



مدل سازی فیزیکی و مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رژیم تنش ها بر شکست هیدرولیکی

محمد داربر؛ هادی شاکری*

۱. استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲. مربی؛ دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۵

(DOI):10.22107/jpg.2019.184733.1095

| واژگان کلیدی | چکیده |
|--|---|
| مدل سازی فیزیکی، شکست هیدرولیکی، رژیم تنش، فشار شکست، هندسه شکست | شکست هیدرولیکی یکی از مهم ترین روش های تحریک مخازن نفت و گاز است که برای افزایش جریان سیال از مخازن با تراوایی پایین به سمت چاه استفاده می شود. عوامل مختلفی همچون رژیم تنش ها، درزه ها و شکستگی های طبیعی سازند، رئولوژی سیال، خواص مکانیکی سازند، شدت جریان سیال تزریقی و مشبک کاری بر روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی تأثیر گذار هستند. در این تحقیق برای بررسی آزمایشگاهی تأثیر رژیم تنش ها بر شکست هیدرولیکی، با در نظر گرفتن شرایط مخزن، دستگاه سه محوره ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش های ناهمسانگرد بر جای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارا می باشد. سپس ۳۲ نمونه مکعبی سیمانی با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر ساخته شد و تأثیر رژیم تنش ها، بر روی هندسه و فشار شکست هیدرولیکی، نمودار فشار-زمان و نحوه گسترش ریزترک ها و شکستگی های متقاطع در دو حالت چاه قائم و افقی بررسی شد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داد، با افزایش تنش افقی حداکثر در چاه قائم، فشار شکست، یک روند افزایشی - کاهشی و در چاه افقی، فشار شکست، یک روند تقریباً کاهشی را نشان می دهد. در چاه قائم، تأثیر تنش افقی حداکثر بر روی فشار شکست، بیشتر از تنش قائم است؛ در حالی که در چاه افقی، تأثیر تنش قائم، بیشتر از تنش افقی است. همچنین با کاهش تنش تفاضلی افقی، در هر دو چاه قائم و افقی، ریزترک ها و ترک های شاخه ای کوتاه بیشتر می شود. بررسی های آزمایشگاهی این تحقیق با استفاده از مواد شبه سنگی، رفتار مواد سنگی مطالعات قبلی را تأیید می کند. |

۱. پیش گفتار

تحریک مخازن نفت و گاز استفاده می کنند. استفاده از تکنولوژی شکست هیدرولیکی در چاه های ذکر شده، باعث افزایش دو تا پنج برابری تولید شده است. تحقیقات انجام شده نشان می دهد عملیات شکست هیدرولیکی، تولید چاه های نفتی را تا ۳۰ درصد و چاه های گازی را تا ۹۰ درصد افزایش می دهد (Montgomeri & Smith, 2010).

مطالعات زیادی روی عوامل مؤثر بر فشار شکست هیدرولیکی، شامل رژیم تنش ها، درزه ها و شکستگی های طبیعی سازند، رئولوژی سیال، خواص مکانیکی سازند، شدت جریان سیال تزریقی و مشبک کاری انجام شده است. هایمسون و فیرهرست (۱۹۶۹)، با بررسی شکست هیدرولیکی بر روی نمونه های مصنوعی بلوکی از جنس هیدروستون

شکست هیدرولیکی به صورت صنعتی در سال ۱۹۴۹ توسط کلارک از شرکت نفت و گاز Stanolind معرفی شد (Clark, 1949). در دهه های گذشته، کاربرد این فناوری در مخازن با نفوذپذیری پائین، همچون شیل، گاز و ماسه سنگ سخت افزایش یافته است (API Technical Report, 2009; Fallahzadeh et al., 2015). شکست هیدرولیکی، به صورت گسترده ای برای افزایش استفاده از انرژی ژئوترمال با ایجاد یا گسترش شبکه شکست در مخازن استفاده می شود (Ha et al., 2017). در حال حاضر، بیش از نیمی از چاه های نفت و گاز آمریکا، از این فناوری استفاده می کنند. امروزه در منطقه آمریکای شمالی، در حدود ۵۸ درصد از چاه های گازی و ۳۸ درصد از چاه های نفتی، از شکستگی های مصنوعی، برای

به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های تفاضلی بر روی جهت و فشار شکست هیدرولیکی در ماسه سنگ‌ها پرداختند. نتایج نشان داد، زمانی که تنش‌های تفاضلی پایین باشد، فشار شکست بالا بوده و راستای شکاف ایجاد شده توسط بافت خود سازند کنترل می‌شود. همچنین در تنش‌های افقی بالا، شکست غالب، از نوع برشی و در تنش‌های افقی پائین، شکست غالب از نوع کششی است (Damani et al., 2012). بهنیا و همکاران (۲۰۱۳)، مطالعات آزمایشگاهی بر روی روند انتشار ترک‌های مصنوعی در عملیات شکست هیدرولیکی در سنگ‌های لایه‌ای انجام دادند (Behnia et al., 2013). نتایج مطالعات 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. چیتراالا و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های تفاضلی بر روی گسترش شکست هیدرولیکی در نمونه‌های ماسه‌سنگ پرداختند. نتایج نشان داد، وقتی تنش افقی حداکثر بالا باشد، فشار شکست کاهش یافته و هندسه شکست به صورت صفحه نازک و متقارن است (Chitralla et al., 2013). جلیلی و آهنگری (۲۰۱۷)، هندسه شکست هیدرولیکی را در رژیم‌های تنشی مختلف مطالعه کردند و نشان دادند که در یک فشار شکست معین، عرض و ارتفاع شکاف، در رژیم تنشی نرمال، بیشتر از رژیم تنشی معکوس است؛ در حالی که طول شکاف در رژیم تنشی معکوس، بیشتر از رژیم تنشی نرمال است (Jalili & Ahangari, 2017).

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با استفاده از علم مکانیک شکست سنگ برای مدل‌سازی مکانیزم انتشار ترک‌ها و شکستگی‌های مصنوعی در سنگ مخزن و هم‌چنین برخورد این ترک‌ها با شکستگی‌های طبیعی موجود در سنگ انجام شده است. حسینی‌نسب و فاتحی‌مرجی (۲۰۰۷) و فاتحی‌مرجی (۲۰۱۳، ۲۰۱۴) و (۲۰۱۵) با استفاده از روش المان مرزی غیرمستقیم و روش ناپیوستگی جابجایی، به بررسی انتشار و انشعاب ترک‌ها در سنگ تحت شرایط شبه استاتیکی پرداخته‌اند (Hosseini Nasab & Fatehi Marji, 2007; Fatehi Marji, 2013, 2014 & 2015). حائری و همکاران (۲۰۱۴) و حائری و

