

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مشبک کاری بر شکست هیدرولیکی، تحت شرایط تنش سه محوره با استفاده از مدلسازی فیزیکی

محمد داربر^۱، هادی شاکری^{۲*}، لهراسب فرامرزی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- مربی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت: آذر ۱۳۹۷، پذیرش: تیر ۱۳۹۸)

چکیده

شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفت و گاز است که برای افزایش جریان سیال از مخازن با تراوایی پایین به سمت چاه استفاده می‌شود. عوامل مختلفی، همچون تنش‌های برجا، شکستگی‌های طبیعی سازند، رئولوژی سیال، خواص مکانیکی سازند، شدت جریان سیال تزریقی و مشبک کاری بر روی فشار شکست و چگونگی عملیات تأثیرگذار هستند. در این مطالعه، برای بررسی آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی با در نظر گرفتن شرایط مخزن، دستگاه سه محوره‌ای با قابلیت اعمال تنش‌های اصلی، طراحی و ساخته شد. برای این منظور، تعداد ۳۸ نمونه مصنوعی با اندازه $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شد. سپس تأثیر پارامترهای مختلف مشبک کاری، همچون هندسه مشبک (شامل طول، قطر و شکل)، فاز مشبک کاری (در دو حالت چاه عمودی و افقی) و تنش افقی کمینه، مطالعه و بررسی شد. با رسم نمودار فشار-زمان، نحوه گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع ارزیابی شد. نتایج نشان داد که با افزایش زاویه مشبک نسبت به تنش افقی بیشینه در چاه قائم، کاهش زاویه مشبک نسبت به تنش افقی بیشینه در چاه افقی و همچنین، افزایش تنش افقی کمینه، فشار شکست افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی

شکست هیدرولیکی، میدان تنش‌های برجا، هندسه مشبک، فاز مشبک، فشار شکست

*عهده‌دار مکاتبات: shakeri@sut.ac.ir

۱- مقدمه

شکست هیدرولیکی^۱، یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای تحریک مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری پایین است. این روش برای افزایش بهره‌وری در مخازن ماسه سنگی با ضخامت کم و همچنین مخازن شیلی با نفوذپذیری و تخلخل مؤثر پایین، کاربرد زیادی دارد [۱]. در حال حاضر، بیش از نیمی از چاه‌های نفت و گاز آمریکا، بدون بهره‌گیری از فناوری شکست هیدرولیکی قادر به تولید نیستند. امروزه در منطقه آمریکای شمالی، در حدود ۵۸ درصد از چاه‌های گازی و ۳۸ درصد از چاه‌های نفتی، از شکستگی‌های مصنوعی برای تحریک مخازن نفت و گاز استفاده می‌شود. استفاده از تکنولوژی شکست هیدرولیکی در چاه‌های ذکر شده، باعث افزایش دو تا پنج برابری تولید شده است. تحقیقات انجام شده نشان داده است که عملیات شکست هیدرولیکی، تولید چاه‌های نفتی را تا ۳۰ درصد و چاه‌های گازی را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهد [۲].

مطالعات زیادی روی عوامل مؤثر بر فشار شکست^۲، شامل میدان تنش‌های برجا، وجود درزه‌ها و شکستگی‌های طبیعی سازند، رئولوژی سیال^۳، خواص مکانیکی سازند، شدت جریان سیال تزریقی و مشبک‌کاری^۴ انجام شده است. هایمسون و فیرهرست (۱۹۶۹)، با بررسی شکست هیدرولیکی بر روی نمونه‌های مصنوعی بلوکی از جنس هیدروستون^۵ (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 [۳]. وارپینسکی و همکاران (۱۹۸۲)، تأثیر تنش‌های برجا را بر نحوه گسترش شکست بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد، در تنش محصور کننده پائین، فشار شکست پایین بوده و با افزایش تنش قائم برجا، فشار شکست افزایش می‌یابد و موجب گسترش شکست هیدرولیکی می‌شود [۴]. دوو و بویس (۱۹۸۹)، مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های آماده شده از نمک با نسبت تنش برجای بین یک تا دو انجام دادند، نتایج نشان داد که تنش انحرافی^۶ بر روی هندسه شکست مؤثر است [۵]. پاتر و همکاران (۲۰۰۰)، تأثیر پارامترهایی هم‌چون شدت جریان سیال تزریقی، تنش

تفاضلی^۷، رژیم تنش^۸ 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^۹ کم‌تری اتفاق می‌افتد. آنها نشان دادند که با افزایش تنش تفاضلی، شکاف ایجاد شده در راستای صفحه ترجیحی شکست بوده و برخورد کم‌تری با ناپیوستگی‌ها دارد [۶]. پاتر و همکاران (۲۰۰۲)، با استفاده از مطالعات عددی و آزمایشگاهی، تأثیر نرخ تزریق^{۱۰} و ویسکوزیته سیال^{۱۱} را بر روی شکست هیدرولیکی بررسی کردند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد، زمانی که ویسکوزیته سیال بالا بوده و نرخ تزریق پایین باشد، از نفوذ سیال جلوگیری شده و فشار شکست افزایش می‌یابد [۷]. 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 [۸]. السون و همکاران (۲۰۱۱)، مطالعات آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را برای تعیین هندسه و مود شکست در سازندهای نرم انجام دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد، در تنش قائم بالا، مود شکست غالباً برشی و در تنش قائم پایین، مود شکست غالباً کششی است [۹]. دمنی و همکاران (۲۰۱۲)، 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 [۱۰]. چیترا و همکاران (۲۰۱۳)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر تنش‌های تفاضلی بر روی گسترش شکاف هیدرولیکی در نمونه‌های ماسه سنگ پرداختند. نتایج نشان داد، وقتی تنش افقی بیشینه بالا باشد، فشار شکست کاهش یافته و هندسه شکست به صورت صفحه نازک و متقارن است [۱۱]. گوا و همکاران (۲۰۱۴)، آزمایش شکست هیدرولیکی را بر روی بلوک‌های شیلی تهیه شده از رخنمون شیلی سیچووان^{۱۲} انجام دادند. در این آزمایش‌ها

پرداختند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد، شکاف ایجاد شده در حالت غیر اشباع به صورت دو باله^{۲۲} است. همچنین شروع شکست از مشبک‌ها در تمامی فازها به صورت تک باله بوده و متقارن نیست و در ادامه، توسعه شکست، یا در راستای تنش افقی بیشینه است و یا در اطراف مشبک، دچار پیچ‌پیچی شده و متوقف می‌شود [۱۹]. کیتریج و پاتر (۱۹۹۷)، آزمایشات شکست هیدرولیکی را برای بررسی تأثیر مشبک بر روی پیچ‌پیچی شکاف هیدرولیکی انجام دادند. نتایج نشان داد که کاهش تنش افقی، تولید شکاف‌های چندگانه را کاهش می‌دهد و افزایش فاصله مشبک‌ها، چندگانه شدن شکاف و پیچ‌پیچی آن را افزایش می‌دهد [۲۰]. آلکسینکو و همکاران (۲۰۱۲)، تأثیر مشبک‌کاری را بر روی شکست هیدرولیکی به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. در این مطالعه، زاویه مشبک نسبت به تنش افقی بیشینه، هندسه مشبک و تنش‌های برجا بررسی شد. نتایج نشان داد، در چاه‌های قائم و افقی، با افزایش زاویه مشبک به ترتیب نسبت به تنش افقی بیشینه و تنش قائم، فشار اولیه شکست افزایش می‌یابد. هندسه مشبک، شامل طول، قطر و شکل تأثیر چندانی در افزایش فشار اولیه شکست ندارد و افزایش تنش‌های برجا، سبب افزایش فشار اولیه شکست می‌شود [۲۱]. عبداللهی پور و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از روش ناپیوستگی جابجایی، گسترش ترک‌های منفرد و چندگانه را در شکست هیدرولیکی یک چال دایره‌ای بررسی کردند. همچنین، تأثیر فشار سیال، زاویه فازی^{۲۳} مشبک‌ها و زاویه شیب هر مشبک را بر روی نحوه گسترش ترک‌های اولیه بررسی کردند [۲۲].

