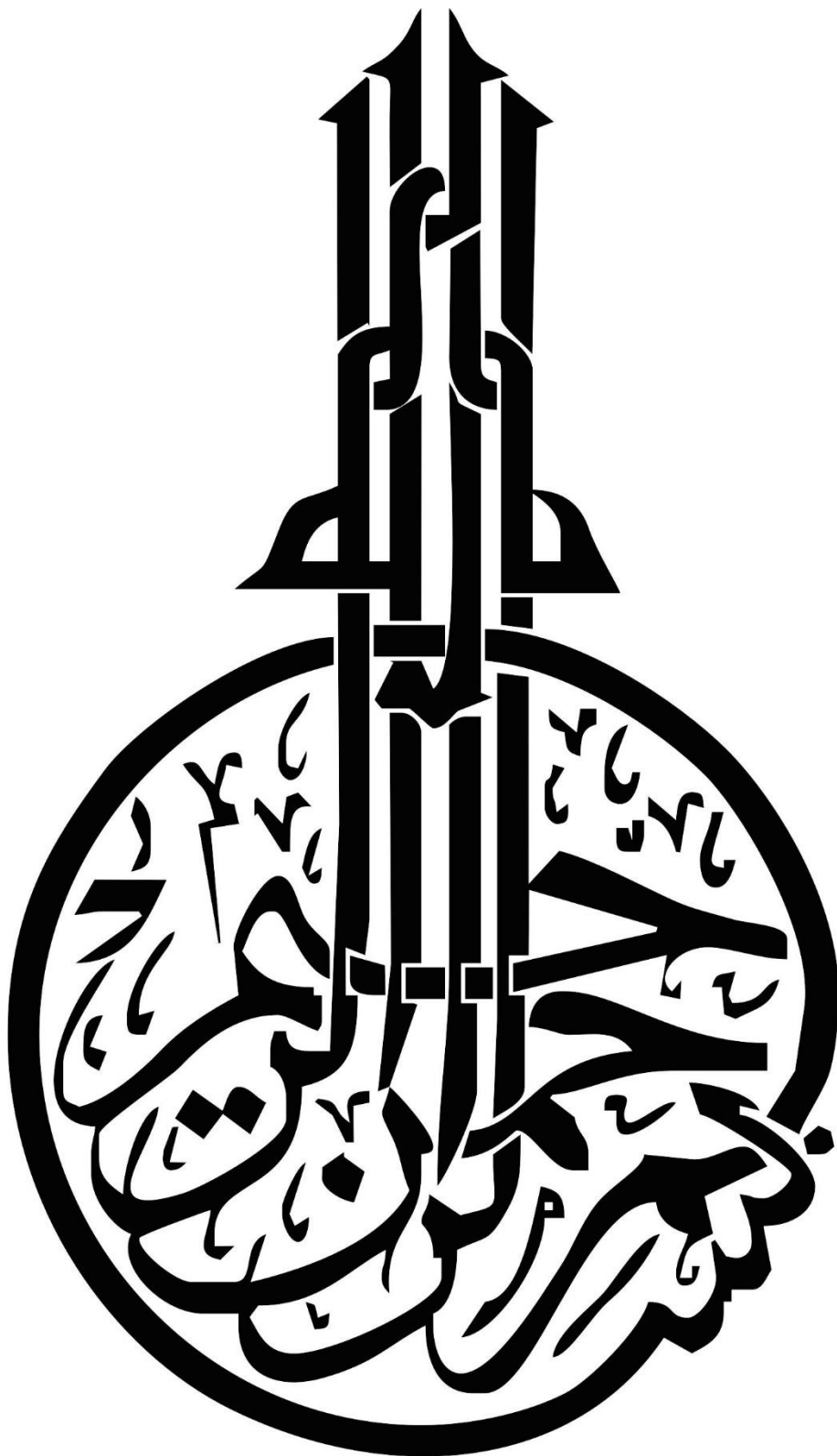






دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

مدلسازی آزمایشگاهی فرایند شکست هیدرولیکی در شرایط تنش سه

محوره واقعی

حامد شیرازی

استاد راهنما

آقای دکتر سید رحمان ترابی

استاد مشاور

آقای دکتر حسین میرزائی

تیر ۹۶

شماره: ۱۳۹۹/۲۰۳
تاریخ: ۹۲/۱۱/۱۷
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای حامد شیرازی دانشجوی دکتری رشته معین (استخراج) به شماره دانشجویی ۹۱۲۷۲۳۵ ورودی بهمن ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۶/۰۴/۲۶ از رساله نظری ☒ عملی ☐ خود با عنوان: مدل سازی آزمایشگاهی فرایند شکست هیدرولیکی در شرایط تنش سه محوره واقعی دفاع و با اخذ نمره ۱۹ به درجه عالی نقل گردید.

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید رحمان تریلی	استاد راهنما	استاد	
۲	دکتر حسین میرزایی	مشاور	استادیار	
۳	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۴	دکتر شکراله زارع	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر کلهران گشتاسبی	استاد مدعو خارجی	دانشیار	
۶	دکتر امین روشندل	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	دانشیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای حامد شیرازی بعمل آید.

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری
تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



بنام حضرت دوست که هرچه داریم از اوست

بدین وسیله از راهنمایی و همراهی بی دریغ استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی و همچنین از راهنمایی های استاد مشاور محترم جناب آقای دکتر حسین میرزائی بسیار سپاسگذارم. از داورهای محترم آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی، دکتر شکراله زارع و دکتر کامران گشتاسبی و نماینده محترم تحصیلات تکمیلی کمال تشکر را دارم.

همچنین، از آقای مهندس زیاری و دیگر پرسنل زحمت کش دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر همراهی و مساعدت‌هایشان قدردانی می‌نمایم.

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است. به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم، به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم که هرچه آموختم در مکتب عشق آنها آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی کران مهربانیشان را سپاس نتوانم بگویم و همسرم که در سایه همیاری و همدلی او به این مهم نائل شدم. باشد که حاصل تلاشم، نسیم گونه، غبار خستگی‌شان را بزدايد.

تعهدنامه

اینجانب حامد شیرازی دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله مدلسازی آزمایشگاهی فرایند شکست هیدرولیکی در شرایط تنش سه محوره واقعی تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سید رحمان ترابی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تأثیرگذار بوده‌اند 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روش شکست هیدرولیکی بهترین روش شناخته شده برای تعیین مقدار و راستای تنش‌های اصلی برجای افقی در اعماق زمین می‌باشد. که مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرا و پارامترهای تاثیرگذار مانند قطر گمانه، طول بازه تحت فشار (اینتروال) و ویسکوزیته سیال شکستگی، بر روی نتایج حاصل از آن، انجام شده است. با این حال، نکات مبهم زیادی در مورد روش شکست هیدرولیکی وجود دارد. در نتیجه، به مطالعات بیشتری برای تعیین میزان تاثیر پارامترهای مختلف بر روند روش مذکور نیاز است.

به همین منظور، در این تحقیق، ابتدا با استفاده از نمونه های استوانه ای گچی ساخته شده، تعداد زیادی آزمایش انجام و تاثیر تغییرات طول بازه تحت فشار بر روی فشار شکست مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با افزایش نسبت طول بازه تحت فشار به قطر چاه تا حدود ۷، فشار شکست کاهش مییابد و از این مقدار به بعد، به سمت یک مقدار ثابت تمایل دارد.

سپس در ادامه، با هدف بررسی تاثیر تغییر ویسکوزیته سیال و قطر گمانه بر روی فشار شکست، دستگاه تست سه محوره واقعی با قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شد. در راستای بررسی ارتباط فشار شکست با دو پارامتر ویسکوزیته سیال و قطر گمانه، که می‌توانند نتایج حاصل از روش شکست هیدرولیکی را در مسیر تعیین تنش های برجای زمین تحت تاثیر قرار دهند، آزمایشات شکست هیدرولیکی به کمک آن دستگاه انجام شد. به همین منظور نمونه‌های بتنی به ابعاد $30 \times 30 \times 30$ cm، که در مرکز آن ها سوراخ با قطرهای ۳۰ mm و ۵۰ mm و ۸۰ mm ایجاد شده بود، مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان داد که با افزایش قطر گمانه فشار سیال برای شکست سنگ کاهش می‌یابد.

در بخش بعدی آزمایش‌ها (بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست)، ۳ نوع روغن هیدرولیک با ویسکوزیته های متفاوت (۴۶H، ۶۸H و ۱۰۰H) در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش ویسکوزیته سیال، فشار شکست کاهش می‌یابد.

با توجه به آزمایش ها و بررسی های انجام شده، پیشنهاد شده است دستگاه هایی با امکانات بیشتر (مانند توانایی اعمال حرارت بر روی نمونه و یا اعمال فشار منفذی بر روی آن و ...) نسبت به دستگاه مورد استفاده در این تحقیق، توسعه داده شوند و آزمایش هایی با هدف مطالعه دیگر پارامترهای موثر بر روی روش شکست هیدرولیکی انجام و مدلی جامع از نتایج بدست آمده به منظور بالا بردن سطح اطمینان به نتایج حاصل از روش شکست هیدرولیکی ارائه شود. همچنین با توجه به آن که روش شکست هیدرولیکی با دو هدف اصلی، تعیین تنش های برجا در اعماق زمین و تحریک چاه های نفتی، اجرا می شود، می توان با اجرای این روش در پروژه های عظیم نفتی و احداث سازه های زیرزمینی در ایران هم راندمان و میزان استخراج نفت را افزایش داد و هم راستا و اندازه تنش های برجا را در محل احداث سازه های زیرزمینی (مانند تونل) تعیین نمود.

مقالات

۱. مقالات چاپ شده در مجلات علمی _ پژوهشی

ردیف	عنوان مقاله	محل انتشار	تاریخ انتشار	عنوان مجله
۱	مطالعه آزمایشگاهی اثر طول بازه تحت فشار بر روی فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی	نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ	۱۳۹۴/۰۷/۰۵	نشریه مکانیک سنگ ایران
۲	مطالعه تاثیر ویسکوزیته سیال و قطر چال بر فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی به کمک دستگاه آزمون سه محوره واقعی	نشریه علمی پژوهشی مکانیک سنگ	۱۳۹۶/۰۴/۱۰	نشریه مکانیک سنگ ایران

۲. مقالات ارائه شده در کنفرانسهای علمی

ردیف	عنوان مقاله	محل انتشار	تاریخ انتشار	عنوان مجله
۱	Analysis of the effect of interval length on the fracture pressure in the hydraulic fracturing technique	دانشگاه تربیت مدرس	۱۳۹۳/۰۲/۲۷	پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران
۲	ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی با قابلیت شبیه سازی روش شکست هیدرولیکی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	۱۳۹۵/۱۱/۲۷	ششمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران

۳. اختراعات ثبت شده

ردیف	عنوان	محل ثبت	تاریخ ثبت	شماره ثبت
۱	شبیه سازی شکست هیدرولیکی در میدان سه محوره واقعی با تزریق مستقیم سیال	سازمان ثبت اسناد و املاک کشور	۱۳۹۳/۱۰/۰۳	۸۵۰۵۱
۲	اعتبار سنجی اختراع " شبیه سازی شکست هیدرولیکی در میدان سه محوره واقعی با تزریق مستقیم سیال "	سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران	۱۳۹۴/۱۰/۲۱	۹۴۰۴۱۱۲

فهرست مطالب

عنوان مطالب

شماره صفحه

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- اهمیت و ضرورت تحقیق	۴
۳-۱- سوالات تحقیق	۵
۴-۱- نوآوری	۶
۵-۱- روش و فرآیند تحقیق	۶
۶-۱- ساختار تحقیق	۸
فصل دوم: شکست هیدرولیکی	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- شکست هیدرولیکی و تنش برجا	۱۰
۳-۲- اجرای شکست هیدرولیکی	۱۲
۴-۲- محاسبه تنش به کمک آزمایش شکست هیدرولیکی	۱۶
۱-۴-۲- تئوری الاستیسیته برای سنگ های نفوذ ناپذیر	۱۷
۲-۴-۲- تئوری Poroelastic با توجه به تنش Poroelastic ناشی از نفوذ سیال در سنگ ها	۲۱
۵-۲- تعیین تنش قائم	۲۴
۶-۲- تعیین مقاومت کششی	۲۴
۱-۶-۲- روش میدانی	۲۵
۲-۶-۲- روش آزمایشگاهی	۲۵
۷-۲- محاسبه تنش برجا در معادن زیرزمینی	۲۶
فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی	۲۹
۱-۳- مقدمه	۳۰
۲-۳- سابقه کلی مطالعات شکست هیدرولیکی	۳۰
فصل چهارم: مطالعه اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست	۴۱
۱-۴- مقدمه	۴۲
۲-۴- نمونه های آزمایشگاهی	۴۲
۳-۴- تجهیزات	۴۳
۱-۳-۴- پمپ تزریق سیال	۴۳
۲-۳-۴- تجهیزات مربوط به تنظیم طول بازه تزریق و آب بندی فضای مذکور	۴۴

۴۵	۳-۳-۴- پیچ تخلیه هوا.....
۴۵	۴-۳-۴- دستگاه اعمال بار ثابت.....
۴۶	۴-۴- مراحل آزمایش.....
۴۷	۵-۴- نتایج آزمایش ها.....
۴۹	۶-۴- نتیجه گیری.....
۵۱	فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی.....
۵۲	۱-۵- مقدمه.....
۵۳	۲-۵- شرح وضعیت دانش فنی پیشین.....
۵۷	۱-۲-۵- دیگر تحقیقات انجام شده با استفاده از دستگاه سه محوره و با اهداف متفاوت با شکست هیدرولیکی.....
۶۰	۲-۲-۵- دستگاه های ساخته شده برای شبیه سازی شکست هیدرولیکی توسط شرکت های مختلف.....
۶۷	۳-۵- دستگاه ساخته شده در دانشگاه صنعتی شاهرود.....
۶۸	۱-۳-۵- ساخت چهارچوب دستگاه.....
۶۹	۲-۳-۵- ساخت جک های دستگاه.....
۷۱	۳-۳-۵- طراحی و ساخت سامانه تزریق مستقیم.....
۷۳	۴-۳-۵- ساخت واحد هیدرولیک.....
۷۵	۵-۳-۵- توضیح اشکال، نقشه ها و نمودارها.....
۷۶	۶-۳-۵- معرفی اجزاء دستگاه.....
۷۹	۷-۳-۵- داده های محاسباتی.....
۸۵	فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست.....
۸۶	۱-۶- مقدمه.....
۸۷	۲-۶- آزمایش های تایید عملکرد دستگاه سه محوره واقعی.....
۸۷	۱-۲-۶- آزمایش شماره ۱ - تایید عملکرد.....
۸۹	۲-۲-۶- آزمایش شماره ۲ - تایید عملکرد.....
۹۱	۳-۶- بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست.....
۹۱	۱-۳-۶- روند آزمایش.....
۹۱	۲-۳-۶- ثبت اطلاعات.....
۹۲	۳-۳-۶- کالیبره کردن نرم افزار آرتمیس.....
۹۳	۴-۳-۶- تشریح آزمایش.....
۱۱۲	۵-۳-۶- نتیجه آزمایش ها.....
۱۱۶	۴-۶- نتیجه گیری.....
۱۱۶	۱-۴-۶- تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست.....
۱۱۸	۲-۴-۶- تاثیر نوع ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست.....
۱۲۰	۳-۴-۶- آنالیز حساسیت.....

فصل هفتم: نتایج و پیشنهادات.....	۱۲۳
۱-۷- نتایج.....	۱۲۴
۱-۱-۷- طول بازه تزریق.....	۱۲۴
۲-۱-۷- قطر چال مرکزی.....	۱۲۴
۳-۱-۷- نوع (ویسکوزیته) سیال.....	۱۲۴
۲-۷- پیشنهادات.....	۱۲۵
منابع.....	۱۲۷
پیوست.....	۱۳۷

فهرست شکل ها

عنوان مطالب

شماره صفحه

۱-۲- اولین تجربه Hydrofrac در سال ۱۹۴۷ در میدان گازی هوگوتن در گرانت کانتی، کانزاس.....	۱۱
۲-۲- نمونه ای از تجهیزات مربوط به آزمایش شکست هیدرولیکی.....	۱۴
۳-۲- نمونه ای از تجهیزات مربوط به Impression packer در آزمایش شکست هیدرولیکی.....	۱۴
۴-۲- اثر ترک مربوط به شکست هیدرولیکی بر روی پوشش لاستیکی Impression packer.....	۱۵
۵-۲- نمای کلی از تجهیزات داخل چال و منحنی فشار زمان.....	۱۶
۶-۲- نمونه ای از منحنی تست تنش.....	۱۷
۷-۲- تعیین مقاومت کششی از طریق آزمایش های میدانی.....	۲۵
۸-۲- طرح شماتیک آزمایش شکست هیدرولیکی در معادن زغال زیرزمینی.....	۲۶
۹-۲- تصویر آزمایش شکست هیدرولیکی در یک ورودی زیرزمینی.....	۲۷
۱-۴- نمونه گچی و قالب بکار رفته برای ساخت آن.....	۴۳
۲-۴- تصویری از دستگاه طراحی شده برای تزریق سیال در داخل سنگ.....	۴۴
۳-۴- نمایی از انژکتور طراحی شده.....	۴۴
۴-۴- پیچ تخلیه هوا.....	۴۵
۵-۴- دستگاه اعمال بار ثابت.....	۴۶
۶-۴- تغییرات فشار شکست نسبت به طول بازه تزریق.....	۴۹
۱-۵- سیستم آزمایش سه محوره واقعی ساندیا با پوسته مخزن تحت فشار شناور.....	۵۸
۲-۵- نمایی از دستگاه HFRTC-100.....	۶۲
۳-۵- نمایی از دستگاه HFT-70.....	۶۳
۴-۵- نمایی از دستگاه RPX-150.....	۶۴
۵-۵- نمایی از دستگاه RPS-100.....	۶۵
۶-۵- نمایی از GDSTTA.....	۶۷
۷-۵- نمایی از GDSTTA.....	۶۷
۸-۵- نمایی از نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه GDSTTA.....	۶۷
۹-۵- صفحات بالایی و پایینی دستگاه.....	۶۸
۱۰-۵- مونتاژ صفحات بالایی و پایینی دستگاه.....	۶۸
۱۱-۵- نمای داخلی دستگاه.....	۶۹
۱۲-۵- نصب صفحه نگهدارنده جک بالایی.....	۶۹
۱۳-۵- متعلقات جک های دستگاه.....	۷۰
۱۴-۵- صفحات حائل بین نمونه و جک ها.....	۷۰

۷۰	۱۵-۵- جک ها در مرحله تراش.....
۷۱	۱۶-۵- مرحله مونتاژ متعلقات جک ها.....
۷۱	۱۷-۵- مونتاژ جک ها.....
۷۲	۱۸-۵- نمای داخلی سامانه تزریق.....
۷۳	۱۹-۵- متعلقات سامانه تزریق.....
۷۳	۲۰-۵- سامانه تزریق.....
۷۴	۲۱-۵- واحد هیدرولیک طی فرایند ساخت.....
۷۴	۲۲-۵- واحد هیدرولیک پس از نصب شلنگ های فشار بالا برای هدایت سیال.....
۷۴	۲۳-۵- تابلوی برق دستگاه.....
۷۵	۲۴-۵- واحد هیدرولیک و اتصال آن به دستگاه سه محوره واقعی.....
۷۶	۲۵-۵- اجزاء مختلف دستگاه.....
۷۹	۲۶-۵- محاسبه کرنش حداکثر برای صفحات بالا و پایین و میله ای راهنما.....
۷۹	۲۷-۵- تحلیل تنش معادل برای صفحات بالا و پایین و میله های راهنما.....
۸۰	۲۸-۵- تحلیل کرنش معادل برای کلاف میانی.....
۸۱	۲۹-۵- تحلیل تنش معادل برای کلاف میانی.....
۸۲	۳۰-۵- نقشه مدار برق.....
۸۳	۳۱-۵- نقشه مدار هیدرولیک.....
۸۸	۱-۶- تصویری از دستگاه سه محوره واقعی.....
۸۹	۲-۶- تصویری از سنگ مرمریت مورد آزمایش.....
۹۰	۳-۶- سنگ مرمریت مورد آزمایش.....
۹۰	۴-۶- نمونه شکسته شده در نتیجه تزریق روغن.....
۹۴	۵-۶- جرثقیل بکارگرفته شده برای حمل و نقل نمونه ها.....
۹۴	۶-۶- انتقال نمونه بتنی به داخل محفظه.....
۹۵	۷-۶- آب بندی انتهای گمانه بوسیله چسب سنگ.....
۹۶	۸-۶- استقرار نمونه در داخل دستگاه.....
۹۶	۹-۶- پر کردن گمانه با سیال.....
۹۶	۱۰-۶- ریختن روغن به داخل سوراخ.....
۹۶	۱۱-۶- مجرای مربوط به تزریق سیال به داخل سامانه تزریق.....
۹۷	۱۲-۶- شکستگی ایجاد شده در نمونه.....
۹۷	۱۳-۶- ترک ایجاد شده در نمونه بتنی.....
۹۷	۱۴-۶- نمودار فشار-زمان نمونه اول با سیال نفت.....
۹۸	۱۵-۶- پیچ دستی نصب شده بر روی فشار سنج برای افزایش یا کاهش فشار.....
۹۹	۱۶-۶- ترک ها و شکستگی های کششی ایجاد شده در نمونه ۲ به علت سطح ناصاف آن.....

۱۷-۶	آماده سازی نمونه.....	۱۰۰
۱۸-۶	استقرار نمونه در داخل دستگاه.....	۱۰۰
۱۹-۶	خط کشی سطح بالایی نمونه شماره ۶ و مشخص کردن محدوده گمانه برای تنظیم موقعیت نازل.....	۱۰۱
۲۰-۶	شکستگی ایجاد شده در نمونه شماره ۶ به علت سطح ناصاف آن.....	۱۰۲
۲۱-۶	دستگاه حفار و نمونه مرمریتی.....	۱۰۳
۲۲-۶	گمانه حفر شده در نمونه.....	۱۰۳
۲۳-۶	آب بندی دهانه پایینی نمونه اول بوسیله چسب سنگ.....	۱۰۴
۲۴-۶	جابجایی نمونه شماره ۴.....	۱۰۴
۲۵-۶	قرارگیری نمونه شماره ۱ در داخل دستگاه.....	۱۰۴
۲۶-۶	پر کردن گمانه با روغن هیدرولیک.....	۱۰۵
۲۷-۶	اعمال فشار قائم بواسطه سامانه تزریق و پر کردن آن با سیال تزریقی.....	۱۰۶
۲۸-۶	شکستگی ایجاد شده بر روی نمونه.....	۱۰۶
۲۹-۶	نمونه شکسته شده در اثر تزریق سیال.....	۱۰۶
۳۰-۶	نمودار فشار-زمان نمونه شماره ۴ - سیال روغن هیدرولیک ۴۶H.....	۱۰۷
۳۱-۶	شکستگی ایجاد شده در نمونه شماره ۸.....	۱۰۸
۳۲-۶	جانمایی نمونه در مرکز محفظه.....	۱۰۹
۳۳-۶	جانمایی نمونه در مرکز محفظه با استفاده از جک‌های قائم و جانبی.....	۱۱۰
۳۴-۶	تثبیت نمونه به کمک جک‌های جانبی.....	۱۱۰
۳۵-۶	پر کردن گمانه با روغن هیدرولیک ۴۶H.....	۱۱۱
۳۶-۶	راستای شکستگی ایجاد شده در نمونه بتنی.....	۱۱۱
۳۷-۶	نمودار فشار-زمان نمونه بتنی شماره ۲۱ - سیال روغن هیدرولیک ۱۰۰H.....	۱۱۲
۳۸-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه- روغن هیدرولیک 46H.....	۱۱۷
۳۹-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه- روغن هیدرولیک 68H.....	۱۱۷
۴۰-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه- روغن هیدرولیک 100H.....	۱۱۸
۴۱-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال- قطر گمانه ۳۰mm.....	۱۱۹
۴۲-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال- قطر گمانه ۵۰mm.....	۱۱۹
۴۳-۶	تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال- قطر گمانه ۸۰mm.....	۱۲۰
۴۴-۶	آنالیز حساسیت.....	۱۲۲

فهرست جدول ها

شماره صفحه

عنوان مطالب

۳۵	۱-۳- آزمایشات انجام شده در زمینه شکست هیدرولیکی.....
۴۷	۱-۴- نتایج آزمایش ها.....
۵۵	۱-۵- دستگاه های تست سه محوره واقعی با قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی.....
۶۰	۲-۵- دستگاه های تست سه محوره واقعی بدون قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی.....
۹۵	۱-۶- محاسبه دبی سیال های استفاده شده در آزمایش ها.....
۱۱۲	۲-۶- نتایج حاصل از آزمایش های انجام شده برای بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست.....
۱۲۱	۳-۶- آنالیز حساسیت.....

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

طراحی فضاهای زیرزمینی به علت پیچیدگی نحوه توزیع تنش در توده سنگ، با طراحی سایر سازه‌ها متفاوت است. در سازه‌های سطحی معمولاً هندسه و کاربری سازه، تعیین کننده بارهای وارد بر آن هستند. اما یک سازه زیرزمینی از ابتدا در معرض مجموعه‌ای از تنش‌های اولیه قرار داشته و در این حالت وضعیت تنش نهایی برآیندی از وضعیت تنش اولیه و تنش‌هایی است که در اثر حفاری ایجاد می‌گردد. از آنجا که تنش‌های ایجاد شده، وابستگی مستقیم به تنش‌های اولیه قبل از حفاری دارند، واضح است که آگاهی از ویژگی‌های میدان تنش اولیه زمین از ملزومات تحلیل و طراحی فضاهای زیرزمینی خواهد بود. تنش‌های اولیه موجود در توده سنگ در اثر وزن لایه‌های فوقانی، محصور شدگی از اطراف و فعالیت‌های تکتونیکی ایجاد می‌گردد. وقتی یک فضای زیرزمینی در سنگ ایجاد می‌گردد وضعیت تنش اولیه توده سنگ دچار آشفتگی و تغییر شده و شرایط جدیدی ایجاد می‌شود. تنش‌های به وجود آمده در چنین حالتی "تنش‌های القایی" یا "تنش‌های ثانویه" نامیده می‌شوند. از آنجا که تنش‌های القایی با تنش‌های اولیه (قبل از حفاری) رابطه مستقیم دارند، تعیین این گونه تنش‌ها نیز می‌تواند راهی برای دستیابی به میدان تنش اولیه توده سنگ باشد. آگاهی از مقدار و جهت تنش‌های اولیه در محل اجرای فضاهای زیرزمینی، چه در پروژه‌های معدنی و چه در پروژه‌های عمرانی، اهمیت زیادی داشته و فقدان آن ممکن است هزینه‌ها و خسارات جبران ناپذیری به همراه داشته باشد. همچنین اطلاع از وضعیت میدان تنش، کمک مؤثری در انتخاب شکل مقطع حفاری‌ها و نحوه جانمایی فضاهای زیرزمینی بزرگ مثل مغارهای نیروگاه (که شامل فضاها و راهروهای متعدد می‌باشند) خواهد نمود. از آنجا که ترک‌ها تمایل دارند در امتداد عمود بر تنش اصلی حداقل گسترش یابند، می‌توان با اطلاع از جهت تنش‌های اصلی، جانمایی با حداقل ریسک را انتخاب نمود (فهیمی فر، ۱۳۸۹).

