

مطالعه آزمایشگاهی اثر سیمان‌شدگی شکاف طبیعی بر گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن نفت و گاز نامتعارف

علی‌نقی دهقان

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۹/۱۸

چکیده

در این مطالعه برای بررسی مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی در برخورد با شکاف طبیعی سیمانی‌شده، مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی انجام گرفت. بدین منظور از تعدادی نمونه‌های ورقه‌ای شکل از جنس پلاستر پایه سیمانی با حضور شکاف‌های طبیعی (از پیش موجود) که از خصوصیات هیدرومکانیکی، ضخامت و موقعیت نسبی مختلف نسبت به یک چاه تزریق سیال برخوردار بودند، استفاده شد. نتایج نشان داد که شکافت هیدرولیکی القایی تمایل به قطع نمودن شکاف‌های طبیعی ضخیمی که از مواد نرم‌تر نسبت به سنگ میزبان یا خمیره نمونه برخوردار بوده را داشته و در قسمت‌هایی که شکاف‌های طبیعی ضخیم با مواد سخت‌تری پر شده‌اند، منحرف شده است. همچنین شکافت هیدرولیکی هنگامی که شکاف‌های طبیعی نازک بوده و از مواد پرکننده سخت‌تری پر شده‌اند، تمایل به قطع نمودن و عبور از آنها را داشته است. علاوه بر این، مشاهده شد که شکاف‌های طبیعی نازک و سخت زمانی که در فاصله نسبتاً نزدیک به چاه تزریق سیال قرار دارند، شکافت هیدرولیکی قادر به قطع نمودن آنها نبوده، اما هنگامی که در فاصله دورتر از چاه تزریق قرار می‌گیرند، شکافت هیدرولیکی ضمن برخورد با شکاف‌های طبیعی از آنها عبور می‌نماید. نتایج به‌دست آمده از این مطالعه حاکی از ارائه شواهد جدیدی از تاثیر نوع مواد پرکننده و یا سیمان شکاف طبیعی بر مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی در نقطه برخورد و برهم‌کنش با آن را دارد.

کلمات کلیدی: شکافت هیدرولیکی آزمایشگاهی، شکاف طبیعی سیمانی‌شده، مواد پرکننده، گسترش شکافت، مواد برخورد شکافت

طبیعی^۲ به‌شدت برای مخازن نفت و گاز نامتعارف همچون سازندهای شیلی حائز اهمیت هستند چرا که بدون این شکستگی‌ها، امکان بازیافت مواد هیدروکربوری از این مخازن غیرممکن است.

مقدمه

حجم زیادی از منابع نفت و گاز جهان در مخازن شکافت‌دار با نفوذپذیری کم^۱ قرار دارند. شکاف‌های

1. Low-Permeability Fractured Reservoirs
2. Natural Fracture (NF)

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی: a.dehghan@srbiau.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2018.3353.2539)

است. رنشاو و پولارد [۵] یک معیار ساده برای حالت قطع‌شدگی شکاف طبیعی توسط شکافت هیدرولیکی ارائه دادند که به‌صورت آزمایشگاهی نیز مورد تایید گرفت. این معیار براساس تنش‌های برجا، ضریب اصطکاک شکاف از پیش موجود و نیز مقاومت کششی مواد بکر در طول شکاف قادر به پیش‌بینی اینکه آیا یک شکافت هیدرولیکی در حال گسترش ضمن برخورد با یک شکاف از پیش موجود متعادل^۵ از آن عبور کرده و یا متوقف می‌شود، را دارد. این معیار توسط گو و همکاران [۶] برای زوایا برخورد غیر متعادل^۶ نیز توسعه داده شد. جو و همکاران [۷] اثر مقاومت برشی^۷ شکاف طبیعی از پیش موجود را بر گسترش شکافت هیدرولیکی در بلوک‌های سیمان را مورد بررسی قرار دادند. آنها از انواع مختلفی از کاغذ جهت استفاده در بلوک‌های سیمانی به منظور تغییر در ضریب اصطکاک شکاف طبیعی استفاده کردند. دهقان و همکاران [۸-۱۳] نیز مطالعات گسترده‌ای در زمینه گسترش شکافت هیدرولیکی و برخورد با شکاف طبیعی (از پیش موجود) را انجام دادند. آنها اثر جهت‌داری شکاف از پیش موجود را به‌صورت سه‌بعدی و با تغییر سیستماتیک امتداد و شیب شکاف از پیش موجود در شرایط مختلف مورد بررسی قرار دادند. مطالعات فوق و بسیاری دیگر از تحقیقات آزمایشگاهی، شکاف‌های از پیش موجود را به‌عنوان یک فصل مشترک اصطکاکی^۸ در نظر گرفته‌اند. در حالی‌که اغلب شکاف‌های طبیعی در سازندهای زیرسطحی با ضخامت‌های محدود و مشخص و نیز با سایر مصالح طبیعی پر و سیمانی می‌شوند [۲ و ۱۴].

