

بررسی آزمایشگاهی گسترش شکست هیدرولیکی در محیط‌های چند لایه

محمود بهنیا^۱، کامران گشتاسبی^{۲*}، علی اکبر گلشنی^۳، محمد فاتحی^۴

۱- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن

۲- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش معدن

۳- دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

۴- دانشگاه یزد، دانشکده معدن و متالورژی

goshtasb@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۴/۱۸

چکیده- شکست هیدرولیکی، به عنوان روشی برای تحریک مخازن نفتی، به عوامل گوناگونی مانند ویژگی‌های محیطی که شکستگی در آن رشد می‌کند، بستگی دارد. ناپیوستگی‌های قرار گرفته در مسیر ترک و ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر روند پیشروی شکست هیدرولیکی و هندسه آن شناخته می‌شوند. در این پژوهش نحوه گسترش و چگونگی توقف شکست هیدرولیکی در محیط‌های چند لایه، با بررسی فرایند برخورد و اندرکنش شکست هیدرولیکی با فصل مشترک لایه‌ها، ارزیابی شده است. با انجام آزمایش شکست هیدرولیکی روی نمونه‌های مکعبی چند لایه، چگونگی گسترش آن در سلول سه محوره‌ی واقعی و در حضور ناپیوستگی‌ها، بررسی شد. همچنین روند رشد ترک از محیط نرم به سخت و از محیط سخت به نرم با تغییر پارامترهای مقاومتی محیط دربرگیرنده شکست هیدرولیکی، مطالعه شد. نتایج نشان داد که نوع ناپیوستگی، درزه باز، بسته و دارای پرشدگی، اثر چشم‌گیری بر روند رشد شکست هیدرولیکی دارد؛ و تغییر ویژگی‌های الاستیک لایه‌ها نیز می‌تواند بر چگونگی رشد ترک و هندسه آن اثر گذارد.

کلیدواژگان: شکست هیدرولیکی، محیط‌های چندلایه، گسترش شکستگی، بررسی آزمایشگاهی

۱- مقدمه

می‌شود. نیروی پیش‌برنده‌ای که سبب ایجاد شکستگی درون سنگ می‌شود، با پمپ کردن سیال تحت فشار به درون چاه، تأمین می‌شود. این سیال رانده‌شده به درون شکستگی، مسیری با نفوذپذیری بالا ایجاد می‌کند که جریان هیدروکربن تولید شده را از پی زون^۳ به درون چاه

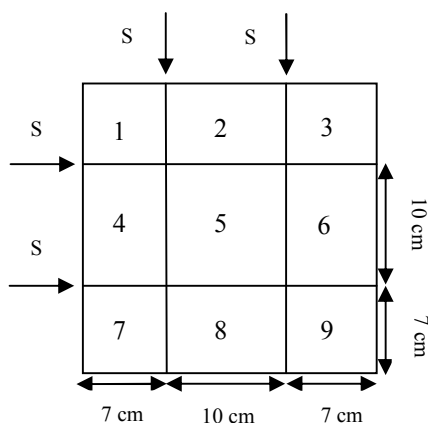
شکست هیدرولیکی^۱ یکی از روش‌های تحریک مخازن^۲ است که برای افزایش بازدهی مخازن استفاده می‌شود. این روش با تحریک چاه‌های تولیدی به وسیله‌ی گسترش یک شکستگی از درون چاه به طرف لایه‌های دارای نفت انجام

3- Pay- zone

1- Hydraulic Fracturing
2- Reservoir Stimulation

۲- ساخت نمونه

در این پژوهش، بلوک‌هایی به شکل مکعب مستطیل تهیه و با چیدمان مناسب آن‌ها، بلوک‌هایی بزرگ‌تر با وضعیت‌های گوناگون ساخته شد؛ سپس با تغییر وضعیت ناپیوستگی میان بلوک‌ها، شرایط مختلف بازشدگی، پرشدگی و بسته بودن ناپیوستگی، ایجاد و تأثیر هر یک از این شرایط بر روند رشد شکست هیدرولیکی بررسی شد. برای ساخت نمونه مناسب برای بررسی تأثیر ناپیوستگی‌ها بر روند شکست هیدرولیکی، ابتدا قالب‌هایی مستطیلی شکل با ابعاد $25 \times 7 \times 7$ ، $25 \times 10 \times 7$ و $25 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر ساخته شد؛ سپس در این قالب‌ها بلوک‌های بتنی با ویژگی‌های گوناگون ایجاد شد. ابتدا دو سری از بلوک‌های کوچک، هر کدام شامل ۹ بلوک با نسبت یکسان سیمان به ماسه و سپس دو سری با نسبت‌های ۲ و ۵/۰ ساخته شد (شکل ۱ و ۲). برای ساخت نمونه‌ها از ترکیب ماسه ریزدانه ($0/125$ میلی‌متر) و سیمان چین با شماره ۳۲۵ استفاده شد. سپس مخلوط ماسه و سیمان ساخته‌شده به صورت همگن با آب ترکیب شد که نسبت آب به سیمان در این ترکیب ۴۰ درصد بود. پس با تغییر نسبت سیمان به ماسه سعی شد ویژگی‌های مکانیکی بتن ساخته‌شده نیز تغییر پیدا کند. پارامترهای مکانیکی بلوک‌های ساخته‌شده در جدول ۱ آمده است.



