

الله أكبر



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

مطالعه عددی گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن درزه دار طبیعی

محمد رضا پیر هوشیاران

استاد راهنما:

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور:

دکتر نادیا شفیع زاده

تیر ۹۹

شماره: ۳۶۹۹۴۸۳
تاریخ: ۹۹-۴-۲۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

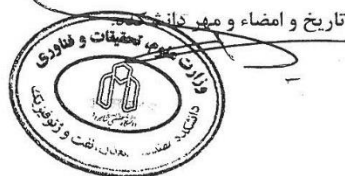
فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **محمدرضا پیر هوشیاران** با شماره دانشجویی **۹۴۰۴۴۰۴** رشته **مهندسی معدن** گرایش **مکانیک سنگ** تحت عنوان **مطالعه عددی گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن درزه دار طبیعی** که در تاریخ **۱۳۹۹/۴/۳۰** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	دکتر نادیا شفیع زاده		
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر مرتضی جوادی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:



این پایان نامه را به گوهران درخشان زندگی ام،

پدرو مادر فرهیخته ام تقدیم می کنم.

تشکر و قدردانی

سپاس ایزد یکتا را که به شناخت او زندگانیم، به نصرت او شادانیم، به کرامت او نازانیم و به عزت او عزیزانیم.

خدای تعالی را شاکرم که مقدر فرمود زیر سایه هدایت‌های بی‌دریغ و ارز شمند استاد فاضل و فرزانه‌ام، جناب آقای دکتر مجید نیکخواه، قدم در طریق والای علم بگذارم. حال که این اثر به سرانجام رسیده است، بر خود فرض می‌دانم که کوشش‌هایشان را ارج نهاده و مراتب سپاسگزاری از ایشان را به جای آورم. امید است که پاسخگوی اندکی از بزرگواری‌هایشان باشد.

تعهدنامه

اینجانب **محمدرضا پیرھوشیاران** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود، نویسنده پایان‌نامه **مطالعه عددی گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار طبیعی** تحت راهنمایی آقای دکتر مجید نیکخواه متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققین دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در این پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج شده از رساله رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در این رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

عملیات شکست هیدرولیکی، دهه‌هاست که به عنوان یک روش کارآمد و سودمند به منظور استخراج منابع هیدروکربن از ذخایر نامتعارف مورد توجه قرار گرفته و استفاده می‌شود. اما این مخازن معمولاً ناهمگن بوده و شامل انواع ناپیوستگی‌های مختلف هستند که به طرز قابل توجهی انتشار شکست هیدرولیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین، درک صحیح از چگونگی اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی در طراحی عملیات شکست هیدرولیکی امری حیاتی است. با این حال، علی‌رغم تلاش‌ها و پژوهش‌های گسترده‌ای که در این زمینه صورت گرفته، همچنان تحقیق برای پاسخ به سوالاتی در رابطه با چگونگی گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار طبیعی در حال انجام است.

در این پژوهش، رفتار شکست هیدرولیکی پس از مواجهه با درزه‌های طبیعی، با بهره‌گیری از کوپلینگ هیدرومکانیکی در مدل پیوند ذرات (BPM) و روش درزه‌صاف (SJM) بررسی شد. تحلیل حساسیت نسبت به زاویه میل درزه، مقاومت درزه‌های طبیعی و نسبت تنش‌های برجا نشان داد که این پارامترها چگونه بر انتشار شکست هیدرولیکی در یک مخزن دارای دو درزه طبیعی موازی تاثیر می‌گذارند. نتایج شبیه‌سازی گویای آن است که اگرچه شکل منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه در زوایای میل مختلف درزه تقریباً مشابه است، اما الگوی شکست و توزیع فشار منفذی متفاوت بوده و با افزایش زاویه بین درزه طبیعی و راستای گسترش شکست هیدرولیکی، احتمال عبور شکست هیدرولیکی از درزه طبیعی افزایش می‌یابد. وجود یک درزه طبیعی با ضریب اصطکاک و چسبندگی صفر، موجب حبس شدن شکست هیدرولیکی و اتساع درزه طبیعی می‌شود و هرچه مقاومت برشی درزه بیشتر شود، احتمال عبور افزایش و اتساع درزه کاهش می‌یابد. مقدار تنش اصلی حداقل، تا حد زیادی بر فشار و زمان ایجاد شکست هیدرولیکی تاثیر می‌گذارد. نسبت‌های مختلف تنش‌های برجا نیز موجب تغییر رفتار شکست هیدرولیکی

پس از برخورد به درزه‌های طبیعی می شوند. نتایج حاصل از این پژوهش، مطابقت خوبی با روابط تحلیلی کلاسیک شکست هیدرولیکی نشان می‌دهند.

کلمات کلیدی شکست هیدرولیکی، مدلسازی عددی، مدل پیوند ذرات، مخازن درزه‌دار، روش المان مجزا

فهرست مطالب

ز	چکیده
۱	فصل اول / مقدمه
۲	۱-۱ پیش گفتار
۲	۲-۱ اهداف پژوهش
۴	۳-۱ ضرورت پژوهش
۵	۴-۱ روش پژوهش
۵	۵-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل دوم / شکست هیدرولیکی
۸	۱-۲ پیش گفتار
۸	۲-۲ شکست هیدرولیکی
۱۱	۱-۲-۲ تاریخچه شکست هیدرولیکی
۱۲	۲-۲-۲ اهمیت شکست هیدرولیکی
۱۳	۳-۲-۲ مکانیزم ایجاد شکست هیدرولیکی
۱۷	۳-۲ مطالعه هندسه و انتشار شکست هیدرولیکی
۱۸	۱-۳-۲ روش های تحلیلی و ریاضی
۱۸	۱-۳-۲-۱ مدل شکست پنی شکل
۱۹	۲-۳-۲-۱ مدل PKN
۱۹	۳-۳-۲-۱ مدل KGD
۲۱	۴-۳-۲-۱ مدل های شبه سه بعدی
۲۱	۵-۳-۲-۱ مدل های سه بعدی کامل
۲۲	۲-۳-۲ پژوهش های آزمایشگاهی
۲۵	۳-۳-۲ مدلسازی عددی
۲۵	۱-۳-۳-۲ روش المان محدود

- ۲۵..... ۲-۳-۳-۲ روش المان محدود توسعه یافته
- ۲۶..... ۳-۳-۳-۲ روش المان مرزی
- ۲۶..... ۴-۳-۳-۲ روش جابجایی-ناپیوستگی
- ۲۷..... ۵-۳-۳-۲ روش المان مجزا

۴-۲- شکست هیدرولیکی در مخازن درزه دار طبیعی..... ۲۹

- ۳۰..... ۱-۴-۲ روش های تحلیلی و ریاضی
- ۳۲..... ۲-۴-۲ پژوهش های آزمایشگاهی
- ۳۳..... ۳-۴-۲ مدلسازی عددی
- ۳۳..... ۱-۳-۴-۲ روش المان محدود
- ۳۴..... ۲-۳-۴-۲ روش المان محدود توسعه یافته
- ۳۵..... ۳-۳-۴-۲ روش المان مرزی
- ۳۵..... ۴-۳-۴-۲ روش جابجایی-ناپیوستگی
- ۳۵..... ۵-۳-۴-۲ روش المان مجزا
- ۳۹..... ۶-۳-۴-۲ الگوریتم دکسترا
- ۴۰..... ۷-۳-۴-۲ روش های هیبریدی

۵-۲- جمع بندی ۴۰

فصل سوم/ تیوری روش عددی..... ۴۳

۱-۳ پیش گفتار ۴۴

۲-۳ نرم افزار PFC^{2D}..... ۴۵

- ۴۶..... ۱-۲-۳ قانون نیرو-جابجایی
- ۴۷..... ۲-۲-۳ قانون حرکت
- ۴۸..... ۳-۲-۳ مدل های تماسی
- ۴۸..... ۱-۳-۲-۳ پیوندهای موازی
- ۴۹..... ۲-۳-۲-۳ مدل درزه صاف
- ۵۳..... ۴-۲-۳ ساخت مدل
- ۵۳..... ۵-۲-۳ کالیبراسیون
- ۵۴..... ۶-۲-۳ اعمال تنش های برجا

۳-۳ مدلسازی دو بعدی جریان سیال و فرمول بندی آن..... ۵۵

۴-۳ کوپلینگ هیدرومکانیکی.....	۵۸
۱-۴-۳ محاسبه گام زمانی.....	۵۹
۲-۴-۳ تعیین تخلخل و حجم دامنه.....	۶۰
۳-۴-۳ محاسبه نفوذپذیری.....	۶۱
۵-۳ پایش ترک در PFC^{2D}	۶۳
۶-۳ جمع بندی.....	۶۴
فصل چهارم / مدل سازی عددی.....	
۱-۴ پایش گفتار.....	۶۸
۲-۴ کالیبراسیون.....	۶۸
۱-۲-۴ شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری تک محوره.....	۶۹
۲-۲-۴ شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری دو محوره.....	۷۰
۳-۲-۴ شبیه سازی آزمون برزلی.....	۷۱
۳-۴ ساخت مدل.....	۷۲
۱-۳-۴ تولید ذرات.....	۷۳
۲-۳-۴ تعادل اولیه.....	۷۴
۳-۳-۴ پیوندهای موازی در نقاط تماس.....	۷۶
۴-۳-۴ تعریف درزه های طبیعی در مدل.....	۷۶
۵-۳-۴ اعمال تنش های برجا.....	۷۷
۴-۴ مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن درزه دار طبیعی.....	۷۸
۱-۴-۴ تاثیر زاویه میل بر رفتار شکست هیدرولیکی.....	۸۱
۲-۴-۴ تاثیر مقاومت درزه ها بر اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه های طبیعی.....	۸۷
۳-۴-۴ تاثیر نسبت تنش های برجا.....	۹۰
۵-۴ اعتبارسنجی.....	۹۷
۶-۴ جمع بندی.....	۹۸
فصل پنجم / نتیجه گیری و پیشنهادها.....	
	۱۰۱

۱-۵ نتایج..... ۱۰۲

۲-۵ پیشنهادها..... ۱۰۳

مراجع..... ۱۰۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ میزان برداشت نفت خام در ایالات متحده طی قرن اخیر..... ۹
- شکل ۲-۲ نمودار میزان تولید گاز طبیعی در کشورهای مختلف..... ۱۲
- شکل ۳-۲ افت قیمت گاز طبیعی با افزایش برداشت گاز از شیل با استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی..... ۱۳
- شکل ۴-۲ شکست عمودی اطراف یک گمانه قائم..... ۱۴
- شکل ۵-۲ شکست هیدرولیکی در سنگ متخلخل و نفوذپذیر..... ۱۵
- شکل ۶-۲ توزیع تنش اطراف یک چاه قائم واقع در یک سازند نفوذناپذیر..... ۱۵
- شکل ۷-۲ فشار چاه حین شکست هیدرولیکی در یک گمانه قائم..... ۱۶
- شکل ۸-۲ شکست عمود بر گمانه (سمت راست) و شکست موازی با گمانه (سمت چپ)..... ۱۸
- شکل ۹-۲ هندسه شکست پنی شکل..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲ هندسه مدل PKN..... ۲۰
- شکل ۱۱-۲ هندسه مدل KGD..... ۲۰
- شکل ۱۲-۲ انتشار آکوستیک حاصل از شکست هیدرولیکی..... ۲۳
- شکل ۱۳-۲ تصویر حاصل از CT اسکن پس از ایجاد شکست هیدرولیکی..... ۲۴
- شکل ۱۴-۲ شکست هیدرولیکی توسط سیال شکست با ویسکوزیته بالا (الف) مدلسازی عددی (ب) آزمون آزمایشگاهی..... ۲۸
- شکل ۱۵-۲ انتشار شکست هیدرولیکی در (الف) مدل هیدروترمو مکانیکی (ب) مدل هیدرو مکانیکی..... ۲۹
- شکل ۱۶-۲ تصویر شماتیک اندرکنش های ممکن بین شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی..... ۳۰
- شکل ۱۷-۲ تاثیر زاویه میل درزه و تفاضل تنش های برجا بر اندرکنش درزه طبیعی و شکست هیدرولیکی..... ۳۱
- شکل ۱۸-۲ مش بندی مدل المان محدود شکست هیدرولیکی در یک مخزن درزه دار طبیعی..... ۳۴
- شکل ۱۹-۲ رویدادهای لرزه ای حاصل از شکست هیدرولیکی و اندرکنش آن با درزه طبیعی با زاویه میل 30° ۳۷
- شکل ۲۰-۲ اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه های طبیعی با زوایای میل مختلف..... ۳۸
- شکل ۲۱-۲ تاثیر درزه های طبیعی با نفوذپذیری (الف) 0.1 mD (ب) 100 mD بر الگوی انتشار شکست هیدرولیکی..... ۳۸
- شکل ۲۲-۲ الگوی شکست هیدرولیکی ایجاد شده تحت سیال شکست با ویسکوزیته (الف) 0.01 Pa.s (ب) 0.1 Pa.s ۳۸

- شکل ۲-۲۳ الگوی شکست حاصل از (الف) مدلسازی عددی با الگوریتم دکسترا و (ب) آزمون آزمایشگاهی..... ۳۷
- شکل ۳-۱ چرخه محاسباتی در PFC^{2D} ۴۶
- شکل ۳-۲ نقطه تماس توپ-توپ در PFC^{2D} ۴۷
- شکل ۳-۳ مدل تماسی درزه صاف دو بعدی..... ۵۰
- شکل ۳-۴ قانون نیرو-جابجایی در درزه صاف (الف) نیروی نرمال نسبت جابجایی نرمال (ب) نیروی برشی نسبت به جابجایی برشی..... ۵۲
- شکل ۳-۵ نمونه‌ای از مدل ساخته شده در PFC^{2D} ۵۳
- شکل ۳-۶ تصویر شماتیک دامنه و کانال‌های جریان سیال در PFC^{2D} ۵۸
- شکل ۳-۷ فشارهای منفذی و نیروی سیال وارد بر ذره..... ۵۹
- شکل ۳-۸ تصویر شماتیک موقعیت، اندازه و جهت‌گیری یک ریزترک در PFC^{2D} ۶۴
- شکل ۴-۱ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون مقاومت فشاری تک محوره (ب) نمودار تنش-کرنش..... ۷۰
- شکل ۴-۲ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون مقاومت فشاری دو محوره (ب) نمودار تنش-کرنش..... ۷۱
- شکل ۴-۳ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون برزلی (ب) نمودار تنش-کرنش..... ۷۲
- شکل ۴-۴ مخزن دارای دو درزه طبیعی موازی..... ۷۴
- شکل ۴-۵ تاریخچه نیروی نامتعادل کننده..... ۷۵
- شکل ۴-۶ تاریخچه سرعت یک ذره تصادفی..... ۷۵
- شکل ۴-۷ موقعیت پیوندهای موازی..... ۷۶
- شکل ۴-۸ موقعیت درزه‌های صاف..... ۷۶
- شکل ۴-۹ منحنی تاریخچه تنش‌های مرزی وارد بر مدل..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰ (الف) تاریخچه فشار گمانه (ب) و (پ) الگوی شکست و توزیع فشار منفذی پس از شکست هیدرولیکی..... ۸۰
- شکل ۴-۱۱ (الف) تاریخچه فشار گمانه (ب) و (پ) و (ت) مراحل مختلف انتشار شکست هیدرولیکی در داخل مخزن دارای دو درزه طبیعی با زوایای میل 30° ۸۳
- شکل ۴-۱۲ الگوی نهایی شکست هیدرولیکی پس از عبور از درزه‌های طبیعی..... ۸۳
- شکل ۴-۱۳ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با زاویه میل 60° (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۸۴
- شکل ۴-۱۴ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با زاویه میل 90° (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۸۵

- شکل ۴-۱۵ مقایسه منحنی‌های فشار گمانه در زوایای میل مختلف..... ۸۶
- شکل ۴-۱۶ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۸۹
- شکل ۴-۱۷ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0.4$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۹۰
- شکل ۴-۱۸ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0.8$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۹۱
- شکل ۴-۱۹ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 1.2$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۹۱
- شکل ۴-۲۰ مقایسه منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه برای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک..... ۹۲
- شکل ۴-۲۱ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\sigma_V/\sigma_H = 40/15$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۹۳
- شکل ۴-۲۲ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\sigma_V/\sigma_H = 40/35$ (ب) تاریخچه فشار گمانه..... ۹۳
- شکل ۴-۲۳ مقایسه منحنی‌های فشار گمانه برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا..... ۹۴
- شکل ۴-۲۴ مقادیر عددی و تحلیلی فشار ایجاد شکست هیدرولیکی بر حسب تنش‌های برجا..... ۹۶
- شکل ۴-۲۵ زمان ایجاد شکست هیدرولیکی بر حسب تنش‌های برجا..... ۹۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲ مقایسه مدل‌های کلاسیک تحلیل شکست هیدرولیکی..... ۲۱
- جدول ۱-۴ خصوصیات بزرگ‌مقیاس مخزن مورد مطالعه..... ۶۹
- جدول ۲-۴ خصوصیات بزرگ‌مقیاس به دست آمده از کالیبراسیون عددی..... ۷۲
- جدول ۳-۴ ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ‌مقیاس سنگ مخزن..... ۷۳
- جدول ۴-۴ ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات ماکروی درزه..... ۷۷
- جدول ۵-۴ پارامترهای هیدرولیکی مدل..... ۷۸
- جدول ۶-۴ پارامترهای عملیاتی..... ۷۹
- جدول ۷-۴ حداکثر فشار و زمان ایجاد شکست هیدرولیکی برای نسبت‌های مختلف تنش برجا..... ۹۵
- جدول ۸-۴ مقادیر تحلیلی و عددی حداکثر فشار شکست..... ۹۸

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیش‌گفتار

کاربرد مکانیک سنگ در بخش‌های مختلف صنعت نفت در موضوعاتی نظیر شکست هیدرولیکی، ذخیره‌سازی زیرزمینی گاز، ماسه‌دهی چاه‌ها، نشست سطح زمین یا کف دریا، فعال شدن گسل‌ها، تغییر تراوایی، بهره‌دهی چاه‌ها، ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین و... از سال‌ها پیش مطرح و پروژه‌های متعددی در این خصوص تعریف شده است.

از لحاظ تاریخی، ذخایر متعارف که دارای یک لایه ماسه‌سنگ حاوی هیدروکربن هستند، مرسوم‌ترین نوع ذخایر برای تولید هیدروکربن هستند. با این حال، تخلیه این نواحی و عدم اکتشاف جدید چنین ذخایری در دهه‌های اخیر و همچنین توسعه فناوری‌های جدید، موجب جلب توجه بیشتر صنایع به استخراج از ذخایر نامتعارف شده است. به طور مثال در استرالیا چندین ذخیره متراکم گاز وجود دارد که ذخایری با تخلخل و تراوایی بسیار پایین بوده و برای تولید تجاری نیازمند تحریک هستند. شکست هیدرولیکی یکی از مهم‌ترین فناوری‌هایی است که برای کمک به تولید تجاری چنین ذخایر هیدروکربنی به کار می‌رود.

بررسی‌های صورت گرفته در مورد چشم‌انداز تولید گاز طبیعی در کشورهای مختلف دارای ذخایر گازی عظیم، گواه آن است که کشورهای آمریکا و روسیه با بکارگیری عملیات شکست هیدرولیکی، گوی سبقت را از سایر کشورها ربوده‌اند. از طرفی افزایش استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی و برداشت گاز طبیعی از مخازن شیل باعث کاهش قیمت گاز طبیعی نیز شده است.

۱-۲ اهداف پژوهش

رشد روزافزون نیاز جهانی به منابع انرژی، استفاده از ذخایر نامتعارف را -که در داخل سنگ‌ها محبوس شده‌اند- می‌طلبد که لازم است به صورت هیدرولیکی تحریک شوند. با این حال چنین ذخایری

ناهمگن بوده و شامل انواع مختلفی سطوح ناپیوستگی هستند که بررسی شکست را مشکل می‌کند. عملیات شکست هیدرولیکی در یک سازند دارای درزه‌های طبیعی بسیار پیچیده است. چرا که ناپیوستگی‌های طبیعی موجود، به طرز قابل ملاحظه‌ای گسترش شکست هیدرولیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بنابراین داشتن درک صحیحی از رفتار یک شکست هیدرولیکی هنگامی که به یک ناپیوستگی طبیعی می‌رسد، بسیار مهم است.

حجم بسیار زیادی از ذخایر گاز طبیعی در مخازن درزه‌دار با تراوایی پایین قرار گرفته‌اند. درزه‌های طبیعی نقش بسیار مهمی در مخازن نامتعارف گاز ایفا می‌کنند. زیرا بازیابی هیدروکربن بدون وجود این شکستگی‌ها امکان‌پذیر نیست. اما به علت تراوایی پایین این سازندها و همچنین ضریب هدایت هیدرولیکی پایین شکستگی‌های طبیعی، روش‌های تحریک مخازن برای برداشت اقتصادی از این مخازن امری ضروری است.

پارامترهای ژئومکانیکی سازند مثل میزان تراوایی و وجود درزه‌های طبیعی و همچنین پارامترهای عملیاتی مثل خصوصیات و نرخ تزریق سیال و نوع پروپانت از جمله عواملی هستند که طراحی صحیح عملیات شکست هیدرولیکی را با چالش جدی مواجه می‌سازند. بنابراین لازم است به منظور طراحی صحیح این عملیات، شناخت کاملی در مورد هر یک از این عوامل کسب شده و نقش هر یک از آنها در انجام عملیات مورد بررسی قرار گیرد.

درزه‌های طبیعی می‌توانند عملیات شکست هیدرولیکی را با چالش جدی مواجه کنند. به عنوان مثال یکی از مواردی که به کرات در مخازن دارای درزه‌های طبیعی مشاهده می‌شود، نرخ نشت بسیار بالا در حین انجام عملیات شکست هیدرولیکی است. در برخی موارد نرخ نشت سیال حتی تا پنجاه برابر نرخ نشت در مخازن بدون درزه‌های طبیعی نیز گزارش شده است.

علاوه بر این نحوه اندرکنش شکست هیدرولیکی با شکستگی‌های موجود نیز انجام عملیات را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند. در واقع خصوصیات هندسی و چگونگی استقرار درزه‌ها در مخزن، سناریوهای متفاوتی را در گسترش شکست هیدرولیکی رقم خواهند زد.

در این پژوهش سعی شده است که با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای PFC^{2D} که ابزاری قدرتمند در مدلسازی عددی محیط‌های ناپیوسته است، تاثیر درزه‌های طبیعی و پارامترهای تعیین کننده آن‌ها بر گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن دارای درزه‌های طبیعی مورد بررسی قرار گیرد و نحوه اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی در مواجهه با یکدیگر بررسی شود.

۱-۳ ضرورت پژوهش

برای طراحی و پایش عملیات شکست هیدرولیکی، لازم است گسترش و رشد هندسی شکست پیش‌بینی شود. بنابراین مطالعات بسیاری طی سال‌های اخیر در این زمینه انجام شده و روش‌های مختلفی از جمله روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی، میکرولرزه‌ای و عددی برای بررسی گسترش ترک ناشی از تزریق سیال توسعه یافته است.

در بسیاری از پژوهش‌ها و مدلسازی‌های انجام شده به منظور شبیه سازی عملیات شکست هیدرولیکی، محیط پیوسته، همسانگرد و همگن فرض شده است. اما این فرض برای بیشتر توده سنگ‌ها - به ویژه مخازن شیل‌های گازی - صحت ندارد. چرا که این مخازن معمولاً شامل حجم عظیمی از سنگ‌های درزه‌دار هستند که انتشار شکست هیدرولیکی در آن‌ها شامل هم شکست سنگ بکر و هم بازشدگی و یا لغزش ناپیوستگی‌های موجود است. این درزه‌های طبیعی می‌توانند به طور قابل توجهی مسیر شکست، فشار لازم برای انتشار شکست و همچنین نفوذ سیال به محیط اطراف را تحت تاثیر قرار دهند. از طرفی نیز بسیاری از شکست‌های هیدرولیکی انجام شده در مخازن درزه‌دار، به دلیل عدم توانایی

مدل‌های عددی استاندارد در پیش‌بینی صحیح فشارها و هندسه شکست، نتایج نسبتاً غیرمنتظره‌ای را ارائه کرده‌اند. بنابراین بررسی عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار و مطالعه تاثیر درزه‌ها بر انتشار شکست بسیار حایز اهمیت است.

۴-۱ روش پژوهش

با توجه به هدف این پایان‌نامه که مطالعه پاسخ مخزن دارای درزه‌های طبیعی به عملیات شکست هیدرولیکی است، بایستی روش عددی و نرم‌افزاری انتخاب شود که قابلیت مدل‌سازی درزه‌های طبیعی و چگونگی انتشار شکست هیدرولیکی را داشته باشد. بدین منظور نرم‌افزار PFC^{2D} که یک برنامه المان مجزاست، انتخاب شده است. این نرم‌افزار مخزن را به صورت مجموعه‌ای از ذرات دایروی شبیه‌سازی می‌کند که در نقاط تماس بین ذرات به یکدیگر پیوند شده‌اند.

با توجه به محدودیت‌های موجود، تنها بخش کوچکی از مخزن شبیه‌سازی شده است. پیش از مدل‌سازی عددی شکست هیدرولیکی، لازم است خصوصیات مخزن به وسیله شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی در PFC^{2D} کالیبره شوند تا ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ‌مقیاس سنگ مخزن تعیین شوند. سپس هندسه مدل ساخته شده و درزه‌های طبیعی پیاده‌سازی می‌شوند. در نهایت پس از اعمال شرایط مرزی، شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی با تزریق سیال شکست که یک کوپلینگ هیدرومکانیکی است، صورت می‌گیرد.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل گردآوری شده است. در آغاز فصل پیش رو، کلیاتی از پژوهش و اهمیت آن و سپس اهداف، ضرورت و روش انجام این پژوهش به اختصار ارائه شد. در ادامه این فصل نیز خلاصه‌ای از فصول مختلف پایان‌نامه تشریح می‌شود.

در فصل دوم، شکست هیدرولیکی و کاربردهای مختلف آن در صنعت بررسی می‌شود. همچنین مبانی شکست هیدرولیکی و مکانیزم‌های ایجاد آن تشریح می‌شود و با مروری بر تلاش‌های سایر پژوهشگران، مدل‌های تحلیلی و آزمون‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط آنان و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در روش‌های عددی مختلف و نتایج آن‌ها مطالعه می‌شود.

فصل سوم به معرفی نرم‌افزار PFC^{2D} و تیوری حاکم بر کد جریان ذره اختصاص دارد. چگونگی ساخت مدل و توده سنگ با استفاده از مدل‌های تماسی در این فصل بررسی می‌شود. در ادامه این فصل جریان سیال و فرمول‌بندی حاکم بر آن و همچنین کوپلینگ هیدرولیکی و نحوه پایش ترک در نرم‌افزار PFC^{2D} توضیح داده می‌شود.

در فصل چهارم که مهم‌ترین فصل پایان‌نامه پیش روست، مدلسازی عددی شکست هیدرولیکی در یک مخزن دارای دو درزه طبیعی موازی ارائه شده است. روند مدلسازی مفصل تشریح شده و در ادامه با استفاده از تحلیل حساسیت نسبت به زاویه میل درزه‌ها، مقاومت برشی درزه‌ها و نسبت تنش‌های برجا، اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی تحت شرایط مختلف بررسی شده است. در انتهای فصل اعتبارسنجی مدل انجام شده و نتایج به دست آمده از مدلسازی تفسیر می‌شود.

در آخر، در فصل پنجم، مطالب بررسی شده در پایان‌نامه و نتایج آن به اختصار جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی نیز به منظور مطالعه بیشتر درباره این موضوع در پژوهش‌های آتی ارائه می‌شود.

فصل دوم

شکست هیدرولیکی

۲-۱ پیش‌گفتار

در این فصل، مختصراً به شرح کلیاتی از فرایند شکست هیدرولیکی و کاربردهای آن در حوزه‌های مختلف صنعت پرداخته می‌شود. در ادامه این فصل، با مرور نوشته‌ها و پژوهش‌های سایر محققان، مدل‌های تحلیلی و ریاضی شکست هیدرولیکی و گسترش آن مورد بحث قرار می‌گیرد. همچنین تلاش‌های آزمایشگاهی و روش‌های عددی پیوسته و ناپیوسته به منظور پایش رشد ترک در مخازن نفت و گاز بررسی شده است. در آخر مدل‌های تحلیلی، آزمون‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی ساخته شده به منظور مطالعه اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی در مخازن درزه‌دار طبیعی مرور می‌شود.

۲-۲ شکست هیدرولیکی

بیش از قرن‌ی است که نفت و گاز طبیعی، سوخت‌های فسیلی اصلی مورد استفاده بشر بوده‌اند که در ابتدا از ذخایر متعارف^۱ - همان بسته‌های زیرزمینی هیدروکربن محبوس - استخراج می‌شدند. دسترسی به این ذخایر نسبتاً آسان بود. با حفر یک چاه و در اثر فشار، سوخت فسیلی ذخیره شده خارج می‌شد. یک مخزن متعارف از یک سنگ متخلخل سرشار از نفت و گاز مثل ماسه سنگ تشکیل شده که یک لایه سنگی ناتراوا آن را پوشانده است. حفر چاه باعث ایجاد مسیری می‌شود که یک جریان ویسکوز ناشی از اختلاف فشار را به وجود می‌آورد که از قانون دارسی^۲ پیروی می‌کند [۱].

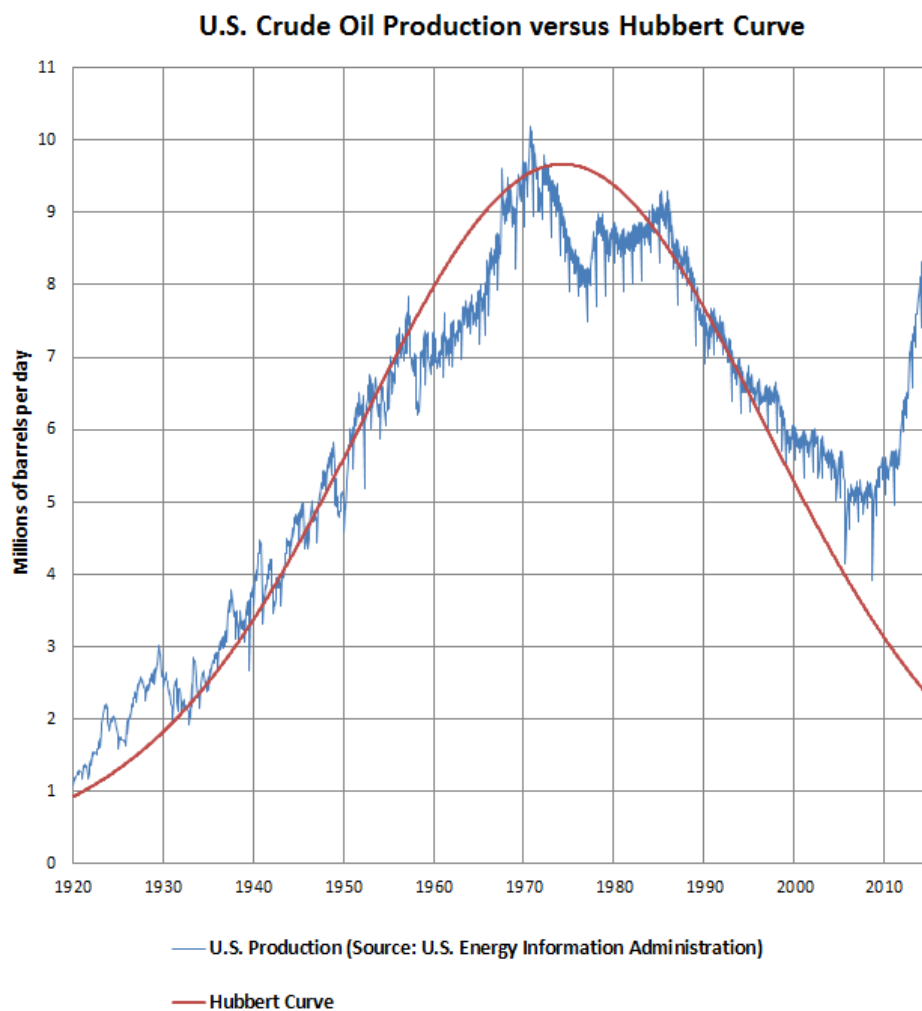
هوبرت^۳، میزان برداشت از میادین نفت و گاز ایالات متحده را به صورت منحنی شکل ۲-۱ نشان داد [۲]. مدلی که یک نقطه اوج را برای میزان استخراج، و به دنبال آن یک افت ثابت را در نظر می‌گیرد. اوج استخراج در ایالات متحده در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی به وقوع پیوست. از آنجا که ناکارآمدی تکنیک‌های شناخته شده استخراج هیدروکربن به همگان ثابت شده بود، تلاش‌هایی برای یافتن روش‌های

¹ conventional reservoirs

² Darcy law

³ Hubbert

جدید استحصال نفت و گاز صورت گرفت [۳]. نخستین مقالات در حوزه شکست هیدرولیکی در همان دوره اوج استخراج منتشر شد [۴-۸]. همان زمانی که صنعت نیاز به روش‌های جدید نامتعارف برای بازیابی هیدروکربن، به منظور ارضای نیاز روزافزون به آن را دریافت.



شکل ۱-۲ میزان برداشت نفت خام در ایالات متحده طی قرن اخیر [۳]

شکست هیدرولیکی به طور کلی به یک شکستگی ناشی از فشار سیال اطلاق می‌شود که در یک

محیط ترد انتشار می‌یابد. این فرایند به طور طبیعی در ایجاد دایک‌های ماگمایی رخ می‌دهد [۹, ۱۰].

¹ Dyke

کاربردهای شکست هیدرولیکی فراتر از صنعت نفت است. از آن جمله می‌توان به دفن خردباطله‌های حفاری^۱ در زیر زمین [۱۱]، استحصال مخازن زمین‌گرمایی [۱۲] و استخراج متان از لایه‌های زغال اشاره کرد.

عملیات شکست هیدرولیکی شامل مراحل زیر است:

- حفر چاه قایم
- حفر یک بخش افقی طویل که تا سازند سنگی غنی مورد هدف ادامه می‌یابد
- ایجاد شکست‌های اولیه به وسیله خرج‌های انفجاری
- تزریق سیال شکست که ممکن است چندین روز ادامه داشته باشد
- تزریق پروپانت^۲
- استحصال هیدروکربن که از طریق شکست‌های ایجاد شده به بیرون جریان می‌یابد

پس از پیدایش فناوری شکست هیدرولیکی، تولید گاز طبیعی تنها در ایالات متحده به دلیل امکان استخراج از شیل‌های گازی تا بیش از ۵۰ درصد افزایش یافته است [۳]. مخازن شیل‌های گازی برخلاف ماسه‌سنگ‌های متعارف، دارای گاز طبیعی محبوس در منافذ سازندهای شیلی ناتراوا هستند. شکست هیدرولیکی در اثر پمپاژ سیال تحت فشارهای بسیار زیاد، شکستگی‌های جدیدی را ایجاد می‌کند و مسیرهایی برای فرار گاز طبیعی از منافذ و جریان یافتن آن تا سطح زمین به وجود می‌آورد. بنابراین می‌توان گفت شکست هیدرولیکی علی‌رغم آنکه بسیار پیچیده و پرهزینه است، موجب نقض منحنی هوبرت شده است [۱۳] و پیش‌بینی او درباره اتمام سوخت‌های فسیلی حداقل تا قرن آینده به تعویق افتاده است.