(سیمان گچی) با تخلخل بالا نشان دادند که گسیختگی ایجاد شده در شکست هیدرولیکی از نوع کششی بوده و با افزایش قطر چاه، فشار شکست کاهش یافته و نیز با افزایش نرخ فشار تزریق، فشار شکست افزایش می‌یابد (Haimson & Fairhurst, 1969). وارپینسکی و همکاران (۱۹۸۲)، تأثیر رژیم تنش‌ها را بر نحوه گسترش شکست بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، در تنش محصور کننده پائین، فشار شکست پایین بوده و با افزایش تنش‌های جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد و موجب گسترش شکست هیدرولیکی می‌شود (Warpinski et al., 1969). دوو و بویس (۱۹۸۹)، مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های آماده شده از نمک با نسبت تنش بر جای بین یک تا دو انجام دادند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که تنش انحرافی بر روی هندسه شکست مؤثر است (Doe & Boyce, 1989). پاتر و همکاران (۲۰۰۰)، تأثیر پارامترهایی همچون شدت جریان سیال تزریقی، تنش تفاضلی، رژیم تنش و الگوی ناپیوستگی را بر روی شکست هیدرولیکی در بلوک‌های سیمانی با ناپیوستگی‌های مصنوعی بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، با افزایش شدت جریان سیال تزریقی، هرزروی سیال کمتر می‌شود و همچنین پیچاپیچی^۱ 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 و برخورد کمتری با ناپیوستگی‌های مصنوعی دارد (Beugelsdijk et al., 2000).

بهلولی و پاتر (۲۰۰۶)، تأثیر تنش محصور کننده و رئولوژی سیال را بر روی شکست هیدرولیکی در سنگ‌های تحکیم نیافته بررسی کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، در سیال نیوتونی ویسکوز و گل بنتونیت، هیچ شکستی ایجاد نمی‌شود؛ همچنین با افزایش تنش‌های محصور کننده، نسبت فشار شکست به تنش افقی، کاهش می‌یابد (Bohlooli & de Pater, 2006). السون و همکاران (۲۰۱۱)، مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای تعیین هندسه و مکانیزم شکست در سازندهای نرم انجام دادند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد، در تنش قائم بالا، مکانیزم شکست غالباً برشی و در تنش قائم پایین، مکانیزم شکست غالباً کششی است (Olson & Bahorich, 2012). دمنی و همکاران (۲۰۱۲)،

¹Tortuosity

۲. تئوری شکست هیدرولیکی

در فرآیند شکست هیدرولیکی، برای غلبه بر رژیم تنش‌ها 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 کم تراوا 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 (Hossain et al., 2000).

فشار لازم جهت ایجاد شکاف در سازند، فشار شکست سازند نامیده می‌شود. این فشار یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی عملیات شکست هیدرولیکی است. برای شکست سازند، بایستی بر تنش حداقل و مقاومت کششی سازند غلبه شود (Fjar et al., 2008). معیار کلی برای شروع شکست کششی در سازند، عبارت است از:

$$\sigma_{\theta} - P_p = -T_0 \quad (1)$$

که σ_{θ} : تنش مماسی، P_p : فشار منفذی و T_0 : مقاومت کششی سازند است. تنش‌های برجا در سازندها را می‌توان به وسیله سه تنش متعامد σ_V در راستای قائم و σ_H و σ_h به ترتیب حداکثر و حداقل در راستاهای افقی متقابل دوگانه و متعامد، تعریف کرد. سیستم‌های گسل زمین‌شناسی اغلب بر اساس تئوری‌های شکست برشی موهر و کلمب تعریف و بر اساس اندازه نسبی تنش‌های اصلی طبقه‌بندی می‌شوند. بسته به مقادیر نسبی σ_V ، σ_H و σ_h ، سه نوع رژیم تنشی گسل نرمال ($\sigma_V > \sigma_H > \sigma_h$)، گسل لغزشی ($\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$) و گسل معکوس ($\sigma_H > \sigma_h > \sigma_V$) تعریف می‌شود (Hossain et al., 2000). زمانی که یک چاه در داخل سازند حفاری می‌شود؛ توده سنگ تحت تنش، به وسیله هر یک از سه رژیم تنش ذکر شده، حفاری شده و با سیال تحت فشار جایگزین می‌شود. شکل ۱، سیستم تنش‌های برجا را در یک چاه شیب‌دار نشان می‌دهد. فشار شکست سازند در چاه قائم از رابطه زیر به دست می‌آید (Hossain et al., 2000):

$$P_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + T_0 \quad (2)$$

که P_{wf} : فشار شکست سازند، σ_h : تنش افقی حداقل و σ_H : تنش افقی حداکثر است. معادله فوق، مرز بالایی تخمین فشار شکست سازند را نشان می‌دهد. نفوذ سیال به داخل سازند، سبب افزایش فشار منفذی در مجاورت چاه می‌شود. افزایش

همکاران (۲۰۱۵ الف و ۲۰۱۵ ب) گسترش ترک‌ها را با استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی و آزمایش‌های آزمایشگاهی در نمونه‌های شبه‌سنگی، شبیه‌سازی نمودند (Haeri et al., 2014; Haeri et al., 2014a & 2015b). عبداللهی پور و همکاران (۲۰۱۶) و مرادی و همکاران (۲۰۱۷) و (۲۰۱۸) به شبیه‌سازی مکانیزم انتشار ترک‌های مصنوعی در عملیات شکست هیدرولیکی و برخورد آن‌ها با شکستگی‌های طبیعی سنگ بر مبنای روش ناپیوستگی جابجایی پرداخته‌اند (Abdollahipour et al., 2016; Moradi et al., 2017) (& 2018). اخیراً، بخشی و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از روش المان مجزا، انتشار ترک‌ها در محیط سنگی متخلخل را مطالعه کرده‌اند (Bakhshi et al. 2019).

هندسه شکست، یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که در مطالعات شکست هیدرولیکی بایستی بررسی شود. معمولاً برای رژیم‌های تنشی که نرمال نیستند، پیش‌بینی هندسه شکست هیدرولیکی، پیچیده و مشکل است. قبل از طراحی شکست هیدرولیکی، دانستن امتداد و هندسه عمومی شکست هیدرولیکی القاء شده بسیار مهم است. اگر شکست هیدرولیکی القاء شده به صورت افقی گسترش یابد، اما محاسبات راندمان چاه بر پایه هندسه و امتداد قائم شکست باشد؛ نتایج می‌تواند دچار اشکال شود. به عبارت دیگر، اگر در گام طراحی عملیات شکست هیدرولیکی در رژیم تنشی معکوس، شکستگی‌های افقی، قائم فرض شوند؛ راندمان و بهره‌وری چال هم از لحاظ فنی و هم از نظر اقتصادی درست تعیین نخواهد شد. در این مقاله، تأثیر رژیم تنش‌ها بر روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی مطالعه شده است. بدین منظور دستگاه سه محوره‌ای با قابلیت اعمال هر سه مؤلفه تنش اصلی، طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهمسانگرد بر جای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارا می‌باشد. در ادامه با استفاده از مدل سازی فیزیکی، ۳۲ نمونه مکعبی سیمانی، با اندازه ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر ساخته شد و تأثیر تغییر تنش‌های قائم و تنش‌های افقی حداکثر در دو چاه قائم و افقی بر پارامترهای مختلف عملیات شکست هیدرولیکی شامل فشار شکست، هندسه شکست هیدرولیکی، نمودار فشار-زمان و نحوه گسترش ریزترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع بررسی شد.

