

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر شکاف از پیش موجود بر گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوری واقعی

علی‌نقی دهقان^{۱*} و میثم خدایی^۲

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

۲- دانشکده مهندسی نفت، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۶/۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۵/۶/۱۹

چکیده

در این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایش‌های آزمایشگاهی با استفاده از یک سیستم شکافت هیدرولیکی بر روی نمونه‌های سیمانی بلوکی شکل به منظور ارزیابی پیچیدگی شبکه شکستگی در زمان گسترش و برخورد شکافت هیدرولیکی با شکاف از پیش موجود تحت شرایط رژیم تنش سه محوره واقعی انجام گرفت. شکاف از پیش موجود در نمونه‌های آزمایش با زوایای شیب و امتداد مختلف در نظر گرفته شدند. نتایج آزمایشگاهی دو نوع رفتار اساسی از گسترش شکافت هیدرولیکی در نقطه برخورد و برهم‌کنش با شکاف از پیش موجود را نشان می‌دهد؛ قطع‌شدگی و عدم قطع‌شدگی. این رفتارها می‌توانند با استفاده از روابط میان زوایای شیب و امتداد و تنش‌های برجا تعیین شوند. از این‌رو دو رابطه تجربی برای توصیف برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف از پیش موجود پیشنهاد شده است. این روابط می‌توانند به پیش‌بینی رفتار گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار طبیعی کمک کنند، اگرچه تعیین دقیق آنها نیازمند آزمایش‌ها و مطالعات تئوری بیشتری است.

کلمات کلیدی: شکافت هیدرولیکی، شکاف از پیش موجود، مخازن شکاف‌دار طبیعی، مطالعه آزمایشگاهی، زاویه برخورد.

مقدمه

مسیرهایی با قابلیت گذردهی و هدایت بالا برای جریان نفت و گاز از مخزن به درون چاه است. یکی از علل پیچیدگی نتایج شبکه شکافت‌های هیدرولیکی، برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی^۲ موجود در مخزن می‌باشد.

شکافت هیدرولیکی^۱ یک روش موثر تحریک و انگیزش مخزن برای توسعه مخازن نامتعارف نفت و گاز است. یکی از اهداف مهم آن ایجاد شبکه پیچیده شکستگی زیرسطحی است که به‌عنوان

1. Hydraulic Fracturing
2. Natural Fracture

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
a.dehghan@srbiau.ac.ir

برای پیش‌بینی آنکه آیا شکافت هیدرولیکی در هنگام برخورد با یک سطح ناپیوستگی یا شکافت از پیش موجود منجر به قطع‌شدگی^۵، باز‌شدگی^۶ و یا لغزش برشی^۷ بر روی آن می‌شود یا خیر، معیارهای مختلفی توسط بلانتون [۱۳]، وارپینسکی و توپفل [۱۰] و رنشاو و پولارد [۱۴] پیشنهاد شده است.

رنشاو و پولارد یک معیار برای حالت قطع‌شدگی با استفاده از تحلیل مرتبه اول تنش‌های نزدیک محل برخورد شکست مود اول و شکستگی‌های اصطکاکی عمو بر روند رشد، ارائه نمودند. مطابق با این مطالعه، عبور عرضی شکافت زمانی رخ می‌دهد که بزرگی تنش نرمال بر روی سطح اصطکاکی به اندازه کافی باشد تا مانع از لغزش در طول سطح مشترک در لحظه‌ای که تنش در نوک ترک برای شروع شکافت بر روی دیوار مقابل سطح مشترک، شود. شکافت‌های طبیعی اغلب هم‌راستا با تنش‌های اصلی درون سازند نیستند، بلکه زاویه محل تقاطع شکافت هیدرولیکی و شکافت طبیعی بین ۰ و ۹۰° است. به‌علت اینکه زاویه محل تقاطع اثر مهمی بر حالت قطع‌شدگی شکافت طبیعی دارد، معیار رنشاو و پولارد توسط گو و ونگ برای برخورد در زوایای غیر متعامد توسعه یافته است [۶ و ۱۴]. اخیراً مطالعات آزمایشگاهی^۸ متعددی به منظور بررسی مساله گسترش شکافت هیدرولیکی در سازندهای شکافدار طبیعی انجام شده است. تحقیقات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شرایط مرزی مانند؛ اختلاف تنش‌های برجا، زاویه‌های برخورد تأثیرات مهمی بر روی برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکافت طبیعی دارند [۸، ۱۵ و ۱۶].