هندسه شکست، یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی است که در مطالعات شکست هیدرولیکی باید بررسی شود. معمولاً برای رژیم‌های تنشی که نرمال نیستند، پیش‌بینی هندسه شکست هیدرولیکی، پیچیده‌تر و مشکل‌تر است. قبل از طراحی شکست هیدرولیکی، دانستن امتداد و هندسه عمومی شکست هیدرولیکی القاء شده بسیار مهم است، چرا که طراحی شکست هیدرولیکی برای گسترش‌های شکست افقی و قائم به صورت کامل با هم متفاوت است. تاکنون، به صورت کامل، تأثیر مشبک‌ها بر روی هندسه شکست هیدرولیکی و مکانیزم شکست آن بررسی نشده است. در این مقاله، به منظور مطالعه تأثیر مشبک‌ها بر روی هندسه شکست هیدرولیکی و نیز مکانیزم شکست آن، دستگاه سه

به بررسی تأثیر نرخ تزریق سیال شکست، ویسکوزیته سیال، ضریب تنش تفاضلی افقی، تنش تفاضلی افقی، شکاف‌های طبیعی و لایه‌بندی بر روی شکست هیدرولیکی در چاه افقی پرداخته شد [۱۲]. بهنیا و همکاران (۲۰۱۴)، برای تحلیل گسترش شکست هیدرولیکی در تشکیلات لایه‌ای، یک روش المان مرزی^{۱۳} بر پایه روش ناپیوستگی با مرتبه بالا^{۱۴}، ارائه و مسیر شکست را با استفاده از معیار تنش مماسی بیشینه^{۱۵} بررسی کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد، اگر شکست هیدرولیکی در لایه سخت‌تر شروع شود، امکان قطع کردن لایه در آن افزایش می‌یابد [۱۳]. فاتحی مرجی (۲۰۱۴)، با توسعه روش ناپیوستگی جابجایی تصحیح شده، جهت و مسیر گسترش ترک را در جامدات شکننده پیش‌بینی کرد [۱۴]. حائری و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی، تأثیر امتداد ترک‌ها را روی مسیر به هم رسیدن و شکست ترک‌ها در نمونه‌های شبه سنگی دیسکی از پیش ترک‌دار شده بررسی کردند و یک روش ناپیوستگی جابجایی با المان مرتبه بالا، که یکی از روش‌های المان مرزی غیر مستقیم است، برای شبیه‌سازی مکانیزم گسترش ترک در نمونه‌ها و در پل‌های سنگی^{۱۶} توسعه دادند. در اولین مرحله از بارگذاری فشاری، ترک‌های شاخه‌ای^{۱۷} شروع شد و در ادامه، گسترش ترک‌ها به سمت بارگذاری خطی فشاری ادامه یافت [۱۵]. حائری و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از روش آزمایشگاهی، مکانیزم به هم رسیدن^{۱۸} ترک‌ها را روی نمونه‌های شبه‌سنگی آماده شده از سیمان پوزولانی، میکاشیست و آب بررسی کردند و با استفاده از روش المان مرزی غیرمستقیم مرتبه بالا، مود I و II ضریب شدت تنش^{۱۹} را در نوک میکروتُرک‌ها بررسی کردند [۱۶]. مرادی و همکاران (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸)، یک مطالعه عددی جامعی از فرآیند شکست هیدرولیکی و پارامترهای مؤثر بر آن انجام داده و رفتار جابجایی ترک (COD)^{۲۰} را مطالعه کردند. مدلسازی آنها نشان داد، فاصله‌داری و زاویه تقاطع ترک‌ها، تأثیر مهمی روی گسترش شکست هیدرولیکی دارد. هم چنین، COD با گسترش ترک و نیز با افزایش شعاع چاه، افزایش یافت [۱۷، ۱۸].

مشبک‌کاری یکی از عوامل مهم مؤثر بر فشار شکست است. بهرمن و ال بل (۱۹۹۱)، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر مشبک‌ها بر روی شکست هیدرولیکی در نمونه‌های اشباع نشده با تراوایی^{۲۱} پایین و نمونه‌های اشباع شده و تراوا

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

که P_{wf} : فشار شکست سازند، σ_h : تنش افقی کمینه و σ_H : تنش افقی بیشینه است. رابطه (۲)، 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 به عنوان مرز پایین فشار شکست مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۲۳]:

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

که $P_{wf,lower}$: مرز پائین فشار شکست است و η پارامتر وابسته به ضریب ثابت پرولاستیک α است و از رابطه (۴) به دست می‌آید [۲۳]:

$$\eta = \frac{\alpha(1 - 2\nu)}{2(1 - \nu)} \quad (4)$$

که ν : ضریب پواسون است. مقدار η به طور معمول ۰/۲۵ 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.

از مشبک‌ها به عنوان ابزاری برای جلوگیری از شکاف‌های چندگانه و تی‌شکل استفاده می‌شود. محققان نشان داده‌اند که وقتی مشبک برای شروع شکست، مؤثر و کارآمد است که با راستای پیش‌بینی شده برای شکاف در یک جهت باشد. وقتی چاه، مشبک‌کاری می‌شود یک تقاطع متعامد بین دو حفره چاه و مشبک با اندازه‌های مختلف ایجاد می‌شود (شکل ۱). جهت مشبک، θ با توجه به جهت σ_x تعریف می‌شود. تنش مماسی با استفاده از تمرکز تنش بر روی مشبک و با استفاده از رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta'} = & (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_{z\theta}) + 2(\sigma_x - \sigma_y - \\ & \sigma_{z\theta}) \cos 2\theta' - 2(\sigma_x - \sigma_y)(\cos 2\theta + \\ & 2 \cos 2\theta \cos 2\theta') - \\ & 4\tau_{xy}(1 + 2 \cos 2\theta) \sin 2\theta - 4\tau_{z\theta} \sin 2\theta' - \\ & P_w(2 \cos 2\theta' + 2) \end{aligned} \quad (5)$$

که $\sigma_{\theta\theta'}$: تنش مماسی در سطح مشترک چاه و مشبک، σ_x : تنش محلی در راستای محور x ، σ_y : تنش محلی در راستای محور y ، $\sigma_{z\theta}$: تنش مماسی هم‌راستا با محور چاه، θ' : زاویه بین تنش مماسی هم‌راستا با محور

محوره‌ای با قابلیت اعمال هر سه مؤلفه تنش‌های اصلی، طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهمسانگرد برجای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارد. برای طراحی دستگاه از لحاظ پایداری در برابر تنش‌های وارده، از نرم‌افزار آباکوس^{۲۴} استفاده شد. در ادامه، با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی، ۳۸ نمونه هیدروستونی، شامل گچ و ماسه بادی دانه‌بندی شده، با اندازه $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شد و تأثیر پارامترهای مختلف مشبک‌کاری هم‌چون هندسه مشبک (شامل طول، قطر و شکل)، فاز مشبک‌کاری (در دو حالت چاه عمودی و افقی) و تأثیر تنش افقی کمینه در حضور مشبک، بر عملیات شکست هیدرولیکی بررسی شد. در نهایت، فشار شکست، هندسه شکست هیدرولیکی، مکانیزم شکست، نمودار فشار-زمان و نحوه گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع بررسی شد.

