

# مکانیسم شروع و گسترش شکست با استفاده از یک سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره بر روی نمونه‌هایی از بلوک‌های سیمانی

علی‌نقی دهقان<sup>۱</sup>، کامران گشتاسبی<sup>۲\*</sup>، کاوه آهنگری<sup>۱</sup>، یان جین<sup>۳</sup> و جنیفر میسکیمینس<sup>۴</sup>

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

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، ایران

۳- دانشگاه نفت چین، گروه مهندسی نفت، پکن، چین

۴- مدرسه معدنی کلرادو، گروه مهندسی نفت، گلدن، آمریکا

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۷/۱۷

## چکیده

در این مطالعه مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با استفاده از یک سیستم شکافت هیدرولیکی سه محوره واقعی به منظور بررسی مکانیسم شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی بر روی نمونه‌های سیمانی شکاف‌دار و فاقد شکاف در شرایط رژیم تنش نرمال و تکتونیک انجام شد و تاثیر میدان تنش و شکاف‌های طبیعی بر روی شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی مورد بحث قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تمرکز تنش در اطراف چاه به میزان مشخصی، فشار شکست در سنگ را افزایش می‌دهد. به‌گونه‌ای که وجود شکاف طبیعی در دیواره چاه این تمرکز تنش را از بین برده و منجر به کاهش فشار شروع شکست به حدود دو سوم فشار در نمونه‌های بدون شکاف طبیعی شده است. همچنین دو نوع برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی (شکاف موجود) در نمونه‌های شکاف‌دار مشاهده شد که عبارتند از قطع‌شدگی و بازشدگی شکاف طبیعی. در شرایط رژیم تنش نرمال، شکافت هیدرولیکی شکاف موجود را قطع کرده و از آن عبور می‌نماید. در صورتی که در شرایط رژیم تنش تکتونیک به‌علت افزایش برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف موجود حتی در تنش تفاضلی بالا، شکافت هیدرولیکی با باز شدن شکاف موجود به دام افتاده و قادر به عبور از آن نمی‌باشد.

**کلمات کلیدی:** آزمایش شکافت هیدرولیکی، شروع و گسترش شکست، رژیم تنش نرمال و تکتونیک، نمونه‌های سیمانی شکاف‌دار و فاقد شکاف

## مقدمه

عملیات اسیدکاری رایج مقایسه گردید [۱]. شکافت هیدرولیکی از زمان معرفی تاکنون به‌عنوان یک ابزار مهم به منظور بهبود فرآیند تولید چاه نفت و گاز به شمار می‌رود.

اولین عملیات شکافت هیدرولیکی<sup>۱</sup> بدون اسید در سال ۱۹۴۷ در چاه گازی در میدان هوگتون در ایالات کانزاس آمریکا انجام شد و نتایج حاصل از آن با

تنش (نرمال یا تکتونیک) ممکن است روی گسترش و هندسه شکست تاثیرگذار باشد و این اثر بعدها می‌تواند بیشتر قابل توجه باشد. دانشی نشان داد که شکست از یک مسیر محلی با کمترین مقاومت و نه یک مسیر کلی پیروی می‌کند و این مسأله منجر به منشعب شدن ذاتی شکست می‌گردد. وقوع شکستگی‌های برشی گسترده و الگوی رشد به شرایط نوک شکستگی در حال انتشار بستگی دارد. بدین معنی که این شرایط رشد، شکست را اتفاقی و نامتعادل خواهد ساخت [۸-۱۰]. جو و همکاران [۱۱] مطالعاتی را در زمینه مکانیسم شکافت هیدرولیکی در مخازن شکافت‌دار انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که در حالت رژیم تنش نرمال، تفاوت تنش‌های افقی و زاویه تقاطع بر روی شکافت هیدرولیکی به‌عنوان فاکتورهای اصلی و همچنین ضریب اصطکاک داخلی و فشار خالص<sup>۲</sup> (اختلاف میان فشار تزریق و تنش اصلی حداقل) به‌عنوان پارامترهای فرعی موثر می‌باشد. همچنین تاثیر رژیم تنش تکتونیک ناحیه‌ای بر روی گسترش شکافت هیدرولیکی نسبت به شکاف‌های طبیعی بیشتر می‌باشد. جو و همکاران [۱۲] به‌طور گسترده آزمایش‌هایی را جهت بررسی تاثیر مقاومت برشی شکاف طبیعی و همچنین تنش تفاضلی و زاویه برخورد شکافت هیدرولیکی با شکاف طبیعی بر روی روند گسترش شکافت هیدرولیکی انجام دادند. آنها سه نوع رفتار قطع‌شدگی<sup>۳</sup>، بازشدگی<sup>۴</sup> و ایجاد لغزش برشی<sup>۵</sup> شکاف طبیعی را در گسترش شکافت هیدرولیکی مشاهده کردند. همچنین مطالعات آزمایشگاهی مختلفی توسط برخی از محققین به منظور بررسی گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن شکافت‌دار طبیعی صورت گرفته است [۱۳-۱۵].