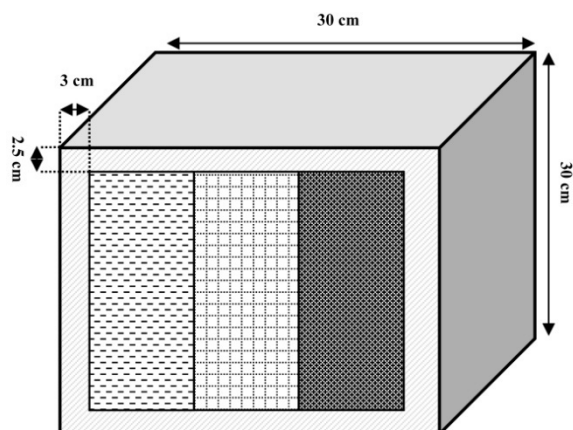
شکل (۱) چیدمان بلوک‌های کوچک برای تشکیل بلوک بزرگ‌تر

یک شکستگی منفرد را که به دو شاخه ترک موازی تبدیل شده بود و همچنین یک شکستگی منفرد را که بعد از برخورد به درزه، به سه شکستگی تبدیل شده بود، بررسی کردند. بوگلسدیک^۱، دی پاتر^۲ و ساتو^۳ [۷]، نشان دادند که در اختلاف بالای تنش‌های افقی، شکست هیدرولیکی تمایل دارد مسیر خود را بدون هیچ‌گونه اندرکنش با ناپیوستگی ادامه دهد. رفتار مشابهی در حالت نرخ جریان و ویسکوزیته بالا دیده شد. دانشی^۴ [۸، ۹، ۱۰]، نشان داد که شکستگی، مسیر با کمترین مقاومت را دنبال می‌کند و مسیر اصلی خود را ادامه نخواهد داد که سبب شاخه‌ای شدن شکستگی می‌شود. ژو^۴ و همکاران [۱۱]، نشان دادند که افزون بر اختلاف تنش‌های برجا و زاویه برخورد، ضریب اصطکاک نیز پارامتر مهم و اثرگذاری است. بازشدگی و شرایط پرشدگی ناپیوستگی نیز در روند گسترش شکست هیدرولیکی مؤثر است. مجموعه نتایج نشان می‌دهد که مهم‌ترین عوامل مؤثر بر روند رشد شکستگی هیدرولیکی، زاویه برخورد شکستگی به مرز لایه، وضعیت تنش‌های برجا و میزان مقاومت اصطکاکی لایه است.

با توجه به اهمیت ویژگی‌های مقاومتی ناپیوستگی‌ها در روند رشد شکست هیدرولیکی، در این پژوهش سعی شد ناپیوستگی‌ها با ویژگی‌های مختلف آزمایش شوند. بنابراین با تغییر پارامترهای مکانیکی ناپیوستگی، روند رشد و هندسه شکست هیدرولیکی با در نظر گرفتن لغزش برشی و نفوذ سیال به مرز لایه‌ها، بررسی شد. در این آزمایش‌ها با ایجاد بلوک‌های کوچک با مدول‌های الاستیک گوناگون و تغییر چیدمان آن‌ها در نمونه کلی، روند رشد ترک پس از عبور از این ناپیوستگی‌ها در بلوک‌های جانبی نیز بررسی شد.

- 1- Beugelsdijk
- 2- De Pater
- 3- Sato
- 4- Zhou

نمای کلی بلوک بزرگ شکل گرفته از چیدمان بلوک‌های کوچک‌تر در شکل ۴ دیده می‌شود. برپایه‌ی روشی که گفته شد، سه نمونه در شرایط گوناگون ساخته شد (جدول ۲). در نمونه ۱، بلوک میانی نسبت به بلوک‌های کناری خود مقاومتی متوسط دارد و با نسبت یکسان سیمان به ماسه ساخته شده است (شکل ۵). در این نمونه، مرز بین بلوک میانی و بلوک‌های پیرامون آن مقید^۲ شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ دیده می‌شود، ابتدا بلوک‌های کناری درون قالب چیده شده است و سپس بلوک میانی (بلوک ۵) به وسیله بتن آماده شده با نسبت مناسب، درون فضای بین بلوک‌های چیده شده و پیرامون گمانه فلزی ریخته شد. در این حالت بتن به خوبی به مرز بلوک‌های کناری چسبیده و یک مرز مقید را تشکیل داد.



شکل (۴) نمای کلی بلوک بزرگ شکل گرفته از چیدمان بلوک‌های کوچک‌تر

نمونه ۲ مانند نمونه ۱ است با این تفاوت که مرز بلوک میانی و بلوک‌های کناری، مقید نشده^۳ است و ابتدا بلوک میانی، آماده و سپس بقیه بلوک‌ها پیرامون آن قرار داده شده است. در نمونه ۳، مرز بلوک میانی و کناری پرشدگی ماسه‌ای دارد که نقش میان لایه در سازندها یا پرشدگی در درزه‌ها و گسل‌ها را ایفا می‌کند.



شکل (۲) بلوک‌های مکعب مستطیل ساخته شده با ویژگی‌های مکانیکی گوناگون

جدول (۱) پارامترهای مکانیکی نمونه‌های ساخته شده

نسبت ماسه به سیمان	مدول الاستیک (GPa)	نسبت پواسون	مقاومت تک محوری (MPa)
۰/۵	۹/۲	۰/۱۷	۴۸
۱	۶/۰	۰/۱۹	۲۳
۲	۲/۸	۰/۲۰	۱۲/۸

برای ساخت نمونه پایانی ابتدا لوله فلزی که دو سوراخ^۱ در دو راستای عمود بر هم داشت وسط قالب جاسازی شد؛ به گونه‌ای که گمانه تزریق در بلوک میانی قرار می‌گرفت و شکست هیدرولیکی از این بلوک به سمت بلوک‌های کناری با ویژگی‌های گوناگون مقاومتی حرکت می‌کرد (شکل ۳).



شکل (۳) چیدمان بلوک‌های کوچک‌تر در بلوک بزرگ‌تر و محل قرارگیری گمانه فلزی میان آن‌ها

2- Bonded
3- unbonded

1- Perforation

۳- آزمون‌های آزمایشگاهی

برای مدل‌سازی شرایط مخزن در آزمایشگاه، از یک دستگاه سلول سه محوره واقعی که می‌تواند تنش‌های گوناگون σ_1, σ_2 و σ_3 را به نمونه مکعبی وارد کند استفاده شد. بخش تزریق سیال به درون گمانه، کنترل آن و همچنین ثبت داده، به عهده یک دستگاه خودکار^۱ MTS 816 بود.