میدان تنش در توده سنگ را می‌توان با استفاده از روش‌هایی نظیر مدلسازی عددی، برآورد نمود. اما در مورد صحت این نتایج هیچ تضمینی وجود ندارد و گاهی اندازه‌گیری‌های بعدی نشان داده است که برآوردهای اولیه با میدان تنش واقعی فاصله زیادی داشته است، که علت این امر، تاثیر عوامل متعددی همچون لایه‌بندی، درزه و ترک‌ها، گسل‌ها، چین‌خوردگی‌ها و حتی ناهمگنی‌های میکروسکوپی است. ضرورت تخمین صحیح حالت تنش اولیه در توده سنگ موجب شد که تلاش‌های قابل توجهی برای ساخت تجهیزات و ارائه روش‌های اندازه‌گیری تنش برجا صورت گیرد. در این رابطه روش‌های مختلفی پیشنهاد شده که در اکثر آن‌ها برای دسترسی به محل اندازه‌گیری، از حفر گمانه کمک گرفته می‌شود (فهیمی فر، ۱۳۸۹).

برای اندازه‌گیری تنش‌های برجا، روش‌های متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که عبارتند از:

۱. روش بیش مغزه‌گیری^۱
۲. روش جک تخت^۲
۳. روش شکست هیدرولیکی^۳
۴. روش کم مغزه‌گیری^۴
۵. کرنش سنج چند المانی^۵
۶. سلول مجوف^۶
۷. کرنش سنج گلچه‌ای مدل درپوش^۷

^۱ Overcoring

^۲ Flat jack

^۳ Hydraulic fracturing

^۴ Undercoring method

^۵ Multi-element strain gauge

^۶ Hollow inclusion cell

^۷ Doorstopper model

۸. روش استفاده از گمانه ته گرد^۱

۹. کرنش سنج مخروطی شکل^۲

از بین تمام روش‌ها، روش شکستگی هیدرولیکی، در محاسبه تنش‌های برجا، بهترین روش شناخته شده برای ارزیابی حالت تنش برجا در اعماق زیاد است. این روش به منظور تعیین بزرگی و جهت تنش افقی حداکثر و حداقل در چال‌های عمیق یا در چال‌های کم عمق که معمولاً اندازه‌گیری با دیگر روش‌ها مقدور نیست، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Kumar et al., 2004; Jinsong et al., 2011).

همچنین، روش شکست هیدرولیکی، روشی است که به منظور تسهیل در آزاد شدن نفت و گاز طبیعی استفاده می‌شود. در این روش از طریق تزریق سیال با فشار بالا در گمانه حفر شده شکستگی‌های موجود افزایش و شکستگی‌های جدید، در سازند سنگ مخزن ایجاد می‌گردند. انرژی حاصل از تزریق سیالی که به شدت تحت فشار است، باعث ایجاد کانال‌هایی در سنگ می‌شود که می‌تواند نرخ استخراج و بازیابی نهایی از هیدروکربن‌ها را افزایش دهد.

۱-۲- اهمیت و ضرورت تحقیق

علیرغم آن که در حال حاضر روش شکست هیدرولیکی، روشی پرکاربرد در تحریک چاه‌های نفتی و اندازه‌گیری تنش‌های برجا است، مؤلفه‌های متعددی بر فرایند شکست هیدرولیکی تاثیرگذار هستند. حتی با توجه به گذشت بیش از چند دهه از عمر روش مذکور همچنان نکات مبهم و تاریکی در ارتباط با آن وجود دارد. به همین علت لزوم تحلیل و بررسی در این زمینه احساس می‌شود. ایده بررسی تاثیر مؤلفه‌های مختلف بر فرایند شکست هیدرولیکی ایده‌ای است که می‌تواند در بالاتر رفتن سطح اعتماد به نتایج و اندازه‌گیری‌های انجام شده در روش مذکور کمک نماید. لازم به ذکر است که

^۱ Hemispherical-ended borehole technique

^۲ Conical-shaped borehole strain-gauge

انجام این موارد مستلزم طراحی و ساخت تجهیزات و دستگاه‌های مورد نیاز، نظیر دستگاه آزمایش سه محوره واقعی^۱ است، که تا بحال چنین دستگاهی در کشور ساخته نشده است.

۳-۱- سوالات تحقیق

با توجه به امکانات موجود و محدودیت زمانی، پس از طراحی و ساخت دستگاه‌های یک و سه محوره واقعی که نوع اخیر برای اولین بار در ایران انجام می‌شود، سعی می‌گردد که حداقل ۲ مورد از موارد زیر به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرند:

- اندازه گیری مقاومت کششی هیدرولیکی
- بررسی اثر بار قائم بر فشار شکست
- بررسی اثر نسبت طول بر قطر فضای تزریق^۲ بر روی فشار شکست
- بررسی اثر دانه بندی بر روی فشار شکست
- بررسی اثر عمق و درجه حرارت بر روی فشار شکست
- بررسی اثر قطر گمانه بر روی فشار شکست
- بررسی اثر نوع سیال بر روی فشار شکست
- بررسی اثر دبی سیال بر روی فشار شکست

استفاده از آزمون‌های آزمایشگاهی برای انجام این مهم در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال می‌توان تاثیر نسبت طول بر قطر فضای تزریق بر روی فشار شکست را بوسیله سیستم بارگذاری تک محوره و تزریق سیال مورد ارزیابی قرار داد. در این تحقیق، طراحی و ساخت سامانه‌های تزریق، تحت فشارهای بیرونی تک محوره و سه محوره و سه محوره واقعی اجتناب ناپذیر است.

^۱ True Triaxial apparatus

^۲ Interval

از چالش‌های پیش رو در این پژوهش، شبیه‌سازی شرایط واقعی آزمون‌های میدانی در آزمایشگاه است.

۴-۱- نوآوری

از آنجایی که تاکنون تلاش‌های زیادی به منظور ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی در کشور صورت گرفته و البته بنا به دلایل مختلف با موفقیت همراه نبوده است، لذا، می‌توان نوآوری این تحقیق را، ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی و انجام آزمایشاتی، به منظور اجرای هر چه بهتر روش شکست هیدرولیکی بیان نمود.

با توجه به آنکه هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر فرایند شکست هیدرولیکی است، سعی می‌شود آزمایشات به نحوی انجام شود تا میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر روی فرایند شکست هیدرولیکی به نحو مناسبی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

۵-۱- روش و فرایند تحقیق

تجزیه و تحلیل نتایج و روابطی که تاکنون توسط محققین مطرح در این زمینه، ارائه شده‌اند و شناسایی زوایای مبهم و قابل راستی آزمایی، گام اول فعالیت و ساخت دستگاه یک محوره و سه محوره واقعی و انجام آزمون‌ها بر روی نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج، گام‌های بعدی بودند. لازم به ذکر است که به دلیل تخریبی بودن آزمون‌ها، تهیه نمونه‌های کافی، از جمله بخش‌های زمان‌بر فعالیت بوده‌اند.

در ارتباط با ساخت دستگاه باید به این نکته اشاره شود که شروع کار با ساخت دستگاهی برای تزریق سیال با فشار و نرخ تزریق مناسب، به داخل فضای تزریق و دستگاهی به منظور اعمال بار قائم ثابت بر روی نمونه بوده است. در فاز اول، این دستگاه قادر به انجام برخی آزمون‌ها نظیر اندازه‌گیری مقاومت کششی هیدرولیکی و بررسی تاثیر ابعاد فضای طول بازه تزریق بود. ذکر این نکته نیز لازم است که در این مرحله نیازی به اعمال بارهای جانبی نبود. از دیگر اهداف انجام این فاز، بررسی مشکلات و

چالش‌های موجود در مسیر ساخت دستگاه آزمایش سه محوره بوده است. در فاز اول، به منظور انجام آزمایش‌های مذکور، نمونه‌های استوانه‌ای بکار گرفته شد اما برای استفاده از دستگاه تست سه محوره واقعی، نمونه‌های مکعبی مورد استفاده قرار گرفته است.

علاوه بر اندازه‌گیری مقاومت کششی هیدرولیکی و بررسی نقش تغییرات طول بازه تزریق بر روی فشار شکست، در فاز اول، امکان بررسی تاثیر تغییرات بار قائم وارد بر سنگ بر روی فشار شکست به کمک تجهیزات تک محوره، نیز وجود داشت.

همان طور که اشاره شد، لزوم اجرای صحیح و دقیق روش شکست هیدرولیکی، شبیه سازی شرایط میدانی و اعمال نیروهایی بوده است که از نظر اندازه با یکدیگر متفاوت هستند و این امر محقق نمی شد مگر از طریق استفاده از دستگاه تست سه محوره واقعی.

از طرف دیگر، از آنجا که تا قبل از این، تلاش‌های انجام شده به منظور ساخت دستگاه مذکور در کشورمان با موفقیت همراه نبوده، لذا ساخت این دستگاه از ملزومات تحقیق به شمار می‌رفت. لازم به توضیح است که دستگاه سه محوره واقعی که در این تحقیق طراحی و ساخته شد، ویژه انجام این تحقیق یعنی آزمون‌های شکست هیدرولیکی بوده است. البته سعی شد که این دستگاه چنان طراحی شود که حتی الامکان پاسخگوی نیازهای مربوط به آزمون‌های بارگذاری تعیین مقاومت سه محوره سنگ و موارد مشابه هم باشد.

دستگاه سه محوره ساخته شده در این پژوهش، ملزومات خاص خود نظیر پکریهایی که وظیفه آب بندی بازه تزریق را دارند و در عین حال قابل جابجایی برای تنظیم فاصله‌های مختلف هستند، مسیری جهت تزریق سیال به داخل گمانه و مسیر تخلیه هوای مسیر را دارا است. نکته مهم دیگر که تاثیر بسزایی بر نتایج آزمایش داشته است، تزریق سیال، با فشار بالا، به درون گمانه بوده که این امر خود مستلزم بکارگیری واحدهای هیدرولیک خاص بوده است.

پس از انجام آزمایش و بررسی تاثیر دو مؤلفه‌ی ویسکوزیته سیال و قطر گمانه (سوراخ مرکزی) بر فرایند شکست هیدرولیکی، نوبت به تجزیه و تحلیل داده‌ها رسید. در حقیقت، در این مرحله دو هدف دنبال شد:

- انجام آزمایش‌ها برای بررسی تاثیر مؤلفه‌ها و ثبت داده‌ها.
- تجزیه و تحلیل داده‌ها.

۱-۶- ساختار تحقیق

بررسی‌ها و ارزیابی‌هایی که در این تحقیق انجام شده‌اند بیشتر از آن که از جنس کمی باشد از جنس کیفی و پارامتریک بوده است. مطابق آنچه بیان شد، در این پژوهش، کلیات و ضرورت انجام تحقیق و روش تحقیق، در فصل اول، شکست هیدرولیکی، در فصل دوم، مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی، در فصل سوم، مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست در فصل چهارم، ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی، در فصل پنجم، بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست، در فصل ششم و نتایج و پیشنهادات در فصل هفتم ارائه شده‌اند.

فصل دوم

شکست هیدرولیکی

۲-۱- مقدمه

قدمت استفاده از شکست هیدرولیکی به عنوان یک روش برای تحریک چاه‌های نفتی کم عمق در سنگ سخت به سال ۱۸۶۰ برمی‌گردد. در سال ۱۹۳۰، ایده تزریق یک سیال غیر انفجاری (اسید) در زمین، برای تحریک چاه مورد بررسی قرار گرفت. اولین عملیات تجربی شکست هیدرولیکی یک چاه به منظور تحریک، در سال ۱۹۴۷ در میدان گازی هوگوتن^۱ در گرانت کانتی^۲، کانزاس، توسط شرکت نفت استانولیند^۳ انجام شد (شکل ۱-۲). اولین شکستگی با نفت خام ژله‌ای شده، ایجاد شد. در نیمه دوم سال ۱۹۵۲، بخش بزرگی از عملیات ایجاد شکستگی بوسیله روغن‌های تصفیه شده و نفت خام صورت گرفت که آن هم به علت ویسکوزیته پایین آن‌ها نسبت به ژله‌های غلیظ که باعث اصطکاک کمتر می‌شود، بود. در سال ۱۹۵۳، با ورود آب به عنوان سیال شکستگی، تعدادی از عوامل ژله‌ای توسعه یافتند. بعدها، به منظور به حداقل رساندن ذرات معلق موجود در سیال، سورفاکتانت‌ها^۴ و برای به حداقل رساندن تاثیر بر روی رس و دیگر ترکیبات حساس به آب، کلرید پتاسیم اضافه شده است. در حال حاضر، تقریباً در ۹۶٪ عملیات ایجاد شکستگی، مایعات آبی از قبیل اسید، آب و آب نمک، به عنوان سیال پایه استفاده می‌شوند (Montgomery et al., 2010).

۲-۲- شکست هیدرولیکی و تنش برجا

فیرهرست^۵ اولین کسی بود که استفاده از شکست هیدرولیکی را برای اندازه‌گیری تنش در سنگ، پیشنهاد نمود (Manthei. et al., 2003).

^۱ Hugoton

^۲ Grant county

^۳ Stanolind

^۴ سورفاکتانت (Surfactant)، مخفف "surface-active agent" است که یک ماده، مانند مواد شوینده است که می‌تواند کشش سطحی یک مایع را کاهش دهد و در نتیجه به مایع اجازه می‌دهد تا کف کند و یا در ماده جامد نفوذ کند.

^۵ Fairhurst

مهم‌ترین کوشش برای تفسیر مکانیسم شکست هیدرولیکی توسط هوبرت^۱ و ویلیس^۲ انجام شد که با استفاده از تئوری الاستیسیته به این نتیجه رسیدند که امتداد شکستگی هیدرولیکی القاء شده و فشارهای ثبت شده در طی اعمال فشار بر گمانه، به طور مستقیم، به تنش‌های اصلی برجا مربوط هستند (Jinsong et al., 2011).



شکل ۱-۲- اولین تجربه Hydrofrac در سال ۱۹۴۷ در میدان گازی هوگوتن در گرانت کانتی، کانزاس (Montgomery et al., 2010)

روش مذکور، مقدار و امتداد هر دو تنش افقی را برآورد می‌نماید. به طور کلی اعتقاد بر این است که شکستگی زمانی آغاز می‌شود که تنش کششی حداکثر القاء شده در هر نقطه از اطراف چاه، بیش از مقاومت کششی سازند و تنش مماسی در آن نقطه بشود، وقتی این اتفاق می‌افتد، شکستگی حاصل بر روی دیواره چاه، امتدادی عمود بر امتداد تنش اصلی حداقل خواهد داشت (Jinsong et al., 2011). از طرف دیگر، روش شکست هیدرولیکی، برای محاسبه، نیازی به مؤلفه‌های مکانیک سنگی ندارد و هیچ محدودیت نظری از نظر عمق اندازه‌گیری وجود ندارد و این روش به طور مستقیم، تنش اصلی حداقل افقی را تعیین می‌نماید (Wen Meng et al., 2012).

¹ Hubbert

² Willis

ذکر این نکته نیز لازم است، که تفسیر کلاسیک از یک آزمون^۱ H.F. تنها در صورتی ممکن است، که محور گمانه، در صفحه ناشی از شکستگی قرار گیرد و موازی با یکی از تنش‌های اصلی نیز باشد (Tian et al., 2008). همچنین، دقت این روش برای ارزیابی تنش اصلی حداکثر در صفحه عمود بر محور گمانه، با فرض اینکه توده سنگ به طور خطی الاستیک، هموزن، ایزوتروپ و غیر متخلخل است، به حداکثر می‌رسد (فهمی فر، ۱۳۸۹؛ Haimson and Cornet, 2003). بعضی از محققین، شروع شکست هیدرولیکی را با شکست برشی و برخی دیگر، شروع شکست هیدرولیکی را با شکست کششی در نظر می‌گیرند (Wang et al., 2009). با توجه به نظریه متعارف، شکست هیدرولیکی از طریق تشکیل ترک کششی آغاز می‌شود. از سوی دیگر، مکانیسم‌هایی از نوع برشی، در بسیاری از رویدادهای ثبت شده انتشار صوتی (AE^۲) در طی آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی شکستگی هیدرولیکی مشاهده شده‌اند. آنچه که مشخص است آن است که نحوه انتشار شکست هیدرولیکی، به اندازه کافی روشن نشده است (Hiroyuki Shimizu et al., 2011).

۲-۳- اجرای شکست هیدرولیکی

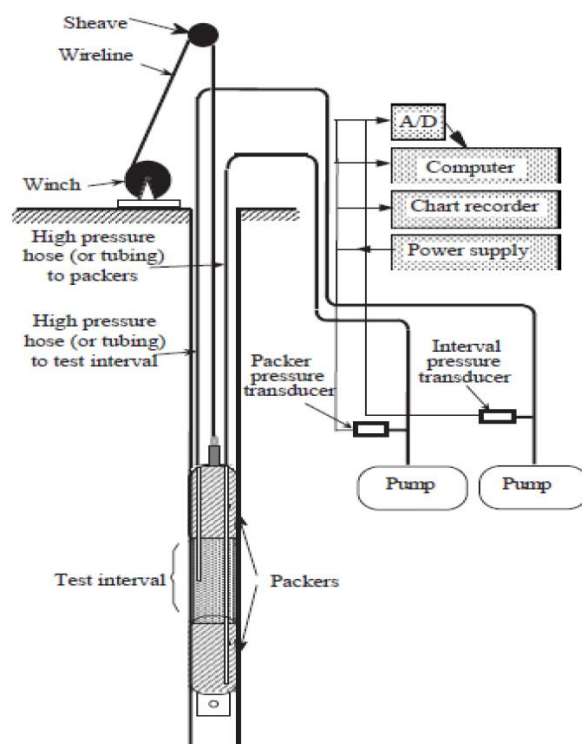
به منظور اجرای شکست هیدرولیکی، یک بخش از گمانه با استفاده از دو پکر لاستیکی قابل تورم (اگر آزمایش در ته گمانه انجام شود، می‌توان از یک پکر استفاده نمود)، که به اندازه کافی تحت فشار (به طوری که به دیواره گمانه می‌چسبند) هستند، آب بندی می‌شود. مجموع این دو پکر، Straddle packer نامیده می‌شود (شکل ۲-۲). همچنین طبق استاندارد ISRM و ASTM فاصله دو پکر از هم حداقل ۶ برابر قطر چال در نظر گرفته می‌شود (ASTM, 1997; Haimson and Cornet, 2003؛ فهمی فر، ۱۳۸۹).

^۱ Hydraulic fracturing

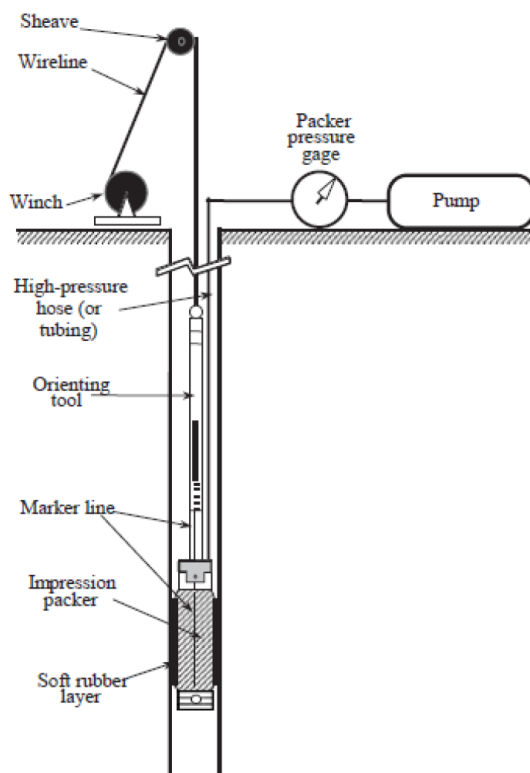
^۲ Acoustic Emission

سپس، سیال هیدرولیکی (معمولا آب) با یک نرخ ثابت جریان در بخش مورد نظر (فضای بین دو پکر) پمپ می‌شود و بتدریج فشار بر روی دیواره گمانه افزایش می‌یابد تا جایی که یک شکستگی در سنگ شروع می‌شود. در این لحظه عملیات پمپاژ متوقف شده و به فشار حد فاصل دو پکر اجازه داده می‌شود تا کاهش یابد و به شرایط محیط بازگردد. سیکل فشار چندین بار با حفظ نرخ جریان تکرار می‌شود. سپس مقادیر کلیدی استفاده شده در محاسبه تنش‌های برجا از منحنی فشار-زمان برداشت می‌شود. در نهایت، وضعیت و حالت شکستگی هیدرولیکی القاء شده، با استفاده از یک Impression packer جهت یافته بدست می‌آید (شکل‌های ۲-۳ و ۲-۴). نکته مهم آن است که، جهت H.F. به جهت تنش‌های اصلی مربوط است (Haimson and Cornet, 2003; Wen Meng et al., 2012). این روش اجازه می‌دهد که تنش افقی حداقل، با یک دقت خوب ($\pm 5\%$)، در صفحه عمود بر محور گمانه و به طور مستقیم محاسبه گردد و تنش افقی حداکثر، از طریق معادلاتی که شامل معیار شکست و مؤلفه‌های ارزیابی شده، از داده‌های فشار میدانی می‌باشند، حاصل شود، البته دقت تنش افقی حداکثر نسبت به تنش افقی حداقل، کمتر است (20% تا $10\% \pm$) (Ljunggren et al., 2003). از طرف دیگر، باید به این نکته نیز اشاره کنیم که هیچ مرجع قابل قبولی برای صحت سنجی مقادیر بدست آمده در این روش وجود ندارد، بنابراین نمی‌توان تنش‌های افقی حداکثر و حداقل را به طور دقیق تعیین نمود (ASTM, 1997).

لازم به ذکر است که اگر روش شکست هیدرولیکی با هدف تسهیل استخراج از چاه‌های نفتی مورد استفاده قرار گیرد، تقریبا روندی مشابه با روند طی شده در اندازه‌گیری تنش‌های برجا دنبال خواهد شد. البته سیال مورد استفاده در تحریک چاه‌های نفتی و گازی ترکیب متفاوتی نسبت به سیال بکار رفته در اندازه‌گیری تنش‌های برجا به روش شکست هیدرولیکی دارد.



شکل ۲-۲- نمونه‌ای از تجهیزات مربوط به آزمایش شکست هیدرولیکی (Haimson and Cornet, 2003)



شکل ۲-۳- نمونه‌ای از تجهیزات مربوط به Impression packer در آزمایش شکست هیدرولیکی (Haimson and Cornet, 2003)



شکل ۲-۴- اثر ترک مربوط به شکست هیدرولیکی بر روی پوشش لاستیکی Impression packer
(Ziaie Moayed et al., 2012)

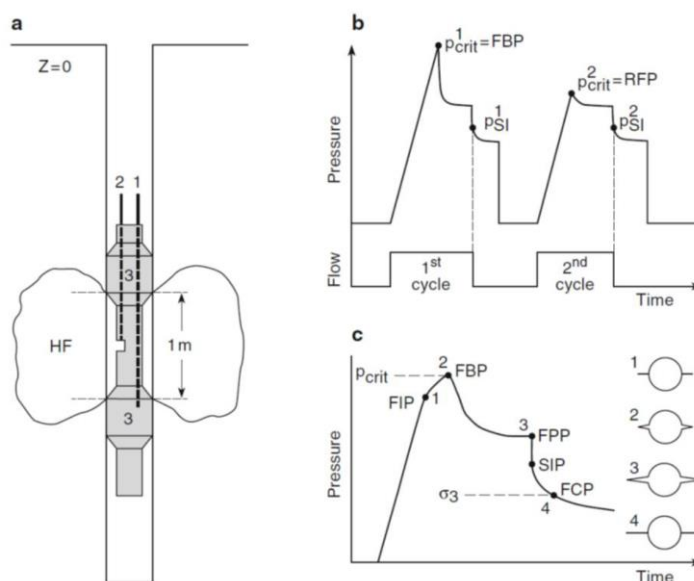
در شکل‌های ۵a، نمای کلی از تجهیزات داخل چال، b، منحنی فشار- زمان رفتار هیدرولیکی داخل چال و c، مکانیک شکست در شکست هیدرولیکی نشان داده شده‌اند. در a، ۲، لوله فشار برای آغاز شکست هیدرولیکی و ۱، لوله فشار برای متورم شدن پکرهای ۳ هستند. لازم به ذکر است که بازه تزریق به طول ۱m در شکل سمت چپ نشان داده شده است. در b، حداکثر فشار محاسبه شده، فشار شکست^۱ FBP و^۲ SIP، فشار انسداد است. در c، فشار آغاز شکستگی^۳ FIP، فشار شکست FBP، فشار انتشار شکستگی^۴ FPP، فشار بسته شدن شکستگی FCP و فشار انسداد SIP، با توجه به مراحل مختلف رشد ترک نشان داده شده‌اند (Zang and Stephansson, 2009).

^۱ Fracture breakdown pressure

^۲ Shut-in pressure

^۳ Fracture initiation pressure

^۴ Fracture propagation pressure

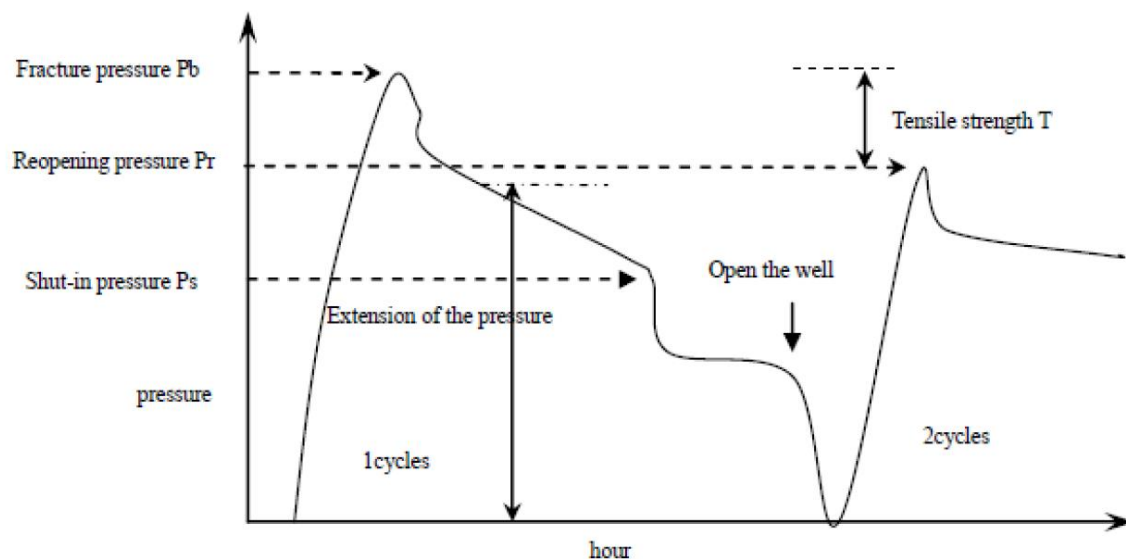


شکل ۲-۵- نمای کلی از تجهیزات داخل چال و منحنی فشار زمان (Zang and Stephansson, 2009)

۲-۴- محاسبه تنش به کمک آزمایش شکست هیدرولیکی

اطلاعات بدست آمده در طی آزمایش شکست هیدرولیکی اصولاً دو نوع است: اطلاعات فشار و اطلاعات شکست هیدرولیکی. اطلاعات فشار از ثبت فشار برحسب زمان و حجم سیال تزریق و بازیابی شده برحسب زمان در طی سیکل‌های پمپاژ بدست می‌آید. از این اطلاعات می‌توان اطلاعات مورد نیاز برای تعیین تنش برجا و همچنین فشار شکست (P_b)، فشار بسته شدن یا فشار بسته شدن آبی (P_s) و فشار بازشدگی مجدد شکستگی (P_r) را برآورد نمود (شکل ۲-۶). دومین دسته اطلاعات حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی شامل توصیف و جهت‌یابی شکستگی است. بر همین اساس معیارهای متعددی به منظور تفسیر داده‌های شکست هیدرولیکی و بررسی و محاسبه تنش‌های برجا توسط محققین مختلف ارائه شده است. در بسیاری از معیارهای ارائه شده حداقل دو اشکال وجود دارد. اول آنکه، مواد مورد مطالعه در بسیاری از مدل‌های شکست هیدرولیکی، نفوذ ناپذیر فرض می‌شوند. از این رو، نظریه‌ها نمی‌توانند اثر قابلیت نفوذ سیال را بر رفتار شکست هیدرولیکی توضیح دهند. ثانیاً، در

بسیاری از مدل‌های موجود، تاثیر وجود ناهمگنی سنگ بر الگوی شکستگی و یا مسیر شکست هیدرولیکی، همراه با جریان، نمی‌تواند به حساب آورده شود (Yang et al., 2005).