بدین ترتیب برای بهبود نرخ موفقیت و اثر شکافت در مخزن، چندین محقق، شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی را در مخازن مختلف بررسی کردند. هوبرت و ویلیز [۲] عنوان نمودند که شکست در امتداد حداکثر تنش افقی ( $\sigma_H$ ) و عمود بر حداقل تنش افقی ( $\sigma_h$ )، شروع و گسترش یافته و در نهایت منجر به ایجاد یک ترک بزرگ می‌گردد. آنها در واقع نخستین رابطه را برای محاسبه فشار شکست ارائه نمودند. تیرکلین و همکاران [۳] از یک دوربین با ویژگی تصویربرداری بالا برای ثبت گسترش شکست و اندازه‌گیری کمی هندسه شکست استفاده کردند. تحقیق آنها نشان داد که شکست توسعه یافته دارای شکل بیضوی در مصالح همگن می‌باشد. همچنین این نتیجه برای میان لایه‌های ناهمگن که دارای تنش‌های افقی متفاوتی هستند، قابل استفاده نمی‌باشد. دانشی [۴] در مطالعاتش به نتایجی که قبلاً توسط هوبرت و ویلیز [۲] ارائه شده بود، دست یافت. اما این محقق عنوان کرد که شکستگی‌های طبیعی موجود در سازند بر روی گسترش و توسعه شکافت هیدرولیکی تاثیرگذار می‌باشد. بلانتون [۵] با انجام مطالعات آزمایشگاهی اظهار داشت که تنش تفاضلی<sup>۱</sup> (اختلاف میان حداقل و حداکثر تنش افقی) و زاویه برخورد میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی، فاکتورهای مهم و تاثیرگذار بر روی شکل و امتداد شکست می‌باشد. ایشان یک معیار برای برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی ارائه کرده‌اند. وارپینسکی و تیوفل [۶] نیز برای بررسی برهم‌کنش میان شکافت هیدرولیکی و شکاف طبیعی، مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند. آنها مشاهده کردند که لغزش برشی روی شکاف‌های طبیعی به هنگام برخورد شکافت‌های هیدرولیکی با شکاف‌های طبیعی به آسانی رخ می‌دهد. بوژلسیج و همکاران [۷] به منظور بررسی روند گسترش شکافت هیدرولیکی در یک محیط با شکستگی‌های متعدد، یک سری مطالعات آزمایشگاهی انجام دادند. آنها معتقد بودند که تفاضل تنش افقی و رژیم

1. Differential Stress  
2. Net Pressure  
3. Crossing  
4. Opening  
5. Shear Slippage

سیستم دارای یک سلول فشار سه محوره با قابلیت اعمال فشار همه جانبه بر روی نمونه می‌باشد (شکل ۱). آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه نفت چین طراحی و انجام شدند. تعداد ۶ بلوک سیمانی در قالب‌های فلزی به ابعاد  $30 \times 30 \times 30$  cm به منظور شبیه‌سازی مخازن شکافت‌دار طبیعی و فاقد شکافت<sup>۱</sup> طراحی و ساخته شد. پس از ساخته شدن بلوک‌ها و نگهداری آنها در دمای اتاق به مدت دو هفته، آزمایش شکافت هیدرولیکی بر روی آنها انجام گرفت. به منظور طراحی شکافت از پیش موجود<sup>۲</sup> از یک تکه کاغذ پرینتر با ضخامت  $0.11$  mm و ضریب اصطکاک  $0.189$  استفاده گردید. پس از ساخت مدل‌های مذکور، یک چاه قائم به قطر  $6$  mm و طول  $15$  cm دقیقاً در وسط بلوک حفاری شد. که  $14$  cm از این چاه توسط یک جدار فلزی پوشیده شد و تنها  $1$  cm انتهایی بدون نصب جدار به منظور تزریق سیال باقی ماند (شکل ۲). یکی از پارامترهای مهم در مسأله شکافت هیدرولیکی، شبیه‌سازی تنش‌های برجا می‌باشد.