نمونه‌های مکعبی ساخته شده به ابعاد $30 \times 30 \times 30$ سانتی‌متر به وسیله شش جک تخت که روی سطوح جانبی آن‌ها قرار می‌گیرند، تحت بارگذاری قرار گرفت. این پیستون‌های فشار می‌توانند بیشینه تنش ۲۸ مگاپاسکال را وارد کنند. صفحات فشار به وسیله چهار صفحه مربعی تجهیز شده تا تنش به گونه‌ای یکنواخت پخش شود. همچنین برای کاهش تنش‌های برشی بر روی سطوح نمونه، از صفحات تفلون بین نمونه و صفحات بارگذاری، استفاده شد. بیشینه فشار سیال تزریق‌شونده در درون گمانه، ۱۴۰ مگاپاسکال است که به وسیله پمپ خودکار تأمین می‌شود. شکل ۷، نمای کلی ماشین آلاتی که برای این آزمون گردآوری شده است را نشان می‌دهد.

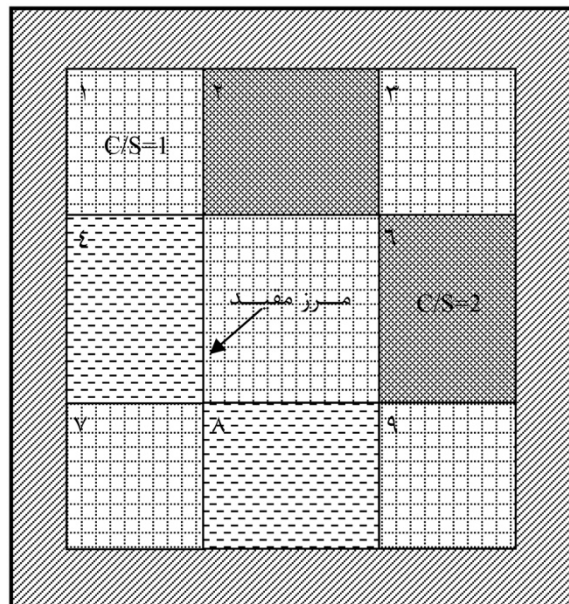
از سیالات با گرانی‌های^۲ گوناگون برای وارد کردن فشار به درون گمانه استفاده شد تا مقدار گرانی‌رو مناسب برای انتشار ترک در چنین محیط‌هایی به دست آید. با انجام چند آزمایش ابتدایی مشخص شد که باید گرانی‌رو سیال را نسبت به آنچه در محیط‌های همگن و بدون حضور ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته می‌شود، افزایش داد. بنابراین با افزایش نسبت پودر بتونیت به آب در مخلوط سیال، گرانی‌رو سیال تا رسیدن به مقدار مناسب افزایش یافت. عامل رنگی نیز برای بهبود ردیابی ترک به این سیال اضافه شد.

برای انتشار ترک در محیط‌های ناپیوسته، نرخ تزریق بالاتری نسبت به محیط‌های همگن و بدون درز و ترک

نمونه‌ها ساخته و پس از گیرش مناسب از قالب خارج شدند و ۲۸ روز برای رسیدن به مقاومت نهایی در دمای آزمایشگاه نگهداری شدند (شکل ۶).

جدول (۲) ویژگی‌های نمونه‌های ساخته‌شده از بلوک‌های کوچک‌تر

شماره نمونه آزمایش شده	شماره بلوک کوچک	نسبت سیمان به ماسه
۱، ۲	۹، ۷، ۵، ۳، ۱	۱
	۶، ۲	۲
	۸، ۴	۰/۵
۳	۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴، ۳، ۲، ۱	۱



شکل (۵) چگونگی قرارگیری بلوک‌های کوچک‌تر در نمونه ۱



شکل (۶) بلوک‌های بزرگ ساخته‌شده پس از خروج از قالب

1- Servo Controller Machine
2- Viscosity

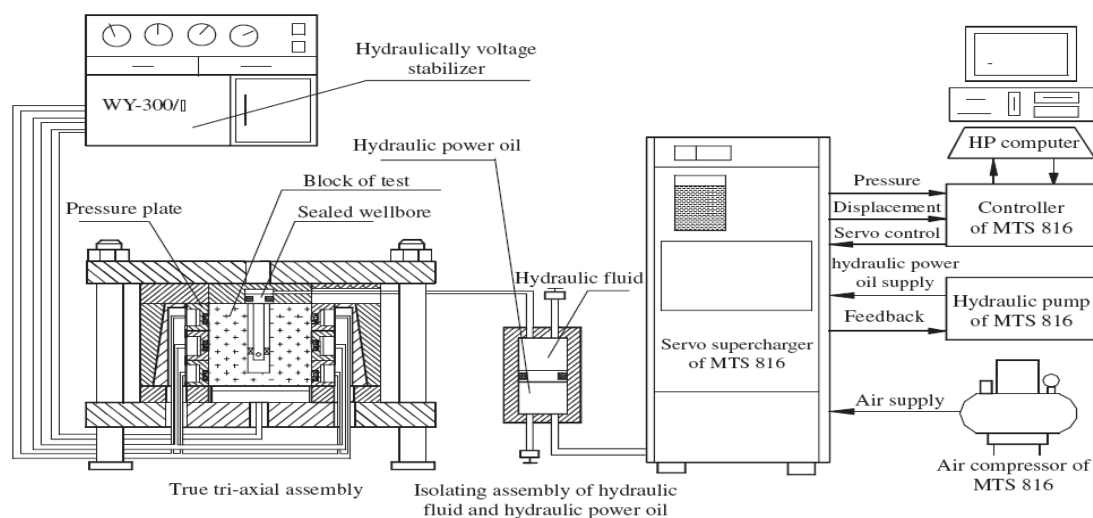
پژوهش‌های پیشین به گونه‌ای گسترده بررسی شده است. در این آزمایش‌ها اختلاف تنش‌های افقی در آزمون دوم نسبت به آزمون اول در یک نمونه، ۲ مگاپاسکال افزایش یافت تا مانع بازشدن شکستگی ایجاد شده در آزمون اول شود.