شکل ۲-۶- نمونه‌ای از منحنی تست تنش (Xingpeng Jing, 2011)

در ادامه، برخی از این معیارها ارائه شده‌اند:

۲-۴-۱- تئوری الاستیسیته برای سنگ‌های نفوذ ناپذیر (معیار Hubbert &

(Willis-1957) یا مدل شکست کلاسیک

اولین مدل شکست که توسط هوبرت و ویلیس ارائه شد، فرض می‌کند که زمانی که تنش فشاری مماسی در دیواره چاه، با مقاومت کششی سنگ برابر می‌شود، شکستگی آغاز می‌شود. در این مدل، آنالیز تنش، تحت شرایط الاستیک خطی انجام می‌شود و سنگ، نفوذ ناپذیر فرض می‌شود (Zang and Stephansson, 2009). دیگر مفروضات این روش عبارتند از (Klee et al., 2002):

- تنش قائم، یک تنش اصلی است.
- سنگ همگن و ایزوتروپ است.
- شکستگی عمودی القاء شده، عمود بر تنش افقی حداقل، امتداد می‌یابد.

➤ مقدار تنش اصلی افقی حداقل و امتداد آن (σ_h)

هوبرت و ویلیس پیشنهاد کردند که تنش افقی حداقل، برابر با فشار مورد نیاز (فشار چاه) برای گسترش شکست هیدرولیکی، در حالی که آن را باز نگه می‌دارد، است. (Zang and Stephansson, 2009). چرا که شکستگی‌های هیدرولیکی قائم، عمود بر امتداد تنش اصلی افقی حداقل، امتداد می‌یابند و اگر فشار سیال از فشار انسداد آنی کمتر شود، شکاف بسته می‌شود و اگر از آن تجاوز کند مجدداً گشوده می‌شود (ترابی، ۱۳۹۱؛ Haimson and Cornet, 2003). کهل^۱ خیلی دقیق‌تر بود و پیشنهاد کرد که تنش افقی حداقل برابر فشار انسداد آنی است که فشار انسداد آنی، حداقل تنش مورد نیاز برای باز نگهداشتن شکستگی در برابر تنش نرمال، بعد از آنکه عملیات پمپاژ متوقف شد، است (Manthei et al., 2003).

$$\sigma_h = P_s \quad (۱)$$

امتداد σ_h مستقیماً از آزمایشات H.F. بدست می‌آید (Haimson and Cornet, 2003):
امتداد تنش افقی حداقل عمود بر شکستگی قائم هیدرولیکی است.

➤ مقدار تنش اصلی افقی حداکثر و امتداد آن (σ_H) (Haimson and Cornet, 2003;)

(Ulf Lindfors, SwedPower AB. 2007)

به منظور محاسبه تنش اصلی افقی دو نظریه ارائه شده است:

نظریه اول: بر اساس این نظریه، تنش افقی اصلی حداکثر بر فرض رفتار الاستیک خطی و اثر ناچیز نفوذ سیال شکستگی در سنگ، استوار است. در غیاب سیال منفذی در توده سنگ، مقدار تنش اصلی افقی حداکثر، بوسیله معادله (۲) ارائه شده است. در این نظریه، مقاومت کششی توده سنگ

^۱ Kehle

در نقطه محاسبه شده، گنجانده شده است و می‌تواند با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین شود
(T_{lab}).

$$\sigma_{HI} = 3.\sigma_h - P_b + T \quad (2)$$

برای محاسبه، در شرایط وجود فشار آب منفذی (P_0) در عمق تحت آزمایش، هیمسون^۱،
قانون تنش موثر را بکار برده است و پس از اصلاح رابطه^۲، رابطه زیر را ارائه نموده است (Nawrocki, 2008):

$$P_b = 3.\sigma_h - \sigma_H - T - P_0 \quad (3)$$

ذکر این نکته نیز لازم است که برای اولین بار، شیدگر^۲، مقاومت کششی سنگ را به منظور
تعیین سه تنش اصلی از طریق شکست هیدرولیکی در گمانه، در معادله (۳) معرفی نمود (Zang and
Stephansson, 2009). که T ، مقاومت کششی سنگ بکر تحت شرایط شکست هیدرولیکی و P_b فشار
شکست است.

نظریه دوم: در این نظریه از مؤلفه فشار بازشدگی مجدد استفاده شده و به شرح زیر، مقاومت
کششی حذف شد است:

مقاومت کششی، معمولاً به عنوان مؤلفه‌ی تغییرپذیر در نظر گرفته می‌شود. لذا، اغلب، بواسطه
ارائه فشار بازشدگی مجدد شکستگی (P_r)، از معادله شکست حذف می‌شود. این مفهوم به وسیله
بردهوفت^۳ و همکارانش ارائه شد. آن‌ها بیان کردند که (Bredehoeft et al., 1975):

"در طی سیکل اول عملیات پمپاژ در داخل فضای مورد آزمایش (بازه تزریق) در درون سنگ
سالم، باید سنگ بشکند. به طور نظری، تفاوت بین فشار شکست در سیکل اول عملیات پمپاژ و
سیکل‌های بعدی عملیات پمپاژ، برابر با مقاومت کششی است."

¹ Haimson

² Scheidegger

³ Bredehoeft

$$\sigma_{HH} = 3.\sigma_h - P_r \quad (4)$$

راتکوویست^۱ و همکارانش، پیشنهاد کردند که زمانی که یک شکستگی القا شده به طور کامل بسته نمی‌شود، تعیین تنش حداکثر اصلی به وسیله شکست هیدرولیکی با استفاده از فشار بازشدگی مجدد، درجه بالایی از عدم قطعیت را دارد. ایتو و همکارانش اظهار کردند که دو نگرانی در ارزیابی تنش افقی حداکثر با استفاده از فشار بازشدگی مجدد وجود دارد: نگرانی اول ناشی از نفوذ سیال در ترک قبل از بازشدگی و نگرانی دوم شناسایی صحیح فشار واقعی بازشدگی مجدد، از سوابق فشار است. برای بدست آوردن فشار بازشدگی مجدد واقعی، باید نرخ پمپاژ در طول تمام سیکل‌ها ثابت نگهداشته شود. فشار بازشدگی مجدد بدست آمده از هر سیکل تزریق، معمولاً با تعداد دفعات سیکل کاهش می‌یابد و بعد از سیکل سوم، به یک مقدار ثابت تمایل دارد. بنابراین، فشار بازشدگی مجدد واقعی، می‌تواند از سیکل سوم و یا از مقدار متوسط پس از چند سیکل حاصل شود (Kang et al., 2010).

در سنگ‌های اشباع شده با نفوذپذیری کم، (فشار منفذی اولیه در سنگ وجود داشته باشد) هیچ تراوشی از سیال شکستگی قبل از بازشدگی شکستگی، در سازند وجود ندارد و اغلب فرض می‌شود که فشار منفذی بدون تأثیرپذیری از حالت تنش و مفهوم تنش مؤثر ترزاقی، برای شکستگی کششی اعمال می‌شود. در این مورد، معادله (۵) بکار می‌رود:

$$\sigma_H - P_0 = T + 3(\sigma_h - P_0) - (P_b - P_0) \quad (5)$$

تنش اصلی افقی حداکثر σ_H (S_H) عمود بر امتداد σ_h (S_h) است.

نقش فشار منفذی هر چقدر باشد، حل معادلات ۳ یا ۵ مستلزم آن است که مقاومت کششی سنگ بتواند مستقیماً در آزمایشگاه بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شود. رایج‌ترین آزمایش کششی، آزمایش برزیلی است. با این حال، شکل و وضعیت آزمایش برزیلی، شرایط H.F. را شبیه‌سازی نمی‌کند و قابلیت اطمینان این آزمایش، به عنوان نمایشگر مقاومت کششی برای H.F. ثابت نشده است.

¹ Rutqvist

مقاومت کششی حاصل از آزمایش‌ها برزیلی، فشار شکست را بسیار کم، پیش بینی می‌نماید (GUO et al., 1993). لذا مغزه، برای آماده سازی سیلندرهای توخالی، که با اعمال فشار داخلی و بدون تنش خارجی محصور می‌شکنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون دقیقاً، یک آزمایش H.F. را شبیه سازی می‌کند که در آن هیچ تنش دوردستی^۱ وجود ندارد و بنابراین، فشار اوج برابر با مقاومت کششی است. تنها مورد مبهم در این آزمایش‌ها، مقیاس بین میدان^۲ و ابعاد آزمایشگاهی است. زمانی که مغزه استخراج شده در دسترس نیست یا آزمایش‌های آزمایشگاهی امکان پذیر نیست و یا زمانی که به نظر می‌رسد آزمون‌های کشش، یک مقدار غیر معقول برای استفاده در روابط ۳ و یا ۵ ارائه می‌کنند، با استناد بر فشار بازشدگی مجدد شکستگی (P_r)، یک رابطه جایگزین استفاده می‌شود.

فرض می‌شود که این فشار، فشاری است که در آن، شکستگی القاء شده، که به طور کامل بعد از سیکل فشار اولیه، بسته شده است، مجدداً باز می‌شود. با این حال، در این زمان، لازم نیست بازشدگی مجدد شکستگی، بر مقاومت کششی غلبه کند و در نتیجه، معادله ۵ به صورت معادله ۶ می‌شود (Haimson and Cornet, 2003; Kumar et al., 2004)

$$\sigma_H - P_0 = 3(\sigma_h - P_0) - (P_r - P_0) \quad (۶)$$

۲-۴-۲ - تئوری Poroelastic با توجه به تنش Poroelastic ناشی از نفوذ سیال

در سنگ‌ها (معیار Haimson and Fairhurst) (Song et al., 2001)

یکی از فرضیات در نظر گرفته شده در مدل الاستیک آن است که سیال، در سنگ میزبان نفوذ نمی‌کند. ولی هیمسون و فیرهرست، سنگ را متخلخل و نفوذ پذیر در نظر می‌گیرند. مفهومی مشابه مدل قبل، در این مدل پذیرفته می‌شود. برای مثال، زمانی که تنش موثر مماسی حداقل، در دیواره چاه، به مقاومت کششی سنگ می‌رسد، شکست رخ می‌دهد. تفاوت بین آن‌ها در این است که

^۱ Farfield

^۲ Field

در این روش، مدل الاستیک، برای سیال نافذ (سنگ نفوذپذیر) اصلاح شده است (Zang and Stephansson, 2009).

$$P_c^p - P_0 = \frac{\sigma_t + 3\sigma_h - \sigma_H}{2 - \alpha \frac{1-2\vartheta}{1-\vartheta}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{\alpha(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \quad 0 \leq \eta \leq 0.5 \quad (8)$$

که، P_c^p فشار بحرانی شکست در سنگ نفوذپذیر، P_0 فشار سیال منفذی، η مؤلفه انعطاف‌پذیری^۱، $\alpha = 1 - \frac{k}{k_s}$ مؤلفه انعطاف‌پذیری بایوت^۲، هستند. زمانی که $0 \leq \alpha \leq 1$ و $0 \leq \vartheta \leq 0.5$ هستند، مخرج کسر معادله γ برای سنگ ایزوتروپیک، بین دو مقدار ۱ و ۲ تغییر می‌نماید (Haimson and Fairhurst, 1969). K و K_s به ترتیب مدول بالک اجزای تشکیل دهنده سنگ (دانه‌ها) و مدول بالک سنگ هستند و ν نسبت پواسون است (Song et al., 2001). اگر تنش برجای افقی حداقل (به عنوان فشار بسته شدن بعد از گسترش شکستگی و انسداد، بدست آمده است) و خصوصیات سنگ مثل مقاومت کششی یا چقرمگی^۳ (سفتی)، مشخص باشند، تنش افقی برجای حداکثر، می‌تواند از فشار شکست تعیین شود (Nawrocki, 2008).

با تقریب زیاد، می‌توان فرض کرد که $\sigma_{11}(\sigma_H) \cong \sigma_{22}(\sigma_h) = \sigma_H$ در این حالت (Haimson and Fairhurst, 1969):

$$P_c^p - P_0 = \frac{\sigma_t - 2\sigma_H}{2 - \alpha \frac{1-2\vartheta}{1-\vartheta}} \quad (9)$$

که تنها σ_H ناشناخته است (Haimson and Fairhurst, 1969).

¹ Poroeleastic

² Biot

³ Toughness

دو فرض در هر دو معیار H-W و H-F در نظر گرفته شد: یکی آنکه شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که تنش مماسی موثر در دیواره چاه به مقاومت کششی هیدرولیکی سنگ برسد. دیگر آنکه قانون تنش موثر ترزاقی، بر تاثیر سیال داخل منافذ بر روی تنش سنگ، تاثیر گذار است. مسائل مختلفی وجود دارد که توسط دو معیار کلاسیک، رضایت بخش توصیف نشده است: اولاً، هیچ تمایز آشکاری میان سنگ‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر وجود ندارد. ثانیاً، نه معیار $H-F^1$ و نه معیار $H-W^2$ دارای تاثیر نرخ فشار چاه و اندازه چاه نیستند که در برخی از نتایج تجربی قابل توجه است. در سنگ‌های با نفوذپذیری کم، تاثیر میزان فشار چاه، از اهمیت کمتری برخوردار است. با این حال، تاثیر میزان فشار چاه در سنگ‌های با نفوذ پذیری بالا بسیار پر اهمیت می‌شود. چرا که برای سرعت بخشیدن به نرخ تزریق سیال و یا برای افزایش ویسکوزیته سیال به منظور غلبه بر خسارات ناشی از نشت منافذ سنگ، اجتناب ناپذیر است (Song et al. 2001).

هیمسون، مفهوم تنش موثر را در بیانش، برای شکست هیدرولیکی کششی در معادله زیر، به حساب آورد (Pine et al., 1983):

$$P_c - P_0 = (3\sigma_h - \sigma_H + T_c - 2 P_0)/k \quad (10)$$

که K مؤلفه انعطاف پذیری، در رابطه با اثرات فشار منافذ بر قابلیت تراکم پذیری سنگ است و P_c فشار شکست، P_0 فشار منافذ محیط، σ_h تنش افقی حداقل، σ_H تنش افقی حداکثر و T_c مقاومت کششی شکست هیدرولیکی هستند. در صورتی که سیال تزریق شده، هیچ نفوذی به داخل منافذ اطراف نداشته باشد (نفوذپذیری سنگ بسیار پایین باشد)، مقدار K به سمت ۱ میل می‌کند (Pine et al., 1983).

¹ Haimson-Fairhurst

² Hubbert-Willis

۲-۵- تعیین تنش قائم (σ_v)

این مؤلفه نمی‌تواند از نتایج آزمون ارزیابی شود مگر آنکه شکستگی القاء شده تقریباً افقی باشد، که در این صورت فشار انسداد آبی ثبت شده، برابر با تنش قائم در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت، فرض می‌شود که تنش قائم برابر با وزن طبقات فوقانی در واحد سطح، در عمق مورد نظر است (Haimson and Cornet, 2003).

$$\sigma_v = \sum_{i=1}^n \rho_i g D_i \quad (11)$$

که در رابطه بالا ρ_i میانگین چگالی لایه سنگی i ام، g شتاب ثقل محلی، D_i ضخامت لایه i ام و n ، تعداد لایه‌ها بر روی منطقه آزمایش است (Haimson and Cornet, 2003).

در مورد تنش قائم دور از میدان نیز می‌توان دو راه را انتخاب کرد: اول با فرض یک مقدار داده شده توسط وزن طبقات فوقانی و دوم با فرض یک مقدار داده شده توسط حداقل فشار انسداد آبی مشاهده شده. برای شکستگی‌های افقی، فشار انسداد آبی بایستی یک اندازه‌گیری مستقیم موضعی از تنش قائم باشد. پس در حالتی که شکستگی‌ها افقی هستند، تنش قائم می‌تواند برابر فشار انسداد آبی و تنش ناشی از وزن طبقات فوقانی باشد (Evans and Engelder, 1989).

البته تنش روباره را می‌توان با استفاده از اطلاعات محاسبه نمود. به طور معمول، مقدار فشار روباره در حدود $7584/23 \text{ Pa}$ به ازای هر یک فوت عمق است (EPA 816-R-04-003, 2004).

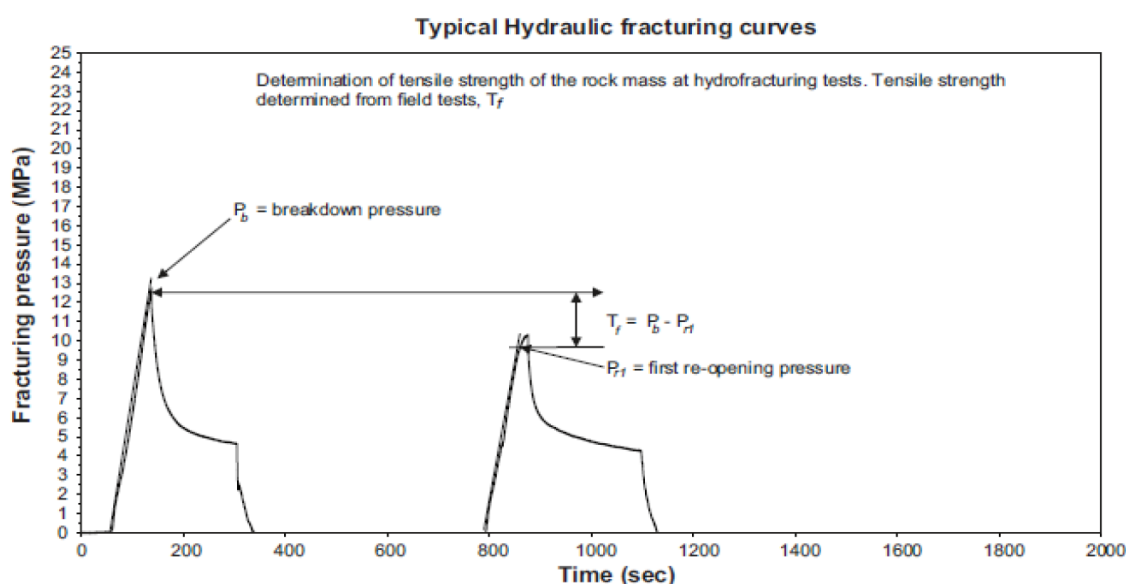
۲-۶- تعیین مقاومت کششی

مقاومت کششی توده سنگ، در موقعیت آزمایش شکست هیدرولیکی با استفاده از دو روش مختلف محاسبه می‌شود (Ulf Lindfors, SwedPower AB, 2007):

۲-۶-۱- روش میدانی

برآورد و تخمین مقاومت کششی می‌تواند با استفاده از تفاوت بین مقدار فشار شکست (P_b) و اولین فشار بازشدگی مجدد (P_{r1}) در هر موقعیت آزمایش، در میدان، انجام شود (رابطه ۱۲)، (شکل ۲-۷):

$$T = T_f = P_b - P_{r1} \quad (12)$$



شکل ۲-۷- تعیین مقاومت کششی از طریق آزمایش‌های میدانی (Ulf Lindfors, SwedPower AB, 2007)

۲-۶-۲- روش آزمایشگاهی

که در آن، تعیین مقاومت کششی در آزمایشگاه انجام می‌شود. در این روش، برخلاف روش‌های معمول، همچون آزمایش برزیلی، سوراخی در وسط نمونه حفر می‌شود و بخشی از آن آب‌بندی شده و از طریق تزریق سیال به بخش مذکور، شکست در سنگ ایجاد می‌شود. در حقیقت، به منظور تعیین مقاومت کششی در آزمایشگاه، بایستی روند شکست هیدرولیکی را دنبال نمود.

۷-۲- محاسبه تنش برجا در معادن زیرزمینی

زمانی که محاسبه تنش برجا بوسیله شکست هیدرولیکی در معادن زیرزمینی انجام می‌شود (شکل‌های ۸-۲ و ۹-۲) و دستگاه ثبت کننده فشار در راهرو نصب می‌شود، باید فشار واقعی در شکستگی در گمانه (P_{r0} و P_{s0}) برای فشار استاتیک لوله، یعنی $\gamma_w h$ ، اصلاح شود و پس از آن، معادلات معمول تنش‌ها، می‌توانند مورد تجدید نظر قرار گیرند (Kang et al., 2010):

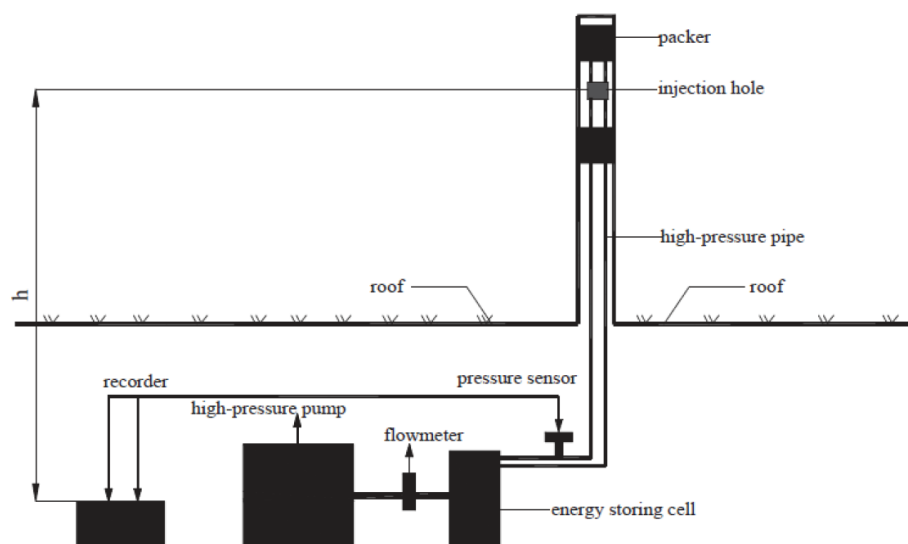
$$\sigma_h = P_s - \gamma_w h$$

$$\sigma_H = 3P_s - P_r - 2\gamma_w h \quad (۱۳)$$

$$\sigma_v = \gamma h$$

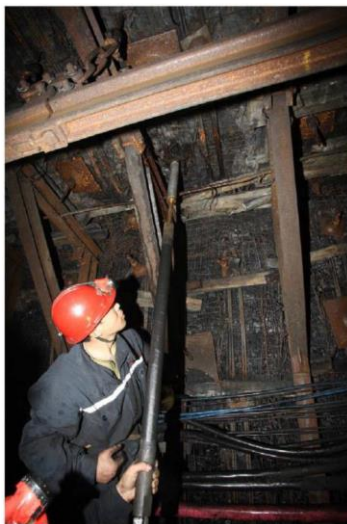
که P_s و P_r ، به ترتیب، فشار انسداد و فشار بازشدگی مجدد از دستگاه ثبت کننده هستند. γ_w

وزن مخصوص آب و h فاصله قائم بین شکستگی و دستگاه ثبت کننده است (Kang et al., 2010).



شکل ۸-۲- طرح شماتیک آزمایش شکست هیدرولیکی در معادن زغال زیرزمینی. h فاصله قائم بین شکست هیدرولیکی و دستگاه ثبت کننده اطلاعات است (Kang et al., 2010)

بر طبق استاندارد ISRM، به منظور اندازه گیری تنش برجا، سایت آزمون بایستی در راهرو و به دور از جبهه کار و دیگر حفاریات قرار گرفته باشد، تا اینکه تاثیر فشارهای القا شده دینامیکی و فشارهای باقیمانده بخش‌های مجاور، از بین بروند (Kang et al., 2010).



شکل ۲-۹- تصویر آزمایش شکست هیدرولیکی در یک ورودی زیرزمینی؛ Straddle packer به داخل گمانه وارد می شود (Kang et al., 2010)

فصل سوم

مطالعات انجام شده بر روی

شکست هیدرولیکی

۳-۱- مقدمه

بیش از چند دهه از عمر روش شکست هیدرولیکی می‌گذرد و در این سال‌ها مطالعات و آزمایش‌های میدانی و آزمایشگاهی متعددی با اهداف مختلف (به عنوان مثال، با هدف اندازه‌گیری تنش‌های برجا، تحریک چاه‌های نفتی و یا با هدف بهبود و افزایش سطح اعتماد به نتایج حاصل از آزمایش شکست هیدرولیکی) بر روی این روش انجام شده است. در این بخش، مطالعات و تحقیقات، با هدف آشنایی بیشتر با زمینه‌های مورد مطالعه در این حوزه، ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که تحقیقات انجام شده در زمینه ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی با قابلیت شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی، در فصل پنجم مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۳-۲- سابقه کلی مطالعات شکست هیدرولیکی

در چند دهه‌ای که از عمر روش شکست هیدرولیکی می‌گذرد، مطالعات گسترده‌ای بر روی نحوه اجرای روش و مؤلفه‌های تاثیرگذار بر روی نتایج حاصل از آن، توسط محققین و دانشمندان مختلف، انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

لاکner^۱ و بیرلی^۲ در سال ۱۹۷۷ نمونه‌ها را با نرخ‌های متفاوت تزریق سیال و اختلاف تنش‌های متفاوت، مورد آزمایش قرار دادند و نشان دادند که چطور مد شکست با اختلاف تنش و نرخ تزریق سیال در ارتباط است (Lockner and Byerlee, 1977).

زوباک^۳ و همکارانش در سال ۱۹۷۷، اثر نرخ تزریق سیال را بر روی فشار شکست، مورد بررسی قرار دادند. نرخ ثابت تزریق، با استفاده از یک ژنراتور فشار هیدرولیکی تامین و به سادگی بین دو مقدار 10^{-3} و $1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ فراهم شد. نتایج به طور واضح نشان می‌دهند که فشار شکست با نرخ

^۱ Lockner

^۲ Byerlee

^۳ Zoback

اعمال فشار در ارتباط است. در نرخ فشار متوسط و در حدود $1/1 \text{ MN/m}^2\text{s}$ ، مشاهده می‌شود که فشارهای شکست تقریباً ثابت است و حاکی از یک مقاومت کششی در حدود $9/5 \text{ MN/m}^2$ است. در نرخ‌های پایین‌تر اعمال فشار، مشاهده می‌شود که فشار شکست کاهش می‌یابد که این، منجر به فرض یک مقدار بسیار کم برای مقاومت کششی می‌شود. این مفهوم شبیه گزارش هیمسون و فیرهرست برای Hydrostone نفوذپذیر و مطابق با مفهوم انتشار سیال، دور از گمانه و افزایش فشار سیال منفذی در مناطق اطراف آن است. در نرخ‌های بسیار بالای اعمال فشار (بالتر از $1 \text{ MN/m}^2\text{s}$) فشار شکست تا حدود 60 MN/m^2 افزایش می‌یابد و به نظر می‌رسد که به طور ناهنجاری، مقادیر بالایی را برای مقاومت کششی نشان می‌دهد (Zoback et al., 1977).