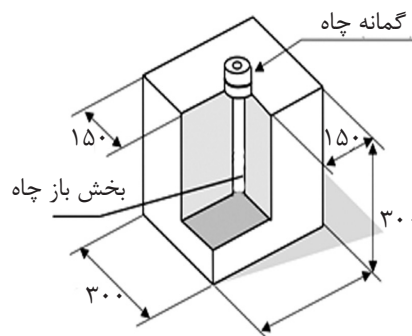
اگر چه در برخی از مطالعات گذشته به بررسی رفتار گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن شکافت‌دار پرداخته شده، اما بررسی‌های دقیقی را در خصوص تاثیر شکافت‌های طبیعی و موقعیت قرارگیری آنها در سنگ مخزن (نسبت به محل تزریق سیال) بر روی میزان فشار شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی در شرایط رژیم تنش‌های مختلف انجام نشده است. در مقاله حاضر، به منظور بررسی مکانیسم شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی در مخازن مختلف، مجموعه‌ای از آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی تحت شرایط رژیم تنش نرمال و تکتونیک طراحی و انجام شد. در ادامه تاثیر میدان تنش و وجود شکافت‌های طبیعی (روی دیواره چاه یا در فاصله معینی از چاه) بر روی رفتار شکافت هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت.

### فرآیند آزمایشگاهی

به منظور شبیه‌سازی عملیات شکافت هیدرولیکی در مخزن از یک سیستم استاندارد آزمایش شکافت هیدرولیکی سه محوره واقعی استفاده گردید. این



شکل ۱- سلول فشار سه محوره سیستم آزمایش شکافت هیدرولیکی

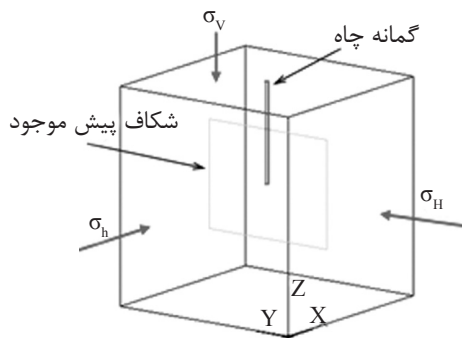


شکل ۲- طرح شماتیک ساختار داخلی بلوک

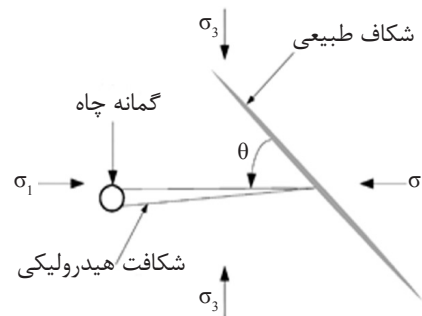
1. Fractured and Non-Fractured Reservoirs  
2. Pre-existing Fracture

جهت شکاف موازی با حداقل تنش افقی (شکل ۴) و در نمونه شماره ۶ جهت شکاف عمود بر حداقل تنش افقی (شکل ۵) می‌باشد. در هر دو نمونه، شکاف‌ها به صورت قائم و موازی با محور چاه در نظر گرفته شد. نمونه‌های شماره ۱، ۳، ۵ و ۶ در شرایط تنش نرمال و نمونه‌های شماره ۲ و ۴ در حالت تنش تکتونیک مورد آزمایش قرار گرفتند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از شرایط آزمایشگاهی نمونه‌ها ارائه شده است. زمانی که نمونه در داخل سلول فشار تحت تنش سه محوره قرار گرفته و به حالت تعادل می‌رسد، سیال شکستگی با گرانیوی  $135 \text{ mPa.s}$  و نرخ  $3/5 \text{ mL/min}$  به داخل نمونه تزریق می‌شود. به منظور ردیابی بهتر مسیر گسترش شکست، سیال تزریقی، ترکیبی از آب ( $98/40$ ٪)، صمغ گوار<sup>۲</sup> و ماده رنگی<sup>۳</sup> ( $1/46$ ٪) در نظر گرفته شد. عمل تزریق سیال تا زمان شروع و گسترش آن به مرز نمونه، ادامه می‌یابد.