با توجه به گستردگی پژوهش‌های انجام شده درباره‌ی "تأثیر زاویه فصل مشترک نسبت به شکستگی، بر روند گسترش شکست هیدرولیکی"، زاویه برخورد در این بررسی، قائم است و بیشتر، تأثیر ویژگی‌های مقاومتی فصل مشترک بررسی شده است.

پس از انجام آزمایش، نمونه‌ها از سلول بیرون آورده و با دقت بررسی شد. سپس با مقایسه میزان سیال تراوش شده و روند انتشار ترک یا توقف آن در بلوک‌های کناری، نتایج بررسی شد.

لازم است. در آزمایش‌های انجام شده، با دو برابر کردن نرخ تزریق، احتمال رشد شکستگی در محیط‌های ناپیوسته، افزایش یافت.

دو آزمایش روی هر نمونه انجام شد که با تغییر راستای تنش‌های افقی وارد شده، مسیر گسترش شکست هیدرولیکی تغییر کرد. برای تشخیص بهتر این دو آزمایش روی یک بلوک، از دو رنگ‌دانه استفاده شد: رنگ سبز فسفری برای آزمایش اول و رنگ قرمز برای آزمایش دوم. آزمایش‌ها در رژیم تنش نرمال انجام شد که در آن، شکستگی به صورت قائم و محوری از پیرامون گمانه شروع می‌شود و با انتشار، به فصل مشترک لایه‌ها برخورد می‌کند. تأثیر اختلاف تنش‌های افقی بر روند رشد شکستگی در



شکل (۷) طرح کلی دستگاه سه محوری واقعی برای انجام آزمون شکست هیدرولیکی

جدول (۳) شرایط آزمایش برای نمونه‌هایی که آزمایش شد.

شماره نمونه	وضعیت ناپیوستگی	شرایط آزمایش اول		شرایط آزمایش دوم		نرخ تزریق
		تنش‌های وارد شده	سیال تزریق شده	تنش‌های اعمال شده	سیال تزریق شده	
۱	مقید شده (bonded)	$\sigma_v = 15 \text{ MPa}$	۵ گرم بتنیت +	$\sigma_v = 15 \text{ MPa}$	۷/۵ گرم بتنیت	۰/۳۳ ml/s
۲	مقید نشده (unbonded)	$\sigma_H = 8 \text{ MPa}$	۵۰۰ میلی‌لیتر آب	$\sigma_H = 10 \text{ MPa}$	۵۰۰ میلی‌لیتر آب	
۳	دارای پرشدگی (with filling)	$\sigma_h = 4 \text{ MPa}$		$\sigma_H = 4 \text{ MPa}$		

۴-۱- نمونه شماره ۱

در نمونه ۱، نتایج نشان داد که ترک پس از انتشار در بلوک میانی (شکل ۸)، به فصل مشترک برخورد کرده و به خاطر جلوگیری از انتشار آن، فشار افزایش می‌یابد. افزایش فشار تا اندازه‌ای ادامه یافت که شکستگی در دو بلوک کناری رشد کند و یا با باز کردن و نفوذ در فصل مشترک، مسیری برای کاهش فشار پیدا کند. به خاطر مقید بودن مرز میان بلوک میانی و بلوک‌های کناری، میزان سیال تراوش کرده به فصل مشترک، کم بود و بنابراین ترک توانست پس از عبور از مرز دو بلوک در بلوک‌های کناری به رشد خود ادامه دهد.



شکل (۸) امتداد شکستگی منتشرشده در بلوک مجاور و چگونگی تراوش سیال به درون فصل مشترک لایه‌ها در نمونه ۱

میزان انتشار و حجم ترک رشد کرده در بلوک‌های کناری کاملاً به میزان پارامترهای مقاومتی آن‌ها وابسته است. در

پس از انجام آزمایش روی دو نمونه مشابه ترکیب نمونه‌های یک و دو، مشخص شد که حجم سیال عبورکننده از سوراخ درون لوله فلزی برای گسترش شکست هیدرولیکی در محیط‌های دارای ناپیوستگی مناسب نیست، بنابراین روش سوراخ باز به جای روش سوراخ کاری انتخاب شد و با حفاری پیرامون لوله‌های فلزی و خروج آن‌ها یک حفره به قطر ۲ و عمق ۱۶ سانتی‌متر درون نمونه‌ها ایجاد شد. سپس یک لوله فلزی با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۱۴ سانتی‌متر درون این حفره قرار داده شد. پیرامون لوله فلزی آجدار به وسیله‌ی اپوکسی با بتن پیرامون درگیر شد و محل ورودی و قسمت بیشتر لوله نیز ایزوله شد. دو سانتی‌متر انتهایی طول حفر شده به صورت سوراخ باز برای ایجاد ترک از درون آن، آزاد گذاشته شد. پس از ایجاد تغییرات لازم، آزمایش‌ها روی سه نمونه انجام شد. در جدول ۳ شرایط و چگونگی انجام آزمایش برای هر نمونه گفته شده است.