سولبرگ^۱ و همکارانش در سال ۱۹۸۰ آزمایش‌ها شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌هایی از شیل نفتی و گرانیت‌هایی که تحت تنش سه محوره بودند، انجام دادند. آن‌ها دریافتند، زمانی که اختلاف تنش بیشتر از 2900 psi (200 MPa) باشد، در نمونه‌ها شکست برشی رخ می‌دهد و زمانی که اختلاف تنش کمتر از 2900 psi است شکست کششی رخ می‌دهد (Solberg et al., 1980).

ماژر^۲ و دوئه^۳ در سال ۱۹۸۶، برای ارزیابی اثر فشارهای همه جانبه بر روی فشار شکست و وابستگی فشار شکست به زمان، به طور هیدرولیکی بلوک‌های نمک را شکستند (Majer and Doe, 1986).

چونگ^۴ و هیمسون در سال ۱۹۸۹ آزمایش‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را بر روی دولومیت شکسته شده، در شرایط سه محوره اجرا کردند (Cheung and Haimson, 1989).

¹ Solberg

² Majer

³ Doe

⁴ Cheung

ایتو^۱ و هایاشی^۲ در سال ۱۹۹۱ یک تئوری برای تفسیر فشار شکست برای اندازه‌گیری تنش تکتونیکی در روش شکست هیدرولیکی ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که فشار شکست به قطر گمانه و نرخ اعمال فشار وابسته است. یعنی فشار شکست، با افزایش قطر گمانه، کاهش و با افزایش نرخ اعمال فشار، افزایش می‌یابد (Ito and Hayashi, 1991).

هیمسون و ژائو^۳ در سال ۱۹۹۱، تاثیر اندازه قطر چال و نرخ اعمال فشار بر روی فشار شکست را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش قطر گمانه، فشار شکست کاهش می‌یابد (Haimson and Zhao, 1991).

دتورنی^۴ و چنگ^۵ در سال ۱۹۹۲ تغییرات فشار شکست را با توجه به تغییر نرخ اعمال فشار مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که رابطه تجربی ارائه شده توسط هیمسون و فیرهرست، با نرخ پایین اعمال فشار و رابطه ارائه شده توسط هوبرت و ویلیس، با نرخ بالای اعمال فشار متناسب و هر دو رابطه مذکور برای شرایط نفوذپذیری کم و تخلخل پایین قابل قبول هستند. همچنین آن‌ها نشان دادند که رابطه هیمسون و فیرهرست برای تفسیر فشار شکست در سنگ‌های نفوذپذیر، رابطه مناسبی است (Detournay and cheng, 1992).

ماتسوناگا^۶ و همکارانش در سال ۱۹۹۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را با استفاده از دو سیال آب و روغن انجام دادند (Matsunaga et al., 1993).

¹ Ito

² Hayashi

³ Zhao

⁴ Detournay

⁵ Cheng

⁶ Matsunaga

ماسودا^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۳ آزمایش‌های آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی را اجرا نمودند، به طوری که آن‌ها زمانی که سیال در درون نمونه تزریق می‌شد، بر انتشار صوت (AE) تولید شده نظارت می‌کردند (Masuda et al., 1993).

وندام^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۸ آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را بر روی نمونه‌های مکعبی ۳۰ میلیمتری و از مواد مختلف اجرا نمودند. انتشار صوت، برای ارزیابی شعاع شکست و ابعاد منطقه فاقد نفوذ (بخشی که سیال در آن نفوذ نکرده) مورد استفاده قرار گرفت (Van Dam et al., 1998).

سانگ^۳ و همکارانش نیز در سال ۲۰۰۱ آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را اجرا نمودند. آن‌ها به منظور تایید این که آیا روش شکست هیدرولیکی برای ارزیابی تنش‌های برجا در سنگ‌های با نفوذپذیری بالا مفید است یا نه، تلاش کردند (Song et al., 2001).

لومه^۴ و همکارانش در سال ۲۰۰۲ آزمایش‌های شکست هیدرولیکی را در مقیاس آزمایشگاهی انجام دادند. سیال‌های با ویسکوزیته متفاوت و نرخ‌های تزریق متغیر به منظور مطالعه انتشار شکستگی و واکنش شکستگی استفاده شدند. آن‌ها یافتند که فشار آغاز شکست و فشار شکست به نرخ اعمال فشار و یا ویسکوزیته سیال وابسته نیست که این یافته‌ها، مطابق و موافق یافته‌های قبلی نیست. به هر حال، زمانی که آن‌ها سیال با ویسکوزیته بالا را با نرخ تزریق پایین استفاده کردند، یک کاهش فشار یکنواخت را بعد از شکست مشاهده کردند، در حالی که، وقتی سیال با ویسکوزیته پایین و با نرخ تزریق بالا استفاده شد، افزایش چند باره فشار سیال بعد از فشار حداکثر اول، مشاهده شد (Lhomme., 2002).

(et al

¹ Masuda

² Van Dam

³ Song

⁴ Lhomme

ایتو در سال ۲۰۰۸، تاثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست را مورد مطالعه قرارداد و به این نتیجه رسید که با افزایش قطر گمانه، فشار شکست افزایش می‌یابد (Ito, 2008).

بنور^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۴، آزمایش‌هایی را برای بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی راستای گسترش شکستگی و حالت‌های شکست انجام دادند. آن‌ها سه نوع سیال: آب، روغن و دی اکسید کربن مایع را انتخاب نمودند. ذکر این نکته نیز لازم است که، روغن دارای بیشترین ویسکوزیته و دی اکسید کربن مایع دارای کمترین ویسکوزیته هستند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که: ۱. راستای گسترش ترک، تحت تاثیر وضعیت تنش‌های برجا است ۲. آزمایش انجام شده با روغن (ویسکوزیته بالا) منجر به القاء شکستگی حالت اول (Mode-I) گردید. در حالی که در آزمایش‌های انجام شده با دو سیال دیگر، شکستگی حالت دوم (Mode-II) القاء شد. یکی دیگر از نتایجی که از این تحقیق بدست آمد، تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست بود. در واقع، این نتایج نشان دادند که با کاهش ویسکوزیته سیال، فشار شکست روند خاصی را طی نمی‌نماید (Bennour et al., 2014).

اینوی^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۴، تاثیر ویسکوزیته سیال را بر روی حالت‌های (مد) شکست، مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که: ۱. با کاهش ویسکوزیته سیال، شکستگی‌های القاء شده، شاخه شاخه می‌شوند. ۲. سیال‌های با ویسکوزیته پایین، باعث القاء شکستگی‌های برشی و سیال‌های با ویسکوزیته بالا، باعث القاء شکستگی‌های کششی می‌شوند (Inui et al., 2014).

لازم به ذکر است که علاوه بر موارد فوق، تحقیقات دیگری نیز برای درک بهتر روند شکست هیدرولیکی از طریق نتایج آزمایش‌ها انجام شده‌اند که در جدول زیر به آن‌ها اشاره شده است.

¹ Bennour

² Inui

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

جدول ۳-۱- آزمایش ها انجام شده در زمینه شکست هیدرولیکی

ردیف	محقق	موضوع	نتیجه
۱	هیمسون و فیهرست (Haimson and Fairhurst, 1969)	تعیین تنش برجا در اعماق زیاد، با استفاده از شکست هیدرولیکی-همچنین ارزیابی تاثیر متغیرهایی مانند قطر چال، نوع پکر و نرخ اعمال فشار	روش شکست هیدرولیکی می تواند برای تخمین حالت تنش در هر عمقی استفاده شود (براساس آزمایش های آزمایشگاهی در گمانه های شبیه سازی شده) - با افزایش قطر گمانه، فشار شکست کاهش می یابد - با افزایش نرخ اعمال فشار، فشار شکست افزایش می یابد.
۲	بردهوفت و همکارانش (Bredehoeft et al., 1975)	تعیین میدان تنش برجا	شکست هیدرولیکی در عمق کمتر از ۱۲۰ متر تقریباً افقی و در عمق بیشتر از آن قائم است و مقادیر مربوط به تنش های برجا (مخصوصاً تنش اصلی حداقل) با عمق رابطه خطی مستقیم دارند.
۳	زوباک و همکارانش (Zoback et al., 1977)	اندازه گیری تنش در کالیفرنیا مرکزی	اندازه گیری قابل اطمینان تنش برجا از طریق روش شکست هیدرولیکی یک کار مهم و چالش برانگیز است. با افزایش عمق فشار شکست افزایش می یابد
۴	پین و همکارانش (Pine et al., 1983)	اندازه گیری تنش برجا- شکست هیدرولیکی در معدن سنگ تا عمق ۲۰۰۰ متر	تنش افقی حداقل و حداکثر، محاسبه شده و نتایج بدست آمده از اجرای روش شکست هیدرولیکی و روش بیش مغزه گیری در عمق ۷۷۰ متری با یکدیگر مقایسه گردیدند که تطابق خوبی با یکدیگر داشتند. با افزایش عمق فشار شکست افزایش می یابد
۵	ماژر و دوئه (Majer and Doe, 1986)	مطالعه شکست هیدرولیکی بوسیله کنترل لرزه های فرکانس بالا	شکست کششی و برشی در طول فرآیند شکست هیدرولیکی رخ می دهند.
۶	هیلی و زوباک (Healy and Zoback, 1988)	اندازه گیری تنش برجا بوسیله شکست هیدرولیکی در عمق ۲٫۱ کیلومتری در کالیفرنیا	این تحقیق بصورت میدانی و در منطقه گسل سن آندریاس انجام شده و نشان می دهد مقدار تنش تابعی از عمق است.
۷	چونگ و هیمسون (Cheung and Haimson, 1989)	مطالعه آزمایشگاهی شکست هیدرولیکی	فشارهای بحرانی مانند فشار انسداد آبی و فشار بازشدگی مجدد که در تعیین تنش برجا درگیر هستند، با استفاده از روش های تفسیری تعیین می شوند.
۸	ماسودا و همکارانش (Masuda et al., 1993)	مطالعه آزمایشگاهی تاثیر حالت تنش برجا و مقاومت برروی زلزله القا شده از طریق جریان سیال	برای بررسی مکانیزم لرزه خیزی، انتشار آکوستیک و سرعت موج P در طی نفوذ آب به نمونه های خشک و اشباع گرانیات مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش ها نشان داد که ایجاد لرزه خیزی بوسیله جریان سیال یا تغییرات فشار آب، توسط تنش دیفرانسیلی برجا و توزیع مقاومت سنگ میزبان کنترل می شود.
۹	برادی (Brady Martin, 1995)	تعیین مقدار تنش برجا و امتداد آن ها در عمق ۹ کیلومتری - پایان نامه دکتری	اندازه گیری میدانی تنش برجا در عمق ۶ و ۹ کیلومتری
۱۰	هایاشی و همکارانش (Hayashi. K et al. 1997)	اندازه گیری تنش های برجا برای یک توده سنگ با صفحات متعدد ضعف	تعیین اندازه و امتداد تنش های اصلی با استفاده از فشار انسداد آبی. ترک های عرضی شیب دار و موقعیت ترک های طولی در سطح چاه در معدن کامائیشی
۱۱	(American society for Testing and Material, 1997) ASTM	تعیین تنش برجا در سنگ با استفاده از روش شکستگی هیدرولیکی	استاندارد D4645

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

۱۲	ون دام و همکارانش (Van Dam et al., 1998)	تجزیه و تحلیل بسته شدن شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه	مکانیک شکست الاستیک خطی می تواند برای آنالیز افت فشار مهم باشد.
۱۳	کلی و همکارانش (Klee et al., 1999)	اندازه گیری تنش شکست هیدرولیکی	اندازه گیری میدانی تنش برجا و امتداد آن در اعماق مختلف در هنگ کنگ
۱۴	سانگ و همکارانش (Song et al., 2001)	مطالعات آزمایشگاهی فشار شکست H.F.	تشریح رابطه فشار شکست و تنش دور میدان در ماسه سنگ با تخلخل بالا - شکست، قبل از رسیدن فشار به حداکثر مقدار خود رخ می دهد - فشار شکست با نرخ اعمال فشار اعمال می یابد
۱۵	کلی و همکارانش (Klee et al., 2002)	اندازه گیری تنش سنگ-شکست هیدرولیکی در گمانه ها	اندازه گیری تنش برجا و تحلیل امتداد آن - آزمایش ها نشان می دهند که شکستگی ها، شیب دار و با جهت گیری مشابه آغاز می شوند.
۱۶	یانگ و همکارانش (Yang, T.H et al., 2003)	تاثیر ناهمگنی خصوصیات مکانیکی بر روی شکست هیدرولیکی در سنگ های نفوذپذیر	۱. ناهمگنی و نفوذپذیری سنگ به طور قابل ملاحظه ای بر روی آغاز و انتشار شکست تاثیر گذار هستند. ۲. فشار آغاز شکست و فشار شکست برای نمونه های همگن بسیار بالاتر از فشارهای مورد نظر در نمونه های ناهمگن هستند. ۳. مسیر شکست هیدرولیکی به طور قابل توجهی تحت تاثیر ناهمگنی نمونه های سنگی است.
۱۷	مانتی و همکارانش (Manthei. G et al. 2003)	اندازه گیری تنش در معادن نمک با استفاده از یک ابزار خاص	در این تحقیق، برای تعیین راستای تنش حداقل، ابزار جدیدی برای ثبت انتشار صوت سه بعدی در داخل گمانه ای که شکست هیدرولیکی اجرا می شود، استفاده شده است. در حالیکه تا به حال برای تعیین امتداد تنش افقی حداقل، گمانه ای در مجاورت گمانه اصلی حفر می شده است.
۱۸	سونگ (Sung O. Choi, 2003)	مطالعات عددی در برآورد فشار انسداد در آزمون شکست هیدرولیکی	۱. تنش تفاضلی نقش مهمی را در کنترل انتشار شکست هیدرولیکی در سنگ بازی می کند. ۲. نتایج مطالعات عددی بر روی ویژگی های مختلف سنگ نشان می دهند که ویژگی های سنگ بر روی فشار انسداد تاثیر ندارند.
۱۹	هیمسون و کرن (Haimson and Cornet, 2003)	روش های پیشنهادی ISRM جهت ارزیابی تنش سنگ	توصیف روش شکست هیدرولیکی و نحوه محاسبه مقادیر مربوط به تنش های برجا با استفاده از روش شکست هیدرولیکی
۲۰	کومار و همکارانش (Kumar et al., 2004)	اندازه گیری تنش برجا و کاربرد آن در پروژه های هیدروالکتریکی در کشورهای هند، بوتان و نپال	کاربردهای مختلف اندازه گیری تنش - مفهوم، جزئیات و روند روش شکست هیدرولیکی برای محاسبه تنش های برجا
۲۱	(SINTEF Civil and Environmental Engineering Rock and Soil Mechanics, 2005)	اندازه گیری تنش های بر جای سنگ	آمار و اطلاعات روش های بکار رفته برای اندازه گیری تنش های برجا در سال های مختلف
۲۲	یانگ و همکارانش (Yang et al., 2005)	شبیه سازی شکستگی های هیدرولیکی سنگ	۱. ناهمگنی و نفوذپذیری سنگ به طور قابل ملاحظه ای بر روی آغاز و انتشار شکست تاثیر گذار هستند. ۲. فشار آغاز شکست و فشار شکست برای نمونه های همگن بسیار بالاتر از فشارهای مورد نظر در نمونه های ناهمگن هستند. ۳. مسیر شکست هیدرولیکی به طور قابل توجهی تحت تاثیر ناهمگنی نمونه های سنگی است.
۲۳	سانو و همکارانش (Sano et al., 2005)	روش های اندازه گیری تنش	روش شکست هیدرولیکی به طور گسترده ای در حوزه ژئوفیزیک و اندازه گیری در اعماق زیاد بکار می رود. با این حال، برای تعیین دقیق حالت تنش، تردیدها در مورد فشار بازشدگی مجدد باید از بین برود.

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

۲۴	لیندفرس (Lindfors, 2007)	اندازه گیری تنش سنگ در گمانه به کمک روش شکست هیدرولیکی	تشریح نحوه اجرای روش شکست هیدرولیکی با هدف تعیین راستا و مقدار تنش های برجا در سه عمق مختلف گمانه
۲۵	ناروکی (Nawrocki, 2008)	تغییرات فشار شکست در سنگ ها	پیش بینی مدل غیر خطی، هم از نظر تنش های گمانه و هم از نظر فشار شکست، با مدل الاستیک خطی متفاوت است. مدل الاستیک خطی لزوماً تنش های گمانه را بیش از حد پیش بینی نمی کند. مدل غیرخطی می تواند فشارهای بالاتر و پایین تر فشار شکست را نسبت به مدل الاستیک خطی کلاسیک ارائه نماید. این بدان معنی است که برآورد تنش افقی حداکثر با استفاده از مدل خطی، با مقادیر واقعی آن متفاوت است.
۲۶	ایتو (Ito, 2008)	شکست هیدرولیکی برای اندازه گیری تنش در اعماق	معرفی روش Baby borehole برای محاسبه تنش های حداقل و حداکثر در اعماق زیاد با در نظر گرفتن محدودیت های موجود در محاسبه فشار بازشدگی مجدد در روش شکست هیدرولیکی
۲۷	تیان و همکارانش (Tian. J et al., 2008)	تاثیر تنش بر روی سرعت امواج الاستیک در اطراف یک گمانه	ارائه نظریه ای برای بررسی توزیع سرعت امواج و دو قطبی شدن در اطراف یک چاه در سنگ های از پیش تنیده
۲۸	وانگ و همکارانش (Wang. S.Y et al., 2009)	آنالیز عددی شکست هیدرولیکی در مواد ناهمگن	درک بهتر مکانیسم آغاز و انتشار ترک در روش شکست هیدرولیکی - نتایج عددی نشان دادند که روند شکست هیدرولیکی به ۴ بخش اصلی تقسیم می شود: ۱. تمرکز تنش ۲. آغاز شکستگی ۳. انتشار پایدار شکستگی ۴. بسته شدن شکستگی -
۲۹	زانگ و همکارانش (Zang et al., 2009)	میدان تنش پوسته زمین	کتاب
۳۰	ساتو و یاماگوچی (Satoh and Yamaguchi, 2009)	آزمایش ها H.F. آزمایشگاهی با استفاده از نمونه های سیلندری توخالی با اندازه بزرگ	به منظور ایجاد شکست هیدرولیکی در نمونه های استوانه ای مورد آزمایش، حداقل قطر خارجی نمونه باید ۱۵cm باشد.
۳۱	ژانگ و همکارانش (Zhang. L et al., 2010)	شکستگی های القا شده و تنش پوسته	شکستگی های ایجاد شده در گمانه، به میدان تنش برجا مربوط می شوند. مدل های المان محدود نشان می دهند که تمرکز تنش در مجاورت گمانه رخ می دهد و شکستگی ها ممکن است در نقطه با مقاومت کششی حداکثر، شروع و با توجه به نظریه تنش کششی انتشار یابند.
۳۲	مونتمری و اسمیت (Montgomery, C., and Smith, M., 2010)	تاریخچه یک فناوری پایدار - شکست هیدرولیکی	ارائه یک تاریخچه
۳۳	رینیک و همکارانش (Reinicke. A et al., 2010)	تحریک شکستگی هیدرولیکی	بررسی پروپان ها
۳۴	کانگ و همکارانش (Kang et al., 2010)	اندازه گیری تنش های برجا در معادن زیرزمینی زغال در چین	۱. در معادن زیرزمینی زغال، تنش های برجا با عمق رابطه مستقیم دارند. ۲. در معادن کم عمق، نرخ افزایش تنش افقی بیشتر از تنش قائم است و رفته رفته با افزایش عمق، این روند از بین می رود. ۳. نسبت تنش افقی حداکثر به تنش قائم، با افزایش عمق کاهش یافته و به ۱ نزدیک می شود. ۴. در عمق حدود ۴۰۰ متر، این نسبت بزرگتر از ۲، برای توده سنگ های نرم، این نسبت کمتر از ۰.۵ و برای معادن زغال این نسبت بین ۰.۵ تا ۲ است.

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

۳۵	ژیان و همکارانش (Jian et al., 2010)	تحقیقات تجربی در مورد شکست هیدرولیکی در بلوک های طبیعی	۱. در جایی که تنش های افقی تفاوت بالایی دارند، شکست هیدرولیکی غالب، بصورت شاخه شاخه با گسترش تصادفی است. ۲. در جایی که تفاوت تنش های افقی کم است، شکست هیدرولیکی غالب، مسطح، شاخه ای و تاحدی قائم است.
۳۶	ژینگ پنگ (Xingpeng, 2011)	یک روش تجربی برای شکست هیدرولیکی در مخازن لایه زغالی	یک آزمایش عملی شکست هیدرولیکی در مخزن های لایه زغال. در این آزمایش، براساس محاسبه فشار در لحظه بسته شدن ترک، فشار در لایه زغال محاسبه شد.
۳۷	میفنگ و پنگ (Meifeng and Peng, 2011)	اندازه گیری تنش برجا	۱. تشریح پیشرفت های انجام شده در روش شکست هیدرولیکی و پیشرفت کشور چین در محاسبه تنش های برجا به کمک روش شکست هیدرولیکی در سال های اخیر. ۲. اندازه گیری تنش برجا در معدن زغال
۳۸	چیترا لا (Chitralla, 2011)	مطالعات آزمایشگاهی سیال القا کننده شکست هیدرولیکی	۱. در نمونه های همسانگرد، زمانی که تنش های اعمال شده از نظر اندازه کوچک باشند، قادر به کنترل راستای شکستگی نیستند و زمانی که اندازه تنش ها زیاد باشد، راستای شکستگی با تنش اعمال شده کنترل می شود. ۲. در نمونه های ناهمسانگرد، راستای شکستگی، به اندازه تنش خارجی اعمال شده و ناهمسانگردی موارد وابسته است. ۳. میانگین مقاومت کششی بدست آمده از فشار شکست در نمونه های سنگ آهک و پیروفیلیت، با مقاومت کششی بدست آمده از روش آزمایش برزلی تقریبا برابر بود. ۴. در نمونه های ماسه سنگ، مقاومت کششی محاسبه شده از فشار شکست تقریبا ۲ برابر مقدار بدست آمده از آزمایش برزلی بود.
۳۹	وی و همکارانش (Wei. H et al., 2011)	تحلیل عامل شکستگی های متعدد در طی شکستگی هیدرولیکی چاه های CBM	هنگامی که شکست هیدرولیکی با شکستگی های طبیعی برخورد می کند، ادامه گسترش آن از ۳ حالت خارج نیست: ۱. همراه با شکستگی طبیعی گسترش می یابد و سپس تحت کنترل تنش اصلی تغییر جهت می دهد. ۲. شکست هیدرولیکی در نقطه ضعف در سطح شکستگی طبیعی، شکسته شده و در راستای تنش اصلی حداکثر گسترش می یابد. ۳. شکست هیدرولیکی در شکست طبیعی متوقف می شود.
۴۰	ژینسونگ و همکارانش (Jinsong. H et al., 2011)	تعیین تنش برجا	ارائه یک روش جدید برای تعیین تنش برجا از طریق روش شکست هیدرولیکی در گمانه های شیب دار – این روش مبتنی بر مکانیک کلاسیک بوده و از یک مجموعه داده مبتنی بر فشار شکست همراه با موقعیت زاویه شکست و زاویه ردیابی استفاده می کند.
۴۱	اشمیت و همکارانش (Schmitt et al., 2011)	شکست هیدرولیکی برای اندازه گیری تنش ترک های ریز در رسوبات سفت	اجرای میدانی روش شکست هیدرولیکی

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

۴۲	ژانگ و همکارانش (Zhang.) (X et al. 2011)	آغاز و انتشار یک شکستگی هیدرولیکی از یک چاه دایره ای	۱. اگر شکستگی اولیه، در نزدیکی یا در امتداد تنش اصلی حداکثر قرار بگیرد، فشار تزریق افت خواهد نمود و بازشدگی شکستگی افزایش خواهد یافت. ولی با توجه به آن که امتداد تنش برجا و موقعیت درزه‌ها در طول یک چاه، تغییر خواهند کرد، انتظار می‌رود که در برخی مواقع شکستگی اولیه از امتداد تنش حداکثر منحرف شود. ۲. دو عامل زاویه شکست و تعداد آن می‌تواند به طور قابل توجهی بر روی خط سیر شکستگی و فشار چاه تاثیر بگذارد. همچنین، شکستگی‌های ثانویه می‌توانند در یک موقعیت مطلوب نسبت به شکستگی اولیه و غالب، با سرعت بیشتری رشد نمایند (هرچند که بخشی از رشد آن ممکن است توسط تنش دور از میدان خنثی شود).
۴۳	ون و همکارانش (Wen) (Meng et al., 2012)	اندازه‌گیری تنش‌های برجا در سنگاپور	اجرای میدانی روش شکست هیدرولیکی و تعیین راستا و اندازه تنش‌های برجا
۴۴	ضیائی و همکارانش (Ziaie et) (al., 2012)	اندازه‌گیری تنش برجا بوسیله روش شکست هیدرولیکی در سد گتوند	۱. اجرای میدانی روش شکست هیدرولیکی و تعیین راستا و اندازه تنش‌های برجا ۲. به علت عمق کم، تنش قائم، تنش بر جای متوسط می‌باشد. ۳. فشار شکست، فشار انسداد آبی و فشار بازشدگی مجدد، با افزایش عمق، افزایش می‌یابند.
۴۵	کیزاکی و همکارانش (Kizaki) (et al., 2013)	اثر آب منفذی بر انتشار شکست هیدرولیکی	انتشار شکستگی‌های میکروسکوپی در نمونه‌های اشباع با آب که سیال تزریق، دی اکسید کربن تحت فشار بود، با انتشار شکستگی در نمونه‌های با آب محتوی که سیال شکستگی آب بود، مشابهت داشتند.
۴۶	فراش و همکارانش (Frash.) (L et al., 2013)	شبیه سازی شکست هیدرولیکی با استفاده از دستگاه سه محوره واقعی گرم شونده	در بخش مربوط به دستگاه‌های تست سه محوره واقعی توضیح داده شده است.
۴۷	دهقان و همکارانش (۱۳۹۳)	مطالعه آزمایشگاهی شکافت هیدرولیکی	تمرکز تنش در اطراف چاه به طور مشخصی فشار شکست در سنگ را افزایش خواهد داد در صورتی که وجود شکاف‌های طبیعی در دیواره چاه این تمرکز تنش را از بین خواهد برد و منجر به کاهش فشار شروع شکست در اطراف چاه می‌گردد.
۴۸	لاکتر و بیرلی (Lockner) (and Byerlee, 1977)	تنش تفاضلی و نرخ تزریق سیال	در شکست هیدرولیکی، نوع شکست (کششی یا برشی) بستگی به تنش‌های منطقه‌ای، نرخ تزریق و نفوذپذیری سنگ دارد. در جایی که نرخ تزریق سیال کمتر بود، شکستگی برشی و در جایی که نرخ تزریق بیشتر شکستگی کششی رخ داد. همچنین، محاسبات نشان داد که نفوذپذیری سنگ به تنش موثر و تنش دیفرانسیلی وابسته است.
۴۹	سولبرگ و همکارانش (Solberg et al., 1980)	شکست هیدرولیکی در گرانیت تحت شرایط ژئوترمال	نرخ تزریق سریع و یا تنش تفاضلی کم، باعث ایجاد شکست کششی و نرخ تزریق آهسته در تنش تفاضلی زیاد باعث شکست برشی می‌شود. ضمناً درجه حرارت، تاثیر قابل توجهی بر روی مکانیسم شکست هیدرولیکی نمی‌گذارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که در نرخ متوسط تزریق سیال و تنش دیفرانسیلی بالا، نفوذپذیری افزایش می‌یابد.
۵۰	بارلا و همکارانش (Barla et) (al., 1986)	آزمایش شکست هیدرولیکی برای اندازه‌گیری تنش	با افزایش قطر گمانه، فشار شکست کاهش می‌یابد. ویسکوزیته سیال، برای شبیه سازی وضعیت‌های مختلف نفوذپذیری مورد بررسی قرار گرفت که با استفاده گلیسیترین نتایج رضایت بخشی حاصل شد. نرخ جریان سیال تاثیر ناچیزی بر روی نتایج دارد. نرخ اعمال فشار، با فشار

فصل سوم: مطالعات انجام شده بر روی شکست هیدرولیکی

شکست رابطه مستقیم غیر خطی دارد. طول فضای تحت فشار با فشار شکست رابطه معکوس غیر خطی دارد.			
مکانیسم شروع و گسترش شکستگی به شدت تحت تاثیر نفوذپذیری، بافت سنگ و ویسکوزیته سیال شکستگی است. زمانی که روغن به عنوان سیال تزریق انتخاب شد، در همه آزمایش‌ها، فشار شکست افزایش یافت که نشان دهنده تاثیر نفوذ سیال شکستگی بر مکانیسم شکست است.	مطالعه مکانیسم شکست هیدرولیکی با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی	ماتسونوگا و همکارانش (Matsunaga et al., 1993)	۵۱
وقتی نرخ تزریق و ویسکوزیته سیال خیلی کم هستند، شکست برشی رخ می‌دهد. همچنین زمانی که فشار شکست کم است، شکست برشی معمولاً رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که روش تنش نقطه‌ای ایتو، فشار شکست را پیش بینی نمی‌نماید بلکه فشار آغاز شکستگی را پیش بینی می‌نماید.	تفسیر فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی	جو و همکارانش (Guo. F et al. 1993)	۵۲
فشار آغاز شکست و فشار شکست به نرخ اعمال فشار و یا ویسکوزیته سیال وابسته نیست. این نتیجه با نتایج دیگر محققین متفاوت است. تاثیر فشار سیال منفذی بر شروع شکستگی و در نتیجه آن، وابستگی فشار شروع شکستگی و فشار شکست به نرخ اعمال فشار ناچیز است. تغییرات فشار ثبت شده در مرحله شکست به جریان سیال و نرخ پمپ بستگی دارد.	مطالعه آزمایشگاهی بر روی آغاز شکست هیدرولیکی	لومه و همکارانش (Lhomme et al., 2002)	۵۳

همچنین، مطالعات انجام شده در زمینه دستگاه‌های تست سه محوره واقعی، در فصل مربوط به آن ارائه شده است.

