

مقاله پژوهشی

تأثیر تخلخل و فشار همه‌جانبه بر مکانیسم شکست هیدرولیکی با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی

محمد رضا دریس عبدالله پور*؛ محمدصادق نیکخواه^۱؛ حسین نادری^۲؛ حسین جلالی فر^۴

۱. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳. فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی نفت؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی نفت و گاز، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴. استاد؛ دانشکده‌ی فنی و مهندسی، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2022.326868.1157

چکیده

فرآیند شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قابل‌استفاده برای افزایش میزان بهره‌برداری و تولید از میدان‌های نفتی و گازی با تراوایی پایین می‌باشد. با توجه به هزینه‌ی بالای شکست هیدرولیکی، بایستی قبل از انجام این عملیات، مطالعات لازم و کافی در خصوص خواص سنگ و سیال و میدان تنش‌های حاکم در اعماق زمین صورت گیرد. به این منظور در این تحقیق با استفاده از نمونه‌های مصنوعی در آزمایشگاه، اثر تخلخل بر فشار شکست، نوع ترک و همچنین تأثیر فشارهای جانبی مختلف بر عملیات شکست بررسی گردید. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که با افزایش فشار جانبی فشار شکست بالاتر رفته و در فشار جانبی بالا ترک از حالت قائم منحرف می‌شود. همچنین با افزایش تخلخل برای نمونه‌های R40 و R30-R20-R10 به ترتیب به میزان ۲۰، ۱۹، ۱۵ و ۱۳ درصد فشار شکست هیدرولیکی در فشار همه‌جانبه‌ی ۲ مگاپاسکال به ترتیب ۳۷، ۲۲، ۲۰ و ۱۹ درصد، در فشار همه‌جانبه‌ی ۳ مگاپاسکال ۳۳، ۲۵، ۲۰ و ۱۲ درصد و در فشار همه‌جانبه‌ی ۵ مگاپاسکال ۳۵، ۲۵ و ۲۰ درصد کاهش دارد که در فشار جانبی‌های بالاتر این تأثیر کم‌تر می‌باشد و همچنین نشان‌دهنده‌ی این است که به‌طور کلی با افزایش تخلخل فشار شکست کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی

شکست هیدرولیکی، اثر تخلخل، اثر فشار جانبی، ترک، مقاومت سنگ

۱. پیشگفتار

کاربرد مکانیک سنگ از سال‌ها پیش در بخش‌های مختلف صنعت نفت و گاز دنیا و در موضوعات مهمی از جمله شکست هیدرولیکی^۱، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز و تغییر تراوایی مخازن نفت سنگین مطرح‌شده و پروژه‌های متعددی در رابطه با آن تعریف گردیده است. شکست هیدرولیکی بیانگر شروع و رشد شکستگی در سنگ، ناشی از فشار هیدرولیکی اعمال‌شده با سیال می‌باشد. این شکست به دو صورت طبیعی و مصنوعی یافت می‌شود. به‌عنوان مثال پدیده‌ی نفوذ ماگما^۲ در لایه‌های بالایی زمین، مانند سیل^۳ (شکاف افقی) و

دایک^۴ (شکاف عمودی)، شکست هیدرولیکی طبیعی بوده و حالت مصنوعی آن به‌وسیله‌ی تجهیزات مخصوص در اعماق زمین در مخازن نفتی و گازی انجام می‌گردد. افزایش درخواست جهانی برای انرژی، موجب شده تا فشارها بر روی صنعت نفت و گاز برای توسعه مخازنی که تولیدشان با مشکلاتی روبه‌رو شده بیشتر شود. پایین بودن تراوایی سنگ مخزن محدودیت طبیعی است که در مسیر جریان سیال وجود دارد به این معنی که سیال به‌راحتی نمی‌تواند در داخل مخزن به سمت چاه به حرکت درآید در این حالت هدف از انجام این فرآیند بهبود تراوایی سازند در اطراف چاه می‌باشد.

¹ Hydraulic Fracturing

² Magma

³ Sill

⁴ Daik

در نظر گرفتن حالت‌های مختلف تنش و زوایای متفاوت برخورد شکاف هیدرولیکی با ناپیوستگی بررسی کردند و دریافتند که شروع دوباره ترک هیدرولیکی از طرف دیگر ترک طبیعی به صورت تصادفی رخ می‌دهد. به دنبال آن، به این نتیجه رسیدند وجود ترک‌ها و ناپیوستگی‌های طبیعی در سنگ میدان تنش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که برای یک صفحه ترک طبیعی بسته، اندرکنش ترک هیدرولیکی با صفحه ترک به زاویه برخورد ترک هیدرولیکی و ترک طبیعی وابسته نبوده و معمولاً ترک هیدرولیکی از ناپیوستگی عبور می‌کند (Lamont & Jessen, 1963).

دانشی^۲ در سال ۱۹۷۳ به منظور تعیین نوع شکست دیواره چاه در عملیات شکست هیدرولیکی در چاه‌های شیب در آزمایش‌هایی را بر روی سه نوع سنگ انجام داد. وی بیان کرد که نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که عملیات شکاف هیدرولیکی در چاه‌های شیب‌دار شروع و گسترش شکاف در دیواره چاه و سازند به صورت کششی بوده نه برشی. از معایب موجود در کار می‌توان به همسانگردی در نظر گرفتن تنش‌ها در منطقه اشاره نمود (Daneshy, 1973). دانشی در سال ۱۹۷۴ مطالعاتی آزمایشگاهی انجام داد و گزارش داد که مقاومت صفحه‌ی ناپیوستگی، جهت آن و مقدار تنش انحرافی، اختلاف میان مقادیر تنش‌های اصلی و همچنین بازشدگی ترک طبیعی فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده‌ای هستند که عبور ترک هیدرولیکی از ناپیوستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. وی به این نکته پی برد که ترک‌های طبیعی با اندازه‌ی کوچک‌تر از ترک هیدرولیکی قادر به تحت تأثیر قرار جهت گسترش ترک هیدرولیکی نیستند. از طرف دیگر شکاف‌های طبیعی باز به صورت چشم‌گیری رشد ترک هیدرولیکی در سنگ را تحت تأثیر قرار داده و اغلب مانع رشد شکاف می‌شوند (Daneshy, 1974). اندرسون^۳ در سال ۱۹۸۱ بیان نمود که مقاومت اصطکاکی یک‌فصل مشترک با مقاومت پایین روی نتیجه حاصل از اندرکنش شکاف هیدرولیکی تأثیر فزاینده‌ای خواهد داشت. او آزمایش‌های متعددی انجام داد به نحوی که ترک تحت زاویه از پیش تعیین شده به سمت

از جمله محدودیت‌های غیرطبیعی صدمه‌های به وجود آمده در سازند، زمان اجرای عملیات، حفاری و یا سیمان‌کاری است. معمولاً در عملیات حفاری، لایه‌ای از گل حفاری تشکیل شده از ذرات بسیار ریز رس و عناصر سیلیکونی در دیواره‌ی چاه پدید می‌آید. این ذرات به دلیل کوچک بودن ابعادشان وارد خلل و فرج سنگ مخزن شده و در مقابل عبور جریان سیال از مخزن به چاه مقاومت می‌کنند، همچنین باعث کاهش شدید تراوایی سنگ مخزن می‌گردند. ذرات سیمان نیز به شیوه‌ای مشابه در طی عملیات سیمان‌کاری همانند گل حفاری موجب کاهش تراوایی می‌گردند. برای رفع مشکلات یادشده می‌توان از روش تحریک در چاه استفاده نمود. به‌طور کلی افزایش بهره‌دهی در چاه‌ها به‌خصوص در چاه‌هایی با تراوایی کم یا چاه‌های آسیب‌دیده یکی از مهم‌ترین اهداف می‌باشد. تا به امروز روش‌های مختلفی جهت افزایش میزان بهره‌دهی چاه‌ها ارائه و صورت گرفته که هر یک می‌تواند به‌گونه‌ای باعث بهبود عملکرد چاه‌ها گردد. از اصلی‌ترین شیوه‌های بهبود بهره‌دهی چاه‌ها، اثر گذاشتن بر فیزیک سنگ مخزن است که در آن تلاش بر آن است که ساختار فیزیکی سنگ مخزن بهبود یابد. به‌طور کلی دو روش اسید کاری و شکست هیدرولیکی وجود دارد که روش انتخابی مورد استفاده وابسته به هدف نهایی فرآیند تحریک است. استفاده از روش اسید کاری همواره مناسب نیست و در برخی از موارد شرایطی بر مخزن حکم فرماست که نمی‌توان از این روش استفاده نمود یا بازدهی پایینی را به همراه خواهد داشت که در این وضعیت روش شکاف هیدرولیکی در صورت مساعد بودن شرایط توصیه می‌گردد (فروزان، شفائی‌زاده، فرامرزی، & لهراسب، ۲۰۱۴).