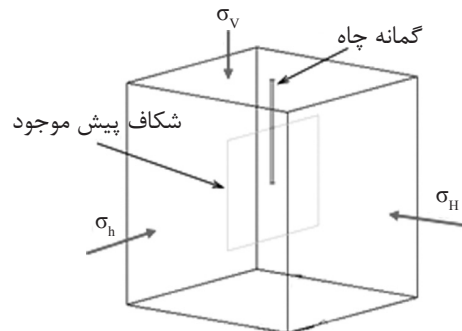
در این مطالعه دو نوع رژیم تنش نرمال و تکتونیک<sup>۱</sup> (امتداد لغز) در نظر گرفته شد. در حالت رژیم تنش نرمال ( $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ )، تنش فشارشی اصلی حداکثر  $\sigma_1$  در صفحه قائم و تنش‌های فشارشی اصلی متوسط  $\sigma_2$  و حداقل  $\sigma_3$  در صفحه افقی اعمال می‌گردد. در حالی که در رژیم تنش تکتونیک ( $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ )، تنش‌های فشارشی اصلی حداکثر  $\sigma_1$  و حداقل  $\sigma_3$  در صفحه افقی و تنش فشارشی اصلی متوسط  $\sigma_2$  در صفحه قائم اعمال می‌شود. بلوک‌های فاقد شکاف (نمونه‌های ۱ و ۲) به عنوان مخازن بدون شکاف طبیعی و بلوک‌های دارای شکاف‌های از پیش موجود (نمونه‌های ۳ تا ۶) به عنوان مخازن شکاف دار طبیعی در نظر گرفته شدند. مطابق شکل ۳ شکاف‌های از پیش موجود نمونه‌های شماره ۳ و ۴ در فاصله معینی از چاه و با زاویه  $60^\circ$  نسبت به جهت شروع شکافت هیدرولیکی قرار دارند. شکاف‌های از پیش موجود نمونه‌های شماره ۵ و ۶ بر روی دیواره چاه قرار دارند که در نمونه شماره ۵



شکل ۴- طرح شماتیک موقعیت قرارگیری شکاف از پیش موجود در نمونه شماره ۵



شکل ۳- طرح شماتیک از موقعیت قرارگیری شکاف از پیش موجود در نمونه‌های ۳ و ۴



شکل ۵- طرح شماتیک موقعیت قرارگیری شکاف از پیش موجود در نمونه شماره ۶

1. Tectonic (Strike-Slip) and Normal-Faulting Stress Regime

2. Guar Gum

3. Dye

جدول ۱- شرایط آزمایشگاهی نمونه‌ها

شماره نمونه	موقعیت شکاف از پیش موجود	تنش قائم $\sigma_v$ (MPa)	تنش افقی حداقل $\sigma_h$ (MPa)	تنش افقی حداکثر $\sigma_H$ (MPa)	رژیم تنش
۱	-	۱۰	۴	۶	نرمال
۲	-	۶	۴	۱۰	تکتونیکی
۳	فاصله از چاه و زاویه $60^\circ$ نسبت به $\sigma_{Hmax}$	۱۰	۴	۶	نرمال
۴	فاصله از چاه و زاویه $60^\circ$ نسبت به $\sigma_{Hmax}$	۶	۴	۱۰	تکتونیکی
۵	روی دیواره چاه و موازی با $\sigma_{Hmax}$	۱۰	۴	۶	نرمال
۶	روی دیواره چاه و موازی با $\sigma_{Hmax}$	۱۰	۴	۶	نرمال

### مشاهدات و آنالیز آزمایشگاهی

مخازن هیدروکربوری از دیدگاه عملیات شکافت هیدرولیکی که منجر به افزایش تولید چاه می‌شود، به دو دسته مخازن فاقد شکاف و شکافدار تقسیم می‌گردد. بنابراین مجموعه‌ای از ۶ آزمایش شکافت هیدرولیکی برای مطالعه شروع و گسترش شکست در این دو نوع مخزن انجام گرفت و آنالیزی از امتداد گسترش شکست و تاثیر شکاف‌های طبیعی روی شروع و گسترش شکاف‌های هیدرولیکی اعمال شده در بلوک‌های سیمانی، صورت پذیرفت.

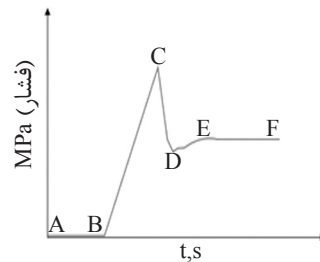
### آنالیز شروع و گسترش شکست در مخازن فاقد شکاف طبیعی

آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی بر روی ۲ نمونه سیمانی (۱ و ۲) فاقد شکاف موجود در دو حالت رژیم تنش نرمال و تکتونیکی به منظور بررسی شروع و گسترش شکست در مخازن فاقد شکاف طبیعی انجام گرفت. منحنی واکنش فشار سیال شکست نسبت به زمان در طول آزمایش شکافت هیدرولیکی در شکل ۶ نشان داده شده است. می‌توان منحنی واکنش فشار را در ۴ مرحله توصیف نمود. (۱) مرحله تزریق سیال (AB)؛ (۲) مرحله افزایش فشار (BC)؛ (۳) مرحله افت فشار (CD) و (۴) مرحله گسترش شکست (DF). نقطه C نقطه شروع شکست و یا به عبارتی معیار یک شکست می‌باشد. در این نقطه، فشار چاه به‌طور ناگهانی به‌علت نشست سیال در طول شکست ایجاد شده افت می‌کند و نهایتاً به کمترین مقدار فشار سیال (D) می‌رسد. مقدار