به‌علت نفوذپذیری کم این نوع سازندها و ضریب هدایت هیدرولیکی کم شبکه شکاف طبیعی، تکنیک‌های شبیه‌سازی همچون شکافت هیدرولیکی^۱ برای تولید اقتصادی ضروری است. نفوذپذیری کم سیستم شکاف طبیعی می‌تواند ناشی از نوع مصالح پرکننده (سیمان) آنها در طول فرآیند دیانز باشد [۱ و ۲]. بنابراین استخراج و بهره‌برداری موفق از منابع نفت و گاز نامتعارف تاکید بر استفاده از عملیات شکافت هیدرولیکی موثر دارد. شکافت هیدرولیکی ایجاد شده در این نوع مخازن عمدتاً در طول مسیر گسترش خود با شکاف‌های طبیعی موجود در سازند برخورد می‌کنند. عملیات شکافت هیدرولیکی خود به تنهایی یک پدیده پیچیده به‌علت هتروژنی ساختار زمین، تنش‌های برجای نامعین، رفتار سنگ و پیچیدگی فیزیکی مساله بوده که با اضافه شدن شکاف طبیعی به مساله، پیچیدگی آن دو چندان خواهد شد. در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی عددی گسترش شکافت هیدرولیکی، برای طراحی و اجرای هر چه بهتر آن به منظور رفع پیچیدگی‌هایی که ناشی از برهم‌کنش میان شکافت‌های هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی به‌وجود می‌آید، تاکید بی‌سابقه‌ای داشته است. همچنین تعدادی مطالعات آزمایشگاهی جهت درک مکانیسم فرآیند گسترش شکافت هیدرولیکی و تایید پیش‌بینی‌های نظری رفتار برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی تحت شرایط مختلف انجام شده است.

آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی انجام شده توسط بلانتون [۳]. در بلوک‌های هایدروستون^۲ و وارپینسکی و تویفل [۴] در بلوک‌های ماسه سنگی نشان داد که زمانی‌که تنش تفریقی^۳ اعمال شده بالا بوده و زاویه برخورد دو شکست نیز تقریباً قائم است، شکافت هیدرولیکی تمایل به عبور از شکاف از پیش موجود^۴ را داشته

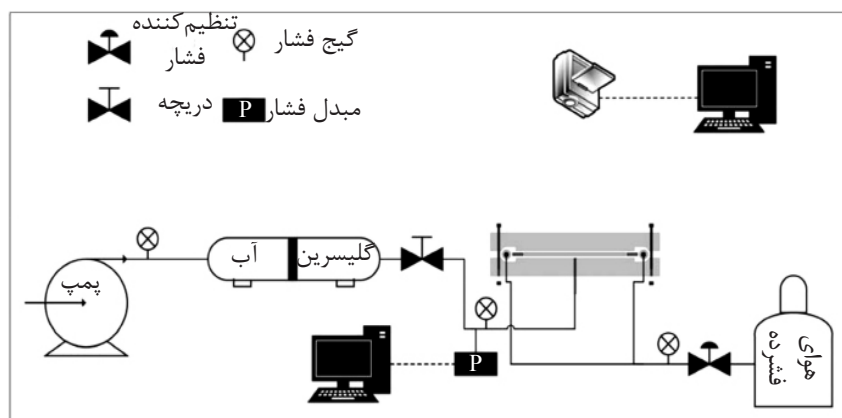
1. Hydraulic Fracturing (HF)
2. Hydrostone
3. Differential Stress
4. Pre-existing Fracture
5. Orthogonal
6. Non-orthogonal Approach Angles
7. Shear Strength
8. Frictional Interface

شکاف‌های طبیعی پر شده از سیمان کوارتزی نسبت به شیل سخت‌تر و مقاوم‌تر هستند [۱۴]. در این مطالعه، یک نمایش آزمایشگاهی جدیدی از گسترش شکافت هیدرولیکی و برهم‌کنش با شکاف طبیعی (از پیش موجود) سیمانی شده که از نظر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نسبت به خمیره نمونه در شرایط مقاوم‌تر و ضعیف‌تر در نظر گرفته شده‌اند، ارائه می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها اثر چند متغیر ناشناخته بر روی برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی از جمله؛ فواصل میان نقطه تزریق سیال و شکاف طبیعی، ضخامت شکاف طبیعی سیمانی شده و خواص فیزیکی و مکانیکی مواد پرکننده سیمان را روشن می‌سازد.

فرآیند آزمایشگاهی

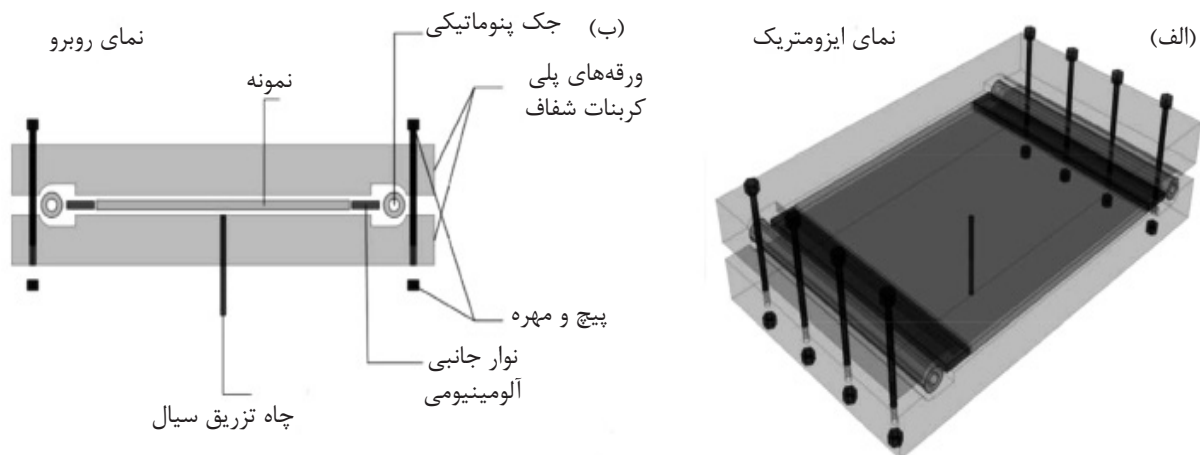
آزمایش‌های فرآیند شکافت هیدرولیکی در آزمایشگاه دانشگاه تگزاس در آستین^۶ آمریکا طراحی و انجام شده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب طرح شماتیکی از سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی و مدل آزمایشگاهی نمونه مورد آزمایش را نشان می‌دهند.