۲- 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 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 بستگی دارد [۲۳]. 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، باید بر تنش کمینه و مقاومت کششی سازند غلبه شود [۲۴]. معیار کلی برای شروع شکست کششی در سازند، عبارت است از:

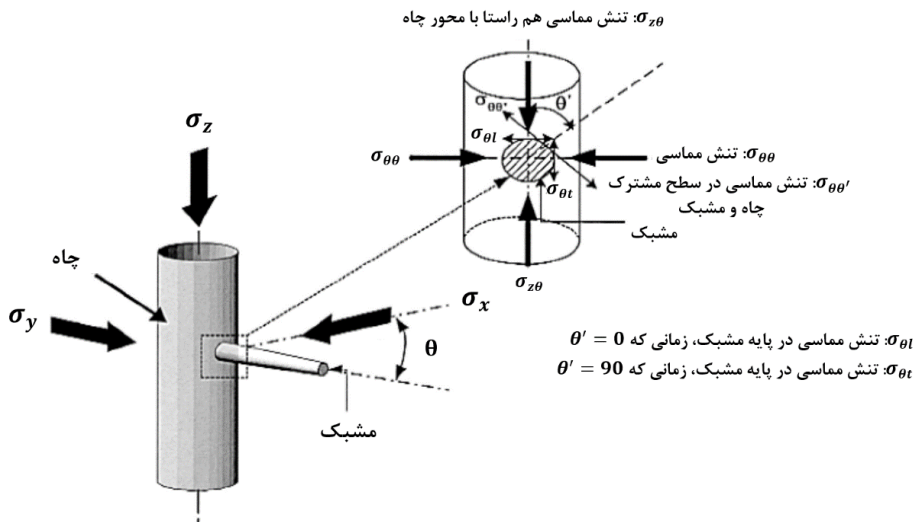
$$\sigma_\theta - P_p = -T_0 \quad (1)$$

که σ_θ : تنش مماسی، P_p : فشار منفذی و T_0 : مقاومت کششی سازند است. فشار شکست سازند در چاه قائم از رابطه (۲) به دست می‌آید [۲۳]:

$$P_{wf} = \frac{1}{4} (9\sigma_h - 3\sigma_H - \sigma_V + 2v(\sigma_H - \sigma_h)) \quad (6)$$

در چاه‌های مشبک‌دار، زاویه و چگالی مشبک‌ها، هندسه شکاف را پیچیده‌تر می‌کند. زمانی که کم‌ترین تنش‌ها، تنش‌های افقی باشند، شکاف ایجاد شده به صورت قائم خواهد بود و وقتی تنش روباره کم‌ترین مقدار بین تنش‌ها باشد، شکاف ایجاد شده، افقی خواهد بود [۲۳].

چاه و تنش مماسی در پایه مشبک، θ : زاویه بین محور x با تنش شعاعی، T_{xy} : تنش برشی در صفحه xy : تنش $T_{z\theta}$: تنش برشی در صفحه $z\theta$ و P_w : فشار سیال داخل چاه است. رابطه (۵)، برای تمامی چاه‌های مشبک‌کاری شده با هر جهتی معتبر است. در بیش‌تر موارد، می‌توان مقدار $\sigma_{\theta\theta}$ را جایگزین $\sigma_{\theta\theta}$ در معیار شروع شکست کرده و سپس معادله را برای حالت جدید حل کرد. در چاه‌های قائم، اگر مشبک در راستای شکاف ایجاد شده باشد، فشار شروع شکست عبارت است از:



شکل ۱: مدل هندسی چاه مشبک دار و نحوه توزیع مجدد سیستم تنش [۲۴]

شکست آن در مباحث شکست هیدرولیکی با شرایط مرزی خاص است [۱۵، ۱۶].

۳- مدلسازی فیزیکی

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر مشبک‌ها بر روی فشار و جهت شکست هیدرولیکی از مدلسازی فیزیکی با استفاده از نمونه‌های هیدروستونی شامل گچ و ماسه بادی دانه‌بندی شده استفاده شد. برای تهیه نمونه‌های هیدروستونی از گچ سفید و ماسه بادی دانه‌بندی شده با ابعاد ۲۰-۴۰ میکرون استفاده شد و اختلاط ماسه، گچ و آب به ترتیب با درصد وزنی ۳۴، ۳۶ و ۳۰، انجام شد. طرح اختلاط، بر اساس آزمایش‌های انجام شده در ابتدای فعالیت‌های آزمایشگاهی، انتخاب شد. در ابتدای کار، طرح اختلاط‌های مختلفی تولید شده و با مقایسه مزایا و معایب هر کدام، طرح اختلاط نهایی انتخاب شده است. مهم‌ترین پارامترهایی که برای انتخاب طرح اختلاط مناسب مد نظر قرار گرفته عبارتند از: گیرش سریع و امکان تولید نمونه در

علاوه بر روش‌های تئوری و آزمایشگاهی، روش‌های عددی المان مرزی (BEM)، المان مجزا (DEM) و ناپیوستگی جابجایی (DDM) نیز می‌توانند برای شبیه‌سازی شروع و گسترش ترک در نمونه‌های سنگی و بتنی استفاده شوند. همچنین، مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) [۲۶]، پیشنهاد شده توسط ایروین [۲۵] می‌تواند برای مطالعه مکانیزم گسترش ترک در این نمونه‌ها استفاده شود. بر همین اساس، سه معیار شکست تنش مماسی بیشینه (معیار σ)، شدت انرژی کمینه [۲۷] (معیار S) و نرخ آزاد شدن انرژی بیشینه [۲۸] (معیار G)، یا شکل تصحیح شده آنها، می‌توانند برای مطالعه شروع و گسترش ترک تحت شرایط بارگذاری مود I و II ، که در بحث مکانیک شکست سنگ پرکاربردتر هستند، استفاده شوند. روش ناپیوستگی جابجایی با مرتبه بالا که جزء روش‌های المان مرزی غیر مستقیم است، یکی از روش‌های پرکاربرد برای بررسی گسترش ترک و مکانیزم

نمونه‌ها، وجهی از نمونه‌های مصنوعی که به هنگام ریختن مواد آزاد بود، با استفاده از دستگاه برش، صاف شده و برای چسباندن لوله فلزی در چاه آماده شد.

برای تهیه لوله از پروفیل آلومینیوم، با طول ۳/۵ سانتی‌متر با سوراخی به قطر ۳ میلی‌متر برای تزریق سیال شکست به داخل نمونه استفاده شد (شکل ۴-الف). قسمتی از لوله با استفاده از ابزار حدیده گردان (شکل ۴-ب) رزوه‌کاری شده تا به صفحه بالایی دستگاه برای انجام تزریق متصل شود. در ادامه لوله‌های آماده شده به چاه شبیه‌سازی شده چسبانده می‌شود و از نشت سیال به هنگام آزمایش جلوگیری می‌کند. شکل ۵، بلوک‌های هیدروستونی آماده شده را نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل ۴: تجهیزات لازم برای مشبک‌کاری: (الف) لوله‌های آلومینیومی، (ب) ابزار حدیده کاری

۳-۲- سیال شکست

ترکیب سیال تزریق برای انجام آزمایش‌های شکست هیدرولیکی در بلوک‌های هیدروستونی شامل ۱۵ گرم پودر زانتان^{۲۹} به اضافه ۸۰۰ سی‌سی آب در نظر گرفته شد (شکل ۶). علت استفاده از این سیال پایه آبی به جای آب،

یک روز، قابلیت حفاری و ایجاد شکاف، طوری که بتوان به راحتی بدون آسیب به نمونه سوراخ‌کاری درون آن را انجام داد، استحکام کافی، طوری که حین قالب‌گیری، نمونه‌ها دچار لب‌پُرشدگی نشوند و امکان خروج هوای نمونه هنگام ویبره نمودن که این مورد از لحاظ همگن شدن نمونه‌ها اهمیت زیادی دارد.