^۱ waste drill cuttings

^۲ Proppant

۲-۱-۲ تاریخچه شکست هیدرولیکی

پیشینه استفاده از شکست به منظور افزایش تولید به دهه ۱۸۶۰ میلادی برمی گردد. زمانی که نیتروگلیسرین برای تحریک مخازن کم عمق مورد استفاده قرار گرفت. در دهه ۱۹۳۰ برای تحریک مخازن از تزریق اسید استفاده شد. فلویید فریس^۱ از شرکت استانولیند^۲ مطالعه مفصلی در مورد رابطه بین عملکرد چاه و فشار اعمال شده انجام داد [۱۴].

اولین عملیات آزمایشی شکست هیدرولیکی در یک چاه -بر اساس مطالعات فریس- توسط شرکت استانولیند در سال ۱۹۴۷ در میدان گازی هیوگوتن^۳ ایالت کانزاس^۴ انجام شد. کمپانی هاوکو^۵ برای اولین بار دو عملیات شکست هیدرولیکی تجاری را در ایالت های اوکلاهما^۶ و تگزاس^۷ اجرا کرد که در سال اول بر روی ۳۳۲ چاه عملیات شکست هیدرولیکی انجام شد و میزان تولید به طور متوسط ۷۵ درصد افزایش یافت. کاربرد فرایند شکست بسیار سریع رشد یافت. به طوری که در اواسط دهه ۱۹۵۰، این عملیات در ماه بر روی بیش از ۳۰۰۰ چاه انجام می شد و در حال حاضر، داشتن ۸ تا ۴۰ مرحله شکست در یک چاه رایج است [۱۴].

با پایان جنگ جهانی دوم پیشرفت های قابل توجهی در توسعه تکنیک های شکست هیدرولیکی حاصل شد. در مدت بیش از ۶۰ سال گذشته، ابزارها و تجهیزات پیشرفته تر و اقتصادی تری برای تحریک مخازن توسعه یافته است که شامل انواع سیال های شکست، تجهیزات سطحی و داخل چاه، نرم افزارهای

^۱ Floyd Farris

^۲ Stanolind

^۳ Hugoton

^۴ Kansas

^۵ Howco

^۶ Oklahoma

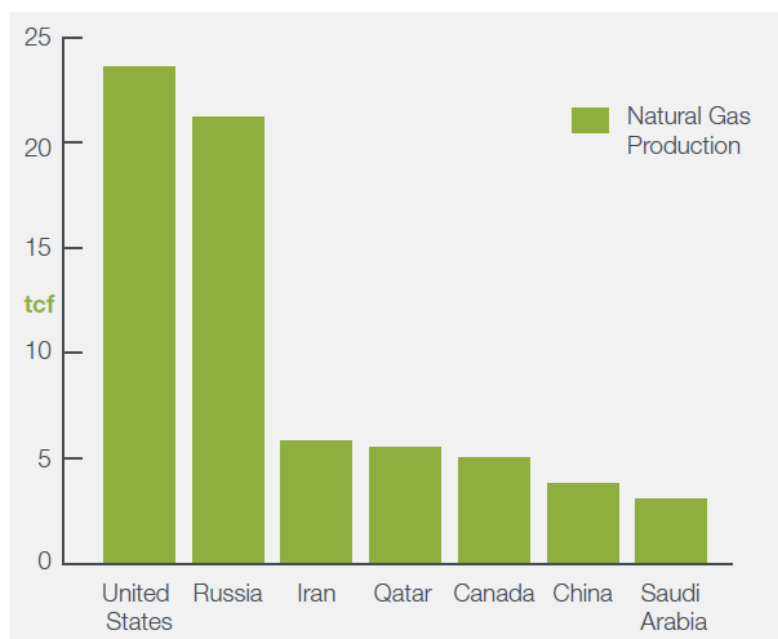
^۷ Texas

کامپیوتری و مدل سازی رفتار شکست و همچنین دانش ایجاد شکست در ارتباط با تنش های تکتونیکی هستند [۱۵].

۲-۲-۲- اهمیت شکست هیدرولیکی

پس از معرفی عملیات شکست هیدرولیکی توسط کمپانی استانولیند، قریب به ۲/۵ میلیون بار این فرایند در سراسر جهان انجام شده است. تحریک مخازن با استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی نه تنها نرخ تولید را افزایش می دهد، بلکه ۹ میلیارد بشکه نفت و بیش از ۷۰۰ تریلیون فوت مکعب گاز را از سال ۱۹۴۹، تنها به ذخایر ایالات متحده افزوده است که بدون استفاده از شکست هیدرولیکی، استحصال آنها غیراقتصادی بود [۱۴].

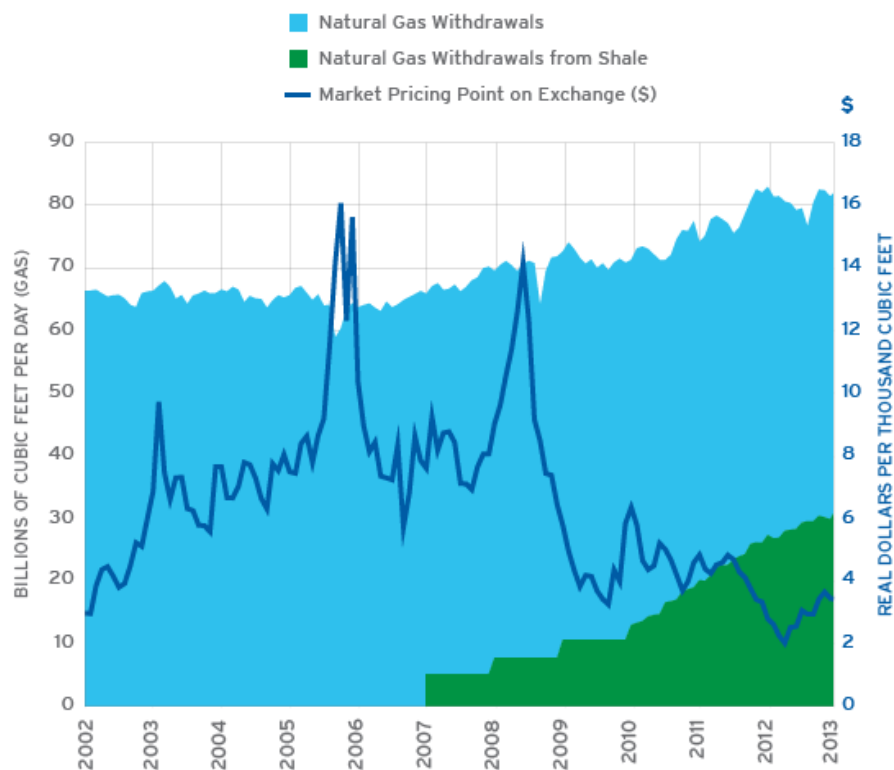
نمودار ستونی زیر چشم انداز تولید گاز طبیعی در کشورهای مختلف دارای ذخایر گازی عظیم را نشان می دهد. همان طور که پیداست، میزان تولید گاز طبیعی در ایالات متحده و روسیه بسیار بیشتر از سایر کشورهاست و علت آن بهره گیری از عملیات شکست هیدرولیکی است [۱۵].



شکل ۲-۲ نمودار میزان تولید گاز طبیعی در کشورهای مختلف [۱۵]

از طرفی افزایش استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی و برداشت گاز طبیعی از مخازن شیل،

باعث کاهش قیمت گاز طبیعی نیز شده است [۱۶].



شکل ۲-۳ افت قیمت گاز طبیعی با افزایش برداشت گاز از شیل با استفاده از عملیات شکست هیدرولیکی [۱۶]

۲-۳- مکانیزم ایجاد شکست هیدرولیکی

شکست هیدرولیکی در سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که فشار سیال درون سنگ از مجموع تنش

اصلی حداقل و مقاومت کششی سنگ بیشتر شود. این امر به گسیختگی کششی می‌انجامد. شکست

هیدرولیکی ممکن است بر اثر فرایندهای طبیعی و زمین‌شناختی - یعنی جایی که فشار سیال افزایش و یا

تنش اصلی حداقل کاهش می‌یابد- ایجاد شود. از آنجا که تنش اصلی حداقل معمولاً در جهت افقی است،

از این رو شکست‌ها قائم خواهند بود. همان‌طور که شکل ۲-۴ نشان می‌دهد، دو بال شکست متقارن

عمود بر تنش اصلی حداقل توسعه می‌یابد. از نقطه‌نظر ماکروسکوپی، شکست به گسیختگی کششی مربوط

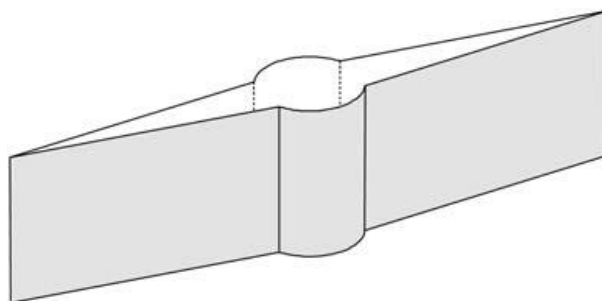
است. گسیختگی کششی زمانی اتفاق می افتد که تنش کششی از مقاومت کششی T_0 بیشتر شود (با پیروی از قرارداد معمول که تنش های فشاری را مثبت در نظر می گیرد) [۱۷]:

$$\sigma < -T_0 \quad (۱-۲)$$

برای مصالح متخلخل، تنش موثر باید جایگزین تنش کلی شود. بنابراین:

$$\sigma - p_f < -T_0 \quad (۲-۲)$$

که در آن p_f فشار منفذی است.

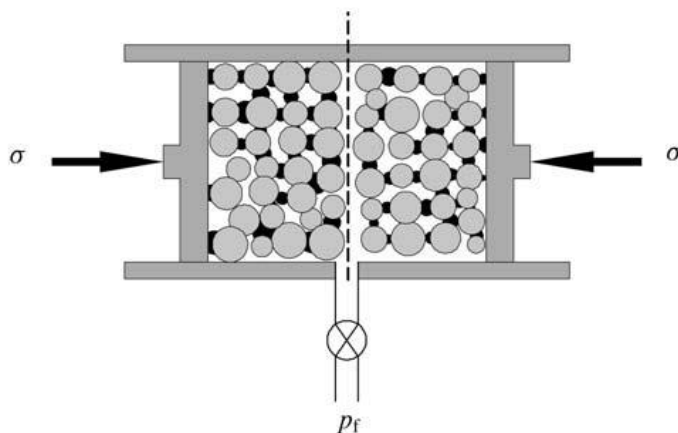


شکل ۲-۴ شکست عمودی اطراف یک گمانه قائم [۱۷]

فرض کنید یک نمونه متخلخل و نفوذپذیر در سلول سه محوری داریم (شکل ۲-۵). این نمونه تحت تنش خارجی σ است. فشار منفذی p_f قابل تغییر است. ابتدا فرض کنید دانه ها به یکدیگر سیمان شده و نمونه به پیستون ها چسبیده است. پیوندها در امتداد خط چین شکسته و بنابراین یک شکستگی بسته را تشکیل می دهند. نیرویی که باعث بسته شدن این شکستگی می شود، اختلاف بین تنش اعمال شده σ و فشار منفذی p_f در شکستگی است. بنابراین شرایط باز شدن این شکست به صورت زیر است:

$$\sigma - p_f < 0 \quad (۳-۲)$$

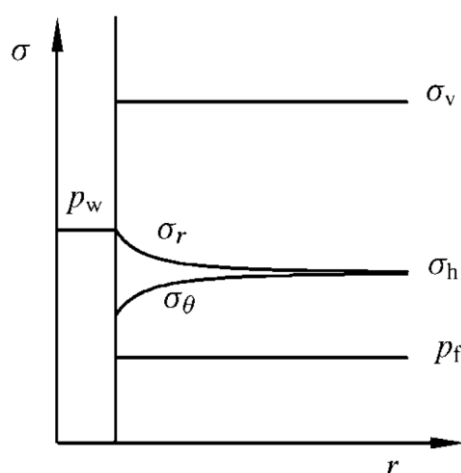
رسیدن به چنین شرایطی با افزایش فشار داخلی p_f یا کاهش تنش خارجی σ امکان پذیر است.



شکل ۵-۲ شکست هیدرولیکی در سنگ متخلخل و نفوذپذیر [۱۷]

شرایط ایده‌آل زیر را به منظور تشریح مفهوم ایجاد شکست در نظر بگیرید: یک گمانه قایم به یک میدان تنش با تنش‌های افقی همسانگرد وارد می‌شود. یعنی $\sigma_v > \sigma_H = \sigma_h$. سنگ همسانگرد و همگن است و رفتار آن از قانون الاستیک خطی هوک^۱ پیروی می‌کند. فعلاً دیواره گمانه را ناتراوا فرض می‌کنیم. به این معنی که فشار منفذی در سازند ثابت می‌ماند و از فشار گمانه تاثیر نمی‌پذیرد. با افزایش فشار چاه p_w ، تنش مماسی σ_θ کاهش می‌یابد (شکل ۶-۲):

$$\sigma_\theta = 2\sigma_h - p_w \quad (۴-۲)$$



شکل ۶-۲ توزیع تنش اطراف یک چاه قایم واقع در یک سازند نفوذناپذیر [۱۷]

^۱ Hooke's law

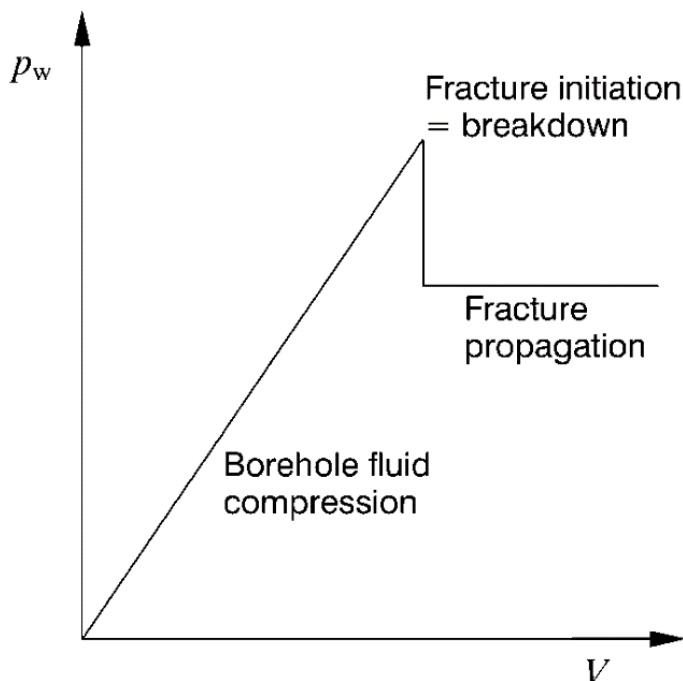
شرایط ایجاد یک شکست هیدرولیکی زمانی فراهم می‌شود که روابط ۵-۲ یا ۶-۲ برقرار باشند:

$$\sigma_{\theta} - p_f = -T_0 \quad (5-2)$$

یا

$$p_{w,max}^{frac} = 2\sigma_h - p_f + T_0 \quad (6-2)$$

تغییرات فشار گمانه در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. بخش خطی ابتدایی، تغییر شکل الاستیک سیستم را در داخل گمانه و اطراف آن نشان می‌دهد. نقطه اوج، شرایط ایجاد شکست، یعنی ایجاد یک شکست قایم روی دیواره گمانه را نشان می‌دهد. در این نقطه، فشار چاه ناگهان افت می‌کند که نشانگر رشد ناپایدار ترک است. یعنی نرخ افزایش حجم ترک در حال رشد، بیشتر از نرخ تزریق سیال است. تداوم پمپاژ در نهایت به رشد پایدار شکست می‌انجامد که توسط قسمت ثابت نمودار نشان داده می‌شود [۱۷].



شکل ۷-۲ فشار چاه حین شکست هیدرولیکی در یک گمانه قایم [۱۷]

اگر تنش‌های افقی متفاوت باشند، آنگاه توزیع تنش نیز تغییر می‌کند. اگر σ_h را تنش اصلی حداقل و σ_H را تنش اصلی متوسط در نظر بگیریم، آنگاه فشار ایجاد شکست برای نمونه نفوذناپذیر یا شرایط افزایش فشار سریع در یک چاه قایم برابر است با [۱۷]:

$$p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_f + T_0 \quad (۷-۲)$$

تا اینجا تنها در مورد یک چاه قایم بحث شد. برای چاه‌های انحرافی و افقی شرایط پیچیده‌تر است. یک چاه افقی در میدان تنش $\sigma_h > \sigma_H > \sigma_V$ در نظر بگیرید. در چنین شرایطی واضح است که فشار ایجاد شکست به جهت آزمون‌های گمانه هم بستگی دارد. برای گمانه موازی با σ_H داریم [۱۷]:

$$p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_V - p_f + T_0 \quad (۸-۲)$$

و برای گمانه موازی با σ_h :

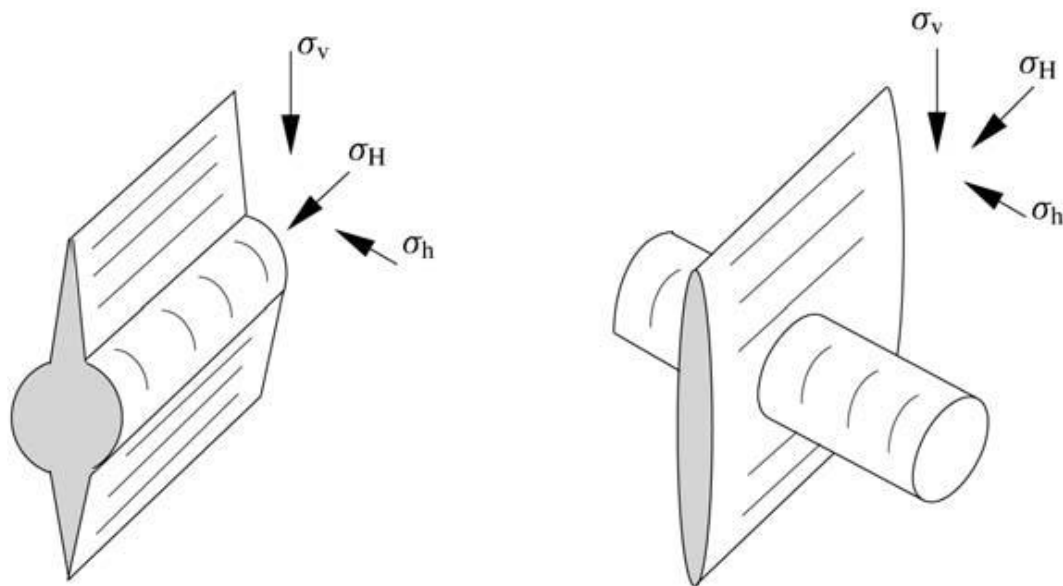
$$p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_H - \sigma_V - p_f + T_0 \quad (۹-۲)$$

بدیهی است که فشار ایجاد شکست در گمانه موازی با σ_h بیشتر از حالت دیگر است. جهت شکست نسبت به گمانه نیز در این دو حالت متفاوت است. در حالت اول تنش بر جای حداقل عمود بر گمانه و شکست موازی با گمانه است. در حالت دوم شکست عمود بر گمانه است (شکل ۲-۸).

۳-۲- مطالعه هندسه و انتشار شکست هیدرولیکی

یک عملیات شکست هیدرولیکی کارآمد، مستلزم دانش کافی در خصوص پیش‌بینی رفتار شکست است تا شبکه شکستگی بهینه حاصل شود. از این رو، مدل‌سازی هندسه شکست هیدرولیکی مدت‌هاست که مورد بررسی قرار گرفته است. محققان چندین روش تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی مختلف

را به منظور درک صحیح چگونگی ایجاد و گسترش شکست هیدرولیکی ارایه داده‌اند که این روش‌ها در ادامه بررسی خواهند شد.



شکل ۲-۸ شکست عمود بر گمانه (سمت راست) و شکست موازی با گمانه (سمت چپ) [۱۷]

۲-۳-۱- روش‌های تحلیلی و ریاضی

نخستین مطالعات درباره شکست هیدرولیکی، به ارایه مدل‌های تحلیلی و ریاضی برای پیش‌بینی فشار ایجاد شکست و چگونگی انتشار آن انجامید که با وجود فرضیات ساده‌کننده مساله، سنگ بنای پیشرفت‌هایی است که امروزه در رابطه با مدل‌های شکست هیدرولیکی شاهد آن هستیم.

۲-۳-۱-۱ مدل شکست پنی‌شکل

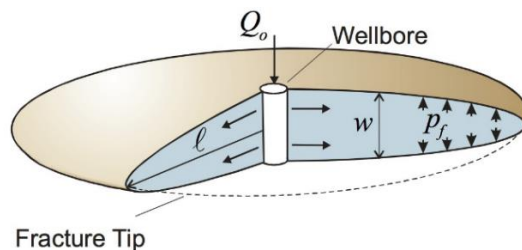
بیشتر مدل‌های شکست هیدرولیکی بر اساس کار اسندون^۱ [۱۸] و الیوت^۲ [۱۹] بر روی بازشدگی ترک‌های پنی‌شکل^۳ و دایره‌ای انجام شده است. مدل شکست پنی‌شکل، ترک را به صورت یک شکستگی افقی در نظر می‌گیرد که به صورت یکنواخت در تمام جهت‌ها پیش می‌رود. مطالعه شکست

^۱ Sneddon

^۲ Elliott

^۳ Penny-shaped

پنی شکل در یک توده سنگ خشک توسط آبه^۱ [۲۰] انجام شد. در این مطالعه توزیع فشار سیال به صورت یکنواخت و نرخ تزریق سیال ثابت در نظر گرفته شد. هندسه شکست پنی شکل در شکل ۹-۲ آمده است.



شکل ۹-۲ هندسه شکست پنی شکل [۲۱]

۲-۱-۳-۲ مدل PKN

تیوری شکست پنی شکل تکامل یافت تا اینکه مدل معروف PKN^۲ معرفی شد. این مدل اثرات نشت سیال را نیز شامل می شود و یک کانال جریان بیضی شکل را در نظر می گیرد که عرض آن توسط افت فشار اصطکاکی تعیین می شود [۷]. مدل PKN یک شکست با ارتفاع ثابت را توصیف می کند که مقطع عرضی آن بیضی شکل است و به صورت افقی در یک جهت انتشار می یابد (شکل ۱۰-۲) [۳]. از این رو مدل PKN در مدلسازی شکست هیدرولیکی متعارف که طول شکست در مقایسه با ارتفاع آن بلند است، به کار می رود [۱۷]. مدل PKN اثر چقرمگی شکست را قابل صرف نظر می داند. چرا که انرژی لازم برای انتشار ترک تا حد زیادی کمتر از انرژی لازم برای جریان یافتن سیال در طول ترک است [۲۲].

۳-۱-۳-۲ مدل KGD

در سال ۱۹۵۵، کریستیانوویچ^۳ و ژلتوف^۴ [۲۳] مستقل از هم مدل شکست هیدرولیکی خود را توسعه دادند که توسط گرتسما^۵ و کلرک^۶ [۴] تکامل یافت و مدل کرنش صفحه ای KGD^۷ پدید آمد. این

^۱ Abe

^۲ Perkins-Kern-Nordgren

^۳ Khristianovic

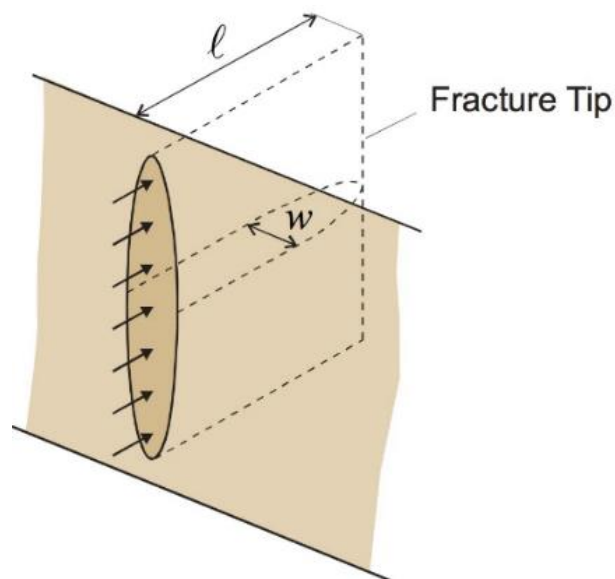
^۴ Zheltov

^۵ Geertsma

^۶ Klerk

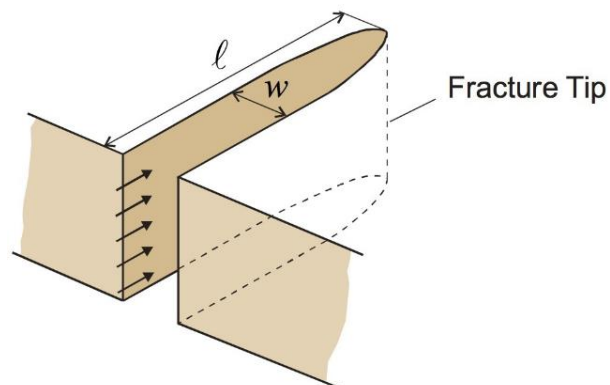
^۷ Khristianovic-Geertsma-de Klerk

مدل تحریک هیدرولیکی را به صورت یک شکست تک صفحه‌ای در نظر می‌گیرد که گسترش آن از گمانه آغاز شده و به سمت سازند ادامه می‌یابد (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۰ هندسه مدل PKN [۲۱]

رویکرد کرنش صفحه‌ای باعث شده است که این مدل برای مواردی که نسبت طول به ارتفاع کم است مناسب باشد [۲۴] و روش KGD برای تست‌های اندازه‌گیری تنش که طول شکست در مقایسه با ارتفاع آن کوتاه است، تقریب بهتری به دست می‌دهد [۱۷]. مدل KGD یک شکست قائم با ارتفاع ثابت را توصیف می‌کند که به صورت افقی در یک جهت منتشر می‌شود [۳].



شکل ۲-۱۱ هندسه مدل KGD [۲۱]

مدل‌های کلاسیک دو بعدی شکست هیدرولیکی را می‌توان به صورت جدول ۱-۲ خلاصه کرد.

جدول ۱-۲ مقایسه مدل‌های کلاسیک تحلیلی شکست هیدرولیکی

مدل	فرض	شکل	کاربرد
PKN	ارتفاع ثابت کرنش صفحه‌ای در جهت قائم	مقطع بیضی شکل	ارتفاع > طول
KGD	ارتفاع ثابت کرنش صفحه‌ای در جهت افقی	مقطع مستطیلی	ارتفاع < طول
پنی شکل	انتشار در صفحه معین و متقارن نسبت به گمانه	مقطع دایره‌ای	شعاعی

۲-۳-۱-۴ مدل‌های شبه سه بعدی

به منظور رفع محدودیت‌های مدل‌های دو بعدی، مدل‌های شبه سه بعدی^۱ (P3D) با حذف فرض ارتفاع ثابت و یکنواخت فرمول‌بندی شدند [۲۵]. ارتفاع شکست در مدل‌های شبه سه بعدی، تابعی از مکان در راستای ترک و زمان شبیه‌سازی است. برخلاف مدل‌های دو بعدی، یک مولفه قائم جریان سیال هم به مدل‌های شبه سه بعدی اضافه شده است و طول ترک بایستی بسیار بیشتر از ارتفاع آن باشد [۲۲]. مدل شبه سه بعدی از توسعه مدل دو بعدی PKN به دست آمد.

۲-۳-۱-۵ مدل‌های سه بعدی کامل

مدل‌های بسیار پیچیده و کاملاً سه بعدی نیز به منظور مدلسازی شکست‌های با شکل و جهت‌گیری‌های دلخواه معرفی شده‌اند. این پیشرفت‌ها در مدل‌های تحلیلی امکان شبیه‌سازی انتشار شکست هیدرولیکی در مخازن چندلایه را نیز فراهم آورد [۲۶].

در رویکرد تحلیل سه بعدی، یک صفحه گسسته‌سازی می‌شود و ترک می‌تواند در یک سیستم لایه‌ای منتشر شود. هندسه نهایی شکست القا شده، بسته به پارامترهای مکانیکی هر لایه می‌تواند نامنظم

^۱ Pseudo-3D

با شد. جریان سیال در ترک به صورت کوپل با الاستیسیته سنگ مخزن است و انتشار ترک به وسیله مقاومت کششی سنگ کنترل می‌شود [۲۴].

ستاری^۱ و کلیری^۲ [۲۵] یک مدل شکست هیدرولیکی سه بعدی جامع را توسعه دادند. فرمول‌بندی این مدل، جریان سه بعدی و دو فازی سیال در مخزن را با یک مدل سه بعدی شکست در یک صفحه قائم، تزریق پروپانت و انتقال حرارت کوپل می‌کند.

۲-۳-۲- پژوهش‌های آزمایشگاهی

زوباک^۳ [۲۷] یک سری آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور بررسی تاثیر احتمالی نرخ تزریق سیال بر فشار شکست^۴ انجام داد و مشاهده کرد که وقتی نشت سیال قابل چشم‌پوشی است، فشار ایجاد شکست کششی مستقل از نرخ تزریق سیال است. در حالی که فشار شکست این‌گونه نیست. زوباک علت فشار شکست بسیار بالا را چنین تشریح کرد که پس از ایجاد شکست، رشد شکست اولیه به علت افت فشار بسیار زیاد در شکست‌های باریک، پایدار است. با افزایش فشار، رشد ترک به صورت ناپایدار اتفاق می‌افتد که به مقدار فشار شکست بالا می‌انجامد. وقتی شکست هیدرولیکی توسط سیال با ویسکوزیته کم اتفاق می‌افتد، فشار شکست الزاماً متناظر با شکست کششی اولیه و مستقل از نرخ تزریق سیال است. مگر اینکه سنگ بسیار نفوذپذیر بوده و یا نرخ تزریق بسیار کم باشد که در این حالت حجم زیادی از سیال نشت می‌کند.

هود^۵ [۲۸] نمونه‌های گرانیتی را مورد آزمایش قرار داد و با استفاده از فناوری انتشار آکوستیک^۶، تحلیل جامعی از ابعاد و هندسه شکست هیدرولیکی ارائه داد. موقعیت شکست از طریق ابر آکوستیک

¹ Settari

² Cleary

³ Zoback

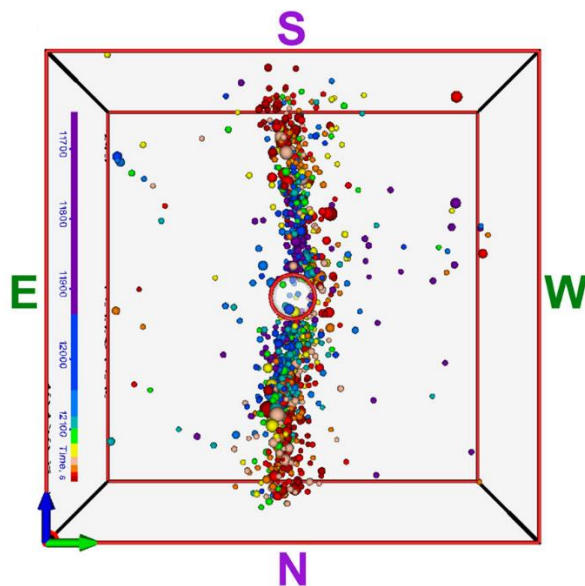
⁴ break-down pressure

⁵ Hood

⁶ Acoustic Emission

تولید شده حین تحریک شناسایی شد. او چنین نتیجه‌گیری کرد که فناوری انتشار آکوستیک ابزار مهمی را برای پایش شکست مصالح زمین‌شناختی در معرض تحریک هیدرولیکی فراهم می‌کند و حضور سیال ویسکوز تاثیر مهمی بر فرایند شکست دارد. به گونه‌ای که نمونه‌های در معرض سیال با ویسکوزیته بالا، فشار شکست بیشتر، آسیب بیشتر و ابعاد شکست بزرگتری را نسبت به نمونه‌های تحت سیال با ویسکوزیته پایین نشان می‌دهد.

استانشیتس^۱ و همکاران [۲۹] نیز از فناوری انتشار آکوستیک برای بررسی رفتار شکست هیدرولیکی استفاده کردند. آن‌ها دریافتند که تزریق سیال با ویسکوزیته بالا به انتشار پایدار شکستی می‌انجامد که پیش از رسیدن به فشار شکست ایجاد می‌شود. در مقابل، شکست با سیال با ویسکوزیته کم به انتشار ناپایدار شکستی می‌انجامد که تقریباً همزمان با فشار شکست ایجاد می‌شود. رویدادهای انتشار آکوستیک حاصل از عملیات شکست هیدرولیکی در شکل ۲-۱۲ آمده است. این مشاهدات مطابقت خوبی با مدل ارایه شده توسط زوباک [۲۷] دارد.

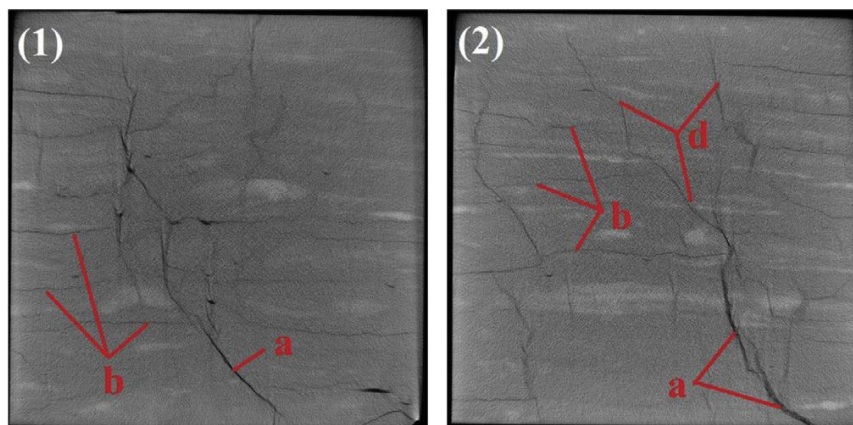


شکل ۲-۱۲ انتشار آکوستیک حاصل از شکست هیدرولیکی [۲۹]

¹ Stanchits

لیچون^۱ و همکاران [۳۰] با استفاده از فناوری CT اسکن، نمونه سنگ‌های آتشفشانی تحت شکست هیدرولیکی را بررسی کردند. تصاویر CT نمونه‌ها پس از آزمایش شکست نشان می‌دهند که شکست‌های هیدرولیکی به برخی از منافذ طبیعی یا ریزترک‌ها متصل هستند. اما شکست در ناحیه‌ای که منافذ طبیعی فراوان هستند، منتشر نمی‌شود. بلکه شکست‌های القا شده، در راستای تنش افقی حداکثر منتشر می‌شوند. آن‌ها همچنین دریافتند که گرادیان شکست مخازن آتشفشانی بسیار بالا بوده و ایجاد شکست‌های القا شده را با دشواری مواجه می‌سازد. بدیهی است که خصوصیات مکانیک سنگی سازندهای اطراف گمانه، عوامل کلیدی در کنترل ایجاد و انتشار شکست‌های هیدرولیکی هستند. به عقیده آن‌ها کلید شکست هیدرولیکی در سنگ‌های آتشفشانی، چگونگی کاهش گرادیان شکست است.

