها به‌مدت ۲٤ ساعت در داخل قالب‌ها، عمل آوری اولیه شدند. نمونه‌های سیمانی برای گیرش و مقاوم‌سازی طبق استاندارد ASTM، پس از بیرون آوردن از قالب، به‌مدت ۷ روز داخل آب با دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. در ادامه، سطح آزاد نمونه‌ها با دستگاه برش صاف شده و برای سوراخ‌کاری آماده شد. به‌منظور تزریق سیال به داخل نمونه‌های سیمانی، نمونه‌ها در مرکز سطح مقطع، با استفاده از دستگاه سوراخ کاری و مته‌های ۷ میلی‌متری، سوراخ شدند (شکل ۲). بعد از سوراخ‌کاری، برای جلوگیری از نشت سیال تزریقی به هنگام آزمایش، از لوله‌های فلزی رزوه دار، با طول ۳۰ میلی‌متر و با قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۷ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۳). در ادامه، لوله‌های آماده شده به چاه شبیه‌سازی شده چسبانده شد تا از نشت سیال به‌هنگام آزمایش جلوگیری شود. چسب کاری لوله‌ها، طوری انجام شد که ۱٥ میلی‌متر از طول لوله فلزی درون نمونه قرار گیرد و ۱٥ میلی‌متر از آن بیرون از نمونه باشد. برای قائم چسباندن لوله‌های فلزی به نمونه‌های استوانه‌ای از قطعاتی استفاده شد که روی نمونه سوار شده و بعد از ۲٤ ساعت از روی نمونه‌های استوانه‌ای باز می‌شد (شکل ٤) و برای قائم چسباندن لوله‌های فلزی به نمونه‌های مکعبی از گونیا استفاده شد. شکل ٥، نمونه‌های سیمانی آماده شده برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد. هم‌چنین، جدول ۱، مشخصات نمونه‌های آماده شده برای انجام آزمایش را نشان می‌دهد.

جدول۱. مشخصات نمونه‌های سیمانی آماده شده برای انجام آزمایش

شکل نمونه	تعداد نمونه‌ها	درصد وزنی			ابعاد نمونه‌ها (mm)		قطر داخلی چاه شبیه سازی شده درون نمونه (mm)	عمق چاه شبیه‌سازی شده درون نمونه (mm)	طول لوله فلزی درون نمونه (mm)
		مماسه (٪)	سیمان (٪)	آب (٪)					
مکعبی	۳۹	۵۵	۲۷/۵	۱۷/۵	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰		۷	۷۰	۱۵
استوانه‌ای	٦۰	۵۵	۲۷/۵	۱۷/۵	قطر (mm) ٥٤	ارتفاع (mm) ۱۱۰	۷	۱۱۰	۱۵

۲. سیال آزمایش‌های شکست هیدرولیکی

در میان سیالات مختلف، سیال‌های بر پایهٔ آب، کاربرد بیش‌تری دارند [۳۳]. در نمونه‌های سیمانی آماده شده این پژوهش نیز، از آب به‌عنوان سیال شکست هیدرولیکی استفاده شد. در این سیال، برای مشاهده هرچه بهتر مسیر گسترش شکاف پس از انجام آزمایش و هم‌چنین برای تعیین دقیق‌تر برای شکست، از رنگ‌دانه مشکی، استفاده شد.

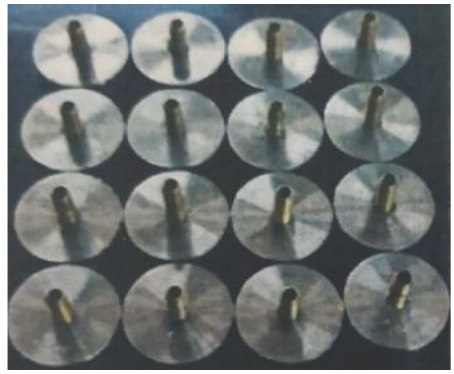


شکل۲. سوراخ کاری نمونه‌های سیمانی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