۳-۱- روش آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های هیدروستونی از قالب‌های پلاستیکی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر و برای ایجاد مشبک‌ها از سیستم مکانیکی نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شد. دلیل استفاده از این سیستم مکانیکی، گیرش سریع هیدروستون است. به محض ریختن قالب، با بیرون آوردن لوله فلزی از داخل قالب، دو مشبک در نمونه ایجاد شد (شکل ۳).



شکل ۲: سیستم مکانیکی ایجاد مشبک



شکل ۳: مشبک با فاز ۱۸۰ درجه

پس از ریختن قالب، برای خروج حباب‌های هوا به مدت یک دقیقه از لرزاننده استفاده شد، سپس نمونه با استفاده از پمپ باد از داخل قالب بیرون آورده شد و به مدت ۵ الی ۶ روز در هوای آزاد قرار داده شد تا کاملاً خشک شده و برای انجام آزمایش آماده شود. پس از خشک شدن

۴- تجهیزات آزمایشگاهی

برای مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی، دستگاه سه‌محوره‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهمسانگرد برجای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارد. سیستم استفاده شده برای راه‌اندازی آزمایش، شامل یک انباشتگر، دستگاه سه‌محوره، پمپ جابجایی 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. شکل ۷، 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 است. جهت ثابت نگه‌داشتن تنش‌های اعمالی، پکرهای جک‌های هیدرولیکی با نوع بسیار مرغوب تعویض شدند تا مشکل افت تنش اعمالی برطرف شود. در شکل ۸، 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 *St37* استفاده شد که دارای مدول الاستیسیته ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ است.

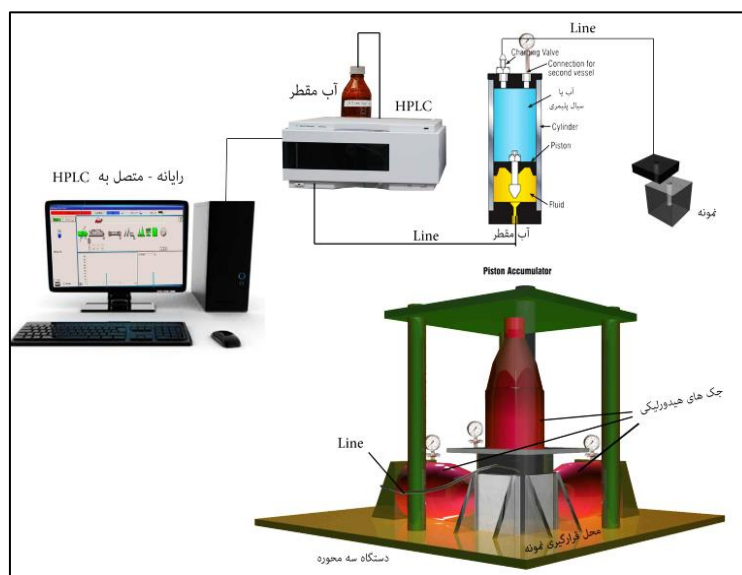
ایجاد ساختار زنجیری طولانی و تولید کیک بر روی دیواره چاه بوده تا مانع هرزروی سیال شکست در نمونه مورد آزمایش شود و همچنین باعث ایجاد فشار در داخل چاه و نهایتاً شکست هیدرولیکی شود. در این سیالات، برای مشاهده هرچه بهتر مسیر گسترش شکاف، پس از انجام آزمایش و همچنین برای تعیین دقیق‌تر جهت شکست، از رنگ‌دانه مشکی استفاده شد.



شکل ۵: بلوک‌های هیدروستونی آماده‌سازی شده برای آزمایش



شکل ۶: نحوه آماده‌سازی سیال برای آزمایش شکست هیدرولیکی: (الف) پودر زانتان، (ب) سیال شکست



شکل ۷: تجهیزات آزمایشگاهی و نحوه اعمال تنش‌های برجا

چهار ستون با مقطع دایره‌ای به قطر ۴۲ میلی‌متر مهار می‌شود. صفحه با ابعاد ۲۰×۲۲ سانتی‌متر، به عنوان تکیه‌گاه جک افقی است، طوری که انتهای جک به وسیله چهار عدد پیچ به این صفحه متصل می‌شود. در مرکز این تکیه‌گاه، سوراخی به قطر ۳ سانتی‌متر، برای خروج شلنگ اتصالی انتهای جک به فشارسنج ایجاد شده است. صفحه با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر، برای اعمال فشار به نمونه از طریق پیستون جک، طراحی شده است، بر روی این صفحه، دایره هم مرکز با صفحه به قطر ۷ سانتی‌متر، برابر با قطر پیستون و به عمق ۳ میلی‌متر برای جلوگیری از لغزش پیستون بر روی صفحه، حین اعمال بار، ایجاد شده است. فریم دستگاه، صفحه‌ای با ابعاد ۱۵×۱۵ سانتی‌متر است که برای قرار گرفتن نمونه مورد آزمایش در آن است. در پشت این صفحه از دو عدد لچگی به ضخامت ۳ سانتی‌متر و به طول ۱۰ سانتی‌متر استفاده شده است. این لچگی‌ها، نقش تکیه‌گاه را برای این صفحه داشته و از انحنا و خمیدگی صفحه، هنگام اعمال فشار جلوگیری می‌کند.



شکل ۸: نمایی از دستگاه سه محوره

۴-۱- طراحی و اعتبارسنجی دستگاه سه محوره

برای طراحی دستگاه سه محوره از چهار صفحه فولادی استفاده شد. این صفحات، تحت بارهای ۴۰ و ۳۰ تنی قرار گرفته و جایجایی حاصل از بارهای وارده به صفحات محاسبه شد. مشخصات صفحه‌های استفاده شده و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی در جدول ۱ بیان شده است. در قسمت بالای دستگاه، صفحه با ابعاد ۴۲×۴۲ سانتی‌متر، تکیه‌گاه بار قائم وارده بر نمونه است که توسط

جدول ۱: مشخصات صفحه‌های استفاده شده برای ساخت دستگاه سه محوره و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی

ابعاد صفحه (cm)	ضخامت صفحه (cm)	بار اعمالی (ton)	جایجایی حاصل از بار (mm)
۴۲×۴۲	۵	۴۰	۱/۴
۲۰×۲۲	۴	۳۰	۰/۰۱۸
۱۰×۱۰	۴	۳۰	۰/۰۹۱
۱۵×۱۵	۵	۳۰	۰/۹۶۸

جریان تزریقی برای این پمپ از ۰/۰۰۱ تا ۵ سی‌سی بر دقیقه است. سیال استفاده شده در این پمپ، آب مقطر است. به منظور تأمین فشار انباشتگرها و بالا راندن پیستون آنها از پمپ هیدرولیکی که سیال آن روغن است، استفاده شد. همچنین، از پمپ خلاء برای پر کردن انباشتگرها و تسریع فرآیند اشباع نمونه‌ها استفاده شد. از انباشتگرها نیز برای تأمین فشار سیال تزریق (گاز یا مایع) استفاده شد. آب تزریقی به وسیله لوله‌ها، شیرها و اتصالات به زیر پیستون انباشتگر مورد نظر منتقل شده و تحت فشار پمپ، پیستون به سمت بالا حرکت می‌کند. با بالا رفتن پیستون، سیال موجود در انباشتگر از طریق اتصالات به سمت محل تزریق هدایت می‌شود.