برای $\theta = 90^\circ$ و رژیم‌های تنش‌ی گسل معکوس و لغزشی، مرزهای بالایی و پائینی فشار شکست سازند از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_{wf} = 3\sigma_v - \sigma_H - P_p + T_0 \quad (۸)$$

$$P_{wf,lower} = \frac{3\sigma_v - \sigma_H - 2\eta P_p + T_0}{2(1-\eta)} \quad (۹)$$

مرزهای بالایی و پائینی فشار شکست سازند در چاه افقی، برای $\beta = 90^\circ$ یعنی زمانی که محور چاه در راستای تنش افقی حداکثر است، برای رژیم‌های تنش‌ی گسل نرمال و لغزشی از روابط ۱۰ و ۱۱ و برای رژیم تنش‌ی گسل معکوس از روابط ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آیند (Hossain et al., 2000):

$$P_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_v - P_p + T_0 \quad (۱۰)$$

$$P_{wf,lower} = \frac{3\sigma_h - \sigma_v - 2\eta P_p + T_0}{2(1-\eta)} \quad (۱۱)$$

$$P_{wf} = 3\sigma_v - \sigma_h - P_p + T_0 \quad (۱۲)$$

$$P_{wf,lower} = \frac{3\sigma_v - \sigma_h - 2\eta P_p + T_0}{2(1-\eta)} \quad (۱۳)$$

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 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 به صورت زیر می‌باشد (Fjar et al., 2008):

$$\sigma_{\theta,max} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_w \quad \theta = 90 \quad (۱۴)$$

$$\sigma_{\theta,min} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_w \quad \theta = 0 \quad (۱۵)$$

فشار منفذی، تنش‌های مؤثر و فشار شکست سازند را کاهش می‌دهد. این فشار به عنوان مرز پایین فشار شکست تعریف می‌شود (Hossain et al., 2000):

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

که $P_{wf,lower}$: مرز پائین فشار شکست و η پارامتر وابسته به ضریب ثابت پرولاستیک α می‌باشد و از رابطه زیر به دست می‌آید (Hossain et al., 2000):

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad (۴)$$

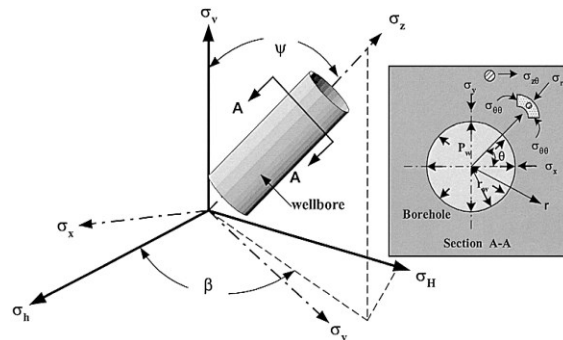
که ν : ضریب پواسون است. مقدار η به طور معمول ۰/۲۵ می‌باشد و برای سنگ‌هایی با تخلخل مؤثر پایین صفر است. استفاده از سیالات با ویسکوزیته پایین و یا تزریق سیال با شدت جریان پایین، سبب نفوذ سیال در سازند و کاهش فشار شروع شکست می‌شود. فشار شکست سازند در چاه افقی، برای $\beta = 0^\circ$ یعنی زمانی که محور چاه در راستای تنش افقی حداقل و تنش قائم در راستای محور x است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{wf} = \sigma_v + \sigma_H - 2(\sigma_v - \sigma_H) \cos 2\theta - P_p + T_0 \quad (۵)$$

که θ : زاویه بین محور x با تنش شعاعی است و به رژیم تنش وابسته است. برای $\theta = 0^\circ$ و رژیم تنش‌ی گسل نرمال، مرزهای بالایی و پائینی فشار شکست سازند از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$P_{wf} = 3\sigma_H - \sigma_v - P_p + T_0 \quad (۶)$$

$$P_{wf,lower} = \frac{3\sigma_H - \sigma_v - 2\eta P_p + T_0}{2(1-\eta)} \quad (۷)$$



شکل ۱. سیستم تنش‌های برجا در یک چاه شیب‌دار (ψ : زاویه شیب چاه، β : زاویه انحراف چاه و θ : زاویه بین محور x با تنش شعاعی) (Hossain et al., 2000)

۳. مدل‌سازی فیزیکی شکست هیدرولیکی

قبل از اجرای عملیات شکست هیدرولیکی، بررسی تأثیر پارامترهای مختلف با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی، بسیار مفید است. برای این هدف، قبل از استفاده از نمونه‌های سنگی واقعی که ممکن است به راحتی در دسترس نباشند، بررسی‌های آزمایشگاهی، می‌تواند روی نمونه‌های مصنوعی هدایت شود. در این تحقیق نیز، به منظور بررسی تأثیر تنش‌های برجا و رژیم تنش‌ها بر روی فشار و جهت شکست هیدرولیکی از نمونه‌های مصنوعی سیمانی استفاده شد. بدین منظور، نمونه‌های مکعبی سیمانی با استفاده از سیمان پرتلند تیپ ۲ و ماسه بادی با نسبت اختلاط ماسه به سیمان ۲ به ۱،۵ ساخته شد. استفاده از نمونه‌های مکعبی، امکان اعمال هر سه مؤلفه تنش را فراهم می‌کند.

۱.۳ روش آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه ۳۲ نمونه سیمانی از قالب‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتیمتر استفاده شد. پس از مخلوط کردن کامل سیمان و ماسه‌بادی، آب به مخلوط اضافه شد، سپس نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل قالب‌ها، عمل‌آوری اولیه شدند. بلوک‌های سیمانی برای گیرش و مقاوم‌سازی طبق استاندارد *ASTM*، پس از بیرون آوردن از قالب، به مدت ۱۴ روز داخل آب قرار گرفتند. در ادامه سطح آزاد نمونه‌ها با دستگاه برش صاف شده و برای سوراخ‌کاری آماده شد. به

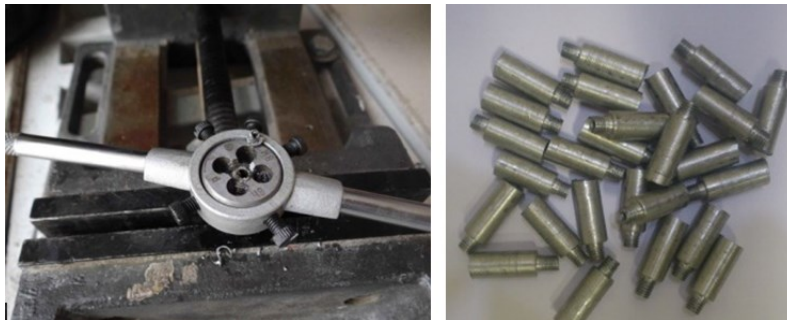
منظور تزریق سیال به داخل نمونه‌های سیمانی، نمونه‌ها در مرکز سطح مقطع، با استفاده از دستگاه سوراخ‌کاری و مته‌های ۸ میلی‌متری، سوراخ شدند (شکل ۲). بعد از سوراخ‌کاری، برای جلوگیری از نشت سیال تزریقی به هنگام آزمایش، از لوله‌های فلزی استفاده شد. برای تهیه لوله‌های فلزی از پروفیل آلومینیوم به طول ۳۵ میلی‌متر با روزنه‌ای به قطر ۳ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۳-الف). قسمتی از لوله با استفاده از ابزار حديدیه گردان (شکل ۳-ب) رزوه‌کاری شد تا به صفحه بالایی دستگاه برای انجام تزریق متصل شود. در ادامه لوله‌های آماده شده به چاه شبیه‌سازی شده چسبانده شد تا از نشت سیال به هنگام آزمایش جلوگیری شود. شکل ۴، نمونه‌های سیمانی آماده شده برای انجام آزمایش شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهد.