در پژوهش‌های دیگری نیز فناوری CT اسکن برای مطالعه شکست هیدرولیکی به کار رفته است. گو^۲ و همکاران [۳۱] از این فناوری در آزمایش شکست هیدرولیکی رخنمون‌های شیلی^۳ استفاده کردند و تاثیر نرخ تزریق سیال، تفاضل تنش افقی و ویسکوزیته سیال شکست را بررسی کردند. نمونه‌ای از کار آن‌ها در شکل ۲-۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۱۳ تصویر حاصل از CT اسکن پس از ایجاد شکست هیدرولیکی [۳۱]

^۱ Lichun

^۲ Guo

^۳ Shale outcrops

۲-۳-۳- مدلسازی عددی

به علت محدودیت‌های مدل‌های تحلیلی در مطالعه ماهیت پیچیده عملیات شکست هیدرولیکی و همچنین سختی و هزینه‌های زیاد روش‌های آزمایشگاهی، روش‌های عددی مختلفی برای مدلسازی پیچیده شکست هیدرولیکی در مخازن نامتعارف ارایه شده‌اند.

۲-۳-۳-۱ روش المان محدود

در روش المان محدود^۱ (FEM) یک مخزن، به صورت زیردامنه^۲هایی (المان‌های محدود) گسسته‌سازی می‌شود. بر روی هر المان، روش تحلیل توسط یک ترکیب خطی از توابع شکل چندجمله‌ای ساده که به صورت محلی پاسخ کلی را تقریب می‌زنند، توصیف می‌شود. جریان سیال و تغییر شکل‌های ژئومکانیکی بر مبنای تیوری پوروالاستیک بیوت^۳ [۳۲، ۳۳] کوپل می‌شوند. انتشار ترک نیز با استفاده از مکانیک شکست الاستیک خطی^۴ (LEFM) مدل می‌شود [۲۴].

۲-۳-۳-۲ روش المان محدود توسعه یافته

مدلسازی رشد ترک در روش FEM، مستلزم مش‌بندی مجدد مخزنی است که توسط یک شکست هیدرولیکی در حال انتشار قطع شده است. وقتی دو کد عددی مختلف - مثل کد FEM برای شبیه‌سازی ژئومکانیکی و روش حجم محدود^۵ (FVM) و یا روش تفاضل محدود^۶ (FDM) برای شبیه‌سازی جریان سیال - کوپل می‌شوند، این مش‌بندی مجدد که با انتقال داده‌ها نیز همراه است، مدل‌های FEM را از لحاظ محاسباتی بسیار پرهزینه می‌کند. برای حل این مشکل، روش المان محدود

¹ Finite Element Method

² Subdomain

³ Biot's poro-elastic theory

⁴ linear elastic fracture mechanics

⁵ Finite Volume Method

⁶ Finite Difference Method

توسعه یافته^۱ (XFEM) معرفی شد که در آن شکست‌های القا شده بدون نیاز به مش‌بندی مجدد منتشر می‌شوند [۳۴].

۲-۳-۳ روش المان مرزی

روش المان مرزی^۲ (BEM)، تحلیل الاستیک را با گسسته‌سازی مرزهای دامنه (صفحات شکست) تقریب می‌زند. دامنه در BEM به دو ناحیه داخلی (شکست) و ناحیه خارجی (سنگ بکر) که توسط مرز (دیواره شکست) از هم جدا شده‌اند، تقسیم می‌شود. تمام المان‌های موجود در دامنه، یک میدان تنش و کرنش تولید می‌کنند [۲۴].

مزیت روش BEM این است که نیازی به گسسته‌سازی محیط پیوسته ندارد. اما با این حال، حل هر المان مرزی، میدانی در دیگر المان‌های مرزی ایجاد می‌کند که منجر به حل ماتریس‌های بزرگ می‌شود. در نتیجه روش BEM برای مخازن بزرگ کارایی ندارد. عیب دیگر روش BEM این است که قابلیت مدل‌سازی ناهمگنی خصوصیات سنگ را ندارد [۳۵].

۲-۳-۴ روش جابجایی-ناپیوستگی

روش جابجایی-ناپیوستگی^۳ (DDM) از روش BEM مشتق شده است. کروچ^۴ [۳۶] این روش عددی را برای حل مسایل مقدار مرزی پیچیده در صفحه الاستواستاتیک^۵ توسعه داد. این روش شامل جایگذاری N جابجایی-ناپیوستگی با مقدار مجهول در راستای مرزهای ناحیه مورد نظر و سپس حل یک دستگاه معادلات جبری به منظور یافتن مقادیر ناپیوستگی‌ای است که جابجایی‌های با مقدار مشخص را تولید می‌کنند.

¹ Extended Finite Element Method

² Boundary Element Method

³ Displacement Discontinuity Method

⁴ Crouch

⁵ Elasto-static

تارا سوفس^۱ و قاسمی [۳۷] با استفاده از این روش، نقش تنش‌های حرارتی بر انتشار ترک در مجاورت یک گمانه و نفوذپذیری شکست حین عملیات تزریق را بررسی کردند.

۲-۳-۵ روش المان مجزا

روش المان مجزا^۲ (DEM)، عبارتی عمومی برای روش‌های عددی سیستم‌های ناپیوسته است و تمام روش‌های عددی‌ای را که دامنه مساله را به صورت مجموعه‌ای از واحدهای مستقل در نظر می‌گیرد، شامل می‌شود. این روش اساساً برای مسایل سنگ‌های درزه‌دار و محیط‌های دانه‌ای به کار می‌رود. اما کاربرد آن در مسایل مکانیک سیالات نیز توسعه یافته است. فرمول‌بندی DEM بر اساس نقاط تماس بین المان‌های مجزا، سینماتیک و مکانیزم تغییر شکل آن‌ها (در صورت تغییر شکل‌پذیر بودن) است [۳۸].

توماک^۳ و گوتیرز^۴ [۳۹] از روش DEM بر مبنای مدل پیوند ذرات^۵ (BPM) یک مدل شکست هیدرولیکی در محیط الاستوپلاستیک^۶ با تخلخل پایین تحت سیال ویسکوز را شبیه‌سازی کردند که با استفاده از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شد. نتایج عددی (شکل ۲-۱۴-الف) و آزمایشگاهی (شکل ۲-۱۴-ب)، هم از لحاظ کمی و هم از لحاظ کیفی با یکدیگر مطابقت داشتند. خروجی اصلی این پژوهش، درک بهتر نقش ویسکوزیته سیال در توسعه میدان تنش-کرنش بود. دیدگاه میکرومکانیکی حاکی از آن است که ویسکوزیته بالای سیال به مساحت بزرگ مقیاس وسیعی در اطراف گمانه آسیب وارد می‌کند. همچنین ویسکوزیته سیال تاثیر زیادی بر فشار شکست ندارد. اما برای انتشار شکست مهم است. سیال با ویسکوزیته بالا قادر است شکست اولیه را ایجاد کند. اما به جای انتشار، ترک محبوس شده و پس

¹ Tarasovs

² Discrete Element Method

³ Tomac

⁴ Gutierrez

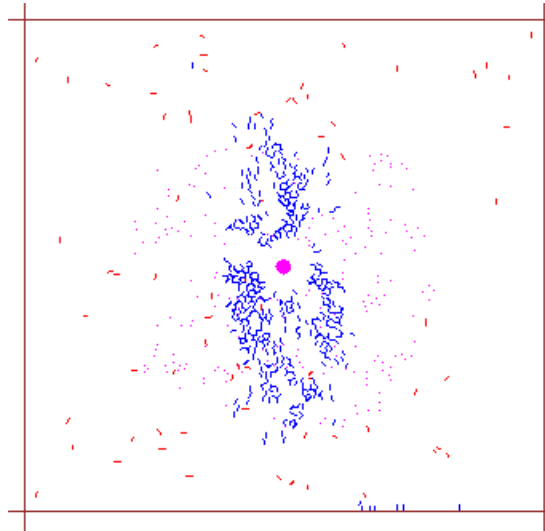
⁵ Bonded Particle Method

⁶ Elasto-plastic

از آن ریزترک‌های اضافی در مجاورت گمانه ایجاد می‌شود. دلیل این امر آن است که در چنین شرایطی افت فشار اتفاق نمی‌افتد.



(ب)

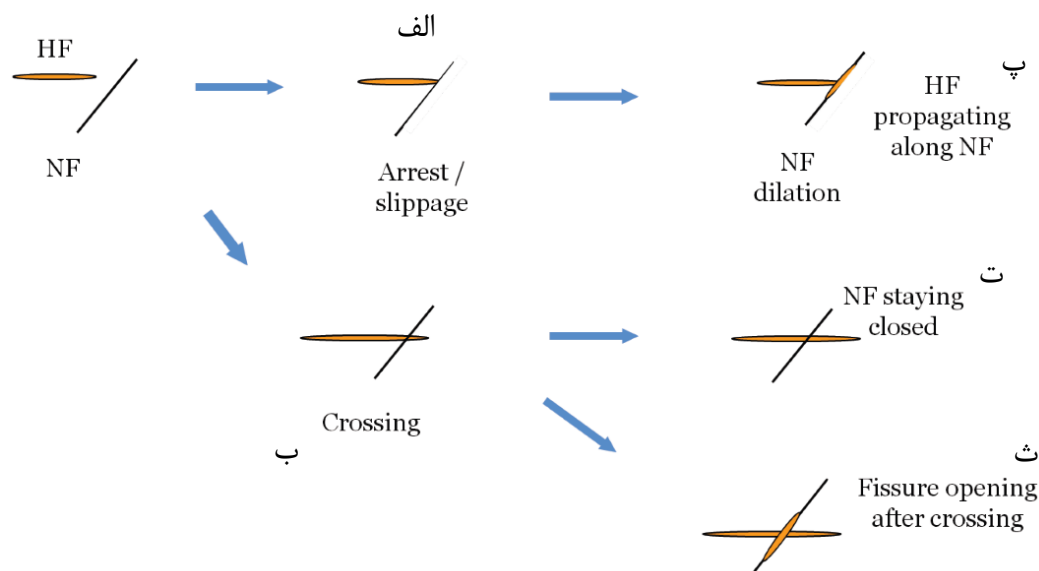


(الف)

شکل ۲-۱۴ شکست هیدرولیکی توسط سیال شکست با ویسکوزیته بالا (الف) مدلسازی عددی (ب) آزمون آزمایشگاهی [۳۹]

توماک و گوتیرز در مطالعه دیگری [۴۰] یک مدل هیدروترمو مکانیکی بر مبنای مدل پیوند ذرات (BPM) را برای مطالعه تاثیر اختلاف دمای بین سنگ و سیال شکست در ایجاد و انتشار شکست هیدرولیکی در سیستم‌های زمین گرمایی توسعه دادند. نتایج مدلسازی‌ها نشان داد که تنش‌های حرارتی باعث ایجاد ریزترک‌هایی در شکست در حال انتشار می‌شوند که امکان نفوذ سیال به درون سنگ در مجاورت شکست را فراهم می‌کند که به ایجاد ریزترک‌های بیشتر می‌انجامد. مقایسه این مدل‌ها با مدل‌های شکست هیدرولیکی که تاثیر اختلاف دمای بین سنگ و سیال شکست در نظر گرفته نشده، گویای آن است که شکست ایجاد شده در مدل هیدروترمو مکانیکی (شکل ۲-۱۵-الف) کوتاه‌تر از مدل هیدرومکانیکی (شکل ۲-۱۵-ب) است. دیگر اینکه ناحیه نزدیک گمانه که شکست در آن ایجاد شده، یعنی جایی که سیال سرد وارد سنگ داغ می‌شود، در مدل هیدروترمو مکانیکی پهن‌تر از مدل هیدرومکانیکی است.

چوپراکوف^۱ و همکاران [۴۴] اندرکنش‌های ممکن بین شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی را خلاصه کردند که در شکل ۱۶-۲ مشاهده می‌شود. یک شکست هیدرولیکی پس از تماس با درزه طبیعی، یا محبوس می‌شود (شکل ۱۶-۲ الف) یا از آن عبور می‌کند (شکل ۱۶-۲ ب). در حالتی که حبس‌شدگی به علت زاویه میل زیاد اتفاق بیفتد، شکست هیدرولیکی ممکن است دچار لغزش شود و درزه طبیعی اتساع یابد (شکل ۱۶-۲ پ). وقتی زاویه میل کم باشد و شکست هیدرولیکی از درزه طبیعی عبور کند، ممکن است درزه طبیعی بسته بماند (شکل ۱۶-۲ ت) یا اتساع یابد (شکل ۱۶-۲ ث).



شکل ۱۶-۲ تصویر شماتیک اندرکنش‌های ممکن بین شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی [۴۴]

در ادامه پژوهش‌های انجام شده در این خصوص مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۴-۱- روش‌های تحلیلی و ریاضی

وارپینسکی^۲ و تویفل^۳ [۴۵] با در نظر گرفتن اثر نفوذپذیری، لغزش برشی، درزه‌های طبیعی،

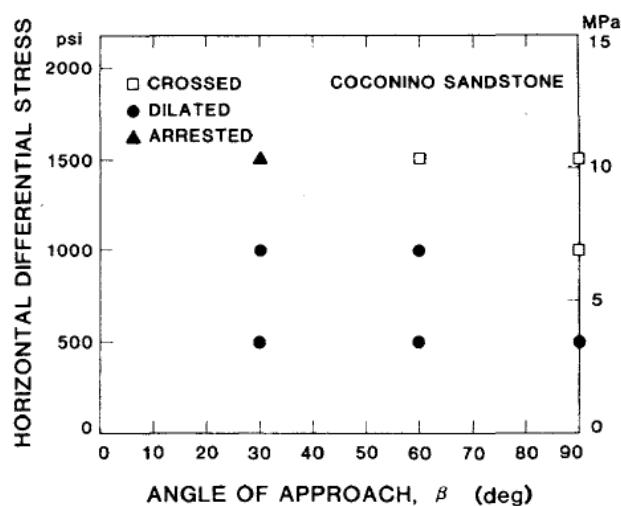
نشت سیال و آشفستگی میدان تنش در اثر شکست هیدرولیکی، اولین مدل تحلیلی بررسی اندرکنش

¹ Chuprakov

² Warpinski

³ Teufel

شکست هیدرولیکی با درزه‌های طبیعی را ارایه دادند و از مقایسه آن با آزمون‌های آزمایشگاهی چنین نتیجه‌گیری کردند که وقتی تفاضل تنش‌های برجا کم است، ناپیوستگی‌های زمین‌شناختی احتمالا دچار اتساع می‌شوند و وقتی تفاضل تنش‌های برجا زیاد باشد، اتساع درزه‌ها انتظار نمی‌رود. اما امکان لغزش برشی در یک ناحیه عظیم وجود دارد که موجب افزایش نشست سیال می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات آن‌ها در شکل ۱۷-۲ آمده است.



شکل ۱۷-۲ تاثیر زوایه میل درزه و تفاضل تنش‌های برجا بر اندرکنش درزه طبیعی و شکست هیدرولیکی [۴۵]

پوتلوری^۱ و همکاران [۴۶] با توسعه معیار وارپینسکی و تویفل، مودهای مختلف انتشار را بررسی کردند. به عقیده آن‌ها وقتی تنش نرمال بر روی درزه طبیعی نسبت به چقرمگی شکست سنگ زیاد باشد، شکست هیدرولیکی از درزه طبیعی عبور می‌کند. در غیر این صورت اتساع درزه طبیعی رخ می‌دهد که یا به انتشار شکست از نوک درزه طبیعی می‌انجامد یا در نقطه‌ای از درزه طبیعی از آن عبور می‌کند.

وَنگ^۲ و همکاران [۴۷] با توسعه روش شبه سه بعدی، مدل شکست نامتعارف^۳ (UFM) را برای تحلیل گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار تعریف کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که

¹ Potluri

² Weng

³ Unconventional Fracture Model

ناهم سانگردی تنش، درزه‌های طبیعی و اصطکاک درزه‌ها نقش حیاتی در پیچیدگی شبکه شکست ایفا می‌کنند. کاهش ناهمسانگردی تنش یا اصطکاک درزه‌ها می‌تواند هندسه شکست القا شده را از یک شکست دوسویه^۱ به یک شبکه شکست پیچیده تغییر دهد. این نتایج اهمیت بافت سنگ و تنش‌ها را در پیچیدگی شکست در مخازن نامتعارف نشان می‌دهد.

۲-۴-۲- پژوهش‌های آزمایشگاهی

زوباک [۲۷] در آزمایشات خود بر روی نمونه‌های درزه‌دار مشاهده کرد هنگامی که سیال شکست یک گل ویسکوز است، همواره یک شکست هیدرولیکی با جهت‌گیری درست ایجاد می‌شود. زوباک این اتفاق را به افت فشار شدیدی مرتبط دانست که در درزه‌های طبیعی اتفاق می‌افتد. اگرچه به یک فشار شکست بسیار بالا منجر می‌شود.

هود [۲۸] در ادامه مطالعات خود بر روی فرایند شکست هیدرولیکی با استفاده فناوری انتشار آکوستیک، درزه‌های طبیعی را نیز در آزمایشات خود در نظر گرفت و مشاهده کرد که وقتی ویسکوزیته سیال شکست کم است، حضور درزه‌های طبیعی موجب کاهش مقاومت جریان و افزایش نشت سیال از طریق شکستگی‌ها می‌شود.

ژو^۲ و همکاران [۴۸] تاثیر مقاومت برشی درزه‌های طبیعی بر انتشار شکست را بررسی کردند. برای این کار یک سری آزمایشات شکست هیدرولیکی در سلول سه محوری خود کنترل انجام شد. نتایج حاکی از آن است که در یک رژیم تنش نرمال، علاوه بر تاثیر تفاضل تنش‌های اصلی افقی و زاویه میل درزه نسبت به راستای انتشار شکست هیدرولیکی، مقاومت برشی درزه‌های طبیعی نیز دیگر عامل موثر بر رفتار شکست هیدرولیکی است. با افزایش مقاومت برشی درزه‌های طبیعی، امکان حبس شدگی افزایش

^۱ bi-wing

^۲ Zhou

می‌یابد. اگر بازشدگی درزه طبیعی کم باشد، عبور شکست هیدرولیکی از درزه طبیعی رفتار غالب است. در غیر این صورت، اتساع درزه رخ می‌دهد.

یوشی^۱ و همکاران [۴۹] با استفاده از فناوری CT اسکن، آزمایشاتی در رابطه با انتشار شبکه شکست هیدرولیکی در شیل‌های گازی لایه‌ای انجام دادند. نتایج به دست آمده آن‌ها به این گونه است که صفحات لایه‌بندی نسبتاً باز در شیل، در ایجاد شکست‌های پیچیده مفید هستند و به ارتباط بهتر شکست‌های هیدرولیکی با درزه‌های طبیعی می‌انجامد. ایجاد یک شکست غالب در راستای صفحات لایه‌بندی در شرایط تفاضل تنش پایین، باعث کاهش حجم تحریک شده مخزن^۲ (SRV) می‌شود. ایجاد یک شبکه شکست بزرگ‌مقیاس، مستلزم شکست‌های هیدرولیکی متصل به درزه‌های طبیعی و همچنین شکست بافت پیوسته سنگ است. آزمایشات آن‌ها نشان داد که تفاضل تنش حد وسط، هم برای رشد شکست‌های هیدرولیکی جدید و هم برای فعالسازی درزه‌های طبیعی موجود در شیل موثر است.

۲-۴-۳- مدل‌سازی عددی

روش‌های عددی و نحوه فرمول‌بندی و کاربرد آن‌ها، در بخش ۲-۳-۳ به اختصار مرور و برخی از مدل‌سازی‌های انجام شده با روش‌های مختلف بدون در نظر گرفتن درزه‌های طبیعی ارائه شد. در ادامه کاربرد روش‌های عددی در مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار بررسی می‌شود.

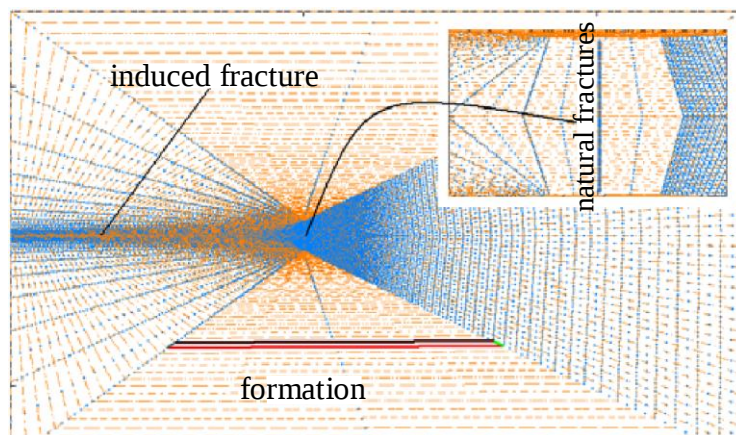
۲-۴-۳-۱ روش المان محدود

رحمان [۵۰] با استفاده از روش FEM، اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی را در یک مخزن پوروالاستیک بررسی کرد و یک معیار اندرکنش شکست ارائه داد. مش‌بندی مدل المان محدود ارائه شده در شکل ۲-۱۸ مشاهده می‌شود. عبور شکست هیدرولیکی از درزه‌های طبیعی، خمش و

¹ Yushi

² Stimulated Reservoir Volume

محبوس شدن و اتساع برشی درزه‌های طبیعی در زوایای میل متغیر تحت شرایط تنش برجا، خصوصیات مختلف سنگ مخزن و سیال و همچنین مشخصات مختلف درزه طبیعی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدلسازی نشان می‌دهد که وقتی یک شکست هیدرولیکی، درزه طبیعی را قطع می‌کند، ابتدا محبوس می‌شود. با افزایش فشار به علت تداوم پمپاژ، شکست هیدرولیکی یا از درزه طبیعی عبور می‌کند و یا موجب بازشدگی آن می‌شود که این مساله به زاویه میل، تفاضل تنش، فشار بازشدگی و باز یا بسته بودن درزه طبیعی بستگی دارد.



شکل ۲-۱۸ مش‌بندی مدل المان محدود شکست هیدرولیکی در یک مخزن درزه‌دار طبیعی [۵۰]

۲-۳-۴ روش المان محدود توسعه یافته

طالقانی و اولسون^۱ [۵۱] یک الگوی انتشار شکست هیدرولیکی را بر اساس روش XFEM به منظور بهینه سازی پارامترهای عملیاتی تحت شرایط پیچیده انتشار، ارایه دادند. هدف اصلی آن‌ها از این پژوهش، بررسی عوامل تعیین کننده انحراف شکست هیدرولیکی در حضور درزه‌های طبیعی بود. نتایج نشان می‌دهد که پیچیدگی الگوی شکست، قویا توسط شدت ناهمسانگردی تنش‌های برجا، چقرمگی سنگ، مقاومت درزه‌های طبیعی و جهت‌گیری درزه‌های طبیعی نسبت به شکست هیدرولیکی کنترل می‌شود. به منظور پیش‌بینی انحراف شکست یک معیار انرژی مبتنی بر انرژی شکست سنگ اتخاذ شد.

¹ Olson

۲-۴-۳ روش المان مرزی

کوشلف^۱ و قاسمی [۵۲] مسیر یک شکست هیدرولیکی را در نزدیکی درزه‌های طبیعی با استفاده از روش المان مرزی متغیر پیچیده مطالعه کردند. آن‌ها ثابت کردند که شیب گسل، خصوصیات اصطکاکی و شرایط سطوح شکست مهم‌ترین عواملی هستند که بر مسیر شکست هیدرولیکی تاثیر می‌گذارند.

۲-۴-۴ روش جابجایی-ناپیوستگی

جفری^۲ و همکاران [۵۳] با استفاده از محاسبات زون لغزش و مدل دو بعدی DDM، به مطالعه اندرکنش شکست هیدرولیکی دارای دو شاخه تقریباً موازی و درزه‌های طبیعی پرداختند و محاسبات خود را با آزمون‌های آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی مقایسه کردند. نتایج این مدل‌سازی نشان می‌دهند که فشار لازم برای انتشار یک شکست چندگانه بسیار بیشتر از فشار لازم برای توسعه یک شکست تک‌صفحه‌ای است. ایجاد زون‌های لغزشی، چقرمگی ظاهری شکست سنگ را افزایش می‌دهد. انرژی صرف شده برای تغییر شکل‌های غیرالاستیک در زون‌های لغزشی اطراف شکست، انرژی موجود برای توسعه شکست را کاهش می‌دهد. همچنین شکست‌های هیدرولیکی می‌توانند در نقطه تقاطع با درزه‌های طبیعی دچار انحراف شوند.

۲-۴-۵ روش المان مجزا

ناگل^۳ و همکاران [۵۴] از نرم‌افزار المان مجزای 3DEC و یک مدل شبکه گسستگی‌های مجزا^۴ (DFN) واقعی برای مدل‌سازی سه بعدی مخزن و شکست هیدرولیکی استفاده کردند. مدل‌های آن‌ها نشان داد که افزایش نرخ تزریق، شدیداً تعداد گسیختگی‌های کششی را افزایش می‌دهد. نرخ‌های تزریق کم،

¹ Koshelev

² Jeffrey

³ Nagel

⁴ Discrete Fracture Network

گسیختگی برشی ایجاد می‌کند. در اثر تزریق سیال با ویسکوزیته کم، مساحت ناحیه‌ای که در اثر برش گسیخته می‌شود، بسیار بیشتر از حالتی است که سیال با ویسکوزیته بالا تزریق می‌شود.

کاتساگا^۱ و همکاران [۵۵] مدل‌های مشابهی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC و DFN انجام دادند و اهمیت خصوصیات DFN بر جریان سیال در مخازن کم‌تراوا را نشان دادند.

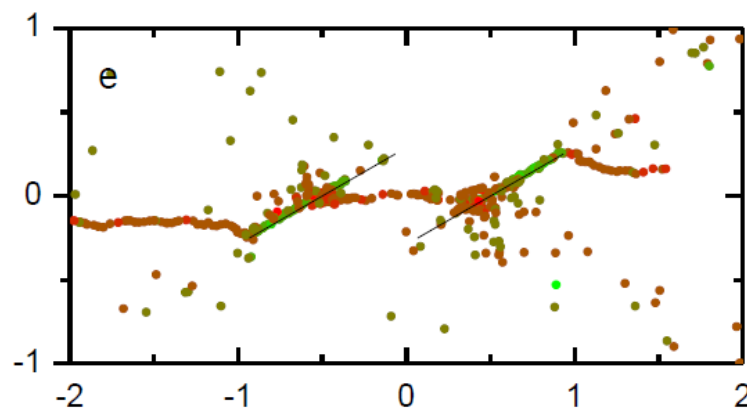
ریاحی و همکاران [۵۶] نرم‌افزار المان مجزای UDEC و شبکه DFN را برای مدلسازی اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی به کار بردند. مشاهده شد که پتانسیل گسیختگی برشی با افزایش احتمال وجود درزه‌های بزرگ در مدل افزایش می‌یابد و زاویه اتساع درزه‌ها نیز پارامتر مهمی در تحریک است. به گونه‌ای که هرچه زاویه اتساع بیشتر باشد، ناحیه‌ای که توسط گسیختگی برشی تحریک می‌شود کوچک‌تر است. اما اتصال شکستگی‌ها به یکدیگر بهتر شده و بازشدگی دائمی آن‌ها بیشتر می‌شود.

یون^۲ و همکاران [۵۷] نرم‌افزار PFC^{2D} را برای شبیه‌سازی اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی در سنگ سخت کم‌تراوا به کار بردند. به علاوه آن‌ها از یک الگوریتم محاسباتی لرزه‌ای برای محاسبه بزرگای رویدادهای لرزه‌ای شبیه‌سازی شده که همان شکست پیوندها هستند، استفاده کردند. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که شکست هیدرولیکی وقتی به یک درزه طبیعی با زاویه میل کم می‌رسد، با آن ادغام شده و سیال، درون درزه طبیعی جریان یافته و برش هیدرولیکی رخ می‌دهد. وقتی زاویه میل زیاد باشد، شکست هیدرولیکی در درزه طبیعی محبوس می‌شود. یک شکست هیدرولیکی که توسط سیال با ویسکوزیته بالا ایجاد می‌شود، کمتر تحت تاثیر درزه‌های طبیعی قرار می‌گیرد. رویدادهای

¹ Katsaga

² Yoon

لرزه‌ای حاصل از شکست هیدرولیکی ایجاد شده در یک مخزن دارای درزه طبیعی با زاویه میل 30° در شکل ۱۹-۲ نشان داده شده است.

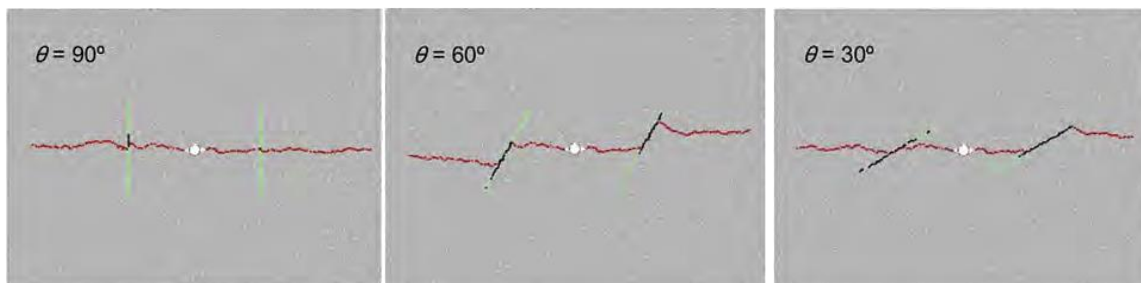


شکل ۱۹-۲ رویدادهای لرزه‌ای حاصل از شکست هیدرولیکی و اندرکنش آن با درزه طبیعی با زاویه میل 30° [۵۷] در مطالعه دیگری با استفاده از نرم‌افزار PFC^{2D} ، ژانگ^۱ و همکاران [۵۸] تاثیر پارامترهای مختلف بر اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها چنین نتیجه‌گیری کردند که کاهش زاویه بین درزه‌های طبیعی و شکست هیدرولیکی، مانع عبور شکست هیدرولیکی از درزه‌های طبیعی می‌شود که گسترش شکست در درزه‌ها را به دنبال دارد (شکل ۲-۲۰). ضمن اینکه افزایش نفوذپذیری درزه باعث اتساع بیشتر درزه‌های طبیعی می‌شود (شکل ۲-۲۱). تحلیل حساسیت نسبت به ویسکوزیته سیال شکست نشان داد که با افزایش ویسکوزیته، طول کمتری از درزه طبیعی دچار اتساع می‌شود (شکل ۲-۲۲).

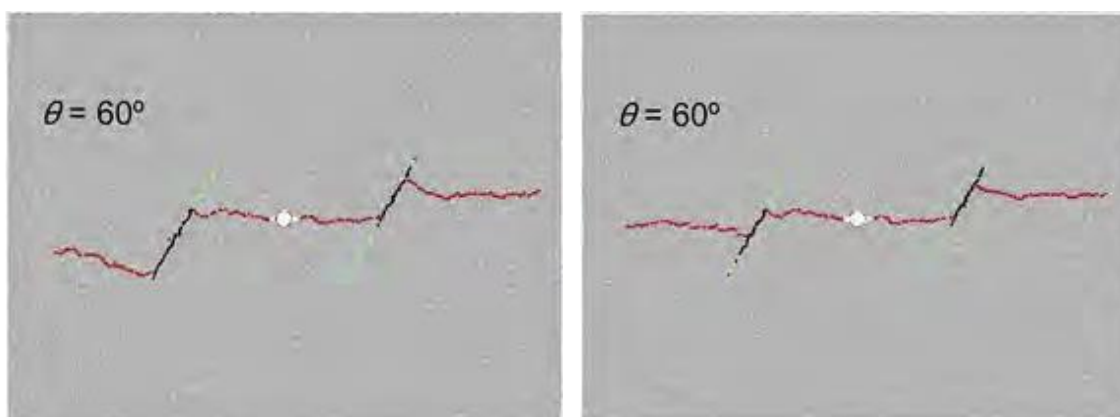
سرمدی [۵۹] با مقایسه نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی در نرم‌افزار PFC^{2D} و آزمون‌های آزمایشگاهی نشان داد که افزایش زاویه میل و ضریب اصطکاک درزه‌ها باعث عبور شکست هیدرولیکی از درزه‌های طبیعی می‌شود و با کاهش این پارامترها، تمایل شکست هیدرولیکی به حبس شدن در درزه‌های

¹ Zhang

طبیعی افزایش می‌یابد. همچنین برای شرایط مختلف، یک حد آستانه زاویه میل وجود دارد که در مقادیر کمتر از آن، شکست هیدرولیکی در داخل درزه طبیعی حبس می‌شود.