برای مونتاژ دستگاه، از ۳۷ عدد پیچ استفاده شد و برای اطمینان از پایداری دستگاه در برابر نیروهای وارده، در تمامی اتصالات، جوشکاری یکنواخت و پیوسته‌ای انجام شد. به دلیل کوچک بودن قطعات استفاده شده برای ساخت دستگاه و محدود بودن فضا برای اتصال پیچ‌ها، مقاوم‌ترین پیچ با مقاومت اسمی ۱۲/۹ برای مونتاژ دستگاه انتخاب شد. همچنین با در نظر گرفتن تنش‌های کششی و برشی وارده بر ستون‌ها و ضریب اطمینان ۲، قطر ستون ۴۲ میلی‌متر تعیین شد.

۴-۲- سیستم تزریق دستگاه سه محوره

در دستگاه سه محوره طراحی شده، برای تزریق سیال از پمپ HPLC استفاده شده است. محدوده فشار این پمپ از ۱ تا ۴۰۰ بار متغیر است، همچنین محدوده شدت

۵- خواص مکانیکی نمونه‌های آماده شده

شده و مقادیر مدول الاستیک مماسی از روی منحنی تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها تعیین شد. تعیین مقاومت کششی برای تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی بسیار حائز اهمیت است. مقادیر مقاومت کششی برزیلی نیز با استفاده از ۱۲ نمونه NX با نسبت طول به قطر به قطر 0.5 با نرخ بارگذاری 0.2 kN/s تعیین شد. خواص مکانیکی نمونه‌های هیدروستونی آماده شده برای آزمایش، در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی نمونه‌های هیدروستونی و تحلیل آماری آنها

ضریب پواسون	چگالی	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول یانگ (GPa)
متوسط	۲/۱۰	۶/۴۸	۱/۸۳	۰/۹۵
انحراف معیار	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۱۱

شده به طول ۱۰ و به قطر ۱ میلی‌متر است که در راستای تنش افقی کمینه قرار گرفته‌اند. ۶ نمونه هیدروستونی برای مطالعات این بخش استفاده شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. هندسه شکست هیدرولیکی در این حالت، پیچیده است و همان طور که در شکل ۹- الف، مشاهده می‌شود، شکست، شاخه‌ای و پیچ در پیچ است. اما هندسه غالب شکست، مشابه مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط دوو و بویس (۱۹۸۹) بر روی نمونه‌های سنگ نمک با نسبت تنش افقی بین ۱ تا ۲، محوری و در راستای تنش افقی بیشینه است. با افزایش تنش افقی، همان طور که در نمودار فشار- زمان مشاهده می‌شود، نوسان زیادی در منحنی دیده می‌شود که نشانگر ایجاد ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع در نزدیکی چاه است.

۶-۲- بررسی تأثیر شکل مشبک بر هندسه شکست

برای بررسی تأثیر شکل مشبک بر روی شکست هیدرولیکی، از دو شکل استوانه‌ای و مخروطی با استفاده از ۴ نمونه هیدروستونی استفاده شد. طول مشبک‌ها ۱۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد که با اختلاف زاویه ۱۸۰ درجه نسبت به هم، در راستای تنش افقی بیشینه ایجاد شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با تغییر شکل مشبک از مقطع مخروطی به استوانه‌ای، به علت کاهش تمرکز تنش در مشبک استوانه‌ای نسبت به مخروطی، امکان شروع و گسترش ترک کاهش یافته، بنابراین، فشار شکست افزایش می‌یابد. در شکل‌های ۱۰ و

برای تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های آماده شده از استاندارد *ISRM* (۲۰۰۷) [۲۶] استفاده شد. مقادیر مقاومت فشاری تک محوری ۶ نمونه آماده شده با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر 2.5 ، با استفاده از آزمایش فشاری تک محوری سروکنترل، با نرخ بار 2 kN/s ، تعیین شد. همچنین نمودارهای تنش-کرنش هر نمونه، ترسیم

۶- مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف مشبک کاری بر عملیات شکست هیدرولیکی

پارامترهای مختلفی هم‌چون شدت جریان تزریق، نوع سیال شکست، ویسکوزیته سیال، میدان تنش‌های برجا، 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 ۳۸ نمونه هیدروستونی آماده شده، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف مشبک‌کاری شامل شکل، طول، قطر و جهت مشبک و نیز تنش افقی کمینه بر هندسه و فشار شکست، نمودار فشار- زمان و نحوه گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع در عملیات شکست هیدرولیکی پرداخته شده است. دو مشبک با اختلاف زاویه ۱۸۰ درجه در داخل چاه به صورت مکانیکی ایجاد شدند. همچنین از سیال پایه آبی همراه با پودر زانتان در تمامی آزمایش‌ها استفاده شد. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، یک تکرار آزمایش برای اطمینان از نتایج به دست آمده انجام شده است.

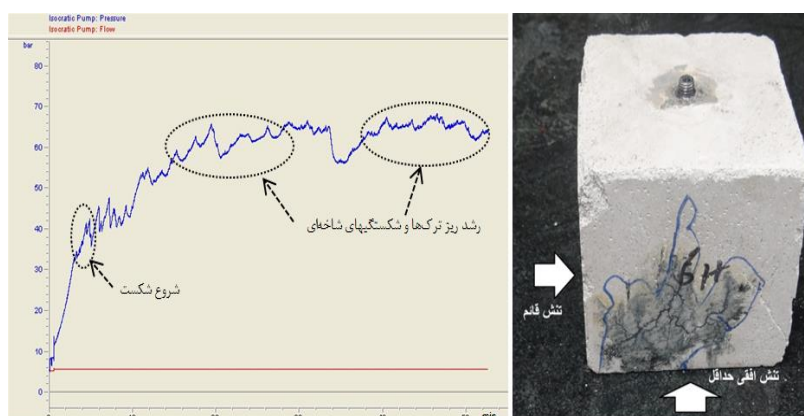
۶-۱- بررسی تأثیر افزایش تنش افقی کمینه در چاه افقی هم‌راستا با تنش افقی بیشینه (رژیم تنشی گسل معکوس)

در ابتدا، تأثیر تنش افقی کمینه بر روی شکست هیدرولیکی در حضور مشبک ایجاد شده در چاه افقی، هم‌راستا با تنش افقی بیشینه بررسی شد. مشبک‌های ایجاد

۱۱، به ترتیب، تصویر بلوک‌های شکسته شده مشبک‌های استوانه‌ای و مخروطی مشاهده می‌شود. در هر دو حالت، هندسه شکست هیدرولیکی به صورت عمودی است و جهت رشد شکاف به سمت پایین نمونه است.