از ابتدای پیدایش شکست هیدرولیکی، تحقیقاتی پیرامون ابعاد مختلف این موضوع آغاز شد. هدف این تحقیق‌ها بررسی امکان انجام عملیات شکست هیدرولیکی، مشخصات یک شکست مطلوب و همچنین بررسی تأثیر خواص سنگ و سیال بر هندسه شکاف ایجادشده، بوده است که در ادامه مختصری از این پژوهش‌ها آورده شده است.

به‌عنوان اولین تلاش، لمونت و یاسن^۱ در سال ۱۹۶۳ دسته‌ای از آزمایش‌ها را در مقیاس آزمایشگاهی روی شش نوع سنگ مختلف انجام دادند. آن‌ها این آزمایش‌ها را با

² Abbas Ali Daneshy

³ Gordon D. Anderson

¹ Norman Lamont & F. W. Jessen

تست‌های شکست هیدرولیکی در مصالح هسته‌ی سدهای خاکی می‌باشد. نتایج حاصل از این نمودار، مشخص می‌کند که فشار شکست با تنش محصورکننده دارای رابطه‌ی مستقیم است (Satoh & Yamaguchi, 2008). ژانگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۰ به پژوهش در رابطه با تغییر جهت گسترش شکاف در عملیات شکاف مجدد^۴ چاه پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بر روی یک نمونه مکعبی شکل که یک‌بار در آن عملیات شکاف هیدرولیکی صورت گرفته بود انجام دادند و بیان کردند که جهت شکاف جدید به‌صورت مستقیم نبوده، بلکه به دلیل متفاوت بودن تنش ماکسیمم در اطراف چاه و نواحی دوردست به شکل یک منحنی به وجود می‌آید (G. Q. Zhang & Chen, 2010). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۱ شروع و رشد شکاف از دهانه چاه در عملیات شکاف هیدرولیکی را موردپژوهش قرار دادند. در نتیجه آن‌ها دریافتند که در هنگام عملیات شکاف هیدرولیکی شکستگی‌های متعددی از دهانه چاه شروع به گسترش می‌کنند، سپس در جهت تنش ماکسیمم تغییر جهت می‌دهند و به‌طور کلی می‌توان گفت برخی از ترک‌ها قادر به رشد نیستند یا رشد آن‌ها خیلی محدود است و اما برخی دیگر به‌هم‌پیوسته و به‌سرعت رشد می‌کنند و شکاف را ایجاد می‌کنند. از نقاط ضعفی که در این پژوهش وجود داشت این بود که طول ترک اولیه و ناتراوا بودن سازند، نادیده گرفته شده بود (X. Zhang, Jeffrey, Bunger, & Thiercelin, 2011). یاو در سال ۲۰۱۲ با مقایسه رشد ترک در محیط‌های شکننده و شکل‌پذیر بیان کرد که طول شکاف در محیط‌های شکل‌پذیر نسبت به محیط‌های شکننده کوتاه‌تر است که علت این اختلاف طول را می‌توان به مقدار انرژی جذب‌شده در این دو محیط نسبت داد (سنگ‌های با خاصیت شکل‌پذیری انرژی بیشتری را جذب می‌کنند) (Yao, 2012). ناصحی^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۳ تأثیر وجود گسل بر روی رشد شکاف در عملیات شکاف هیدرولیکی را بررسی کردند. آن‌ها عنوان کردند زمانی که نوک شکاف هیدرولیکی به گسل برخورد می‌کند، رشد شکاف متوقف می‌گردد که دلیل توقف گسترش شکاف را، از دست رفتن انرژی سیال در هنگام برخورد با گسل عنوان کردند (

یک‌فصل مشترک تحت شرایط تنش تک‌محوری حرکت می‌کرد. او دریافت که یک شکاف هیدرولیکی زمانی از فصل مشترک عبور خواهد کرد که تنش نرمال وارد بر فصل مشترک به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد (Anderson, 1981). اتول^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۸ به بررسی نحوه رشد شکاف در عملیات شکافت هیدرولیکی در مخازن همگن و مخازن چندلایه پرداختند. به این منظور آزمایش‌های خود را بر روی دو بلوک A و B که دارای خواص متفاوتی بودن را انجام دادند. بلوک A که باسیمان همگن ساخته شده بود، به‌منظور شبیه‌سازی عملیات شکاف هیدرولیکی در مخازن همگن مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی عملیات شکاف هیدرولیکی در مخازن چندلایه از بلوک B که از چندلایه با خواص متفاوت ساخته شده بود استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مخازن همگن شکستگی به‌صورت دو بال پنی شکل در دو طرف محور چاه به وجود خواهد آمد. همچنین بیان نمودند که در مخازن دارای چندلایه مسیر رشد شکاف به‌صورت نامنظم بوده و شکاف به‌صورت چند شاخه‌ای گسترش خواهد یافت. یکی از دلیل رشد نامنظم مسیر شکاف در مخازن چندلایه به متفاوت بودن خواص مواد در مرز بین لایه‌ها می‌توان اشاره کرد (Athavale & Miskimins, 2008). ساتوه و یاماگوچی^۲ در سال ۲۰۰۹ مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی را برای بررسی شکاف هیدرولیکی در مصالح مورد استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی انجام دادند. این تست‌ها برای نمونه‌های استوانه‌ای توخالی، در مقیاس بزرگ با نمونه‌هایی با قطر خارجی ۳۰ سانتی‌متر و در مقیاس متوسط با نمونه‌هایی با قطر خارجی ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. در این پژوهش تأثیر ماکزیمم قطر دانه‌های خاکی D_{max} و فشار محصورکننده‌ی σ_3 ، فشار شکست و مقاومت نمونه‌های ساخته شده از مصالح متراکم شده در برابر شکاف هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که شکاف هیدرولیکی مصالح مورد استفاده در هسته‌ی سدهای خاکی در آزمایش با مقیاس بزرگ، یعنی در نمونه‌هایی با قطر ۱۵ سانتی‌متر به بالا قابل مشاهده است. آن‌ها همچنین نموداری را ارائه کردند که بیانگر رابطه بین فشار شکست P_f و فشار محصورکننده σ_3 برای این

³ Guang Qing Zhang

⁴ Reopening Fracture

⁵ Mohammad Javad Nasehi

¹ Athavale

² Hiroyuki Satoh, Yoshikazu Yamaguchi

گسترش و فرم شکستگی می‌باشد درحالی‌که اگر میزان شکستگی کم باشد انرژی موجب افزایش شکستگی‌های ناپیوسته و ایجاد یک شبکه‌ی شکستگی پیچیده می‌کند (Y. Zhang et al., 2019). جیانمینگ^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۹ خصوصیات ترک‌های ریز ناشی از شکست هیدرولیک را بررسی کردند و دریافتند که ترک‌های ریز به‌طور عمده در مرزهای اتصال و چسبیدن مواد معدنی و آلی به یکدیگر گسترش می‌یابد که می‌توان با متصل کردن فضاهای مواد آلی و معدنی تراوایی بیشتری به دست آورد و ترک‌هایی که در راستای حداکثر تنش ایجاد می‌شوند بسیار طولانی‌تر هستند (He, Li, Yin, Zhang, & Lin, 2020).

۲. تئوری شکست

برای اجرای عملیات شکاف هیدرولیکی در منطقه‌ی موردنظر، ابتدا چاه را تا عمق پیش‌بینی‌شده حفر می‌کنیم و بخشی از گمانه برای انجام شکاف هیدرولیکی انتخاب می‌شود. محل موردنظر به‌وسیله مجرا بند^۷ متورم شونده، آب‌بندی‌شده و سیال با دبی ثابت به داخل چاه تزریق می‌شود. با تزریق مداوم، فشار سیال به‌تدریج افزایش می‌یابد تا جایی که موجب شکسته شده دیواره‌ی چاه می‌گردد. بیشترین فشاری که در لحظه‌ی شکستن دیواره چاه به‌دست می‌آید، فشار شکست^۸ نام دارد. با کاهش نرخ تزریق جریان به چاه، شکستگی ایجادشده شروع به بسته شدن می‌کند. فشاری که در آن شکستگی ایجادشده مجدداً به‌صورت کامل بسته می‌شود، فشار انسداد^۹ و فشاری که در آن شکاف مجدداً باز می‌شود، فشار بازگشایی مجدداً^{۱۰} نام دارد. به هنگام اجرای عملیات شکست هیدرولیکی، فشار سیال به‌صورت مداوم ثبت می‌گردد و منحنی فشار - زمان رسم می‌شود (شکل ۱) (BC Haimson & Cornet, 2003).