بنابراین مواد سیمانی درون شکاف‌های طبیعی، می‌توانند نقش مهمی در برهم‌کنش میان شکافت‌های هیدرولیکی اعمال شده و شکاف‌های طبیعی سیمانی شده داشته باشند. فو و همکاران [۱۵] گسترش شکافت هیدرولیکی را در بلوک‌های ملاتی^۱ با در نظر گرفتن سطوح ناپیوسته‌ای که به صورت جزئی و کامل سیمانی شده‌اند را مورد بررسی قرار دادند. آنها از یک لایه چند میلیمتری اپوکسی^۲ برای چسباندن بلوک‌ها به یکدیگر استفاده کردند. باهوریچ و همکاران [۱۶] ورقه‌هایی از جنس شیشه، ماسه سنگ و پلاستر عمل‌آوری شده با ضخامت ۲/۵ mm بر روی یکدیگر به منظور شبیه‌سازی شکاف‌های طبیعی سیمانی شده در درون بلوک‌های پلاستر قرار دادند. مقاومت در نظر گرفته شده برای سیمان شکاف طبیعی نسبت به خمیره^۳ نمونه یا سنگ میزبان^۴ برابر و یا بیشتر بود. در سازندهای شیلی، شکاف‌های طبیعی سیمانی شده بسته به ترکیب سیمان ممکن است قوی‌تر یا ضعیف‌تر از سنگ میزبان باشند. به عنوان مثال، شکاف‌های طبیعی پر شده با سیمان کلسیتی^۵ معمولاً از خمیره شیلی میزبان ضعیف‌تر و مقاومت کمتری از خود نشان می‌دهند در صورتی که



شکل ۱ شمای کلی از سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی

1. Mortar
2. Epoxy
3. Matrix
4. Host
5. Calcite
6. Austin



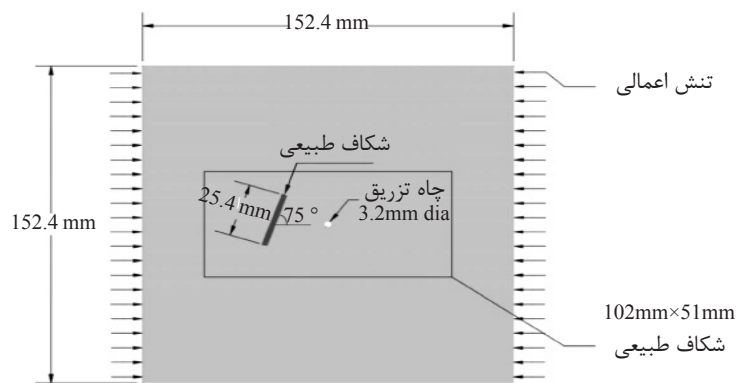
شکل ۲ شمای کلی از مدل آزمایشگاهی (سلول شکست) الف) نمای ایزومتریک و ب) نمای مقابل

سیال شکستگی (چاه) قرار دارد (شکل ۳).

نمونه‌های مورد آزمایش از پلاستر پایه سیمانی ساخته شده است. شکاف‌های طبیعی سخت و مقاوم قرار گرفته شده در نمونه‌های آزمایش از هیدروستون و شکاف‌های طبیعی نرم و ضعیف از ترکیب وزنی ۸۰٪ پلاستر و ۲۰٪ تالک^۵ ساخته شده است. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح مورد استفاده برای ساخت نمونه و شکاف‌های طبیعی در جدول ۱ ارائه شده است. آزمون‌های فشاری تک محوری^۶ بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به منظور تعیین مدول یانگ^۷ انجام شد. همچنین برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست^۸ مصالح نمونه و شکاف طبیعی از آزمایش خمش نیم دایره^۹ استفاده شد. مقاومت کششی غیرمستقیم^{۱۰} مصالح مورد استفاده نیز با استفاده از آزمایش برزیلی^{۱۱} بر روی نمونه‌های دیسکی دایره‌ای شکل مطابق استاندارد ASTM^{۱۲} D3967-08 انجام شد [۱۷].

همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، نمونه آزمایش در میان دو صفحه ضخیم و شفاف پلی‌کربنات^۱ با ضخامت ۲۵ mm قرار داده شده است. نمونه مورد آزمایش دارای ابعاد ۱۵۲ mm (طول و عرض) و ضخامت ۵/۱۰ mm با یک چاه تزریق به قطر ۳/۲۰ mm در مرکز است. سیال ایجاد کننده شکستگی^۲ از طریق یک چاه تعبیه شده در مرکز نمونه تزریق می‌شود تا شکافت هیدرولیکی از آن نقطه آغاز و شروع به گسترش نماید. تنش برجا با استفاده از جک‌های پنوماتیکی^۳ در دو طرف موازی نمونه تعبیه شده تا یک مسیر مشخص برای شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی ایجاد شود (شکل ۲). در قسمت بالا و پایین نمونه برای جلوگیری از نشست سیال از لایه‌های نازک و انعطاف‌پذیر چسب روشن بر پایه پلیمری استفاده می‌شود. مراحل رشد و گسترش شکافت هیدرولیکی در طول فرآیند آزمایش‌ها با استفاده از یک دوربین دیجیتال با وضوح تصویر بالا ثبت می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است محدوده مورد بررسی و پایش^۴ گسترش شکافت هیدرولیکی در حدود ۵۱ mm در ۱۰۲ mm است و تنش برجا در طرفین نمونه به صورت موازی و در راستای افقی اعمال می‌شود. شکاف طبیعی (از پیش موجود) با زاویه ۷۵° نسبت به امتداد گسترش شکافت هیدرولیکی با طول ۲۵ mm و ضخامت و فاصله متغیر نسبت به محل تزریق