این برهم‌کنش به تنش‌های درون سازند، ویژگی‌های مکانیک سنگی، ویژگی‌های شکافت طبیعی و پارامترهای عملیات شکافت هیدرولیکی نظیر؛ ویژگی‌های سیال شکافت و نرخ تزریق وابسته است [۱-۶]. وقتی که شکافت هیدرولیکی در یک مخزن شکافدار طبیعی^۱ گسترش می‌یابد، ارزیابی تأثیر یک شکافت طبیعی بر شبکه پیچیده شکستگی بسیار مهم است. برخورد میان شکافت هیدرولیکی گسترش یافته و ناپیوستگی‌ها ممکن است منجر به؛ (۱) جلوگیری از گسترش شکافت، (۲) ورود سیال به داخل ناپیوستگی‌ها، (۳) ایجاد شکافت چندگانه و (۴) انحراف شکافت شود. سه مورد اول باعث کاهش طول شکستگی‌ها شده و انحراف شکستگی و شکافت چندگانه باعث کاهش عرض شکستگی می‌شود. این کاهش عرض ممکن است باعث گیرکردن پروپانت‌ها^۲ و در نتیجه باعث مسدود شدن ناگهانی انتقال پروپانت‌ها شود که این پدیده، گرفتادگی یا تجمع پروپانت در یک نقطه^۳ نامیده می‌شود [۷ و ۸]. اگر شکافت هیدرولیکی، شکافت طبیعی را قطع کند، شکافت هیدرولیکی مسطح (دو وجهی) باقی می‌ماند، اما در مقابل اگر شکافت طبیعی را گشادتر کند و در راستای آن منتشر شود، یک شبکه شکافت ترکیبی ایجاد می‌شود. تعیین اینکه یک شکافت هیدرولیکی، شکافت طبیعی را تحت شرایط خاص مثل تنش‌های درون سازندی، ویژگی‌های سنگ و شکافت طبیعی، ویژگی‌های سیال شکافت و شرایط پمپاژ، قطع می‌کند یا خیر، مهم است زیرا که این مسئله هندسه نتایج شبکه شکافت را کنترل می‌کند [۹-۱۱]. تأثیر شکافت از پیش موجود^۴ در گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های سه محوره اولین بار توسط لامونت و جسن در سال ۱۹۶۳ مورد تحقیق و پژوهش قرار گرفت. آن‌ها دریافتند که مقاومت یک سطح ناپیوستگی، جهت آن و نیز اختلاف بین تنش‌های اصلی تأثیرات مهمی بر روی گسترش شکافت هیدرولیکی دارند [۱۲].

1. Naturally Fractured Reservoir

2. Propant

3. Screen out or Bridging

4. Pre-existing Fracture

5. Crossing

6. Opening

7. Shear Slippage

8. Experimental Study

پروژه آزمایشگاهی

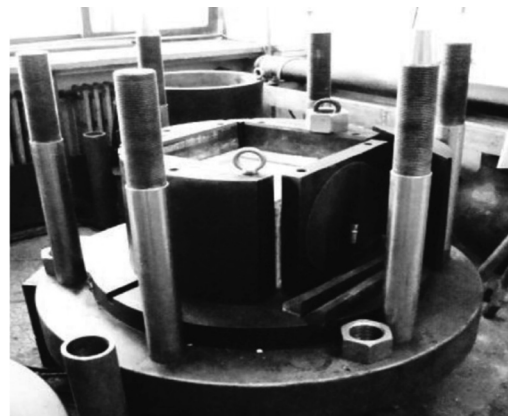
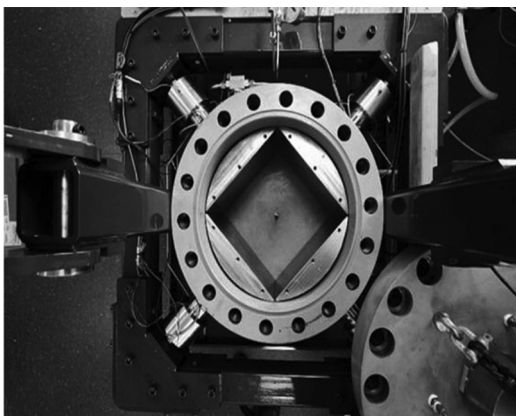
تجهیزات آزمایشگاهی

هیدرولیکی به ترتیب 0.326 mL/s و $16/5 \text{ mPa.s}$ در کل آزمایش می‌باشد.