۲.۳ سیال شکست هیدرولیکی

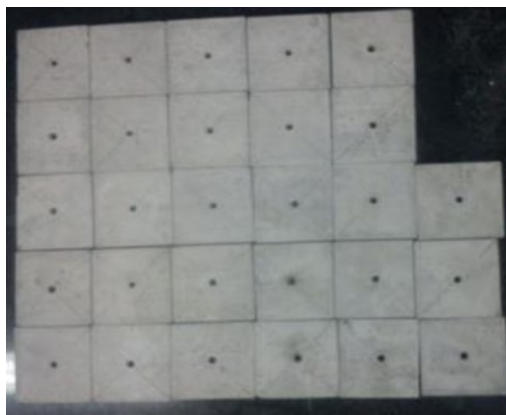
در میان سیالات مختلف، سیال‌های بر پایه آب، کاربرد بیشتری دارند (*Li et al., 2016*). در نمونه‌های سیمانی آماده شده این مطالعه نیز، از آب به عنوان سیال شکست هیدرولیکی استفاده شد. در این سیال، برای مشاهده هر چه بهتر مسیر گسترش شکاف پس از انجام آزمایش و همچنین برای تعیین دقیق‌تر جهت شکست، از رنگ‌دانه مشکی، استفاده شد.



شکل ۲. سوراخ‌کاری نمونه‌های سیمانی



شکل ۳. الف). لوله‌های آلومینیومی (ب). ابزار جدید کاری



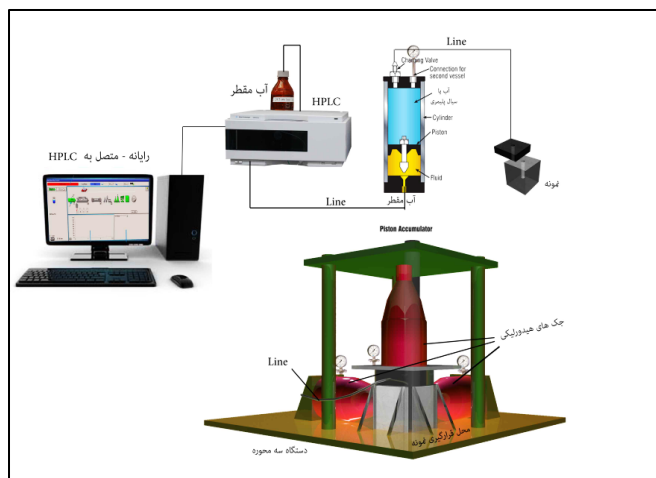
شکل ۴. نمونه‌های سیمانی آماده شده برای آزمایش شکست هیدرولیکی

۴. تجهیزات آزمایشگاهی

برای مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، دستگاه سه محوره‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهمسانگرد بر جای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارا می‌باشد. سیستم استفاده شده برای راه‌اندازی آزمایش، شامل یک انبساطگر، دستگاه سه محوره، پمپ جابجایی با شدت جریان ثابت *HPLC* و لوله‌های اتصالی است. دستگاه سه محوره برای اعمال تنش‌های برجا و نیز پمپ هیدرولیکی و انبساطگر برای انتقال سیال تحت فشار هیدرولیکی به داخل نمونه‌های سنگی استفاده می‌شوند. شکل ۵، نمایی از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده برای انجام عملیات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این دستگاه، با استفاده از سه جک دستی تعبیه شده در سه جهت متعامد، تنش‌های ناهمسانگرد به نمونه

مورد نظر اعمال می‌شود. ظرفیت اعمال نیرو در یک جهت ۴۰ تن و در دو جهت دیگر ۳۰ تن می‌باشد. برای اعمال تنش‌های مد نظر با دقت بالا، 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. جهت ثابت نگه داشتن تنش‌های اعمالی، پکرها‌ی جک‌های هیدرولیکی با نوع بسیار مرغوب تعویض شدند تا مشکل افت تنش اعمالی برطرف شود. در شکل ۶، نمایی از دستگاه ساخته شده مشاهده می‌شود. برای طراحی دستگاه از لحاظ پایداری در برابر تنش‌های وارده، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. برای ساخت دستگاه از فولاد *S137* استفاده شد که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ می‌باشد.

مدل سازی فیزیکی و مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رژیم تنش ها بر شکست هیدرولیکی



شکل ۵. تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه اعمال تنش های برجا



شکل ۶. نمایی از دستگاه سه محوره

۵. خواص مکانیکی نمونه های آماده شده

شد. تعیین مقاومت کششی برای تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش های شکست هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت می باشد. مقادیر مقاومت کششی برزیلی نیز با استفاده از ۱۰ نمونه NX با نسبت طول به قطر ۰/۵، با نرخ بارگذاری kN/s ۰/۲ تعیین شد. خواص مکانیکی نمونه های سیمانی آماده شده برای آزمایش، در جدول ۱ آورده شده است.

برای تعیین خواص مکانیکی نمونه های آماده شده از استاندارد $ISRM$ (۲۰۰۷) استفاده شد. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری ۵ نمونه آماده شده با قطر ۵۴ میلی متر و نسبت طول به قطر ۲/۵، با استفاده از آزمایش فشاری تک محوری سرو کنترل، با نرخ بار kN/s ۲، تعیین شد. همچنین نمودارهای تنش- کرنش هر نمونه، ترسیم شده و مقادیر مدول الاستیک مماسی از روی منحنی تنش-کرنش هر یک از نمونه ها تعیین

جدول ۱. خواص مکانیکی نمونه های سیمانی

| مدول یانگ (GPa) | مقاومت کششی (MPa) | مقاومت فشاری تک محوره (MPa) | نوع نمونه |
|---------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| ۴/۶۰ | ۵/۰۸ | ۲۸/۷۱ | سیمانی |

۶. مطالعه تأثیر رژیم تنش‌ها بر عملیات

شکست هیدرولیکی

پارامترهای مختلفی همچون شدت جریان تزریق، نوع سیال شکست، ویسکوزیته سیال، رژیم تنش‌ها، مقاومت کششی سنگ، مدول الاستیسیته، رژیم تنش اطراف چاه، فشار منفذی، مشبک کاری و تنش تفاضلی بر عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. در این تحقیق، با استفاده از ۳۲ نمونه سیمانی آماده شده، به بررسی تأثیر تغییر تنش‌های قائم و افقی حداکثر بر روی هندسه و فشار شکست، نمودار فشار-زمان و نحوه گسترش ریزترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع در عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، یک تکرار آزمایش برای اطمینان از نتایج به دست آمده انجام شده است.