فصل چهارم

مطالعه اثر طول بازه تزریق بر روی

فشار شکست

۴-۱- مقدمه

اجرای دقیق آزمایش شکست هیدرولیکی تحت تاثیر چندین مؤلفه است. با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده بر روی روش شکست هیدرولیکی، طول بازه تحت فشار^۱ یکی از مؤلفه‌های مؤثر بر روی فشار شکست است. اهمیت مؤلفه مذکور تا آنجایی است که ISRM^۲ و ASTM^۳ محدودیت‌هایی را برای فضای مذکور در نظر گرفته‌اند و پیشنهاد کرده‌اند که فاصله بین دو پکر (بازه تزریق) حداقل ۶ برابر قطر چال باشد (Haimson and Cornet, 2003; ASTM, 1997). در این فصل، تجهیزات، نمونه‌های ساخته شده و آزمایش‌های انجام شده، در راستای بررسی میزان تاثیر "طول بازه تحت فشار" بر روی فشار شکست تشریح خواهند شد.

لازم به ذکر است که برخی از تجهیزاتی که قبلاً توسط دیگر محققین طراحی و ساخته شده بودند، برای استفاده در این تحقیق، مورد بازبینی و تغییرات قرار گرفتند و دیگر تجهیزات بکار رفته، توسط نویسندگان این تحقیق طراحی و ساخته شده‌اند.

۴-۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

به منظور انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، پس از بررسی نمونه‌های طبیعی و مصنوعی و با توجه به محدوده فشار مورد نیاز، تصمیم بر استفاده از نمونه مصنوعی از جنس گچ ساختمانی گرفته شد. در نتیجه گچ سرند شده با مش ۳۵ و با نسبت وزنی آب به گچ ۳۰۰ به ۴۸۰ برای ساخت نمونه مورد استفاده قرار گرفت. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، یک قالب با ارتفاع ۱۴ cm و قطر ۵/۴ cm و با یک میله مرکزی با قطر ۱ cm برای ساخت نمونه‌های استوانه‌ای شکل و شبیه‌سازی گمانه

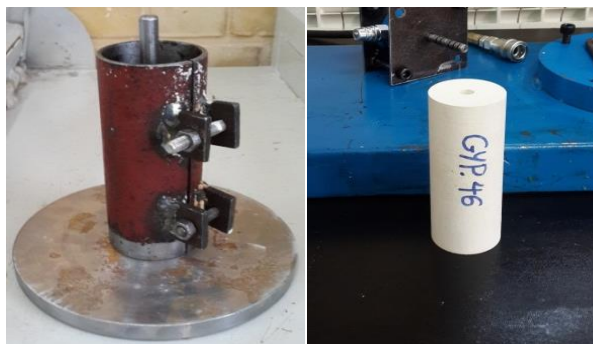
^۱ طول بازه تزریق

^۲ International Society for Rock Mechanics

^۳ American Society of the International Association for Testing and Materials

فصل چهارم: مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست

در مرکز آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴-۱). لازم به ذکر است که برای تکمیل شدن فرایند گیرش گچ، ۱۰ روز در نظر گرفته شد.



شکل ۴-۱- نمونه گچی و قالب بکار رفته برای ساخت آن

۴-۳- تجهیزات

به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، تهیه دستگاه‌ها و تجهیزات مناسب، لازم و ضروری بود. در این رابطه یک پمپ تزریق سیال با نرخ تزریق مناسب و فشار سیال کنترل شده، تجهیزات مربوط به تنظیم طول فضای تزریق سیال (طول بازه تزریق) و آب بندی فضای مذکور و دستگاهی برای اعمال بار قائم ثابت، طراحی و ساخته شدند. در ادامه، هریک از دستگاه‌ها و قطعات به تفکیک تشریح شده‌اند.

۴-۳-۱- پمپ تزریق سیال

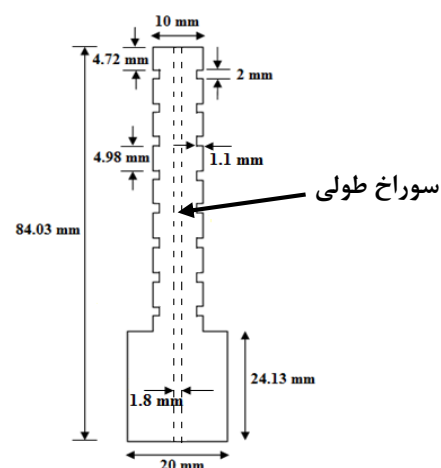
به منظور به دست آوردن فشار شکست به عنوان تابعی از طول بازه تزریق در آزمایشگاه، دستگاهی برای تزریق سیال (روغن هیدرولیک) به داخل فضای تزریق، با قابلیت کنترل نرخ افزایش فشار، طراحی و ساخته شد (شکل ۴-۲). همان طور که در شکل مشخص است، فشار سنج روی دستگاه، نشان دهنده فشار سیال تزریقی بوده و زمانی که شکست اتفاق می‌افتد، فشار شکست را نشان می‌دهد. به این ترتیب که عقربه فشار سنج در زمان وقوع شکست، متوقف می‌گردد و پس از قرائت فشار شکست، به کمک یک شیر دستی، به محل اولیه خود بازمی‌گردد.



شکل ۴-۲- تصویری از دستگاه طراحی شده برای تزریق سیال در داخل سنگ

۴-۳-۲- تجهیزات مربوط به تنظیم طول بازه تزریق و آب بندی فضای مذکور

همان طور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، به منظور تنظیم طول بازه تزریق در داخل نمونه، دو انژکتور شیاردار، طراحی و ساخته شده‌اند. این انژکتورها در بخش بالایی و پایینی نمونه قرار می‌گیرند و دو اورینگ لاستیکی در داخل دو شیار جایگذاری می‌شوند. در حقیقت این اورینگ‌ها، نقش پکر را بازی می‌کنند و علاوه بر آب بندی فضای تزریق، وظیفه تنظیم طول این فضا را نیز برعهده دارند.



شکل ۴-۳- نمایی از انژکتور طراحی شده

با توجه به شکل بالا، برای هدایت سیال به داخل فضای تزریق و تخلیه هوا از این بخش، سوراخ‌های طولی بر روی دو انژکتور بالایی و پایینی ایجاد شده است که به ترتیب وظیفه هدایت سیال به داخل فضای تزریق و تخلیه هوا از فضای مذکور را برعهده دارند.

۴-۳-۳- پیچ تخلیه هوا

از آنجا که بایستی، سیال شکستگی، کل فضای تزریق را فراگیرد و هیچگونه حباب هوایی در این بخش نباشد، لذا در ابتدای آزمایش و قبل از اعمال بار و در حالتی که پیچ هوای تعبیه شده (شکل ۴-۴) بر روی تکیه گاه باز است، سیال، به داخل فضای تزریق پمپ می‌شود. تا زمانی که سیال به همراه حباب‌های هوا از قسمت تحتانی خارج شود این کار ادامه می‌یابد و در نهایت پس از اطمینان از خروج کامل هوا، پیچ هوا بسته می‌شود.



شکل ۴-۴- پیچ تخلیه هوا

۴-۳-۴- دستگاه اعمال بار ثابت (CLA^1)

با توجه به آنکه در این بخش از آزمایش‌ها، تاثیر تغییرات طول بازه تزریق بر روی فشار شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد و همچنین با توجه به امکانات موجود، تنها، بار قائم بر روی نمونه‌ها اعمال می‌شود و تنش‌های جانبی صفر منظور می‌گردند. در این راستا، دستگاه اعمال بار ثابت (شکل ۴-۵) که توسط دیگر محققین (Hosseini et al., 2012) طراحی و ساخته شده بود، با ایجاد برخی تغییرات

¹ Constant Load Apparatus

فصل چهارم: مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست

که شامل اضافه کردن تکیه‌گاهی برای استقرار انژکتور پایینی و همچنین ایجاد مسیر تخلیه هوا است، بکار گرفته شد. این دستگاه از قانون اهرم‌ها تبعیت می‌نماید و با استفاده از سیستم اندازه‌گیری دیجیتال^۱، مشخص شد که بار وارد بر نمونه از طریق دستگاه مذکور ۲۰ برابر وزنه‌ای است که بر روی کفه نگهدارنده وزنه قرار می‌گیرد.



شکل ۴-۵- دستگاه اعمال بار ثابت

۴-۴- مراحل آزمایش

ابتدا، برای ایجاد طول مناسب در فضای تزریق، اورینگ‌ها در داخل شیارهای تعبیه شده بر روی انژکتورهای بالایی و پایینی قرار می‌گیرند (شکل ۴-۳). طول بازه تزریق می‌تواند از حداکثر ۱۳/۵ cm تا حداقل ۰/۵ cm تغییر کند. لازم به ذکر است که برای تنظیم فواصل کمتر از ۴/۶ cm، در حالی که اورینگ بالایی در داخل پایین‌ترین شیار قرار می‌گیرد، بجای انژکتور پایینی، از پکرهای PVC طراحی شده استفاده می‌شود. در مرحله دوم، نمونه در جای مناسب خود که بر روی دستگاه بار ثابت تعبیه شده است قرار می‌گیرد و از طریق یک شیلنگ فشار بالا به پمپ تزریق سیال متصل می‌گردد. سپس به منظور تخلیه هوا از مسیر جریان روغن، در حالی که پیچ تخلیه هوا باز است، روغن تزریق می‌شود. عملیات تزریق تا جایی ادامه می‌یابد که حباب‌های هوا در سیال مشاهده نشوند. در این زمان

¹ Load cell

فصل چهارم: مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست

پیچ بسته می‌شود. در ادامه، یک بار ثابت ۷/۵ کیلوگرمی که متناسب است با ۳۴ KPa فشار بر روی نمونه، از طریق تنظیم اهرم‌ها و اتصالات در دستگاه بار ثابت، بر روی کفه نگهدارنده وزنه قرار می‌گیرد. در مرحله آخر، با هدف ایجاد شکست، عملیات تزریق سیال به داخل نمونه با یک نرخ ثابت انجام می‌شود.

۴-۵- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به مراحل که در بخش قبل تشریح گردید، ۴۳ آزمایش انجام شد که به علت انحراف زیاد از مقدار متوسط، ۱۲ آزمایش غیر قابل قبول در نظر گرفته شد. نتایج در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۶ ارائه شده‌اند.

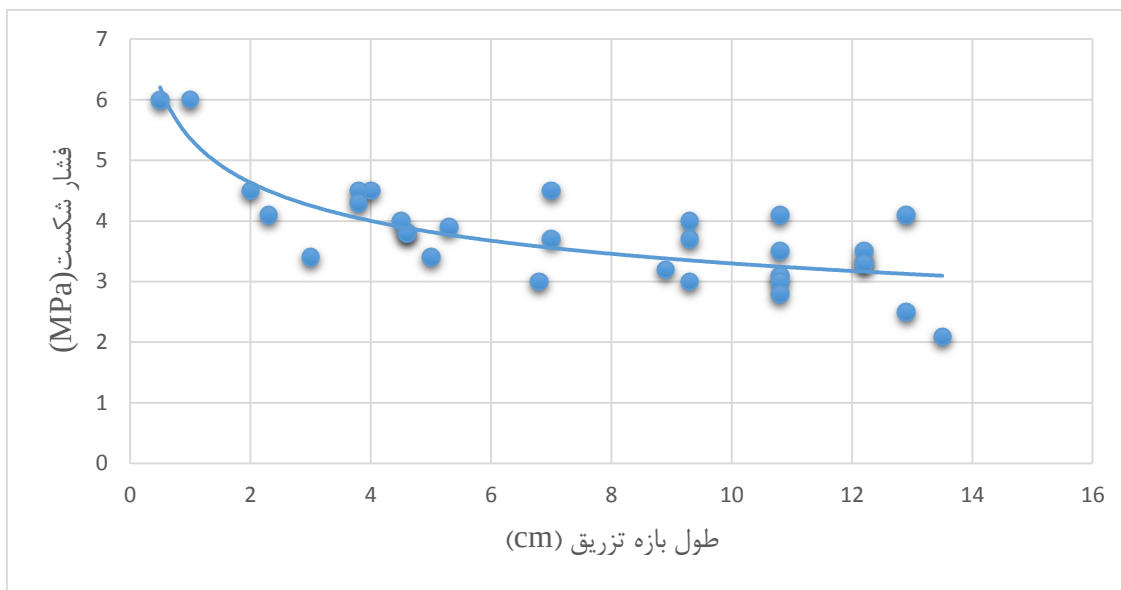
جدول ۴-۱- نتایج آزمایش‌ها

شماره آزمایش	کد نمونه	طول بازه تزریق (cm)	فشار شکست (MPa)
۱	GYP.8	۱۲/۹ اورینگ‌ها در دنده اول مجاور دهانه قرار داده شدند	۴/۱
۲	GYP.9	۱۲/۹ اورینگ‌ها در دنده اول مجاور دهانه قرار داده شدند	۲/۵
۳	GYP.10	۱۲/۲ دنده دوم مجاور دهانه	۳/۳
۴	GYP.11	۱۲/۲ دنده دوم مجاور دهانه	۳/۵
۵	GYP.12	۱۲/۲ دنده دوم مجاور دهانه	۳/۳
۶	GPY.13	۱۰/۸ دنده سوم از دهانه	۳/۱
۷	GYP.14	۱۰/۸ دنده سوم از دهانه	۳
۸	GYP.16	۱۰/۸ دنده سوم از دهانه	۴/۱
۹	GYP.17	۱۰/۸ دنده سوم از دهانه	۳/۵
۱۰	GYP.18	۹/۳ دنده چهارم از دهانه	۳/۷

فصل چهارم: مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست

۴	۹/۳ دنده چهارم از دهانه	GYP.19	۱۱
۳/۲	۸/۹ دنده پنجم از دهانه	GYP.20	۱۲
۴/۵	۷ دنده ششم از دهانه	GYP.21	۱۳
۳/۷	۶/۸ دنده ششم از دهانه	GYP.22	۱۴
۳/۹	۵/۳ دنده هفتم از دهانه	GYP.23	۱۵
۳/۸	۴/۶ دنده هشتم از دهانه	GYP.24	۱۶
۳/۸	۴/۶ دنده هشتم از دهانه	GYP.25	۱۷
۴/۵	۴ با استفاده از پکر PVC	GYP.26	۱۸
۴	۴/۵ با استفاده از پکر PVC	GYP.27	۱۹
۴/۵	۳/۸ با استفاده از پکر PVC	GYP.28	۲۰
۴/۵	۲ با استفاده از پکر PVC	GYP.30	۲۱
۶	۰/۵ با استفاده از پکر PVC	GYP.31	۲۲
۶	۱ با استفاده از پکر PVC	GYP.32	۲۳
۲/۱	۱۳/۵ در دنده اول از دهانه	GYP.33	۲۴
۲/۸	۱۰/۸ در دنده سوم از دهانه	GYP.35	۲۵
۳	۹/۳ در دنده سوم از دهانه	GYP.36	۲۶
۳	۶/۸ در دنده سوم از دهانه	GYP.38	۲۷
۳/۴	۵ در دنده هفتم از دهانه	GYP.39	۲۸
۴/۳	۳/۸ با استفاده از پکر PVC	GYP.40	۲۹
۳/۴	۳ با استفاده از پکر PVC	GYP.41	۳۰

۴/۱	۲/۳ با استفاده از پکر PVC	GYP.42	۳۱
-----	------------------------------	--------	----



شکل ۴-۶- تغییرات فشار شکست نسبت به طول بازه تزریق

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با افزایش طول بازه تزریق، مقدار فشار شکست کاهش می‌یابد و برای فواصل بیش از حدود ۷ cm و یا نسبت طول بر قطر بیش از حدود ۷، تاثیر آن (طول بازه تزریق) ناچیز است. ارتباط بین فشار شکست و طول بازه تزریق را می‌توان با استفاده از معادله زیر بیان نمود:

$$P_b = 5.3616 \times L^{-0.211} \quad (1)$$

که P_b فشار شکست (MPa) و L طول بازه تزریق (cm) است. این نتیجه‌گیری، به استاندارد ASTM و ISRM برای آزمون‌های شکست هیدرولیکی که مقدار ۶ را برای حداقل نسبت طول بازه تزریق به قطر گمانه پیشنهاد می‌کنند، نزدیک است (ASTM, 1997; Haimson and Cornet, 2003).

۴-۶- نتیجه‌گیری

یکی از موارد قابل تامل در اندازه‌گیری تنش‌های برجا به روش شکست هیدرولیکی، تعیین فاصله بین پکرها است. در طی تحقیق اخیر، نمونه‌های گچی برای آزمایش اثر طول بازه تزریق بر فشار

فصل چهارم: مطالعه بر روی اثر طول بازه تزریق بر روی فشار شکست

شکست مورد استفاده قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده، با افزایش طول بازه تزریق، فشار شکست کاهش می‌یابد و برای فواصل بیش از حدود ۷ cm و یا نسبت طول بر قطر بیش از حدود ۷، تاثیر آن (طول بازه تزریق) ناچیز است. این در حالی است که استاندارد ASTM و ISRM، مقدار ۶ را برای حداقل نسبت طول بازه تزریق به قطر گمانه پیشنهاد می‌کنند.

فصل پنجم

ساخت دستگاه تست سه محوره

واقعی

۵-۱- مقدمه

از آنجا که شبیه سازی اعمال تنش‌های برجا در آزمایشگاه مشکل است، در اکثر مطالعات انجام شده در مورد تنش‌های برجا، نمونه‌های استوانه‌ای تحت شرایط سه محوره عادی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. در صورتیکه برای نیل به نتایج قابل اتکا در این تحقیقات بایستی از نمونه‌های مکعبی استفاده نمود و به کمک دستگاه تست سه محوره واقعی^۱، در سه راستای مختلف، سه تنش متفاوت را بر آن‌ها اعمال کرد. برای شبیه سازی پدیده شکست هیدرولیکی که در این تحقیق مورد توجه بوده است، لازم است همزمان با شرایط تنش فوق، سیال مناسب با فشار بالا به درون سنگ تزریق و سنگ شکسته شود. راستای شکستگی راهنمای تعیین جهات تنش‌های برجا است و با کمک نمودار فشار-زمان و روابط تحلیلی ارائه شده در روش فوق می‌توان بزرگی تنش‌ها را نیز محاسبه نمود. آگاهی از شرایط تنش‌های برجا، کمک شایانی به طراحی فضاهای زیرزمینی می‌نماید.

با توجه به اهمیت موضوع و اهداف مورد نظر در این تحقیق (مانند بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست) تصمیم گرفته شد تا برای اولین بار در کشور دستگاه با قابلیت شبیه سازی فرآیند شکست هیدرولیکی در میدان تنش سه محوره واقعی ساخته شود. در این راستا علاوه بر تمهیدات لازم برای اعمال سه تنش متفاوت در سه امتداد متعامد، از سامانه تزریق مستقیم برای تزریق سیال فشار بالا به درون سنگ بدون نیاز به شلنگ‌ها و اتصالات فشار بالا استفاده گردید.

¹ True Triaxial Apparatus

۵-۲- شرح وضعیت دانش فنی پیشین

تاکنون آزمایش‌های چند محوره بر روی نمونه‌های سنگی، توسط محققین متعددی همچون، تاکاهاشی^۱ و کوئید^۲ (۱۹۸۹)، کروفرود^۳، اسمارت^۴، ماین^۵ و لیاکوپولو-موریس^۶ (۱۹۹۵)، هیمسون^۷ و چانگ^۸ (۲۰۰۰) و چانگ و هیمسون (۲۰۰۵) انجام شده است (Manabu et al., 2013). لازم به ذکر است که آزمون سه محوره واقعی تنها می‌تواند در نمونه‌های مکعبی شکل (در این نمونه‌ها تنش‌های متفاوت افقی در دو جهت عمود بر هم اعمال می‌شوند و تنش قائم که تنش روباره را شبیه سازی می‌نماید در راستای قائم بر نمونه اعمال می‌شود) به طور مناسبی اجرا شود. هر چند در برخی از موارد ممکن است آزمایش‌های سه محوره معمولی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل، مفید باشند، با این حال، شبیه سازی شکست هیدرولیکی در آزمایشگاه تنها در صورتی معتبر است که در شرایط تنش سه محوره واقعی اجرا شود. در گذشته، تلاش‌های زیادی برای انجام آزمایش نمونه‌های سنگی در معرض وضعیت تنش سه محوره واقعی صورت گرفته است. چندین نفر، تجهیزات تخصصی را برای انجام آزمایش‌های سه محوره واقعی طراحی نموده‌اند. موگی^۹ اولین دستگاهی را که قادر به اعمال سه بار یکنواخت مستقل و دو به دو عمود بر هم بر روی سطوح یک نمونه مکعب مستطیلی با حداقل اصطکاک می‌باشد، ساخته است. او دولومیت دانه‌ام^{۱۰} و دیگر سنگ‌ها را در معرض تنش‌های فشاری اصلی متوسط مختلف و تنش‌های اصلی حداقل یکسان قرار داد و سپس تنش اصلی حداکثر را برای ایجاد شکست

¹ Takahashi

² Koide

³ Crawford

⁴ Smart

⁵ Main

⁶ Liakopoulou-Morris

⁷ Haimson

⁸ Chang

⁹ Mogi

¹⁰ Dunham

افزایش داد (Rasouli, 2011; Haimson, 2006; Haimson and Chang, 2000; Oku et al., 2007, Chang and Haimson, 2000).

هوژم و کوک^۱ (۱۹۶۸) آزمایش‌هایشان را به کمک سلول چند محوره‌ای که در آن، جک‌های تخت به منظور اعمال تنش سه محوره واقعی بر روی سنگ استفاده شدند، انجام دادند که در نتیجه آن، یک معیار شکست انرژی کرنش برشی موثر، براساس اطلاعات بدست آمده فرموله شد. موگی (۱۹۷۰، ۱۹۷۱، ۱۹۷۷) نمونه‌های مکعبی انواع سنگ‌ها را آزمایش نمود و تفاوت‌های مقاومتی بسیار مهمی را نسبت به گزارش‌های ارائه شده توسط بريس^۲، هوژم و کوک بدست آورد و در سال ۱۹۷۱ به طور تجربی نشان داد که برای سنگ آزمایش شده، مقاومت، تابعی از تنش افقی متوسط است که به شیوه‌ای مشابه و به لحاظ تئوری بوسیله ویبولز^۳ و کوک پیش بینی شده است. او یک قدم پیشتر رفت و قادر بود نشان دهد که تمامی نتایج تجربیش، زمانی که یک دامنه تعمیم یافته فون میزز^۴ از تنش برشی هشت وجهی در مقابل تنش نرمال میانگین وارد بر سطح شکست رسم شد، یک معیار مقاومتی ساده را در قالب یک تابع افزایشی یکنواخت برازش می‌کند. بیشتر اطلاعات حاصل از آزمایش‌های چند محوره که اخیراً بر روی نمونه‌های مکعبی انجام شده‌اند، عبارتند از: اطلاعات ژائو^۵ و همکارانش (۱۹۸۳) که نمونه‌های مکعبی ۱۰ سانتی متری ماسه سنگ قرمز رنگ را، هم بوسیله صفحات فلزی سخت و هم بوسیله صفحات انعطاف پذیر در معرض بار قرار دادند، آمادی و رایینسون^۶ (۱۹۸۶) که سنگ آهک را تحت وضعیت فشاری - کششی با صفحات فلزی انعطاف پذیر پر از سیال و صفحات فلزی قرار دادند و اساکي و کیمورا^۷ (۱۹۸۹) که یک محفظه سه محوره واقعی با فشار بالا را با صفحات فلزی صلب برای

¹ Hojem and Cook

² Brace

³ Wiebols

⁴ Von Mises

⁵ Gao

⁶ Amadei and Robinson

⁷ Esaki and Kimura

اعمال تنش‌های در حد گیگاپاسکال استفاده نمودند (Smart et al., 1999; Crawford et al., 1995; Smart and Crawford, 1993; Haimson, 2006; Haimson and Chang, 2000; Oku et al., 2007, (Chang and Haimson, 2000).

کینگ^۱ (۲۰۰۲) یک سیستم آزمایش چند محوره را توسعه داد و سرعت صوت و قابلیت نفوذ سیال و رفتار تنش- کرنش الاستیک را با استفاده از یک نمونه کوبیک با مجموعه‌ای از شکستگی‌ها اندازه‌گیری نمود. او ارتباط بین سرعت و قابلیت نفوذ را برای سنگ‌های با شکستگی‌های متعدد موازی مدل سازی نمود و یک رابطه معکوس بین سرعت امواج برشی که به صورت عمود بر سطح شکستگی‌های ردیف شده انتشار می‌یابد و نفوذپذیری، بدست آورد (Manabu et al., 2013).