آماده‌سازی نمونه

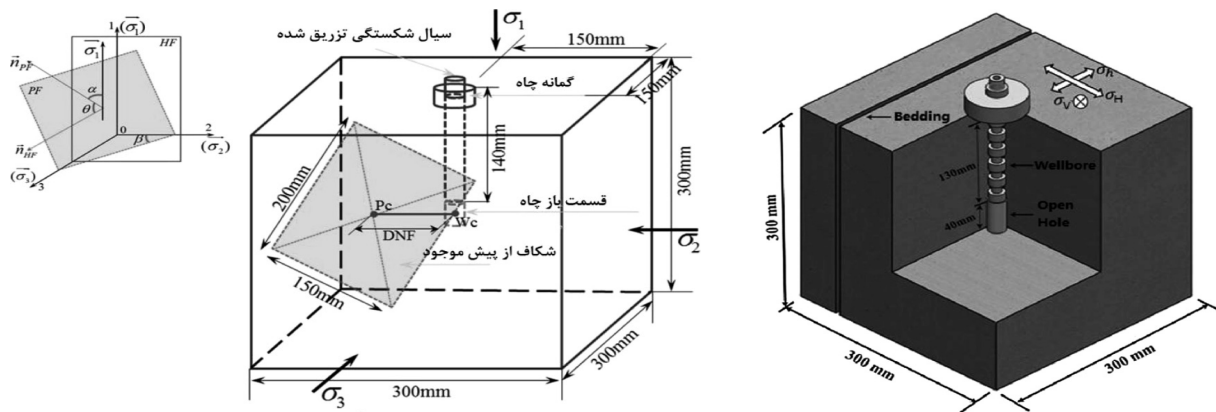
نمونه‌های آزمایشگاهی از بلوک‌های سیمانی (ملائی^۴) مکعبی شکل به ابعاد $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}$ ساخته شده است (شکل ۲). سیمان (P.S32.5) و ماسه (الک ۸۰-۴۰) به نسبت ۱:۱ ترکیب شده‌اند. نسبت آب به سیمان ۱:۰.۳۱۲ می‌باشد. نمونه درون یک کوره برای عمل‌آوری^۵ بتن به مدت ۱۰ روز قرار داده شد. هدف اصلی سرعت بخشیدن به برنامه آزمایش بود، از طرف دیگر تفاوت بین آماده‌سازی مکانیکی برای عمل‌آوری بتن از ۱۰ تا ۲۸ روز ناچیز است. برای مثال آزمایش‌های تراکم یک محوری در آزمایشگاه برای مقایسه تفاوت بین مقاومت ۱۰ روزه و مقاومت نهایی ۲۸ روزه استفاده می‌شود که این تفاوت ۱۰٪ می‌باشد. خواص فیزیکی و مکانیکی بلوک‌های سیمانی مورد آزمایش یکسان می‌باشد. سیال ایجاد کننده شکافت به درون لوله برای تحریک دیواره چاه برجا تزریق می‌شود که قطر خارجی آن 16 mm و قطر داخلی آن 10 mm می‌باشد. طول گمانه چاه تزریقی در حدود 140 mm و طول قسمت حفره باز آن حدودا 20 mm می‌باشد (شکل ۲).

مطالعه گسترش شکافت به وسیله یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی^۱ با قابلیت اعمال تنش سه محوره واقعی^۲ در دانشگاه نفت چین^۳ انجام گرفت (شکل ۱). نمونه‌های مکعبی شکل در میان صفحات پهن فلزی از جنس فولاد قرار گرفته که این صفحات توسط پمپ‌های هیدرولیکی تنش‌های مشخصی بر روی سطح نمونه ایجاد می‌کند. تنش‌ها به ترتیب به وسیله سه پمپ مجزا به همراه تثبیت کننده ولتاژ هیدرولیکی کنترل می‌شوند که می‌توانند مقادیر مطلوب تنش را به صورت مستقل از هم در طی آزمایش بر روی سطح نمونه حفظ کنند. ویسکوزیته‌های مختلف سیال می‌تواند تاثیر به سزایی در شبیه‌سازی سیال شکافت واقعی در میدین نفتی داشته باشد. جریان یک سیال ویسکوز همواره یک افت فشار را در سیال و در مسیر گسترش شکافت به همراه خواهد داشت. تاثیر این افت فشار در مقیاس آزمایشگاهی، کوچک به نظر می‌رسد، بنابراین استفاده از دبی جریان بالا (به منظور جبران افت فشار ناشی از ویسکوزیته سیال تزریقی) لازم و ضروری نیست. دبی تزریق و ویسکوزیته سیال ایجادکننده شکافت



شکل ۱ سلول فشار سه محوره سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی [۵].

1. Hydraulic Fracturing Test System (HFTS)
2. True Triaxial Stress Cell (TTSC)
3. China University of Petroleum (CUP)
4. Mortar
5. Curing



شکل ۲ طرح شماتیک ساختار داخلی از یک نمونه بلوک سیمانی.