1. Polycarbonate
2. Fracturing Fluid
3. Pneumatic Jacks
4. Monitoring
5. Talc
6. Uniaxial Compression Tests (UCS)
7. Young's Modulus
8. Fracture Toughness
9. Semi-circular Bending (SCB) Test
10. Splitting Tensile Strength
11. Brazilian Tests
12. American Society for Testing and Materials (ASTM)



شکل ۳ موقعیت چاه تزریق و شکاف طبیعی در نمونه آزمایش

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح نمونه و شکاف طبیعی

نوع مصالح	جنس و ترکیب مصالح	مدول یانگ E (GPa)	چقرمگی شکست K_{IC} (MPa.m ^{0.5})	مقاومت کششی (MPa) \bar{T}	تخلخل ϕ (%)	نفوذپذیری k (m ²)
خمیره نمونه	پلاستر ۱۰۰٪	۱/۱۴	۰/۱۷	۲/۲۵	۵۳/۷۶	$7/29 \times 10^{-14}$
شکاف طبیعی سخت	هیدروستون ۱۰۰٪	۶/۳۳	۰/۴۰	۶/۲۳	۲۸/۳۸	$2/92 \times 10^{-14}$
شکاف طبیعی نرم	پلاستر ۸۰٪ + تالک ۲۰٪	۰/۵۸	۰/۱۱	۱/۱۹	۵۹/۷۳	$8/04 \times 10^{-14}$

شفاف با غلظت خمیری مناسب در قسمت بالا و پایین نمونه خشک شده جهت جلوگیری از نشست سیال استفاده می‌شود و همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است سلول شکست برای انجام آزمایش شکافت هیدرولیکی آماده می‌گردد. چسب استفاده شده در ابتدا به صورت مایعی با گرانشی زیاد بوده که پس از خشک شدن کامل به یک ماده لاستیکی شکل و جامد تبدیل می‌شود. آزمایش شکافت هیدرولیکی پس از ۲۴ hr که به چسب اجازه داده می‌شود به‌طور کامل خشک شود، انجام می‌گیرد. جک‌های پنوماتیکی یک فشار معینی به‌عنوان تنش برجا به‌صورت افقی بر روی نمونه آزمایش اعمال می‌نمایند (شکل‌های ۲ و ۳). مقدار تنش برجا برای همه آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی به‌صورت ثابت و ۰/۴۵ Mpa در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، تنش اعمال شده در مرزهای چپ و راست نمونه (محور x) است.

مواد پرکننده مورد استفاده برای شکاف‌های طبیعی سخت دارای مدول یانگ، چقرمگی شکست و مقاومت کششی بالاتری در مقایسه با مواد خمیره نمونه داشته که نسبت آنها به ترتیب ۵/۵۵، ۲/۳۵ و ۲/۷۷ هستند. همچنین مقادیر مدول یانگ، چقرمگی شکست و مقاومت کششی سیمان پرکننده شکاف طبیعی نرم نسبت به مواد خمیره نمونه به ترتیب ۰/۵۱، ۰/۶۵ و ۰/۵۳ هستند (جدول ۱).

ابتدا نمونه آزمایش به وسیله یک قالب لاستیکی^۱ که دارای یک حائل یا فاصله‌گذار اکریلیک^۲ با ابعاد مشخص برای شکاف طبیعی است، توسط پلاستر ساخته می‌شود. هنگامی که پلاستر به‌طور جزئی عمل‌آوری^۳ و سفت می‌شود، فاصله‌گذار از نمونه خارج شده و سپس ماده پرکننده شکاف طبیعی به درون آن ریخته می‌شود. به نمونه اجازه داده می‌شود به مدت چهار روز خشک شود. به منظور ردیابی بهتر مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی، بر روی نمونه‌های خشک شده توسط اسپری یک الگوی تصادفی از لکه‌های سیاه و سفید بسیار ریز اجرا می‌شود. همچنین از یک نوع چسب پلیمری

1. Rubber Mold
2. Acrylic Spacer
3. Curing

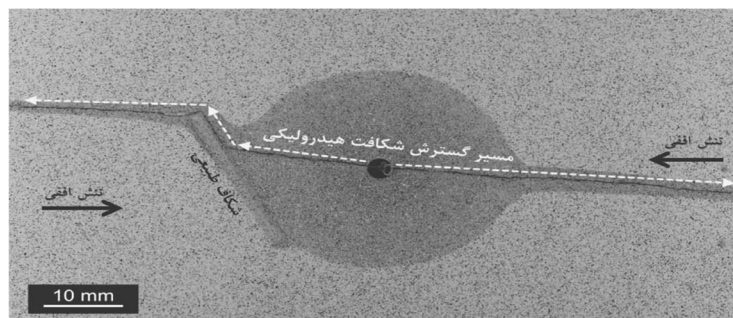
مرزهای بالا و پایین نمونه در راستای محور y محصور نشده‌اند (مرزهای بدون تنش^۱). پس از اعمال تنش برجا بر روی نمونه، سیال شکستگی از طریق چاه مورد نظر به درون نمونه تزریق می‌شود که این تزریق با افزایش فشار سیال به میزان $6/9 \text{ kPa/s}$ همراه بوده (نرخ تزریق سیال^۲) و این عمل تا زمانی که شکافت هیدرولیکی در نمونه آغاز و شروع به گسترش نماید، ادامه می‌یابد. گلیسرین با گرانیوی حدود $0/942 \text{ Pa.s}$ به‌عنوان سیال شکستگی استفاده می‌شود. همچنین به منظور بررسی و آنالیز مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی در برخورد با شکاف طبیعی، عکس‌هایی با وضوح تصویر بالا از هر آزمایش به‌صورت مجزا برداشت می‌شود.