حداکثر فشار سیال برای گسترش شکست، نقطه E می‌باشد. منحنی فشار برای نمونه‌های فاقد شکستگی مشابه شکل ۶ است. در این نمونه‌ها (۱ و ۲) شکستگی‌ها در جهت حداقل تنش افقی ( $\sigma_h$ ) باز و در امتداد حداکثر تنش افقی ( $\sigma_H$ ) گسترش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، فشار شروع شکست به‌طور وضوح بزرگ‌تر از فشار گسترش شکست می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که فشار در اطراف محدوده محیط چاه در محدوده ۳ تا ۶ برابر قطر چاه تمرکز بیشتری یافته است. قابل ذکر است که خارج از این محدوده، تنش میدان دور<sup>۱</sup> نقش مهمی ایفا می‌کند. خلاصه‌ای از نتایج این دو آزمایش در جدول ۲ آورده شده است. فشار شروع شکست ( $p_p$ ) توسط رابطه هوبرت و ویلیز [۲] محاسبه می‌گردد:

$$p_p = 3\sigma_h - \sigma_H - p_p + T_0 \quad (1)$$

در رابطه بالا  $\sigma_h$  حداقل تنش افقی،  $\sigma_H$  حداکثر تنش افقی،  $p_p$  فشار حفره‌ای و  $T_0$  مقاومت کششی نمونه‌های سیمانی می‌باشد. به‌علت تخلخل پایین نمونه‌های سیمانی، هیچ سیالی نمی‌تواند در نمونه‌ها جریان یابد. بنابراین فشار حفره‌ای صفر در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که شکافت هیدرولیکی از چاه شروع و توسعه می‌یابد، گسترش شکست به دلیل تنش میدان دور، غالب می‌گردد.



شکل ۶- منحنی واکنش فشار سیال نسبت به زمان در طول آزمایش شکافت هیدرولیکی

جدول ۲- مقادیر فشار بحرانی اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های فاقد شکاف

شماره نمونه	مقاومت کششی نمونه (MPa)	فشار شروع شکست (نقطه C) (MPa)	حداقل فشار شکست (نقطه D) (MPa)	فشار گسترش شکست (نقطه E) (MPa)
۱	۵/۰۵	۱۴/۷۲	۷/۰۵	۸/۴۷
۲	۵/۰۴	۱۳/۸۸	۶/۴۵	۸/۶۵

با سیال قرار دارد، تیره‌تر است، بنابراین، می‌توان شروع و گسترش شکستگی‌ها را مورد تحلیل قرار داد. شروع شکافت هیدرولیکی، وابسته به فشار تزریقی است که بر تنش متمرکز در اطراف چاه غلبه کرده و منجر به نفوذ سیال به داخل شکستگی‌ها می‌گردد. به همین دلیل نمونه شروع به شکست می‌کند. اما نمونه در یک زمان توسط شکافت هیدرولیکی در طرفین منجر به شکست نشده و به جای آن یک شکست نزدیک به چاه شکل می‌گیرد. این پدیده عمدتاً به علت ظرفیت پایین پمپ و محدودیت ظرفیت انرژی می‌باشد. باز شدن شکست منجر به کاهش فشار همانند بخش CD در شکل ۶ می‌گردد. در این صورت شکافت هیدرولیکی ایجاد شده با ادامه عمل پمپ کردن سیال به طرف سطح نمونه، گسترش می‌یابد.

#### آنالیز شروع و گسترش شکست در مخازن شکاف‌دار طبیعی

نمونه‌های دارای شکستگی‌های از پیش موجود برای شبیه‌سازی سنگ‌های مخازن شکاف‌دار استفاده شد. به علت پیچیدگی مخازن شکاف‌دار طبیعی، تعیین تاثیر شکاف‌های طبیعی روی شروع و گسترش شکست‌ها در طول فرآیند شکافت هیدرولیکی مشکل می‌باشد.

بنابراین فشار گسترش شکاف ( $p_{re}$ ) توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