تجهیزات طراحی شده و توسعه یافته در آزمایشگاه‌های مختلف، تمرکز ویژه‌ای بر روی برخی اهداف از پیش تعیین شده داشته‌اند. با این حال، هیچ یک از آن‌ها انعطاف پذیری لازم را برای انجام آزمایش‌های مختلف در یک سلول مشابه نداشتند. بعلاوه، بعضی از آن‌ها تنها می‌توانند نمونه‌های مکعبی کوچک را استفاده کنند. در حالی که دیگر دستگاه‌ها در هنگام استفاده از تنش اعمال شده حداکثر به یک نمونه بزرگ، محدودیت دارند (در نمونه‌های ۳۰ سانتی متری) و تعدادی از آن‌ها قابلیت شبیه‌سازی فشار سیال منفذی را ندارند. حال، در جدول (۵-۱)، معرفی مختصری از برخی از سیستم‌های سه محوره واقعی و چند محوره موجود در سراسر جهان که قابلیت انجام آزمایش شکست هیدرولیکی را دارند، ارائه می‌شود (Rasouli, 2011).

جدول ۵-۱- دستگاه‌های تست سه محوره واقعی با قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی

ردیف	نام موسسه یا دانشگاه	بار قائم (KN)	بارهای افقی (KN)	فشار منفذی (MPa)	فشار سیال تزریق (MPa)	نرخ تزریق سیال (lit/min)	ابعاد نمونه (cm ³)	حداکثر حرارت نمونه (°C)
۱	دانشگاه کرتین استرالیا (Rasouli, 2011; Younessi et al., 2012)	۴۵۰	۲۵۰	۲۱	۳۶	۱۳۰	۳۰×۳۰×۳۰	۱۰۰

¹ King

فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی

۲	دانشگاه دلف هلند (Rasouli, 2011)	۳۵۰۰	۳۵۰۰	--	--	--	۳۰×۳۰×۳۰	--
۳	Rasouli,) CSIRO ¹ (2011)	۴۰۰۰	۴۰۰۰	--	--	--	۴۰×۴۰×۴۰	--
۴	دانشگاه وسترن استرالیا Rasouli, 2011;) (Ismail, 2005	۹۴	۹۴	--	--	--	۲۵×۲۵×۲۵	--
۵	دانشگاه نفت چین Zhang and Fan,) 2014; Rasouli, 2011 (	۲۵۲۰	۲۵۲۰	--	۱۴۰	--	۳۰×۳۰×۳۰	--
۶	شرکت 3D Geoscience (Aoyagi et al., 2013)	--	--	--	--	--	۱۶×۱۶×۱۶	--
۷	دانشگاه توهوکو (Kizaki et al., 2013)	--	--	--	--	--	--	۴۰
۸	دانشگاه تگزاس (Hosseini, 2012)	۶۴/۱۷	۶۴/۱۷	--	--	--	۳۰/۵×۳۰/۵×۳۰/۵	--
۹	دانشگاه ویسکانسین Chang and) Haimson, 2000; Haimson and Chang, 2000; Haimson, 2006; (Oku et al., 2007	۵۷۷/۶	۲۸۸/۸	--	--	--	۱/۹×۱/۹×۳/۸	--
۱۰	مدرسه معدن کلرادو Frash and) Gutierrez, 2012; (Frash et al., 2014	۱۱	۱۱	--	۷۰	۱۰-۸-۰/۰۶	۳۰×۳۰×۳۰	۱۸۰
۱۱	دانشگاه معدن و فناوری چین () Huang et al., 2011; Jinli et al., (2011	۴۰۰۰	۴۰۰۰	--	۷۰	--	۵۰×۵۰×۵۰	--
۱۲	دانشگاه ملی سئول (Cheon, 2006)	۴۵۰۰	۱۸۰۰ و ۴۵۰	--	--	--	۳۰×۳۰×۳۰	--
۱۳	دانشگاه آخن آلمان (Weber et al., 2013)	۲۷۰۰	۲۰۲۵	--	۶۵	--	۳۰×۳۰×۴۵	--
۱۴	دانشکده نفت دانشگاه کرتین (گزارش بازدید- ترابی، ۱۳۹۵)						۱۰×۱۰×۱۰	

¹ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization

۵-۲-۱- برخی دیگر از تحقیقات انجام شده در دنیا، با استفاده از دستگاه‌های سه

محوره و با اهدافی متفاوت با شبیه سازی شکست هیدرولیکی

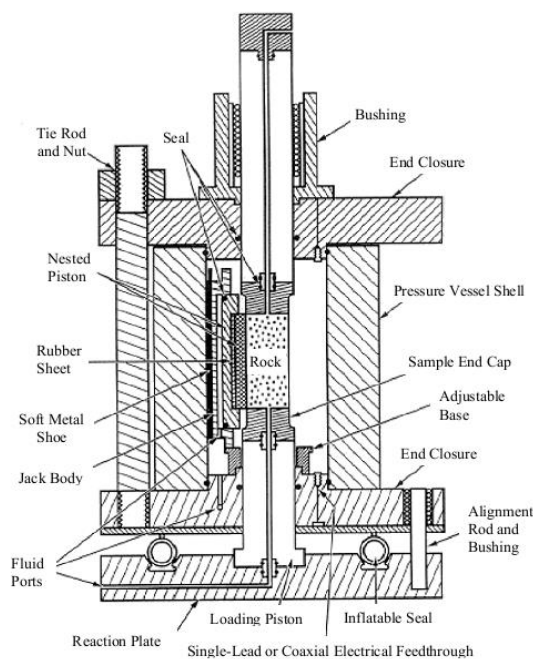
هوک^۱ و فرانکلین^۲ در سال ۱۹۷۰ از ماسه سنگ برای اعمال تنش‌های تک محوره، دو محوره، سه محوره و چند محوره استفاده نمودند. نتایج بدست آمده، تاثیر تنش اصلی متوسط را بر روی شکست سنگ تایید نمود و نشان داد که مقاومت ظاهری سنگ به طور قابل توجهی بوسیله شرایط تنش اعمال شده تحت تاثیر قرار می‌گیرد. سیستم آزمایش چند محوره می‌تواند پیش بینی واقع بینانه‌ای از رفتار واقعی سنگ ارائه دهد و تدوین و فرمول بندی مدل‌های عددی مناسب‌تر را هدایت نماید (Sriapai, 2010).

واورسیک^۳ و همکارانش در سال ۱۹۹۷ دستگاه سه محوره واقعی را توسعه دادند که باعث استفاده از محفظه‌های فشار سه محوره مرسوم همراه با پیکربندی ویژه و جک‌های هیدرولیکی فشار بالا در داخل این محفظه‌ها می‌شود (شکل ۵-۱). دستگاه مذکور، ترکیبی از مزایایی که در امکانات رایج یافت نمی‌شود را دارا است. از آن جمله می‌توان به طراحی مختصر و مفید، قابلیت فشار سیال منفذی و عبور جریان، توانایی رسیدن به تنش‌های اصلی بالا و تفاوت تنش‌های اصلی، دسترسی مستقیم به قسمت‌های مختلف نمونه و تدارکات مناسب برای تغییر شکل‌های نسبتاً بزرگ بدون ناهمگونی‌های میدان تنش توسعه یافته، اشاره نمود (Thosuwan, 2009).

¹ Hoek

² Franklin

³ Wawersik



شکل ۵-۱- سیستم آزمایش سه محوره واقعی ساندیا با پوسته مخزن تحت فشار شناور (Thosuwan, 2009)

کولمنارس^۱ و زوباک^۲ در سال ۲۰۰۲ هفت معیار شکست مختلف را برای اطلاعات آزمایش چند محوره بر روی ۵ نوع سنگ مختلف در انواع حالات تنش بررسی نمودند. آن‌ها یک الگوریتم جستجوی شبکه را برای پیدا نمودن بهترین مجموعه از مؤلفه‌هایی که شکست را برای هر معیار و محیط‌های نامتجانس مرتبط توصیف می‌نماید، بکار بردند. به طور کلی آن‌ها دریافتند که معیار چند محوره اصلاح شده ویبولز^۳ و کوک^۴ و معیار اصلاح شده لید^۵، به یک برازش خوب برای بیشتر داده‌های آزمون رسیده‌اند (Sriapai, 2010).

^۱ Colmenares

^۲ Zoback

^۳ Weibols

^۴ Cook

^۵ Lade

کواسنیوسکی^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ نمونه‌ای منشوری از جنس ماسه سنگ را برای آزمایش‌های تک محوره، سه محوره متداول و سه محوره واقعی بکار بردند (Sriapai, 2010).

الکسیو^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۴ دو نسل از دستگاه‌های بارگذاری سه محوره واقعی را ارائه نمودند. نسل اول عمدتاً برای شبیه‌سازی حالت تنش واقعی نمونه‌های سنگی و یا مواد معدنی در نظر گرفته شد. نسل دوم به منظور ارائه اندازه‌گیری‌های دقیق در هرگونه تنش و شبیه‌سازی انفجار سنگ در آزاد شدن ناگهانی یک وجه از نمونه طراحی شد. هر دو دستگاه بارگذاری سه محوره واقعی می‌توانند فشار تا ۲۵۰ MPa، مربوط به عمق حدود ۱۰۰۰۰ متری را به طور مستقل در امتداد هر سه محور اعمال نمایند (Thosuwan, 2009).

چانگ^۳ و هیمسون^۴ در سال ۲۰۰۵ مکانیسم تغییر شکل بدون اتساع و شکست در شرایط فشار سه محوره واقعی را مورد بحث قرار دادند. آن‌ها آزمایش‌های آزمایشگاهی مقاومت سنگ را برای دو سنگ ترد هورنفلس^۵ و متاپلیت^۶ که مجموع آن‌ها ترکیب عمده دره کالدر^۷ را در عمق ۲۰۲۵-۲۹۹۶ متری تشکیل می‌دهند، انجام دادند (Sriapai, 2010).

والسری^۸ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ قاب بارگذاری چند محوره را برای تعیین مقاومت فشاری و کششی سه نوع ماسه سنگ در معرض تنش‌های سه محوره واقعی، توسعه دادند (Sriapai, 2010).

در ادامه و در جدول (۵-۲) دیگر مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌های دارای دستگاه‌های تست سه محوره واقعی بدون قابلیت شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی ارائه شده‌اند.

1 Kwasniewski

2 Alexeev

3 Chang

4 Haimson

5 Hornfels

6 Metapelite

7 Caldera

8 Walsri

فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی

جدول ۵-۲- دستگاه های تست سه محوره واقعی بدون قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی

ردیف	نام موسسه یا دانشگاه	بار قائم (KN)	بارهای افقی (KN)	ابعاد نمونه (cm ³)	درجه حرارت نمونه (°C)
۱	گروه مهندسی عمران، موسسه فن آوری هند (Tiwari and Rao, 2006-1; Tiwari and Rao 2006-2; Tiwari and Rao, 2004; Rao and Tiwari, 2011)	۱۰۰۰	۳۰۰	۱۵×۱۵×۱۵	
۲	دانشگاه کلرادو (Sture et al., 1988)			۱۷٫۸×۱۷٫۸×۱۷٫۸	
۳	دانشگاه فناوری سوراناری تایلند (Sriapai, 2010; Kapang, 2012)	۱۰۰۰	۱۰۰	۱۰×۵×۵	
۴	موسسه فناوری کالسروهه (http://ibf.webarchiv.kit.edu/felslabor/felslabor8_en.html)			۱۲۰×۶۲×۶۲	
۵	دانشگاه هریوت وات (Smart et al., 1999; Crawford et al., 1995; Smart and Crawford, 1993)				
۶	آزمایشگاه دینامیک شکست سنگ (RFDL) در موسسه لاسوند- دانشگاه تورنتو (Rasouli, 2011; Young, 2012)	۶۸۰۰	۳۴۰۰	۸×۸×۸	۲۰۰

۵-۲-۲- دستگاه های ساخته شده برای شبیه سازی شکست هیدرولیکی توسط

شرکت های مختلف

➤ سیستم های آزمایش GCTS

شرکت GCTS در زمینه ساخت تجهیزات آزمایشگاهی در کشور آمریکا فعالیت می نماید. این

شرکت علاوه بر ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی، دستگاه مخصوص تست شکست هیدرولیکی را

نیز تولید می نماید. در ادامه، در مورد خصوصیات و قابلیت های این دستگاه ها توضیح خواهیم داد

(<http://www.gcts.com>).

➤ Hydraulic Fracture Test System (HFRTC-100)

سیستم آزمایش شکست هیدرولیکی GCTS نه تنها قادر به انجام آزمایش های پایه استاتیکی

و دینامیکی سه محوره می باشد بلکه شکست هیدرولیکی، پایداری گمانه، و آزمایش های نفوذپذیری را

نیز انجام می‌دهد (شکل ۵-۲). کار با این سیستم چند منظوره بدلیل نرم افزار رابط کاربری گرافیکی

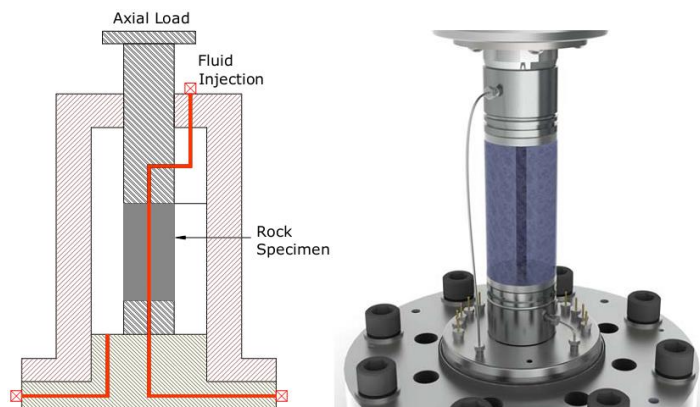
(GUI)^۱ بسیار آسان است (<http://www.gcts.com>).

قابلیت‌ها (<http://www.gcts.com>):

- قادر به انجام آزمایش‌های سه محوری دینامیکی و استاتیکی و همچنین شکست هیدرولیکی، پایداری چاه و نفوذپذیری سنگ.
 - سلول سه محوره فولادی ضد زنگ RTX-100 برای نمونه‌های با قطر ۵۴ mm (ظرفیت فشار محصور ۱۰۰۰۰ PSI)
 - تقویت کننده فشار هوا/روغن با انتقال دهنده فشار برای کنترل استاتیکی سلول یا فشار برگشتی تا ۷۰ MPa (۱۰۰۰۰ PSI)
 - تشدید کننده فشار سروو کنترل، قادر به کنترل استاتیکی و دینامیکی فشارهای تزریق سیال تا ۷۰ MPa
 - سیستم گرمایشی برای آزمایش در دمای تا ۲۳۰ °C (۵۵۰ °F)
 - حسگر داخلی انتشار صوت
- مشخصات (<http://www.gcts.com>):
- بار محوری ۱۰۰۰ KN
 - فشار محصور و منفذی ۷۰ MPa
 - حجم تشدید کننده ۲۸۰ cc
 - حمل و نقل (<http://www.gcts.com>):
 - وزن ۱۶۰۰ kg

^۱ Graphical User Interface

- ابعاد: (۱) عرض ۱ m ، ارتفاع ۲ m و طول ۲ m ، (۲) عرض ۱ m ، ارتفاع ۲ m و طول ۱,۵ m



شکل ۵-۲- نمایی از دستگاه HFRTC-100 (<http://www.gcts.com>)

➤ Hydraulic Fracturing Tester (HFT-70)

دستگاه تست شکست هیدرولیکی GCTS اجازه می‌دهد تا آزمون‌های شکستگی با تشدید کننده فشار HPVC انجام شوند. این لوازم و متعلقات معمولاً برای شکست هیدرولیکی، پایداری چاه و آزمایش‌های نفوذپذیری استفاده می‌شوند (شکل ۵-۳). این آزمایش‌ها می‌توانند با فشار محصور و یا بدون آن انجام شوند. سلول سه محوره HFT همراه با یک تعادل هیدرولیکی برای استفاده از حالت تنش هیدرواستاتیک می‌باشد. ولی می‌توان آن را برای اعمال تنش‌های انحرافی برای حالت تنش ناهمسانگرد با تنش قائم تا ۱۴۰ MPa بر روی نمونه‌های با قطر ۵۴ mm استفاده نمود. یک قاب بارگذاری می‌تواند برای القاء بارهای محوری بزرگتر استفاده شود. فشار شکستگی معمولاً با یک نرخ ثابت و بصورت شیب‌دار بالا می‌رود در حالی که کرنش شعاعی برای تعیین فشار شکست، در طول آزمایش شکستگی اندازه‌گیری می‌شود. این سیستم می‌تواند با کنترل درجه حرارت تا ۲۰۰°C ارتقا یابد (<http://www.gcts.com>).

قابلیت ها (<http://www.gcts.com>):

- انجام آزمایش‌های شکستگی هیدرولیکی، پایداری چاه و نفوذپذیری سنگ
- فشار سلول و شکستگی ۷۰ MPa

- ظرفیت تعادل هیدرولیکی برای حالت تنش هیدرواستاتیک، می‌تواند برای اعمال تنش‌های انحرافی برای حالت تنش ناهمسانگرد با تنش قائم تا ۱۴۰ MPa بر روی نمونه‌های با قطر mm ۵۴ استفاده شود.
- ۳۲ خط تغذیه الکتریکی
- ۷ خروجی سیال (۵ خروجی برای نمونه و ۲ خروجی برای سلول)
- مکانیسم کشش برای تسهیل در نصب و تنظیم نمونه



شکل ۵-۳- نمایی از دستگاه HFT-70 (<http://www.gcts.com>)

➤ Rock Polyaxial Fixture (RPX-150)

دستگاه چند محوره GCTS RPX-150 می‌تواند برای مطالعه اثر تنش اصلی متوسط بر روی رفتار مهندسی سنگ و توصیف مقاومت سنگ در معرض یک سیستم کلی تنش‌های فشاری چند محوره بکار برود (شکل ۵-۴). RPX-150 یک دستگاه ساده و مقرون به صرفه است که قابلیت‌های سیستم‌های سه محوره سنگ GCTS استاندارد را (شامل کنترل سلول و فشار منفذی) افزایش می‌دهد. این دستگاه برای مجهز نمودن داخل سلول‌های سه محوره GCTS طراحی می‌شود و قاب بارگذاری را برای اعمال (معمولاً) تنش اصلی حداکثر، فشار سلول را برای اعمال تنش اصلی متوسط و سیستم فشار منفذی را برای اعمال تنش اصلی حداقل از طریق جک‌های تخت استفاده می‌نماید (<http://www.gcts.com>).



شکل ۵-۴- نمایشی از دستگاه RPX-150 (<http://www.gcts.com>)

ویژگی‌ها:

- ساخته شده از فولاد ضد زنگ
- انجام آزمون‌های چند محوره (سه محوره واقعی) در سلول‌های سه محوره سنگ
- کنترل مستقل تنش‌های حداقل، متوسط و حداکثر (که با هم برابر نیستند)
- اندازه‌گیری کرنش در هر سه جهت عمود بر هم
- مطابقت داشتن با نمونه‌های سنگی مکعبی و یا استوانه‌ای با ابعاد حداکثر $38/1 \text{ mm} \times 38/1 \text{ mm} \times 76/2 \text{ mm}$ یا با قطر $38/1 \text{ mm}$ و ارتفاع $76/2 \text{ mm}$
- کنترل تنش تا حد 70 MPa
- دسترسی به حسگرهای اولتراسونیک (مافوق صوت) برای اندازه‌گیری سرعت موج‌های P و S در وضعیت تنش‌های مختلف

➤ Rock Polyaxial System (RPS-100)

این دستگاه چند محوره می‌تواند برای مطالعه اثر تنش اصلی متوسط بر روی رفتار مهندسی سنگ و توصیف مقاومت سنگ در معرض یک سیستم کلی تنش‌های فشاری چند محوره بکار برود (شکل ۵-۵). تشدید کننده‌های سرنگی فشار برای اعمال مستقل تنش‌های حداقل، متوسط و حداکثر با اندازه‌گیری تغییرات نسبت $\frac{\text{حجم}}{\text{تغییر شکل}}$ استفاده می‌شوند. حسگرهای مافوق صوت نیز می‌توانند به منظور بررسی تاثیر وضعیت تنش ناهمسانگرد بر روی سرعت امواج فشاری و برشی ارائه شوند.

فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی

سرعت‌ها می‌توانند با این گزینه به سادگی در حین آزمایش‌های چند محوره برای هر سه محور اندازه‌گیری شوند (<http://www.gcts.com>).

ویژگی‌ها:

- کنترل مستقل تنش‌های حداقل، متوسط و حداکثر یا کرنش‌های حداقل، متوسط و حداکثر یا کنترل ترکیبی از تنش یا کرنش برای هر محور با ۱۴۰ MPa (۲۰۰۰۰ psi) تنش حداکثر بر روی یک نمونه مکعبی ۱۰۰ میلی متری.
- حسگرهای تغییر شکل بر روی هر وجه برای اندازه‌گیری کرنش‌ها در سه جهت اصلی
- یک تشدید کننده فشار منفذی برای اشباع نمودن نمونه و انجام تست‌های نفوذپذیری
- خروجی‌های فشار منفذی بر روی هر وجه با دریچه‌های کنترل برای انتخاب جهت جریان در هنگام اندازه‌گیری نفوذپذیری
- وجود کریستال‌های P و S بر روی هر وجه برای اندازه‌گیری سرعت صوت در هر جهت اصلی
- وجود پوشش^۱ گرمایشی برای کنترل درجه حرارت از شرایط محیط تا ۱۵۰ °C
- وجود صفحات فلزی شکست هیدرولیکی برای انجام آزمایش‌های پایداری چاه



شکل ۵-۵- نمایشی از دستگاه RPS-100 (<http://www.gcts.com>)

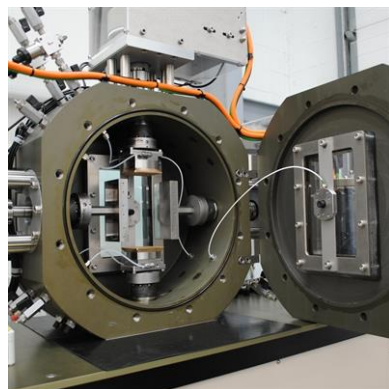
^۱ jacket

➤ شرکت GDS Instruments

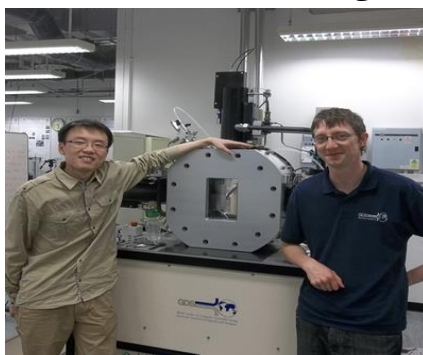
دستگاه سه محوره واقعی GDS (GDSTTA) ساخت کشور انگلستان، دارای ویژگی‌های مشخصی است که برخلاف دستگاه‌های سه محوری معمولی می‌توان هر سه تنش اصلی را به طور مستقل کنترل نمود (شکل های ۵-۶، ۵-۷ و ۵-۸). این ویژگی اجازه می‌دهد که یک طیف وسیع‌تری از مسیرهای تنش پیچیده اجرا شود. این سیستم چرخه‌ای پویا توسط یک محرک الکترومکانیکی پیشرفته و یا محرک هیدرولیکی، طراحی شد است و یک ابزار تحقیقاتی بسیار پیچیده است. محور قائم و یک محور افقی از طریق سیلندر دینامیکی بارگذاری می‌شوند و برای محور افقی دوم، از طریق فشار سلول، کنترل تنش فراهم شده است (gdsinstruments.com).
ویژگی‌های کلیدی:

تنش یا کرنش اعمال شده به یک نمونه $150\text{mm} \times 75\text{mm} \times 75\text{mm}$ مکعب مستطیلی، به طور مستقل و در سه جهت: دو جفت رام دینامیکی مشابه و همسان برای محورهای ۱ و ۲ و یک سیال محصور تامین کننده فشار برای محور سوم برای اندازه‌گیری بار (gdsinstruments.com).
مشخصات رام: هر رام یک سلول بارگذاری شناور داخلی و مبدل جابجایی مختص خود را برای اطمینان از به حداقل رسیدن اثر اصطکاک دارد (gdsinstruments.com).
محرک (سیلندر) الکترومکانیکی استاندارد: محرک‌های الکترومکانیکی، یک راه حل ساده‌تر برای استفاده و سازگار با محیط را برای آزمایش دقیق ارائه می‌کند. محرک الکترومکانیکی نیازی به حضور یک دستگاه تنظیم برق هیدرولیکی ندارد، از این رو نیازی به ارائه خدمات دستگاه تنظیم برق یا محافظت از کاربران سیستم در برابر سر و صدای تولید شده توسط دستگاه تنظیم برق نیست (gdsinstruments.com).
آماده سازی نمونه:

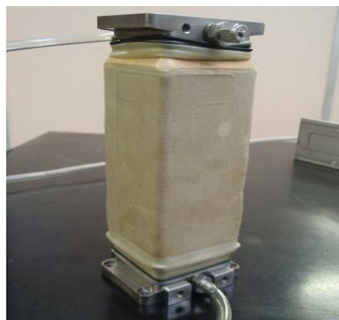
تمامی تجهیزات آماده سازی نمونه برای نمونه‌های چسبنده و غیر چسبنده با سیستمی شامل یک ماشین طراحی شده خاص برای تولید نمونه‌های مکعبی ارائه شده است (gdsinstruments.com).



شکل ۵-۶- نمایی از GDSTTA (gdsinstruments.com)



شکل ۵-۷- نمایی از GDSTTA (gdsinstruments.com)



شکل ۵-۸- نمایی از نحوه قرار گیری نمونه در دستگاه GDSTTA (gdsinstruments.com)

۵-۳- دستگاه ساخته شده در دانشگاه صنعتی شاهرود

همان طور که در ابتدای این فصل اشاره شد برای تحقق اهداف مورد نظر در این تحقیق، نیاز مبرم به دستگاه تست سه محوره واقعی احساس می‌شد. به همین منظور، با توجه به مطالعات اولیه انجام شده بر روی دستگاه‌های ساخته شده ی مشابه در دیگر نقاط جهان، دستگاه تست سه محوره

فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی

واقعی با قابلیت شبیه سازی شکست هیدرولیکی در دانشگاه صنعتی شاهرود طراحی و ساخته شد. در ادامه روند ساخت دستگاه مذکور به تفکیک بخش های مختلف آن ارائه می گردد:

۵-۳-۱- ساخت چهارچوب دستگاه

چهارچوب دستگاه مذکور از فولاد ساخته شده است که روند ساخت آن ها در شکل های ۵-۹

تا ۵-۱۲ قابل مشاهده است.



شکل ۵-۹- صفحات بالایی و پایینی دستگاه



شکل ۵-۱۰- مونتاژ صفحات بالایی و پایینی دستگاه



شکل ۵-۱۱- نمای داخلی دستگاه



شکل ۵-۱۲- نصب صفحه نگهدارنده جک بالایی

۵-۳-۲- ساخت جک‌های دستگاه

با توجه به بررسی‌ها و مطالعات فنی انجام شده در زمینه جک‌های مورد نیاز دستگاه و آنچه در بازار موجود بود، ساخت جک‌ها بهترین راه حل بود. چرا که هیچ یک از جک‌های موجود در بازار تناسب لازم از نظر هندسی و توان برای استفاده در این دستگاه را نداشتند. در شکل‌های ۵-۱۳ تا ۵-۱۷ تصاویری از فرایند ساخت جک‌ها قابل مشاهده است.

قابل ذکر است که کلیه صفحات فولادی انتهایی جک‌ها که در هنگام آزمایش به بدنه نمونه تکیه می‌کنند (Platens)، دارای قابلیت خود تنظیم^۱ هستند تا از تمرکز تنش در صورت وجود ناهماهنگی‌های هندسی احتمالی در سطوح نمونه جلوگیری شود.