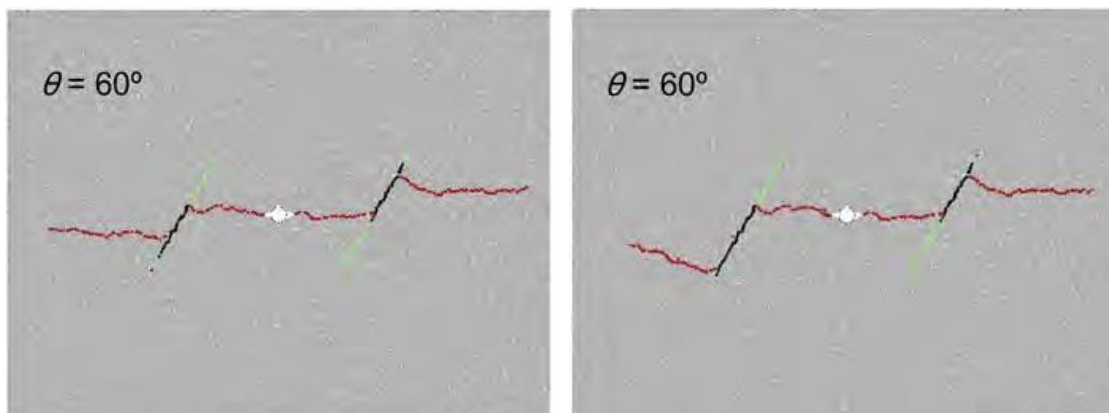
شکل ۲-۲۰ اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی با زوایای میل مختلف [۵۸]



(ب)

(الف)

شکل ۲-۲۱ تاثیر درزه‌های طبیعی با نفوذپذیری (الف) ۰/۱ mD (ب) ۱۰۰ mD بر الگوی انتشار شکست هیدرولیکی [۵۸]



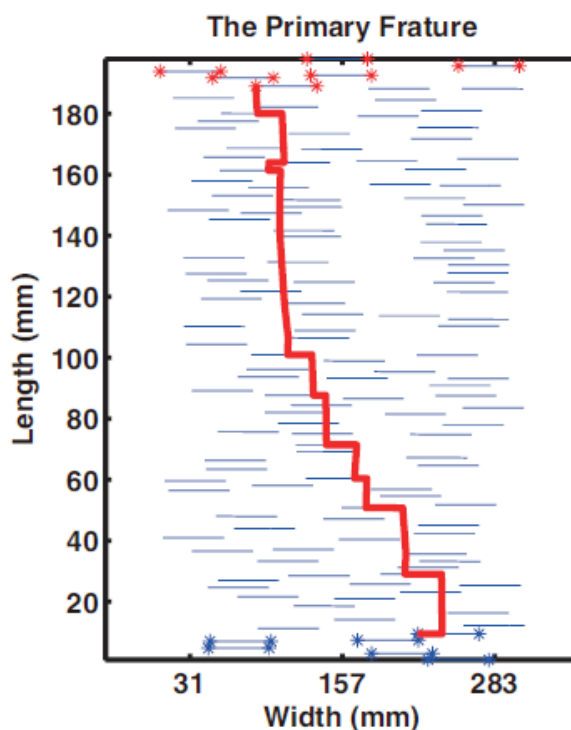
(ب)

(الف)

شکل ۲-۲۲ الگوی شکست هیدرولیکی ایجاد شده تحت سیال شکست با ویسکوزیته (الف) ۰/۰۰۱ Pa.s (ب) ۰/۱ Pa.s [۵۸]

۲-۴-۳-۶ الگوریتم دکسترا

وو^۱ و لی^۲ [۶۰] یک روش عددی انتشار شکست هیدرولیکی در شبکه درزه‌های طبیعی مجزا را ارائه دادند. این روش بر مبنای شکست وزنی توسعه یافت که از ترکیب الگوریتم دکسترا^۳، روش برداری و نظریه انرژی مشتق شده است و به ادعای آن‌ها کارایی محاسباتی بالایی دارد. تحلیل‌های حساسیت نتایج جالبی را نشان دادند. مقدار وزنی کوتاه‌ترین مسیر با افزایش چگالی و طول درزه‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش زاویه بین شکست هیدرولیکی و جهت تنش اصلی حداکثر افزایش می‌یابد. در شکل ۲-۱۹ مقایسه نتیجه حاصل از مدلسازی با الگوریتم دکسترا (شکل ۲-۲۳-الف) و یک تجربه آزمایشگاهی (شکل ۲-۲۳-ب) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۳ الگوی شکست حاصل از (الف) مدلسازی عددی با الگوریتم دکسترا و (ب) آزمون آزمایشگاهی [۶۰]

¹ Wu

² Li

³ Dijkstra's Algorithm

۲-۴-۷ روش‌های هیبریدی

صفری و قاسمی [۶۱] از کوپل روش DDM سه بعدی (برای مدل‌سازی شکست‌ها و درزه‌ها) و روش المان محدود گالرکین^۱ (برای مدل‌سازی معادلات جریان درون شکست‌ها) استفاده کردند. مدل آن‌ها اهمیت اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی را بر تغییر شکل برشی و لغزش شکست نشان داد.

هافمن^۲ و همکاران [۶۲] نخستین بار، کاربرد جامع کوپل روش DEM و FEM را به وسیله نرم‌افزارهای PFC^{2D} و OpenGeoSys نشان دادند. این رویکرد امکان ارزیابی همزمان تاثیر مهندسی مخازن و عوامل طبیعی بر الگوهای رشد ترک و عملیات شکست هیدرولیکی را فراهم آورد.

۲-۵- جمع‌بندی

فرایند شکست هیدرولیکی را می‌توان به صورت ایجاد یک شکستگی درون محیط سنگی تعریف کرد که در اثر فشار سیال ایجاد شده و در محیط انتشار می‌یابد. مهم‌ترین کاربرد عملیات شکست هیدرولیکی را می‌توان در صنعت نفت و به عنوان ابزاری برای ازدیاد برداشت از مخازن نامتعارف نفت و گاز دانست.

در این فصل پس از ارائه کلیاتی درباره شکست هیدرولیکی و کاربردهای آن، به تاریخچه استفاده از شکست هیدرولیکی پرداخته شد. همان‌طور که گفته شد این عملیات در سال ۱۹۴۷ معرفی شد و ظرف مدت کوتاهی کاربرد گسترده‌ای پیدا کرد. در ادامه، اهمیت شکست هیدرولیکی و نقش آن در میزان تولید و قیمت گاز طبیعی تشریح شد. سپس توضیحاتی در باب مکانیزم ایجاد شکست هیدرولیکی و توصیف فیزیکی آن، همراه با روابط کلاسیک شکست هیدرولیکی ارائه شد.

¹ Galerkin

² Hofmann

بخش دیگر این فصل به مرور نوشته‌جات و تلاش‌های سایر محققان در خصوص مطالعه هندسه و توسعه شکست هیدرولیکی اختصاص یافت. مدل‌های شکست پنی شکل، PKN، KGD و مدل‌های شبه سه بعدی و سه بعدی کامل، به عنوان روش‌های تحلیلی و ریاضی مطالعه شکست هیدرولیکی مورد بحث قرار گرفتند. سپس پژوهش‌های آزمایشگاهی و استفاده از فناوری‌های مختلف مثل انتشار آکوستیک و CT اسکن و نتایج آن‌ها بررسی شد. در ادامه، مدل‌سازی‌های عددی انجام شده با استفاده از روش‌های المان محدود، المان محدود توسعه یافته، المان مرزی، جابجایی-ناپیوستگی و المان مجزا به اختصار ارائه شد.

همان طور که ذکر شد، مخازن نامتعارف شامل درزه‌های طبیعی هستند. بنابراین داشتن درک صحیح از رفتار شکست هیدرولیکی پس از برخورد با این درزه‌های طبیعی بسیار حیاتی است. از این رو، در بخش آخر این فصل به این موضوع پرداخته شد. پژوهش‌های پیشین، شامل روش‌های تحلیلی، آزمون‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده با روش‌های عددی مختلف ارائه و توضیح داده شد که خصوصیات درزه‌های طبیعی، چگونه می‌توانند بر الگوی انتشار یک شکست هیدرولیکی تاثیر بگذارند.

فصل سوم

تئوری روش عددی

۳-۱ پیش‌گفتار

در بخش‌های پیشین نمونه‌هایی از مدل‌های تحلیلی، تجارب آزمایشگاهی و مدلسازی‌های عددی انجام شده در ارتباط با شکست هیدرولیکی و اندرکنش آن با درزه‌های طبیعی ارایه شد.

پیشرفت روزافزون فناوری و ظهور رایانه‌های پرسرعت دروازه‌های جدیدی را بر محققان گشوده است. امروزه استفاده از رایانه در تمامی رشته‌های علمی امری رایج است. علوم فنی و مهندسی به سبب ماهیت تحلیلی، کاربرد کامپیوتر را بیشتر از سایر علوم به خود دیده‌اند. علم ژئومکانیک و مکانیک سنگ نیز از این قاعده مستثنی نبوده و روش‌های عددی مختلفی -با کاربردهای متفاوت- در این حوزه ارایه شده‌اند. مقایسه خروجی این روش‌ها با آنچه که در عمل مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که این روش‌ها، ابزار بسیار مناسبی برای تحلیل رفتار سنگ تحت شرایط مختلف هستند. از این رو استفاده از روش‌های عددی، همواره یکی از گزینه‌های پیش روی مهندسين، در طراحی‌ها و تحلیل‌ها بوده است.

از سوی دیگر، حضور درزه‌ها و ناپیوستگی‌های طبیعی، شرایط ناهمسانگرد و ناهمگن توده‌سنگ و کوپل آن با خصوصیات جریان سیال و پارامترهای عملیاتی در این مورد بخصوص را نمی‌توان با روش‌های تحلیلی و ریاضی مدل کرد. اگرچه می‌توان در آزمون‌های آزمایشگاهی و با استفاده از فناوری‌هایی مثل انتشار آکوستیک و CT اسکن، پیچیدگی شرایط توده‌سنگ را تا حد زیادی شبیه‌سازی کرد، اما با این حال، هزینه بالا و زمان‌بر بودن آن‌ها نیز محدودیت ایجاد می‌کند.

در بخش‌های ۲-۳-۳ و ۲-۴-۳ خلاصه‌ای از انواع روش‌های عددی و کاربرد آن‌ها در مدلسازی شکست هیدرولیکی ارایه شد. هدف این پژوهش، بررسی رفتار شکست هیدرولیکی در مواجهه با درزه‌های طبیعی است. برای این منظور، نرم‌افزار المان مجزای PFC^{2D} انتخاب شده است.

در این فصل کد جریان ذره، روند ساخت و بررسی توده سنگ مصنوعی توسط نرم افزار PFC^{2D} ، مدل سازی جریان سیال و همچنین الگوریتم جریان سیال با استفاده از آزمون جریان داری تشریح شده است.

۳-۲ نرم افزار PFC^{2D}

نرم افزار PFC^1 یکی از نرم افزارهای گروه مهندسين مشاور آیتسکا^۲ است که با استفاده از روش المان مجزا (DEM) و بر مبنای مدل پیوند ذرات (BPM) طراحی شده است. روش المان مجزا نخستین بار توسط کاندال^۳ در سال ۱۹۷۱ ارائه شد [۶۳]. این روش به منظور مدل سازی حرکت و اندرکنش تعداد زیادی از بلوک های مجزا، تحت شرایط استاتیک یا دینامیک طراحی شده است. پوتیوندی^۴ [۶۴] با توسعه روش DEM، مدل پیوند ذرات را ارائه داد.

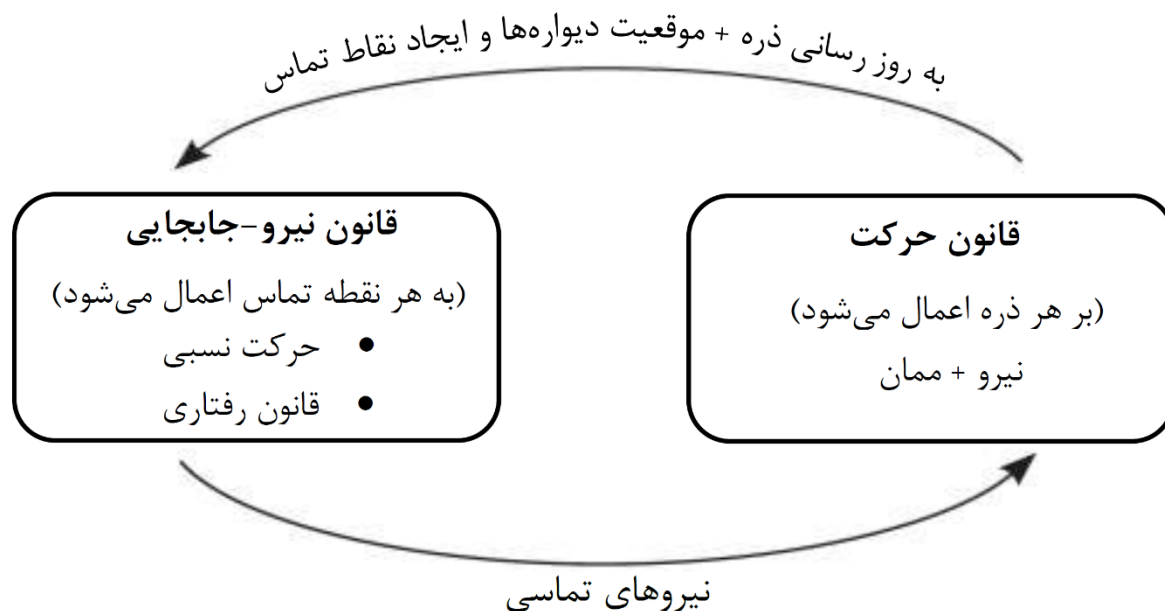
در نرم افزار PFC قانون دوم نیوتن بر حرکت ذرات حاکم است. چرخه محاسباتی در PFC یک الگوریتم گام زمانی است که مستلزم استفاده مکرر از قانون حرکت برای هر ذره، قانون نیرو-جابجایی برای هر نقطه تماس و به روزرسانی موقعیت دیواره هاست. چرخه محاسباتی در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. نقاط تماس در آغاز هر گام زمانی و از طریق ذرات مشخص شده و موقعیت معین دیواره ها، به روزرسانی می شوند. سپس قانون نیرو-جابجایی به هر نقطه تماس اعمال می شود تا نیروهای تماسی به روزرسانی شوند. در ادامه قانون حرکت بر هر ذره اعمال می شود تا سرعت و موقعیت آن ذره، بر اساس نیرو و ممان به دست آمده از نیروهای تماسی وارد بر آن، به روزرسانی شود [۶۵].

¹ Particle Flow Code

² Itasca Consulting Group

³ Cundall

⁴ Potyondy



شکل ۱-۳ چرخه محاسباتی در PFC^{2D} [۶۵]

۳-۲-۱ قانون نیرو-جابجایی

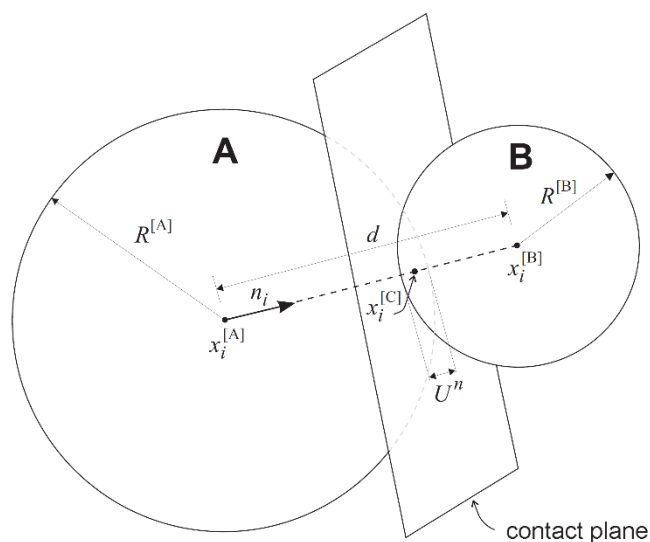
کد جریان ذره، رفتار مکانیکی سنگ را با ارایه آن به صورت مجموعه ای از هزاران ذره دایره ای (در حالت 2D) یا کروی (در حالت 3D) پیوند داده شده (که همه آن ها می توانند مستقل از هم جابجا شوند) شبیه سازی می کند. ذرات در نقاط تماس به یکدیگر پیوند داده شده اند. این ذرات، صلب در نظر گرفته می شوند. اما تغییر شکل یا همپوشانی در نقاط تماس آن ها رخ می دهد. نقاط تماس فقط در یک نقطه -و نه در یک سطح محدود- حضور دارند [۶۵].

نقطه تماس دو ذره ($x_i^{[C]}$) در ناحیه همپوشانی روی خط واصل مراکز دو ذره واقع است (شکل

۳-۲). نیروی نرمال در نقطه تماس (مولفه $\hat{I}$ ام) به وسیله قانون نیرو-جابجایی محاسبه می شود:

$$F_i^n = K^n U^n n_i \quad ۱-۳$$

که در آن K^n سختی نرمال در نقطه تماس، U^n جابجایی نرمال (همپوشانی) و n_i مولفه $\hat{I}$ ام بردار نرمال واحد است [۶۵].



شکل ۲-۳ نقطه تماس توپ-توپ در PFC^{2D} [۶۵]

تغییر نیروی برشی در نقطه تماس طی یک گام زمانی برابر است با:

$$\Delta F_i^S = -k^S \Delta U_i^S \quad ۲-۳$$

که در آن k^S سختی برشی است و افزایش نیروی برشی را به افزایش جابجایی برشی ربط می‌دهد و برابر با تغییر مولفه برشی جابجایی نقطه تماس است.

۲-۲-۳ قانون حرکت

قانون دوم نیوتن بر حرکت ذرات حاکم است. حرکت یک ذره صلب با بردارهای نیرو و ممان وارد

بر آن تعیین می‌شود. معادله حرکت انتقالی ذره را می‌توان به فرم برداری نوشت:

$$F_i = m\ddot{x}_i \quad ۳-۳$$

که در آن F_i نیروی وارد بر ذره، m جرم ذره و $\ddot{x}_i$ شتاب انتقالی آن است. سپس قانون حرکت دو مرتبه ادغام می‌شود تا موقعیت ذره را به دست دهد. سپس این موقعیت به روزرسانی شده، در محاسبات نیرو-جابجایی به کار می‌رود [۶۵].

۳-۲-۳ مدل‌های تماسی

مدل‌های رفتاری سنگ را می‌توان به وسیله مدل‌های تماسی در هر نقطه تماس شبیه‌سازی کرد. این مدل‌ها رفتار نیرو-جابجایی نقاط تماس را تعریف می‌کنند. نرم‌افزار PFC^{2D} چندین مدل تماسی از جمله مدل خطی^۱، هرتز^۲، پیوند موازی^۳، درزه صاف^۴ و... را در خود گنجانده است. در این پژوهش از مدل پیوند موازی در شبیه‌سازی سنگ بکر و از روش درزه صاف برای مدلسازی درزه‌های طبیعی استفاده شده است.

۳-۲-۳-۱ پیوندهای موازی

یک پیوند موازی همچون یک ماده (مثل سیمان) پیوند دهنده دو ذره‌ای که در تماس با یکدیگر هستند، عمل می‌کند. PFC این امکان را فراهم می‌کند که ذرات در نقاط تماس به هم پیوند شوند. این کار توسط پیوندهای تماسی یا پیوندهای موازی انجام می‌شود. این پیوندها را می‌توان به صورت نوعی چسب تلقی کرد که دو ذره را به هم متصل می‌کند. چسب پیوند تماسی به طرز نامحسوسی کوچک است. به طوری که فقط در نقطه تماس عمل می‌کند. اما چسب پیوند موازی اندازه محدودی دارد که بر مقطع دایروی یا مستطیلی بین ذرات عمل می‌کند. پیوند موازی را می‌توان به جای یک نقطه چسبناک، به صورت یک چسب الاستیک استوانه‌ای (یا مجموعه‌ای از فنرها) در نظر گرفت که دو ذره را به هم متصل می‌کند. پیوند تماسی تنها نیرو را انتقال می‌دهد. اما پیوند موازی هم نیرو و هم ممان را انتقال می‌دهد. یعنی پیوندهای موازی علاوه بر برش و کشش، در برابر ممان هم مقاومت می‌کنند. نیروها به شیوه

¹ linear

² Hertz

³ parallel bond

⁴ smooth joint

افزایشی^۱ محاسبه می‌شوند. تغییر نیروی نرمال که از یک جابجایی نرمال در گام زمانی (Δt) ناشی از رابطه ۳-۴ به دست می‌آید:

$$\Delta \bar{F}_i^n = (-\bar{k}^n A \Delta U^n) n_i \quad ۳-۴$$

که در آن مولفه با علامت بار، یک مقدار مرتبط با پیوندهای موازی و A سطح مقطع پیوند را نشان می‌دهند. مقدار A از رابطه ۳-۵ به دست می‌آید:

$$A = 2\bar{R}t \quad ۳-۵$$

که در آن $\bar{R}$ شعاع پیوند موازی و t ضخامت ذره (دیسک) است.

این پیوند، موازی با نقطه تماس عمل می‌کند. بنابراین نیروی کلی در یک نقطه تماس برابر است با مجموع پیوند موازی و نیروهای تماسی. وقتی تنش کششی یا برشی وارد بر پیوند از مقاومت نرمال یا برشی آن بیشتر شود، پیوند می‌شکند. تنش‌های وارد بر پیوند با استفاده از تیوری تیر^۲ به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن $\bar{M}_3$ ممان و I ممان اینرسی قطبی مقطع پیوند موازی است [۶۵].

$$\sigma_{max} = \frac{-\bar{F}^n}{A} + \frac{|\bar{M}_3|}{I} \bar{R} \quad ۳-۶$$

$$\tau_{max} = \frac{\bar{F}_l^s}{A} \quad ۳-۷$$

۳-۲-۲ مدل درزه صاف

روش عمومی برای شبیه‌سازی درزه‌های طبیعی در PFC^{2D} روش حذف پیوند است. یعنی نقاط تماس ذراتی که روی یک درزه واقع هستند بدون پیوند باقی می‌مانند. از این رویکرد برای مطالعه رفتار برشی درزه‌های سنگ استفاده شده است [۶۶]. قابلیت روش حذف پیوند در شبیه‌سازی رفتار برشی

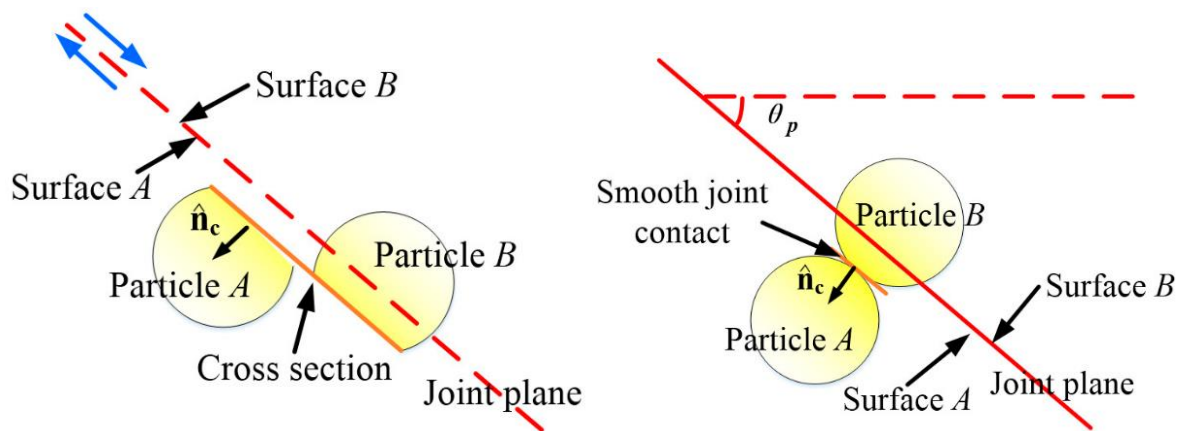
^۱ incremental

^۲ beam theory

درزه‌ها محدود است. چرا که شکل دایره‌ای، اندازه نامساوی و توزیع غیریکنواخت ذرات به رفتار برشی غیرواقعی درزه‌ها منجر می‌شود [۶۷].

به منظور غلبه بر کاستی‌های این روش، پیرس^۱ و همکاران [۶۸] مدل درزه صاف (SJM) را معرفی کردند. مدل درزه صاف رفتار درزه‌ها را به وسیله سطوح لغزش ریزمقیاس در نقاط تماس بین ذراتی که در فصل مشترک درزه مقابل هم واقع شده‌اند، شبیه‌سازی می‌کند. در این نقاط تماس، پیوندهای موازی حذف شده و مدل پیوند جدید با جهت‌گیری از پیش تعیین شده اعمال می‌شود. این در حالی است که ذرات در تماس با هم می‌توانند با یکدیگر همپوشانی داشته باشند.

وقتی صفحه درزه تعریف می‌شود، درزه صاف بر نقاط تماس بین ذرات توزیع می‌شود (شکل ۳-۳-۱). هر صفحه درزه شامل دو سطح همپوشاننده (سطح A و سطح B) است که ذرات تنها می‌توانند در امتداد این دو سطح حرکت کنند (شکل ۳-۳-۲ چپ).



شکل ۳-۳-۲ مدل تماسی درزه صاف دو بعدی [۶۹]

¹ Pierce

جهت گیری این دو سطح با بردار نرمال واحد درزه $\hat{\mathbf{n}}_j$ ارایه می شود که توسط زاویه شیب درزه

θ_p تعریف می شود:

$$\hat{\mathbf{n}}_j = (\sin(\theta_p), \cos(\theta_p)) \quad ۸-۳$$

حاصل ضرب داخلی بردار نرمال واحد درزه و بردار نرمال واحد نقطه تماس، برای تعیین سطحی

که هر ذره بر روی آن قرار می گیرد، به کار می رود. اگر $\hat{\mathbf{n}}_j \cdot \hat{\mathbf{n}}_c > 0$ باشد، ذره بر روی سطح نزدیک تر

قرار می گیرد. مثل ذره A که در سطح A قرار گرفته است (شکل ۳-۳ راست). برای ساختن درزه صاف

بین ذرات، پیوندهای موجود حذف می شوند. مساحت سطح مقطع درزه صاف (A') برابر است با:

$$A' = \pi \bar{R}^2 \quad ۹-۳$$

که در آن $\bar{R}$ میانگین شعاع است و به صورت زیر تعریف می شود ($\bar{\lambda}$ ضریب شعاع است):

$$\bar{R} = \bar{\lambda} \min(R^A, R^B) \quad ۱۰-۳$$

بردار نیرو $\mathbf{F}$ و بردار جابجایی $\mathbf{U}$ درزه صاف در مختصات محلی صفحه درزه به صورت روابط ۱۱-۳ و

۱۲-۳ تعریف می شود:

$$\mathbf{U} = U_n \hat{\mathbf{n}}_j + \mathbf{U}_s \quad ۱۱-۳$$

$$\mathbf{F} = F_n \hat{\mathbf{n}}_j + \mathbf{F}_s \quad ۱۲-۳$$

U_n جابجایی نسبی و F_n نیروی نرمال درزه صاف هستند. $\mathbf{U}_s$ و $\mathbf{F}_s$ نیز به ترتیب بردارهای جابجایی

نسبی و نیروی برشی هستند.

رفتار مکانیکی یک درزه صاف از مدل لغزش کولمب^۱ پیروی می‌کند. افزایش جابجایی نسبی دو ذره‌ای که با یکدیگر اندرکنش دارند، در هر گام زمانی به دو مولفه نرمال و برشی تقسیم می‌شوند. نیروهای نرمال و برشی درزه صاف با استفاده از معادلات ۱۳-۳ و ۱۴-۳ به‌روزرسانی می‌شوند (شکل ۴-۳).

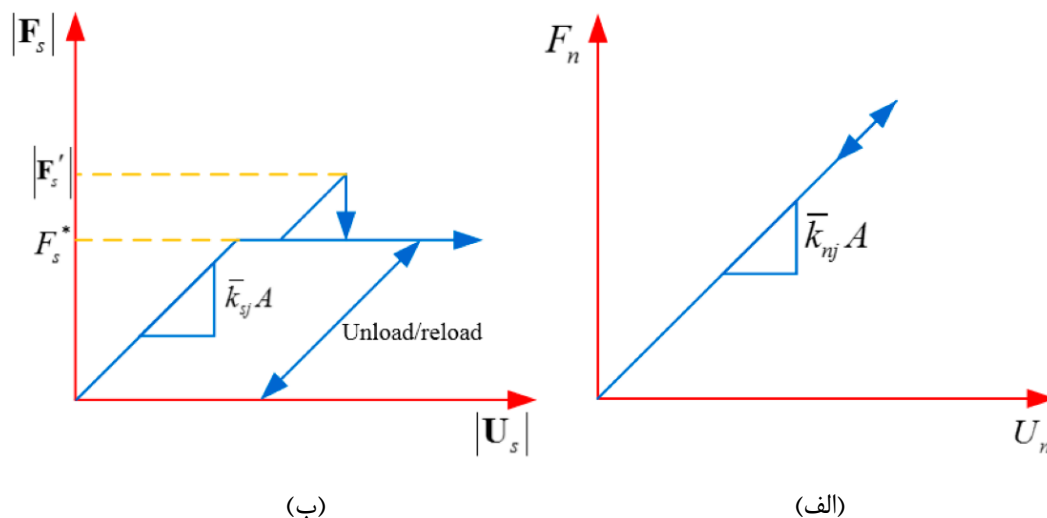
$$F_n := F_n + \bar{k}_n A \Delta U_n \quad 13-3$$

$$\mathbf{F}'_s := \mathbf{F}_s - \bar{k}_s A \Delta \mathbf{U}_s \quad 14-3$$

که در آن $\bar{k}_n$ و $\bar{k}_s$ سختی‌های نرمال و برشی درزه صاف هستند. Δ میزان افزایش مقدار به‌روزرسانی شده است. حداکثر نیروی برشی F_s^* ، به وسیله ضریب اصطکاک درزه صاف μ_j تعیین می‌شود:

$$F_s^* = F_n \mu_j \quad 15-3$$

اگر $F'_s \leq F_s^*$ باشد، آنگاه $|\mathbf{F}'_s| \leq |\mathbf{F}_s|$. در غیر این صورت جابجایی لغزشی رخ خواهد داد و $|\mathbf{F}_s| = F_s^*$ (شکل ۴-۳ ب).

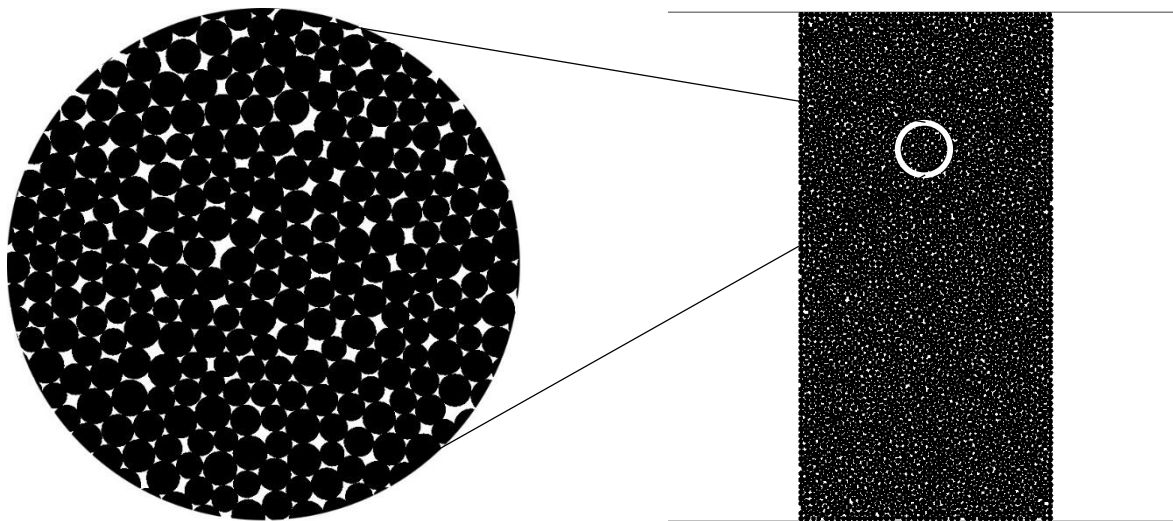


شکل ۴-۳ قانون نیرو-جابجایی در درزه صاف (الف) نیروی نرمال نسبت به جابجایی نرمال (ب) نیروی برشی نسبت به جابجایی برشی [۶۹]

¹ Coulomb sliding model

۴-۲-۳ ساخت مدل

در حالت کلی، یک مدل PFC^{2D} شامل گروهی از ذرات پیوند شده به یکدیگر در مجموعه‌ای متراکم است (شکل ۳-۵). از مدل‌های PFC^{2D} می‌توان برای شبیه سازی رفتار مکانیکی یک نوع سنگ خاص و بسیاری شرایط و فرایندهای مختلف استفاده کرد. ریزپارامتر^۱های ذرات و پیوندها را می‌توان به منظور شبیه سازی سنگ موردنظر تعریف کرد. این خصوصیات میکرو بر خصوصیات ماکروی سنگ مدل شده -مثل مقاومت و سختی- تاثیر می‌گذارد.



شکل ۳-۵ نمونه‌ای از مدل ساخته شده در PFC^{2D}

۵-۲-۳ کالیبراسیون

نرم‌افزار PFC^{2D} رفتار و خصوصیات بزرگ‌مقیاس مصالح را از طریق اندرکنش مولفه‌های ریزمقیاس شبیه‌سازی می‌کند. رفتار یک مدل PFC متأثر از پارامترهایی مثل اندازه ذرات و پارامترهای مربوط به نقاط تماس است. پارامترهای ورودی ریزمقیاس معمولاً ناشناخته‌اند و نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً از طریق آزمون‌های استاندارد که در حالت کلی تنها اطلاعات بزرگ‌مقیاس را به دست می‌دهند، استخراج

¹ micro-parameter

کرد. بنابراین لازم است این خصوصیات با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده در PFC^{2D} و از طریق آزمون و خطا تعیین شوند. این خصوصیات میکرو در نهایت منجر به رفتار ماکروی مدل می‌شوند. برای ایجاد یک مدل PFC^{2D} که رفتار ماکروی سنگ واقعی را شبیه‌سازی می‌کند، بایستی خصوصیات میکرو (مثل سختی پیوند) با پارامتر ماکروی متناظرش (یعنی ثابت الاستیک) متناظر باشد. ریزپارامترهای لازم برای شبیه‌سازی رفتار واقعی سنگ توسط روش کالیبراسیون^۱ تکراری تعیین می‌شود. مجموعه‌ای از ریزپارامترها اختصاص داده می‌شوند و یک آزمون آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده در PFC^{2D} مثل تست فشار دو محوره^۲ اجرا می‌شود. مقاومت حداکثر و ثابت‌های الاستیک سنگ از طریق این آزمون‌ها تعیین می‌شوند.

۳-۲-۶ اعمال تنش‌های برجا

در نرم‌افزار PFC^{2D} نمی‌توان بر دیواره‌های مرزی مدل نیرو وارد کرد. چرا که معادلات حرکت برای دیواره‌ها حل نشده‌اند. اما مولفه‌های سرعت، شامل دو مولفه انتقالی و یک مولفه چرخشی را می‌توان به هر دیواره اختصاص داد. بنابراین یک دیواره می‌تواند با سرعت معین و بدون هیچ مقاومتی از سوی ذره‌ها و دیواره‌های دیگر حرکت کند. نیروهای حاصل شده را می‌توان برای اعمال تنش به کار برد. تنش میانگین وارد بر دیواره، از تقسیم نیروهای عکس‌العمل بر مساحت دیواره اندازه‌گیری می‌شود.

نیروهای وارد بر یک دیواره را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. اما می‌توان آن‌ها را با تعبیه یک سازوکار خودکنترل^۳ در FISH کنترل کرد. این مکانیزم به منظور ثابت نگه داشتن مولفه‌های نیرو در مقدار تخصیص یافته، سرعت اعمال شده بر دیواره را تغییر می‌دهد [۶۵].

¹ calibration

² biaxial compression test

³ servo-mechanism

۳-۳ مدل سازی دو بعدی جریان سیال و فرمول بندی آن

جریان سیال در محیط های متخلخل، به بسیاری از دلایل عملی مورد توجه بوده است. بر جریان حالت پایدار^۱ در یک نمونه سنگی، یک قانون تجربی حاکم است که به قانون دارسی معروف است. این قانون تقریب بسیار خوبی از رفتار جریان را در مقیاس ماکرو ارائه می دهد. قانون دارسی به شکل ساده و برای یک جریان خطی^۲، نرخ جریان سیال را به ضریب هدایت هیدرولیکی K و گرادیان هیدرولیکی $\partial h / \partial l$ مربوط می کند [۷۰].

$$Q = -KA \frac{\partial h}{\partial l} \quad ۱۶-۳$$

که در آن Q نرخ جریان دارسی و A مساحت سطح مقطع جریان است. ضریب هدایت هیدرولیکی (ضریب نفوذپذیری) امکان انتقال سیال درون یک بافت متخلخل را نشان می دهد. این ضریب هم به بافت سنگ و هم به خصوصیات سیال بستگی دارد. ضریب هدایت هیدرولیکی را می توان به صورت رابطه ۳-۱۷ تعریف کرد:

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad ۱۷-۳$$

پارامتر k نفوذپذیری ذاتی سنگ و μ و ρ ویسکوزیته و چگالی سیال هستند [۷۰].