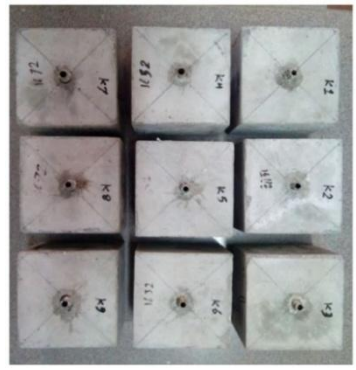


شکل۳. لوله‌های فلزی رزوه‌دار



شکل٤. قطعه‌های طراحی شده برای قائم چسباندن لوله‌های فلزی به نمونه‌های استوانه‌ای





شکل ۵. نمونه‌های سیمانی آماده شده برای آزمایش شکست هیدرولیکی

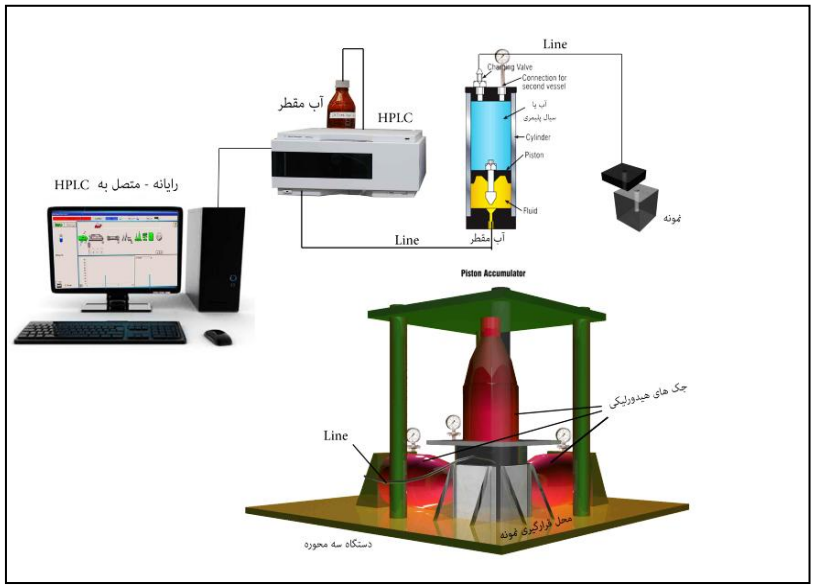
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

تجهیزات آزمایشگاهی

سیستم استفاده شده برای راه اندازی آزمایش در نمونه‌های مکعبی، شامل یک انباشتگر، دستگاه سه‌محوره، پمپ جابه‌جایی با شدت جریان ثابت HPLC و لوله‌های اتصالی است. دستگاه سه‌محوره برای اعمال تنش‌های برجا و نیز پمپ هیدرولیکی و انباشت‌گر برای انتقال سیال تحت فشار هیدرولیکی به داخل نمونه‌های سنگی استفاده می‌شوند. هم‌چنین، سیستم استفاده شده برای انجام آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای شامل یک انباشت‌گر، پمپ هیدرولیکی، دستگاه بارگذاری محوری همراه با سلول هوک و لوله‌های اتصالی است. شکل ٦، نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام عملیات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در این تحقیق را نشان می‌دهد. شکل ۷، دستگاه بارگذاری تک‌محوری و جانبی استفاده شده در نمونه‌های استوانه‌ای را نشان می‌دهد. برای بررسی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در نمونه‌های مکعبی، دستگاه سه‌محوره‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهم‌سانگرد برجای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارد. در دستگاه سه‌محوره استفاده شده در نمونه‌های مکعبی، با استفاده از سه جک دستی تعبیه شده در سه جهت متعامد، تنش‌های ناهم‌سانگرد به نمونه مورد نظر اعمال می‌شود. در شکل ۸، نمایی از دستگاه سه‌محوره ساخته شده مشاهده می‌شود. ظرفیت اعمال نیرو در یک جهت ٤٠ تن و در دو جهت دیگر ۳۰ تن است. برای اعمال تنش‌های مد نظر با دقت زیاد، هر کدام از جک‌های هیدرولیکی با استفاده از یک عدد لودسل با دقت ۱ نیوتن کالیبره شدند. برای هر میزان تنش اعمالی، می‌توان با رسم نمودار کالیبراسیون برای هر جک، فشار مورد نیاز را محاسبه کرد. برای ثابت نگه داشتن تنش‌های اعمالی، پکرهای جک‌های هیدرولیکی با نوع بسیار مرغوب تعویض شدند تا مشکل افت تنش اعمالی برطرف شود. برای طراحی دستگاه از لحاظ پایداری در برابر تنش‌های وارده، از نرم افزار آباکوس استفاده شد. برای ساخت دستگاه از فولاد St37 استفاده شد که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰,۳ است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]



شکل ٦. تجهیزات آزمایشگاهی و نحوهٔ اعمال تنش‌های برجا

خواص مکانیکی نمونه‌های آماده شده

برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های آماده شده از استاندارد ISRM (۲۰۰۷) [۳٤] استفاده شد. مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری ۵ نمونه آماده شده با قطر ٥٤ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵، با استفاده از آزمایش فشاری تک‌محوری سروکنترل، با نرخ بار ۲ kN/s، تعیین شد. هم‌چنین نمودارهای تنش-کرنش هر نمونه، ترسیم شده و مقادیر مدول الاستیک مماسی از روی منحنی تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. تعیین مقاومت کششی برای تحلیل نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت است. مقادیر مقاومت کششی برزیلی نیز با استفاده از ۱۰ نمونه NX با نسبت طول به قطر ۰٫۵، با نرخ بارگذاری ۰٫۲ kN/s تعیین شد. خواص مکانیکی نمونه‌های استوانه‌ای آماده شده برای آزمایش، در جدول ۲ آورده شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]



شکل ۷. نمایی از دستگاه بارگذاری تک‌محوری و جانبی استفاده شده در نمونه‌های استوانه‌ای



شکل ۸. نمایی از دستگاه سه‌محوره استفاده شده در نمونه‌های مکعبی

جدول ۲. خواص مکانیکی نمونه‌های استوانه‌ای سیمانی

نوع نمونه	مقاومت فشاری تک‌محوره (*MPa*)	مقاومت کششی (*MPa*)	مدول یانگ (*GPa*)
استوانه‌ای	۲۸/۸۶	۵/۶۵	۶/۲۲

بررسی تأثیر تنش‌های برجا و هندسه نمونه بر شکست هیدرولیکی

پارامترهای مختلفی مانند هندسه نمونه، شدت جریان تزریق، نوع سیال شکست، ویسکوزیته سیال، رژیم تنش‌ها، مقاومت کششی سنگ، مدول الاستیسیته، رژیم تنش اطراف چاه، فشار منفذی، مشبک‌کاری و تنش تفاضلی بر عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق، با استفاده از ۹۹ نمونه سیمانی آماده شده، به بررسی تأثیر هندسه نمونه و تغییر تنش‌های قائم و افقی حداکثر روی هندسه و فشار شکست و نحوهٔ گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع در عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، دو تکرار آزمایش برای اطمینان از نتایج به‌دست آمده انجام شده است.