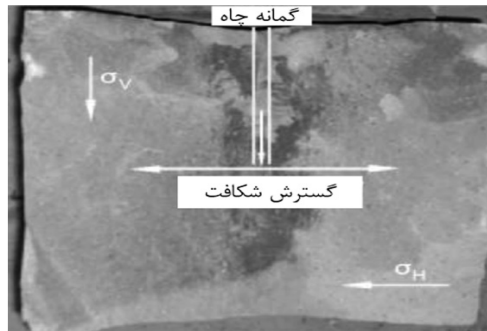
$$p_{re} = \sigma_h + T_0 \quad (2)$$

فشار شروع و گسترش شکست محاسبه شده از روابط ۱ و ۲ در جدول ۳ آورده شده است. فشار شکست محاسبه شده از رابطه ۱ کمتر از مقادیر آزمایشگاهی می‌باشد و میانگین متوسط اختلاف ۲۴٪ است که نشان می‌دهد رابطه ۱ برای تحلیل آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی، قابل استفاده نمی‌باشد. همچنین میانگین اختلاف میان فشار گسترش از رابطه ۲ و مقادیر آزمایشگاهی ۳۷٪ می‌باشد که نشان می‌دهد فشار لازم برای غلبه بر نیروی مقاوم سنگ به منظور گسترش شکست در نمونه‌های فاقد شکاف موجود، به مقادیر سازندهای عمیق خیلی نزدیک‌تر می‌باشد. آزمایش شکافت هیدرولیکی بر روی یک نمونه فاقد شکاف، (نمونه شماره ۲) در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، سطح شکست متقارن و صفحه‌ای می‌باشد که در برخی موارد به‌طور جزئی متغیر است). رنگ قرمز در نزدیکی محل تزریق سیال و در سمت چپ نمونه تیره‌تر و در سمت راست نمونه روشن‌تر می‌باشد. توزیع سیال تزریقی در نمونه کاملاً یکنواخت نیست و به نظر می‌رسد سطوحی از شکست که در تماس بیشتری



جدول ۳- نتایج مقادیر فشار محاسبه شده به روش تحلیلی

شماره نمونه	فشار شروع شکست ( $f_p$ ) (MPa)	فشار گسترش شکست ( $p_{cr}$ ) (MPa)
۱	۱۱/۱۴	۹/۱۴
۲	۱۰/۶۷	۸/۶۷



شکل ۷- گسترش شکافت هیدرولیکی در نمونه شماره ۲

شکاف‌های طبیعی در شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی، اهمیت زیادی دارد.

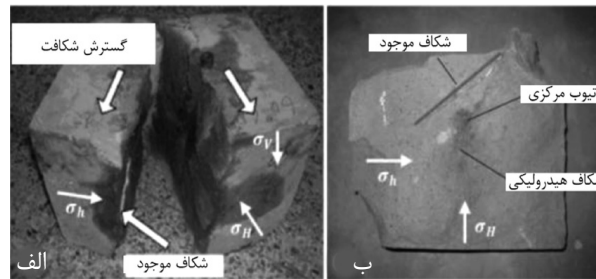
در آزمایش ۳ شکافت هیدرولیکی در امتداد حداکثر تنش افقی گسترش یافته و در صورت برخورد با شکاف از پیش موجود، باعث قطع شدن و عبور از آن می‌شود. (شکل ۸- الف).

در آزمایش ۴ شکافت هیدرولیکی ابتدا در امتداد حداکثر تنش افقی گسترش می‌یابد و سپس در هنگام برخورد با شکاف طبیعی متوقف شده و با ادامه پمپ شدن سیال به داخل نمونه، شکاف طبیعی توسط شکافت هیدرولیکی باز می‌شود و سیال در امتداد آن جریان می‌یابد (شکل ۸- ب). در نمونه شماره ۵، سطح شکست از پیش موجود راحت‌ترین صفحه برای گسترش شکست می‌باشد که این مسأله به‌علت زاویه  $90^\circ$  میان شکاف طبیعی و تنش اصلی افقی حداقل و نیز صفر بودن مقاومت کششی شکاف طبیعی می‌باشد. شکافت هیدرولیکی در نمونه شماره ۵ در امتداد صفحه شکاف طبیعی شروع و گسترش یافته است که عمود بر حداقل تنش افقی می‌باشد (شکل ۹). هندسه شکافت هیدرولیکی در نمونه شماره ۵ مشابه هندسه شکست در نمونه‌های ۱ و ۲ (فاقد شکاف طبیعی) می‌باشد.

بنابراین در این مقاله برای مطالعه برخورد میان شکافت هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی، از نمونه‌هایی که دارای یک شکاف از پیش موجود می‌باشند، استفاده گردید. ۴ آزمایش بدین منظور طراحی و انجام شد که در دو نمونه (۳ و ۴) شکاف از پیش موجود در فاصله معینی از چاه و در دو نمونه دیگر (۵ و ۶) بر روی دیواره چاه قرار داشت. روند کلی منحنی شکست همانند منحنی ارائه شده در شکل ۶ می‌باشد، هرچند که حضور شکاف‌های طبیعی در نمونه‌ها بسیار جدی است. داده‌های منحنی شکست در جدول ۴ ارائه شده است. جدول ۴ نشان می‌دهد که فشار شکست نمونه‌های ۳ و ۴ به فشار شکست نمونه‌های فاقد شکستگی (۱ و ۲) که توسط رابطه ۱ محاسبه شده، نزدیک می‌باشد. میانگین انحراف نسبی بین این دو مقدار  $6/8\%$  به‌دست آمد. در صورتی که فشار گسترش شکست اندازه‌گیری از آزمایش شکافت هیدرولیکی پایین‌تر و نزدیک به تنش افقی حداقل است و با مقدار محاسبه شده توسط رابطه ۲ متفاوت می‌باشد. برای نمونه‌های ۵ و ۶ به‌علت وجود شکاف از پیش موجود بر روی دیواره چاه، فشار شکست پایین است و فشار گسترش نیز نزدیک به نمونه‌های ۳ و ۴ می‌باشد. آزمایش‌های شکافت هیدرولیکی بر روی نمونه‌های شکاف‌دار نشان می‌دهد که وجود