قانون دارسی بر حسب فشار را می توان به صورت رابطه زیر نوشت. این رابطه نشان می دهد که نرخ جریان یک سیال ویسکوز به اختلاف فشار در طول نمونه و مساحت سطح مقطع نمونه وابسته است.

$$Q = -\frac{kA}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad ۱۸-۳$$

^۱ steady state flow

^۲ laminar

همچنین سرعت دارسی را می توان به صورت رابطه ۱۹-۳ نوشت.

$$V = \frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{L} \quad ۱۹-۳$$

که در آن V جریان یک بعدی است.

الگوریتم جریان سیال در PFC^{2D} تو سط کاندال [۷۱] معرفی شد که بر اساس جریان بین دو صفحه موازی است. این الگوریتم مدل PFC را به صورت مجموعه ای از کانال ها در نظر می گیرد که سیال می تواند از میان آن ها جریان یابد. با فرض جریان خطی، نرخ جریان حجمی در کانال ها را می توان از رابطه ۲۰-۳ محاسبه کرد.

$$Q = K a^3 \frac{(P_2 - P_1)}{L} \quad ۲۰-۳$$

که در آن a بازشدگی و $(P_2 - P_1)$ اختلاف فشار بین دو دامنه مجاور و L طول کانال است [۶۵].

بازشدگی کانال تابعی از فشار وارد بر دو دامنه مجاور هم است. وقتی ذرات تشکیل دهنده کانال به هم پیوند شده، اما هیچ فشاری بر آن ها وارد نیست، بازشدگی برابر با a_0 و وقتی نیرو به بی نهایت میل می کند، این مقدار نیز به صفر می رسد. رابطه تجربی زیر برای محاسبه مقدار بازشدگی کانال به عنوان تابعی از بار فشاری به کار می رود که در آن F_0 مقدار نیروی فشاری نرمال و F مقدار نیرویی است که تحت آن، بازشدگی تا $a_0/2$ کاهش می یابد.

$$a = \frac{a_0 F_0}{F + F_0} \quad ۲۱-۳$$

اگر نیروی کششی نرمال وارد شود، بازشدگی به صورت مجموع بازشدگی پسماند و فاصله نرمال بین سطوح دو ذره g محاسبه می شود. یعنی:

$$a = a_0 + mg \quad ۲۲-۳$$

که در آن m یک ضریب مقیاسی بدون بعد است [۶۵].

همان طور که پیش تر گفته شد، مدل جریان سیال، هر نقطه تماس را به عنوان یک کانال جریان

در نظر می گیرد که در آن نرخ جریان متناسب با گرادیان هیدرولیکی $\frac{\partial h}{\partial x}$ است. بنابراین برای جریان خطی

پایدار در امتداد یک نقطه تماس با بازشدگی w می توان نوشت:

$$Q = Kw \frac{\partial h}{\partial x} \quad ۲۳-۳$$

ضریب هدایت هیدرولیکی K با اتخاذ همترایی صفحات موازی تخت، جهت ارایه سطوح نقطه

تماس محاسبه می شود. برای جریان ویسکوز نیوتنی داریم:

$$K = \frac{w^2 \rho g}{12 \mu} \quad ۲۴-۳$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی و ρ دانسیته است. روابط فوق، رابطه ۲۵-۳ را نتیجه می دهند

که در آن $\frac{\partial p}{\partial x}$ گرادیان فشار سیال است.

$$Q = \frac{w^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad ۲۵-۳$$

همان طور که ملاحظه می شود، نرخ جریان متناسب با مکعب بازشدگی ناپیوستگی است.

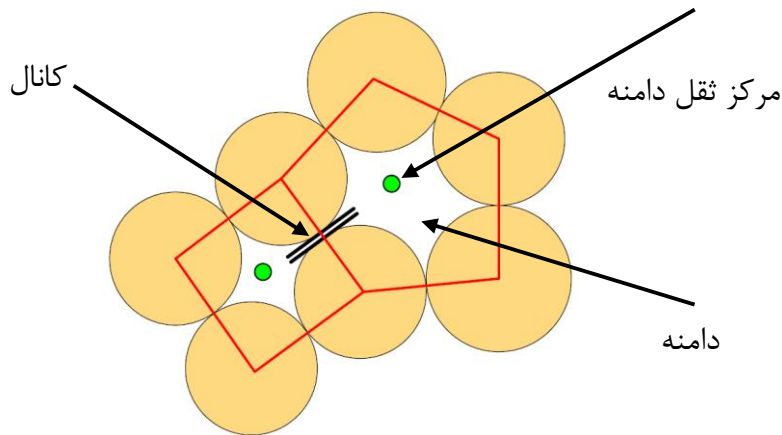
بنابراین نرخ جریان به شدت به تغییرات کوچک بازشدگی حساس است [۷۰].

بازشدگی w یک کانال، متناسب با جابجایی نرمال در نقطه تماس است. در نرم افزار PFC اگر

ذرات به هم پیوند شده باشند، باز شدگی زمانی افزایش می یابد که پیوندها، شکسته شده و ذرات از هم

فاصله بگیرند. علاوه بر کانال های جریان، دامنه های سیال نیز وجود دارند که حجم آن ها به فضای بدون

ذره مرتبط است (شکل ۶-۳).



شکل ۳-۶ تصویر شماتیک دامنه و کانال‌های جریان سیال در PFC^{2D} [۷۲]

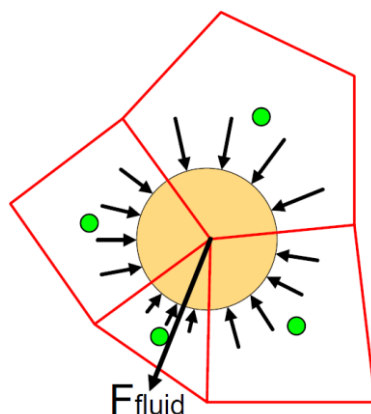
حجم این دامنه‌ها را می‌توان با اندازه‌گیری مساحت و استفاده از تخلخل سنگ تخمین زد. فشارهای ذخیره شده در این دامنه‌ها در حین محاسبات سیالی به‌روزرسانی می‌شوند و بر ذرات پیرامون خود همچون نیرو عمل می‌کنند. تغییر فشار سیال ΔP در هر دامنه که در اثر جریان از کانال‌های پیرامون آن ناشی می‌شود، در یک گام زمانی Δt را می‌توان با استفاده از مدول بالک سیال K_f و حجم ظاهری دامنه V_d با بکارگیری معادله پیوستگی به فرم زیر نوشت [۷۰]:

$$\Delta P = \frac{K_f}{V_d} (\Sigma Q \Delta t - \Delta V_d) \quad ۲۶-۳$$

۳-۴ کوپلینگ هیدرومکانیکی

در این پژوهش مسیر جریان به صورت کانال‌های صفحه‌ای موازی در نقاط تماس بین ذرات در نظر گرفته شده است. بازشدگی کانال متناسب با جابجایی نرمال در نقطه تماس است. اگر ماده دارای پیوند باشد، بازشدگی زمانی افزایش می‌یابد که پیوند شکسته شده و ذرات از هم جدا شوند. علاوه بر کانال جریان، دامنه‌ها نیز در فضای خالی بین ذرات وجود دارند که حجم آن‌ها به فضای منفذی مدل سنگی PFC مرتبط است. کوپلینگ بین سیال تغییر شکل‌پذیر و ذرات PFC کاملاً در فرمول‌بندی گنجانده شده‌اند. این کوپلینگ به واسطه تغییر باز شدگی، در نتیجه تغییر نیرو در نقاط تماس حاصل شده است.

تغییر حجم دامنه به تغییر فشار منجر می‌شود. فشار هیدرولیکی در نقاط تماس بر ذرات نیرو وارد می‌کند (شکل ۷-۳). اگر نیروی وارد بر ذرات از حد آستانه معینی در نتیجه فشار هیدرولیکی بیشتر شود، آنگاه پیوند شکسته خواهد شد و یک شکست هیدرولیکی رخ می‌دهد. این مدل قابلیت شبیه سازی جریان داری، در فشارهای پایین و شکست هیدرولیکی در فشارهای بالا را دارد.



شکل ۷-۳ فشارهای منفذی و نیروی سیال وارد بر ذره [۷۲]

۳-۴-۱ محاسبه گام زمانی

به منظور حفظ پایداری مدل لازم است گام زمانی محاسبه شود. محاسبات بین اعمال معادله جریان به تمام کانال‌ها (رابطه ۳-۲۵) و اعمال معادله فشار (رابطه ۳-۲۶) به تمام دامنه‌ها در تناوب است. گام زمانی بحرانی برای پایداری در ادامه تشریح می‌شود. جریان به داخل یک دامنه به علت تغییر فشار به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{Nw^3}{24\mu} \frac{\Delta P_p}{\bar{R}} \quad ۳-۲۷$$

که در آن ΔP_p اختلال فشار^۱ در یک دامنه، $\bar{R}$ میانگین شعاع ذرات پیرامون دامنه و N تعداد کانال‌های متصل به دامنه است. در معادله ۳-۲۵، ∂x برابر با طول کانال در نظر گرفته شده است. طول کانال L برابر

^۱ pressure perturbation

با فاصله مرکز ثقل دو دامنه است که به وسیله کانال به هم متصل شده‌اند. بنابراین طول کانال برابر با $2\bar{R}$ در نظر گرفته می‌شود. جریان به داخل یک دامنه تغییرات فشار ΔP_r را سبب می‌شود که می‌توان آن را از رابطه ۳-۲۶ به صورت رابطه زیر محاسبه کرد. توجه شود که تغییر حجم دامنه ΔV_d قابل صرف نظر فرض شده است [۷۰].

$$\Delta P_r = \frac{K_f Q \Delta t}{V_d} \quad ۲۸-۳$$

به منظور حفظ پایداری، پاسخ فشار در یک دامنه به علت اختلال فشار، باید کمتر از اختلال فشار اصلی باشد. یعنی $\Delta P_r \leq \Delta P_p$ بنابراین با استفاده از روابط ۳-۲۷ و ۳-۲۸، می‌توان حداقل گام زمانی به منظور حفظ پایداری را محاسبه کرد:

$$\Delta t \leq \frac{24\mu\bar{R}V_d}{NK_f w^3} \quad ۲۹-۳$$

گام زمانی برای محاسبات سیالی بایستی به قدر کافی کوچک و کمترین مقدار تمام گام‌های زمانی محلی‌ای باشد که از طریق رابطه ۳-۲۹ محاسبه شده‌اند. بنابراین می‌توان یک ضریب ایمنی کوچک‌تر از ۱ برای گام زمانی سیال تعریف کرد [۷۰].

۳-۴-۲ تعیین تخلخل و حجم دامنه

تعیین تخلخل در PFC^{2D} یک روش مبتنی بر مساحت است (نسبت مساحت پوچ به مساحت کلی). از تخلخل برای محاسبه حجم دامنه استفاده می‌شود. تخلخل n مجموعه‌ای از ذرات موجود در یک سطح A به صورت رابطه ۳-۳۰ تعریف می‌شود:

$$n = 1 - \frac{A_p}{A} \quad ۳۰-۳$$

که در آن A_p مساحت کلی تمام ذرات است و از رابطه ۳-۳۱ به دست می‌آید [۶۵]:

$$A_p = \Sigma \pi R^2 \quad 31-3$$

۳-۴-۳ محاسبه نفوذپذیری

معادله جریان خطی یک بعدی با ویسکوزیته μ در کانالی به طول ∂x و در معرض افت فشار ∂p

را می‌توان به وسیله قانون داریسی به صورت رابطه ۳-۳۲ بیان کرد:

$$v_i = - \frac{k_{ij}}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad 32-3$$

که در آن v_i بردار تخلیه مخصوص و k_{ij} مولفه‌های تانسور نفوذپذیری هستند. رابطه بین

نفوذپذیری ماکرو و ریزپارامترهای به کار رفته در PFC^{2D} از روابط زیر استخراج می‌شود. میانگین حجم

سهم تمام کانال‌ها از جریان در یک حجم کنترلی V برابر است با:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{V} \Sigma v_i^p V^p \quad 33-3$$

که در آن v_i^p بردار تخلیه مخصوص و V^p حجم کانال است و عمل جمع بر روی تمام کانال‌های

موجود در حجم V انجام می‌شود. رابطه ۳-۲۵ را می‌توان بر حسب تخلیه مخصوص کانالی با مساحت A و

بردار نرمال واحد $\hat{n}_i$ به شکل رابطه ۳-۳۴ بازنویسی کرد:

$$v_i^p = \frac{w^3 \Delta P \hat{n}_i}{12 \mu L A} \quad 34-3$$

با جایگزینی رابطه فوق در رابطه ۳-۳۳ داریم:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{12V} \Sigma \frac{w^3 \Delta P \hat{n}_i}{\mu} \quad 35-3$$

در ناحیه‌ای که گرادیان فشار $\frac{\partial P}{\partial x_i}$ یکنواخت است، اختلاف فشار بین دو نقطه‌ای که به و سیله

بردار $L\hat{n}_i$ از هم جدا شده‌اند برابر است با:

$$\Delta P = L\hat{n}_j \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad 36-3$$

با جایگزینی آن در رابطه ۳۳-۳ به رابطه ۳۷-۳ می‌رسیم:

$$\bar{v}_i = \frac{1}{12V} \frac{\partial P}{\partial x_j} \sum \frac{w^3 L \hat{n}_i \hat{n}_j}{\mu} \quad 37-3$$

از مقایسه این رابطه با رابطه ۳۲-۳ می‌توان مولفه‌های نفوذپذیری را به شکل رابطه ۳۸-۳ بیان کرد:

$$k_{ij} = \frac{1}{12V} \sum w^3 L \hat{n}_i \hat{n}_j \quad 38-3$$

اگر محیط همسانگرد باشد (یعنی $k_{11} = k_{22} = k$ و $k_{12} = 0$)، خصوصیت بزرگ‌مقیاس و اسکالر

نفوذپذیری k را می‌توان بر حسب بازشدگی (خصوصیت میکرو و اسکالر) به صورت رابطه ۳۹-۳ نوشت:

$$k = \frac{1}{12V} \sum_{pipes} L w^3 \quad 39-3$$

حجم کلی متناظر برای تمام ذرات، برابر با مجموع حجم تمام ذرات $V_p = \sum \pi R^2$ است. از آنجا

که مخزن مورد نظر در این پژوهش تخلخل بسیار کمی دارد، می‌توان چنین فرض کرد که حجم کلی

ذرات تقریباً برابر با حجم مجموعه ذرات V است. در این حالت داریم:

$$k = \frac{\sum_{pipes} L w^3}{12\pi \sum_{balls} R^2} \quad 40-3$$

روابط ۳۹-۳ و ۴۰-۳ تنها در مورد مجموعه‌های با توزیع آماری یکنواخت که در آن‌ها تمام

کانال‌ها بازشدگی یکسانی دارند، صدق می‌کنند. بنابراین بازشدگی پسماند w_0 را می‌توان به صورت رابطه

زیر، از رابطه ۴۰-۳ استخراج کرد:

$$w_0 = \sqrt[3]{\frac{12k\pi \Sigma_{balls} R^2}{\Sigma_{pipes} L}} \quad 41-3$$

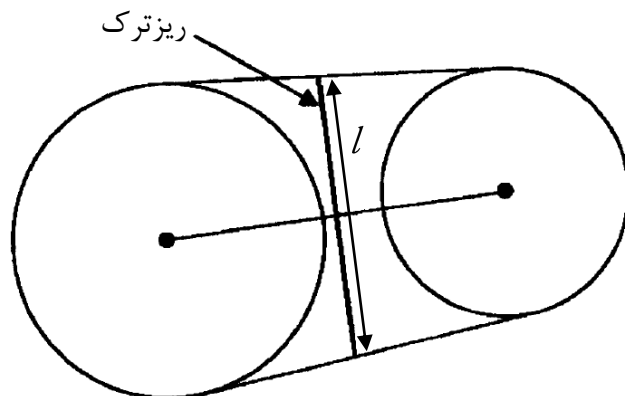
که در آن k مقدار نفوذپذیری ورودی مخزن است. الگوریتم از این مقدار برای تخمین ریزپارامترها استفاده می‌کند [۷۰].

به منظور محاسبه نفوذپذیری ماکروی سنگ بکر برای هر کانال (نقطه تماس)، بازشدگی پسماند w_0 در نظر گرفته شده است. در واقع پیوند برقرار است. اما نیروی نرمال برابر صفر است. علاوه بر این از معادلات ۳-۲۱ و ۳-۲۲ چنین برداشت می‌شود که افزایش نیروی نرمال، بازشدگی ظاهری را کاهش داده و نفوذپذیری مخزن تغییر می‌کند.

۳-۵ پایش ترک در PFC^{2D}

به منظور پایش و نمایش ترک‌ها در مدل‌های PFC ، مجموعه‌ای از توابع FISH نوشته شده‌اند [۷۳]. در یک نمونه سنگ مصنوعی ساخته شده در PFC^{2D} ، ریزترک‌ها^۱ تنها می‌توانند بین ذرات به هم پیوند شده ایجاد شوند. بنابراین زمانی می‌گوییم یک ترک ایجاد شده است که پیوند بین دو ذره گسیخته شود. هندسه و موقعیت هر ریزترک به وسیله اندازه و موقعیت فعلی دو ذره مجاور هم که پیوند بین آن‌ها گسیخته شده است، تعیین می‌شود. هر ریزترک در PFC^{2D} به صورت خطی در نظر گرفته می‌شود که در نقطه میانی خط واصل مراکز دو ذره مجاور هم قرار دارد. جهت‌گیری این ترک عمود بر خط واصل مراکز دو ذره مجاور و اندازه آن برابر با مقدار l در شکل ۳-۸ است. بسته به اینکه این ترک در اثر تجاوز تنش از مقاومت کششی یا برشی آن ایجاد شده باشد، ممکن است کششی یا برشی باشد [۶۵].

¹ microcracks



شکل ۳-۸ تصویر شماتیک موقعیت، اندازه و جهت گیری یک ریز ترک در PFC^{2D} [۷۰]

۳-۶ جمع بندی

شکست هیدرولیکی مساله بسیار پیچیده‌ای است. حضور درزه‌های طبیعی، ناهمسانگردی و ناهمگنی توده سنگ و همچنین کوپل آن با خصوصیات جریان سیال و پارامترهای عملیاتی را نمی‌توان با استفاده از روش‌های تحلیلی مدل کرد. هزینه بالای آزمون‌های آزمایشگاهی و استفاده از فناوری‌های مختلف برای مطالعه عملیات شکست هیدرولیکی، امکان استفاده از این روش‌ها را نیز با محدودیت مواجه می‌کند. از این رو، روش‌های عددی و نرم‌افزارهای کامپیوتری به عنوان ابزاری سودمند برای مطالعه اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی در مخازن نامتعارف نفت و گاز شناخته می‌شوند.

در آغاز فصل، نرم‌افزار المان مجزای PFC^{2D} که مبتنی بر مدل پیوند ذرات است، معرفی شد. سپس تیوری حاکم بر آن، شامل قوانین نیوتن و نیرو-جابجایی و همچنین چرخه محاسباتی در PFC ارائه شد. شناخت مدل‌های تماسی در مدلسازی با نرم‌افزار PFC بسیار حایز اهمیت است. بخشی از این فصل به پیوندهای موازی و نحوه عملکرد آن‌ها اختصاص یافت. همچنین مدل درزه صاف که برای مدلسازی درزه تعریف شده است، معرفی و فرمول‌بندی آن ارائه شد. در ادامه فصل، کالیبراسیون خصوصیات بزرگ‌مقیاس توده‌سنگ و چپستی، چرایی و چگونگی انجام آن و همچنین نحوه اعمال تنش‌های برجا در مدل PFC از نظر گذرانده شد.

بخش مهم این پژوهش، مدل‌سازی جریان سیال و کوپل آن با خصوصیات مکانیکی توده سنگ است. توضیح داده شد که چگونه نقاط تماس بین ذرات به عنوان کانال‌های جریان سیال عمل می‌کنند. سپس چگونگی محاسبه گام زمانی (به منظور حفظ پایداری مدل)، تخلخل و حجم دامنه و همچنین نفوذپذیری محیط تشریح داده شد. در آخر توضیح داده شد که چگونه گسیختگی پیوند بین دو ذره مجاور هم، برای پایش ترک‌ها در PFC^{2D} به کار گرفته می‌شود.

فصل چهارم

مدلسازی عددی

۴-۱ پیش‌گفتار

تیوری حاکم بر مدل پیوند ذرات و چگونگی کوپلینگ جریان سیال و رفتار مکانیکی مدل سنگی ساخته شده در PFC^{2D} در فصل قبل ارایه شد. با توجه به ماهیت ناپیوسته این پژوهش، نرم‌افزار المان مجزای PFC^{2D} که بر مبنای مدل پیوند ذرات طراحی شده است، به منظور شبیه‌سازی اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی به کار گرفته شد.

روند مدلسازی شامل کالیبراسیون و شبیه‌سازی آزمون‌های آزمایشگاهی به منظور یافتن ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ‌مقیاس توده‌سنگ مصنوعی، هندسه مدل و پیاده‌سازی درزه‌های طبیعی در مخزن، اعمال شرایط مرزی و اولیه و در نهایت مدلسازی شکست هیدرولیکی در یک مخزن دارای دو درزه موازی طبیعی، شرح داده شده است.

در آخر، اعتبار سنجی مدل نیز انجام شد. با مقایسه نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی با روابط تحلیلی در خصوص تعیین فشار شکست و همچنین پژوهش‌های آزمایشگاهی صورت گرفته در خصوص چگونگی اندرکنش شکست هیدرولیکی و ناپیوستگی‌های طبیعی، مشاهده شد که مدل ارایه شده مطابقت خوبی با پژوهش‌های پیشین دارد.

۴-۲ کالیبراسیون

همان طور که در بخش ۳-۲-۵ گفته شد، در نرم‌افزار PFC^{2D} برخلاف نرم‌افزارهای مبتنی بر روش‌های پیوسته، نمی‌توان خصوصیات بزرگ‌مقیاس سنگ مورد نظر را مستقیماً به صورت داده ورودی به نرم‌افزار اعمال کرد. بدین منظور بایستی از طریق روش کالیبراسیون تکراری، ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ‌مقیاس را شناسایی کرد.

خصوصیات مکانیکی در نظر گرفته شده برای مخزن مورد مطالعه در این مدلسازی، از مطالعات انجام شده توسط ژانگ^۱ و همکاران [۵۸] استخراج شده است. پارامترهای ریزمقیاس، بر اساس میانگین خصوصیات بزرگمقیاس - یعنی مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی - ارایه شده توسط ژانگ و همکاران کالیبره شده است (جدول ۴-۱).

جدول ۴-۱ خصوصیات بزرگمقیاس مخزن مورد مطالعه [۵۸]

پارامتر	نماد	واحد	مقادیر آزمایشگاهی
مدول یانگ	E	GPa	۲۷/۹
نسبت پواسون	ν	-	۰/۲۰۳
مقاومت فشاری تک محوره	σ_c	MPa	۱۵۰/۹
مقاومت کششی	σ_t	MPa	۸/۴

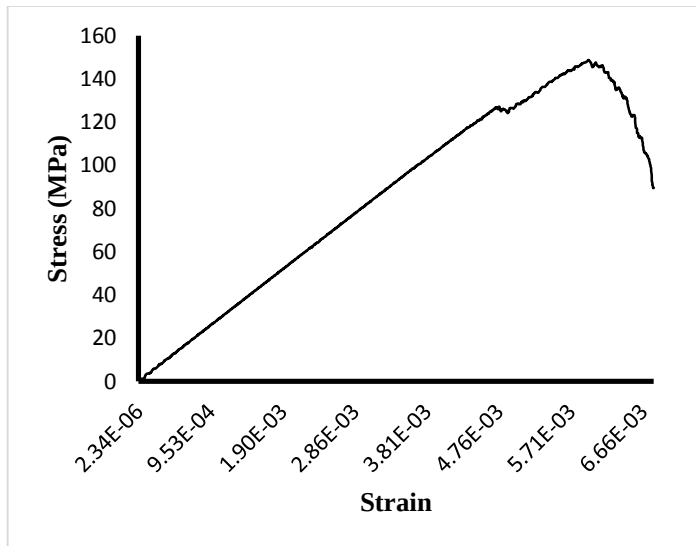
۴-۲-۱ شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری تک محوره

به منظور شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری تک محوره، ابتدا نمونه‌ای به ابعاد $۱/۰۸ \times ۰/۵۴$ متر ساخته شد و به تعادل اولیه رسید. سپس ریزپارامترهای پیوند موازی در نقاط تماس توپ-توپ تعریف شد. لازم به ذکر است که اندازه ذرات، بایستی همان مقداری باشد که در مدلسازی اصلی به کار می‌رود. از آنجا که شرایط مساله بسیار پیچیده است، اندازه ذرات در مدلسازی شکست هیدرولیکی، ۱ تا ۱/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است که همین مقدار در شبیه سازی آزمون مقاومت فشاری تک محوره نیز استفاده شد. فرایند تولید ذرات و رسیدن به تعادل اولیه در بخش‌های ۴-۳-۱ و ۴-۳-۲ تشریح می‌شود.

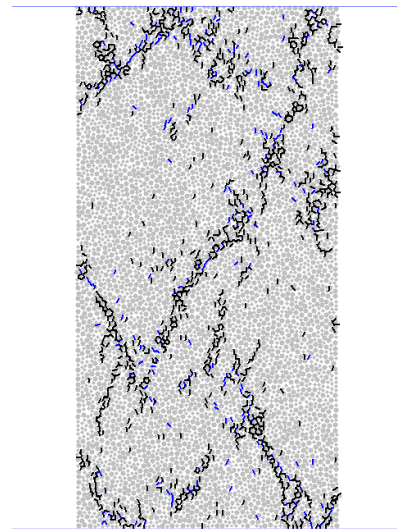
پس از این مراحل، دیواره‌های جانبی حذف شده و دیواره‌های بالایی و پایینی، به عنوان صفحات بارگذاری عمل می‌کنند. نرخ بارگذاری $0/1 \text{ MPa/s}$ بر صفحات اعمال شد. مقاومت فشاری سنگ مخزن

¹ Zhang

مورد نظر ۱۵۰/۹ MPa است. با استفاده از روش کالیبراسیون تکراری و آزمون و خطا، مقدار مقاومت فشاری ۱۴۸/۴۸ MPa برای نمونه حاصل شد. شکل ۴-۱، گسیختگی نمونه پس از انجام آزمایش و نمودار تنش- کرنش متناظر با آزمون مقاومت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد.



(ب)



(الف)

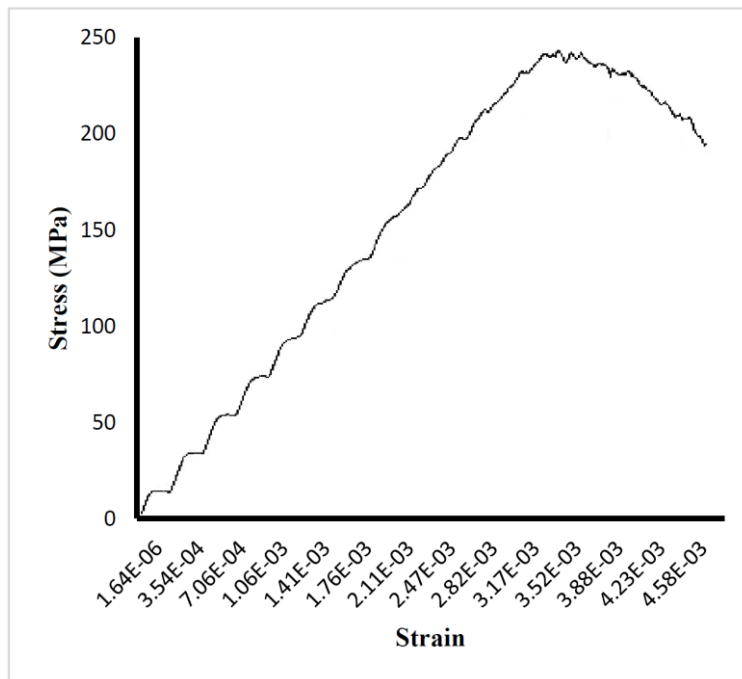
شکل ۴-۱ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون مقاومت فشاری تک محوره (ب) نمودار تنش-کرنش

۴-۲-۲ شبیه‌سازی آزمون مقاومت فشاری دو محوره

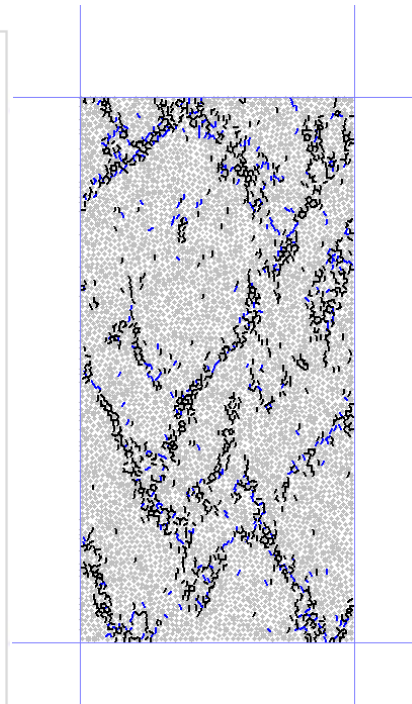
از آزمون مقاومت فشاری دو محوره برای تعیین ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات الاستیک سنگ، یعنی مدول یانگ و نسبت پواسون استفاده می‌شود. پس از ساخت نمونه‌ای به ابعاد 10.8×0.54 متر، رسیدن به تعادل اولیه و تعریف پیوندهای موازی در نقاط تماس، فشار جانبی ۱۰ MPa به وسیله دیواره‌های جانبی بر نمونه اعمال شد. سپس بار محوری از طریق دیواره‌های بالایی و پایینی با نرخ ۰/۱ MPa/s بر نمونه وارد شد. با استفاده از روابط الاستیک تعریف شده، مدول یانگ و نسبت پواسون به ترتیب برابر با ۲۷/۸ GPa و ۰/۲۰۱ به دست آمد که مطابقت خوبی با سنگ مخزن مورد نظر دارد.

نحوه شکست نمونه پس از آزمون مقاومت فشاری دو محوره و نمودار تنش-کرنش آن در شکل

۲-۴ نشان داده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۴ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون مقاومت فشاری دو محوره (ب) نمودار تنش-کرنش

۳-۲-۴ شبیه سازی آزمون برزلی

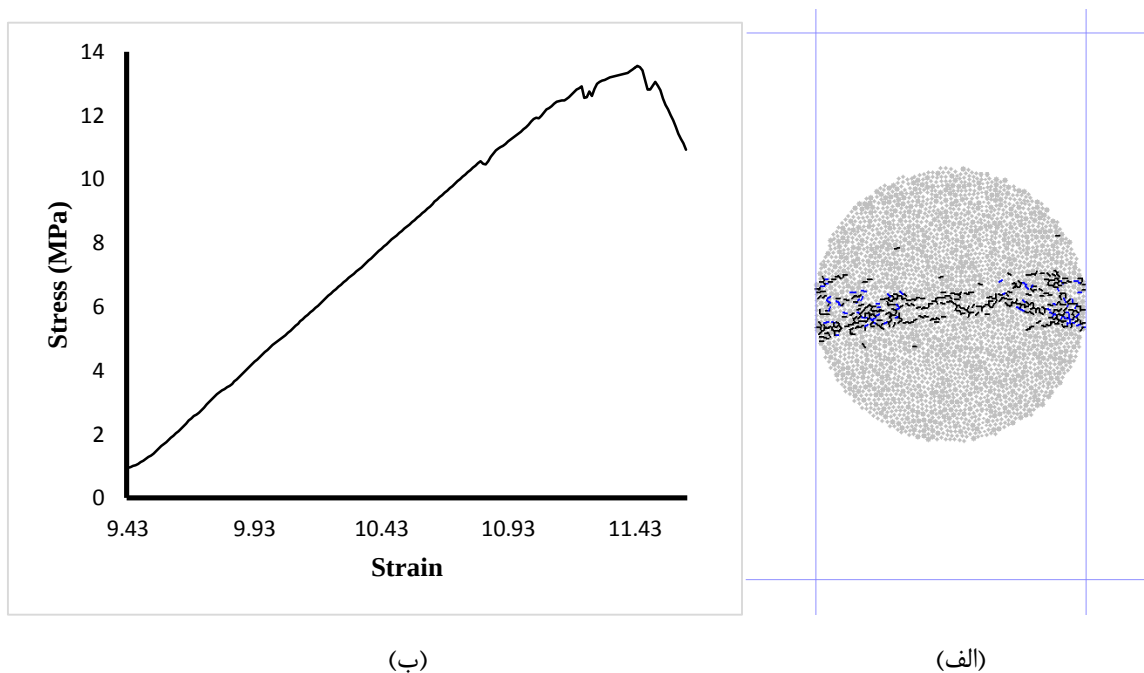
آزمون کشش غیرمستقیم برزلی، بر روی دیسکی به قطر ۰/۵۴ متر انجام شد. پس از آنکه مدل

اولیه با ابعاد $۱/۰۸ \times ۰/۵۴$ متر به تعادل رسید و پیوند موازی در نقاط تماس تعریف شد، ذرات اطراف

دیسک حذف شده و تنش به نرخ ۱۰۰ KPa/s توسط دیواره‌های جانبی بر مدل وارد شد. مقاومت کششی

نمونه، ۱۳/۵۵ MPa به دست آمد که در شکل ۳-۴ گسیختگی نمونه و نمودار تنش-کرنش مشاهده

می‌شود.



شکل ۳-۴ (الف) گسیختگی نمونه تحت آزمون برزلی (ب) نمودار تنش-کرنش

در جدول ۲-۴ مقادیر به دست آمده از کالیبراسیون عددی و در جدول ۳-۴ ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ مقیاس مخزن مورد نظر که از طریق کالیبراسیون مشخص شدند، ارایه شده است.

جدول ۲-۴ خصوصیات بزرگ مقیاس به دست آمده از کالیبراسیون عددی

پارامتر	نماد	واحد	مقادیر مدلسازی
مدول یانگ	E	GPa	۲۷/۸۳
نسبت پواسون	ν		۰/۲۰۱
مقاومت فشاری تک محوره	σ_c	MPa	۱۴۸/۴۸
مقاومت کششی	σ_t	MPa	۱۳/۵۵

۳-۴ ساخت مدل

ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ مقیاس مخزن مورد مطالعه در بخش قبل تعیین شد.