نتایج آزمایشگاهی

به منظور بررسی مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی در برخورد با شکاف طبیعی چهار آزمون آزمایشگاهی در شرایط مختلف انجام شد. خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی و نتایج مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است. در آزمایش‌های شماره ۱، ۲ و ۳ سیمان

جدول ۲ خلاصه‌ای از شرایط و نتایج آزمایش‌ها

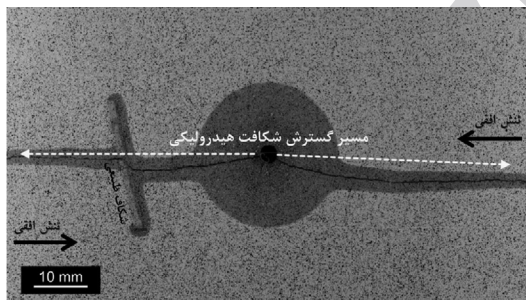
شماره آزمایش	نوع سیمان NF	ضخامت NF (mm)	فاصله NF از چاه تزریق (mm)	نتایج آزمایش
۱	سخت	۲	۱۹	انحراف HF
۲	سخت	۲	۲۷	قطع شدگی NF
۳	سخت	۶	۲۷	انحراف HF
۴	نرم	۶	۲۷	قطع شدگی NF



شکل ۴ توقف و انحراف مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی توسط شکاف طبیعی در آزمایش شماره ۱

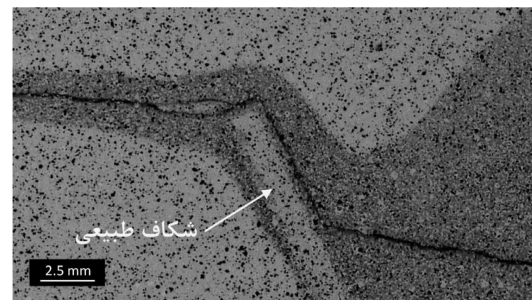
1. Stress-free boundaries
2. Fluid injection rate
3. Glycerin

۲ در مقایسه با فاصله ۱۹ mm آزمایش شماره ۱، ۲۸ mm برآورد شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، شکافت هیدرولیکی ضمن برخورد با شکافت طبیعی سخت و مقاوم موفق به عبور از آن شده است (قطع شدگی). در این آزمایش هرچند مود قطع‌شدگی شکافت طبیعی اتفاق افتاده اما یک انحراف جزئی در مرحله اولیه برخورد شکافت هیدرولیکی با شکافت طبیعی مشاهده می‌شود (شکل ۷) که این انحراف معرف برهم‌کنش نسبتاً زیاد در نقطه برخورد است. در واقع در مرحله اولیه برخورد، شکافت هیدرولیکی وارد شکافت طبیعی شده و شروع به گسترش در طول آن نموده ولی در فاصله خیلی کوتاهی مجدداً از شکافت طبیعی خارج و در مسیر اولیه خود (امتداد تنش افقی) قرار گرفته است. در این آزمایش مشاهده می‌شود که نشت سیال علاوه‌بر مسیر اصلی گسترش شکافت هیدرولیکی، در طول سطح ناپیوستگی میان شکافت طبیعی و نمونه نیز رخ داده است (شکل‌های ۶ و ۷).

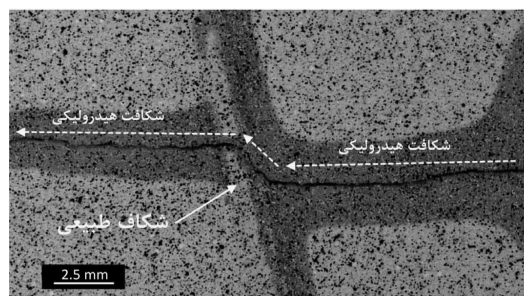


شکل ۶ قطع‌شدگی شکافت طبیعی توسط شکافت هیدرولیکی در آزمایش شماره ۲

همان‌طور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود شکافت هیدرولیکی موفق به ورود به شکافت طبیعی سخت و مقاوم نشده و گسترش آن در مرز میان شکافت طبیعی و خمیره نمونه که از مقاومت کششی کمتری برخوردار بوده، ادامه یافته است. همچنین به‌علت مقاومت بالای مواد پرکننده شکافت طبیعی، علاوه‌بر عدم ورود شکافت هیدرولیکی به درون آن، از نشت سیال به درون خود نیز ممانعت کرده است (شکل ۵). نشت سیال به درون خمیره نمونه آزمایش در اطراف چاه تزریق و در طول مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی به‌صورت نواحی تیره‌تر مشاهده می‌شود (شکل ۴). در آزمایش شماره ۲ شرایط آزمایشگاهی همانند آزمایش شماره ۱ حفظ گردید. در این آزمایش تنها شکافت طبیعی در فاصله بیشتری نسبت به چاه تزریق سیال و به اندازه ۲۷ mm در نظر گرفته شد. در یک شکستگی سخت طبیعی با ضخامت ۲ mm در فاصله دور تر از محل تزریق در آزمایش ۲ جایگیر شده است. فاصله بین محل تزریق و شکستگی طبیعی در آزمایش شماره

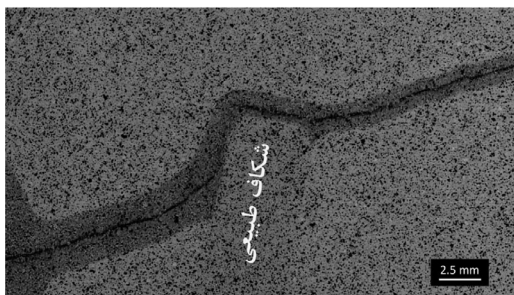


شکل ۵ گسترش شکافت هیدرولیکی در طول سطح ناپیوستگی میان ماتریکس نمونه و شکافت طبیعی و عدم نشت سیال به درون شکافت طبیعی (نشت سیال به‌صورت رنگ تیره‌تر مشخص است)