جدول ۴- مقادیر فشار بحرانی و امتداد شکافت هیدرولیکی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های شکافدار

شماره نمونه	فشار شکست (MPa) (نقطه C)	حداقل فشار (MPa) (نقطه D)	فشار گسترش (MPa) (نقطه E)	امتداد گسترش شکافت هیدرولیکی
۳	۱۱/۴۶	۳/۶۱	۴/۱۵	عمود بر حداقل تنش افقی و قطع شدن شکاف طبیعی
۴	۱۲/۰۱	۳/۷۲	۴/۷۶	عمود بر حداقل تنش افقی و باز شدن شکاف طبیعی
۵	۸/۴۲	۴/۷۲	۶/۴۵	عمود بر حداقل تنش افقی
۶	۹/۹۵	۶/۵۷	۷/۸۳	ابتدا موازی و سپس عمود بر حداقل تنش افقی



شکل ۸- گسترش شکافت هیدرولیکی در نمونه‌های الف) شماره ۳ و ب) شماره ۴



شکل ۹- گسترش شکافت هیدرولیکی در امتداد شکاف از پیش موجود (نمونه شماره ۵)

شماره ۶ متفاوت از نمونه شماره ۵ است. نمونه‌های ۵ و ۶ دارای یک شکاف طبیعی بر روی دیواره چاه هستند که شکاف از پیش موجود در این نمونه‌ها به‌ترتیب موازی و عمود با حداکثر تنش افقی می‌باشد. فشار شکست برای این دو نمونه خیلی پایین و در حدود دو سوم فشار در نمونه‌های فاقد شکست است. فشار شکست در نمونه ۶ تا حدودی بیشتر از نمونه ۵ می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که شکاف از پیش موجود (بر روی دیواره چاه) نقش مهمی در شروع شکست بازی می‌کند. شکست در نمونه‌ها منجر به کاهش و برطرف نمودن اثر شرایط تنش سنگ احاطه کننده چاه می‌شود.

در صورتی که در نمونه شماره ۶، شکافت هیدرولیکی در امتداد شکاف طبیعی که موازی با حداقل تنش افقی (عمود بر حداکثر تنش افقی) می‌باشد، شروع و گسترش یافته است. اما زمانی که به نوک شکاف رسیده متوقف شده و با تغییر گسترش شکست، در جهت عمود بر حداقل تنش افقی گسترش یافته است. فشار شکست در نمونه‌های ۵ و ۶ به‌طور واضح پایین‌تر می‌باشد. این پدیده می‌تواند این‌گونه توصیف گردد که شکاف از پیش موجود بر روی دیواره چاه می‌تواند منجر به کاهش و برطرف نمودن تنش‌های متمرکز در اطراف چاه گردد. حالت تنش سنگ احاطه کننده به‌عنوان فاکتور تاثیرگذار و اصلی روی شروع شکست نزدیک به چاه می‌باشد. هندسه شکافت هیدرولیکی در نمونه



## نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل می باشد:

۱- توزیع تنش پوسته‌ای، حالت تنش در اطراف چاه و نوع نمونه سیمانی (شکاف دار یا بدون شکاف) پارامترهای مهم و موثری در مکانیسم شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی می باشند.

۲- شکاف‌های موجود در نمونه‌های سیمانی تاثیر مشخصی بر روی شروع و گسترش شکافت هیدرولیکی دارند. به طوری که شکاف‌های طبیعی فشار شکست نمونه را کاهش داده و باعث پیچیدگی در هندسه شکافت هیدرولیکی می گردند.

۳- شکاف طبیعی موجود در دیواره چاه تمرکز تنش اطراف چاه را برطرف کرده و فشار شروع شکست را حدود دو سوم فشار در نمونه‌های بدون شکاف کاهش می دهد.