(Nasehi & Mortazavi, 2013). گندوسی^۱ در سال ۲۰۱۶ روش‌های تحریک سازند بدون استفاده از آب را مطالعه و استفاده از گاز آل پی جی برای تحریک را بررسی کرد و دریافت که استفاده از سیال با ویسکوزیته، کشش سطحی و چگالی کم و حلال بودن در سیال مخزن می‌تواند بهره‌وری از لایه را افزایش داده و موجب می‌شود که آسیب کمتری به سازند وارد شود (Gandossi, 2016). وانیارچی‌چی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی عمق و فشار تزریق و اثر آن بر روی فشار شکست و تراوایی مخازن شیلی متوجه افزایش خطی فشار شکست سازند با افزایش عمق شدند و به گسترش شعاعی شکاف در مخازن با عمق کم و گسترش قائم شکاف در راستای تنش حداکثر در مخازن با عمق زیاد پی بردند (Wanniarachchi et al., 2017). اوچی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با بررسی تأثیر ناهمگنی در مقیاس کوچک بر روی رشد شکاف هیدرولیکی به این نتیجه رسیدند که شکاف از پیشروی در کانی‌های سخت اجتناب می‌کند و ترجیحاً در کانی‌های شکننده مانند کلسیت نفوذ می‌کند و اگر چندین شکاف در طول گسترش شکاف ایجاد شود، شکافی که کمترین پیچ‌پیچی را دارد بازمی‌ماند و درحالی‌که بقیه‌ی شکاف‌ها دور می‌شوند سرانجام بسته خواهند شد (Ouchi, Agrawal, Foster, & Sharma, 2017). یولانگ چن^۴ در سال ۲۰۱۸ در طی بررسی زاویه ناچ^۵، طول ناچ و دبی تزریق در مدل آزمایشگاهی با استفاده از نمونه‌های سیمانی و دستگاه سه محوره به این نتیجه رسیدند که هندسه‌ی انتشار شکاف ممکن است ارتباط مستقیمی با طول ناچ و دبی تزریق نداشته باشد ولی بسیار متأثر از زاویه‌ی ناچ است (Chen, Meng, & Zhang, 2018). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ ریخت‌شناسی شکستگی‌ها را در مخازن شیلی چندلایه را مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان‌دهنده‌ی این است که شکست هیدرولیکی در شیل به سه دسته اتفاق می‌افتد:

شکست ساده، شکست پیچیده و شکست شبکه‌ای که در شکست ساده اختلاف تنش افقی حداکثر تعیین‌کننده‌ی

⁶ Jianming He

⁷ Paker

⁸ Breakout pressure

⁹ Shut-in pressure

¹⁰ Reopening pressure

¹ Luca Gandossi

² Wanniarachchillage Ayal Maneth Wanniarachchi

³ Hisanao Ouchi

⁴ Yulong Chen

⁵ Noch

۱-۲-۱. چگونگی به دست آوردن مقدار و جهت

تنش‌های برجا در آزمایش HF

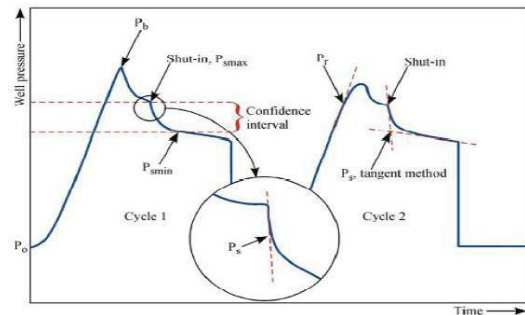
با ثبت فشار سیال در هر مرحله و رسم نمودار فشار برحسب زمان سپری شده در عمق مورد نظر و با داشتن P_s ، P_f و P_c با استفاده از روش کلاسیک (Hubbert & Willis, 1957)، تنش‌های اصلی قابل تعیین است. به جهت استفاده از این روش باید فرض‌های زیر را در نظر گرفت:

- محور طولی چاه می‌بایست در جهت یکی از تنش‌های اصلی باشد
- شکاف ایجاد شده هم‌راستا با محور چاه باشد (با حداکثر تا ۱۵ درجه انحراف)
- سنگ ایزوتروپ، هموژن، الاستیک خطی و در حالت اولیه نفوذناپذیر باشد.

۱-۲-۱-۱. تعیین مقدار و جهت تنش افقی مینیمم

(σ_h)

با توجه به اینکه جهت گمانه‌های ایجاد شده برای آزمون شکاف هیدرولیکی HF به‌طور عمده در جهت قائم است، این فرض بدان معناست است که یکی از تنش‌های اصلی در جهت قائم و تنش‌های اصلی دیگر در صفحه‌ی عمود بر محور گمانه می‌باشد. بر طبق نظریه گریفیث، در سنگ‌های همسانگرد، شکستگی‌های هیدرولیکی در راستای عمود بر تنش افقی مینیمم رشد می‌کنند (Cornet & Valette, 1984). (شکل ۲) جهت‌گیری شکست هیدرولیکی و جهت تنش‌های برجا را به‌طور شماتیک نمایش می‌دهد؛ بنابراین با تعیین راستای شکستگی ایجاد شده در گمانه، می‌توان جهت تنش‌های اصلی مینیمم و ماکزیمم را مشخص کرد. در صورتی که توده سنگ همگن و همسانگرد نباشد و یا جهت گمانه با راستای یکی از تنش‌های اصلی هم‌جهت نباشد، شکاف‌های هیدرولیکی به‌وجود آمده موازی با محور گمانه نمی‌باشد.



شکل ۱. منحنی فشار-زمان و مقادیر فشار انسداد، فشار شکست و فشار بازگشایی مجدد (BC Haimson & Cornet, 2003)

۱-۲-۱. فرآیند شکاف هیدرولیکی در محاسبه‌ی

مقدار و جهت تنش‌های برجا

برای تعیین مقدار و جهت تنش‌های برجا با استفاده از فرآیند شکست هیدرولیکی، این فرآیند به دو روش قابل اجرا می‌باشد: روش اول، روش کلاسیک یا HF^۱ در سال ۱۹۵۷ توسط هوپرت ویلیس^۲ به وجود آمد. تفسیر نتایج آزمایش HF فقط در صورتی ممکن که محور گمانه موازی با یکی از تنش‌های اصلی منطقه بوده و صفحه شکست به وجود آمده را شامل شود.

روش دوم که از آن به‌عنوان HTPF^۳ یاد می‌شود در سال ۱۹۸۶ توسط کورنت^۴ به وجود آمد. در این روش شکاف هیدرولیکی در شکاف‌ها و درزه‌هایی که از قبل در سنگ وجود دارد صورت می‌گیرد. این روش برای هر چاه با هر جهتی قابل انجام می‌باشد. فشار آب منفذی در این سبک اثرگذار نیست و تعیین مشخصات مواد ضرورتی ندارد. در هر دو روش، از لحاظ تئوری هیچ محدودیتی برای انجام آزمایش در عمق‌های متفاوت وجود ندارد، البته با این شرط که بتوان چاهی پایدار برای دست یافتن به عمق مورد انتظار حفر کرد و سنگ الاستیک و شکننده باشد (BC Haimson & Cornet, 2003).

¹ Hydraulic Fracturing

² Hubert and Willis

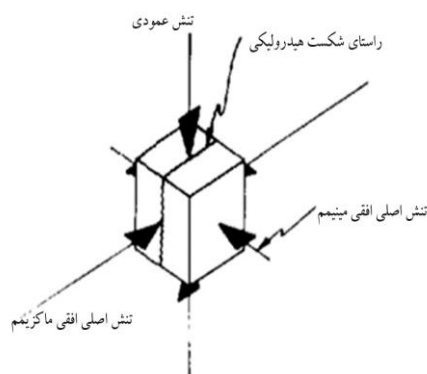
³ Hydraulic Testing of Pre-existing Fracture

⁴ Cornet

که در رابطه‌ی فوق P_0 فشار سیال منفذی می‌باشد. با در نظر داشتن این عنوان که مقاومت کششی سنگ در آزمایشگاه با آزمایش بر روی نمونه‌های گرفته‌شده از سنگ موردنظر قابل‌محاسبه است، در صورتی که نمونه‌های آزمایشگاهی در دسترس نباشد و یا امکان استفاده از دستگاه آزمایشگاهی برای آزمون وجود نداشته باشد، تنش افقی ماکزیمم از معادله‌ی زیر قابل به‌دست آوردن می‌باشد:

$$\sigma_H - P_0 = 3(\sigma_h - P_0) - (P_r - P_0) \quad (4)$$

که در این معادله به‌جای مقاومت کششی (T) از فشار بازشدگی مجدد P_r استفاده شده است.



شکل ۲. جهت‌گیری شکست هیدرولیکی، عمود بر تنش اصلی مینییم (Cornet & Valette, 1984).