مشخص شده است. زاویه بین فصل مشترک خط PF و سطح ۳-۰-۲ با σ_2 با علامت β ($0 < \beta < 90$) مشخص شده است که به صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$\theta = \arccos(\sin \alpha \cos \beta) \quad (2)$$

اگر فرض کنیم که مختصات (۱، ۲، ۳) با مختصات زمین (U, N, E) یکسان باشد، در این صورت آلفا زاویه شیب PF و بتا زاویه امتداد PF را است. رابطه ۲ ارتباط میان زاویه برخورد و هندسه شکاف از پیش موجود (شیب و امتداد) را نشان می‌دهد. اختلاف تنش برجای عمودی با علامت $\Delta\Omega$ به صورت رابطه ۳ مشخص شده است:

$$\Delta\Omega = \sigma_V - \sigma_h \quad (3)$$

و ضریب اختلاف تنش برجا به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$K_S = \frac{\sigma_V - \sigma_h}{\sigma_V - \sigma_H} \quad (4)$$

اختلاف تنش برجای افقی به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود:

$$\Delta\sigma = \sigma_H - \sigma_h \quad (5)$$

طرح آزمایش

در جدول ۲ پارامترها و نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. نمونه‌های مربوط به گروه‌های اول و دوم دارای زاویای مختلفی از شیب و امتداد شکاف از پیش موجود می‌باشند.

یک تکه کاغذ سفید به ابعاد $200 \times 150 \times 0/1$ mm (از جنس کاغذ A4) برای شبیه‌سازی یک سطح شکاف از پیش موجود بدون چسبندگی (نیروی جاذبه بین ذرات) در نمونه، قرار داده شد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، نقطه P_c در مرکز کاغذ است در حالی که نقطه W_c در مرکز قسمت حفره باز می‌باشد که در ارتفاع یکسانی قرار دارند و مقطع بین آن‌ها با ماکزیمم تنش اصلی افقی، موازی است. خواص مکانیکی بلوک‌ها به وسیله آزمایش‌های صورت گرفته بر روی مغزه نمونه به ابعاد 25×50 mm (قطر در طول) تعیین شده است (جدول ۱).

شرایط تنش‌های برجا به صورت $\sigma_V = \sigma_1 > \sigma_H = \sigma_2 > \sigma_h = \sigma_3$ می‌باشد که مختصات سه بعدی تنش‌های اصلی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مطالعه، شکاف‌های از پیش موجود به عنوان شکاف طبیعی در نظر گرفته شده و با علامت PF و شکافت هیدرولیکی با علامت HF مشخص شده است. بردار نرمال سطح PF، $\vec{n}_{PF} = (l_1, l_2, l_3)$ است. عموماً HF $\vec{n}_{HF} = (0, 0, 1)$ باشد. بنابراین بردار نرمال صفحه HF، $\vec{n}_{HF} = (0, 0, 1)$ است. زاویه بین PF و HF که همان زاویه برخورد است، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\theta = \arccos(\vec{n}_{HF} * \vec{n}_{PF}) \quad (1)$$

زاویه بین \vec{n}_{PF} و σ_1 با علامت α ($0 < \alpha < 90$)

جدول ۱ خواص مکانیکی نمونه‌های سیمانی (ملاتی).

مقدار	علائم	پارامتر
۸/۴ GPa	E	مدول الاستیسیته
۰/۲۳	ν	نسبت پواسون (نسبت تغییرات قطر به تغییرات طول یک جسم)
۲۸/۳۴ MPa	σ_c	مقاومت تراکمی تک محوری (UCS)
۲/۸۵ MPa	C	مقاومت چسبندگی نمونه
۰/۷۵	μ_f	ضریب اصطکاک نمونه
۰/۶۵	μ_f	ضریب اصطکاک در شکاف از پیش موجود

جدول ۲ پارامترهای آزمایشگاهی به همراه نتایج.