۴-۲ نتایج آزمایش‌ها و ارزیابی آن‌ها

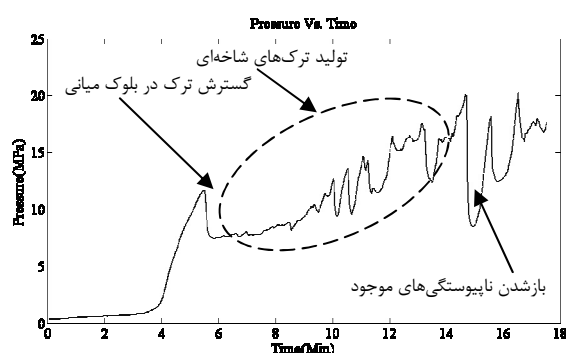
پس از تزریق سیال به درون گمانه و با افزایش فشار، شکستگی در امتداد تنش افقی پیشینه و عمود بر راستای تنش افقی کمینه، منتشر و با فصل مشترک لایه‌ها برخورد کرد. روند رشد و هندسه شکستگی هیدرولیکی، تحت تأثیر شرایط فصل مشترک لایه‌ها، همانند شرایط کاملاً بسته، دارای پرشدگی و بدون پرشدگی و همچنین تغییر جنس لایه‌ها و قرارگیری لایه‌های سخت^۱ و نرم^۲ کنار هم و چگونگی توالی آن‌ها بررسی شد. پارامترهای به دست آمده از آزمایش‌ها برای ارزیابی آن‌ها، فشار سیال، چگونگی تراوش سیال به درون فصل مشترک لایه‌ها و هندسه شکستگی بود.

1- Stiff
2- Soft

۴-۲- نمونه شماره ۲

در نمونه ۲، دو بلوک با نسبت سیمان به ماسه ۲ و ۰/۵ در دو طرف بلوک میانی قرار داده شد. روی این نمونه دو آزمایش انجام شد که در آزمایش دوم، میزان گرانیروی و اختلاف تنش‌های افقی، افزایش داده شد.

مرز بین بلوک کوچک میانی و بلوک‌های مجاور در این نمونه، مقید نشده بود؛ بنابراین، میزان چسبندگی در این مرزها، کمتر و احتمال لغزش بر ناپیوستگی‌ها بیشتر بود. نتایج نشان داد که در آزمایش نخست پس از انتشار ترک و برخورد آن به فصل مشترک‌ها، به خاطر تراوش سیال درون فصل مشترک، فشار افزایش نیافت و پس از پر کردن فضای ناپیوستگی و افزایش فشار، ترک توانست در بلوک‌های روبه‌رو نفوذ کند (شکل ۱۱). نتایج همچنین نشان می‌دهند که ترک از مسیر خود منحرف شده و سپس در بلوک‌های جانبی گسترش پیدا کرده است (شکل ۱۲).



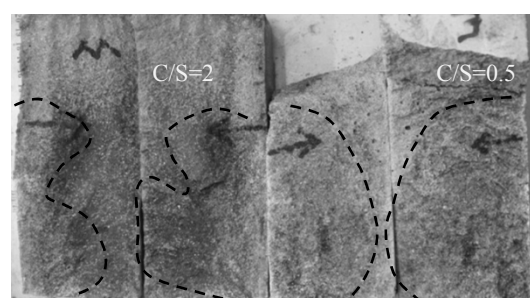
شکل (۱۱) نمودار فشار- زمان در نمونه ۲ برای آزمایش نخست

در نمونه با مقاومت پایین، به خاطر بالاتر بودن نسبت ماسه به سیمان، تخلخل نمونه بیشتر بود. این حفره‌ها، در آن سوی فصل مشترک، نقش ریزترک‌ها و نقاط ضعف را داشته و نقطه شروع شکستگی در بلوک‌های مجاور می‌باشند. بنابراین به خاطر بیشتر بودن این حفره‌ها در بلوک با مقاومت کمتر، شکستگی نزدیک‌تر به امتداد نخست خود و همچنین زودتر در این بلوک گسترش یافت. در آزمایش

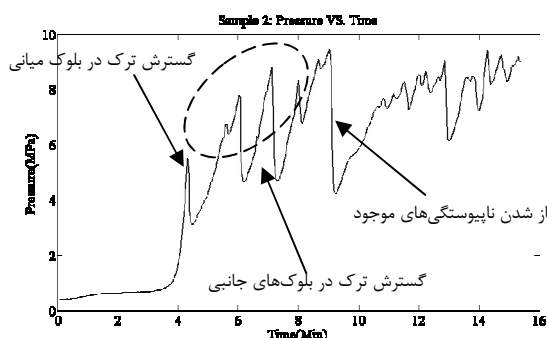
بلوک با مقاومت پایین‌تر (۰/۵ = ماسه/سیمان) میزان نفوذ شکستگی بیشتر بود و ترک توانست در طول بیشتری منتشر شود؛ در حالی که شکستگی در بلوک با مقاومت بالاتر (۲ = ماسه/سیمان)، کمتر انتشار یافت (شکل ۹).

پس از انتشار ترک در بلوک میانی و برخورد آن به فصل مشترک لایه‌ها، فشار افزایش می‌یابد که این افزایش فشار در مرحله نخست بر مقاومت کششی و تنش کمینه در بلوک کناری با مقاومت پایین‌تر غلبه می‌کند و سپس در بلوک با مقاومت بیشتر سبب گسترش شکست هیدرولیکی می‌شود که با توجه به اختلاف دو نقطه بیشینه دوم و سوم روی نمودار فشار-زمان دیده می‌شود.

همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، پس از نفوذ سیال در مرز بلوک مجاور و بلوک میانی، این سیال می‌تواند به درزه‌های عمود بر تنش افقی کمینه نیز نفوذ کرده و آن‌ها را باز کند و بیشینه کاهش فشار را ایجاد کند.