در این صورت مقدار تنش افقی مینییم با فشار انسداد برابری می‌کند؛ یعنی:

$$\sigma_h = P_s \quad (1)$$

۲-۱-۱-۲. تعیین مقدار و جهت تنش افقی ماکزیمم (σ_H)

جهت تنش افقی ماکزیمم عمود بر راستای تنش افقی مینییم است. به‌دست آوردن مقدار تنش افقی ماکزیمم با در نظر گرفتن این فرض که سنگ الاستیک خطی باشد و اثر نفوذ سیال شکست به داخل سنگ نادیده گرفته شود، صورت می‌پذیرد. اگر در توده سنگ از فشار سیال منفذی صرف‌نظر شود، مقدار تنش افقی ماکزیمم از رابطه‌ی زیر قابل‌محاسبه است:

$$\sigma_H = T + 3\sigma_h + P_b \quad (2)$$

که در این معادله σ_H تنش افقی ماکزیمم، T مقاومت کششی سنگ، σ_h تنش افقی مینییم و P_b فشار شکست در نظر گرفته شده است.

در سنگ‌های اشباع که قابلیت نفوذپذیری پایینی را دارند، قبل از آنکه شکافها باز شوند، سیال شکست به داخل ساختار سنگ نفوذ نخواهد کرد؛ بنابراین عموماً این‌گونه تصور می‌شود که فشار سیال منفذی بدون تأثیرپذیری از حالت تنش بوده و مفهوم نظریه تنش مؤثر ترازقی در شکستگی‌های کششی به کار می‌رود. در این حالت تنش افقی ماکزیمم از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\sigma_H - P_0 = T + 3(\sigma_h - P_0) - (P_b - P_0) \quad (3)$$

۲-۱-۱-۳. تعیین مقدار و جهت تنش عمودی (σ_v)

راستای این تنش همیشه به‌صورت عمود بر سطح زمین می‌باشد و مقدار آن از نتایج آزمایش‌های شکاف هیدرولیکی قابل‌محاسبه نیست، مگر این‌که شکاف‌های ایجاد شده تقریباً افقی باشد؛ که در این صورت تنش عمودی برابر است با فشار انسداد شکاف‌های ایجاد شده.

معمولاً مقدار این تنش را مساوی با مقدار بار وارد شده از سمت روبراه به واحد سطح در نظر می‌گیرند؛ یعنی:

$$\sigma_v = \sum_i n_i P_i = \sum_i n_i g D_i \quad (5)$$

در این معادله P_i چگالی لایه‌های موجود در سازند، n تعداد لایه‌ها، D_i ضخامت لایه و g شتاب گرانشی زمین است.

۲-۱-۲. معیارهای کلاسیک برای تعیین رابطه‌ی بین P_c و تنش‌های اصلی افقی

دو معیار برای بیان رابطه‌ی بین P_b و تنش‌های اصلی افقی موجود است:

۲-۱-۲-۱. معیار شکست هوبرت و ویلیس

این معیار شکست بر پایه‌ی تئوری الاستیک برای سنگ‌های نفوذناپذیر بوده و به‌صورت رابطه‌ی زیر نمایش داده شده است (Hubbert & Willis, 1957):

$$P_b - P_0 = T_{hf} - 3\sigma_h + \sigma_H + P_0 \quad (6)$$

۲-۱-۲-۲. معیار شکست همیسون و فیرهارست^۱

این معیار شکست بر پایه‌ی نظریه پروالاستیک و با احتساب تنش‌های پروالاستیک القاشده که توسط نفوذ سیال در

¹ Haimson and Fairhurst

نمونه‌ها از سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان ماهان، پودر میکروسیلیس، پودر سنگ، پودر پرلیت و ماسه با اندازه‌های زیر یک میلی‌متر (ماسه‌بادی)، ۱ تا ۲ میلی‌متر و ۲ تا ۳ میلی‌متر که توسط الک از هم جدا شده‌اند، برای ساخت نمونه با قطر ۵۴ و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. در این قسمت نمونه‌های انتخاب شده (جدول ۲) که دارای مقاومت یکسان و تخلخل متفاوت هستند، برای اجرای عملیات شکست هیدرولیکی سوراخ‌کاری می‌شوند. سوراخ‌کاری نمونه‌ها به این صورت می‌باشد که در ابتدا به مقدار ۸ میلی‌متر از ابتدای نمونه با قطر ۱۳/۵ میلی‌متر برای قرارگیری پکینگ^۲ و سپس با قطر ۶ میلی‌متر به اندازه‌ی ۵ سانتی‌متر درون نمونه‌ها، حفره امتداد می‌یابد (شکل ۳).



شکل ۳ (الف): مراحل سوراخ‌کاری نمونه با قطر ۱۳/۵ میلی‌متر، (ب): مرحله‌ی سوراخ‌کاری با قطر ۶ میلی‌متر و (ج): نمایی از چند نمونه‌ی سوراخ شده

۴. سیال شکست

در میان سیالات شکست، سیال پایه آبی بیشترین کاربرد را دارد (Xiang Li et al., 2016)؛ اما در این پژوهش برای جلوگیری از نفوذپذیری سیال، از روغن هیدرولیک با ویسکوزیته ۶۰ سانتی پویز استفاده گردیده است.

سنگ‌ها به‌وجود می‌آید و به‌صورت رابطه‌ی زیر نمایش داده شده است (Bezael Haimson & Fairhurst, 1967).

$$P_c - P_o = \frac{T_{hf} + 3\sigma_h - \sigma_H - 2P_o}{2 - 2n} \quad (7)$$

در این روابط P_o فشار آب منفذی و T_{hf} تنش کششی شکست هیدرولیکی، P_c فشار آستانه‌ی شکست و n بیانگر پارامتر پرولاستیک است. و از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$n = \frac{\alpha(1-2\theta)}{2(1-\theta)} \quad 0 \leq n \leq 0.5 \quad (8)$$

که نماد α نشانگر پارامتر بایوت و نماد θ بیان‌کننده‌ی ضریب پواسون می‌باشد.

در هر دو معیار شکست، دو فرض وجود دارد:

۱- زمانی که تنش مماسی مؤثر در دیواره‌ی چاه به مقدار تنش کششی شکست هیدرولیکی T_{hf} سد، یک شکاف هیدرولیکی اتفاق می‌افتد.

۲- تئوری تنش مؤثر ترازقی که تأثیر فشار آب منفذی را به نمایش می‌گذارد، برقرار باشد، یعنی:

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} P_o \quad (j,i=1,2,3) \quad (9)$$

که σ_{ij}^{eff} تنش مؤثر می‌باشد و:

$$(\delta_{ij} = 1 \text{ for } i=j \text{ and } \delta_{ij} = 0 \text{ for } i \neq j) \quad (10)$$

۳. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تهیه‌ی نمونه‌ها با شرایط مدنظر از طرح اختلاط‌های متفاوت به‌صورت آزمون و خطا استفاده شد (جدول ۱). در ابتدا مواد موردنیاز با درصد‌های وزنی موردنظر با یکدیگر به‌خوبی مخلوط می‌شوند و بعد از اضافه نمودن آب، مخلوط آماده‌شده در قالب مخصوص ریخته می‌شود در مرحله‌ی بعد بایستی قسمت بالا و انتهای نمونه با استفاده از یک جسم صاف، صیقل داده شود. بعد از حدود ۲۴ ساعت که استحکام لازم در نمونه‌ها ایجاد شد از قالب خارج می‌گردند. لازم به ذکر است زمانی که مخلوط سیمانی داخل قالب ریخته می‌شود، توسط ضربه آن‌ها را به‌خوبی متراکم و با ضربات به دیواره قالب ویبره^۱ می‌شوند. این کار توسط یک چوب محکم و چکش پلاستیکی در این تحقیق انجام شده است. نمونه‌ها پس از ساخته شدن به مدت ۲۸ روز درون مخزن آب جهت رسیدن به حداکثر مقاومت تراکمی قرار گرفتند. برای ساخت