۱.۶ اثر تغییر تنش قائم در چاه قائم

در ابتدا، تأثیر افزایش تنش قائم بر چاه قائم بر روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی، در حالی که تنش‌های افقی ثابت هستند، بررسی شد. ۸ نمونه سیمانی برای مطالعات این بخش استفاده شد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. علت اختلاف نتایج فشار شکست در بعضی موارد، بین هر زوج از آزمایش‌ها، تعداد تکرار ۲ بار در این تحقیق، با توجه به محدودیت‌های موجود بوده است. معیار اصلی در انتخاب جواب صحیح، به دست آوردن روند منطقی در هر آزمایش بوده و میانگین گیری برای کلیه آزمایش‌ها انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی نشان داد، تغییر تنش قائم، تأثیر زیادی بر روی فشار و هندسه شکست دارد. با افزایش تنش قائم از

$10/3 \text{ MPa}$ تا $14/3 \text{ MPa}$ ، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۳۸ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش قائم از $14/3 \text{ MPa}$ تا $17/2 \text{ MPa}$ ، میانگین فشار شکست حدود ۴۳ درصد کاهش یافت. علت کاهش فشار شکست در منحنی میانگین را می‌توان با توجه به مقاومت کششی بلوک سیمانی توضیح داد. با توجه به مقاومت تک محوره نمونه مورد آزمایش، افزایش تنش قائم تا یک مرزی، سبب بسته شدن ریزترک‌های داخل سنگ و در واقع باعث افزایش مقاومت کششی سنگ می‌شود.

همین امر سبب افزایش فشار شکست در سنگ می‌شود. اما از یک مرز مشخصی به بعد، افزایش تنش قائم به عنوان عامل کمکی سبب بازشدگی بیشتر ریزترک‌ها و کاهش مقاومت کششی سنگ می‌شود. در اینجا با ورود عامل خارجی به داخل سنگ که همان سیال شکست است؛ گسترش سریع-تر ریزترک‌ها و غلبه بر مقاومت کششی سنگ انجام می‌شود. در نتیجه فشار شکستی که برای شروع شکاف در این حالت لازم است، کاهش خواهد یافت؛ چرا که تنش قائم در این حالت به عنوان عاملی برای کاهش فشار شکست عمل می‌کند. همچنین، افزایش تنش تفاضلی (اختلاف بین تنش قائم و افقی حداقل) با افزایش تنش قائم همسو می‌باشد. به عبارت دیگر، با افزایش تنش تفاضلی از 6 MPa تا 10 MPa ، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۳۸ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش تفاضلی از 10 MPa تا $12/9 \text{ MPa}$ ، میانگین فشار شکست حدود ۴۳ درصد کاهش یافت.

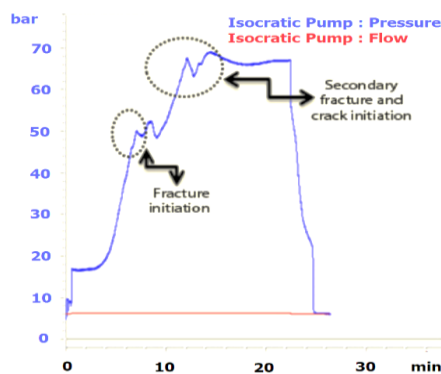
جدول ۲. نتایج حاصل از تغییر تنش قائم در چاه قائم بر فشار شکست

| شماره آزمایش | تنش قائم (MPa) | تنش افقی حداکثر (MPa) | تنش افقی حداقل (MPa) | تنش تفاضلی ($\sigma_v - \sigma_h$) | فشار شکست (MPa) | میانگین فشار شکست (MPa) |
|--------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|
| ۱ | ۱۰/۳ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۶ | ۷/۷ | ۷/۲۵ |
| ۲ | ۱۰/۳ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۶ | ۶/۸ | ۷/۲۵ |
| ۳ | ۱۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۷/۷ | ۱۱/۵ | ۹/۰۵ |
| ۴ | ۱۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۷/۷ | ۶/۶ | ۹/۰۵ |
| ۵ | ۱۴/۳ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۱۰ | ۱۴/۳ | ۱۰ |
| ۶ | ۱۴/۳ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۱۰ | ۵/۷ | ۱۰ |
| ۷ | ۱۷/۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۱۲/۹ | ۷/۴ | ۵/۶۵ |
| ۸ | ۱۷/۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۱۲/۹ | ۳/۹ | ۵/۶۵ |

مدل‌سازی فیزیکی و مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رژیم تنش‌ها بر شکست هیدرولیکی

در عملیات واقعی نیز، شکست هیدرولیکی از ابتدا دقیقاً در راستای تنش افقی حداکثر قرار ندارد و به دلیل تنش‌های القایی و ایجاد شکستگی‌های متعدد در نزدیکی چاه، راستای اولیه رشد می‌تواند متفاوت باشد. راستای شکست پس از طی مسافتی به تدریج در راستای تنش افقی حداکثر قرار می‌گیرد. در نمونه‌های مطالعه شده این تحقیق نیز، عدم انطباق راستای شکست هیدرولیکی با راستای تنش افقی حداکثر می‌تواند به دلیل ابعاد کوچک نمونه‌ها باشد.

در شکل ۷، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده و نمودار فشار-زمان آزمایش ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پس از شروع شکست، منحنی فشار شکست با گذشت زمان دچار نوسان و ترک‌های ثانویه و شاخه‌ای تشکیل می‌شود. همچنین، هندسه شکست هیدرولیکی به صورت قائم و هم راستا با محور چاه ایجاد می‌شود. با افزایش تنش قائم، ترک‌های شاخه‌ای ظاهر شده و سبب پیچیده‌تر شدن هندسه شکست می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تنش قائم، جهت شکست از راستای تنش افقی حداکثر منحرف شده و در راستای دیگر رشد می‌کند. معمولاً،



شکل ۷. بررسی تأثیر افزایش تنش قائم بر چاه قائم بر هندسه شکست (الف) نمونه شکسته شده (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۷)

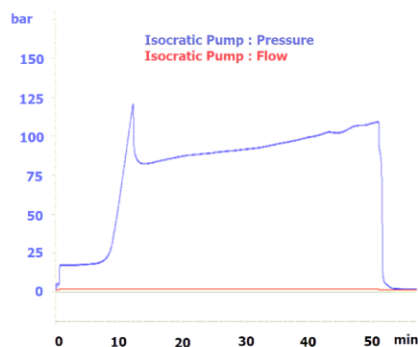
ترک در این راستا، فشار سیال متناظر با افزایش تنش مماسی حداکثر، افزایش می‌یابد. در آزمایش پایانی، علت کاهش فشار شکست با افزایش تنش افقی حداکثر، می‌تواند به علت کاهش مقاومت کششی سنگ باشد. در شکل ۸، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده و نمودار فشار-زمان آزمایش ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکست ایجاد شده در این نمونه، دو باله متقارن است که در جهت تنش افقی حداکثر رشد کرده و در جهت عمود بر تنش افقی حداکثر گسترش می‌یابد. هندسه غالب شکست، قائم بوده و شکست در راستای محور چاه و تنش افقی حداکثر رشد می‌کند. همچنین، با افزایش تنش افقی حداکثر، ترک‌های شاخه‌ای و کوتاه افزایش می‌یابد.