۱. اثر تغییر تنش قائم در نمونه‌هایی با هندسه مختلف تحت تنش تک‌محوره

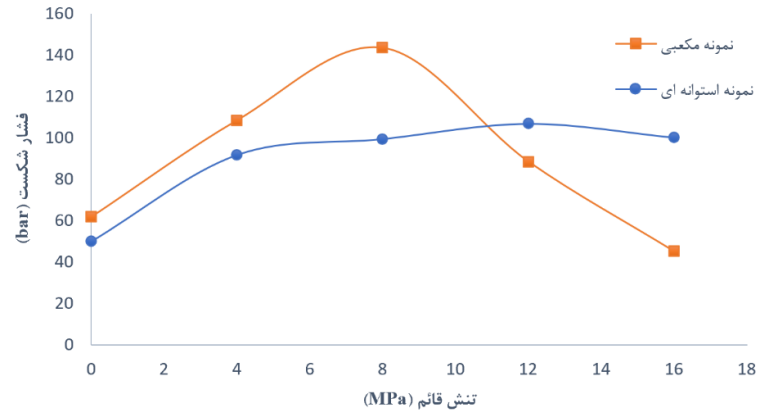
در ابتدا، تأثیر تغییر تنش قائم در چاه قائم بر فشار و هندسه شکست هیدرولیکی در نمونه‌هایی با هندسه مختلف بررسی شد. تنش محوری با نسبت ثابت افزایش یافت و بدون آن‌که نمونه تحت تنش جانبی قرار گیرد، آزمون‌ها انجام شد. ۱۵ نمونه سیمانی استوانه‌ای و ۱۵ نمونه سیمانی مکعبی برای بررسی‌های این بخش استفاده شد که نتایج آن در جداول ۳ و ٤ آورده شده است. شکل ۹، نحوهٔ تغییرات میانگین فشار شکست را در نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی برای تنش‌های قائم مختلف نشان می‌دهد. بررسی‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد، تغییر تنش قائم، تأثیر زیادی روی فشار و هندسه شکست دارد. در نمونه‌های مکعبی، با افزایش تنش قائم از صفر تا Mpa ۸، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۱۳۲ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش قائم از Mpa ۸ تا Mpa ١٦، میانگین فشار شکست حدود ٦٩ درصد کاهش یافت. در نمونه‌های استوانه‌ای، با افزایش تنش قائم از صفر تا Mpa ۱۲، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۱۱۳ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش قائم از Mpa ۱۲ تا Mpa ١٦، میانگین فشار شکست حدود ٦ درصد کاهش یافت. با افزایش تنش قائم تا یک مرزی، نمونه فشرده شده و خلل و فرج و ریزترک‌های داخل نمونه بسته می‌شود، بنابراین، مقاومت کششی و فشار شکست افزایش می‌یابد. سپس از یک مرز مشخصی به بعد، افزایش تنش قائم به‌عنوان عامل کمکی سبب باز شدگی بیش‌تر ریزترک‌ها و کاهش مقاومت کششی سنگ می‌شود. در این‌جا با ورود عامل خارجی به داخل سنگ که همان سیال شکست است؛ گسترش سریع‌تر ریز ترک‌ها و غلبه بر مقاومت کششی سنگ انجام می‌شود. در نتیجه فشار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

شکستی که برای شروع شکاف در این حالت لازم است، کاهش خواهد یافت، زیرا تنش قائم در این حالت به‌عنوان عاملی برای کاهش فشار شکست عمل می‌کند. شکل ۱۰، تأثیر تنش قائم بر هندسه شکست هیدرولیکی را در نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای نشان می‌دهد.

جدول ۳. نتایج حاصل از تغییر تنش قائم در نمونه‌های استوانه‌ای بر فشار شکست

شمارهٔ آزمایش	تنش قائم (*Mpa*)	فشار شکست (*bar*)	میانگین فشار شکست (*bar*)
۱	۰	۵۰	۵۰
۲	۰	۵۵	
۳	۰	٤٥	
٤	٤	۹۰	۹۱/٦۷
٥	٤	۹۰	
٦	٤	۹٥	
۷	۸	۹۰	۹۹/۳۳
۸	۸	۱۰۳	
۹	۸	۱۰٥	
۱۰	۱۲	۱۱٥	۱۰٦/٦۷
۱۱	۱۲	۹٥	
۱۲	۱۲	۱۱۰	
۱۳	۱٦	۱۰٥	۱۰۰
۱٤	۱٦	۹٥	
۱٥	۱٦	۱۰۰	



شکل ۹. مقایسهٔ میانگین فشار شکست نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