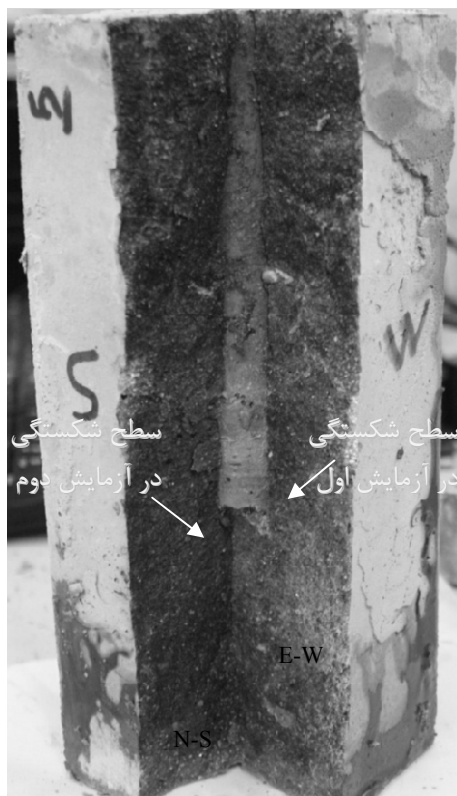


شکل (۹) سطوح شکستگی در بلوک‌های جانبی با پارامتر مقاومتی گوناگون در نمونه ۱



شکل (۱۰) نمودار فشار-زمان در نمونه ۱

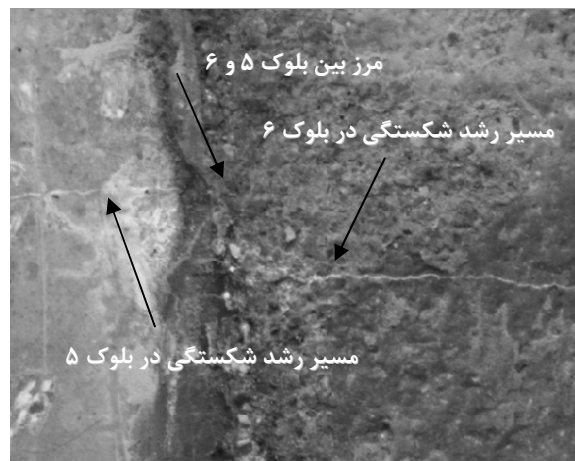
در سمت دیگر صفحه شکستگی افت کرده و امکان رشد شکستگی در بلوک ۲ به خاطر مقاومت بالاتر آن، کمتر بوده است. میزان بازشدگی شکستگی در بلوک‌های کناری با مقاومت‌های گوناگون نیز متفاوت است و با کاهش مقاومت و مدول الاستیک نمونه، این مقدار افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل ۱۵ دیده می‌شود نوع بازشدگی و چگونگی سطح آن، نشان می‌دهد که بازشدگی در بلوک ۸ (بلوک جنوبی) از بلوک ۲ (بلوک شمالی) بیشتر است.



شکل (۱۳) سطح دو ترک ایجاد شده در راستای شرق، غرب و در راستای شمال و جنوب

در این آزمایش‌ها، افت شدید فشار، ناشی از باز شدن درزه‌های عمود بر تنش اصلی کمینه است که می‌توانند حجم زیادی از سیال را با توجه به تنش عمود بر آن‌ها در خود جای دهند.

دوم، گرانیروی سیال افزایش یافت و میزان اختلاف تنش‌های افقی نیز به ۶ مگاپاسکال افزایش داده شد. در این آزمایش، ترک در بلوک میانی به صورت قائم رشد کرد (شکل ۱۳) و پس از رسیدن به فصل مشترک، بدون انحراف از آن عبور کرد. افزایش اختلاف تنش‌های افقی و همچنین بالاتر رفتن تنش عمود بر سطح فصل مشترک نسبت به آزمایش پیشین و افزایش گرانیروی سیال تزریقی، از عوامل مؤثر بر روند رشد در این آزمایش بود که مانع لغزش بلوک در راستای فصل مشترک گردید.



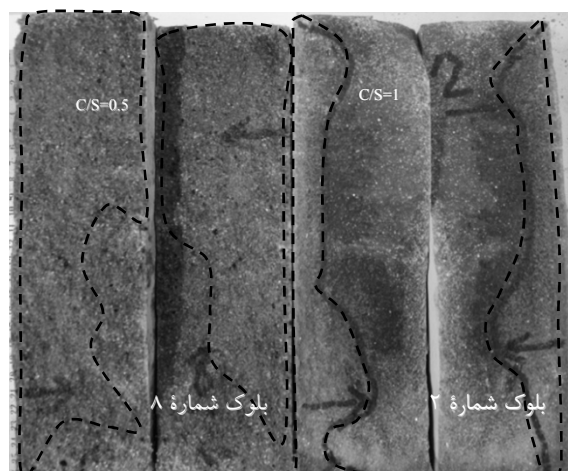
شکل (۱۲) منحرف شدن ترک پس از برخورد به فصل مشترک سمت راست

مقایسه سطوح شکستگی در دو بلوک ۲ و ۸ (شکل ۱۴) نشان داد که میزان تراوش و سطح ترک در دو بلوک متفاوت بوده است؛ به گونه‌ای که در بلوک ۸، سطح شکستگی کاملاً با سیال تزریقی پوشیده شده است، اما در بلوک ۲، شکستگی در نزدیکی محل تزریق، بیشترین پیشروی را داشته است و با رسیدن به لبه‌های بالایی و پایینی بلوک، این مقدار کمتر می‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که به خاطر مقاومت بالای بلوک ۲ نسبت به بلوک ۸، انرژی بیشتری برای نفوذ ترک و گسترش آن در این بلوک لازم است. همچنین به خاطر گسترش ترک در بلوک ۸ و تراوش سیال به درون آن، فشار سیال تزریقی