۲.۶ اثر تغییر تنش افقی حداکثر در چاه قائم

برای بررسی تغییر تنش افقی حداکثر در چاه قائم بر روی شکست هیدرولیکی، در حالی که تنش‌های قائم و افقی حداقل ثابت هستند، از ۸ نمونه مکعبی سیمانی استفاده شد. نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۳ ارائه شده است. با افزایش تنش افقی حداکثر از $4/3 MPa$ تا $8/6 MPa$ ، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۶۶ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش افقی حداکثر از $8/6 MPa$ تا $10/7 MPa$ ، میانگین فشار شکست حدود ۲۹ درصد کاهش یافت. از نظر تئوری، طبق رابطه‌های ۱۴ و ۱۵، 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

جدول ۳. نتایج حاصل از تغییر تنش افقی حداکثر در چاه قائم بر فشار شکست

| شماره آزمایش | تنش قائم (MPa) | تنش افقی حداکثر (MPa) | تنش افقی حداقل (MPa) | فشار شکست (MPa) | میانگین فشار شکست (MPa) |
|--------------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| ۱ | ۱۷/۲ | ۴/۳ | ۴/۳ | ۷/۳ | ۶/۷ |
| ۲ | ۱۷/۲ | ۴/۳ | ۴/۳ | ۶/۱ | ۶/۷ |
| ۳ | ۱۷/۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۸/۵ | ۸ |
| ۴ | ۱۷/۲ | ۶/۴ | ۴/۳ | ۷/۵ | ۸ |
| ۵ | ۱۷/۲ | ۸/۶ | ۴/۳ | ۱۰/۱ | ۱۱/۱۵ |
| ۶ | ۱۷/۲ | ۸/۶ | ۴/۳ | ۱۲/۲ | ۱۱/۱۵ |
| ۷ | ۱۷/۲ | ۱۰/۷ | ۴/۳ | ۱۰/۲ | ۷/۹ |
| ۸ | ۱۷/۲ | ۱۰/۷ | ۴/۳ | ۵/۶ | ۷/۹ |



شکل ۸. بررسی تأثیر افزایش تنش افقی حداکثر در چاه قائم بر هندسه شکست (الف) نمونه شکسته شده (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۶)

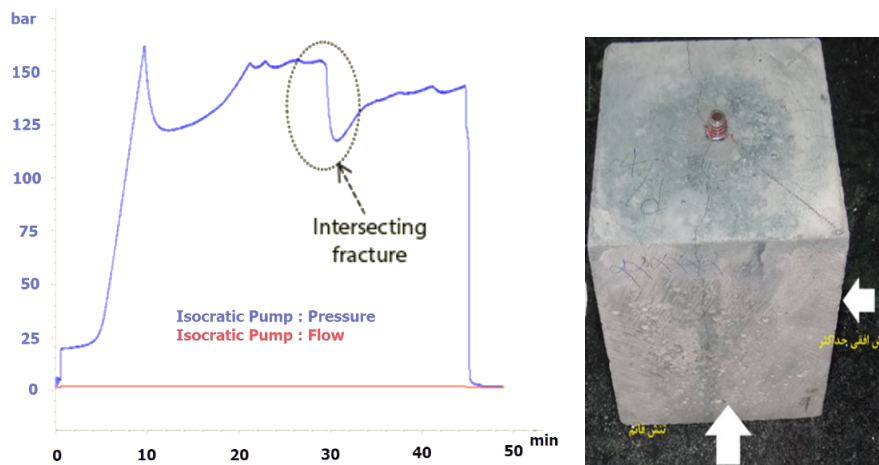
افقی، سبب کاهش فشار شکست می‌شود. علت افزایش اولیه فشار شکست با افزایش تنش قائم را می‌توان به بسته شدن ریزترک‌های سنگ نسبت داد. یعنی زمانی که تنش قائم در چاه افقی افزایش می‌یابد، ابتدا سبب بسته شدن ریزترک‌ها و افزایش مقاومت کششی در سنگ می‌شود، بنابراین فشار شکست نیز افزایش می‌یابد. اما با افزایش مکرر تنش قائم، ریزترک‌های بسته شده تحت افزایش تمرکز تنش، دوباره باز شده و مقاومت کششی را کاهش می‌دهند و در نتیجه فشار شکست کاهش می‌یابد.

۳.۶ اثر تغییر تنش قائم در چاه افقی

برای بررسی تأثیر تنش قائم بر روی شکست هیدرولیکی، در چاه افقی که هم راستا با جهت تنش افقی حداقل است، از ۸ نمونه مکعبی سیمانی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴ آمده است. با افزایش تنش قائم، از $8/2 \text{ MPa}$ تا $9/4 \text{ MPa}$ ، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۵۵ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش قائم از $9/4 \text{ MPa}$ تا 12 MPa ، میانگین فشار شکست حدود ۶۷ درصد کاهش یافت. از نظر تئوری مطابق رابطه ۶، افزایش تنش قائم در چاه

جدول ۴. نتایج حاصل از تغییر تنش قائم در چاه افقی بر فشار شکست

| شماره آزمایش | تنش قائم (MPa) | تنش افقی حداکثر (MPa) | تنش افقی حداقل (MPa) | تنش تفاضلی ($\sigma_v - \sigma_h$) | فشار شکست (MPa) | میانگین فشار شکست (MPa) |
|--------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|
| ۱ | ۸/۲ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۴ | ۱۲/۵ | ۹/۱۵ |
| ۲ | ۸/۲ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۴ | ۵/۸ | ۹/۱۵ |
| ۳ | ۹/۴ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۶ | ۱۴/۲ | ۱۴/۲ |
| ۴ | ۹/۴ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۶ | ۱۴/۳ | ۱۴/۲ |
| ۵ | ۱۰/۷ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۸ | ۱۳/۸ | ۱۲/۶ |
| ۶ | ۱۰/۷ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۰/۸ | ۱۱/۴ | ۱۲/۶ |
| ۷ | ۱۲ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۱ | ۳/۸ | ۴/۶۵ |
| ۸ | ۱۲ | ۶/۴ | ۵/۷ | ۱ | ۵/۵ | ۴/۶۵ |



شکل ۹. بررسی تأثیر افزایش تنش قائم در چاه افقی هم راستا با تنش افقی حداقل بر هندسه شکست (الف). نمونه شکسته شده (ب). نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۴)

۴.۶ اثر تغییر تنش افقی حداکثر در چاه افقی

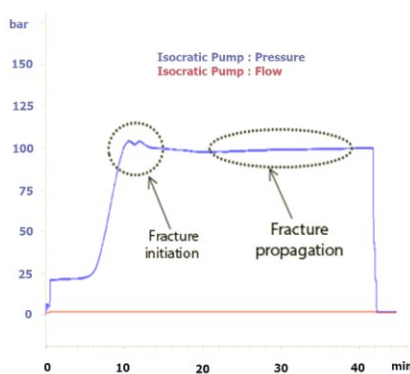
برای بررسی تأثیر تغییر تنش افقی حداکثر بر روی شکست هیدرولیکی، در چاه افقی که هم راستا با تنش افقی حداقل است، ۸ آزمایش انجام شد. نتایج آزمایش ها در جدول ۵ ارائه شده است. همچنین، برای بررسی تأثیر رژیم تنشی بر هندسه و جهت شکست، رژیم تنش گسل لغزشی در نظر گرفته شد. با افزایش تنش افقی حداکثر در چاه افقی از $7/7 \text{ MPa}$ تا 9 MPa ، ابتدا میانگین فشار شکست حدود ۴ درصد افزایش و سپس با افزایش تنش افقی حداکثر از 9 MPa تا $11/6 \text{ MPa}$ ، میانگین فشار شکست حدود ۲۱ درصد کاهش یافت.