جدول ٤. نتایج حاصل از تغییر تنش قائم در نمونه‌های مکعبی بر فشار شکست

شمارهٔ آزمایش	تنش قائم (*Mpa*)	فشار شکست (*bar*)	میانگین فشار شکست (*bar*)
۱	۰	۵۰	٦۱/٦۷
۲	۰	۷۰	
۳	۰	٦۵	
٤	٤	۱۲۰	۱۰۸/۳۳
۵	٤	۹۵	
٦	٤	۱۱۰	
۷	۸	۱۵۰	۱٤۳/۳۳
۸	۸	۱٤۰	
۹	۸	۱٤۰	
۱۰	۱۲	۸۰	۸۸/۳۳
۱۱	۱۲	۱۰۰	
۱۲	۱۲	۸۵	
۱۳	۱٦	٤۰	٤۵
۱٤	۱٦	٤۵	
۱۵	۱٦	۵۰	





الف ب

شکل ۱۰. بررسی تأثیر تنش قائم بر هندسه شکست هیدرولیکی
الف). نمونهٔ مکعبی ب). نمونهٔ استوانه‌ای

مقایسهٔ تغییرات میانگین فشار شکست در نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی (شکل ۹)، نشان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

می‌دهد که مقادیر فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های مکعبی تا نقطه پیک نمودار، بیش‌تر از فشار شکست نمونه‌های استوانه‌ای است. با توجه به بزرگ‌تر بودن سطح قاعده نمونه‌های مکعبی نسبت به سطح قاعده نمونه‌های استوانه‌ای، اصطکاک بین فک‌های فشاری دستگاه و قاعده نمونه‌های مکعبی با افزایش تنش قائم، افزایش یافته و یک نیرویی برشی اضافی در سطوح بالا و پائین نمونه القا کرده است. در حالتی که تنش قائم بیش‌تر از تنش‌های جانبی باشد، صفحه شکست هیدرولیکی، به‌صورت قائم است، بنابراین، جهت بازشدگی صفحه شکست و تنش‌های برشی القا شده در سطوح بالا و پائین نمونه، مخالف یک‌دیگرند. در نمونه‌های مکعبی که اصطکاک در سطوح بالا و پائین نمونه بیش‌تر است، نیروی برشی بیش‌تر بوده و برای ایجاد شکست هیدرولیکی به فشار هیدرولیکی بیش‌تری نیاز است. اما در قسمت دوم نمودار، به‌علت تمرکز تنش بیش‌تر در نمونه‌های مکعبی نسبت به نمونه‌های استوانه‌ای، ریزترک‌ها و شکستگی‌ها در نمونه‌های مکعبی بیش‌تر از نمونه‌های استوانه‌ای است و موجب کاهش فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های مکعبی می‌شود.

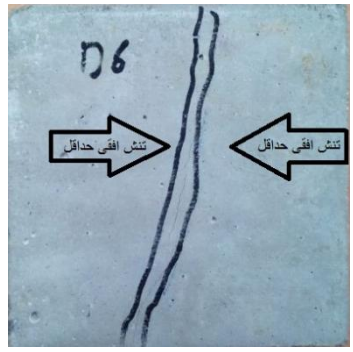
۲. اثر تغییر تنش افقی حداکثر در نمونه مکعبی تحت تنش سه‌محوری

برای بررسی تغییر تنش افقی حداکثر در چاه قائم بر شکست هیدرولیکی، در حالی‌که تنش‌های قائم و افقی حداقل ثابت هستند، از ۱۲ نمونه مکعبی سیمانی استفاده شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۵ ارائه شده است. با افزایش تنش افقی حداکثر از ۳ MPa تا ۵ MPa، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۹ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش افقی حداکثر از ۵ MPa تا ۹ MPa، میانگین فشار شکست حدود ۳۰ درصد کاهش یافت. از نظر تئوری، طبق رابطه‌های ۵ و ٦، با افزایش تنش افقی حداکثر، تنش القایی مماسی حداکثر افزایش می‌یابد و چون تنش القایی مماسی حداکثر، عمود بر راستای تنش افقی حداکثر است، برای رشد ترک در این راستا، فشار سیال متناظر با افزایش تنش مماسی حداکثر، افزایش می‌یابد. با افزایش تنش افقی حداکثر از ۵ MPa به ۹ MPa، علت کاهش فشار شکست می‌تواند به‌علت تمرکز تنش و کرنش بیش‌تر در راستای تنش افقی حداقل باشد. در شکل ۱۱، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، شکست ایجاد شده در این نمونه، دو باله متقارن است که در جهت تنش افقی حداکثر رشد کرده و در جهت عمود بر تنش افقی حداقل گسترش می‌یابد. هندسه غالب شکست، قائم است و

شکست در راستای محور چاه و تنش افقی حداکثر رشد می‌کند. هم‌چنین، با افزایش تنش افقی حداکثر، ترک‌های شاخه‌ای و کوتاه افزایش می‌یابد.