²Packing

¹ Vibration

جدول ۱ طرح اختلاط نمونه‌های ساخته‌شده

پرلیت (گرم)	روان کننده (میلی لیتر)	پودر سنگ (گرم)	میکرو سیلیس (گرم)	نسبت آب به سیمان	ماسه سه میلی متر (گرم)	ماسه دو میلی متر (گرم)	ماسه بادی (گرم)	سیمان (گرم)	مصالح / کد نمونه
۱۰	۰	۰	۰	۰/۶	۲۰	۵۰	۴۰۰	۱۴۴	R10-5
۱۴	۰	۰	۵	۰/۶	۳۰	۲۵	۴۳۲	۱۴۴	R10-10
۲۰	۰	۱۰	۱۰	۰/۶	۵۰	۵۰	۴۳۲	۱۴۴	R10-15
۲۵	۰	۱۵	۲۲	۰/۵۵	۰	۰	۵۷۶	۱۵۴	R10-20
۰	۰	۰	۲۰	۰/۵۵	۴۰	۱۳۰	۲۵۰	۱۵۰	R20-5
۰	۰	۰	۲۰	۰/۵۵	۰	۱۰۰	۳۳۰	۱۴۰	R20-10
۱۵	۰	۱۰	۱۰	۰/۵	۱۳۰	۰	۵۰۰	۱۵۰	R20-15
۲۵	۱۰	۴۰	۰	۰/۵	۰	۲۷۰	۲۷۰	۱۷۸	R20-20
۰	۵	۰	۲۰	۰/۴۵	۱۰۰	۲۰۰	۴۳۲	۲۰۰	R30-5
۰	۱۵	۰	۲۵	۰/۴۵	۱۰۰	۱۰۰	۵۰۰	۲۲۰	R30-10
۱۰	۱۵	۲۰	۲۰	۰/۴۵	۵۰	۵۰	۴۰۰	۱۸۰	R30-15
۲۵	۱۵	۳۰	۳۰	۰/۴۵	۳۰	۶۰	۵۷۰	۲۰۰	R30-20
۰	۲۵	۰	۶۰	۰/۴	۴۰	۶۰	۴۷۰	۳۰۰	R40-5
۱۰	۲۵	۱۰	۵۰	۰/۴	۴۰	۲۰	۴۷۰	۳۰۰	R40-10
۲۰	۲۰	۲۰	۵۰	۰/۴	۶۵	۸۰	۶۰۰	۳۰۰	R40-15
۳۰	۲۵	۱۵	۶۵	۰/۳۸	۸۰	۸۰	۶۰۰	۳۴۰	R40-20

۵. شرح دستگاه شکست هیدرولیکی

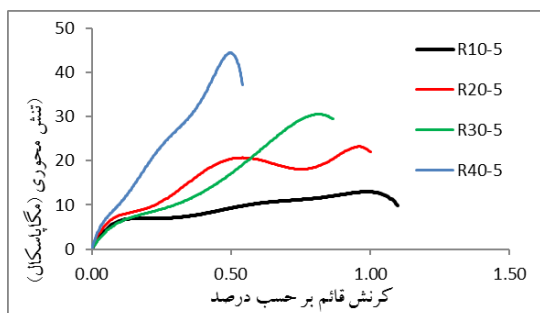
در این آزمایش برای شبیه‌سازی فشار جانبی از سلول هوک (شکل ۴) استفاده شده است. همچنین برای اعمال فشار هیدرولیکی به منظور شکست نمونه‌ها و اعمال فشار جانبی از دستگاه شکست شرکت پیشگامان کرمان استفاده گردید (شکل ۵) و برای اعمال فشار محوری بر روی نمونه از دستگاه آزمایش مقاومت تک‌محوره استفاده شد، به این صورت که نمونه‌های ساخته‌شده ابتدا درون یک غلاف پلاستیکی که در سلول هوک وجود دارد، قرار می‌گیرند سپس یک کپ^۱ همراه با نازل از بالا روی نمونه‌های سوراخ شده قرار می‌گیرد و کل مجموعه درون دستگاه آزمایش

^۱ Cap

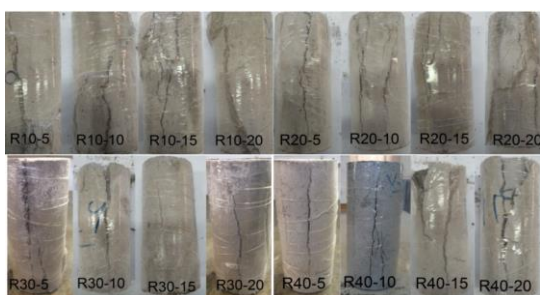
تراکم تک‌محوره قرار می‌گیرد. در این زمان فشار جانبی و فشار قائم به‌صورت تدریجی، هم‌زمان باهم افزوده می‌شوند تا به حد مطلوب و مورد انتظار برسند. بعد از اعمال فشار جانبی و قائم، توسط دستگاه شکاف هیدرولیکی فشار روغن داخل گمانه به‌آرامی و به‌تدریج بالا برده می‌شود تا زمانی که نمونه شکافته شود و فشار روغن کاهش یابد.

۶. خواص مکانیکی نمونه‌ها

در این مرحله نمونه‌های ساخته‌شده در چهار دسته سنگ با مقاومت‌های ثابت و تخلخل متغیر به‌منظور بررسی نمونه‌ها در مقاومت یکسان و تخلخل با استفاده از روش وزنی و فرمول $\Delta = \frac{V_p}{V_b}$ با درصد خطای زیر ۲ درصد مورد بررسی قرار گرفت و



شکل ۶. نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها برای کم‌ترین میزان تخلخل از هر دسته



شکل ۷. نحوه‌ی شکست سنگ در آزمایش تراکم تک‌محوره

۷. مطالعه تأثیر تخلخل و فشار همه‌جانبه بر فشار شکست هیدرولیکی

پارامترهای مختلفی همچون نرخ تزریق سیال، ویسکوزیته سیال تزریقی، تنش‌های منطقه، مقاومت کششی، مدول الاستیک، فشار منفذی، مشبک‌کاری، تنش تفاضلی بر شکست هیدرولیکی اثر می‌گذارند. در این تحقیق با استفاده از نمونه‌های سیمانی ساخته‌شده، به بررسی تأثیر تخلخل و فشار جانبی در شکست هیدرولیکی پرداخته‌شده است. در تمامی آزمایش‌های انجام‌شده دو تکرار آزمایش برای اطمینان از صحت نتایج به‌دست‌آمده انجام‌شده است لازم به ذکر است که دلیل ناهمسانی در برخی از آزمایش‌ها، خطای دستگاه و تفاوت‌های جزئی در ساختار نمونه‌های سیمانی می‌باشد.

آزمایش مقاومت تک‌محوره بر روی آن‌ها انجام گردید که نتایج حاصل‌شده در (جدول ۲) آورده شده که در این جدول عدد اول از سمت چپ نشان‌دهنده‌ی مقاومت تقریبی سنگ و عدد دوم که در سمت راست نوشته‌شده میزان تقریبی تخلخل را نشان می‌دهد، همچنین در (شکل ۶) نمودار تنش - کرنش برای هر مقاومت با کم‌ترین میزان تخلخل ترسیم‌شده و در مرحله‌ی آخر تصاویر مربوط به شکست تک‌محوره (شکل ۷) قابل‌مشاهده می‌باشد.



شکل ۴. سلول هوک قرار گرفته در دستگاه شکست تک‌محوره



شکل ۵. دستگاه اعمال فشار شکست و فشار جانبی

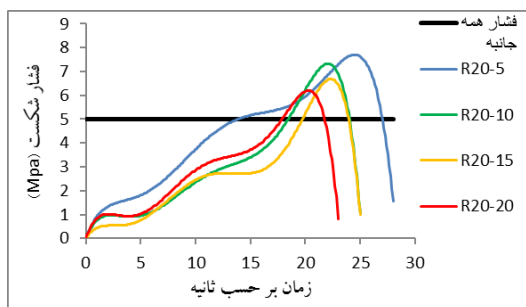
جدول ۲. مشخصات نمونه‌های ساخته‌شده

مدول الاستیک (گیگاپاسکال)	تخلخل (درصد)	جابه‌جایی (میلی‌متر)	مقاومت (مگاپاسکال)	پارامتر کد نمونه
۴۰/۸	۴	۱/۰۱	۳۲	R30-5
۸/۸	۵	۱/۳۲	۱۳/۸	R10-5
۳۱/۱	۶	۱/۲	۲۴	R20-5
۸۴	۷	۰/۶۵	۴۲/۶	R40-5
۳۴	۱۰	۱/۱۳	۳۳/۷	R30-10
۶۶	۱۰	۰/۸۳	۴۲/۶	R40-10
۱۲/۵	۱۱	۱/۴	۱۵/۱	R10-10
۲۷/۱	۱۳	۱/۱	۲۵/۱	R20-10
۶۶	۱۴	۰/۹۲	۴۵/۴	R40-15
۴۱	۱۶	۱/۲۰	۳۰/۳	R30-15
۷/۱	۱۷	۱/۴۹	۱۲/۹	R10-15
۲۲/۳	۲۰	۱/۳۲	۲۲/۸	R20-15
۶۶	۲۰	۱/۲	۴۴	R40-20
۳۸/۶	۲۱	۱/۳۱	۳۲/۴	R30-20
۱۰/۸	۲۴	۱/۶۱	۱۴	R10-20
۲۳	۲۵	۱/۴۲	۲۴	R20-20