در این پژوهش، مخزنی به ابعاد 3×4 متر در نظر گرفته شده که دارای دو درزه طبیعی موازی با زاویه

میل θ است که هر کدام ۱ متر طول دارند. فاصله این دو درزه از هم در جهت قائم $1/5$ متر است. این مخزن تحت تنش‌های قائم 40 MPa (σ_V به عنوان تنش اصلی حداکثر) و افقی 25 MPa (σ_H به عنوان تنش اصلی حداقل) قرار دارد. در مرکز مدل گمانه‌ای به قطر ۱۵ سانتی‌متر و در صفحه قائم به منظور تزریق سیال شکست ایجاد شده است (شکل ۴-۴).

جدول ۴-۳ ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات بزرگ‌مقیاس سنگ مخزن

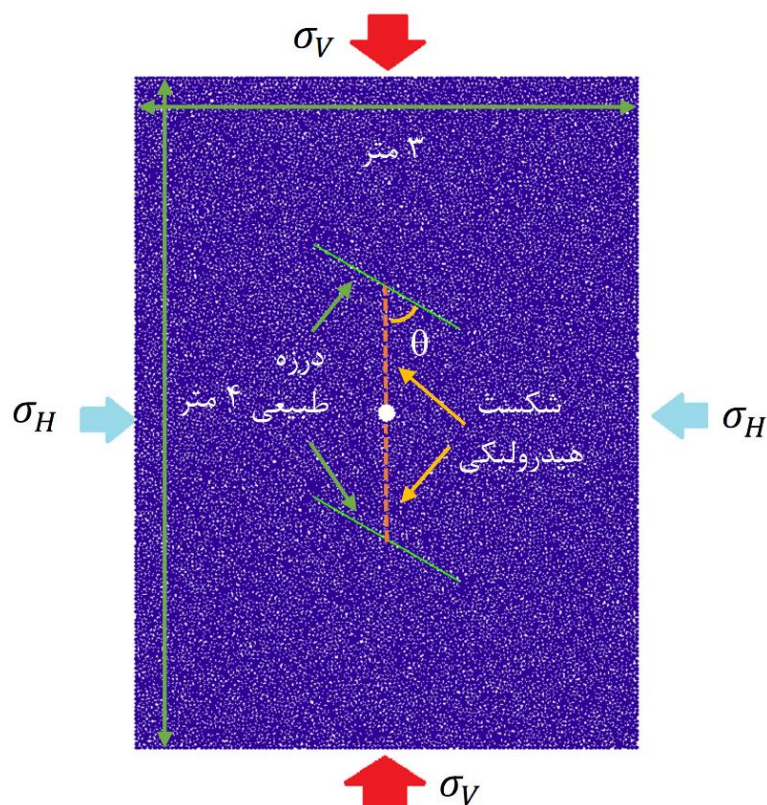
ریزپارامترهای ورودی	نماد	واحد	مقدار
کران پایین شعاع ذره	$R_{\min}$	cm	۱
نسبت شعاع ذرات	$R_{\max}/R_{\min}$	-	۱/۵
چگالی ذره	ρ	kg/m^3	۳۱۰۰
مدول یانگ ذره	E_c	GPa	۱۵/۵
نسبت سختی ذره	k_n/k_s	-	۲
ضریب اصطکاک ذره	μ	-	۰/۵
مدول یانگ پیوند موازی	$\bar{E}_c$	GPa	۱۵/۵
نسبت سختی پیوند موازی	$\bar{k}_n/\bar{k}_s$	-	۲
مقاومت کششی پیوند موازی	$\bar{\sigma}_t$	MPa	۴۵/۵
چسبندگی پیوند موازی	$\bar{c}$	MPa	۷۰
زاویه اصطکاک داخلی پیوند موازی	ϕ	°	۲۵

مراحل مختلف ساخت مدل در ادامه شرح داده می‌شود.

۴-۳-۱ تولید ذرات

برای ساخت مدل لازم است که ابتدا ذرات در داخل حجم بسته‌ای که توسط دیواره‌ها ایجاد

شده‌اند، تولید شوند. برای تولید ذرات کافی است شعاع حداقل و حداکثر به نرم‌افزار اعمال شود.



شکل ۴-۴ مخزن دارای دو درزه طبیعی موازی

مجموعه ذرات ممکن است مجموعه‌ای متراکم با تخلخل منطقی باشد و ممکن است چنین نباشد. رویکرد بهتر این است که یک تابع FISH نوشته شود تا تخلخل مورد نظر حاصل شود [۶۵].

تولید ذرات به صورت تصادفی انجام می‌شود و در این پژوهش توزیع یکنواخت برای ابعاد ذرات در نظر گرفته شده است. در نهایت حدود ۲۲۰۰۰ ذره تولید شد.

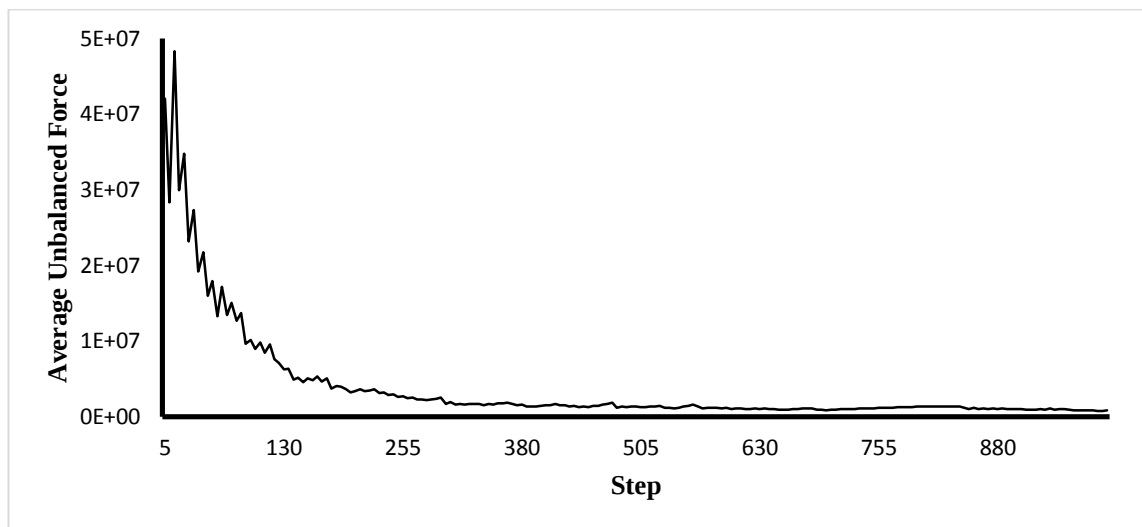
۴-۳-۲ تعادل اولیه

پس از تولید ذرات، لازم است شرایط تعادل اولیه ارضا شود. شرط لازم برای تعادل اولیه این است که یا نیروی نامتعادل کننده^۱ روند نزولی داشته باشد و در نهایت به صفر میل کند یا سرعت ذرات به صفر برسد [۶۵].

¹ unbalanced force

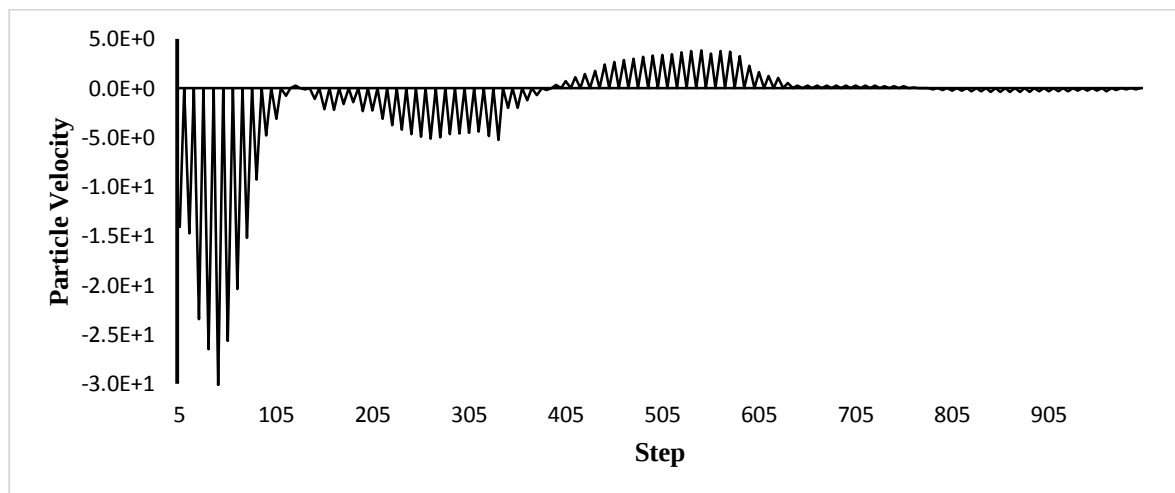
با استفاده از تاریخچه نیروی نامتعادل کننده می توان به صحت تعادل اولیه مدل پی برد

(شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵ تاریخچه نیروی نامتعادل کننده

تاریخچه سرعت یک ذره تصادفی نیز در شکل ۴-۶ نشان داده شده است.

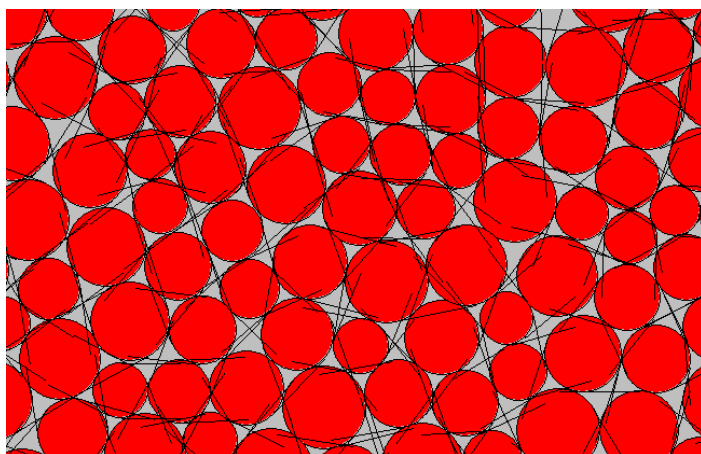


شکل ۴-۶ تاریخچه سرعت یک ذره تصادفی

۳-۳-۴ پیوندهای موازی در نقاط تماس

پس از آنکه تعادل اولیه برقرار شد، پیوندهای موازی در نقاط تماس بین ذرات تعریف می شوند.

شکل ۷-۴ موقعیت این پیوندها را نشان می دهد.



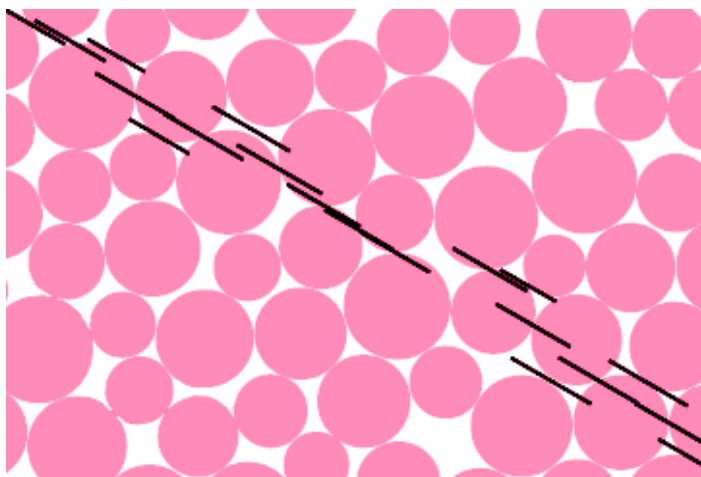
شکل ۷-۴ موقعیت پیوندهای موازی

۴-۳-۴ تعریف درزه‌های طبیعی در مدل

از روش درزه صاف که تیوری حاکم بر آن در بخش ۲-۳-۲-۳ شرح داده شد، به منظور

شبیه سازی درزه‌های طبیعی استفاده شده است. موقعیت درزه‌های صاف در شکل ۸-۴ و ریزپارامترهای

متناظر با درزه موردنظر در جدول ۴-۴ آمده که از مدلسازی ژانگ [۵۸] استخراج شده است.



شکل ۸-۴ موقعیت درزه‌های صاف

جدول ۴-۴ ریزپارامترهای متناظر با خصوصیات ماکروی درزه [۵۸]

ریزپارامترهای ورودی	نماد	واحد	مقدار
سختی نرمال درزه صاف	k_n	GPa/m	۵۰۰
سختی برشی درزه صاف	k_s	GPa/m	۲۰۰
مقاومت کششی درزه صاف	σ'_t	MPa	۵
ضریب اصطکاک درزه صاف	μ'		۰/۸
چسبندگی درزه صاف	c'	MPa	۵

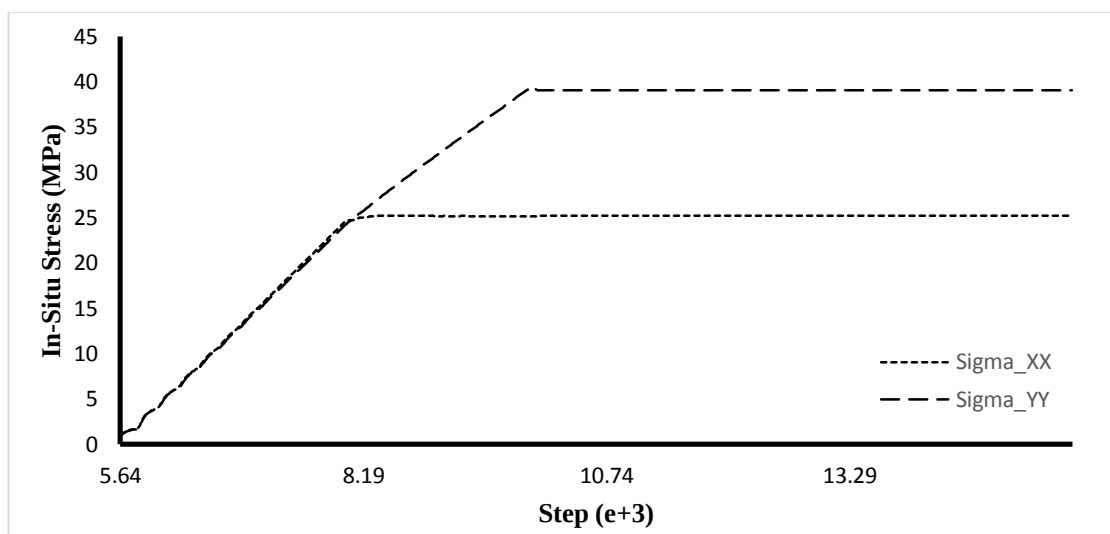
۴-۳-۵ اعمال تنش‌های برجا

همان طور که در بخش ۳-۲-۶ شرح داده شد، در نرم‌افزار PFC نمی‌توان تنش‌های اولیه را مستقیماً بر دیواره‌ها وارد کرد. برای این کار بایستی یک مقدار سرعت به دیواره‌ها اعمال کرده و با استفاده از FISH یک سازوکار خودکنترل نیز تعبیه شود.

تنش برجای مورد نظر، ۴۰ MPa در جهت قائم به عنوان تنش اصلی حداکثر و ۲۵ MPa در جهت افقی به عنوان تنش اصلی حداقل است. صفحات بالایی و پایینی برای اعمال تنش قائم و صفحات جانبی برای اعمال تنش افقی به کار می‌روند. این صفحات با سرعت ۱۰۰ mm/s به سمت هم حرکت می‌کنند و سبب ایجاد تنش‌های مورد نظر می‌شوند. منحنی تاریخچه تنش‌های مرزی وارد بر مدل در شکل ۴-۹ آمده است.

۴-۴ مدل سازی عددی شکست هیدرولیکی در مخازن درزه دار طبیعی

پس از آنکه مراحل اولیه مدل سازی به اتمام رسید، خصوصیات سیال و پارامترهای عملیاتی به مدل اعمال می شود. سیال شکست از طریق گمانه مرکزی که در صفحه قائم واقع است تزریق شده و این روند ادامه می یابد تا شکست هیدرولیکی ایجاد شده، گسترش پیدا کند و به درزه های طبیعی برسد.



شکل ۴-۹ منحنی تاریخچه تنش های مرزی وارد بر مدل

پارامترهای هیدرولیکی مدل در جدول ۴-۵ و پارامترهای عملیاتی در جدول ۴-۶ خلاصه شده اند. لازم به ذکر است که به علت عدم دسترسی به اطلاعات واقعی، مقادیر ارایه شده در جداول ۴-۵ و ۴-۶ مقادیر فرضی هستند.

جدول ۴-۵ پارامترهای هیدرولیکی مدل

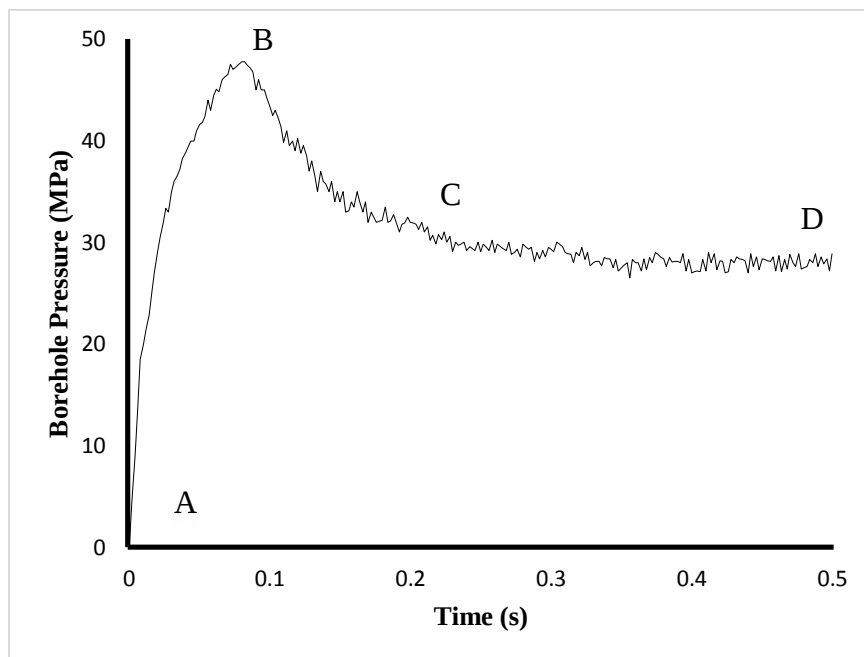
پارامترهای هیدرولیکی	نماد	واحد	مقدار
نفوذپذیری	K	mD	۱
فشار منفذی اولیه	P ₀	MPa	۰
بازشدگی اولیه کانال جریان	a ₀	m	۱۰ ^{-۵}
نفوذپذیری درزه صاف	K _{sj}	mD	۱۰

پیش از ارایه مدل‌های شکست هیدرولیکی در حضور درزه‌های طبیعی، یک مدل شکست هیدرولیکی ساده ارایه می‌شود. شکل‌های ۴-۱۰-ب و پ، کنترهای فشار منفذی و مراحل گسترش شکست هیدرولیکی را نشان می‌دهند. همان طور که هوبرت شرح داده است [۵]، راستای انتشار شکست هیدرولیکی به وسیله مقادیر تنش‌های برجا کنترل می‌شود. از این رو، با توجه به وضعیت تنش‌های برجا (σ_V تنش اصلی حداکثر و σ_H تنش اصلی حداقل) و قرارگیری گمانه در صفحه قائم، شکست هیدرولیکی در جهت تنش حداکثر (σ_V) گسترش یافته است. تاریخچه فشار گمانه در شکل ۴-۱۰-الف نشان داده شده است. همان طور که از این منحنی پیداست، فشار شکست برابر با ۴۷/۸۷ MPa است و شکست هیدرولیکی پس از ۰/۰۸۲ ثانیه ایجاد شده و در جهت تنش حداکثر انتشار می‌یابد.

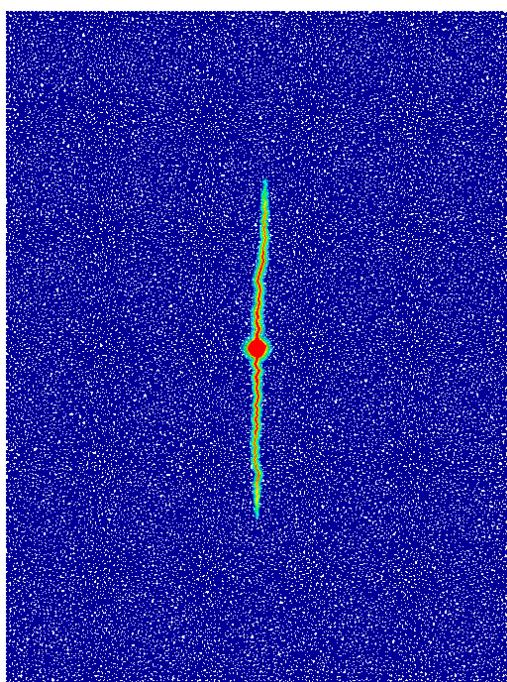
منحنی تغییرات فشار گمانه در بخش ۲-۲-۳ برای شکل ۲-۷ تشریح شد. بر این اساس و برای شکل ۴-۱۰-الف، نقطه آغازین تا نقطه اوج (مسیر AB) نشانگر تغییر شکل الاستیک سیستم در داخل گمانه و اطراف آن است. پس از آنکه فشار گمانه به مقدار B می‌رسد، یک شکست هیدرولیکی دوسویه و قائم روی دیواره گمانه ایجاد می‌شود. سپس فشار گمانه افت می‌کند و در مسیر BC رشد ناپایدار ترک رخ می‌دهد (شکل ۴-۱۰-ب). بدین معنی که نرخ افزایش حجم شکست هیدرولیکی در حال انتشار، بیشتر از نرخ تزریق سیال شکست است. با ادامه پمپاژ سیال، توسعه پایدار شکست هیدرولیکی اتفاق می‌افتد که مسیر CD نشانگر آن است (شکل ۴-۱۰-پ).

جدول ۴-۶ پارامترهای عملیاتی

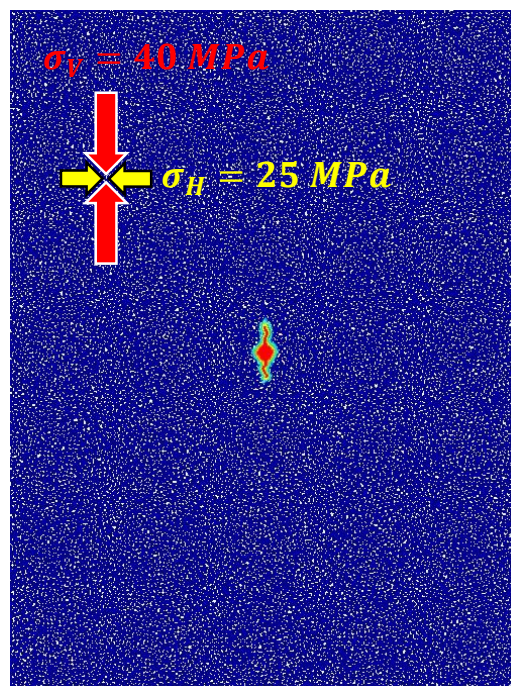
پارامترهای عملیاتی	نماد	واحد	مقدار
نرخ تزریق		m ³ /s	۱۰-۴
ویسکوزیته سیال	μ	Pa.s	۱۰-۲
مدول بالک سیال	K_f	GPa	۲



(الف)



(پ)



(ب)

شکل ۴-۱۰ (الف) تاریخچه فشار گمانه (ب) و (پ) الگوی شکست و توزیع فشار منفذی پس از شکست هیدرولیکی

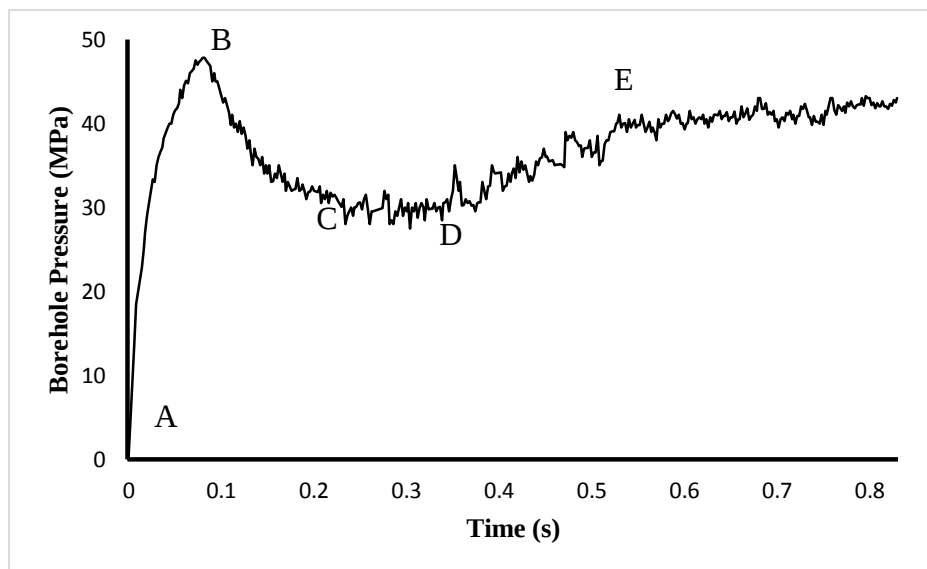
۴-۴-۱ تاثیر زاویه میل بر رفتار شکست هیدرولیکی

در این بخش اندرکنش بین شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی تحت زوایای میل 30° ، 60° و 90° نسبت به راستای قائم شبیه سازی شده است. نتایج مدل سازی‌ها نشان می‌دهند که شکل منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه در هر سه مدل با یکدیگر مشابه است. در حالی که الگوهای شکست و توزیع‌های فشار منفذی متفاوت است.

وقتی زاویه میل 30° است (شکل ۴-۱۱)، شکست هیدرولیکی در درزه طبیعی محبوس شده و موجب اتساع بیش از نیمی از درزه طبیعی می‌شود. این روند تا انتهای درزه ادامه می‌یابد و پس از آن شکست در جهت تنش اصلی حداکثر پیش می‌رود.

نتایج شبیه سازی شامل منحنی تاریخچه فشار گمانه و توزیع فشار منفذی پس از شروع عملیات شکست هیدرولیکی، در شکل ۴-۱۱ ارایه شده است. نقطه A (شکل ۴-۱۱-الف) زمان شروع عملیات است. با تزریق سیال، فشار گمانه افزایش می‌یابد و نهایتاً به نقطه اوج نمودار، یعنی نقطه B می‌رسد. در این لحظه یک شکست هیدرولیکی دوسویه در جهت تنش اصلی حداکثر (جهت قائم) روی دیواره چاه ایجاد می‌شود. پس از ایجاد شکست هیدرولیکی، به علت آزادسازی تنش و نشت سیال به داخل شکستگی ایجاد شده، فشار گمانه افت می‌کند و توسعه ناپایدار شکست هیدرولیکی (مسیر BC) رخ می‌دهد (شکل ۴-۱۱-ب). افت فشار گمانه تا نقطه C که مقدار آن تقریباً برابر با تنش اصلی حداقل است، ادامه پیدا می‌کند. پیشروی شکست هیدرولیکی داخل مخزن (مسیر CD) در جهت تنش اصلی حداکثر ادامه می‌یابد (شکل ۴-۱۱-پ) تا اینکه شکست هیدرولیکی به درزه‌های طبیعی می‌رسد (نقطه D). با مقایسه نتایج به دست آمده از این شبیه سازی و رویدادهای لرزه‌ای ایجاد شده در شبیه سازی‌های یون و همکاران [۵۷] می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که در این لحظه، شکست هیدرولیکی با درزه طبیعی ادغام شده و سیال

شکست به داخل درزه‌های طبیعی نفوذ می‌کند که به گسیختگی برشی درزه‌ها می‌انجامد (مسیر DE) که همان مکانیزم برش هیدرولیکی^۱ است (شکل ۴-۱۱-ت). همان طور که مشاهده می‌شود، در مسیر DE افزایش فشار گمانه اتفاق می‌افتد. یعنی فشار بیشتری برای گسترش شکست هیدرولیکی در داخل درزه‌های طبیعی و اتساع آن‌ها نیاز است. چرا که در این مرحله در داخل هر دو درزه بالایی و پایینی و همچنین در دو جهت درزه‌ها، نشت سیال اتفاق می‌افتد. با ادامه تزریق و پر شدن و اتساع کامل درزه‌های طبیعی (نقطه E)، تمرکز تنش در انتهای درزه‌های طبیعی افزایش می‌یابد و شکست هیدرولیکی از آن نقطه و در جهت تنش اصلی حداکثر ادامه می‌یابد (شکل ۴-۱۲). این نوع شکست در تجارب آزمایشگاهی انجام شده توسط شن^۲ [۷۴] و لی^۳ [۷۵] در رابطه با انتشار شکست از انتهای درزه‌های مایل تحت بار اضافی مشاهده شده است. الگوی نهایی شکست هیدرولیکی پس از عبور از درزه‌های طبیعی در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود.

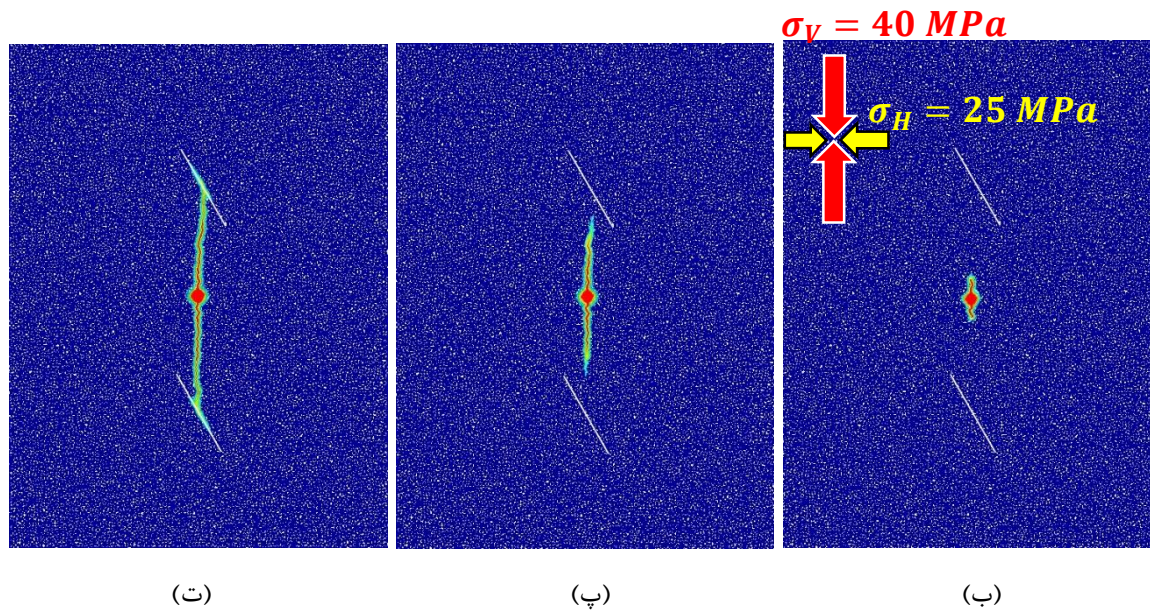


(الف)

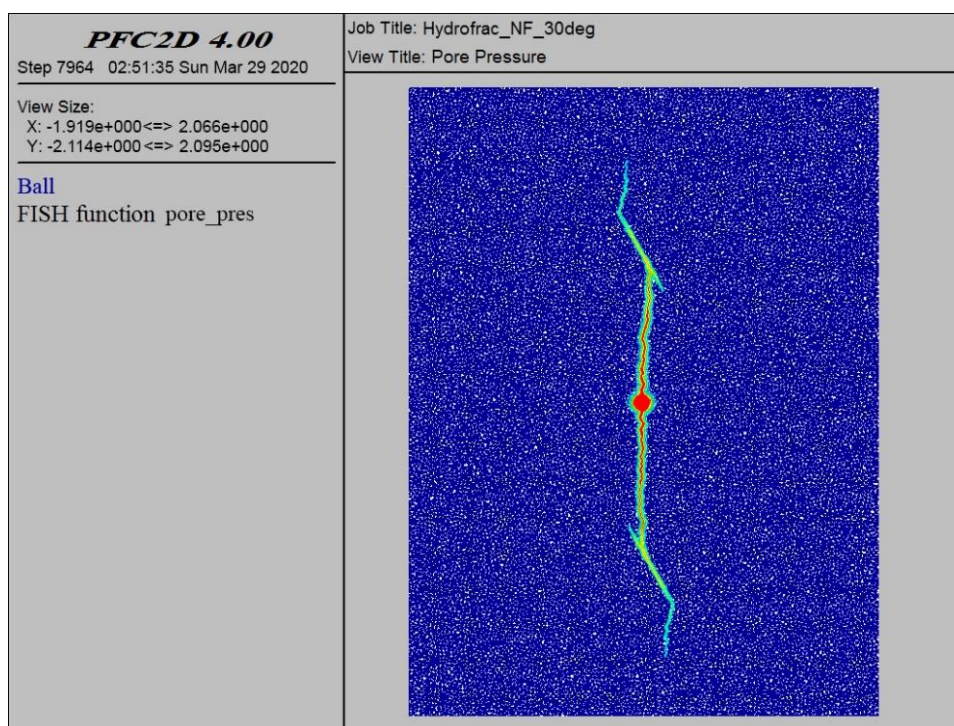
¹ hydro-shearing mechanism

² Shen

³ Lee



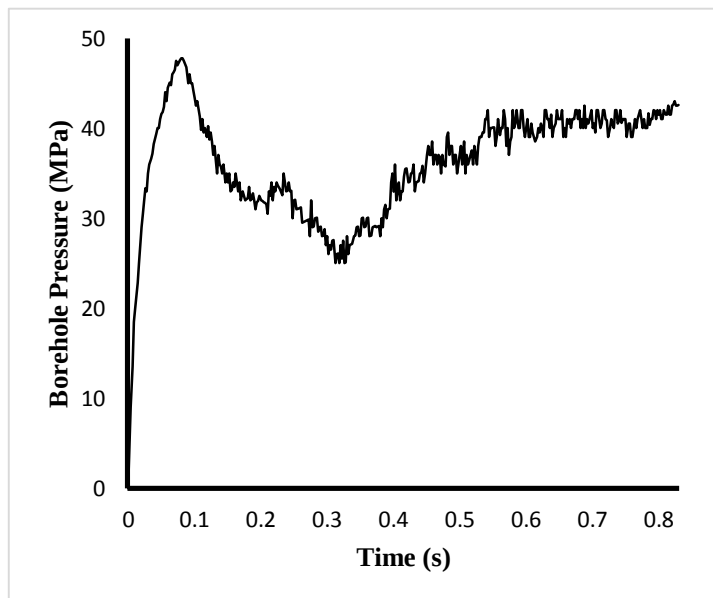
شکل ۴-۱۱ (الف) تاریخچه فشار گمانه (ب) و (پ) و (ت) مراحل مختلف انتشار شکست هیدرولیکی در داخل مخزن دارای دو درزه طبیعی با زوایای میل 30°



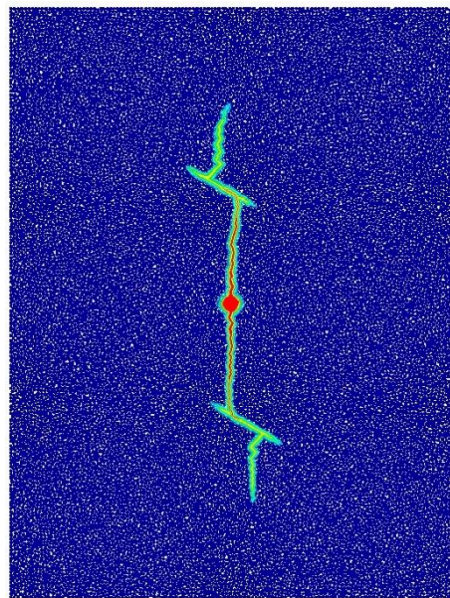
شکل ۴-۱۲ الگوی نهایی شکست هیدرولیکی پس از عبور از درزه‌های طبیعی

وقتی زاویه میل 60° است (شکل ۴-۱۳)، شکست هیدرولیکی از نقطه‌ای بین نقطه تقاطع (محل برخورد شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی) و انتهای درزه‌های طبیعی عبور می‌کند. در واقع شکست هیدرولیکی پس از رسیدن به درزه طبیعی دچار انحراف شده و در محلی بین نقطه تقاطع و انتهای درزه، از درزه طبیعی عبور کرده و در جهت تنش اصلی حداکثر گسترش می‌یابد. لازم به ذکر است بخش‌هایی از درزه طبیعی دچار اتساع نیز می‌شود.