شکل ۵-۱۳- متعلقات جک‌های دستگاه



شکل ۵-۱۴- صفحات حائل بین نمونه و جک‌ها



شکل ۵-۱۵- جک‌ها در مرحله تراش

¹ Self-alignment



شکل ۵-۱۶- مرحله مونتاژ متعلقات جک‌ها



شکل ۵-۱۷- مونتاژ جک‌ها

۵-۳-۳- طراحی و ساخت سامانه تزریق مستقیم

به منظور تزریق سیال از هر نوع و با هر ویسکوزیته، با فشار بالا به داخل گمانه، سامانه‌ای طراحی شد که به طور مستقیم و بدون نیاز به شلنگ‌ها و اتصالات فشار قوی عملیات تزریق را انجام می‌دهد. مشکل عمده در طراحی این سامانه نحوه تزریق، آب بندی و بالابردن فشار سیال در درون گمانه بود که مطالعات زیادی در این زمینه انجام شد. در نهایت، سامانه تزریق با بکارگیری سیستم منگنه آبی طراحی شد. این سیستم که دارای قابلیت استقرار موقت در بالای نمونه در هنگام آزمون و دوران حول یکی از ۴ محور ستون و دور شدن از نمونه برای ایجاد فضای کافی برای کنترل و کار، بر روی نمونه از نظر نصب حسگرها و تجهیزات جانبی است، برای اولین بار در دنیا در این دستگاه استفاده شده است و قابلیت تزریق سیال را به طور مستقیم، با فشار بالا و با آب بندی مناسب دارد. در توضیح قابلیت‌های این سیستم موارد زیر قابل ذکر است:

- تزریق مستقیم سیال:

سیالی که در این سامانه استفاده و به داخل سنگ تزریق می شود مستقل از سیال استفاده شده برای جک ها است و این ویژگی، امکان بکار بردن سیال های گوناگون و با ویسکوزیته های متفاوت را به کاربر می دهد.

- قابلیت اعمال فشار بالا بر روی دیواره گمانه:

از آنجا که برای القای شکستگی بر روی دیواره گمانه نیاز به فشار بالا است و البته تامین این فشار نیاز به قطعات و تجهیزات ویژه دارد لذا با بکارگیری سیستم منگنه آبی، مشکلات مذکور مرتفع گردید. این سامانه، فشار را با نسبت ۱ به ۱۰ به دیواره گمانه اعمال می نماید. یعنی با کاهش قطر لوله تزریق در مسیر جریان، فشار وارده ۱۰ برابر می شود.

- آب بندی مناسب مسیر تزریق:

سامانه طراحی شده، برای آب بندی مسیر، از جک قائم استفاده می کند. به این صورت که جک قائم فشار را بر روی سامانه تزریق اعمال می نماید و آن را به سنگ می چسباند. این عمل باعث آب بندی مسیر می شود. در پایان عملیات نیز سامانه تزریق بوسیله فنری که بر روی آن تعبیه شده است به حالت اول باز می گردد.

در شکل های ۵-۱۸ تا ۵-۲۰، این سامانه و مراحل ساخت آن قابل مشاهده است.



شکل ۵-۱۸- نمای داخلی سامانه تزریق



شکل ۵-۱۹- متعلقات سامانه تزریق



شکل ۵-۲۰- سامانه تزریق

۵-۳-۴- ساخت واحد هیدرولیک

این واحد که دارای یک مخزن ۲۵۰ لیتری است، وظیفه تزریق سیال (روغن هیدرولیک) به داخل سیلندر جک‌ها را دارد. از آنجا که ۴ جک افقی و ۱ جک قائم برای دستگاه طراحی شده است و جک‌های افقی دو به دو باهم در ارتباط هستند (جک‌هایی که مقابل هم قرار گرفته‌اند باید فشار یکسانی را به نمونه وارد کنند) لذا هر ۲ جک افقی یک فشارسنج دارد و مقدار فشار جک‌ها توسط فشارسنج‌هایی که بر روی این واحد نصب شده، قابل کنترل است. علاوه بر آن، مسیری برای هدایت سیال به سمت سامانه تزریق، بر روی واحد فوق تعبیه شد است که به منظور تحریک پیستون داخل سامانه، از تحت فشار قرار دادن سیال کمک می‌گیرد. واحد مذکور دارای ۲ موتور ۳ph (۲۲۰۰w) و ۲ پمپ دو طبقه برای تزریق سیال به مسیرهای توضیح داده شده، است. لازم به ذکر است که تابلوی برق دستگاه نیز بر

فصل پنجم: ساخت دستگاه تست سه محوره واقعی

روی این واحد نصب شده است. در ادامه در شکل‌های ۵-۲۱ تا ۵-۲۴ تصاویری از واحد هیدرولیک و تابلو برق نصب شده بر روی آن در روند ساخت و نصب قابل مشاهده است.



شکل ۵-۲۱- واحد هیدرولیک طی فرایند ساخت



شکل ۵-۲۲- واحد هیدرولیک پس از نصب شلنگ‌های فشار بالا برای هدایت سیال



شکل ۵-۲۳- تابلوی برق دستگاه



شکل ۵-۲۴- واحد هیدرولیک و اتصال آن به دستگاه سه محوره واقعی

۵-۳-۵- ویژگی‌های دستگاه ساخته شده

دستگاه اعمال تنش سه محوره به منظور اعمال نیرو در سه راستای اصلی (X, Y, Z) طراحی شده است. یکی از کاربردهای این دستگاه در آزمایشگاه‌های مکانیک سنگ و برای آنالیز مقاومت مکانیکی سنگ‌های مختلف است.

قابلیت دیگر این دستگاه که در تلاش اخیر مورد نظر است، شبیه سازی فرآیند شکست هیدرولیکی است. به این صورت که، تزریق سیال به داخل گمانه‌ای ایجاد شده در نمونه‌ی سنگ انجام می‌شود. این عمل بمنظور اعمال فشار از درون به نمونه انجام می‌شود و افزایش تدریجی فشار تا ایجاد شکست در نمونه ادامه می‌یابد. همانگونه که اشاره شد، در حین انجام عمل تزریق، نمونه در سه امتداد تحت تنش خواهد بود. بسته هیدرولیکی یا سامانه تزریق مستقیم طراحی شده برای تزریق سیال به درون نمونه با فشار اعمالی از طرف جک قائم در جایگاه خود تثبیت شده و از انحراف آن جلوگیری می‌شود.

همان گونه که اشاره شد، سامانه تزریق به گونه‌ای طراحی شده است که در زمانی که به آن نیازی نیست با یک حرکت دورانی حول یکی از شفت‌های سازه اصلی دستگاه از روی نمونه کنار می‌رود. اطلاعات ورودی طراحی بدین شرح است:

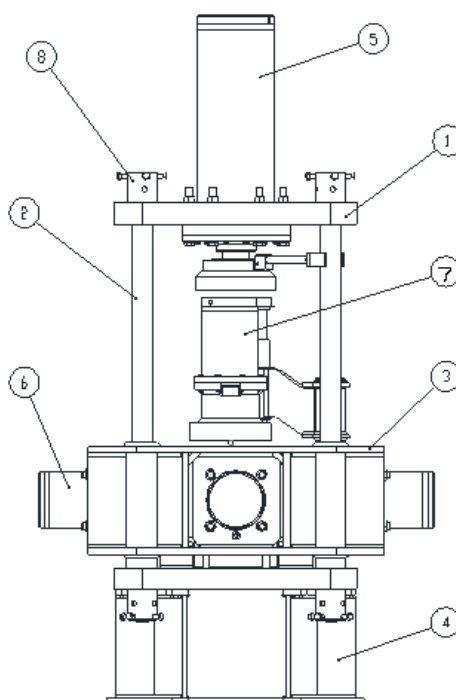
- اعمال نیروی ۵۰ تن بر روی صفحات نمونه در راستای افقی.

- اعمال نیروی ۸۰ تن بر روی صفحات نمونه در راستای قائم.
- فشار سیال تزریقی به درون نمونه تا ۲۰۰۰ bar قابل افزایش است.
- قابلیت اعمال فشار به نمونه‌هایی با ابعاد حداکثر $30\text{ mc} \times 30\text{ mc} \times 30\text{ mc}$.
- استفاده از سیستم خود تنظیم، برای توزیع فشار یکنواخت بر روی نمونه.

۵-۳-۶- معرفی اجزای دستگاه

در این قسمت در ابتدا بخش‌های مختلف دستگاه را معرفی کرده و نکات مربوط به طراحی و

محاسبات اجزای مربوط به هر بخش ارائه می‌شود (شکل ۵-۲۵).



شکل ۵-۲۵- اجزاء مختلف دستگاه

شماره ۱ - صفحه‌ی بالایی دستگاه: این بخش وظیفه تحمل نیروی اعمالی از طرف جک عمودی دستگاه را دارد که به دلیل بزرگی تنش اعمالی بیشترین فشار را تحمل می‌کند. به همین سبب باید ضریب اطمینان مناسبی در انتخاب ابعاد ورق آن در نظر گرفت.

همچنین ۴ میله راهنما به وسیله اسپنرهای مخصوص روی این بخش محکم می‌شوند. از نکات مهم در طراحی این بخش در نظر گرفتن تنش لهیدگی در محل بسته شدن اسپنرهاست که باید در ضریب اطمینان لحاظ شود.

شماره ۲ - میله‌های راهنما: ۴ میله راهنما علاوه بر ایجاد فاصله مناسب بین صفحه سندان و صفحه بالایی دستگاه برای حرکت جک عمودی، در انتقال نیروی عکس العمل عمودی از جانب جک عمودی به صفحه سندان و پایه‌های دستگاه نقش مهمی دارند. همچنین به علت نقایص ساخت باید علاوه بر تنش نرمال نیروی های خمشی و برشی ناشی از عدم مرکزیت و بارهای برشی را هم در نظر داشت. پکیج تزریق سیال یا سامانه تزریق مستقیم حول یکی از میله‌های راهنما دوران می‌کند و با توجه به طراحی کمر شکن^۱ در محل مناسب روی نمونه قرار می‌گیرد.

شماره ۳ - کلاف جک‌های افقی: این بخش وظیفه ایجاد تکیه گاه برای جک‌های افقی جهت تحمل نیروی عکس العملی وارد بر نمونه را دارد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود فلانچ جک‌های افقی به یک ورق پیچ می‌شود. آن ورق به بدنه کلاف جوش داده شده است تا مانع از رها شدن بدنه جک شود. همچنین برای افزایش استحکام سطح جوشکاری شده از دو ورق بالا و پایین استفاده شده تا سطح زیر جوش افزایش یابد.

شماره ۴ - پایه دستگاه: این بخش وظیفه تحمل وزن دستگاه و حفظ تعادل آن را بر عهده دارد. برای کاهش وزن مجموعه به جای استفاده از ورق مربعی کامل از ۴ ورق C شکل استفاده شد. همچنین برای بخش پایه‌های عمودی به جای استفاده از میله تو پر، سه تکه ورق مستطیل شکل به هم جوش داده شد.

¹ Articulated

شماره ۵ - جک قائم: این بخش نقش مهمی در عملکرد نهایی پرس دارد. اعمال تنش عمودی به نمونه به وسیله این جک انجام می‌شود که باید توانایی اعمال نیرویی بیش از سایر جک‌ها داشته باشد. همچنین این بخش در حین انجام عمل تزریق سیال برای جلوگیری از کنترل خارج شدن جک تزریق بر پشت سیلندر جک تزریق نیرو اعمال می‌کند.

شماره ۶ - جک‌های افقی: این جک‌ها وظیفه اعمال نیروهای افقی را دارند. در طراحی این بخش برای اطمینان از اعمال یکنواخت فشار بر روی نمونه، از سیستم گوی و کاسه در صفحه اعمال فشار جک‌ها استفاده شد تا در صورت انحراف نمونه از حالت استاندارد (مکعب کامل) در اعمال فشار مشکل ایجاد نشود و در محل اعمال فشار تمرکز تنش به وجود نیاید. همچنین برای ایجاد تقارن در هنگام ایجاد کرنش و جلوگیری از خروج از مرکز نمونه، بجای استفاده از یک تکیه گاه ثابت و یک جک، در هر محور x و y از یک جفت جک متقابل و متقارن استفاده شد که به وسیله مدارهای هیدرولیکی به هم متصل هستند.

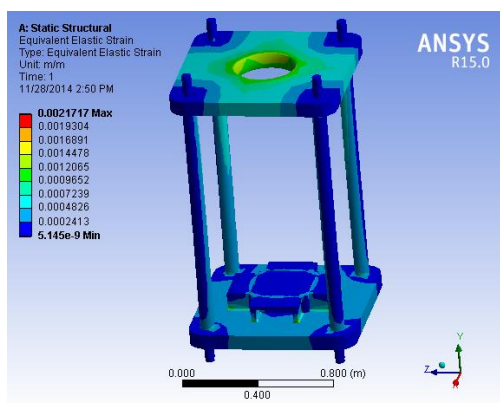
شماره ۷ - جک تزریق یا سامانه تزریق مستقیم: این بخش وظیفه تزریق سیال به درون حفره نمونه سنگ را بر عهده دارد. موقعیت جک به وسیله نیرویی که از جانب جک بالایی بر پشت سیلندر آن وارد می‌شود تثبیت می‌گردد. برای جابجایی جک تزریق، وزن سیستم تزریق به وسیله فنر قرار گرفته دور بازوی دورانی جک تزریق، خنثی می‌شود و جک حول یکی از میله‌های راهنمای پرس دوران می‌کند.

شماره ۸ - مهره سفت کننده میله راهنما: طراحی این قسمت به صورتی انجام شده که علاوه بر نیروی مقاوم در رزوه‌ها، به وسیله ۴ پیچ که روی اسپیندل بسته می‌شوند از حرکت میله راهنما جلوگیری می‌شود.

۵-۳-۷- داده‌های محاسباتی

در این قسمت داده‌های محاسباتی به دست آمده از تحلیل المان محدود ارائه می‌شوند. مدل‌سازی به وسیله نرم افزار ANSYS انجام شده است.

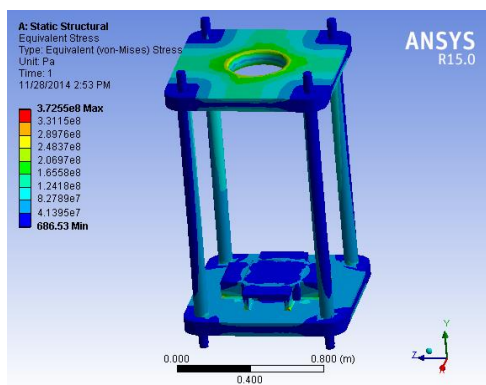
• تحلیل کرنش معادل برای صفحات بالا و پایین و میله‌های راهنما



شکل ۵-۲۶- محاسبه کرنش حداکثر برای صفحات بالا و پایین و میله‌های راهنما

همان طور که مشاهده می‌شود کرنش حداکثر، در حدود ۲ به دست آمده است که در طراحی پرس‌ها مقدار قابل قبولی است.

• تحلیل تنش معادل (فون-میزس)^۱ برای صفحات بالا و پایین و میله‌های راهنما

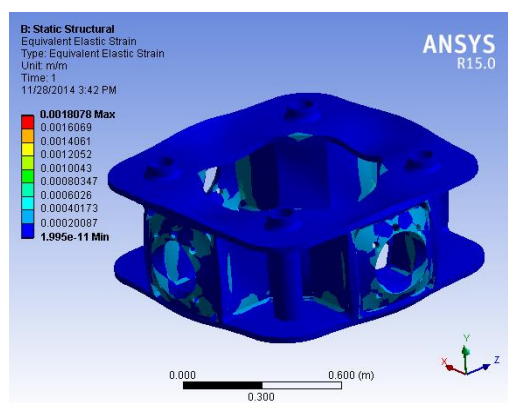


شکل ۵-۲۷- تحلیل تنش معادل برای صفحات بالا و پایین و میله‌های راهنما

^۱ Von-mises

همان طور که در شکل توپوگرافیک توزیع تنش هم مشخص است بیشتر بخش‌های نشان داده شده، تحت اثر تنش‌هایی زیر 200 aPM است که این مقدار زیر تنش تسلیم فولاد^۱ استفاده شده است به همین دلیل خرابی ایجاد نخواهد شد. در بخش‌هایی که تنش از حد تنش تسلیم بیشتر است (محدوده بسته شدن فلانچ جک در صفحه بالایی) بعد از بسته شدن فلانچ جک و پوسته جک، بخشی از بار بر روی این اجزا می‌افتد و مقدار تنش اعمالی کاهش می‌یابد.

• تحلیل کرنش معادل برای کلاف میانی

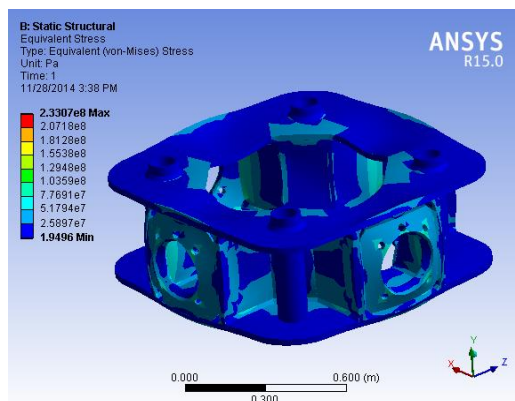


شکل ۵-۲۸- تحلیل کرنش معادل برای کلاف میانی

در این بخش نیز ماکزیمم تغییر شکل الاستیک ما در حدود ۲ به دست آمده که قابل قبول است. البته همان طور که در دیاگرام توزیع کرنش دیده می‌شود بیشتر بخش‌های کلاف میانی کرنشی زیر 1 mm دارند.

^۱ تنش تسلیم فولاد بکار رفته: در شاسی و بدنه اصلی دستگاه، 200 MPa ، در میله‌های راهنما 460 MPa و در سیلندرهای جک 300 MPa است.

• تحلیل تنش معادل (فون-میزس) برای کلاف میانی

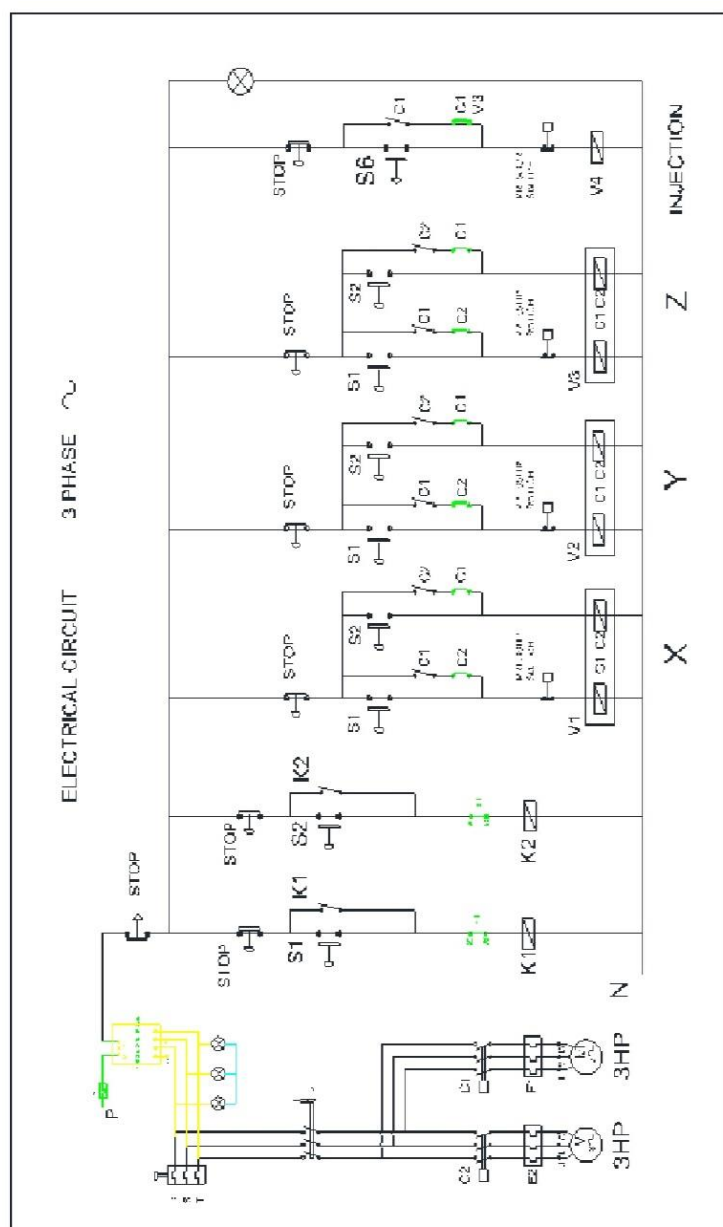


شکل ۵-۲۹- تحلیل تنش معادل برای کلاف میانی

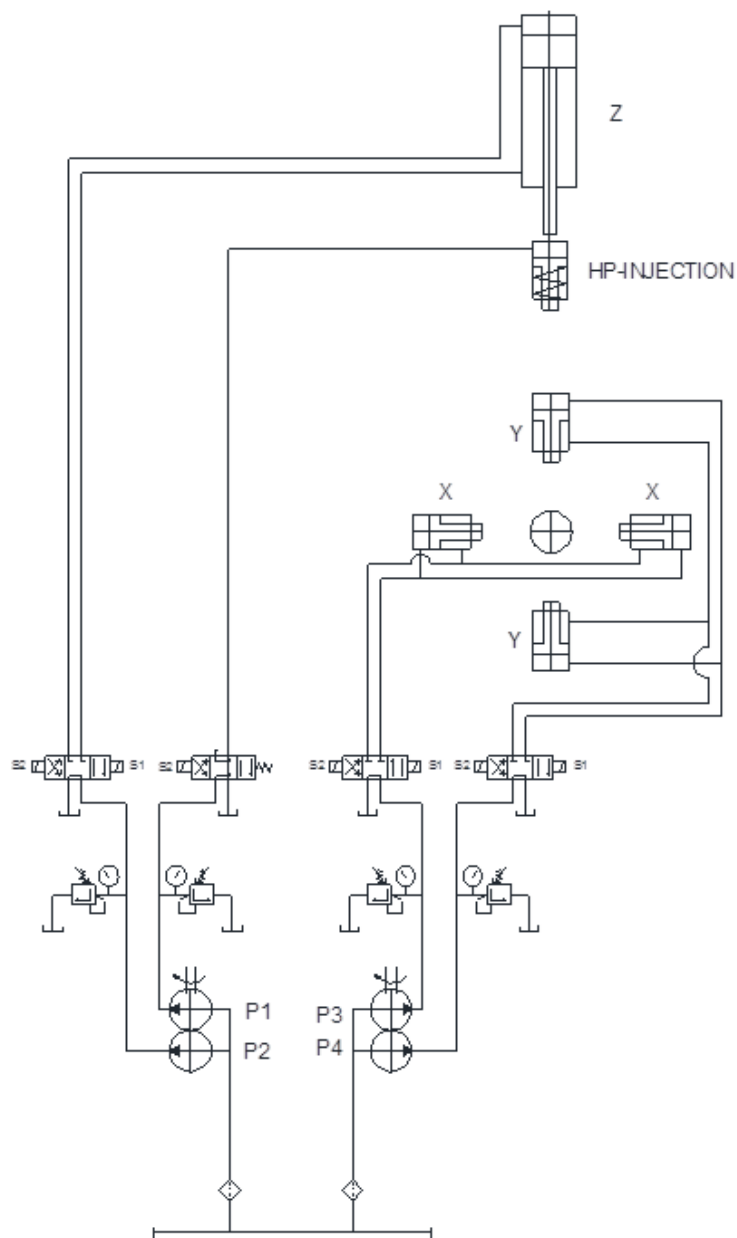
همان طور که در شکل ۵-۲۹ مشخص است بیشتر بخش‌های کلاف میانی تحت تنش‌های زیر 100 aPM قرار دارند که خرابی ایجاد نخواهند کرد.

• مدارهای الکتریکی و هیدرولیک

شمایی از نقشه مدار الکتریکی طراحی شده برای سیستم برق رسانی دستگاه در شکل ۵-۳۰ و نیز شمایی از نقشه مدار هیدرولیکی که نشان دهنده مسیر جریان روغن هیدرولیک برای تحریک جک‌های قائم، جانبی و سامانه تزریق است، در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده اند.



شکل ۵-۳۰- نقشه مدار برق



شکل ۵-۳۱- نقشه مدار هیدرولیک

فصل ششم

بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته
سیال و قطر چال بر روی فشار
شکست

۶-۱- مقدمه

همان طور که قبلا نیز توضیح داده شد، روش شکست هیدرولیکی، یکی از روش‌های پرکاربرد برای تعیین اندازه تنش‌های برجا است. در روش مذکور، عامل اساسی در تعیین اندازه تنش‌ها، ایجاد شکست در دیواره گمانه است که وقوع آن به مؤلفه‌های متعددی بستگی دارد. از آن جمله می‌توان به ویسکوزیته سیال و قطر چال (گمانه) اشاره نمود. در این فصل، ابتدا، آزمایش‌های اولیه برای تایید عملکرد دستگاه تست سه محوره واقعی که برای شبیه سازی شکست هیدرولیکی ساخته شده است، انجام می‌شوند و سپس نمونه‌هایی از جنس مرمریت (طبیعی) و بتن (مصنوعی) برای بررسی و تحلیل تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست، مورد آزمایش قرار می‌گیرند. علت اصلی بررسی دو مؤلفه‌ی فوق، به تحقیقات قبلی مربوط است. چرا که با توجه به مطالعات انجام شده که در فصل سوم نیز ارائه گردید: (۱) تحقیقات گسترده و جامعی بر روی تاثیر دو پارامتر فوق بر فشار شکست انجام نشده است. (۲) اگر پژوهشی در این زمینه انجام شده، نتایج قابل دفاعی را ارائه ننموده و حتی نتایج قبلی را نقض نموده است. دلیل اصلی دیگر در انتخاب دو مؤلفه فوق، امکانات و تجهیزات سخت افزاری و نرم افزاری موجود در آزمایشگاه بود. لازم به ذکر است، از آنجا که این آزمایش‌ها برای اولین بار و با کمک دستگاه ساخت داخل، در کشور انجام شده است، تعدادی از آن‌ها، به ویژه در مراحل اول با مشکلات عملی برخورد کردند. لیکن، جهت آگاهی و انتقال تجربه به محققان بعدی، جزئیات همه آزمایش‌ها، اعم از آزمایش‌های انجام شده با بتن نوع اول، آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ و آزمایش‌های انجام شده با بتن نوع دوم، ارائه شده‌اند. در مورد آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن نوع اول و نمونه‌های سنگی، یاد آور می‌شود که عمده آزمایش‌های بر روی این بتن‌های نوع اول، به دلیل عدم دقت کافی در ساخت نمونه (از نظر هندسی و ترکیب) و آزمایش‌های بر روی نمونه‌های سنگی، به دلیل وجود درزه‌های موئین و غیر قابل اجتناب در سنگ، با نتایج ملموس و روشن‌گر همراه نبودند. اما بتن نوع دوم، با توجه به تجربیات حاصل از آزمایش‌های دو گروه قبلی، با نتایج قابل قبولی، همراه بودند.