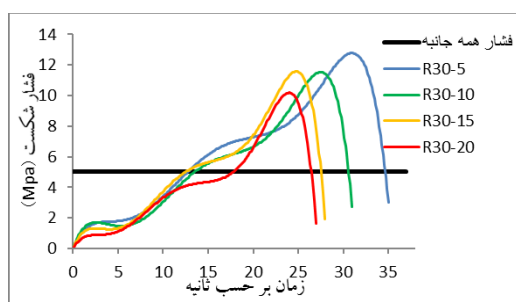
گرفت که در این سنگ با افزایش تخلخل نمونه از ۴ به ۲۴ درصد در فشار همه‌جانبه‌ی ۵ و فشار قائم ۷ مگاپاسکال فشار شکست هیدرولیکی از فشار شکست میانگین ۴/۵ به ۲/۹ مگاپاسکال رسید و کاهش ۳۵ درصدی نسبت به حالت با تخلخل پایین را نشان داد. در نمونه‌ی رده‌ی R20 با افزایش تدریجی تخلخل از مقدار اولیه‌ی ۶ به مقدار نهایی ۲۵ درصد فشار شکست در ابتدا ۸ مگاپاسکال و به ترتیب با افزایش تدریجی تخلخل به مقدار ۶/۹، ۶/۷ و در نهایت به مقدار ۶ مگاپاسکال رسید. در سنگ‌های با مقاومت بالاتر نیز آزمایش شکست هیدرولیکی برای سنگ‌های رده‌ی R30 و R40 صورت پذیرفت که در نمونه‌ی R30 با افزایش میزان تخلخل از ۴ درصد و به تدریج به مقدار نهایی ۲۱ درصد با شرایط فشار قائم ۷ و فشار جانبی ۵ مگاپاسکال، مقدار فشار شکست به ترتیب ۱۲/۲، ۱۱/۶، ۱۱/۴ و ۹/۷ مگاپاسکال ثبت شد که در مقایسه‌ی فشار شکست سنگ با تخلخل بالا با نمونه‌ی دارای تخلخل پایین، کاهش ۲۰ درصدی در فشار

۱.۷. تأثیر تخلخل بر شکست هیدرولیکی

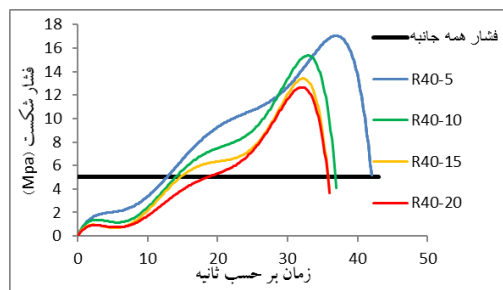
در ابتدا چهار دسته سنگ با تخلخل‌های متفاوت طبق برنامه‌ی مشخص‌شده (جدول ۳) و تحت فشار جانبی‌های متفاوت (۲، ۳ و ۵ مگاپاسکال) توسط دستگاه شکست هیدرولیکی به منظور بررسی فشار شکست، تأثیر تخلخل و فشار جانبی بر روی آن‌ها بررسی شد که نمودارهای مربوط به فشار شکست در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال برای هر رده‌ی مقاومتی (شکل ۸ تا ۱۱) و نمودار مقایسه‌ی فشار شکست سنگ‌ها در فشارهای جانبی مختلف برای سنگ‌های با تخلخل پایین از هر دسته ترسیم‌شده (شکل ۱۳ تا ۱۶) و سایر نتایج نیز در (جدول ۳) قابل‌مشاهده می‌باشد. معیار اصلی در انتخاب جواب صحیح به دست آوردن روند منطقی در هر آزمایش بوده و میانگین‌گیری برای تمام نمونه‌ها انجام‌شده است، همچنین تصویر شکست نمونه‌ها تحت فشار همه‌جانبه‌ی ۵ مگاپاسکال در (شکل ۱۲) آورده شده است. در بررسی اثر تخلخل ابتدا نمونه‌ی R10 مورد آزمایش قرار



شکل ۹. نمودار شکست هیدرولیکی ردهی R20 در فشار همه جانبه ۵ مگاپاسکال



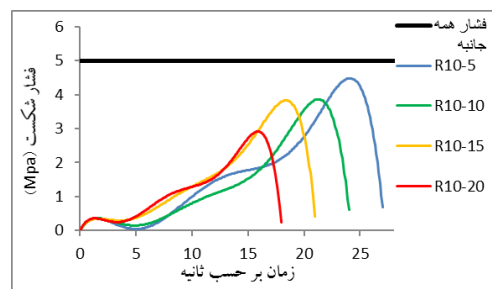
شکل ۱۰. نمودار شکست هیدرولیکی ردهی R30 در فشار همه جانبه ۵ مگاپاسکال



شکل ۱۱. نمودار شکست هیدرولیکی ردهی R40 در فشار همه جانبه ۵ مگاپاسکال

شکست مشاهده می‌شود. در نمونه‌ی با مقاومت بالای R40 با افزایش تخلخل از ۷ به ۲۰ درصد دچار افت فشار شکست به میزان ۲۰ درصد گردید.

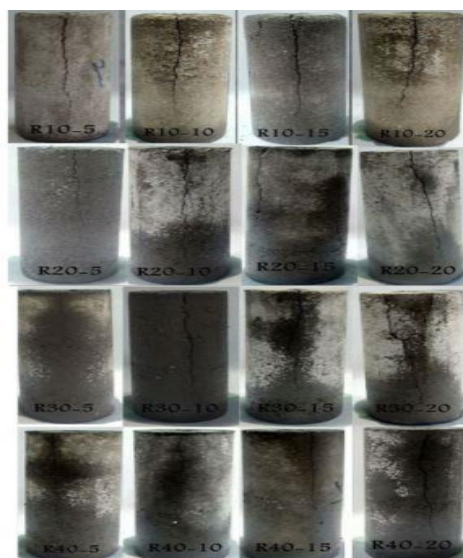
علت کاهش فشار شکست هیدرولیکی در اثر افزایش تخلخل را می‌توان این‌گونه تشریح کرد که، با افزایش تخلخل حفره‌ها و ترک‌های بیشتری نسبت به نمونه‌های با تخلخل کمتر وجود دارد که باعث می‌شود سیال تزریقی راحت‌تر به آن نفوذ کند و فشار بیشتری اعمال نماید. همچنین ریزترک‌های موجود را به راحتی بیشتر در اثر فشار اعمال شده به هم متصل نماید که این امر موجب کاهش فشار شکست در اثر تخلخل می‌شود. با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته و مقایسه‌ی دودسته‌ی R10 و R20 با دودسته‌ی R30 و R40 می‌توان عنوان کرد که هر چه مقدار مقاومت سنگ بالاتر می‌رود، تأثیر تخلخل بر میزان کاهش فشار شکست نیز کم‌تر می‌شود اما هم چنان افزایش تخلخل بر کاهش فشار شکست اثرگذار است.



شکل ۸. نمودار شکست هیدرولیکی ردهی R10 در فشار همه جانبه ۵ مگاپاسکال

شکست مشاهده گردید.

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده بر روی نمونه‌ها می‌توان به این مطلب اشاره کرد که افزایش فشار همه‌جانبه در اطراف سنگ‌ها موجب بالاتر رفتن فشار شکست هیدرولیکی می‌شود. این میزان افزایش فشار شکست هیدرولیکی در سنگ‌های با مقاومت پایین‌تر (R10 و R20) تأثیر بیشتری نسبت به سنگ‌های با مقاومت بالا (R30 و R40) داشت، همچنین در شکست سنگ‌ها با فشار همه‌جانبه‌ی ۲ و ۳ مگاپاسکال نحوه‌ی شکست سنگ در جهت فشار قائم و بدون انحراف مشاهده گردید اما با افزایش فشار همه‌جانبه به ۵ مگاپاسکال و بالاتر رفتن تخلخل زاویه شکست از حالت قائم منحرف‌شده و هر آنچه تخلخل افزایش‌یافته این انحراف بیشتر شده است. دلیل این پدیده به این شرح است که در سنگ‌های به‌خصوص با مقاومت پایین با نزدیک شدن فشار همه‌جانبه به فشار قائم، سنگ در شکست حالت برشی به خود گرفته و از حالت قائم خارج می‌شود که در تخلخل‌های بالا حفره‌ها و ریزترک‌های موجود موجب از کنترل خارج شدن بیشتر زاویه‌ی شکست می‌شود.