جدول ۳: نتایج حاصل از تغییر تنش افقی کمینه

شماره آزمایش	تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	ضریب تنش تفاضلی $(K_h = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_h})$	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	۲/۲	۱۱/۴	۴/۳	۱/۷	۴	۵/۶	کششی
۲	۲/۲	۱۱/۴	۴/۳	۱/۷	۷/۲	۵/۶	کششی
۳	۲/۲	۱۱/۴	۶/۴	۰/۸	۴/۴	۶/۲	کششی
۴	۲/۲	۱۱/۴	۶/۴	۰/۸	۷/۸	۶/۲	کششی
۵	۲/۲	۱۱/۴	۸/۶	۰/۳	۶/۱	۶/۴	کششی
۶	۲/۲	۱۱/۴	۸/۶	۰/۳	۶/۹	۶/۴	کششی



شکل ۹: نمایش هندسه شکست و منحنی رفتاری آن: (الف) هندسه شکست، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۵)

جدول ۴: نتایج حاصل از تغییر شکل مشبک بر هندسه شکست

شماره آزمایش	شکل مشبک	تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	مخروطی	۱۱/۴	۴/۳	۲/۲	۳/۳	۲/۹۵	کششی
۲	مخروطی	۱۱/۴	۴/۳	۲/۲	۲/۶	۲/۹۵	کششی
۳	استوانه‌ای	۱۱/۴	۴/۳	۲/۲	۴/۷	۴/۰۵	کششی
۴	استوانه‌ای	۱۱/۴	۴/۳	۲/۲	۳/۴	۴/۰۵	کششی

طول مشبک، تغییر چندانی در میزان فشار شکست رخ نمی‌دهد. دلیل عدم تغییر قابل توجه در فشار شکست، آن است که شروع شکاف در تمامی آزمایش‌ها برای مشبکی که در راستای تنش افقی بیشینه قرار دارد، از دیواره چاه است و چون تمرکز تنش در اطراف چاه برای تمامی آزمایش‌های با طول مشبک متفاوت، یکسان است، فشار شروع شکست تقریباً یکسان است. در شکل ۱۲، تصویر مربوط به بلوک شکسته شده و نمودار فشار- زمان آزمایش ۵ نشان داده

۳-۶- بررسی تأثیر طول مشبک بر هندسه شکست

برای بررسی تأثیر تغییر طول مشبک، ۶ آزمایش بر روی ۶ نمونه هیدروستونی با مشبک‌هایی به طول ۱۰، ۱۷/۵ و ۲۲/۵ میلی‌متر و به قطر ۱ میلی‌متر انجام شد. مشبک‌ها هم راستا با تنش افقی بیشینه و خلاف جهت هم در داخل نمونه ایجاد شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش

همچنین، همان طور که در نمودار فشار- زمان مشاهده می‌شود، با گذشت زمان، گسترش شکاف با افزایش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های شاخه‌ای همراه است.

همان طور که مشاهده می‌شود، شکست دو باله متقارن در دو طرف چاه ایجاد شده است. هندسه شکست ایجاد شده در این نمونه به صورت قائم و شیب‌دار است.



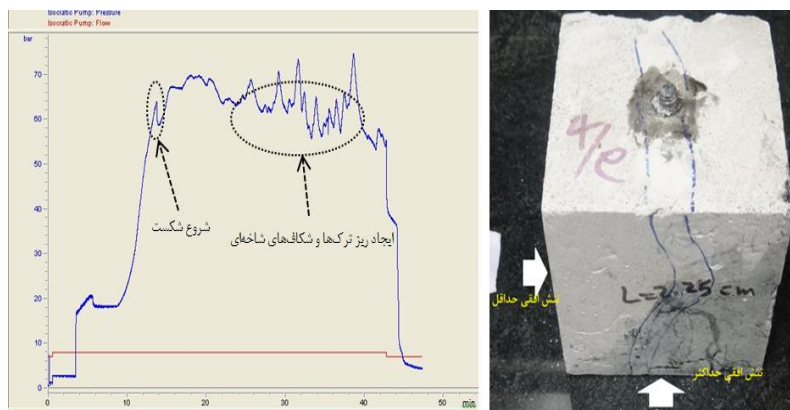
شکل ۱۰: بررسی تأثیر شکل مشبک بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده با مشبک مخروطی، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۲)



شکل ۱۱: بررسی تأثیر شکل مشبک بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده با مشبک استوانه‌ای، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۴)

جدول ۵: نتایج حاصل از تغییر طول مشبک بر هندسه شکست

شماره آزمایش	طول مشبک (mm)	تنش قائم (MPa)	تنش بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	۱۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۴/۲	۶/۱	کششی
۲	۱۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۸	۶/۱	کششی
۳	۱۷/۵	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۵/۹	۶/۹۵	کششی
۴	۱۷/۵	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۸	۶/۹۵	کششی
۵	۲۲/۵	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۴/۵	۶/۰۵	کششی
۶	۲۲/۵	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۷/۶	۶/۰۵	کششی



شکل ۱۲: بررسی تاثیر طول مشبک بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۵)

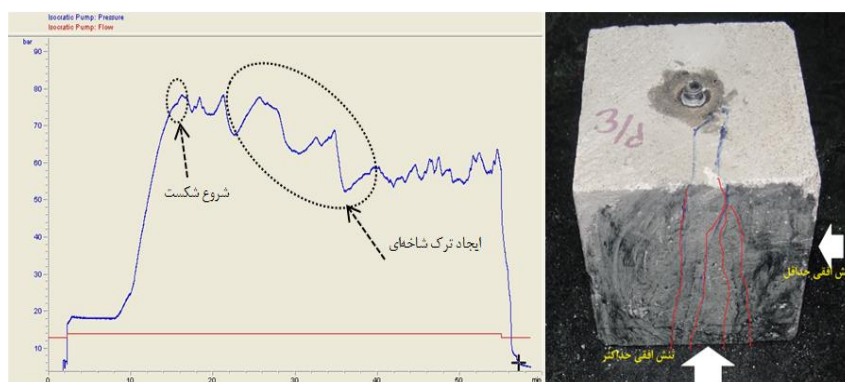
۴-۶- بررسی تاثیر قطر مشبک بر هندسه شکست

نشان می‌دهد، با افزایش قطر مشبک، فشار شکست ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. تصویر بلوک شکسته شده و نمودار فشار- زمان مربوط به آزمایش شماره ۴ در شکل ۱۳ ارائه شده است. هندسه شکست غالب در این آزمایش‌ها، شکست قائم با دو باله متقارن است، ولی در بعضی موارد شکست‌های شیب‌دار با یک بال نیز مشاهده شده است.

دو مشبک، خلاف جهت هم و در راستای تنش افقی بیشینه با طول ثابت و قطرهای متفاوت برای بررسی تاثیر قطر مشبک بر روی شکست هیدرولیکی، در داخل چاه شبیه‌سازی شده، ایجاد شدند. برای بررسی تاثیر قطر مشبک نیز از ۶ نمونه هیدروستونی استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج

جدول ۶: نتایج حاصل از تغییر قطر مشبک بر هندسه شکست

شماره آزمایش	قطر مشبک (mm)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	۱	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۴/۶	۵/۴	کششی
۲	۱	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۶/۲	۵/۴	کششی
۳	۲	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۳/۱	۴	برشی
۴	۲	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۴/۹	۴	برشی
۵	۳	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۳/۷	۵/۷۷	کششی
۶	۳	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۷/۸	۵/۷۷	کششی

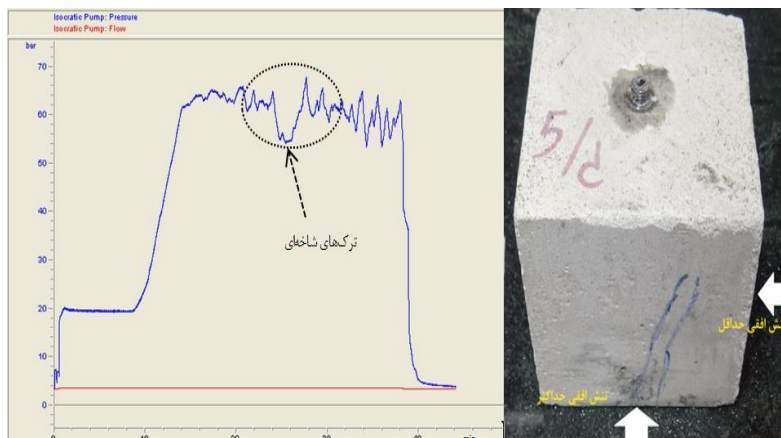


شکل ۱۳: بررسی تاثیر قطر مشبک بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۴)

افقی بیشینه در چاه قائم، فشار شکست افزایش می‌یابد. تنها در زاویه ۳۰ درجه، به علت تغییر مکانیزم شکست از کششی به برشی، فشار شکست کاهش یافته است. در شکل ۱۴، تصویر بلوک شکسته شده و نمودار فشار- زمان آزمایش شماره ۴ نشان داده شده است. هندسه شکست در زوایای مختلف مشبک کاری متفاوت است. تنها شکست ایجاد شده در مشبک هم راستا با تنش افقی بیشینه، قائم و مستقیم است. در دیگر زوایا، شکست ایجاد شده، شیب‌دار، کوتاه، تک باله و شاخه‌ای است.