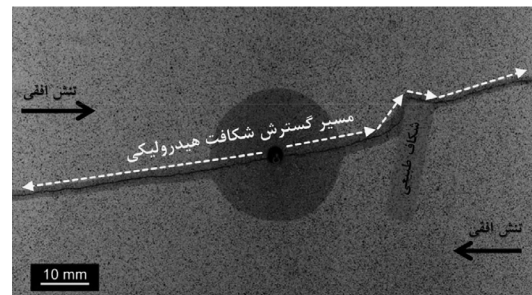
شکل ۷ انحراف جزئی در مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی و نشت سیال در طول سطح ناپیوستگی و عدم نشت آن به درون شکافت طبیعی

میان شکاف طبیعی و خمیره نمونه به خوبی در شکل ۹ نشان داده شده است. در این آزمایش نیز همانند دو آزمایش شماره ۱ و ۲، ضمن برخورد شکافت هیدرولیکی با شکاف طبیعی نشت سیال به درون آن صورت نگرفته است (شکل ۹). در آزمایش شماره ۴، شرایط آزمایشگاهی آزمایش شماره ۳ (فاصله شکاف طبیعی از چاه تزریق، ضخامت شکاف طبیعی و غیره) حفظ شده اما خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیمان یا مواد پرکننده شکاف طبیعی تغییر داده شده است. در این آزمایش، شکاف طبیعی با سیمان متفاوت و ضعیف تر نسبت به شکاف طبیعی آزمایش های شماره ۱، ۲ و ۳ و نیز ماتریکس نمونه آزمایش در نظر گرفته شد (جدول ۱). شکاف طبیعی با ضخامت ۶ mm و در فاصله ۲۷ mm از چاه تزریق قرار دارد. در این آزمایش شکافت هیدرولیکی پس از برخورد با شکاف طبیعی نرم، به راحتی از آن عبور نموده است (اشکال ۱۰ و ۱۱). همان طور که در اشکال (۱۰ و ۱۱) مشاهده می شود، نشت سیال تنها در طول مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی هم به درون خمیره نمونه و هم به درون سیمان شکاف طبیعی که از نفوذپذیری پایینی برخوردار هستند، صورت گرفته است. برهم کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی در نقطه برخورد به واسطه ضعیف بودن سیمان شکاف طبیعی پایین بوده و حتی با توجه به مقاومت کششی کم سطح ناپوستگی میان شکاف طبیعی و نمونه، هیچ گونه نشت سیالی در طول آن مشاهده نمی شود (شکل ۱۱).

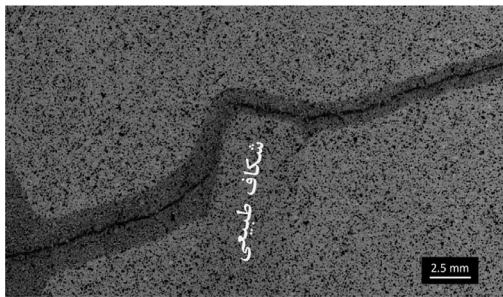


شکل ۹ گسترش شکافت هیدرولیکی در طول سطح ناپوستگی بدون نشت سیال به درون شکاف طبیعی

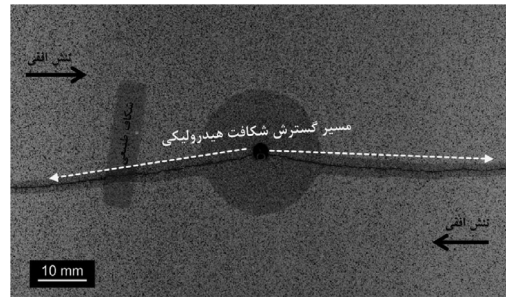
به علت برهم کنش نسبتاً زیاد و افزایش تدریجی فشار سیال در نقطه برخورد، پس از عبور شکافت هیدرولیکی از شکاف طبیعی سیال شکستگی در طول سطح ناپوستگی که از مقاومت کششی کمی برخوردار بوده جریان یافته است. همان گونه که در شکل ۷ نشان داده شده است، نشت سیال به درون شکاف طبیعی صورت نگرفته و یا به ندرت مشاهده می شود. از آنجایی که نفوذپذیری سیمان شکاف طبیعی که از هیدروستون تشکیل شده خیلی پایین بوده و حتی از ماتریکس نمونه نیز پایین تر است، نشت سیال به درون آن به ندرت اتفاق می افتد. مساله عدم نشت سیال به درون مواد پرکننده شکاف طبیعی، علاوه بر سطح ناپوستگی میان شکاف طبیعی و نمونه در مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی در محدوده عبور از شکاف طبیعی به خوبی قابل مشاهده است (شکل ۷). در آزمایش شماره ۳، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سیمان شکاف طبیعی همانند آزمایش های شماره ۱ و ۲ حفظ گردید اما ضخامت شکاف طبیعی نسبت به این دو آزمایش از ۲ به ۶ mm افزایش داده شد. افزایش در ضخامت سیمان شکاف طبیعی منجر به افزایش مقاومت آن شده و در نتیجه شکافت هیدرولیکی ضمن برخورد با شکاف طبیعی قادر به عبور مستقیم از آن نبوده و با دور زدن آن از شکاف طبیعی عبور کرده است (شکل ۸). همانطور که در شکل ۸ مشاهده می شود شکافت هیدرولیکی پس از رسیدن به لبه انتهایی شکاف طبیعی در مسیر اولیه خود در جهت تنش افقی اعمالی قرار گرفته است. گسترش شکافت هیدرولیکی در طول فصل مشترک