در شکل ۹، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده و نمودار فشار-زمان آزمایش ۴ نشان داده شده است. هندسه شکست ایجاد شده در این نمونه، قائم است. در نمودار فشار-زمان، منحنی دارای افت فشار ثانویه است که نشان دهنده شکاف متقاطع مستقیم در نمونه است. در سایر نمونه ها، هندسه غالب شکست، افقی است و در راستای محور چاه گسترش می یابد. اما در بعضی موارد مانند همین آزمایش، شکست های محوری و افقی شیب دار و هندسه شکست متقاطع مشاهده می شود. وجود چنین شکست هایی، تفسیر کلی هندسه شکست در چاه های افقی را پیچیده و دشوار می کند.

نتیجه به دست آمده با تئوری شکست هیدرولیکی برای پیش‌بینی عملیات شکست هیدرولیکی همخوانی دارد. از نظر تئوری طبق رابطه ۸، افزایش تنش افقی حداکثر به عنوان عاملی کمکی در جهت کاهش فشار شکست می‌باشد.

جدول ۵. نتایج حاصل از تغییر تنش افقی حداکثر در چاه افقی بر فشار شکست

| شماره آزمایش | تنش قائم (MPa) | تنش افقی حداکثر (MPa) | تنش افقی حداقل (MPa) | فشار شکست (MPa) | میانگین فشار شکست (MPa) |
|--------------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------|-------------------------|
| ۱ | ۶/۴ | ۷/۷ | ۵/۷ | ۱۱/۳ | ۹/۷ |
| ۲ | ۶/۴ | ۷/۷ | ۵/۷ | ۸/۱ | ۹/۷ |
| ۳ | ۶/۴ | ۹ | ۵/۷ | ۱۰/۴ | ۱۰/۱ |
| ۴ | ۶/۴ | ۹ | ۵/۷ | ۹/۸ | ۱۰/۱ |
| ۵ | ۶/۴ | ۱۰/۳ | ۵/۷ | ۷/۳ | ۸/۹ |
| ۶ | ۶/۴ | ۱۰/۳ | ۵/۷ | ۱۰/۵ | ۸/۹ |
| ۷ | ۶/۴ | ۱۱/۶ | ۵/۷ | ۸/۴ | ۷/۹۵ |
| ۸ | ۶/۴ | ۱۱/۶ | ۵/۷ | ۷/۵ | ۷/۹۵ |



شکل ۱۰. بررسی تأثیر افزایش تنش افقی حداکثر در چاه افقی هم راستا با تنش افقی حداقل بر هندسه شکست (الف) نمونه شکسته شده (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۸)

حداکثر قرار می‌گیرد. همچنین، با کاهش تنش تفاضلی افقی، ریزترک‌ها و ترک‌های شاخه‌ای کوتاه در سنگ بیشتر شده و هندسه شکست را پیچیده‌تر می‌کنند.

۷. نتیجه‌گیری

شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفت و گاز می‌باشد. پارامترهای مختلفی همچون 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

در شکل ۱۰، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده و نمودار فشار-زمان آزمایش ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، هندسه شکست، افقی و عرضی بوده و در راستای تنش افقی حداقل گسترش پیدا می‌کند. به دلیل بیشینه بودن تنش افقی حداکثر، هندسه غالب برای رژیم تنشی گسل لغزشی در چاه افقی، معمولاً افقی و عرضی است. در آزمایش‌های ۱ و ۲، هندسه شکست، شیب‌دار بوده و جهت شکست، انحراف زیادی نسبت به تنش افقی حداکثر دارد. این انحراف از آزمایش‌های ۳ تا ۶ کاهش می‌یابد و در آزمایش‌های ۷ و ۸، جهت شکست ایجاد شده، تقریباً در راستای تنش افقی

افزایش تنش افقی حداکثر، جهت شکست ایجاد شده، تقریباً در راستای تنش افقی حداکثر قرار می‌گیرد.

۳- با کاهش تنش تفاضلی افقی، در هر دو چاه قائم و افقی، ریزترک‌ها و ترک‌های شاخه‌ای کوتاه‌تر شده و هندسه شکست را پیچیده‌تر می‌کند.

۴- مطالعات آزمایشگاهی انجام شده نشان می‌دهد، در چاه قائم، تأثیر تنش افقی حداکثر بر روی فشار شکست بیشتر از تنش قائم است در حالی که در چاه افقی، تأثیر تنش قائم، بیشتر از تنش افقی حداکثر است.

۵- نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی انجام شده نشان داد، رفتار مواد شبه سنگی این مطالعه، نتایج مطالعات وارپینیسکی و همکاران (۱۹۸۲)، بر روی بلوک‌های ماسه‌سنگ و توف، دوو و بویس (۱۹۸۹) بر روی نمونه‌های سنگ نمک و بهلولی و پاتر (۲۰۰۶) بر روی سنگ‌های تحکیم نیافته و نیز دمینی و همکاران (۲۰۱۲) و چیتراالا و همکاران (۲۰۱۳) بر روی بلوک‌های ماسه‌سنگ را تأیید می‌کند. مطالعات انجام شده توسط وارپینیسکی و همکاران و دوو و بویس نشان داد، در تنش محصورکننده پائین، فشار شکست پایین بوده و با افزایش تنش‌های جانبی، فشار شکست افزایش می‌یابد. همچنین بهلولی و پاتر، دمینی و همکاران و چیتراالا و همکاران نشان دادند، در تنش محصورکننده بالا، فشار شکست کاهش یافته و هندسه شکست به صورت صفحه نازک و متقارن است. بررسی‌های آزمایشگاهی این تحقیق با استفاده از مواد شبه سنگی نیز رفتار مواد سنگی مطالعات 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 و در چاه افقی، یک روند تقریباً کاهشی را نشان می‌دهد.

عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، برای مطالعه آزمایشگاهی تأثیر رژیم تنش‌ها بر روی فشار و هندسه شکست هیدرولیکی، دستگاه سه محوره‌ای با قابلیت اعمال هر سه مؤلفه تنش اصلی، طراحی و ساخته شد. با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، ۳۲ نمونه سیمانی مکعبی با اندازه $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شد و تأثیر تغییر رژیم تنش‌ها بر پارامترهای مختلف عملیات شکست هیدرولیکی شامل فشار شکست، هندسه شکست هیدرولیکی، نمودار فشار-زمان و نحوه گسترش ریزترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع بررسی شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی انجام شده عبارت است از:

۱- در چاه‌های قائم و افقی، تغییر تنش قائم، تأثیر زیادی بر روی فشار و هندسه شکست دارد. هندسه شکست در چاه قائم، مطابق با تئوری گریفیث، قائم بوده و با افزایش تنش قائم، جهت شکست از راستای تنش افقی حداکثر منحرف شده و در راستای دیگر رشد می‌کند. عدم انطباق راستای شکست هیدرولیکی با راستای تنش افقی حداکثر می‌تواند به دلیل ابعاد کوچک نمونه‌ها باشد. در چاه افقی، هندسه غالب شکست، افقی بوده و در راستای محور چاه گسترش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش قائم، ترک‌های کوتاه و شاخه‌ای افزایش می‌یابند.

۲- با افزایش تنش افقی حداکثر در هر دو چاه قائم و افقی، ترک‌های شاخه‌ای و کوتاه افزایش می‌یابد. در چاه قائم، هندسه غالب شکست، قائم بوده و شکست در راستای محور چاه و تنش افقی حداکثر رشد می‌کند. در چاه افقی، هندسه غالب شکست، افقی و عرضی بوده و در تنش‌های افقی پائین در راستای تنش افقی حداقل گسترش پیدا می‌کند و با

۸. مراجع

- Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Bafghi, A. Y., & Gholamnejad, J. (2016). Time-dependent crack propagation in a poroelastic medium using a fully coupled hydromechanical displacement discontinuity method. *International Journal of Fracture*, 199(1), 71-87.
- API Technical Report. (2009). *Hydraulic fracturing operations-well construction and integrity guidelines*. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Bakhshi, E., Rasouli, V., Ghorbani, A., Fatehi Marji, M., Damjanac, B., & Wan, X. (2019). Lattice numerical simulations of lab-scale hydraulic fracture and natural interface interaction. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(5), 1315-1337.

- Behnia, M., Goshtasbi, K., Golshani, A. A., & Fatehi Marji, M. (2013). Experimental investigations of hydraulic fracturing propagation in multi-layer formation. *Modares Civil Engineering journal*, 13(3), 123.
- Beugelsdijk, L. J. L., de Pater, C. J., & Sato, K. (2000). Experimental hydraulic fracture propagation in a multi fractured medium. In the *SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management*, Yokohama, Japan.
- Bohloli, B., & de Pater, C. J. (2006). Experimental study on hydraulic fracturing of soft rocks: Influence of fluid rheology and confining stress. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53 (1-2), 1-12.
- Chitrala, Y., Moreno, C., Sondergeld, C., & Rai, C. (2013). An experimental investigation into hydraulic fracture propagation under different applied stresses in tight sands using acoustic emissions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 151-161.
- Clark, J. B. (1949). A hydraulic process for increasing the productivity of wells. *Petroleum Transactions, AIME*, 186, 1-8.
- Damani, A., Sharma, A., Sondergeld, C. H., & Rai, C. S. (2012). Mapping of hydraulic fractures under triaxial stress conditions in laboratory experiments using acoustic emissions. In the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Texas, USA.
- Dehghan, A. N., Goshtasbi, K., Ahangari, K., & Jin, Y. (2015). Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74 (3), 887-895.
- Doe, T. W., & Boyce, G. (1989). Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 26 (6), 605-611.
- Fallahzadeh, S. H., Rasouli, V., & Sarmadivaleh, M. (2015). An investigation of hydraulic fracturing initiation and near-wellbore propagation from perforated boreholes in tight formations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48, 573-584.
- Fatehi Marji, M. (2013). On the use of power series solution method in the crack analysis of brittle materials by indirect boundary element method. *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 365-382.
- Fatehi Marji, M. (2014). Numerical analysis of quasi-static crack branching in brittle solids by a modified displacement discontinuity method. *International Journal of Solids and Structures*, 51(9), 1716-1736.
- Fatehi Marji, M. (2015). Simulation of crack coalescence mechanism underneath single and double disc cutters by higher order displacement discontinuity method. *Journal of Central South University*, 22(3), 1045-1054.
- Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. 2nd Edition, Elsevier Science publishers B.V, Netherlands.
- Ha, S. J., Yun, T. S., Kim, K. Y., & Jung, S. G. (2017). Experimental study of pumping rate effect on hydraulic fracturing of cement paste and mortar. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, 3115-3119.

- Haeri, H., Khaloo, A., & Fatehi Marji, M. (2015a). Experimental and numerical simulation of the microcrack coalescence mechanism in rock-like materials. *Strength of Materials*, 47(5), 740-754.
- Haeri, H., Khaloo, A., & Fatehi Marji, M. (2015b). Fracture analyses of different pre-holed concrete specimens under compression. *Acta Mechanica Sinica*, 31(6), 855-870.
- Haeri, H., Shahriar, K., Fatehi Marji, M., & Moarefvand, P. (2014). On the crack propagation analysis of rock like Brazilian disc specimens containing cracks under compressive line loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(8), 1400-1416.
- Haimson, B., & Fairhurst, C. (1969). Hydraulic fracturing in porous-permeable materials. *Journal of Petroleum Technology*, 21(7), 811-817.
- Hossain, M. M., Rahman, M. K., & Rahman, S. S. (2000). Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 27(3-4), 129-149.
- Hosseini Nasab, H., Fatehi Marji, M. (2007). A semi-infinite higher-order displacement discontinuity method and its application to the quasistatic analysis of radial cracks produced by blasting. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 2(3), 439-458.
- Jalili, S., & Ahangari, K. (2017). Effects of different stress regimes on hydraulic fracture geometry: a particle flow code approach. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2(41).
- Li, X., Feng, Z., Han, G., Elsworth, D., Marone, C., Saffer, D., & Cheon, D. S. (2016). 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, 63-76.
- Montgomery, C. T., & Smith, M. B. (2010). *NSI technologies, hydraulic fracturing: history of an enduring technology*. Technical Report JPT, JPT.
- Moradi, A., Tokhmechi, B., Rasouli, V., Fatehi Marji, M. (2017). A comprehensive numerical study of hydraulic fracturing process and its affecting parameters. *Geotechnical and Geological Engineering*, 35(3), 1035-1050.
- Moradi, A., Tokhmechi, B., Rasouli, V., Fatehi Marji, M. (2018). Displacement discontinuity analysis of the effects of various hydraulic fracturing parameters on the crack opening displacement (COD). *Journal of Petroleum Science and Technology*, 8(3), 3-13.
- Olson, J. E., & Bahorich, B. (2012). Examining hydraulic fracture: Natural fracture interaction in hydrostone block experiments. In the *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, Texas, USA.
- Warpinski, N. R., Clark, J. A., Schmidt, R. A., & Huddle, C. W. (1982). Laboratory investigation on the effect of in-situ stresses on hydraulic fracture containment. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 22(3), 333-340.