جدول ۵. نتایج حاصل از تغییر تنش افقی حداکثر در نمونه مکعبی بر فشار شکست (تنش قائم ۱۲ MPa)

شماره آزمایش	تنش قائم (*MPa*)	تنش افقی حداکثر (*MPa*)	تنش افقی حداقل (*MPa*)	فشار شکست (*bar*)	میانگین فشار شکست (*bar*)
۱	۱۲	۳	۲	۱۱۰	۱۱۱/٦۷
۲	۱۲	۳	۲	۱۱۰	
۳	۱۲	۳	۲	۱۱۵	
٤	۱۲	۵	۲	۱۲۵	۱۲۱/٦۷
۵	۱۲	۵	۲	۱۲۰	
٦	۱۲	۵	۲	۱۲۰	
۷	۱۲	۷	۲	۹۵	۹۸/۳۳
۸	۱۲	۷	۲	۱۰۵	
۹	۱۲	۷	۲	۹۵	
۱۰	۱۲	۹	۲	۸۵	۸۵
۱۱	۱۲	۹	۲	۸۰	
۱۲	۱۲	۹	۲	۹۰	



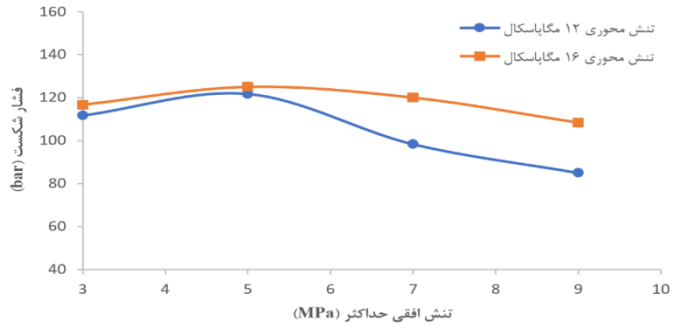
شکل ۱۱. تأثیر تنش افقی حداکثر در چاه قائم بر هندسه شکست نمونه مکعبی تحت تنش قائم ۱۲ MPa (آزمایش شمارهٔ ٦)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

۳. اثر تغییر تنش قائم در نمونه مکعبی تحت تنش سه‌محوری

برای بررسی تأثیر تنش قائم در چاه قائمی که تنش‌های جانبی نیز به آن وارد می‌شود، از ۲٤ نمونه مکعبی سیمانی در دو سری ۱۲ تایی استفاده شد. در سری اول، آزمایش‌ها تحت تنش قائم ۱۲ MPa، تنش افقی حداقل ۲ MPa و تنش افقی حداکثر بین ۳ MPa تا ۹ MPa انجام شد. نتایج آزمایش‌های این سری در بخش قبل بیان شد. در سری دوم، تنش‌های افقی جانبی مشابه سری اول است ولی تنش قائم به ۱٦ MPa افزایش یافت. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در سری دوم در جدول ٦ آمده است. در شکل ۱۲، میانگین فشار شکست نمونه‌های مکعبی با تنش‌های قائم ۱۲ MPa و ۱٦ MPa مقایسه شده است. با افزایش تنش قائم، از ۱۲ MPa به ۱٦ MPa، میانگین فشار شکست افزایش می‌یابد. به صورت میانگین، فشار شکست در نمونه‌ای تحت تنش قائم ۱٦ MPa، حدود ۱٤ درصد بیش‌تر از نمونه تحت تنش قائم ۱۲ MPa است. علت افزایش فشار شکست با افزایش تنش قائم در نمونه تحت تنش‌های جانبی، متراکم شدن، بسته شدن ریز ترک‌ها و افزایش مقاومت کششی نمونه است. بیش‌ترین اختلاف مقادیر فشار شکست در تنش‌های افقی بالاتر رخ می‌دهد. در تنش افقی حداکثر ۹ MPa، میانگین فشار شکست در نمونه‌ای تحت تنش قائم ۱٦ MPa، حدود ۲۷ درصد بیش‌تر از نمونه تحت تنش قائم ۱۲ MPa است. هندسه شکست ایجاد شده در این حالت نیز، قائم است و در راستای تنش افقی حداکثر است. هم‌چنین، صفحه شکست دربرگیرنده چاه است و به‌صورت دو باله متقارن است که تطابق خوبی با تئوری شکست هیدرولیکی دارد.



شکل ۱۲. مقایسهٔ میانگین فشار شکست نمونه‌های مکعبی تحت تنش‌های قائم مختلف

جدول ٦. نتایج حاصل از تغییر تنش افقی حداکثر در نمونه مکعبی بر فشار شکست (تنش قائم ١٦ MPa)

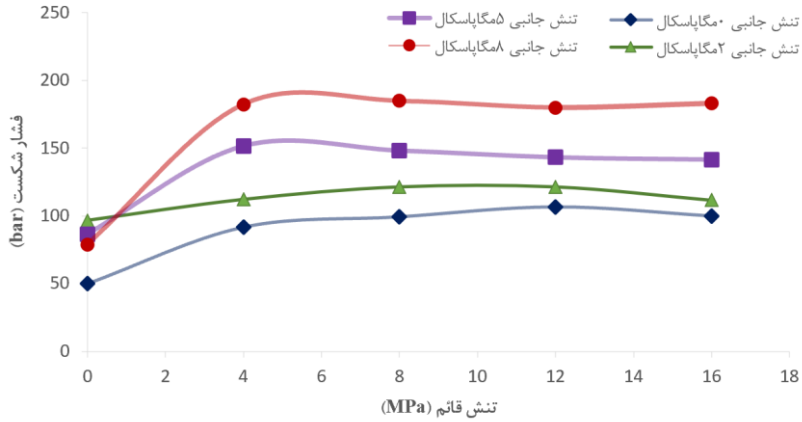
شماره آزمایش	تنش قائم (*MPa*)	تنش افقی حداکثر (*MPa*)	تنش افقی حداقل (*MPa*)	فشار شکست (*bar*)	میانگین فشار شکست (*bar*)
۱	١٦	۳	۲	۱۲۰	۱۱٦/٦۷
۲	١٦	۳	۲	۱۲۰	
۳	١٦	۳	۲	۱۱۰	
٤	١٦	٥	۲	۱۳۰	۱۲٥
٥	١٦	٥	۲	۱۲۰	
٦	١٦	٥	۲	۱۲٥	
۷	١٦	۷	۲	۱۱٥	۱۲۰
۸	١٦	۷	۲	۱۲۰	
۹	١٦	۷	۲	۱۲٥	
۱۰	١٦	۹	۲	۱۱٥	۱۰۸/۳۳
۱۱	١٦	۹	۲	۱۰٥	
۱۲	١٦	۹	۲	۱۰٥	