شکل ۸ انحراف مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی توسط شکاف طبیعی در آزمایش شماره ۳



شکل ۱۱ عبور شکافت هیدرولیکی از شکاف طبیعی بدون انحراف و نشن سیال در طول ناپیوستگی



شکل ۱۰ قطع‌شدگی شکاف طبیعی توسط شکافت هیدرولیکی در آزمایش شماره ۴

نمودن آن ضمن شرایط یکسان با آزمایش شماره ۲ نشده است. در این حالت شکافت هیدرولیکی ضمن برخورد با شکاف طبیعی ضخیم که ظاهراً از چقرمگی شکست بالاتری نسبت به فاکتور شدت تنش در نوک شکافت هیدرولیکی برخوردار بوده، اجازه قطع شدن و عبور توسط شکافت هیدرولیکی داده نشده (ناکافی بودن مقدار شدت تنش نسبت به چقرمگی شکست در نوک شکافت هیدرولیکی) و در نتیجه شکافت هیدرولیکی با انحراف در مسیر گسترش خود در طول سطح ناپیوستگی میان شکاف طبیعی و خمیره نمونه، از شکاف طبیعی سخت عبور کرده است.

از طرف دیگر، مواد استفاده شده برای شکاف طبیعی نرم در آزمایش شماره ۴ از چقرمگی شکست قابل ملاحظه و کمتری در مقایسه با مواد خمیره نمونه برخوردار است. در این حالت شکافت هیدرولیکی القایی به محض رسیدن به شکاف طبیعی نرم و ضعیف به راحتی آن را قطع کرده است. این مساله را می‌توان با مقایسه فشار شکست در آزمایش شماره ۴ نسبت به سایر آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی در نمونه‌هایی که از مواد با چقرمگی شکست بالاتری برای شکاف‌های طبیعی برخوردار بودند، مشاهده نمود.

در شکل ۱۲ منحنی فشار تزریق سیال در طول فرآیند شکافت هیدرولیکی برای هر چهار آزمایش ارائه شده است. فشار شکست^۱ در آزمایش‌های شماره ۱ تا ۳ تقریباً به یک میزان و در حدود ۲/۵ Mpa ثبت شده است. در صورتی که فشار شکست در آزمایش شماره ۴ که از مصالح ضعیف‌تری برای شکاف طبیعی استفاده شده، به مقدار قابل توجهی کمتر و در حدود ۲/۲ Mpa است.

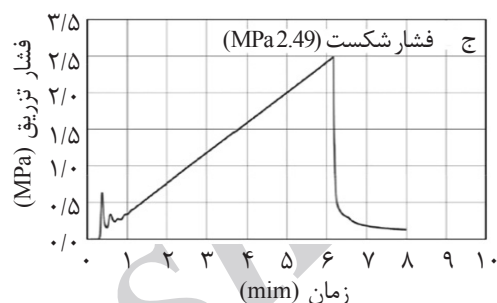
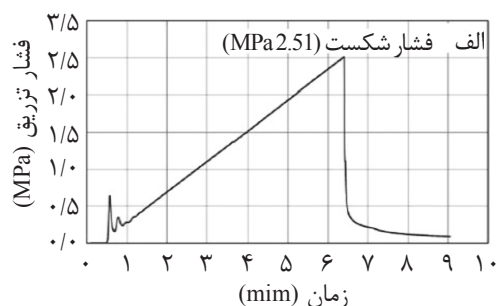
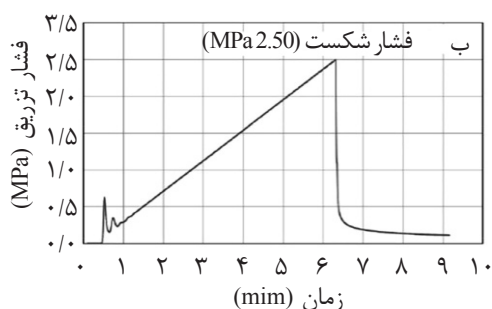
بحث

هنگامی که فاکتور شدت تنش^۲ (K_I) در نوک شکست، بزرگ‌تر از چقرمگی شکست (K_{IC}) مواد موجود در نوک شکست گردد، شکافت هیدرولیکی القایی از محل تزریق شروع به گسترش می‌نماید. فاکتور شدت تنش شکافت هیدرولیکی در حال گسترش متناسب با فشار سیال (P) در طول شکستگی و نیز نصف طول شکستگی (a) است. به‌عنوان مثال، برای یک شکستگی تحت فشار سیال در یک صفحه نامحدود و همگن، رابطه (۱) به منظور محاسبه فاکتور شدت تنش ارائه می‌شود [۱۸]:

$$K_I = P\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

زمانی که شکاف طبیعی سخت به صورت نسبتاً ضخیم در آزمایش شماره ۳ در نظر گرفته شده، شکافت هیدرولیکی القایی مجدداً قادر به قطع

1. Breakdown Pressure
2. Stress Intensity Factor



شکل ۱۲ فشار تزریق سیال در طول فرآیند آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی الف) آزمایش شماره ۱، ب) آزمایش شماره ۲، ج) آزمایش شماره ۳ و د) آزمایش شماره ۴

نتیجه‌گیری

نسبت به سنگ میزبان و یا خمیره نمونه، مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. شکافت هیدرولیکی به احتمال زیاد تمایل به قطع نمودن شکاف‌های طبیعی نرم و ضعیف‌تر و منحرف شدن توسط شکاف‌های طبیعی مقاوم‌تر و سخت‌تر با هندسه یکسان دارند.