وقتی زاویه میل به 90° می‌رسد (شکل ۴-۱۴)، شکست هیدرولیکی مستقیماً از درزه‌های طبیعی عبور می‌کند که بخش از کوچکی از درزه نیز دچار اتساع می‌شود. اما باعث انحراف شکست هیدرولیکی نمی‌شود و شکست هیدرولیکی در همان جهت اولیه خود پیش می‌رود. لازم به ذکر است که توضیحات ارائه شده برای مدل با درزه 30° ، درباره مراحل مختلف فرایند شکست هیدرولیکی، در مورد دو مدل دیگر نیز صادق است.

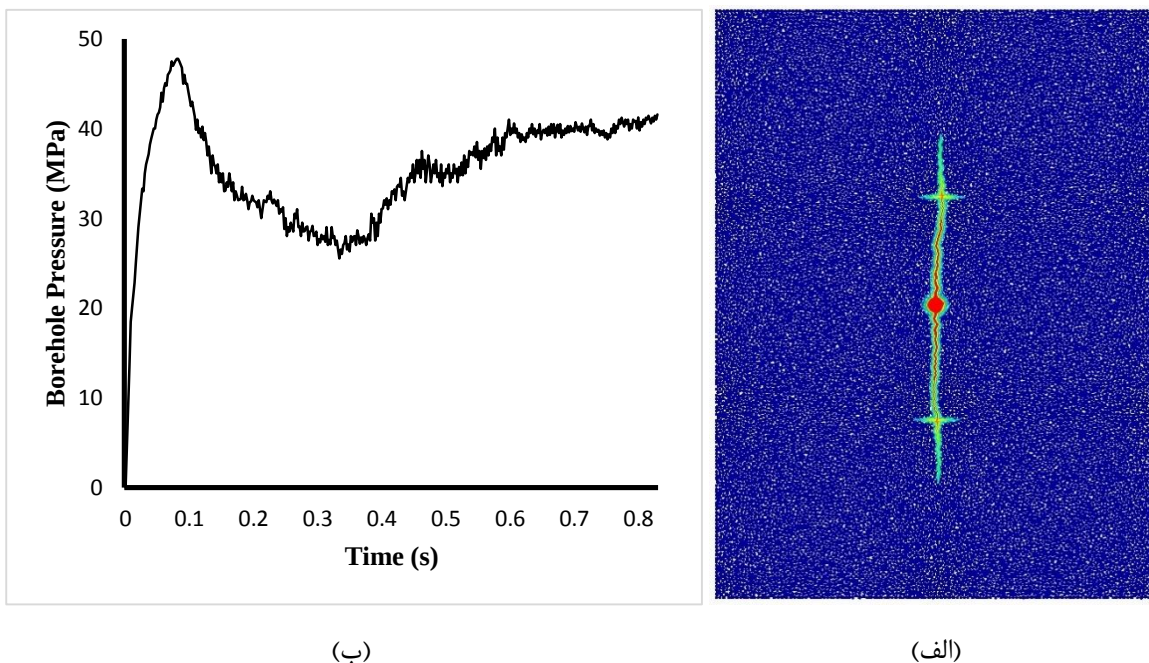


(ب)



(الف)

شکل ۴-۱۳ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با زاویه میل 60° (ب) تاریخچه فشار گمانه



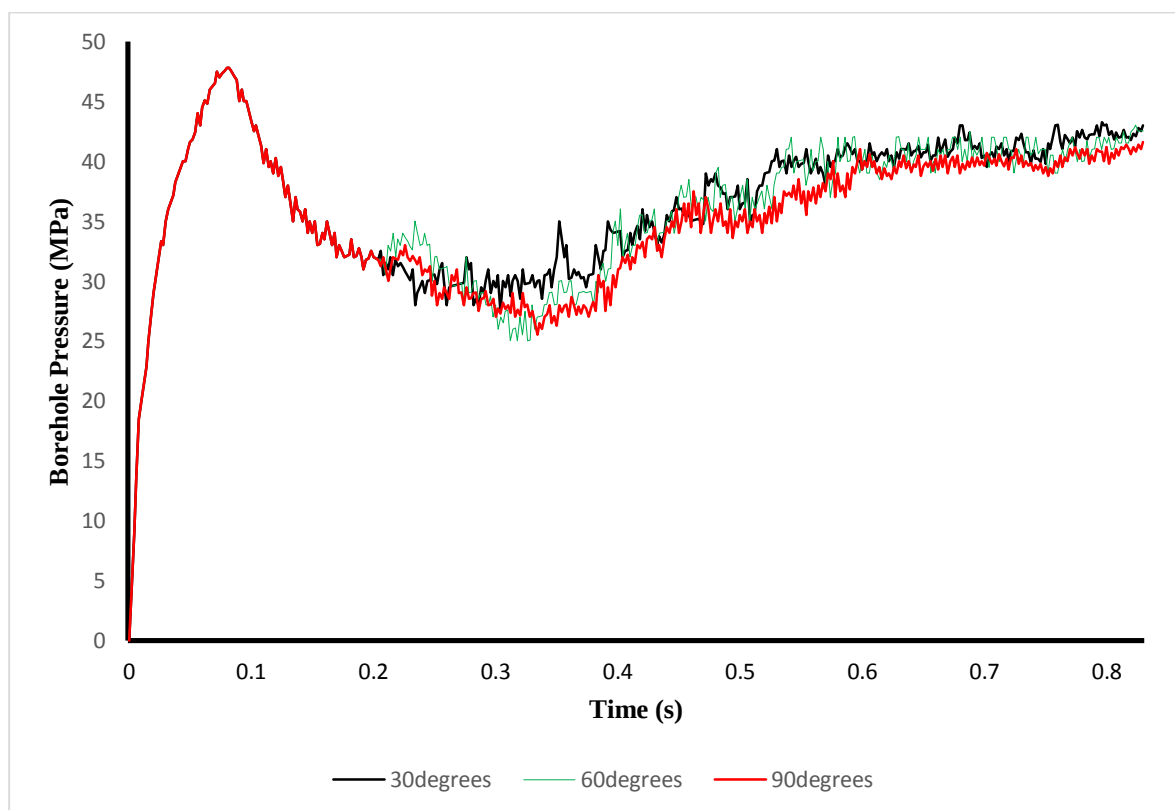
شکل ۴-۱۴ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با زاویه میل 90° (ب) تاریخچه فشار گمانه

همان طور که از اشکال ۴-۱۱ تا ۴-۱۴ پیداست، در شرایطی که درزه‌های طبیعی متعام هستند (زاویه 90°)، نقطه شروع و توسعه شکست هیدرولیکی بعد از شکستگی طبیعی، در راستای مستقیم ایجاد می‌شود. به عبارت دیگر در صورت شرایط یکسان برای حالت زاویه شکستگی غیرمتعام^۱، راستای شکست هیدرولیکی مستقیم نبوده و همچنین نقطه شروع مجدد شکستگی ناشی از عملیات فشار هیدرولیکی، بستگی به زاویه شکستگی طبیعی دارد. به طوری که مشاهده می‌شود که در زاویه 60° شکستگی طبیعی، شروع شکست هیدرولیکی از داخل شکستگی طبیعی و با طی مسیر کوتاه‌تری نسبت به زاویه 30° ایجاد شده و در جهت تنش اصلی حداکثر برجا گسترش می‌یابد. در حالی که با کاهش زاویه

^۱ non-orthogonal

شکستگی طبیعی 30° و کمتر، شروع شکستگی از انتهای شکستگی و از داخل شکستگی طبیعی رخ داده و در جهت تنش اصلی حداکثر ادامه می‌یابد.

از مقایسه منحنی‌های فشار گمانه در هر سه جهت‌یافتگی درزه‌های طبیعی که در شکل ۴-۱۵ آورده شده است، می‌توان دریافت که فشار شکست در تمامی حالت‌های فوق، یک مقدار یکسان و حدود $47/87 \text{ MPa}$ بوده و برابر است با مدلی که هیچ درزه طبیعی در محیط وجود ندارد. در حالی که پس از رسیدن شکست هیدرولیکی به درزه‌های موجود، فشار گمانه افزایش می‌یابد. علت این امر هرزروی سیال در داخل درزه‌های طبیعی و اتساع درزه است. به علاوه زمان ایجاد شکست هم در تمامی حالت‌ها $0/082$ ثانیه بوده که مشابه حالتی است که هیچ درزه طبیعی در مخزن وجود ندارد. بنابراین می‌توان گفت که زاویه میل درزه‌های طبیعی، تاثیر چندانی بر فشار توسعه شکست هیدرولیکی و زمان آغاز آن ندارد.



شکل ۴-۱۵ مقایسه منحنی‌های فشار گمانه در زوایای میل مختلف

به طور کلی می‌توان گفت که جهت‌گیری درزه‌های طبیعی، تاثیر قابل توجهی بر انتشار شکست هیدرولیکی دارد. به طوری که در زوایای میل کم، تمایل درزه‌های طبیعی به اتساع و انحراف سیال شکست بیشتر است و همین امر به انتشار شکست هیدرولیکی در درزه طبیعی و ایجاد دوباره آن از انتهای درزه یا یک نقطه ضعیف در آن می‌انجامد. در مقابل، در زوایای میل زیاد، شکست هیدرولیکی تمایل دارد که از درزه‌های طبیعی عبور کند. یعنی هرچه زاویه میل درزه کمتر باشد، انتشار شکست هیدرولیکی در درزه طبیعی آسان‌تر است. این نتایج مطابقت قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی بلانتون^۱ [۷۶] دارد.

۴-۴-۲ تاثیر مقاومت درزه‌ها بر اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی

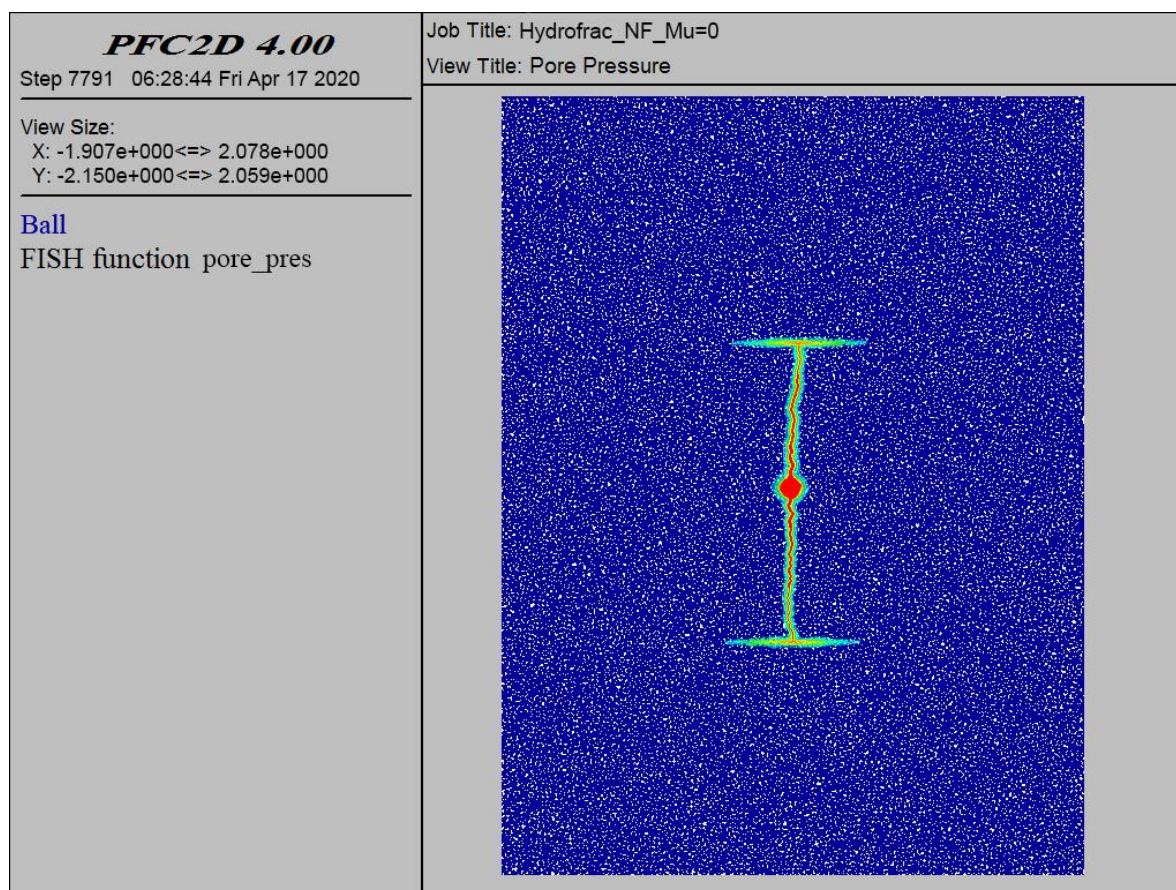
در این بخش تاثیر مقاومت درزه‌ها (ضریب اصطکاک درزه) بر اندرکنش بین درزه‌های طبیعی و شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، ضرایب اصطکاک مختلف ۰، ۰/۴، ۰/۸ و ۱/۲ برای درزه‌های طبیعی، در یک زاویه میل 90° در نظر گرفته شده و مدلسازی شده است. در این مدلسازی‌ها نیز تنش‌های محصورکننده، پارامترهای ریزمقیاس مدل و پارامترهای عملیاتی همانند مدل‌های قبلی است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که شکست هیدرولیکی پس از رسیدن به درزه طبیعی بدون اصطکاک و بدون چسبندگی، کاملاً محبوس شده، درزه اتساع می‌یابد و ترک در جهت درزه طبیعی گسترش می‌یابد (شکل ۴-۱۶). منحنی تاریخچه فشار گمانه نشان می‌دهد که پس از ایجاد شکست هیدرولیکی در فشار ۴۷/۸۷ MPa، منحنی دچار یک افت شده و پس از رسیدن شکست هیدرولیکی به درزه‌های طبیعی، دوباره کمی افزایش می‌یابد. علت این پدیده را می‌توان هرزروی سیال شکست در درزه‌های طبیعی و دوشاخه شدن شکست هیدرولیکی دانست. این پدیده سبب رهایی تنش شده و بنابراین برای گسترش شکست هیدرولیکی نیاز به فشار بیشتری وجود دارد. از آنجا که شکست هیدرولیکی تمایل

¹ Blanton

دارد در جهت کمترین مقاومت منتشر شود، بنابراین در درزه‌های طبیعی که هیچ مقاومتی ندارند گسترش یافته و موجب اتساع آن‌ها می‌شود.

سرمدی [۵۹] در مطالعات آزمایشگاهی و عددی خود این پدیده را به اثبات رساند. به علاوه اینکه رنشاو^۱ و پولارد^۲ [۷۷] با مطالعه اندرکنش ناپیوستگی‌های اصطکاکی^۳ و یک شکست خشک^۴ نشان دادند، وقتی که مقاومت برشی ناپیوستگی کمتر از تنش کششی القا شده باشد، ناپیوستگی دچار لغزش شده و شکست در داخل آن حبس می‌شود.



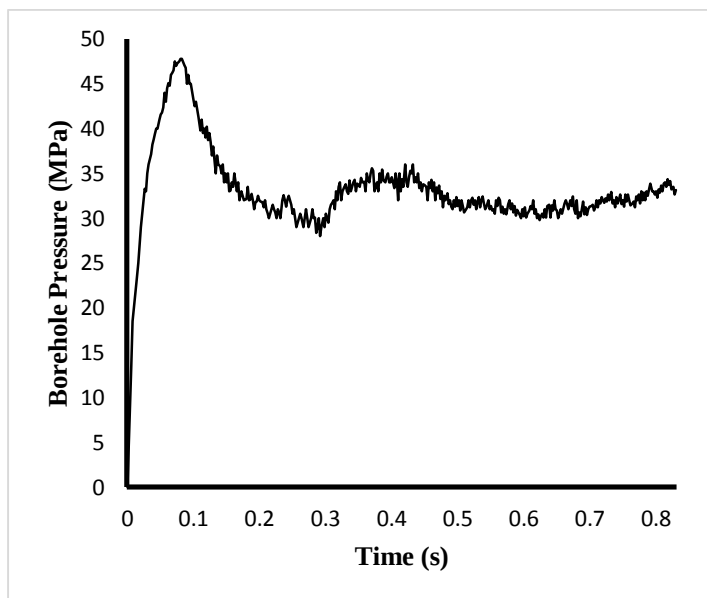
(الف)

¹ Renshaw

² Pollard

³ frictional interfaces

⁴ dry fracture



(ب)

شکل ۴-۱۶ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0$ (ب) تاریخچه فشار گمانه

ژائو^۱ [۷۸] نشان داد که حبس شدن شکست هیدرولیکی در درزه‌های طبیعی می‌تواند به علت لغزش برشی درزه‌های موجود باشد. چرا که لغزش برشی سبب کاهش فشار سیال در داخل درزه می‌شود و این امر به اتساع درزه‌ها می‌انجامد. از آنجا که در حالت فوق درزه طبیعی در تمام طول خود هیچ مقاومتی ندارد، لذا تا انتها دچار لغزش برشی و اتساع شده و شکست هیدرولیکی را حبس می‌کند.

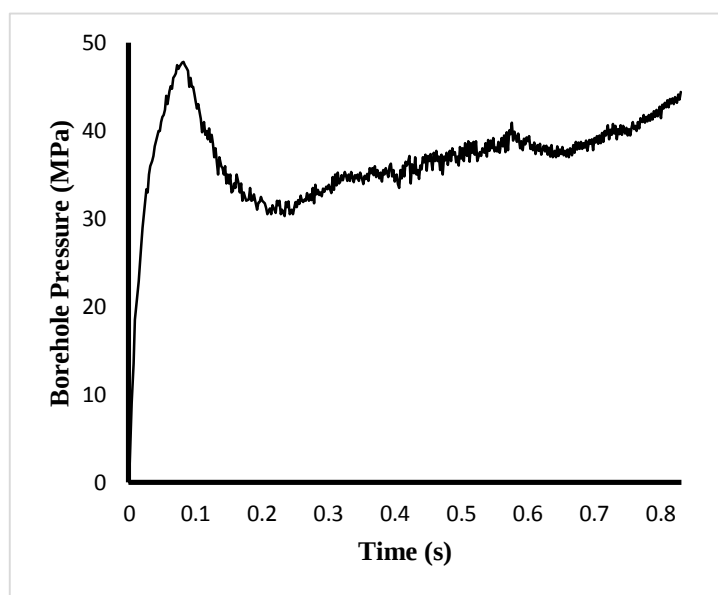
شکل‌های ۴-۱۷ تا ۴-۱۹ نشان می‌دهند که اگرچه شکست هیدرولیکی در تمام حالت‌ها از درزه طبیعی عبور می‌کند، اما وقتی ضریب اصطکاک درزه کمتر است، ناحیه بیشتری از آن دچار بازشدگی می‌شود. در واقع در ابتدا، به علت لغزش برشی درزه، شکست هیدرولیکی در داخل درزه‌های طبیعی حبس می‌شود. اما با ادامه پمپاژ از آن‌ها عبور می‌کند. بدیهی است که در مدل‌های با مقاومت درزه کمتر، طول بیشتری از درزه دچار لغزش برشی و اتساع می‌شود.

¹ Zhao

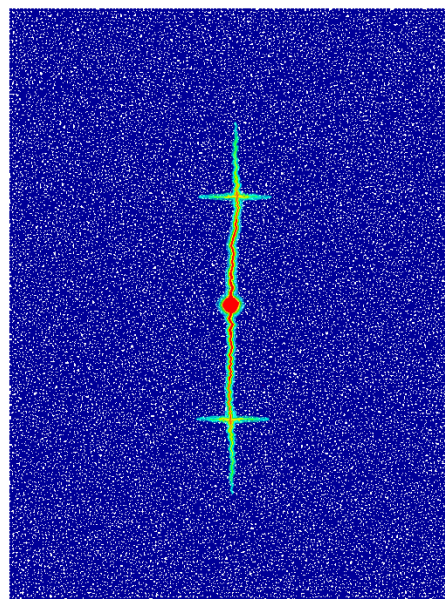
با مقایسه منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه (شکل ۴-۲۰) می‌توان دریافت که فشار شکست و زمان ایجاد شکست در تمامی حالت‌ها تقریباً یکسان است.

۴-۳-۴ تاثیر نسبت تنش‌های برجا

وضعیت رژیم تنش منطقه یکی از عوامل تاثیرگذار بر الگوی توسعه شکست هیدرولیکی است. تنش‌های ذاتی در توده‌سنگ اغلب ناهمگن بوده و فشار ایجاد و انتشار شکست هیدرولیکی و جهت‌گیری و گسترش آن ارتباط نزدیکی با ناهمگنی تنش‌های برجا دارد. در این بخش اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی با زاویه میل 60° در سه نسبت تنش بر جای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که خصوصیات این مدل‌ها، مشابه مدل‌های قبلی است و تنها مقادیر تنش‌های برجا تغییر می‌کنند.

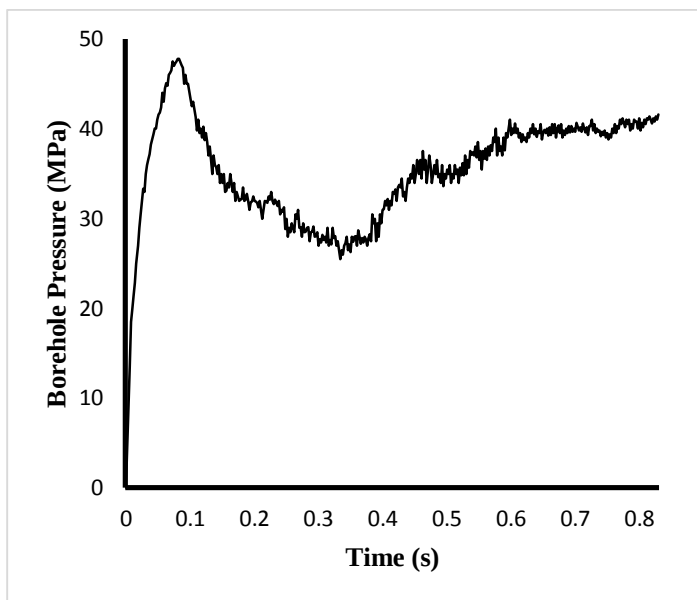


(ب)

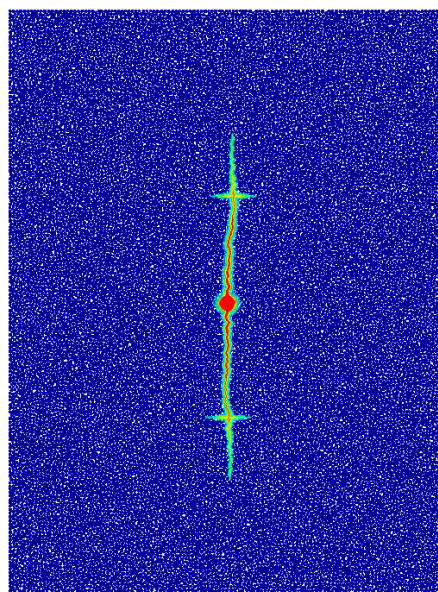


(الف)

شکل ۴-۱۷ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0.4$ (ب) تاریخچه فشار گمانه

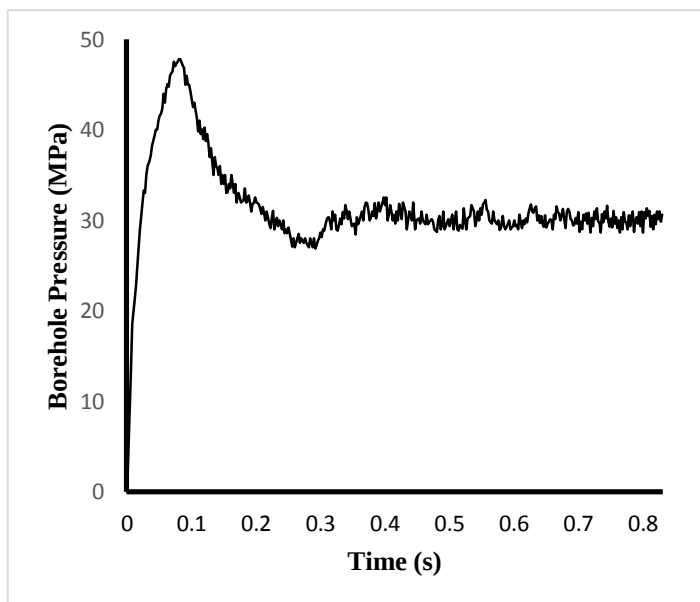


(ب)

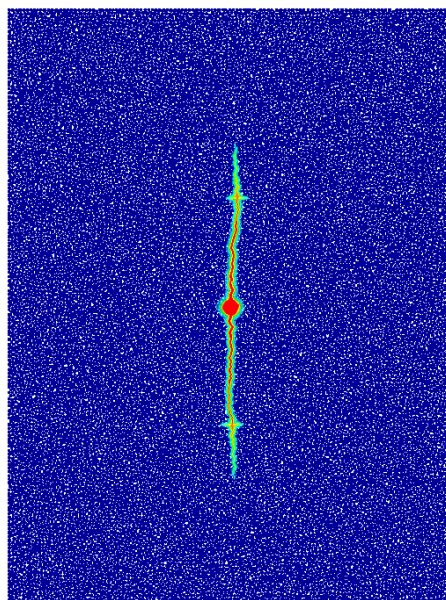


(الف)

شکل ۴-۱۸ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 0.8$ (ب) تاریخچه فشار گمانه

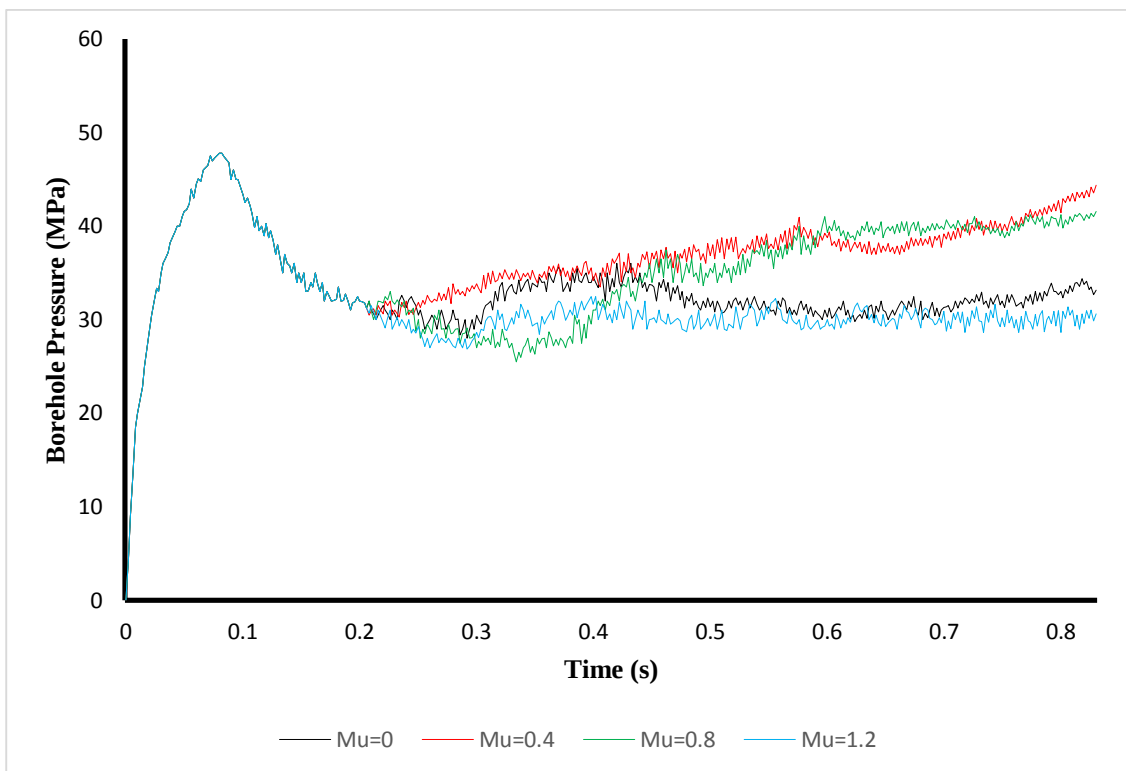


(ب)



(الف)

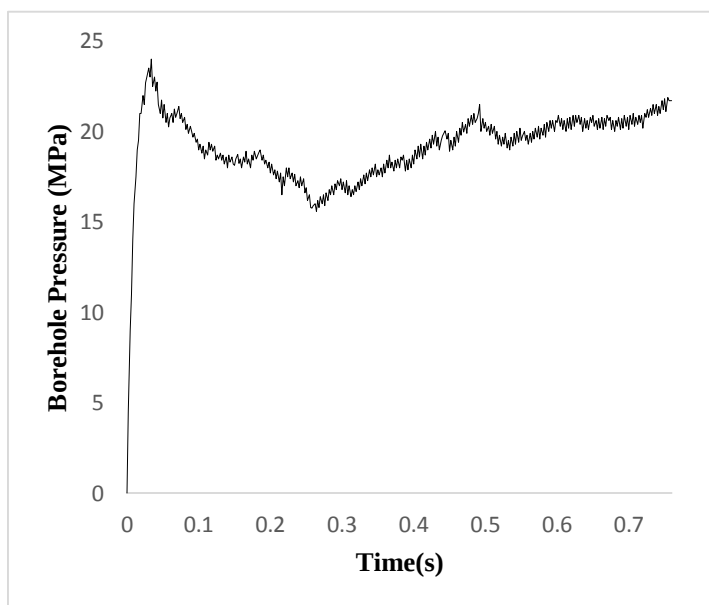
شکل ۴-۱۹ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\mu = 1.2$ (ب) تاریخچه فشار گمانه



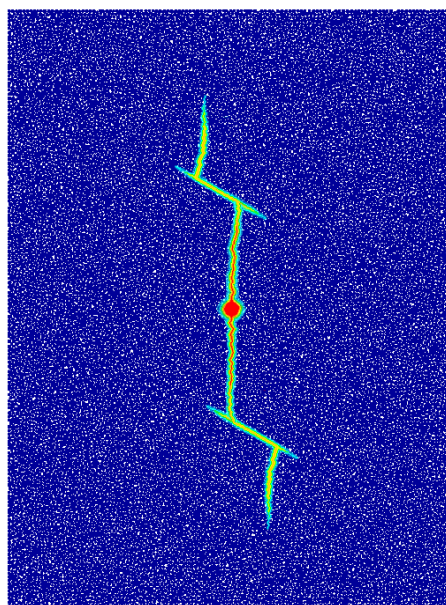
شکل ۴-۲۰ مقایسه منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه برای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک

در حالت اول، نسبت تنش‌های برجا به صورت $\sigma_V/\sigma_H = 40 \text{ MPa}/15 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۲۱). در این حالت مشاهده می‌شود که فشار شکست تا $23/64 \text{ MPa}$ کاهش می‌یابد. علاوه بر این طول بیشتری از درزه طبیعی دچار اتساع می‌شود و شکست هیدرولیکی پس از $0/034$ ثانیه ایجاد می‌شود.

در حالت دوم نسبت تنش‌های برجا به صورت $\sigma_V/\sigma_H = 40 \text{ MPa}/35 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شد (شکل ۴-۲۲). مشاهده شد که فشار شکست تا $75/39 \text{ MPa}$ افزایش می‌یابد و طول کمتری از درزه دچار اتساع می‌شود. ضمن اینکه شکست هیدرولیکی پس از گذشت $0/102$ ثانیه از آغاز عملیات شکست هیدرولیکی، ایجاد می‌شود.