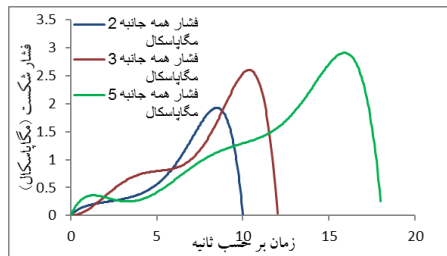


شکل ۱۲. نمایی از نمونه‌های شکسته شده در آزمایش شکست هیدرولیکی در فشار همه‌جانبه‌ی ۵ مگاپاسکال

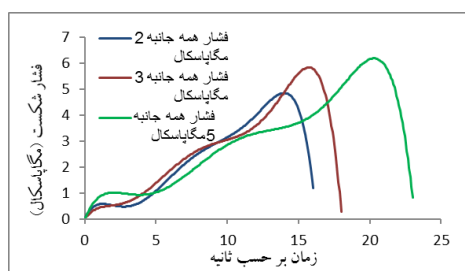
۲-۷ تأثیر فشار جانبی بر شکست هیدرولیکی

برای پی بردن به تأثیر فشار همه‌جانبه در فشار شکست، نمونه‌های آزمایش‌شده در فشار جانبی ۵ مگاپاسکال در شرایط فشار جانبی ۲ و ۳ مگاپاسکال نیز مورد آزمایش قرار گرفت که نتایج کلی حاصل‌شده در (جدول ۳) قابل‌مشاهده و نمودار مربوط به هر نمونه در فشارهای جانبی مختلف (شکل ۱۳ تا ۱۶) آورده شده است و نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها به شرح زیر است:

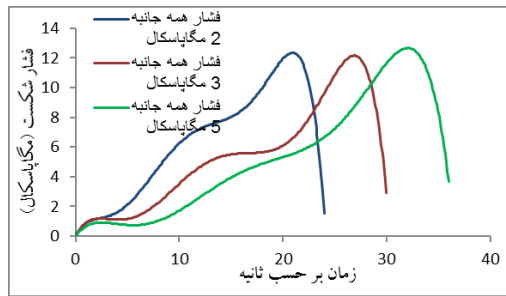
در نمونه سنگ با رده‌ی مقاومتی R10 با افزایش فشار همه‌جانبه از ۲ به ۵ مگاپاسکال به ترتیب برای نمونه‌های R10-5, R10-10, R10-15 و R10-20 فشار شکست برای نمونه‌ها به میزان ۳۵، ۵۵، ۸۰ و ۶۱ درصد افزایش یافت. با افزایش فشار جانبی در نمونه‌های رده‌ی R20 از ۲ به ۵ مگاپاسکال فشار شکست نمونه‌های R20-5, R20-10, R20-15 و R20-20 به ترتیب ۳۱، ۲۳، ۳۶ و ۲۷ درصد افزایش شد. در آزمایش‌های متناظر بر روی دو رده‌ی R30 و R40 نیز با افزایش مقدار مشابه فشار جانبی همانند آزمایش‌های انجام‌شده، در نمونه‌های R30-5, R30-10, R30-15 و R30-20 مقدار افزایش فشار شکست به میزان ۳۸، ۳۹، ۵۰ و ۳۸ درصد و در نمونه‌های R40-5, R40-10, R40-15 و R40-20 به ترتیب ۱۵، ۱۴، ۱۳ و ۱۳ درصد افزایش فشار



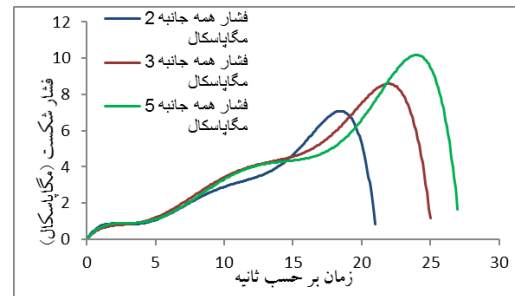
شکل ۱۳. نمودار فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌ی R10-20 در فشارهای همه‌جانبه‌ی متفاوت



شکل ۱۴. نمودار فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌ی R20-20 در فشارهای همه‌جانبه‌ی متفاوت



شکل ۱۶. نمودار فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌ی R40-20 در فشارهای همه‌جانبه‌ی متفاوت



شکل ۱۵. نمودار فشار شکست هیدرولیکی نمونه‌ی R30-20 در فشارهای همه‌جانبه‌ی متفاوت

جدول ۳. برنامه و نتایج آزمایش شکست هیدرولیکی

مشخصات	فشار قائم (مگاپاسکال)	فشار همه‌جانبه (مگاپاسکال)	زمان شکست (ثانیه)	فشار شکست (مگاپاسکال)	فشار شکست از آزمایش تکرار پذیری (مگاپاسکال)	میانگین فشار شکست (مگاپاسکال)	کد نمونه
	۷	۲	۱۷	۳	۲/۸ , ۳/۱	۲/۹	R10-5
	۷	۲	۱۴	۲/۸	۳ , ۲/۸	۲/۸	R10-10
	۷	۲	۱۳	۲/۲	۲/۱ , ۲	۲	R10-15
	۷	۲	۱۰	۱/۹	۱/۹ , ۱/۷	۱/۸	R10-20
	۷	۲	۲۱	۶/۱	۵/۸ , ۶/۴	۶/۱	R20-5
	۷	۲	۱۷	۵/۷	۵/۸ , ۵/۵	۵/۶	R20-10
	۷	۲	۱۴	۵/۱	۵/۳ , ۴/۵	۴/۹	R20-15
	۷	۲	۱۱	۴/۸	۴/۶ , ۴/۹	۴/۷	R20-20
	۷	۲	۲۶	۸/۷	۹ , ۸/۷	۸/۸	R30-5
	۷	۲	۲۴	۸	۸/۲ , ۷/۷	۸/۳	R30-10
	۷	۲	۲۰	۷/۷	۷/۸ , ۷/۵	۷/۶	R30-15
	۷	۲	۱۸	۷/۲	۶/۸ , ۷	۷	R30-20
	۷	۲	۲۱	۱۴	۱۴/۴ , ۱۳/۵	۱۳/۹	R40-5
	۷	۲	۲۰	۱۳/۱	۱۲/۸ , ۱۳/۴	۱۳/۱	R40-10
	۷	۲	۱۷	۱۲/۵	۱۲/۶ , ۱۱/۷	۱۲/۲	R40-15
	۷	۲	۱۶	۱۱/۵	۱۱ , ۱۱/۲	۱۱/۲	R40-20
	۷	۳	۲۴	۳/۶	۳/۸ , ۳/۵	۳/۶	R10-5
	۷	۳	۲۳	۳	۳/۳ , ۲/۸	۳	R10-10
	۷	۳	۲۰	۲/۶	۲/۶ , ۲/۵	۲/۵	R10-15
	۷	۳	۱۸	۲/۵	۲/۳ , ۲/۴	۲/۴	R10-20
	۷	۳	۲۸	۷/۱	۶/۸ , ۷	۷	R20-5
	۷	۳	۲۵	۶/۲	۶ , ۶/۱	۶/۱	R20-10
	۷	۳	۲۵	۶	۵/۶ , ۶/۳	۵/۹	R20-15
	۷	۳	۲۳	۵/۴	۵/۳ , ۵	۵/۲	R20-20

۱۰/۱	۱۰/۵, ۱۰	۹/۹	۲۶	۳	۷	R30-5
۹	۹/۲, ۸/۸	۹/۱	۲۴	۳	۷	R30-10
۸/۳	۸/۳, ۸/۲	۸/۳	۲۵	۳	۷	R30-15
۸	۸/۲, ۷/۷	۸/۱	۲۱	۳	۷	R30-20
۱۴/۴	۱۴/۹, ۱۳/۸	۱۴/۶	۳۲	۳	۷	R40-5
۱۴/۱	۱۳/۹, ۱۴/۴	۱۴/۲	۲۹	۳	۷	R40-10
۱۳/۷	۱۴, ۱۳/۵	۱۳/۷	۲۸	۳	۷	R40-15
۱۲/۶	۱۲/۴, ۱۲/۵	۱۲/۹	۲۵	۳	۷	R40-20
۴/۵	۴/۳, ۴/۸	۴/۴	۳۵	۵	۷	R10-5
۳/۸	۳/۶, ۳/۹	۴	۳۱	۵	۷	R10-10
۳/۶	۳/۵, ۳/۶	۳/۸	۲۸	۵	۷	R10-15
۲/۹	۲/۸, ۳	۳	۲۷	۵	۷	R10-20
۸	۷/۷, ۸/۴	۷/۹	۳۱	۵	۷	R20-5
۶/۹	۶/۸, ۷	۷/۱	۲۹	۵	۷	R20-10
۶/۷	۶/۹, ۶/۵	۶/۸	۲۵	۵	۷	R20-15
۶	۵/۹, ۶	۶/۳	۲۴	۵	۷	R20-20
۱۲/۲	۱۲/۵, ۱۲	۱۲/۲	۳۵	۵	۷	R30-5
۱۱/۶	۱۲/۲, ۱۱	۱۱/۸	۳۳	۵	۷	R30-10
۱۱/۴	۱۱/۱, ۱۲	۱۱/۱	۳۰	۵	۷	R30-15
۹/۷	۹/۸, ۹/۵	۱۰	۲۹	۵	۷	R30-20
۱۶	۱۶/۵, ۱۵/۲	۱۶/۳	۴۱	۵	۷	R40-5
۱۵	۱۴/۶, ۱۵/۴	۱۵/۱	۳۷	۵	۷	R40-10
۱۳/۹	۱۴/۳, ۱۳/۷	۱۳/۹	۳۶	۵	۷	R40-15
۱۲/۷	۱۳/۵, ۱۱/۸	۱۳	۳۶	۵	۷	R40-20