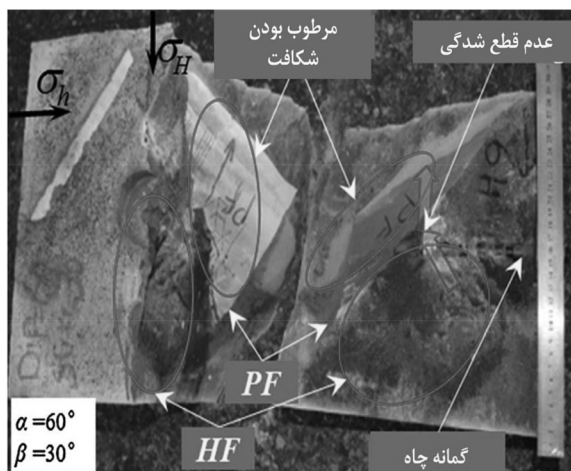
گروه	آزمایش	α (°)	β (°)	θ (°)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)	$\Delta\Omega$	$\Delta\sigma$	K_s	نتایج آزمایش
اول	۱	۶۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۴	۴	۱۶	۱۰	۲/۶۷	C
	۲	۶۰	۶۰	۶۴/۳	۲۰	۱۴	۴	۱۶	۱۰	۲/۶۷	C
	۳	۶۰	۳۰	۴۷/۰	۲۰	۱۴	۴	۱۶	۱۰	۲/۶۷	NC
	۴	۳۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۴	۴	۱۶	۱۰	۲/۶۷	C
	۵	۳۰	۶۰	۷۵/۵	۲۰	۱۴	۴	۱۶	۱۰	۲/۶۷	C
دوم	۶	۶۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۷	۶۰	۶۰	۶۴/۳	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۸	۶۰	۳۰	۴۱/۴	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۹	۳۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۱۰	۳۰	۶۰	۷۵/۵	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۱۱	۹۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۱۲	۹۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۰	۵	۱۵	۵	۱/۵	NC
	۱۳	۹۰	۹۰	۹۰	۲۰	۱۰	۳	۱۷	۷	۱/۷	C
	۱۴	۹۰	۶۰	۶۰	۲۰	۱۰	۳	۱۷	۷	۱/۷	C
	۱۵	۹۰	۳۰	۳۰	۲۰	۸	۵	۱۵	۳	۱/۲۵	NC
سوم	۱۶	۹۰	۶۰	۶۰	۲۰	۱۳	۳	۱۷	۱۰	۲/۴۳	C
	۱۷	۹۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۳	۳	۱۷	۱۰	۲/۴۳	NC
	۱۸	۹۰	۶۰	۶۰	۲۰	۸	۵	۱۵	۳	۱/۲۵	NC
	۱۹	۹۰	۹۰	۹۰	۲۷/۷	۱۳/۸	۶/۹	۲۰/۸	۶/۹	۱/۵۰	C
	۲۰	۹۰	۹۰	۹۰	۲۷/۷	۷/۶	۶/۹	۲۰/۸	۰/۷	۱/۰۳	NC
	۲۱	۹۰	۷۵	۷۵	۲۷/۷	۱۷/۶	۶/۹	۲۰/۸	۱۰/۷	۲/۰۶	C
	۲۲	۹۰	۷۵	۷۵	۲۷/۷	۸/۳	۶/۹	۲۰/۸	۱/۴	۱/۰۷	NC
	۲۳	۹۰	۴۵	۴۵	۲۷/۷	۱۷/۲	۶/۹	۲۰/۸	۱۰/۳	۱/۹۸	NC
	۲۴	۹۰	۴۵	۴۵	۲۷/۷	۸/۳	۶/۹	۲۰/۸	۱/۴	۱/۰۷	NC

Crossing(C): قطع شدگی، No Crossing(NC): عدم قطع شدگی

این دو حالت دارای مود یکسان و فاقد قطع‌شدگی شکاف از پیش موجود است. بنابراین در این مطالعه به تشخیص مود قطع‌شدگی از عدم قطع‌شدگی پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، HF، PF را قطع نکرده چرا که سیال شکافت پس از برخورد با شکاف از پیش موجود، به داخل آن منحرف شده است. علائم C (Crossing) و NC (No Crossing) به ترتیب معرف قطع‌شدگی و عدم قطع‌شدگی شکاف از پیش موجود توسط شکافت هیدرولیکی است (جدول ۲).

آنالیز آزمایشگاهی

تاثیرات زاویه برخورد θ (α و β) و ضرایب اختلاف تنش‌های برجا ($\Delta\sigma$, k_s , $\Delta\sigma$) در گسترش شکافت هیدرولیکی براساس ۴ گروه از نتایج آزمایشگاهی انجام شده می‌تواند به‌طور جزئی آنالیز شود. مطابق شکل ۵ حالت قطع‌شدگی و عدم قطع‌شدگی شکاف از پیش موجود به‌صورت نواحی مشخص و سه بعدی نشان داده شده است. این نواحی می‌تواند از سطوح مرزی غیر مستقیم تشکیل شده باشد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، رابطه بین σ و Δ به‌حالت یک منحنی جدا کننده نمونه قطع شده از یک نمونه قطع نشده می‌باشد. دو مقدار $\Delta\sigma_a = 5/5$ mPa و $\theta_a = 48^\circ$ از دو خط مجانب با یکدیگر به‌ترتیب معرف اختلاف تنش افقی و زاویه برخورد می‌باشد.



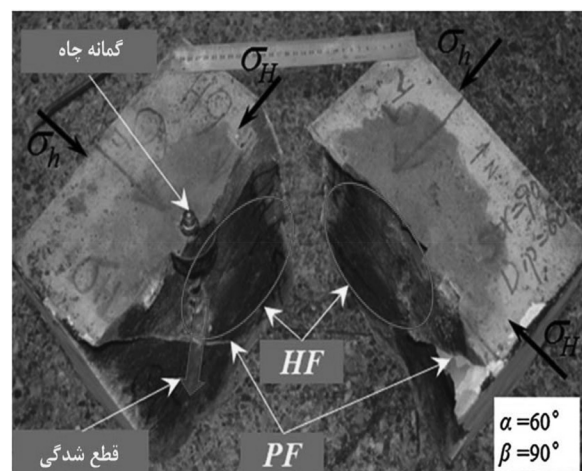
شکل ۴ نتایج آزمایشگاهی، عدم قطع شدگی.