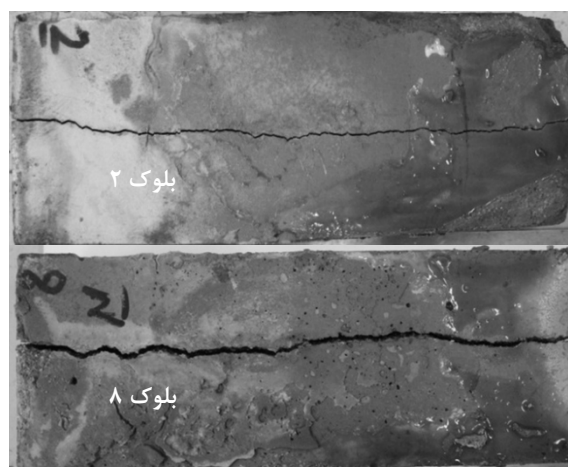
افزایش گرانشی، تراوش و نفوذ در پرتشدگی ماسه‌ای نسبت به آزمایش اول کمتر بود و بنابراین چند کاهش شدید در نمودار فشار - زمان مشاهده شد. این کاهش به خاطر باز شدن ناگهانی درزه‌ها در اثر افزایش فشار است؛ در حالی که در آزمایش نخست، سیال آسان‌تر می‌توانست در مرز لایه‌ها نفوذ کند. پس از پایان آزمایش و بررسی نمونه، دیده شد که پس از برخورد سطح شکستگی به فصل مشترک پرتشدگی با ماسه، سیال تزریق شده، درون فصل مشترک نفوذ کرده و در سطح آن پراکنده شده است و در نتیجه روند رشد ترک در هر دو آزمایش و برای هر دو بلوک با مقاومت‌های گوناگون، متوقف شده است. این توقف، به خاطر ایجاد نشدن تمرکز تنش مورد نیاز برای رشد ترک در نقطه‌ای از فصل مشترک، به خاطر نفوذ سیال درون درزه‌های مجاور بوده است. همچنین پرتشدگی ماسه‌ای مانند کانالی برای انتقال سیال به بالا و پایین نمونه عمل کرده و سبب جمع شدن حجم زیادی از سیال، بالا و پایین نمونه در مجاورت لایه ۲/۵ سانتی‌متری شده است.



شکل (۱۶) نمای کلی نمونه ۳ و تراوش سیال به بالای نمونه پس از برخورد شکستگی هیدرولیکی به فصل مشترک ماسه‌ای



شکل (۱۴) اختلاف نفوذ شکستگی در بلوک‌های مجاور (۸ و ۲) با مقاومت‌های گوناگون در نمونه ۲



شکل (۱۵) میزان بازشدگی در بلوک‌های ۲ و ۸ در نمونه ۲

۳-۴- نمونه شماره ۳

برای بررسی تأثیر پرتشدگی بر روند رشد شکستگی در محیط‌های لایه‌ای، در نمونه ۳، فصل مشترک بلوک میانی و بلوک‌های مجاور با ماسه و دوغاب سیمان با ضخامت ۱ سانتی‌متر پرتشدگی شد (شکل ۱۶). شرایط در دو آزمایش اول و دوم در این نمونه مانند نمونه ۲ است. نتایج نشان می‌دهد که با گذشت زمان و تزریق بیشتر سیال به درون نمونه، فشار کلی درون نمونه به خاطر پرتشدگی درزه‌ها از سیال تزریقی افزایش می‌یابد (شکل ۱۷). در آزمایش دوم به خاطر

درون آن نفوذ می‌کند و بعد از اشباع شدن فصل مشترک بسته به نفوذپذیری آن، فشار افزایش می‌یابد. با اشباع کردن نمونه و بالا بردن فشار منفذی، فشار شکست می‌تواند به مقدار مورد نیاز برای گذشتن از پرشدگی ماسه‌ای برسد.

جدول (۴) نتایج آزمایش‌های انجام شده روی سه نمونه

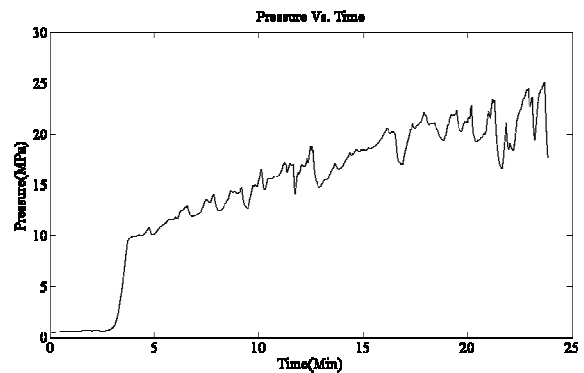
شماره نمونه	شرایط ناپیوستگی	بیشینه فشار هنگام آزمایش (MPa)	وضعیت گسترش شکستگی
۱	مقید شده	۹/۴	رد شدن
۲	آزاد	۲۰/۳	رد شدن همراه انحراف
		۳۴/۲	رد شدن
۳	دارای	۲۵	ایستادن
	پرشدگی	۲۰	ایستادن

مقایسه سطح شکستگی در بلوک‌های جانبی با مقاومت‌های متفاوت نشان می‌دهد که شکست هیدرولیکی در بلوک‌های با مقاومت کمتر، بیشتر نفوذ کرده و تراوش سیال به درون حفرات و منافذ این بلوک‌ها نیز بیشتر است.

در مجموع، افزایش تراوش سیال، ایست رشد شکستگی، انحراف شکستگی و فشار بالای تزریق، از مواردی است که هنگام برخورد شکست هیدرولیکی با ناپیوستگی‌ها رخ می‌دهد. برپایه‌ی وضعیت ناپیوستگی که می‌تواند مقید، آزاد و یا دارای پرشدگی باشد، شکست هیدرولیکی نیز می‌تواند بایستد یا منحرف شود و یا بدون تغییر از ناپیوستگی عبور کند.

۶- نتیجه‌گیری

- توسعه شکست هیدرولیکی در محیط‌های لایه‌ای با مشکلاتی مانند انحراف شکستگی و جلوگیری از پیشروی پروپانت در آن روبروست که می‌تواند ناشی از لغزش در امتداد درزه‌ها به خاطر مقاومت اصطکاکی پایین آن‌ها باشد.