جدول ۷: نتایج حاصل از تغییر زاویه مشبک در چاه قائم بر هندسه شکست

شماره آزمایش	زاویه مشبک (درجه)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۴/۴	۴/۷۵	کششی
۲	۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۵/۱	۴/۷۵	کششی
۳	۳۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۳/۲	۴/۳	برشی
۴	۳۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۵/۴	۴/۳	برشی
۵	۶۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۳/۹	۵/۳۵	کششی
۶	۶۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۶/۸	۵/۳۵	کششی
۷	۹۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۵/۶	۶/۷۵	کششی
۸	۹۰	۸/۶	۴/۳	۲/۲	۷/۹	۶/۷۵	کششی



شکل ۱۴: بررسی تأثیر زاویه مشبک در چاه قائم بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده، (ب) نمودار فشار-زمان (آزمایش شماره ۴)

تنشی که برای چاه شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شده است، رژیم گسل نرمال است. به همین علت، چون تنش قائم، مقدار بزرگ‌تری نسبت به تنش افقی بیشینه دارد، کم‌ترین فشار شکست در راستای تنش قائم به دست می‌آید. با افزایش زاویه مشبک نسبت به راستای تنش افقی بیشینه در چاه افقی، فشار شکست کاهش می‌یابد. در شکل ۱۵ بلوک شکسته شده و نمودار فشار- زمان آزمایش ۶ ارائه شده است. هندسه شکست در این آزمایش‌ها مانند بخش

۶-۵- بررسی تأثیر تغییر جهت مشبک نسبت به راستای تنش افقی بیشینه در چاه قائم بر هندسه شکست

در آزمایش‌های این بخش، چهار جهت صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به تنش افقی بیشینه برای مشبک در نظر گرفته شد. مشبک‌ها به صورت دوگانه و خلاف جهت هم در داخل چاه شبیه‌سازی شده، ایجاد شدند. ۸ نمونه هیدروستونی برای بررسی تأثیر جهت مشبک کاری در چاه قائم استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۷، آورده شده است. با افزایش زاویه مشبک نسبت به تنش

۶-۶- بررسی تأثیر تغییر جهت مشبک نسبت به راستای تنش افقی بیشینه در چاه افقی

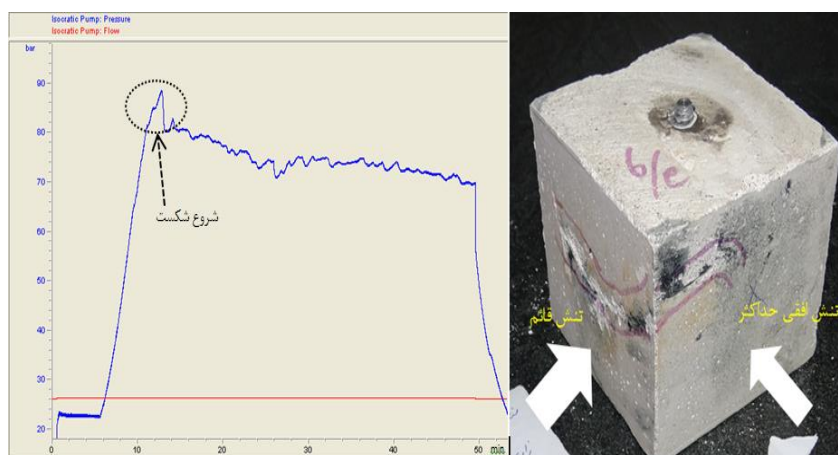
مطالعات این بخش، مشابه بررسی‌های بخش قبلی است، با این تفاوت که آزمایش‌های انجام شده برای چاه افقی طراحی شده است. چاه افقی شبیه‌سازی شده، هم راستا با تنش افقی کمینه در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در جدول ۸ ارائه شده است. رژیم

است. در سایر موارد، شکست‌های ایجاد شده، افقی، شیب‌دار و در بعضی موارد محوری است که در یک یا دو وجه در سطح خارجی نمونه مشاهده شده است.

قبلی، نسبت به زوایای مشبک متفاوت است. شکست ایجاد شده در راستای تنش قائم، افقی و عمود بر تنش افقی کمینه بوده و در یک جهت به سطح خارجی نمونه رسیده

جدول ۸: نتایج حاصل از تغییر زاویه مشبک در چاه افقی بر هندسه شکست

شماره آزمایش	زاویه مشبک (درجه)	تنش قائم (MPa)	تنش افقی بیشینه (MPa)	تنش افقی کمینه (MPa)	فشار شکست (MPa)	میانگین فشار شکست (MPa)	مکانیزم شکست
۱	۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۵/۷	۷/۱۵	کششی
۲	۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۸/۶	۷/۱۵	کششی
۳	۳۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۵/۷	۶/۱	کششی
۴	۳۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۶/۵	۶/۱	کششی
۵	۶۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۴/۸	۶	کششی
۶	۶۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۷/۲	۶	کششی
۷	۹۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۵/۷	۵/۷۵	کششی
۸	۹۰	۶/۴	۴/۳	۳/۴	۵/۸	۵/۷۵	کششی



شکل ۱۵: بررسی اثر زاویه مشبک در چاه افقی بر هندسه شکست: (الف) نمونه شکسته شده، (ب) نمودار فشار- زمان (آزمایش شماره ۶)

شکست هیدرولیکی بررسی شد. بدین منظور، با استفاده از مدلسازی فیزیکی، ۳۸ نمونه هیدروستونی شامل گچ و ماسه بادی دانه‌بندی شده با اندازه ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متر ساخته شد. برای مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی و به منظور اعمال تنش‌های برجا با مقادیر مختلف، دستگاه سه محوره‌ای طراحی و ساخته شد. این دستگاه، توانایی اعمال تنش‌های ناهمسانگرد بر جای زمین در مقیاس آزمایشگاهی را دارد. نتایج حاصل از آزمایش‌های شکست هیدرولیکی انجام شده عبارتند از:

- ۱- در چاه افقی مشبک‌دار و در شرایط رژیم تنشی گسل معکوس، فشار شکست، رابطه مستقیمی با مقدار تنش افقی کمینه نشان داد. با دو برابر شدن تنش افقی کمینه، میانگین فشار شکست، حدود ۱۴ درصد افزایش یافت.