زوایای شیب و امتداد در گروه‌های سوم و چهارم متفاوت بوده، به‌طوری که شیب مربوط به کلیه نمونه‌های گروه‌های سوم و چهارم 90° می‌باشد، اما زوایای امتداد (زوایای برخورد) آنها متفاوت است. باید توجه داشت که در تحقیقات مربوط به دانشی در سال ۱۹۷۴ فرض بر این بود که شکاف از پیش موجود به‌طور عمودی برای مثال با زاویه شیب 90° ، در سازند قرار دارد [۱۷]. شکاف طبیعی در مخزن عموماً از شیب و امتداد مختلفی برخوردار می‌باشد، بنابراین آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی به‌صورت شبیه‌سازی شکاف طبیعی با یک سری شکاف از پیش موجود با زوایای شیب و امتداد مختلف که در جدول ۲ نشان داده شده است، انجام گرفت.

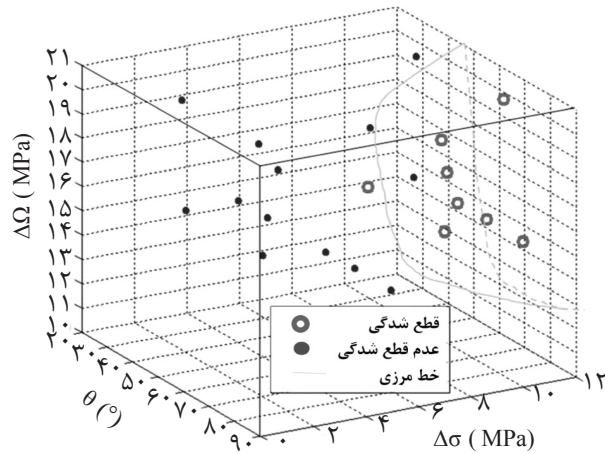
آنالیزها و نتایج آزمایشگاهی

نتایج آزمایشگاهی

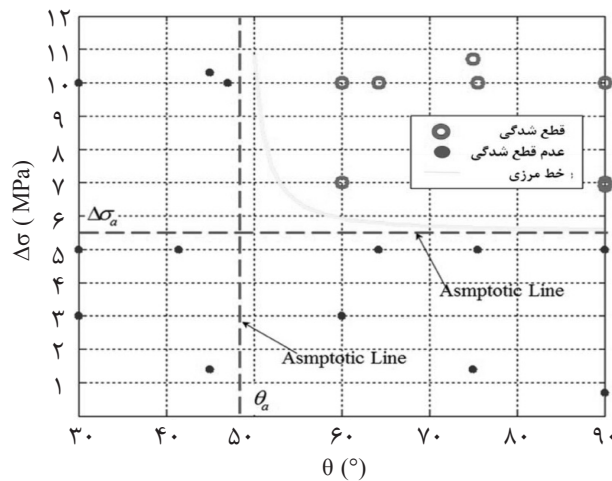
برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف از پیش موجود معمولاً به ۳ مورد قطع شده، متوقف شده و منحرف شده تقسیم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، HF، PF را به‌صورت یک سطح عمودی قطع کرده و باعث تغییر جهت گسترش آن بعد از عبور از قطع‌شدگی نشده است. تشخیص حالت توقف از حالت انحراف شکافت هیدرولیکی مشکل است چرا که سیال شکافت در این دو مورد عموماً به داخل شکاف از پیش موجود نشت می‌کند. هر چند که



شکل ۳ نتایج آزمایشگاهی، قطع شدگی.



شکل ۵ تاثیر $\Delta\sigma$ ، θ و $\Delta\Omega$ بر گسترش شکافت هیدرولیکی.



شکل ۶ تاثیر θ و $\Delta\sigma$ بر گسترش شکافت هیدرولیکی.