۴- فشار شکست نمونه‌های آزمایش با شکاف‌های طبیعی نرم و ضعیف کمتر از فشار شکست نمونه‌های دارای شکاف‌های طبیعی مقاوم و سخت است.

اغلب در مطالعات پیشین هم به‌صورت آزمایشگاهی و هم به‌صورت تئوری، اثر شکاف طبیعی به‌عنوان یک فصل مشترک یا سطح ناپیوستگی اصطکاکی با ضخامت صفر در گسترش شکافت هیدرولیکی در نظر گرفته شده است. مشاهدات آزمایشگاهی گزارش شده در این مطالعه، اهمیت خصوصیات مواد و یا سیمان پرکننده شکاف‌های طبیعی بر روی مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی را برجسته کرده است. طبیعت کوچک مقیاس و دوبعدی این آزمون‌های آزمایشگاهی برای مقایسه با مدل‌سازی عددی برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی ارزشمند است.

این مطالعه مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی جدید از گسترش شکافت هیدرولیکی القایی در برخورد با شکاف‌های طبیعی (از پیش موجود) سیمانی‌شده با مواد مختلف را ارائه می‌کند. براساس آزمایش‌های انجام شده نتایج این مطالعه به شرح ذیل است:

۱- تغییر فاصله میان محل تزریق سیال و شکاف طبیعی سیمانی شده می‌تواند بر روی مسیر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت شرایط یکسان اثرگذار باشد. شکافت هیدرولیکی القایی تمایل به قطع نمودن شکاف طبیعی در فواصل نسبتاً دورتر از محل شروع خود دارد (طول بزرگ‌تر شکافت هیدرولیکی).

۲- شکاف‌های طبیعی سخت و مقاوم به‌عنوان سد یا مانع جهت گسترش شکافت هیدرولیکی عمل می‌کنند. شکافت هیدرولیکی القایی تمایل به قطع نمودن شکاف‌های طبیعی سخت و نازک داشته اما با ضخیم شدن شکاف طبیعی با مواد پرکننده یکسان از مسیر اولیه خود منحرف می‌گردد.

۳- مقاومت مواد یا سیمان پرکننده شکاف طبیعی

آمریکا به پاس حمایت‌های همه جانبه کمال
تقدیر و تشکر را دارد.

تشکر و قدردانی
نویسنده این مقاله از دانشگاه تگزاس در آستین

مراجع

- [1]. Laubach S. E., "Practical approaches to identifying sealed and open fractures," AAPG Bulletin, Vol. 87, No. 4, pp. 561-579, 2003.
- [2]. Gale J. F. W., Reed R. M. and Holder J., "Natural fractures in the barnett shale and their importance for hydraulic fracture treatments," AAPG Bulletin; Vol. 91, No. 4, pp. 603- 622, 2007.
- [3]. Blanton T. L., "An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures. In SPE unconventional gas recovery symposium," Society of Petroleum Engineers, 1982.
- [4]. Warpinski N. R. and Teufel L. W., "Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation," (includes associated papers 17011 and 17074). Journal of Petroleum Technology, Vol. 39, No. 2, pp.209-220, 1987.
- [5]. Renshaw C. E. and Pollard D. D., "An experimentally verified criterion for propagation across unbounded frictional interfaces in brittle, linear elastic materials," In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 32, No. 3, pp. 237-249, Pergamon, 1995.
- [6]. Gu H., Weng X., Lund J., Mack M., Ganguly U. and Suarez Rivera R., "Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: A criterion and its validation," SPE-139984-PA. SPE Production & Operations, Vol. 27, No. 01, pp. 20-26, 2012.
- [7]. Zhou J., Chen M., Jin Y. and Zhang G. Q., "Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 45, No. 7, pp.1143-1152, 2008.
- [8]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K. and Jin Y., "Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks," Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 74, No. 3, pp.887-895, 2015.
- [9]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K. and Jin Y., "The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 75, pp. 210-215, 2015.
- [10]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K. and Jin Y., "Mechanism of fracture initiation and propagation using a tri-axial hydraulic fracturing test system in naturally fractured reservoirs," European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 560-585, 2016.
- [11]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K., Jin Y. and Bahmani A., "3D Numerical modeling of the propagation of hydraulic fracture at its intersection with natural (Pre-existing) fracture," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 50, pp. 367-386, 2017.

[۱۲]. دهقان ع ن، گشتاسبی ک، آهنگری ک، جینی و میسکیمینس ج، "مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه‌هایی از بلوک‌های سیمانی،"

پژوهش نفت، شماره ۲-۸۵، زمستان ۹۴.

[۱۳]. دهقان ع ن، خدایی م، "مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوری واقعی"، پژوهش نفت، شماره ۹۵، مهر و آبان ۹۶.

[14]. Gale J. F. W, Laubach S. E., Olson J. E., Eichhubl P. and Fall A., "Natural fractures in shale: a review and new observations," AAPG Bulletin, Vol. 98, No. 11, pp. 2165-2216, 2014.

[15]. Fu W., Ames B. C., Bungler A. P. and Savitski A. A., "Impact of partially cemented and nonpersistent natural fractures on hydraulic fracture propagation," Rock Mech Rock Eng, Vol. 49, pp. 4519-4526, 2016.

[16]. Bahorich B., Olson J. E., and Holder J., "Examining the effect of cemented natural fractures on hydraulic fracture propagation in hydrostone block experiments," SPE-160197-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, TX, October 8-10, 2012.

[17]. ASTM International., "Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens," ASTM Standard D3967-08, 2008.

[18]. Anderson T. L., "Fracture mechanics fundamentals and applications," third edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2005.

Archive of SID