۷- نتیجه‌گیری

شکست هیدرولیکی یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تحریک مخازن نفت و گاز است. پارامترهای مختلفی همچون شدت جریان تزریق، نوع سیال شکست، ویسکوزیته سیال، میدان تنش‌های برجا، مقاومت کششی سنگ، مدول الاستیسیته، رژیم تنش اطراف چاه، فشار منفذی، مشبک‌کاری و تنش تفاضلی بر روی عملیات شکست هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف مشبک‌کاری، همچون هندسه مشبک (شامل طول، قطر و شکل مشبک)، فاز مشبک‌کاری (در دو حالت چاه عمودی و افقی) و تنش افقی کمینه در حضور مشبک بر هندسه و فشار شکست، نمودار فشار- زمان و نحوه گسترش ریز ترک‌ها و شکستگی‌های متقاطع عملیات

مطالعات انجام شده توسط دوو و بویس بر روی نمونه‌های سنگ نمک و بهلولی و پاتر (۲۰۰۶) بر روی سنگ‌های تحکیم نیافته نشان داد، هندسه غالب شکست، محوری و در راستای تنش افقی بیشینه است و با افزایش تنش‌های محصور کننده، فشار شکست افزایش می‌یابد. بررسی‌های آزمایشگاهی این تحقیق با استفاده از مواد شبه سنگی نیز رفتار مواد سنگی مطالعات قبلی را تأیید می‌کند.

مراجع

- [1] API Technical Report, (2009), Hydraulic Fracturing Operations-Well Construction and Integrity Guidelines, Washington, DC, American Petroleum Institute.
- [2] Montgomeri, C. T., & Smith, M. B. (2010). NSI Technologies, Hydraulic Fracturing: History of an Enduring Technology. Technical Report JPT, JPT.
- [3] Haimson, B., & Fairhurst, C. (1969). Hydraulic fracturing in porous-permeable materials. *Journal of Petroleum Technology*. 21(7), 811-817.
- [4] 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.
- [5] Doe, T. W., & Boyce, G. (1989). Orientation of hydraulic fractures in salt under hydrostatic and non-hydrostatic stresses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 26(6), 605-611.
- [6] Beugelsdijk, L. J. L., 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.
- [7] Lhomme, T. P., Pater, C. J., & Helfferich, P. H. (2002). Experimental study of hydraulic fracture initiation in Colton sandstone. In the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Texas, USA.
- [8] Bohlooli, B., & 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.
- [9] 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.

- ۲- تغییر شکل مشبک از مخروطی به استوانه‌ای، سبب افزایش ۳۷ درصدی میانگین فشار شکست شد.
- ۳- افزایش طول مشبک، تأثیر چشم‌گیری بر روی مقدار فشار شکست ندارد، البته نتیجه به دست آمده برای مشبک ایجاد شده در راستای تنش افقی بیشینه است، ممکن است با تغییر زاویه مشبک، نتیجه حاصل متفاوت باشد.
- ۴- با افزایش قطر مشبک از یک تا دو میلی‌متر، ابتدا، میانگین فشار شکست، حدود ۲۶ درصد کاهش و سپس، با افزایش قطر مشبک از دو تا سه میلی‌متر، میانگین فشار شکست حدود ۴۴ درصد افزایش یافت.
- ۵- افزایش زاویه مشبک نسبت به تنش افقی بیشینه از صفر تا ۹۰ درجه در چاه افقی، موجب کاهش ۲۰ درصدی میانگین فشار شکست شد. کاهش فشار شکست در چاه افقی، غیر یکنواخت است. غیر یکنواخت بودن تغییر فشار شکست با افزایش زاویه مشبک، سبب پیچیده‌تر شدن تحلیل اثر مشبک در چاه افقی می‌شود و طراحی و پیش‌بینی فشار و جهت شکاف در عملیات شکست هیدرولیکی را با مشکل مواجه می‌کند. تغییر زاویه مشبک، سبب ایجاد ترک‌های شاخه‌ای، کوتاه، متقاطع و در بعضی موارد سبب متوقف شدن شکست می‌شود.
- ۶- هندسه مشبک، تأثیر قابل توجهی بر روی جهت و هندسه شکست ندارد و هندسه غالب برای این حالت در چاه قائم، طبق تئوری گریفیث، قائم بوده و در راستای عمود بر تنش افقی کمینه رشد می‌کند.
- ۷- رژیم تنش‌های گسل معکوس و ایجاد مشبک در راستای تنش افقی کمینه، سبب پیچاپیچی و متقاطع شدن شکست هیدرولیکی می‌شود.
- ۸- نتایج مدلسازی آزمایشگاهی انجام شده نشان داد، رفتار مواد شبه سنگی این مطالعه، رفتار بلوک‌های ماسه سنگی مطالعه شده توسط آلکسینکو و همکاران (۲۰۱۲) و بلوک‌های سنگ نمک مطالعه شده توسط دوو و بویس (۱۹۸۹) را تأیید می‌کند. مطالعات انجام شده توسط آلکسینکو و همکاران بر روی بلوک‌های ماسه سنگی بزرگ، نشان داد، پارامتر اصلی مؤثر بر فشار شکست، زاویه مشبک است. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نیز، تغییر زاویه نسبت به تغییر شکل، طول و قطر مشبک، تأثیر بیشتری بر روی مقدار فشار شکست دارد. همچنین

initiation from perforated non-cemented wellbore. In the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, USA.

[22] Abdollahipour, A., Fatehi Marji, M., Yarahmadi Bafghi, A., & Gholamnejad, J. (2015). Simulating the propagation of hydraulic fractures from a circular wellbore using the Displacement Discontinuity Method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 80, 281-291.

[23] 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.

[24] 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.

[25] Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strain near the end of crack traversing a plate. *J. Appl. Mech.*, 24, 361-364.

[26] ISRM. (2007). *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. Ulusay, R., & Hudson, J. A. (eds.), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey.

¹ Hydraulic Fracturing

² Breakdown pressure

³ Fluid rheology

⁴ Perforation

⁵ Hydrostone

⁶ Deviatoric Stress

⁷ Differential stress

⁸ Stress regime

⁹ Tortuosity

¹⁰ Injection pressure

¹¹ Fluid viscosity

¹² Sichuan

¹³ Boundary Element Method

¹⁴ Higher order displacement discontinuity method

¹⁵ Maximum tangential stress criterion

¹⁶ Bridge area

¹⁷ Wing cracks

¹⁸ Coalescence

¹⁹ Stress intensity factors

²⁰ Crack opening displacement

²¹ Permeability

²² Bi-wing

²³ Phase angle

²⁴ ABAQUS

²⁵ Poroelastic

²⁶ Linear Elastic Fracture Mechanics

²⁷ Minimum energy density criterion

²⁸ Maximum energy release rate criterion

²⁹ Xanthan

[10] 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.

[11] Chitralla, 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.

[12] Guo, T., Zhang, S., Qu, Z., Zhou, T., Xiao, Y., & Gao, J. (2014). Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume. *Fuel*, 128, 373-380.

[13] Behnia, M., Goshtasbi, K., Fatehi Marji, M., & Golshani, A. (2014). Numerical simulation of crack propagation in layered formations. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(7), 2729-2737.

[14] 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, 1716-1736.

[15] Haeri, H., Khaloo, A., & Fatehi Marji, M. (2015). Experimental and numerical analysis of Brazilian discs with multiple parallel cracks. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(8), 5897-5908.

[16] Haeri, H., Khaloo, A., & Fatehi Marji, M. (2015). Experimental and numerical simulation of the microcrack coalescence mechanism in rock-like materials. *Strength of Materials*, 47(5), 740-754.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Behrmann, L. A., & Elbel, J. L. (1991). Effect of perforations on fracture initiation. *Journal of Petroleum Technology*, 43(5), 608-615.

[20] Ketterij, R. B., & Pater, C. J. (1999). Impact of perforations on hydraulic fracture tortuosity. In the SPE European Formation Damage Conference, Hague, Netherlands.

[21] Alekseenko, O. P., Potapenko, D. I., Cherny, S. G., Esipov, D. V., Kuranakov, D. S., & Lapin V. N. (2012). 3-D modeling of fracture