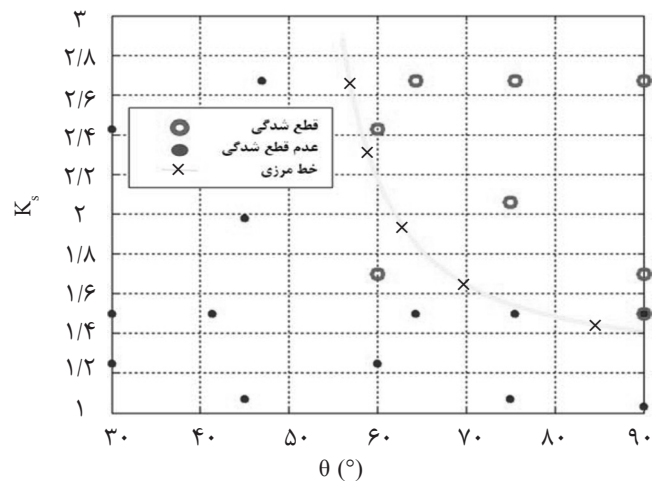
جایی که؛ $A_2 = \Delta\sigma_a = 5.5$ و $A_1 = 14$ ، $n = 1.4$ مطابق شکل ۷ یک خط مرزی به عنوان رابطه بین θ و k_s تعریف شده است. اگر $\theta < \theta_a$ باشد، شکافت هیدرولیکی قادر نخواهد بود شکافت از پیش موجود را قطع کند.

رابطه ۷ یک رابطه تجربی است که شکل مشابهی با رابطه ۶ دارد. زمانی که $f_2 > 0$ باشد، نمونه مورد آزمایش در داخل ناحیه مورد نظر قرار گرفته و شکافت هیدرولیکی، شکافت از پیش موجود را قطع خواهد کرد اما در حالتی که $f_2 < 0$ باشد، شکافت هیدرولیکی، شکافت از پیش وجود را قطع نخواهد کرد.

$$f_2(K_s, \theta) = (K_s - A_4) - \frac{A_3}{(\theta - \theta_a)^n} \quad (7)$$

در صورتی که $\Delta\sigma < \Delta\sigma_a$ یا $\theta < \theta_a$ برقرار باشد، شکافت هیدرولیکی نمی تواند شکافت از پیش موجود را قطع کند. جو و شو از لحاظ کیفی این روند را بدون تعریف هیچ مقدار جانبی توصیف کردند [۱۸]. از این رو می توان آن را با یک بیان تجربی و به صورت یک رابطه آماری تعریف کرد رابطه (۶). در حالتی که $f_1 > 0$ باشد، نمونه مورد آزمایش در داخل ناحیه ایجاد شده قرار گرفته و شکافت هیدرولیکی، شکافت از پیش موجود را قطع خواهد کرد اما در حالتی که $f_1 < 0$ باشد نمونه خارج از ناحیه مذکور بوده و شکافت هیدرولیکی، شکافت از پیش موجود را قطع نخواهد کرد.

$$f_1(\Delta\sigma, \theta) = (\Delta\sigma - A_2) - \frac{A_1}{(\theta - \theta_a)^n} \quad (6)$$



شکل ۷ تاثیر θ و K_s بر گسترش شکافت هیدرولیکی.

نظیر؛ سطوح لایه‌بندی، گسل، درزه و غیره کمک کند. می‌توان نتیجه گرفت هر چه زاویه برخورد بزرگ‌تر باشد، پتانسیل شکافت هیدرولیکی برای قطع کردن شکاف از پیش موجود بیشتر خواهد بود. همچنین با افزایش اختلاف تنش برجا، پتانسیل شکافت هیدرولیکی برای قطع نمودن شکاف از پیش موجود بیشتر خواهد بود. باید توجه داشت که شبکه شکستگی، از تعداد زیادی شکاف‌های از پیش موجود تشکیل شده است و هر شکاف از پیش موجود می‌تواند به‌طور مستقل بر شکافت هیدرولیکی تاثیر بگذارد. این معیار تجربی می‌تواند به درک بهتر شبکه پیچیده گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار طبیعی و نیز کاربرد آن در شبیه‌سازی مخازن کمک نماید. به‌نظر می‌رسد که در تحقیقات آینده به معیاری که در برگزیده کلیه سطوح ناپیوستگی براساس آنالیزهای مکانیکی و اندازه‌گیری‌های پارامتری مصالح برای انواع مختلفی از سنگ‌ها است نیاز باشد. در بسیاری از آزمایش‌ها نیاز است که شکاف‌های از پیش موجود در فواصل معین و مختلف از حفره چاه، سرعت گسترش متفاوت شکافت هیدرولیکی در نمونه و زوایای مختلف شیب و امتداد شکاف از پیش موجود، با در نظر گرفتن رژیم تنش برجا (گسلش نرمال و معکوس) بررسی شوند.

جایی که؛ $n = 1.4$ ، $A_3 = 30$ و $A_4 = 1.25$. مقادیر پارامترهای $\Delta\sigma_a, \theta_a, A_1, A_2, A_3, A_4, n$ در روابط ۶ و ۷ در جریان راه‌اندازی آزمایش اندازه گرفته شده‌اند. البته لازم به ذکر است که به تعداد آزمایش‌ها و کارهای تئوری بیشتری نیاز بوده تا مشخص شود که این پارامترها مربوط به خواص مصالح می‌باشند یا خیر. اما به نظر می‌رسد که این پارامترها، پارامترهای وابسته به خواص مصالح استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشند.