۸. نتیجه‌گیری

فرآیند شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین فناوری‌های قابل‌استفاده برای افزایش میزان بهره‌برداری و تولید از میدان‌های نفتی و گازی با تراوایی پایین می‌باشد. با توجه به هزینه‌ی بالای شکست هیدرولیکی، بایستی قبل از انجام این عملیات، مطالعات لازم و کافی در خصوص خواص سنگ و سیال و میدان تنش‌های حاکم در اعماق زمین صورت گیرد. در این مطالعه سنگ‌ها با مقاومت یکسان و تخلخل متغییر در همان مقاومت بررسی شد که نوآوری این طرح می‌باشد. به این منظور در این تحقیق با استفاده از نمونه‌های مصنوعی در آزمایشگاه، اثر تخلخل بر فشار شکست، نوع ترک و همچنین تأثیر فشارهای جانبی مختلف بر عملیات شکست بررسی گردید. نتایج حاصل از شکست هیدرولیکی عبارت است از:

۱- در هر مقاومت یکسان، هرچه تخلخل افزایش یابد زاویه‌ی صفحه‌ی شکست بیشتر شده و همچنین جابه‌جایی قائم نیز افزایش می‌یابد. همچنین سنگ‌ها در تخلخل‌های پایین‌تر، دارای رفتاری شکننده‌تر^۱ هستند و با افزایش تخلخل رفتار سنگ مقداری شکل‌پذیرتر^۲ خواهد شد. در سنگ‌های با مقاومت بیشتر در مقایسه با سنگ‌های با مقاومت کمتر، جابه‌جایی قائم کمتر می‌باشد و رفتاری بسیار شکننده‌تر نسبت به سنگ‌های مقاومت پایین دارند.

۲- در اثر افزایش تخلخل در نمونه‌ها فشار شکست هیدرولیکی نمونه کاهش خواهد داشت که میزان کاهش فشار شکست در سنگ‌های با مقاومت پایین بیشتر است و در سنگ‌های با مقاومت بالا به‌مراتب تأثیر کمتری دارد.

¹ Brittle

² Ductile

۴- با افزایش فشار جانبی در نمونه‌ها و افزایش تخلخل زاویه‌ی شکست از حالت قائم منحرف‌شده و در تخلخل‌های بالا این انحراف مشهود است.

۳- با افزایش فشار جانبی در اطراف نمونه‌ها فشار شکست هیدرولیکی سنگ بالاتر می‌رود و در نمونه‌های با مقاومت پایین تأثیر افزایش فشار جانبی بیشتر است.

		فهرست علائم	
تنش کششی شکست هیدرولیک	T_{hf}	فشار انسداد	P_s
پارامتر پروالاستیک	n	تنش افقی مینیمم	σ_h
تنش مؤثر	σ_{ij}^{eff}	تنش افقی ماکزیمم	σ_H
میلی داریسی	mDa	مقاومت کششی سنگ	T
تخلخل	ϕ	فشار شکست	P_b
مگاپاسکال	MPa	فشار سیال منفذی	P_o
گیگاپاسکال	GPa	فشار بازشدگی مجدد	P_r
میلی‌متر	mm	چگالی	ρ_i
نیوتون	N	ضخامت	D_i
قطر	D	شتاب گرانش	g
ضخامت	t	مقاومت کششی	σ_t
		فشار شروع شکست	P_c

.٩ منابع

- Anderson, G. D. (1981). Effects of friction on hydraulic fracture growth near unbonded interfaces in rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21(01), 21-29 .
- Athavale, A., & Miskimins, J. (2008). *Laboratory hydraulic fracturing tests on small homogeneous and laminated blocks*. Paper presented at the The 42nd US Rock Mechanics Symposium (USRMS).
- Chen, Y., Meng, Q., & Zhang, J. (2018). Effects of the notch angle, notch length and injection rate on hydraulic fracturing under true triaxial stress: an experimental study. *Water*, 10(6), 801 .
- Cornet, F., & Valette, B. (1984). In situ stress determination from hydraulic injection test data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B13), 11527-11537 .
- Daneshy, A. A. (1973). A study of inclined hydraulic fractures. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 13(02), 61-68 .
- Daneshy, A. A. (1974). *Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness*. Paper presented at the SPE European spring meeting.
- De Pater, C., & Beugelsdijk, L. (2005). *(Experiments and numerical simulation of hydraulic fracturing in naturally fractured rock*. Paper presented at the Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
- Dean, R. H., & Schmidt, J. H. (2009). Hydraulic-fracture predictions with a fully coupled geomechanical reservoir simulator. *Spe Journal*, 14(04), 707-714 .
- Gandossi, L. (2016). State of the art report on waterless stimulation techniques for shale formations. *The Netherlands: Publications Office of the European Union* .
- Haimson ,B., & Cornet, F. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 40(7-8), 1011-1020 .
- Haimson, B., & Fairhurst, C. (1967). Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 7(03), 310-318 .
- He, J., Li, X., Yin, C., Zhang, Y., & Lin, C. (2020). Propagation and characterization of the micro cracks induced by hydraulic fracturing in shale. *Energy*, 191, 116449 .
- Hossain, M. M., & Rahman, M. (2008). Numerical simulation of complex fracture growth during tight reservoir stimulation by hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 6-٨٦, (٢) . ١٠٤
- Hubbert, M. K., & Willis, D. G. (1957). Mechanics of hydraulic fracturing. *Transactions of the AIME*, 210(01), 153-168 .
- Lamont, N., & Jessen, F. (1963). The effects of existing fractures in rocks on the extension of hydraulic fractures. *Journal of Petroleum Technology*, 15(02), 203-209 .
- 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(2), 63-76 .
- Li, X., Tan, C., & Roegiers, J. (1997). Effects of packer on hydraulic fractures initiated from highly-deviated and horizontal boreholes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 34(3-4), 260. e261-260. e221 .
- Nasehi, M. J., & Mortazavi, A. (2013). Effects of in-situ stress regime and intact rock strength parameters on the hydraulic fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 108, 211-221 .
- Ouchi, H., Agrawal, S., Foster, J. T., & Sharma, M. M. (2017). *Effect of small scale heterogeneity on the growth of hydraulic fractures*. Paper presented at the SPE hydraulic fracturing technology conference and

exhibition.

Satoh, H., & Yamaguchi, Y. (2008). *Laboratory hydraulic fracturing tests for core materials using large size hollow cylindrical specimens*. Paper presented at the The First International Symposium on Rockfill Dams, Chengdu, China.

Shin, D. H., & Sharma, M. M. (2014). *Factors controlling the simultaneous propagation of multiple competing fractures in a horizontal well*. Paper presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference.

Wanniarachchi, W. A. M., Gamage, R. P., Perera, M. S. A., Rathnaweera, T. D., Gao, M., & Padmanabhan, E. (2017). Investigation of depth and injection pressure effects on breakdown pressure and fracture permeability of shale reservoirs: an experimental study. *Applied Sciences*, 7(7), 664 .

Yao, Y. (2012). Linear elastic and cohesive fracture analysis to model hydraulic fracture in brittle and ductile rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(3), 375-387 .

Zhang, G. Q., & Chen, M. (2010). Dynamic fracture propagation in hydraulic re-fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70(3-4), 266-272 .

Zhang, X , Jeffrey, R., Bungler, A., & Thiercelin, M. (2011). Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 48(6), 984-995 .

Zhang, Y., Ma, Y., Hu, Z., Lei, H., Bai, L., Lei, Z & , Zhang, Q. (2019). An experimental investigation into the characteristics of hydraulic fracturing and fracture permeability after hydraulic fracturing in granite. *Renewable Energy*, 140, 615-624 .

فروزان، شفقائی‌زاده، فرامرزی، & لهراسب. (۲۰۱۴). شبیه‌سازی جوانه‌زنی و رشد ترک در عملیات شکست هیدرولیکی چاه نفت با استفاده از معیار آسیب تنش اصلی پیشینه. مهندسی مکانیک مدرس، ۱۴(۵)، ۱۷۴-۱۶۴.