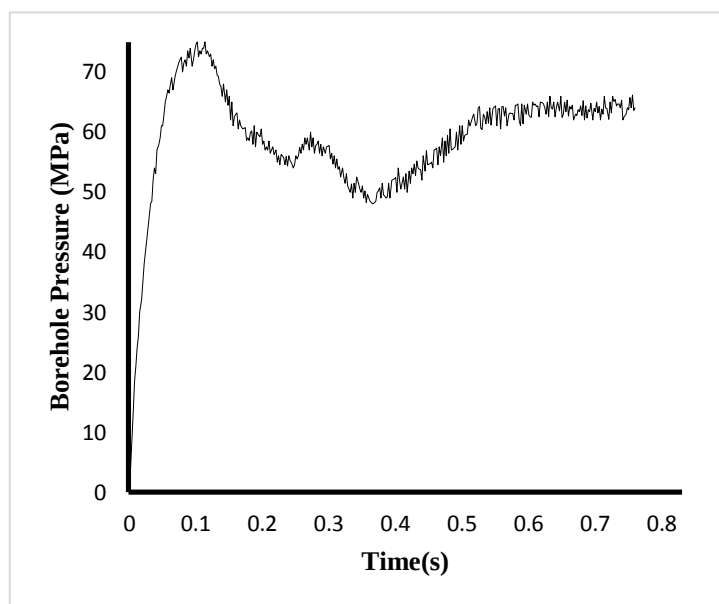


(ب)

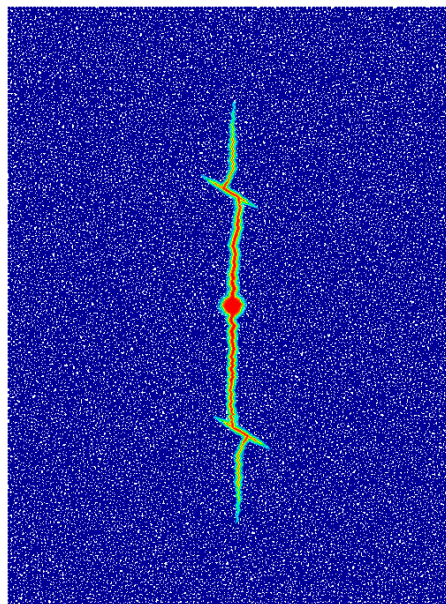


(الف)

شکل ۴-۲۱ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\sigma_V/\sigma_H = 40/15$ (ب) تاریخچه فشار گمانه



(ب)



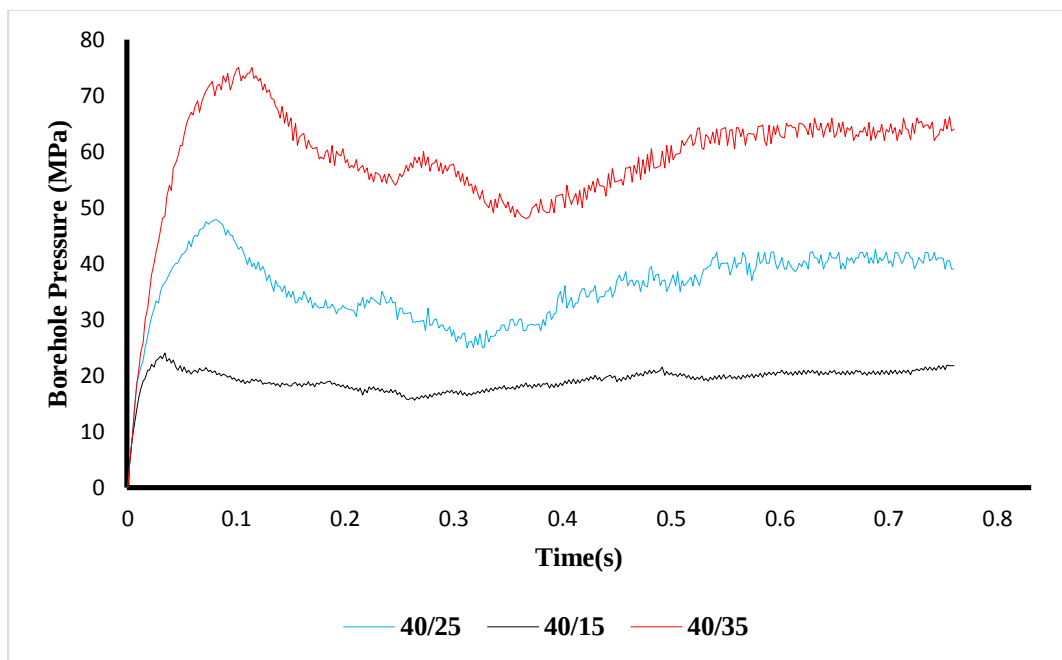
(الف)

شکل ۴-۲۲ (الف) اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه طبیعی با $\sigma_V/\sigma_H = 40/35$ (ب) تاریخچه فشار گمانه

برای حالت سوم نیز نسبت تنش‌های برجا به صورت $\sigma_V/\sigma_H = 40 \text{ MPa}/25 \text{ MPa}$ در نظر

گرفته شد که پیش‌تر (شکل ۴-۱۳) جزییات آن تشریح شد.

مقایسه منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه برای نسبت‌های مختلف تنش‌های برجا (شکل ۴-۲۳) نشان می‌دهد که روند نمودار در هر سه حالت مشابه است. اما همان طور که از جدول ۴-۷ پیداست، فشار ایجاد شکست هیدرولیکی به شدت وابسته به نسبت تنش‌های برجا است. به عبارت دیگر، در شرایط یکسان مقدار تنش اصلی حداکثر، مقدار تنش اصلی حداقل تاثیر قابل توجهی بر الگوی انتشار ترک خواهد داشت. همان طور که از جدول و نمودار برمی‌آید، تحت شرایط یکسان مقدار تنش اصلی حداکثر، فشارهای ایجاد شکست هیدرولیکی با افزایش ناهمگنی و نسبت تنش‌های برجا کاهش می‌یابد. علاوه بر این زمان ایجاد شکست هیدرولیکی نیز با افزایش مقدار تنش افقی برجا افزایش یافته است. نکته قابل توجه دیگر این است که فشار توسعه شکست هیدرولیکی نیز متناسب با افزایش مقدار تنش اصلی حداقل، افزایش می‌یابد.



شکل ۴-۲۳ مقایسه منحنی‌های فشار گمانه برای مقادیر مختلف نسبت تنش‌های برجا

همان طور که اشاره شد، در مقادیر تنش افقی کمتر (نسبت تنش قائم به تنش افقی بیشتر)، اتساع درزه طبیعی بیشتر از حالت‌هایی است که مقدار تنش افقی زیاد است. علت این پدیده را می‌توان

این طور تفسیر کرد که با کاهش مقادیر تنش افقی، تنش نرمال وارد بر صفحه درزه طبیعی و به تبع آن مقاومت برشی درزه طبیعی کاهش می‌یابد. همین امر سبب گسترش بیشتر شکست هیدرولیکی در راستای درزه طبیعی می‌شود.

جدول ۴-۷ حداکثر فشار و زمان ایجاد شکست هیدرولیکی برای نسبت‌های مختلف تنش برجا

نسبت تنش‌های برجا حداکثر فشار شکستگی زمان ایجاد شکست (s)

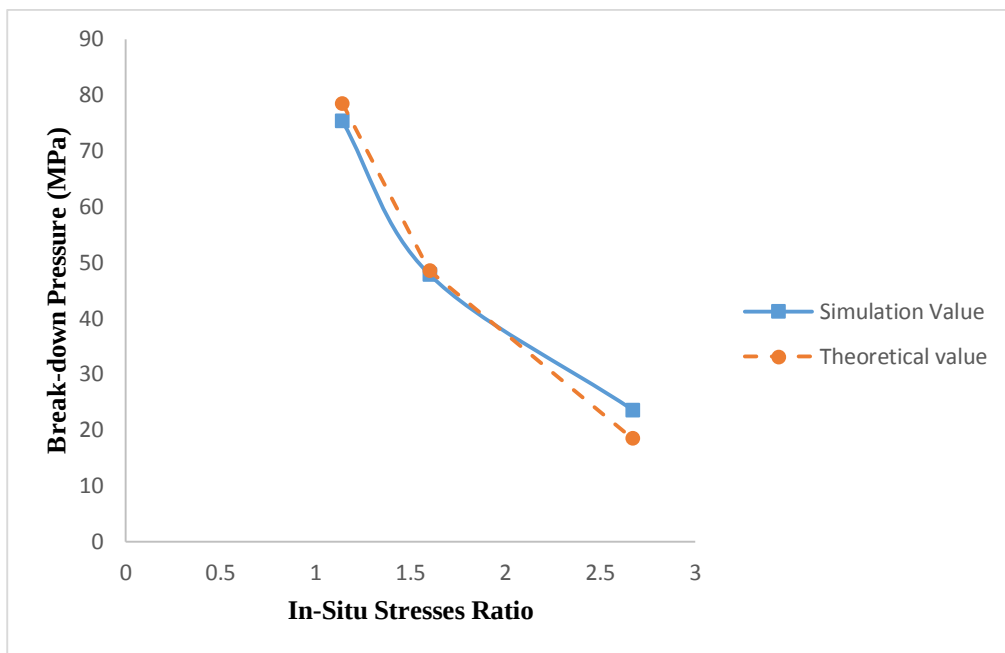
$\sigma_V/\sigma_H = 40/15$	۲۳/۶۴	۰/۰۳۴
$\sigma_V/\sigma_H = 40/25$	۴۷/۸۷	۰/۰۸۲
$\sigma_V/\sigma_H = 40/35$	۷۵/۳۹	۰/۱۰۲

شکل ۴-۲۴، نمودار فشار ایجاد شکست هیدرولیکی بر حسب نسبت تنش‌های برجا با استفاده از مدلسازی PFC^{2D} و مقادیر به دست آمده از روابط تحلیلی را نشان می‌دهد. چگونگی محاسبه مقادیر تحلیلی فشار ایجاد شکست هیدرولیکی در بخش ۴-۵ تشریح می‌شود. بر این اساس، در یک مقدار تنش حداکثر ثابت، با افزایش نسبت تنش‌های برجا، فشار ایجاد شکست هیدرولیکی کاهش می‌یابد. ژو و همکاران [۴۲] در شبیه‌سازی‌های یکسانی که بدون در نظر گرفتن درزه‌های طبیعی انجام دادند و مقایسه نتایج خود با مقادیر تحلیلی، مشاهده کردند که نتایج حاصل از مدلسازی PFC^{2D} مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی دارد.

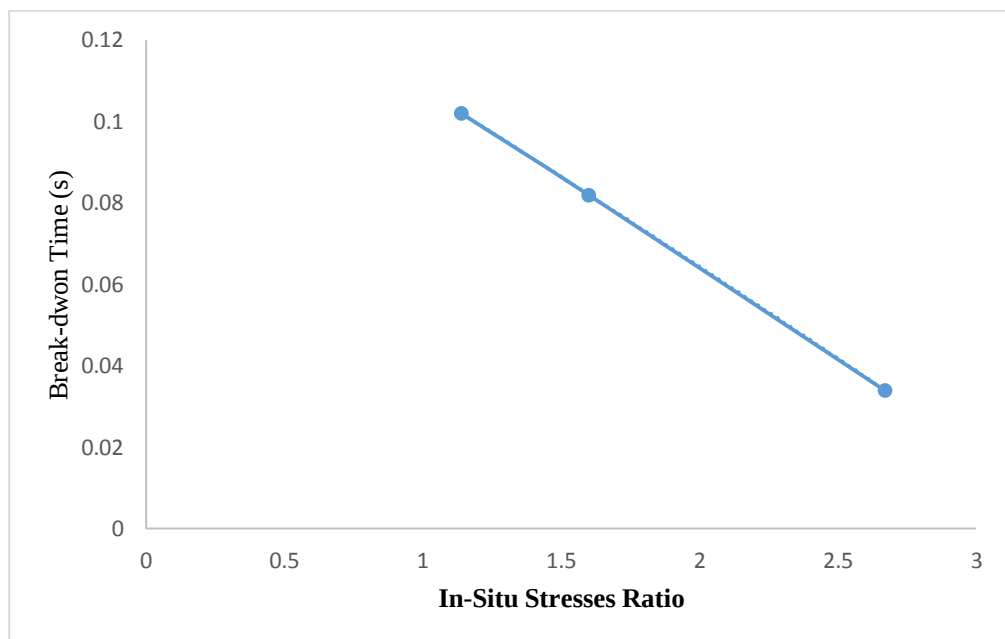
نمودار حداکثر زمان ایجاد شکست هیدرولیکی پس از شروع عملیات بر حسب نسبت تنش‌های

برجا در شکل ۴-۲۴ نشان داده شده است. همان طور که پیداست، در یک مقدار تنش حداکثر ثابت، با

افزایش نسبت تنش‌های برجا، زمان ایجاد شکست هیدرولیکی تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲۴ مقادیر عددی و تحلیلی فشار ایجاد شکست هیدرولیکی بر حسب تنش‌های برجا



شکل ۴-۲۵ زمان ایجاد شکست هیدرولیکی بر حسب تنش‌های برجا

۴-۵ اعتبارسنجی

امکان استفاده از روش پیوند ذرات (BPM) برای شبیه سازی جریان سیال در مطالعات بسیاری بررسی شده است [۷۰, ۷۸-۸۳]. اما در مدل سازی شکست هیدرولیکی نه تنها جریان سیال، بلکه ایجاد و گسترش ترک نیز حایز اهمیت است. به علاوه اینکه یک مدل سازی عددی در کنار صحت سنجی آن معنا و مفهوم پیدا می کند.

در این پژوهش به علت عدم دسترسی به اطلاعات میدانی و آزمایشگاهی، از روش های تحلیلی به منظور اعتبار سنجی مدل عددی استفاده شده است. طبق رابطه ۲-۹ (بخش ۲-۳) فشار شکست هیدرولیکی در داخل یک گمانه افقی واقع در صفحه قائم و در شرایط تنش برجای قائم بزرگ تر از تنش برجای افقی، برابر است با [۱۷]:

$$p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_H - \sigma_V - p_f + T_0 \quad (۲-۹)$$

در این مدل سازی فشار منفذی برابر با صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین می توان از مولفه p_f صرف نظر کرد. مقادیر تنش افقی برجا در مدل سازی های مختلف به ترتیب برابر با ۱۵، ۲۵ و ۳۵ MPa و تنش قائم برجا برای تمام مدل ها برابر با ۴۰ MPa در نظر گرفته شده اند. مقاومت کششی سنگ محیط نیز با استفاده از شبیه سازی آزمون برزلی ۱۳/۵۵ MPa به دست آمد. با جایگذاری این مقادیر در رابطه فوق، حداکثر فشار شکست تحلیلی محاسبه می شود که خلاصه آن در جدول ۴-۸ آمده است. در تمام حالت ها مقدار فشار شکست به دست آمده از مدل سازی به مقدار تحلیلی بسیار نزدیک است که نشانگر صحت و اعتبار شبیه سازی انجام شده در این پژوهش است. مسیر شکست هیدرولیکی نیز که در جهت تنش اصلی حداکثر است، دلیل دیگری بر صحت این مدل سازی است.

جدول ۴-۸ مقادیر تحلیلی و عددی حداکثر فشار شکست

نسبت تنش‌های برجا حداکثر فشار شکست (MPa)

مقدار عددی	مقدار تحلیلی	
۲۳/۶۴	۱۸/۵۵	$\sigma_V/\sigma_H = 40/15$
۴۷/۸۷	۴۸/۵۵	$\sigma_V/\sigma_H = 40/25$
۷۵/۳۹	۷۸/۵۵	$\sigma_V/\sigma_H = 40/35$

۴-۶ جمع‌بندی

به منظور طراحی و انجام عملیات شکست هیدرولیکی در یک مخزن دارای درزه‌های طبیعی، لازم است تاثیر این ناپیوستگی‌های طبیعی بر چگونگی انتشار شکست هیدرولیکی به دقت بررسی شود. بدین منظور و به علت ماهیت ناپیوسته این مساله، نرم‌افزار PFC^{2D} به کار گرفته شد.

روند مدلسازی شامل کالیبراسیون خصوصیات بزرگ‌مقیاس مخزن با استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده در PFC^{2D}، چگونگی ساخت مدل PFC^{2D}، تولید ذرات و تعریف پیوندهای موازی در نقاط تماس، استفاده از مدل درزه صاف در تعریف درزه‌های طبیعی و اعمال تنش‌های برجا به تفصیل در این فصل شرح داده شد.

سپس با تعریف خصوصیات سیال و پارامترهای عملیاتی، در ابتدا شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی در یک مخزن بدون ناپیوستگی انجام شد و فشار و زمان ایجاد شکست هیدرولیکی و همچنین الگوی انتشار آن در مخزن از مدل استخراج شد. در ادامه و با تعریف درزه‌های طبیعی، تحلیل حساسیت نسبت به زوایای مختلف بین درزه‌های طبیعی و راستای انتشار شکست هیدرولیکی، مقاومت درزه‌های طبیعی و نسبت تنش‌های برجا انجام و تاثیر این پارامترها بر پاسخ شکست هیدرولیکی در تقابل با درزه‌های طبیعی تفسیر شد.

در آخر، اعتبار سنجی این شبیه سازی با استفاده از روابط کلاسیک شکست هیدرولیکی انجام شد. مشخص شد که شبیه سازی انجام شده در نرم افزار PFC^{2D} ، تطابق خوبی با روابط تحلیلی دارد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتایج

در این پژوهش، با استفاده از کوپلینگ هیدرومکانیکی پیاده سازی شده در روش المان مجزای مبتنی بر مدل پیوند ذرات، سناریوهای مختلف حاکم بر چگونگی انتشار شکست هیدرولیکی در یک مخزن دارای درزه‌های طبیعی بررسی شد و تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای زاویه میل درزه طبیعی، مقاومت درزه طبیعی و نسبت تنش‌های بر جای منطقه صورت گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که:

- شکل منحنی‌های تاریخچه فشار گمانه برای زوایای میل مختلف درزه‌های طبیعی، مشابه است. اما الگوی شکست و توزیع‌های فشار منفذی متفاوت است. به طوری که اگر تحت شرایط یکسان، زاویه میل درزه 30° باشد، شکست هیدرولیکی در درزه محبوس شده و موجب اتساع آن می‌شود. وقتی زاویه درزه به 60° برسد، اگرچه شکست هیدرولیکی دچار انحراف می‌شود، اما از نقطه‌ای بین محل تقاطع و انتهای درزه عبور می‌کند. وقتی زاویه میل 90° است، شکست هیدرولیکی از درزه عبور می‌کند و تنها بخش کوچکی از درزه دچار اتساع می‌شود.
- وجود درزه‌های طبیعی تاثیری بر فشار شکست هیدرولیکی و زمان ایجاد آن ندارد. اما پس از رسیدن شکست هیدرولیکی به درزه طبیعی، فشار شکست افزایش می‌یابد که علت آن هرزروی سیال شکست در داخل درزه‌های طبیعی و اتساع آن است.
- شکست هیدرولیکی پس از رسیدن به درزه‌ای با ضریب اصطکاک و چسبندگی صفر و زاویه میل 90° محبوس شده و تنها باعث اتساع درزه می‌شود. هرچه مقاومت برشی درزه افزایش یابد، طول کمتری از درزه طبیعی دچار اتساع و بازشدگی می‌شود. به علاوه اینکه مقادیر مختلف مقاومت برشی درزه، تاثیری بر فشار شکست و زمان ایجاد آن ندارد.

- نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهند که فشار شکست هیدرولیکی و زمان ایجاد آن شدیداً به نسبت و اختلاف تنش‌های اصلی وابسته است. به طوری که با افزایش تنش اصلی حداقل، فشار شکست هیدرولیکی و زمان ایجاد آن افزایش می‌یابد.
- الگوی شکست هیدرولیکی نیز به نسبت تنش‌های برجا وابسته است و هرچه نسبت تنش‌های برجا بیشتر باشد، طول بیشتری از درزه طبیعی دچار بازشدگی می‌شود.
- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش، مطابقت خوبی با روابط تحلیلی نشان می‌دهد. بنابراین روش المان مجزای مبتنی بر مدل پیوند ذرات، قابلیت شبیه‌سازی واقع‌گرایانه عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن درزه‌دار طبیعی را دارد.

۵-۲ پیشنهادها

- عملیات شکست هیدرولیکی، فرایند بسیار پیچیده‌ای است و پارامترهای بسیاری بر کیفیت آن تاثیر می‌گذارند. لذا نمی‌توان همه این پارامترها را در یک مطالعه بررسی کرد. بنابراین موارد زیر به منظور مطالعات آتی در این حوزه پیشنهاد می‌شوند:
- عوامل مختلفی که بر اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی تاثیر می‌گذارند، ممکن است متقابلاً از یکدیگر اثر بپذیرند. جزییات این رابطه همچنان مجهول است. بنابراین پیشنهاد می‌شود مطالعاتی در خصوص کشف این روابط انجام شود.
 - اگرچه مدل PFC^{2D} ارایه شده در این پژوهش، قابلیت زیادی در مطالعه مکانیزم‌های مختلف اندرکنش از خود نشان داد، اما مساله شکست هیدرولیکی یک مساله سه بعدی است که در این پژوهش اثر بعد سوم مورد بررسی قرار نگرفت. لذا می‌توان در مطالعات بعدی از نرم‌افزار PFC^{3D} بهره گرفت.

- توصیه می‌شود برای درک بهتر و کامل‌تر این فرایند، ترکیبی از روش‌های مختلف تحلیلی و ریاضی، آزمایشگاهی و عددی اتخاذ شده و در مطالعات بعدی به آن پرداخته شود.
- یکی از مراحل مهم عملیات شکست هیدرولیکی، تزریق پروپانت پس از تزریق سیال شکست است. لذا پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تاثیر پروپانت نیز بر اندرکنش شکست هیدرولیکی و درزه‌های طبیعی لحاظ شود.

1. Peaceman, D.W., *Fundamentals of Numerical Reservoir Simulation*. 1977. Elsevier Scientific Publishing Company.
2. Priest, T., *Hubbert's peak: the great debate over the end of oil*. Historical Studies in the Natural Sciences, 2014. **44**(1): p. 37-79.
3. Kusmierczyk, P., *Numerical simulation of hydraulic fractures: various leak-off regimes and multifracturing*. 2015, Aberystwyth University.
4. Geertsma, J. and F. De Klerk, *A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures*. Journal of petroleum technology, 1969. **21**(12): p. 1,571-1,581.
5. Hubbert, M.K. and D.G. Willis, *Mechanics of hydraulic fracturing*. 1972.
6. Nordgren, R., *Propagation of a vertical hydraulic fracture*. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972. **12**(04): p. 306-314.
7. Perkins, T. and L. Kern, *Widths of hydraulic fractures*. Journal of Petroleum Technology, 1961. **13**(09): p. 937-949.
8. Spence, D. and P. Sharp, *Self-similar solutions for elastohydrodynamic cavity flow*. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 1985. **400**(1819): p. 289-313.
9. Lister, J.R., *Buoyancy-driven fluid fracture: the effects of material toughness and of low-viscosity precursors*. Journal of Fluid Mechanics, 1990. **210**: p. 263-280.
10. Rubin, A.M., *Propagation of magma-filled cracks*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995. **23**(1): p. 287-336.
11. Moschovidis, Z., et al. *The Mounds drill-cuttings injection field experiment: final results and conclusions*. in *IADC/SPE Drilling Conference*. 2000. Society of Petroleum Engineers.
12. Pine, R. and P. Cundall. *Applications of the fluid-rock interaction program (FRIP) to the modelling of hot dry rock geothermal energy systems*. in *International symposium on fundamentals of rock joints*. 1985.
13. Cavallo, A.J., *Hubbert's petroleum production model: an evaluation and implications for world oil production forecasts*. Natural Resources Research, 2004. **13**(4): p. 211-221.
14. Montgomery, C.T. and M.B. Smith, *Hydraulic fracturing: history of an enduring technology*. Journal of Petroleum Technology, 2010. **62**(12): p. 26-40.
15. (CSUG), C.S.f.U.G., *Understanding Hydraulic Fracturing*. 2011.
16. Dews, F., *The economic benefits of fracking*. Brookings, 2015.
17. Fjar, E., et al., *Petroleum related rock mechanics*. 2008: Elsevier.
18. Sneddon, I.N., *The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1946. **187**(1009): p. 229-260.
19. Sneddon, I. and H. Elliot, *The opening of a Griffith crack under internal pressure*. Quarterly of Applied Mathematics, 1946. **4**(3): p. 262-267.
20. Abe, H., L. Keer, and T. Mura, *Growth rate of a penny-shaped crack in hydraulic fracturing of rocks*, 2. Journal of Geophysical Research, 1976. **81**(35): p. 6292-6298.

21. Carbonell, R., Garagash, D., Savitski, A., Adachi, J., Bunger, A., Y. Kovalyshen, Madyarova, M., Kresse, O., Lecampion, B., and, and E. Gordelyi, *Mechanics of hydraulic fractures*. 2014: p. 201-210.
22. Xiang, J., *A PKN hydraulic fracture model study and formation permeability determination*. 2012, Texas A & M University.
23. Khristianovic, S. and Y. Zheltov. *Formation of vertical fractures by means of highly viscous fluids*. in *Proc. 4th world petroleum congress, Rome*. 1955.
24. Shahid, A., P. Fokker, and V. Rocca, *A review of numerical simulation strategies for hydraulic fracturing, natural fracture reactivation and induced microseismicity prediction*. The Open Petroleum Engineering Journal, 2016. **9**(1).
25. Settari, A. and M.P. Cleary, *Three-dimensional simulation of hydraulic fracturing*. Journal of Petroleum Technology, 1984. **36**(07): p. 1,177-1,190.
26. Rahman, M. and M. Rahman, *A review of hydraulic fracture models and development of an improved pseudo-3D model for stimulating tight oil/gas sand*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2010. **32**(15): p. 1416-1436.
27. Zoback, M., et al. *Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock*. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1977. Elsevier.
28. Hood, J.C., *Acoustic monitoring of hydraulic stimulation in granites*. 2014, Colorado School of Mines. Arthur Lakes Library.
29. Stanchits, S., J. Burghardt, and A. Surdi, *Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015. **48**(6): p. 2513-2527.
30. Lichun, J., et al., *Experimental study on propagation of hydraulic fracture in volcanic rocks using industrial CT technology*. Petroleum Exploration and Development, 2013. **40**(3): p. 405-408.
31. Guo, T., et al., *Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume*. Fuel, 2014. **128**: p. 373-380.
32. Biot, M.A., *General theory of three-dimensional consolidation*. Journal of applied physics, 1941. **12**(2): p. 155-164.
33. Biot, M.A., *Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid*. Journal of applied physics, 1955. **26**(2): p. 182-185.
34. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
35. McClure, M.W. and R.N. Horne, *Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation: Coupling flow and geomechanics*. 2013: Springer Science & Business Media.
36. Crouch, S.L., *Solution of plane elasticity problems by the displacement discontinuity method. I. Infinite body solution*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1976. **10**(2): p. 301-343.
37. Tarasovs, S. and A. Ghassemi. *On the role of thermal stress in reservoir stimulation*. in *37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. 2012.
38. Jing, L. and O. Stephansson, *Fundamentals of discrete element methods for rock engineering: theory and applications*. 2007: Elsevier.

39. Tomac, I. and M. Gutierrez, *Discrete Element Modeling of Hydraulic Fracturing in Granite*. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017.
40. Tomac, I. and M. Gutierrez, *Coupled hydro-thermo-mechanical modeling of hydraulic fracturing in quasi-brittle rocks using BPM-DEM*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017. **9**(1): p. 92-104.
41. Liu, X., et al., *Fluid-driven fractures in granular materials*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015. **74**(2): p. 621-636.
42. Zhou, J., et al., *Numerical modeling and investigation of fluid-driven fracture propagation in reservoirs based on a modified fluid-mechanically coupled model in two-dimensional particle flow code*. Energies, 2016. **9**(9): p. 699.
43. Zhou, J., L. Zhang, and Z. Han, *Hydraulic fracturing process by using a modified two-dimensional particle flow code-method and validation*. Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal, 2017. **17**(1): p. 52-62.
44. Chuprakov, D., O. Melchaeva, and R. Prioul. *Hydraulic fracture propagation across a weak discontinuity controlled by fluid injection*. in *ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. 2013. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
45. Warpinski, N. and L. Teufel, *Influence of geologic discontinuities on hydraulic fracture propagation (includes associated papers 17011 and 17074)*. Journal of Petroleum Technology, 1987. **39**(02): p. 209-220.
46. Potluri, N., D. Zhu, and A.D. Hill. *The effect of natural fractures on hydraulic fracture propagation*. in *SPE European formation damage conference*. 2005. Society of Petroleum Engineers.
47. Weng, X., et al. *Modeling of hydraulic fracture network propagation in a naturally fractured formation*. in *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. 2011. Society of Petroleum Engineers.
48. 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 and Mining Sciences, 2008. **45**(7): p. 1143-1152.
49. Yushi, Z., et al., *Experimental investigation into hydraulic fracture network propagation in gas shales using CT scanning technology*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016. **49**(1): p. 33-45.
50. Rahman, M.M. *A fully coupled numerical poroelastic model to investigate interaction between induced hydraulic fracture and pre existing natural fracture in a naturally fractured reservoir: potential application in tight gas and geothermal reservoirs*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2009. Society of Petroleum Engineers.
51. Dahi-Taleghani, A. and J.E. Olson, *Numerical modeling of multistranded-hydraulic-fracture propagation: accounting for the interaction between induced and natural fractures*. SPE journal, 2011. **16**(03): p. 575-581.
52. Koshelev, V. and A. Ghassemi. *Hydraulic fracture propagation near a natural discontinuity*. in *Proceedings of the 28th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. 2003.

53. Jeffrey, R., L. Vandamme, and J.-C. Roegiers. *Mechanical interactions in branched or subparallel hydraulic fractures*. in *Low Permeability Reservoirs Symposium*. 1987. Society of Petroleum Engineers.
54. Nagel, N.B., et al. *Simulating hydraulic fracturing in real fractured rocks-overcjavascript: Item () oming the limits of pseudo3D models*. in *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*. 2011. Society of Petroleum Engineers.
55. Katsaga, T., A. Riahi, and B. Damjanac. *Three-dimensional investigation of hydraulic treatment in naturally fractured reservoirs*. in *Proceedings of the 40th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. 2015.
56. Riahi, A., B. Damjanac, and J. Furtney. *Discrete element modeling of thermo-hydro-mechanical coupling in enhanced geothermal reservoirs*. in *Proceedings*. 2014.
57. Yoon, J.S., et al., *Discrete element modelling of hydraulic fracture propagation and dynamic interaction with natural fractures in hard rock*. *Procedia engineering*, 2017. **191**: p. 1023-1031.
58. Zhang, L., et al., *Sensitivity analysis on the interaction between hydraulic and natural fractures based on an explicitly coupled hydro-geomechanical model in PFC2D*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. **167**: p. 638-653.
59. Sarmadivaleh, M., *Experimental and numerical study of interaction of a pre-existing natural interface and an induced hydraulic fracture*. 2012, Curtin University.
60. Wu, Y. and X. Li, *Numerical simulation of the propagation of hydraulic and natural fracture using Dijkstra's algorithm*. *Energies*, 2016. **9**(7): p. 519.
61. Safari, M. and A. Ghassemi. *3D analysis of huff and puff and injection tests in geothermal reservoirs*. in *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (in press)*, Stanford University, Stanford, California. 2011.
62. Hofmann, H., et al., *A hybrid discrete/finite element modeling study of complex hydraulic fracture development for enhanced geothermal systems (EGS) in granitic basements*. *Geothermics*, 2016. **64**: p. 362-381.
63. Cundall, P.A. and O.D. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*. *geotechnique*, 1979. **29**(1): p. 47-65.
64. Potyondy, D.O. and P. Cundall, *A bonded-particle model for rock*. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2004. **41**(8): p. 1329-1364.
65. Itasca, C., *PFC2D (Particle Flow Code in 2 Dimensions), Version 4.0*. Minneapolis: ICG, 2008. **3**.
66. Zhou, J., et al., *Investigation of processes of interaction between hydraulic and natural fractures by PFC modeling comparing against laboratory experiments and analytical models*. *Energies*, 2017. **10**(7): p. 1001.
67. Bahaaddini, M., et al., *Parametric study of smooth joint parameters on the shear behaviour of rock joints*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015. **48**(3): p. 923-940.
68. Pierce, M., et al. *A synthetic rock mass model for jointed rock*. in *Proceedings of the first CA-US rock mechanics symposium*, Vancouver, BC. 2007.
69. Chong, Z., et al., *Numerical investigation into the effect of natural fracture density on hydraulic fracture network propagation*. *Energies*, 2017. **10**(7): p. 914.
70. Al-Busaidi, A., J. Hazzard, and R. Young, *Distinct element modeling of hydraulically fractured Lac du Bonnet granite*. *Journal of geophysical research: solid earth*, 2005. **110**(B6).

71. Cundall, P., *Fluid formulation for PFC2D*. Itasca Consulting Group: Minneapolis, Minnesota, 2000.
72. Furtney, J., F. Zhang, and Y. Han. *Review of methods and applications for incorporating fluid flow in the discrete element method*. in *Proceedings of the 3rd International FLAC/DEM Symposium, Hangzhou, China*. 2013.
73. Potyondy, D., P. Cundall, and C. Lee. *Modelling rock using bonded assemblies of circular particles*. in *2nd North American rock mechanics symposium*. 1996. American Rock Mechanics Association.
74. Shen, B., et al., *Coalescence of fractures under shear stresses in experiments*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1995. **100**(B4): p. 5975-5990.
75. Lee, H. and S. Jeon, *An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression*. International Journal of Solids and Structures, 2011. **48**(6): p. 979-999.
76. Blanton, T.L. *An experimental study of interaction between hydraulically induced and pre-existing fractures*. in *SPE unconventional gas recovery symposium*. 1982. Society of Petroleum Engineers.
77. Renshaw, C. and D. Pollard. *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*. 1995. Elsevier.
78. Zhao, X. and R. Paul Young, *Numerical modeling of seismicity induced by fluid injection in naturally fractured reservoirs*. Geophysics, 2011. **76**(6): p. WC167-WC180.
79. Chang, M. and R.-C. Huang, *Observations of hydraulic fracturing in soils through field testing and numerical simulations*. Canadian Geotechnical Journal, 2015. **53**(2): p. 343-359.
80. Eshiet, K.I., Y. Sheng, and J. Ye, *Microscopic modelling of the hydraulic fracturing process*. Environmental earth sciences, 2013. **68**(4): p. 1169-1186.
81. Hazzard, J.F., R.P. Young, and S.J. Oates. *Numerical modeling of seismicity induced by fluid injection in a fractured reservoir*. in *Mining and tunnel innovation and opportunity, Proceedings of the 5th North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada*. 2002. Citeseer.
82. Shimizu, H., S. Murata, and T. Ishida, *The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution*. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2011. **48**(5): p. 712-727.
83. Yoon, J.S., A. Zang, and O. Stephansson, *Numerical investigation on optimized stimulation of intact and naturally fractured deep geothermal reservoirs using hydro-mechanical coupled discrete particles joints model*. Geothermics, 2014. **52**: p. 165-184.

Abstract

As an efficient and useful technique, hydraulic fracturing has been used for recovery of hydrocarbon from unconventional reservoirs for decades. However, these reservoirs are mostly heterogeneous and they include variety of discontinuities which significantly affect the propagation of hydraulic fractures. Therefore, in designing phase of hydraulic fracturing, it is vital to know how hydraulically induced and natural fractures interact. In spite of massive attempts in this field, researches are on the way to better understanding of how a hydraulic fracture propagates in a naturally fractured reservoir.

Response of a hydraulic fracture to reaching natural fractures is investigated in this study using hydro-mechanical coupling in Bonded Particle Model (BPM) and Smooth-Joint Method. Sensitivity analysis of approaching angle of natural fractures, shear strength of natural fractures and ratio of in-situ stresses showed that how these parameters influence the propagation of a hydraulic fracture in a reservoir with two parallel natural fractures. Simulation results show that although the shape of borehole pressure history curves for different approaching angles are almost the same, but fracture patterns and pore pressure distributions are different. So that the more angle between natural fracture and direction of hydraulic fracture, the more chance for crossing hydraulic fracture the natural fracture. Existence of a natural fracture with friction coefficient and cohesion of zero, causes the arresting of hydraulic fracture and dilation of natural fracture. By increasing the shear strength of natural fracture, the chance for crossing increases and dilation of natural fractures decreases. Minimum principal stress greatly affects the time of initiation and break-down pressure of hydraulic fracturing. Different ratios of in-situ stresses force the hydraulic fractures to change their behaviors after reaching the natural fractures. Results of this study are in a good agreement with classic analytical equations of hydraulic fracturing.

Keywords hydraulic fracturing, numerical modeling, bonded particle model, naturally fractured reservoirs, discrete element method



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Rock Mechanics

Numerical Study of Propagation of Hydraulic Fracture in Naturally Fractured Reservoirs

By:

Mohammadreza Pirhooshyaran

Supervisor:

Dr. Majid Nikkhah

Advisor:

Dr. Nadia Shafie Zadeh

July 2020