٤. اثر تغییر تنش قائم و تنش افقی حداکثر در نمونه استوانه‌ای

برای بررسی تأثیر تنش‌های سه‌محوره در چاه قائم بر فشار و جهت شکست هیدرولیکی نمونه‌های استوانه‌ای، ٦۰ آزمایش در چهار سری ۱٥ تایی انجام شد. در هر سری، تنش جانبی ثابت و تنش عمودی از صفر تا ١٦ MPa تغییر داده شد و هر آزمایش دو بار تکرار شد. در سری اول، تنش جانبی صفر، سری دوم ۲ MPa، سری سوم ٥ MPa و سری چهارم ۸ MPa بر نمونه استوانه‌ای اعمال شد. در شکل ۱۳، میانگین فشار شکست نمونه‌های استوانه‌ای در تنش‌های قائم صفر تا ١٦ MPa و تنش‌های جانبی صفر تا ۸ MPa مقایسه شده است. در هر سری با افزایش تنش قائم، ابتدا میانگین فشار شکست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش تنش‌های جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد به‌طوری که میانگین فشار شکست در تنش جانبی ۲ MPa نسبت به تنش جانبی صفر، حدود ٢٦ درصد، در تنش جانبی ٥ MPa نسبت به تنش جانبی ۲ MPa، حدود ۱۹ درصد و در تنش جانبی ۸ MPa نسبت به تنش جانبی ٥ MPa، حدود ۲۱ درصد افزایش می‌یابد. به‌علاوه در تنش‌های جانبی بالاتر، ریزترک‌ها در تنش‌های قائم پائین‌تری درون نمونه رخ

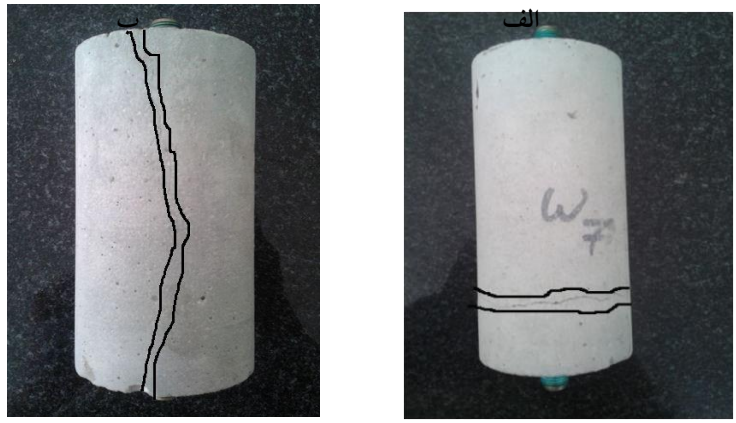
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

می‌دهند در نتیجه در تنش‌های جانبی بالاتر، روند نزولی میانگین فشار شکست سریع‌تر رخ می‌دهد. به‌عبارت دیگر، در تنش جانبی صفر، نقطه شروع ریزترک‌ها و یا پیک فشار شکست، تنش قائم MPa ۱۲، در تنش جانبی MPa ۲، نقطه شروع ریزترک‌ها و یا پیک فشار شکست، تنش قائم MPa ۱۰، در تنش جانبی MPa ۵، نقطه شروع ریزترک‌ها و یا پیک فشار شکست، تنش قائم MPa ۸ و در تنش جانبی MPa ۸، نقطه شروع ریزترک‌ها و یا پیک فشار شکست، تنش قائم MPa ٤ است. هندسه شکست نمونه‌های استوانه‌ای در شکل ١٤ الف و ب نشان داده شده است. هنگامی که تنش جانبی بیش‌تر از تنش قائم باشد، صفحه شکست همانند قسمت الف، عمود بر محور چاه و به‌صورت افقی و عرضی بوده است و در حالتی که تنش قائم بزرگ‌تر از تنش جانبی باشد مشابه شکل ب، در راستای محور نمونه و دربرگیرندهٔ چاه است.



شکل ۱۳. مقایسهٔ میانگین فشار شکست نمونه‌های استوانه‌ای تحت تنش‌های قائم و جانبی مختلف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]



شکل ١٤. هندسه شکست نمونه استوانه‌ای تحت تنش جانبی MPa ٨ ، الف) صفحه شکست عمود بر محور نمونه به‌صورت افقی و عرضی (تنش قائم MPa ٤)، ب) صفحهٔ شکست در راستای محور نمونه و دربرگیرنده محور چاه (تنش قائم MPa ١٦)