۴- قطع شدگی و باز شدگی شکاف طبیعی به عنوان دو نوع رفتار غالب گسترش شکافت هیدرولیکی به ترتیب تحت شرایط رژیم تنش نرمال و تکتونیک در نمونه‌های شکاف دار معرفی می شوند.

۵- در رژیم تنش نرمال، در صورت برخورد شکافت هیدرولیکی با شکاف طبیعی، آن را قطع و از آن عبور می کند. اما در شرایط رژیم تنش تکتونیک، شکافت هیدرولیکی ضمن برخورد با شکاف طبیعی،

## مراجع

- [1]. Weijers L., "The near-wellbore geometry of hydraulic fractures initiated from horizontal and deviated wells," Ph.D. dissertation. Delft University of Technology, Netherlands. 1995.
- [2]. Hubbert M. K., and Willis D. G., "Mechanics of hydraulic fracturing," *Journal of American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 12, No. 18, pp. 239-257, 1957.
- [3]. Thiercelin M., Naceur K. B., and Lemanczyk Z. R., "Simulation of threedimensional propagation of a vertical hydraulic fracture," Paper SPE 13861 Presented at the SPE/DOE Low Permeability Gas Reservoirs, May 19-22, Denver, Colorado, 1985.
- [4]. 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, May 29-30, 1974.
- [5]. Blanton T. L., "Propagation of hydraulically and dynamically induced fractures in naturally fractured reservoirs," SPE 15261, Presented at the SPE/DOE Unconventional Gas Technology Symposium, Louisville, May 18-21, 1986.

منجر به انحراف و تغییر مسیر در طول شکافت موجود می گردد. در رژیم تنش تکتونیک، شکافت هیدرولیکی تمایل بیشتری به برهم کنش با شکاف طبیعی حتی در تنش تفاضلی بالا دارد. چرا که در این حالت به دلیل تنش روباره کم نسبت به حالت تنش نرمال، میزان بازشدگی شکافت موجود بیشتر است.

۶- شکافت هیدرولیکی القایی تمایل به گسترش در امتداد شکافت موجود بر دیواره چاه دارد و هنگامی که امتداد شکافت طبیعی در امتداد حداکثر تنش افقی باشد، شکافت هیدرولیکی به راحتی در امتداد آن گسترش می یابد. اما در حالتی که امتداد شکافت طبیعی عمود بر حداکثر تنش افقی باشد، با رسیدن شکافت هیدرولیکی به نوک شکافت موجود، با توجه به شرایط تنش حاکم بر نمونه به تدریج تغییر مسیر داده و در جهت امتداد حداکثر تنش افقی گسترش می یابد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از مدیر دپارتمان مهندسی نفت دانشگاه نفت چین، به دلیل حمایت‌های همه جانبه کمال تقدیر و تشکر را دارند.

- [6]. Warpinski N. R. and Teufel L. W.; "Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation," *J. Petrol. Technol.*, pp. 209–220, 1987.
- [7]. Beugelsdijk L. J. L., De Pater C. J., and Sato K., "Experimental hydraulic fracture propagation in a multi-fractured medium," Paper SPE 59419 Presented at the SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modeling for Asset Management, Yokohama, Japan, April 25-26, 2000.
- [8]. Daneshy A. A.; "Off-balance growth: a new concept in hydraulic fracturing," *J. Petrol. Technol.*, pp. 78–85, 2003.
- [9]. Daneshy A. A., "Analysis of off-balance fracture extension and fall-off pressures," SPE 86471, Presented at the SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, pp. 18–20, 2004.
- [10]. Daneshy A. A., "Impact of off-balance fracturing on borehole stability and casing failure", SPE 93620, Presented at the SPE Western Regional Meeting, Irvine, CA. 2005.
- [11]. Zhou J., Chen M., Jin Y., and Zhang, G.-q.; "Experimental study of propagation mechanism of hydraulic fracture in naturally fractured reservoir," *Acta Petrolei Sinica*, Vol. 28, No. 5, pp. 109-113, 2007 (in Chinese).
- [12]. Zhou J., Chen M., Jin Y., Zhang, G.-q., "Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 45, pp. 1143-1152, 2008.
- [13]. Suarez-Rivera R., Burghardt J., Stanchits S., Edelman E., Surdi A., "Understanding the effect of rock fabric on fracture complexity for improving completion design and well performance," IPTC 17018, Presented at the International petroleum Technology Conference, Beijing, March 26–28, 2013.
- [14]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K., and Jin Y., "Experimental investigation of hydraulic fracture propagation in fractured blocks," *Bull. Eng. Geol. Environ.* 74:887-895, 2015a .
- [15]. Dehghan A. N., Goshtasbi K., Ahangari K., and Jin Y. (2015b) "The effect of natural fracture dip and strike on hydraulic fracture propagation," *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.*, 75, pp. 210–215.