بحث و نتایج

در یک مخزن شکاف‌دار طبیعی یا در مخازن نفت و گاز نامتعارف همچون گاز شیل یا نفت شیل، برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی یا از پیش موجود نسبتاً پیچیده و درک این مسئله دشوار است. بنابراین، ارزیابی تاثیر شکاف طبیعی بر شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی در طراحی بهینه عملیات شکافت هیدرولیکی به منظور دستیابی به بیشترین میزان تولید از یک مخزن مهم است. رفتارهای مشاهده شده (قطع‌شدگی یا عدم قطع‌شدگی) و روابط تجربی به‌دست آمده (روابط ۶ و ۷) در این آزمایش‌ها می‌تواند به درک بهتر برهم‌کنش میان گسترش شکافت هیدرولیکی و سطوح ناپیوستگی‌های دیگر

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تاثیر شکاف از پیش موجود با جهت‌داری (شیب و امتداد) مختلف برروی گسترش شکافت هیدرولیکی تحت تنش‌های برجا مطالعه شده است. نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

۱- گسترش شکافت هیدرولیکی به‌طور اساسی، پس از برخورد با شکاف از پیش موجود، تحت تاثیر آن قرار دارد.

۲- قطع‌شدگی و عدم قطع‌شدگی به‌عنوان دو رفتار متفاوت از گسترش شکافت هیدرولیکی در برخورد با

مراجع

شکاف از پیش موجود می‌باشند.

۳- یک ناحیه سه بعدی برای نشان دادن رفتار برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی و دو رابطه تجربی برای گسترش شکافت هیدرولیکی براساس آزمایش‌های انجام شده برروی بلوک‌های سیمانی پیشنهاد داده شده‌اند.

۴- برخی از نتایج به‌دست آمده در این مطالعه می‌تواند به درک بهتر رفتار گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن دارای ناپیوستگی‌های مختلف (سطوح لایه‌بندی، شکاف طبیعی، گسل و غیره) کمک کند.

- [1]. 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, Issue 3, pp.887-895, 2015.
- [2]. 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.
- [3]. 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, Issue 5, pp. 560-585, 2016.
- [4]. 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, Issue 2, pp. 367-386, 2017.
- [۵]. دهقان ع. ن، گشتاسبی ک، آهنگری ک، جین ی. و میسکیمینس ج، "مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره برروی نمونه‌هایی از بلوک‌های سیمانی،" پژوهش نفت، شماره ۲-۸۵، زمستان ۹۴.
- [6]. Gu H., Weng X., Lund J. B., Mack M. G., Ganguly U. and Suarez-Rivera R., "Hydraulic fracture crossing natural fracture at nonorthogonal angles: a criterion and its validation," *SPE Production & Operations*, Vol. 27, Issue 01, pp. 20-26, 2012.
- [7]. Dahi-Taleghani A., "Analysis of hydraulic fracture propagation in fractured reservoir: an improved model for the interaction between induced and natural fractures," PhD Thesis in the University of Texas at Austin, 2009.
- [۸]. دهقان ع. ن، "تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی بر مکانیسم گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری،" رساله دکترای تخصصی، رشته مهندسی معدن، دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، ۱۳۹۳.
- [9]. 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*, 45(7), pp.1143-1152, 2008.

- [10]. Warpinski N. R. and Teufel L. W., "Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation," Journal of Petroleum Technology, Vol. 39, Issue 02, pp. 209-220, 1987.
- [11]. 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.
- [12]. Lamont N. and Jessen F. W., "The effects of existing fractures in rocks on the extension of hydraulic fractures," Journal of Petroleum Technology, Vol. 15, Issue 02, pp. 203-209, 1963.
- [13]. Blanton T. L., "Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs," In SPE Unconventional Gas Technology Symposium, Society of Petroleum Engineers, 1986.
- [14]. 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.
- [15]. Liu Z., Chen M. and Zhang G., "Analysis of the influence of a natural fracture network on hydraulic fracture propagation in carbonate formations," Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 47, No. 2, pp. 575-587, 2014.
- [16]. Olson J. E., Bahorich B. and Holder J., "Examining hydraulic fracture: natural fracture interaction in hydros-tone block experiments," In SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [17]. Daneshy A. A., "Hydraulic fracture propagation in the presence of planes of weakness," Paper SPE 4852 presented at the SPE European Spring Meeting, Amsterdam, the Netherlands. 29-30 May, 1974.
- [18]. Zhou J. and Xue C., "Experimental investigation of fracture interaction between natural fractures and hydraulic fracture in naturally fractured reservoirs," In SPE Europec/Eage Annual Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2011.