بحث

در صنعت نفت، وجود اطلاعات آزمایش‌های درون چاهی، گامی مهم در طراحی یک عملیات موفق شکست هیدرولیکی است. فرآیند شکست هیدرولیکی، شامل پمپاژ سیال با فشار بالا به درون چاه است، طوری‌که کشش ایجاد شده در سطح دیواره چاه، تنش‌های برجا (فشاری) را در سنگ تا حد بسیار زیادی کاهش دهد. بنابراین، مقادیر تنش‌های برجا، نقشی بسیار مؤثر در عملیات شکست هیدرولیکی دارند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این پژوهش، در عملیات شکست هیدرولیکی، با افزایش تنش‌های برجا، یک روند افزایشی-کاهشی، در مقادیر میانگین فشار شکست مشاهده می‌شود. این تغییرات فشار شکست بر روی طول و حجم عملیات شکست هیدرولیکی و نیز برنامه زمان‌بندی نحوهٔ پمپاژ سیال به درون چاه مؤثر است. نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده نشان داد، رفتار مواد شبه سنگی این پژوهش، نتایج بررسی‌های وارپینسکی و همکاران (۱۹۸۲)، روی بلوک‌های ماسه سنگ و توف، دوو و بویس (۱۹۸۹) روی نمونه‌های سنگ نمک، بهلولی و پاتر (۲۰۰٦) روی سنگ‌های تحکیم نیافته، دمنی و همکاران (۲۰۱۲) و چیترالا و همکاران (۲۰۱۳) روی بلوک‌های ماسه سنگ، قنبری و شمس (۲۰۱۵) روی سه نمونه خاک ریزدانه و نیز روحانی و فرخنده (۲۰۱۷) روی نمونه‌های سنگ آهک را تأیید می‌کند. پژوهش‌های انجام شده به‌وسیلهٔ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

وارپینیسکی و همکاران، دوو و بویس و نیز قنبری و شمس نشان داد، در تنش محصورکننده پائین، فشار شکست پایین است و با افزایش تنش‌های جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد. هم‌چنین بهلولی و پاتر، دمنی و همکاران، چیترالا و همکاران و روحانی و فرخنده نشان دادند، در تنش محصورکننده بالا، فشار شکست کاهش یافته و هندسه شکست به‌صورت صفحه نازک و متقارن است. بررسی‌های آزمایشگاهی این تحقیق با استفاده از مواد شبه سنگی نیز رفتار مواد سنگی بررسی‌های قبلی را تأیید می‌کند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق، با افزایش تنش افقی حداکثر در چاه قائم، فشار شکست، یک روند افزایشی-کاهشی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ۳۹ نمونه مکعبی و ٦۰ نمونه استوانه‌ای سیمانی ساخته شد و تأثیر هندسه نمونه و تنش‌های برجا بر پارامترهای مختلف عملیات شکست هیدرولیکی بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی انجام شده عبارت است از:

۱. تغییر تنش قائم در نمونه‌های تحت تنش تک‌محوری، تأثیر زیادی روی فشار شکست دارد. در هر دو نوع هندسه بررسی شده، با افزایش تنش قائم، ابتدا میانگین فشار شکست، افزایش و سپس از یک مرزی به بعد، با افزایش تنش قائم، میانگین فشار شکست کاهش یافت.

۲. مقایسه تغییرات میانگین فشار شکست در نمونه‌های استوانه‌ای و مکعبی تحت تنش تک‌محوری نشان می‌دهد که مقادیر فشار شکست هیدرولیکی در نمونه‌های مکعبی تا نقطه پیک نمودار، بیش‌تر از فشار شکست نمونه‌های استوانه‌ای است.

۳. با افزایش تنش افقی حداکثر در نمونه مکعبی تحت تنش‌های سه‌محوره، ابتدا میانگین فشار شکست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. هندسه غالب شکست، قائم بوده است و شکست در راستای محور چاه و تنش افقی حداکثر رشد می‌کند.

٤. در نمونه مکعبی تحت تنش‌های سه‌محوره، با افزایش تنش قائم، میانگین فشار شکست افزایش می‌یابد. هندسه شکست ایجاد شده، قائم است و در راستای تنش افقی حداکثر است. هم‌چنین، صفحه شکست دربرگیرنده چاه است و به‌صورت دو باله متقارن است

که تطابق خوبی با تئوری شکست هیدرولیکی دارد.

۵. بررسی‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان داد، در نمونه‌های استوانه‌ای تحت تنش سه محوره، با افزایش تنش قائم، ابتدا میانگین فشار شکست افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش تنش‌های جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد.

منابع

1. Clark J. B., "A hydraulic process for increasing the productivity of wells", Petroleum Transactions, AIME, 186 (1949) 1-8
2. Schmitt D. R., Zoback M. D., "Poroelastic effects in the determination of the maximum horizontal principal stress in hydraulic fracturing tests", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26 (1989) 499-506.
3. Ha S. J., Yun T. S., Kim K. Y., Jung S. G., "Experimental study of pumping rate effect on hydraulic fracturing of cement paste and mortar", Rock Mechanics and Rock Engineering, 50 (2017) 3115-3119.
4. Montgomery C. T., Smith M. B., "NSI technologies, hydraulic fracturing: history of an enduring technology", Technical Report JPT, JPT, (2010).
5. Smith M. B., Montgomery C. T., "Hydraulic fracturing", CRC Press, London, (2015).
6. Haimson B., Fairhurst C., "Hydraulic fracturing in porous-permeable materials", Journal of Petroleum Technology, 21 (1969) 811-817.
7. Warpinski N. R., Clark J. A., Schmidt R. A., Huddle C. W., "Laboratory investigation on the effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment", Society of Petroleum Engineers Journal, 22 (1982) 333-340.
8. Doe T. W., Boyce G., "Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses", International Journal of Rock

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

Mechanics and Mining Sciences, 26 (1989) 605-611.