شکل (۱۷) نمودار فشار - زمان برای آزمایش اول در نمونه ۳

۵- بحث و بررسی

نتایج نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک، بازشدگی و شرایط پرشدگی ناپیوستگی، افزون بر اختلاف تنش‌های برجا و زاویه برخورد، بر روند گسترش شکست هیدرولیکی مؤثر است. در ناپیوستگی‌های با بازشدگی کم، شکستگی در بیشتر موارد عبور می‌کند و با افزایش بازشدگی، اتساع گزینه غالب است.

نتایج نشان می‌دهد که با کاهش زاویه اصطکاک و پارامترهای مقاومتی، به خاطر لغزش فصل مشترک و تغییر توزیع تنش‌ها پیرامون ناپیوستگی، فشار سیال تزریقی مورد نیاز برای نفوذ شکستگی در بلوک مجاور افزایش می‌یابد. همچنین به خاطر لغزش فصل مشترک بلوک میانی و بلوک‌های جانبی، مسیر انتشار شکستگی منحرف می‌شود. این نتیجه با مقایسه نمونه ۱ و ۲ به دست می‌آید (جدول ۴).

تغییرات شدید فشار تزریقی هنگام انجام آزمایش نشان دهنده فرایندی مرکب از رشد ترک و باز شدن درزه‌ها در راستاهای گوناگون (عمود بر هم) است.

نتایج آزمایش روی نمونه ۳ نشان داد که شکستگی توانسته از میان بلوک بتنی میانی عبور کند اما در مرز ماسه و سنگ به خاطر تراوش بیش از حد، ایستاده است. هنگام رسیدن شکستگی به فصل مشترک دارای پرشدگی، سیال به

گذاشتن تجهیزات آزمایشگاه مکانیک سنگ این دانشگاه و از کارکنان آزمایشگاه برای کمک در انجام آزمایش‌ها قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

- [1] Daneshy AA. Hydraulic Fracture Propagation in the Presence of Plane of Weakness, (1974). [SPE 4852].
- [2] Blanton TL. An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures. SPE 10847, presented at the SPE/DOE unconventional gas recovery symposium, Pittsburgh, 16–18 May 1982
- [3] Blair SC, Thorpe RK, Heuze FE, Shaffer RJ. Laboratory observations of the effect of geological discontinuities on hydrofracture propagation. In: Proceedings of the 30th US Symposium on Rock Mechanics, Morgantown, 1989. p. 433–50.
- [4] Warpinski NR, Teufel LW. Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation. J Petrol Technol 1987;February: 209–20.
- [5] Warpinski NR, Teufel LW. hydraulic fracturing in tight, fissured media, J Petrol Technol ; 208–209 February 1991
- [6] Lambert SW, Saulsberry JL, Steidl PF, Conway MW, Spafford SD. Fracturing experience at the rock creek multiple coal seams project. Topical report, Gas Research Institute, Chicago, 1995.
- [7] Beugelsdijk LJL, de Pater CJ, Sato K. Experimental hydraulic fracture propagation in multi-fractured medium. SPE 59419, presented at the SPE Asia Pacific conference on integrated modeling, Yokohoma, 25–26 April 2000.
- [8] Daneshy AA. Off-balance growth: a new concept in hydraulic fracturing. J Petrol Technol, 78–85. April 2003
- [9] Daneshy AA. 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, 18–20, February 2004.

- لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها سبب انحراف مسیر شکستگی هیدرولیکی یا توقف آن می‌شود؛ در حالی که در ناپیوستگی‌های مقیدشده، شکستگی از فصل مشترک عبور می‌کند.

- نوع پرشدگی و میزان مقاومت آن بر انتشار ترک و عبور آن از فصل مشترک، تأثیر مستقیم دارد؛ به گونه‌ای که مواد پرکننده با میزان تراوش بالا و مقاومت پایین می‌توانند رشد ترک را متوقف کنند.

- میزان بازشدگی و تراوش سیال در لایه‌های با مقاومت کمتر، بیشتر است. با توجه به حضور این لایه‌ها و رشد اولیه شکستگی در آن‌ها، احتمال تراوش سیال به درون این لایه‌ها و کاهش فشار و در نتیجه جلوگیری از رشد ترک در لایه‌های جانبی با مقاومت بالاتر وجود دارد.

- نوع سیال و گرانیوی آن، نقشی تعیین کننده در روند رشد شکستگی هیدرولیکی در محیط‌های لایه‌ای دارد. به گونه‌ای که در مقایسه آزمایش‌های اول و دوم در نمونه‌های دو و سه، به خاطر اختلاف گرانیوی، نمودار فشار تزریقی و چگونگی تراوش سیال به درون درزه‌های متفاوت است.

- نرخ تزریق سیال به درون نمونه از دیگر عوامل مؤثر بر روند رشد شکستگی هیدرولیکی است. در این آزمایش‌ها با افزایش نرخ تزریق از ۰/۱۶۵ به ۰/۳۳ میلی لیتر بر ثانیه، امکان رشد ترک و عبور آن از فصل مشترک، افزایش یافت.

- لغزش در امتداد فصل مشترک، اختلاف ویژگی‌های مکانیکی لایه‌های کنار هم، تراوش و نفوذ سیال به خاطر وجود پرشدگی و در نتیجه کند شدن نوک ترک، از جمله عوامل مؤثر بر چگونگی انتشار شکستگی در محیط‌های لایه‌ای است که هر کدام از آن‌ها به تنهایی و همچنین ترکیب آن‌ها می‌تواند بر روند رشد اثرگذارد.

۷- سپاسگذاری

از پروفسور ژانگ استاد دانشگاه نفت پکن برای در اختیار

- [11] Zhou J. et al. Analysis of fracture propagation behavior and fracture geometry using a tri-axial fracturing system in naturally fractured reservoirs; International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 45 (2008) 1143-1152
- [10] Daneshy AA. Impact of off-balance fracturing on borehole stability and casing failure. SPE 93620, presented at the SPE western regional meeting, Irvine, CA, 30 March-1 April 2005.