9. Beugelsdijk J. L., de Pater C. J., Sato K., "Experimental hydraulic fracture propagation in a multi fractured medium", In the SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Yokohama, Japan, (2000).
10. Bohloli B., Pater C. J., "Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress", Journal of Petroleum Science and Engineering, 53 (2006) 1-12.
11. Olson J. E., Bahorich B., "Examining hydraulic fracture: Natural fracture interaction in hydrostone block experiments", In the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, USA, (2012).
12. Damani A., Sharma A., Sondergeld C. H., Rai C. S., "Mapping of hydraulic fractures under triaxial stress conditions in laboratory experiments using acoustic emissions", In the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, USA, (2012).
13. Behnia M., Goshtasbi K., Golshani A. A., Fatehi Marji M., "Experimental investigations of hydraulic fracturing propagation in multi-layer formation", Modares Civil Engineering Journal, 13 (2013) 13-25.
14. Chitrala Y., Moreno C., Sondergeld C., Rai C., "An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions", Journal of Petroleum Science and Engineering, 108 (2013) 151-161.
15. Guo T., Zhang S., Qu Z., Zhou T., Xiao Y., Gao J., "Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume", Fuel, 128 (2014) 373-380.
16. Shafaeizadeh I., Forouzan M., Faramarzi L., "Simulation of crack initiation and propagation in hydraulic fracturing of oil wellbore by

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]

[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

maximum principal stress criterion", Modares Mechanical Engineering, 14 (2014) 164-174.

17. Ghanbari A., Shams Rad S., "Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams", Acta Geotechnica, 10 (2015) 243-254.
18. Abdollahipour A., Soltanian H., Fatehi Marji M., Mortazavi S., "Field design of hydraulic fracturing in a sandstone formation (Case study: A vertical well in Hugoton gas field in the USA)", Journal of Petroleum Geomechanics, 1 (2017) 1-21.
19. Akrami A., Hosseini M., "Laboratory modeling of hydraulic fracturing", New Findings in Applied Geology, 11 (2017) 83-91.
20. Tan P., Jin Y., Hou B., Zheng X., Guo X., Gao J., "Experiments and analysis on hydraulic sand fracturing by an improved true tri-axial cell", Journal of Petroleum Science and Engineering, 158 (2017) 766-774.
21. Hou B., Chen M., Wan Ch., Sun T., "Laboratory studies of fracture geometry in multistage hydraulic fracturing under triaxial stresses", Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 53 (2017) 219-226.
22. Lakirouhani A., Farkhondeh S., "Effective parameters on breakdown pressure in hydraulic fracturing, modeling with finite difference method", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50 (2018) 557-566.
23. Liu Z., Wang S., Zhao H., Wang L., Li W., Geng Y., Tao S., Zhang G., Chen M., "Effect of random natural fractures on hydraulic fracture propagation geometry in fractured carbonate rocks", Rock Mechanics and Rock Engineering, 51 (2018) 491-511.
24. Duan K., Kwok C., Wu W., Jing L., "DEM modeling of hydraulic fracturing in permeable rock: influence of viscosity, injection rate and in situ states", Acta Geotechnica, 13 (2018) 1187-1202.
25. Darbor M., Shakeri H., "A laboratory study of the effects of stress

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]

regimes on hydraulic fracturing", Journal of Petroleum Geomechanics, 3 (2019) 45-59.

26. Pan P., Wu Z., Yan F., Ji W., Miao S., Wang Z., "Effect of the intermediate principal stress on hydraulic fracturing in granite: an experimental study", Environmental Earth Sciences, 79 (2020) 10.
27. Liu Z., Ren X., Lin X., Lian H., Yang L., Yang J., "Effects of confining stresses, pre- crack inclination angles and injection rates: observations from large- scale true triaxial and hydraulic fracturing tests in laboratory", Rock Mechanics and Rock Engineering, 53 (2020) 1991-2000.
28. Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S., "Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes", Journal of Petroleum Science and Engineering, 27 (2000) 129-149.
29. Fjar E., Holt R. M., Raaen A. M., Risnes R., Horsrud P., "Petroleum related rock mechanics", 2nd Edition, Elsevier Science publishers B.V, Netherlands, (2008).
30. Irwin G. R., "Analysis of stresses and strain near the end of crack traversing a plate", Journal of Applied Mechanics, 24 (1957) 361-364.
31. Haeri H., Khaloo A., Fatehi Marji M., "Experimental and numerical analysis of Brazilian discs with multiple parallel cracks", Arabian Journal of Geosciences, 8 (2015) 5897-5908.
32. Haeri H., Khaloo A., Fatehi Marji M., "Experimental and numerical simulation of the microcrack coalescence mechanism in rock-like materials", Strength of Materials, 47 (2015) 740-754.
33. Li X., Feng Z., Han G., Elsworth D., Marone C., Saffer D., Cheon D. S., "Breakdown pressure and fracture surface morphology of hydraulic fracturing in shale with H2O, CO2 and N2", Geomechanics and

Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2 (2016) 63-76.

34. Ulusay R., Hudson J. A., "Suggested methods prepared by the commission on testing methods", International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, (2007).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1400.15.1.6.1]
[DOI: 10.52547/jeg.15.1.67]