۲-۶- آزمایش‌های تایید عملکرد دستگاه سه محوره واقعی

همان طور که در فصل مربوط به ساخت دستگاه نیز اشاره شد، دستگاه تست سه محوره واقعی مورد استفاده در این تحقیق، برای اولین بار در ایران، طراحی و ساخته شده است و از آنجا که، تجهیزات و دستگاه‌هایی که برای نخستین بار ساخته می‌شوند نیاز به بررسی فنی اولیه و تایید عملکرد دارند، دستگاه مذکور نیز مورد آزمایش قرار گرفت. به این صورت که پس از اتمام مراحل ساخت و قبل از انتقال دستگاه به دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲ آزمایش، مطابق با آزمایش‌های مورد نظر در این تحقیق، انجام و پس از تایید عملکرد آن، نمونه‌های اصلی، مورد آزمایش قرار گرفتند. در ادامه، ابتدا ۲ آزمایش مذکور و سپس دیگر آزمایش‌های انجام شده در راستای تحقق اهداف تحقیق پیش رو، تشریح می‌گردند:

۱-۲-۶- آزمایش شماره ۱-تایید عملکرد

آماده سازی نمونه ۱

نخستین آزمایش انجام شده با استفاده از دستگاه تست سه محوره واقعی (شکل ۱-۶)، بر روی نمونه سنگ مرمریت با ابعاد $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ بود (شکل ۲-۶). در نمونه مذکور که در ظاهر فاقد هرگونه ناپیوستگی بود، حفره‌ای (سوراخ) به قطر 80 mm ، در مرکز نمونه، ایجاد و دهانه پایینی (بخش تحتانی) آن با چسب مخصوصی کاملاً آب بندی شد. پس از آب بندی سوراخ، نوبت به جانمایی نمونه در داخل دستگاه رسید. به همین منظور، از جک قائم استفاده شد. بدین صورت که، با استقرار نمونه در داخل دستگاه، جک قائم به سمت آن تحریک و نمونه در بخش مرکزی دستگاه تثبیت گردید. لازم به ذکر است که در این آزمایش از فشارهای جانبی صرف‌نظر شد.

این بدان معنی است که تثبیت نمونه در مرکز محفظه، تنها با استفاده جک قائم انجام شد و تنظیمات مکانی آن براساس صفحه فولادی جک قائم که با نمونه در ارتباط بود، انجام گردید.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

با اطمینان از استقرار دقیق نمونه در داخل محفظه، بار قائم از روی آن برداشته و با ایجاد دسترسی مجدد بر سطح فوقانی، حفره مرکزی نمونه با روغن هیدرولیک بابک ۶۸ (سیال تزریق) پر شد. سپس سامانه تزریق بین نمونه و جک قائم قرار گرفت و بار قائم از طریق جک قائم و بواسطه سامانه تزریق، بر روی نمونه اعمال گردید.

اعمال بار بر روی نمونه و انجام آزمایش شکست هیدرولیکی:

همان طور که در بخش قبل نیز اشاره شد، در این آزمایش از فشارهای جانبی صرفنظر گردید و تنها، بار قائم بر روی نمونه اعمال شد که مقدار آن، 6.6 MPa (بر روی نمونه) بود. سپس با تزریق سیال داخل سامانه تزریق به درون حفره، فشار سیال داخل حفره افزایش یافته و باعث ایجاد شکست در دیواره آن گردید. عددی که فشار سنج، در لحظه شکست نشان داد، 30 MPa بود. به عبارت دیگر فشار در لحظه وقوع شکست در دیواره، 30 MPa بود.



شکل ۶-۱- تصویری از دستگاه سه محوره واقعی



شکل ۶-۲- تصویر از سنگ مرمریت مورد آزمایش

۶-۲-۲- آزمایش شماره ۲- تایید عملکرد

آماده سازی نمونه ۲

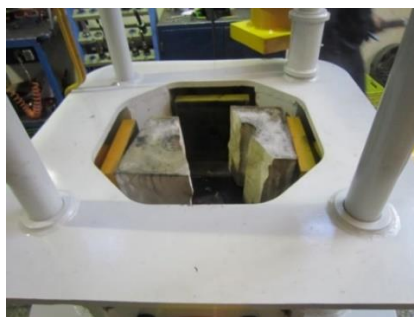
برای آماده سازی نمونه ۲ (شکل ۶-۳) که از نظر جنس و ابعاد، مشابه نمونه قبلی و از نظر قطر سوراخ مرکزی (۷cm) با آن متفاوت بود همان مراحل آزمایش اول طی شد. البته در این آزمایش، به منظور تثبیت و جانمایی نمونه در مرکز محفظه، تنش‌های جانبی نیز بر روی نمونه اعمال گردیدند. بدین صورت که ابتدا به منظور جلوگیری از حرکت نمونه به اطراف، تنش قائم و سپس تنش‌های جانبی، بر نمونه اعمال شدند. ذکر این نکته نیز لازم است که در مرحله آماده سازی، هدف از اعمال بار، تنها، مستقر نمودن نمونه در مرکز است و مقدار تنش اعمال شده بر روی سطوح، بسیار ناچیز هستند. پس از اعمال تنش‌های جانبی، جک قائم به سمت بالا حرکت داده شد و با ایجاد دسترسی مجدد بر روی سطح فوقانی نمونه، سوراخ مرکزی با روغن هیدرولیک بابک ۶۸ (سیال تزریق) پر شد. سپس، با تنظیم موقعیت سامانه تزریق در بالای نمونه، جک قائم به سمت نمونه حرکت داده شد. با برخورد جک قائم به سامانه تزریق، سامانه مذکور نیز به سمت نمونه حرکت نمود و به محض استقرار آن در بالای نمونه، حرکت جک قائم متوقف شد.

اعمال بار بر روی نمونه و انجام آزمایش شکست هیدرولیکی

پس از اتمام مرحله آماده سازی، نوبت به انجام آزمایش شکست هیدرولیکی می‌رسد. به همین منظور ابتدا تنش‌های قائم و جانبی به ترتیب، به میزان $4/5 \text{ MPa}$ ، $2/26 \text{ MPa}$ و $1/13 \text{ MPa}$ بر روی نمونه اعمال می‌شوند. سپس، سیلندر داخل سامانه تزریق با سیال تزریق پر شده و عملیات تزریق آن به داخل سوراخ آغاز می‌گردد. این عملیات تا لحظه وقوع شکست در دیواره حفره ادامه می‌یابد و به محض ایجاد شکستگی، فشار افت می‌نماید. در این آزمایش، شکستگی در فشار 35 MPa به وقوع پیوست. همچنین، با توجه به راستای اعمال تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، راستای شکستگی القا شده تقریباً عمود بر تنش افقی حداقل بود (تنش افقی حداقل در راستای محور X و تنش افقی حداکثر در راستای محور Y بر نمونه اعمال شدند) (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۳- سنگ مرمریت مورد آزمایش



شکل ۴-۴- نمونه شکسته شده در نتیجه تزریق روغن

با اتمام مرحله تایید عملکرد دستگاه و انتقال آن به دانشگاه صنعتی شاهرود، آزمایش‌ها وارد فاز جدیدی می‌شوند. به همین منظور، در ادامه، ابتدا توضیحاتی در مورد چگونگی ثبت اطلاعات و روند

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

آزمایش‌ها و سپس آزمایش‌ها تشریح خواهند شد. لازم به ذکر است که آزمایش‌هایی که از این به بعد با استفاده از دستگاه تست سه محوره واقعی انجام خواهند شد، در راستای اهداف تحقیق و در چارچوب برنامه ریزی خاص هستند.

۳-۶- بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

آزمایش‌هایی که در ادامه تشریح می‌شوند، با هدف بررسی تاثیر دو مؤلفه، ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست، انجام شدند. ولی قبل از توضیح آن‌ها، ابتدا، توضیحاتی در مورد سیال‌ها و نمونه‌های انتخابی و نحوه ثبت اطلاعات بدست آمده از آزمایش‌ها ارائه می‌گردد.

۱-۳-۶- روند آزمایش

آزمایش‌ها، با توجه به اهداف تعیین شده یعنی بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال و قطر گمانه بر روی فشار شکست، به دو بخش تقسیم شدند. در یک بخش، تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست و در بخش دیگر، تاثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست، بررسی شدند. لازم به ذکر است که در هر بخش، حداقل ۳ نمونه، مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین، به منظور بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست، چهار نوع سیال؛ نفت سفید، روغن هیدرولیک ۴۶H، روغن هیدرولیک ۶۸H و روغن هیدرولیک ۱۰۰H و به منظور تاثیر قطر گمانه بر روی فشار شکست، سوراخ‌های با قطرهای متفاوت، در نمونه ایجاد و مورد آزمایش قرار گرفتند.

۲-۳-۶- ثبت اطلاعات

دستگاه تست سه محوره واقعی مورد استفاده در این آزمایش‌ها، دارای ۴ خروجی مربوط به فشار در راستای محور X ، فشار در راستای محور Y ، فشار در راستای محور Z و فشار سیال تزریقی برای ثبت تغییرات فشار بوده، که خروجی‌های مذکور بر روی مخزن هیدرولیک جانمایی شده‌اند.

از طرف دیگر برای ثبت اطلاعات، از یک دستگاه دیتا لاگر^۱ ۱۶ کاناله استفاده شد که کانال‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ آن به ترتیب برای ثبت اطلاعات فشار در راستای X ، Y ، Z و فشار سیال تزریقی اختصاص یافته بودند. ۴ کانال مذکور بوسیله ۴ کابل دارای فرستنده^۲ فشار، به ۴ خروجی‌ای که بر روی مخزن روغن هیدرولیک تعبیه شده بودند، متصل گردیدند. لازم به ذکر است که تمامی اطلاعات بدست آمده از ۴ فرستنده فشار، که بوسیله ۴ کابل به دیتالاگر منتقل شده‌اند، از طریق یک کابل که از یک طرف به دیتالاگر و از طرف دیگر به کامپیوتر متصل است، به یک نرم افزار ثبت اطلاعات (نرم افزار آرتمیس) منتقل و بر روی نمودارهای فشار-زمان نمایش داده می‌شوند.

۳-۳-۶- کالیبره کردن نرم افزار آرتمیس

همان طور که در بخش قبل اشاره شد، کلیه اطلاعات مورد نیاز برای تحلیل فشار شکست، بر روی یک کامپیوتر ثبت می‌گردد و تحقق این امر، وابسته به استفاده از نرم افزارهای ثبت کننده اطلاعات است. به همین منظور از نرم افزار آرتمیس استفاده شد. نرم افزار مذکور همراه با دستگاه دیتالاگر از یک شرکت ارائه دهنده خدمات سخت افزاری و نرم افزاری خریداری شد ولی به منظور استفاده از نرم افزار مذکور ابتدا باید عملیات کالیبراسیون نرم افزار انجام می‌گرفت. به همین منظور، با کمک فشارسنج‌های بکار رفته بر روی دستگاه تست سه محوره واقعی، عملیات کالیبراسیون انجام شد. به این صورت که، زمانی که اولین نمونه، پس از آماده سازی، در داخل دستگاه قرار گرفت، قبل از شروع آزمایش، فشارهای قائم و جانبی بر روی نمونه‌ها اعمال گردید و متناسب با هریک از آن‌ها، خروجی آن نیز بر روی نرم افزار تعریف شد. به عنوان مثال اگر فشار در راستای محور Z بر روی نمونه اعمال گردید، در داخل نرم افزار نیز فشار Z تعریف شد که نمایانگر افزایش یا کاهش فشار بر روی نمونه بود. سپس فشار در راستای محور Z بر روی نمونه افزایش یافت و به صورت تصادفی در دو نقطه تثبیت شد. دو

^۱ Data Logger

^۲ Trans meter

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

عدد خوانده شده از روی فشارسنج‌های دستگاه تست سه محوره واقعی، در داخل نرم افزار وارد و عملیات کالیبراسیون نرم افزار انجام شد. لازم به ذکر است که برای تمامی فشارهای خارجی اعمال شده بر روی نمونه، عملیات کالیبراسیون، مشابه آنچه که در بالا تشریح گردید، انجام شد. ولی با توجه به آنکه افزایش فشار سیال تزریقی، تنها در زمان انجام آزمایش میسر بود، به همین علت کالیبراسیون مربوط به خروجی فشار سیال تزریق، همزمان با انجام آزمایش انجام شد.

۶-۳-۴ - تشریح آزمایش

آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی

نمونه‌های استفاده شده در این مرحله از آزمایش‌ها، از جنس بتن بودند که مقادیر وزنی مواد تشکیل دهنده هر متر مکعب از آن‌ها عبارت بودند از؛ ۳۵۰ kg سیمان، ۸۰۰ kg ماسه، ۱۰۰۰ kg شن و ۱۸۰ L آب. به عبارت دیگر، برای ساخت هر نمونه؛ ۸ بیل ماسه، ۱۰ بیل شن، ۱۰ kg سیمان و حدود ۵ Lit آب مورد استفاده قرار گرفته است^۱.

لازم به ذکر است که ترکیب مذکور برای تمامی نمونه‌ها یکسان بوده و هر یک از نمونه‌های بتنی ساخته شده، برای رسیدن به حداکثر مقاومت خود، به مدت ۲۸ روز در داخل آب نگهداری شدند و با توجه به تاریخ ساخت، مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین، تمامی آزمایش‌ها، با هدف بررسی تاثیر تغییرات دو مؤلفه ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست انجام شدند که در ادامه، شرح آزمایش‌ها، ارائه شده است.

در مورد نحوه حمل و جابجایی نمونه‌های مورد آزمایش نیز باید به این نکته اشاره شود که حمل و نقل نمونه‌ها به کمک یک جرثقیل (شکل‌های ۵-۶ و ۶-۶) انجام شده است.

^۱ طرح اختلاط مورد نظر، با استناد بر نشریه شماره ۵۵ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، با عنوان "مشخصات فنی و عمومی کارهای ساختمانی" و مشورت با اساتید و مهندسين عمران، تهیه شد است.



شکل ۶-۵- جرثقیل بکارگرفته شده برای حمل و نقل نمونه ها



شکل ۶-۶- انتقال نمونه بتنی به داخل محفظه

• بررسی تاثیر ویسکوزیته^۱ سیال بر روی فشار شکست

از آنجا که امکان اندازه گیری ویسکوزیته سیال در آزمایشگاه وجود نداشت، دبی تخلیه آن‌ها از درون پیپت، ملاک قرار گرفت. به همین منظور، برای بررسی اختلاف ویسکوزیته سیال‌های مورد استفاده، ۹mLit از هر یک از سیال‌های نفت سفید، روغن هیدرولیک ۴۶H، روغن هیدرولیک ۶۸H و روغن هیدرولیک ۱۰۰H، درون پیپت ریخته و مدت زمان تخلیه آن‌ها اندازه گیری شد. واضح است که سیالی که ویسکوزیته بیشتری دارد، دیرتر تخلیه می‌شود. سپس دبی آن‌ها بر حسب سی سی بر ثانیه محاسبه گردید که در جدول ۶-۱ قابل مشاهده است. به این ترتیب ویسکوزیته نسبی آن‌ها بدست آمد.

^۱ در آزمایش‌هایی که برای بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال انجام شد تمامی نمونه‌ها دارای شرایط مشابه بودند و بجز نوع سیال تزریقی، بقیه مؤلفه‌ها مثل قطر گمانه، ثابت بودند.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

جدول ۶-۱- محاسبه دبی سیال‌های استفاده شده در آزمایش‌ها

نوع سیال	مدت زمان تخلیه (s)	دبی (s/cc) (s/cc)
نفت سفید	۳٫۵	۲٫۵۷
روغن هیدرولیک ۴۶H	۲۶٫۸	۰٫۳۳
روغن هیدرولیک ۶۸H	۴۶٫۷	۰٫۱۹
روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۵۲٫۷۵	۰٫۱۷

همان طور که در جدول بالا نیز مشخص است، نفت سفید، بیشترین و روغن هیدرولیک ۱۰۰H، کمترین دبی را دارند. این بدان معنی است که ویسکوزیته نفت از همه کمتر و ویسکوزیته روغن هیدرولیک ۱۰۰H از همه بیشتر است.

پس از بررسی ویسکوزیته سیال‌ها نوبت به انجام آزمایش‌ها می‌رسد. در تمامی آزمایش‌های انجام شده، روندی مشابه دنبال شد. یعنی ابتدا نمونه‌ها آماده سازی گردیده و سپس اعمال بار بر روی آن‌ها انجام و آزمایش شکست هیدرولیکی با هدف ایجاد شکست در نمونه آغاز گردید. لازم به ذکر است که مراحل انجام آزمایش در تصاویر زیر قابل مشاهده است. ضمناً نتایج بدست آمده در این آزمایش‌ها، هم در نمودارهای فشار-زمان و هم در جدول ۶-۲ ارائه شده‌اند.



شکل ۶-۷- آب بندی انتهای گمانه بوسیله چسب سنگ

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۸- استقرار نمونه در داخل دستگاه



شکل ۶-۹- پر کردن گمانه با سیال



شکل ۶-۱۰- ریختن روغن به داخل سوراخ



شکل ۶-۱۱- مجرای مربوط به تزریق سیال به داخل سامانه تزریق

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

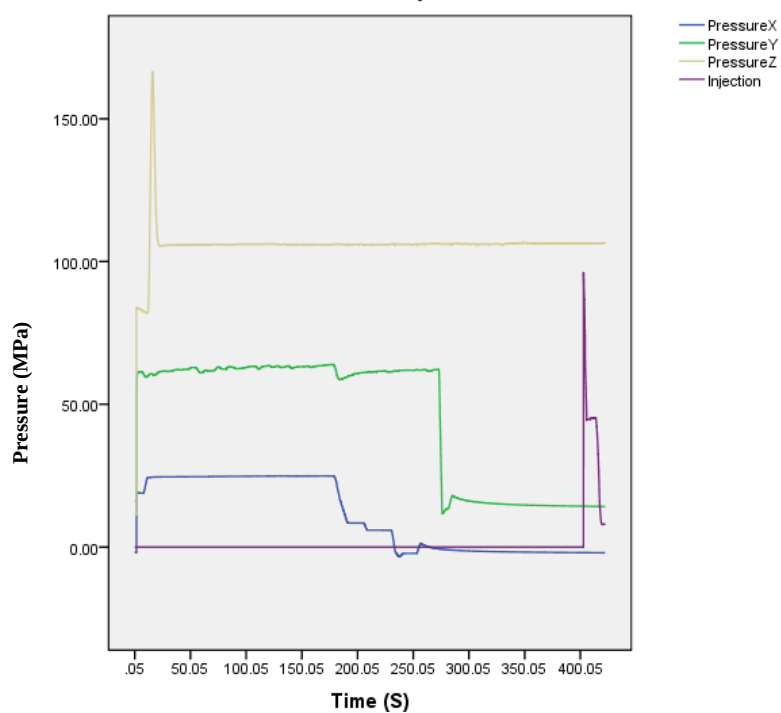


شکل ۶-۱۲- شکستگی ایجاد شده در نمونه



شکل ۶-۱۳- ترک ایجاد شده در نمونه بتنی

Conc.1-Viscosity test-Petroleum



شکل ۶-۱۴- نمودار فشار - زمان نمونه اول با سیال نفت

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

با توجه به شکل ۶-۱۴، نوساناتی در روند تغییرات فشارهای قائم و جانبی قابل رویت است. که به علت ایجاد تغییر در میزان فشار بر روی نمونه، بوسیله پیچ دستی (به منظور افزایش و یا کاهش فشار، بر روی هر یک از فشار سنج ها، پیچ دستی طراحی شده است) (شکل ۶-۱۵) قابل توجیه است.

نکته مهم دیگری که در نمودار شکل ۶-۱۴ قابل مشاهده است مربوط به فشار در راستای Y است. که با توجه به مشاهده مقاومت بالای بتن در زمان اعمال فشارهای همه جانبه، از اعمال فشارهای جانبی صرفنظر گردید. لازم به ذکر است که با توجه به شکل ۶-۱۴، فشار در راستای Y مقداری بیش از صفر را نشان می دهد که علت این امر، اختلال ایجاد شده در فشار سنج مربوطه بوده است.



شکل ۶-۱۵- پیچ دستی نصب شده بر روی فشار سنج برای افزایش یا کاهش فشار

یادآور می شود که در برخی از آزمایش ها، سطح ناهموار و غیر مسطح نمونه، باعث ایجاد ترک های کششی در سطح بالایی نمونه می گردید (شکل ۶-۱۶). در نتیجه، آزمایش به دلیل نقص در نمونه، با موفقیت همراه نبود.



شکل ۶-۱۶- ترک‌ها و شکستگی‌های کششی ایجاد شده در نمونه ۲ به علت سطح ناصاف آن

همچنین، در برخی از آزمایش‌ها، فشار شکست ثبت شده بسیار بالا بوده است. این احتمال وجود دارد که این فشار بالا به آن دلیل بوده باشد که شکست هیدرولیکی در فشاری کمتر از فشار ثبت شده، رخ داده و سیال تزریق، از طریق آن شکستگی، به طور کامل نشت کرده و پیستون درون سیلندر در داخل سامانه تزریق به انتهای کورس خود رسیده و به سطح پایینی سیلندر برخورد کرده است. می‌توان گفت که علت این امر نیز می‌تواند خطای انسانی باشد. زیرا، از آنجا که روند افزایش فشار از طریق فشار سنج نصب شده بر روی دستگاه پیگیری می‌شد، تشخیص افت فشار در لحظه وقوع شکست توسط ناظر میسر نشده است. از طرف دیگر با توجه به آن که فشارهای جانبی نیز بر روی نمونه اعمال می‌شدند، به محض وقوع شکست، این فشارها باعث بسته شدن ترک ایجاد شده گردیدند و همین امر باعث شد تا علائم ایجاد شکست بر روی نمونه قابل مشاهده نباشد.

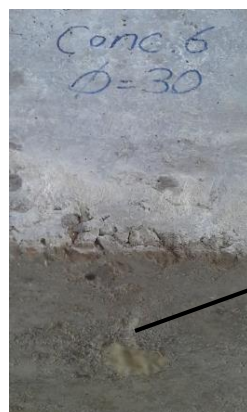
• بررسی تاثیر قطر چال^۱ بر روی فشار شکست

یکی از مؤلفه‌های انتخاب شده برای ارزیابی، قطر چال بود. بدین معنی که با افزایش یا کاهش قطر چال، تاثیر آن بر روی فشار شکست مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور، نمونه‌های بتنی با همان ترکیب اولیه که قبلاً ذکر شد با گمانه با قطرهای مختلف ۳۰ mm، ۵۰ mm و ۸۰ mm، آماده‌سازی

^۱ در آزمایش‌هایی که به منظور بررسی تاثیر قطر چال بر روی فشار شکست انجام گرفت، تمامی مؤلفه‌ها بجز قطر چال، ثابت بودند.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

(مرحله آماده سازی این نمونه نیز همچون نمونه های قبلی بود) شد و مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۶-۱۷ و ۶-۱۸).



انتهای گمانه که
با چسب سنگ
آب بندی گردید.

شکل ۶-۱۷- آماده سازی نمونه



شکل ۶-۱۸- استقرار نمونه در داخل دستگاه

پس از آن که نمونه در داخل دستگاه جانمایی گردید (شکل ۶-۱۹)، برای تنظیم دقیق محل استقرار آن، سامانه تزریق بر روی نمونه مستقر شد. همان طور که قبلا نیز توضیح داده شد، شاخص اصلی استقرار دقیق نمونه، نازل سیال است و از آن جایی که نازل سیال در داخل گمانه قرار می گیرد، پس از استقرار نمونه در داخل دستگاه، سامانه تزریق آن قدر جابجا می شود تا نازل سیال دقیقا در بالای گمانه قرار بگیرد. با قرارگیری نازل در بالای گمانه، عملا نمونه در محل مناسب خود قرار گرفته است.



شکل ۶-۱۹- خط کشی سطح بالایی نمونه شماره ۶ و مشخص کردن محدوده گمانه برای تنظیم موقعیت نازل

پس از فراهم کردن مقدمات آزمایش و پر کردن گمانه از روغن هیدرولیک (سیال تزریق)، بار قائم از طریق جک قائم و بواسطه سامانه تزریق بر روی نمونه اعمال گردید و افزایش یافت. لازم به ذکر است که در برخی از آزمایش‌های انجام شده در این مرحله، از فشارهای جانبی صرف‌نظر شد. سپس با تثبیت بار قائم، فشار سیال در داخل گمانه با هدف ایجاد شکست در دیواره آن، افزایش یافت.

در این مرحله (بررسی تاثیر قطر چال بر روی فشار شکست)، یک نمونه مورد آزمایش قرار گرفت و مشخص شد که، نمونه قبل از تزریق سیال و به علت سطح ناصاف، در زمان اعمال بار قائم شکسته شده بود و تمامی روغن هیدرولیک به بیرون نشت کرده بود (شکل ۶-۲۰). به همین دلیل نتایج ثبت شده حاصل از این آزمایش، قابل قبول نبودند.



شکل ۶-۲۰- شکستگی ایجاد شده در نمونه شماره ۶ به علت سطح ناصاف آن

آزمایش بر روی نمونه‌های طبیعی از جنس مرمیت

• آماده سازی و حفر گمانه

پس از انجام چندین آزمایش بر روی نمونه‌های مصنوعی، که شرح آن‌ها قبلاً ارائه گردید و بررسی نتایج و یافته‌های حاصل از آن‌ها، مشخص شد که متأسفانه برخی نمونه‌های بتنی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای دو نقطه ضعف زیر بودند:

۱. کیفیت نامطلوب بتن (از نظر دانه بندی و مقاومت در برابر فشار) که با اعمال بار قائم و جانبی باعث ایجاد ترک در نمونه‌ها می‌گردید.

۲. موازی و مسطح نبودن سطوح نمونه که در نتیجه‌ی اعمال بار بر روی آن، باعث تمرکز تنش و ایجاد ترک می‌گردید.

به همین علت، نمونه‌های طبیعی از جنس مرمیت جایگزین نمونه‌های بتنی شدند و در ادامه، آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های طبیعی که از کیفیت مطلوبی برخوردار بودند انجام شد. لازم به ذکر است که نمونه‌های مرمیتی تهیه شده، فاقد گمانه بوده که برای حفر آن، از دستگاه مغزه‌گیر استفاده شد.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

تصاویر ۶-۲۱ و ۶-۲۲ که در ادامه مشاهده می‌شود، حفر گمانه با قطر ۶۳ mm^۱ را در نمونه‌ی از جنس مرمیت، نشان می‌دهند.



شکل ۶-۲۱- دستگاه حفار و نمونه مرمیتی



شکل ۶-۲۲- گمانه حفر شده در نمونه

با حفر چال مرکزی در این نمونه‌ها، دو مؤلفه قطر چال و ویسکوزیته سیال مورد ارزیابی قرار گرفت.

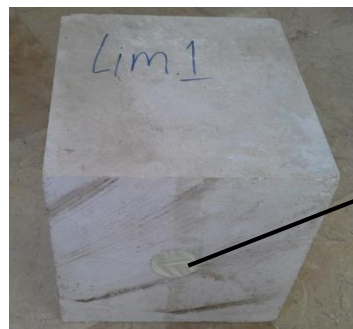
• بررسی تاثیر قطر چال و تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست

این مرحله از آزمایش‌ها نیز با آماده‌سازی نمونه‌ها آغاز می‌گردد که روندی مشابه آزمایش‌های

قبل دارد. ابتدا دهانه پایینی گمانه به کمک چسب سنگ آب بندی شد (شکل ۶-۲۳).

^۱ قطر مغزه ایجاد شده ۵۴mm و قطر گمانه ایجاد شده ۶۳mm بود.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۲۳- آب بندی دهانه پایینی نمونه اول بوسیله چسب سنگ

سپس نمونه به کمک جرثقیل، در مرکز محفظه، در داخل دستگاه تست سه محوره واقعی

قرار گرفت (شکل‌های ۶-۲۴ و ۶-۲۵).



شکل ۶-۲۴- جابجایی نمونه شماره ۴



شکل ۶-۲۵- قرار گیری نمونه شماره ۱ در داخل دستگاه

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

پس از جانمایی نمونه در داخل دستگاه، برای اطمینان از استقرار آن در محل مناسب، سامانه تزریق بر روی سنگ مستقر گردید. سامانه مذکور بایستی دقیقاً بر روی نمونه قرار بگیرد. یعنی تمام سطح آن را بپوشاند و نازل تزریق نیز دقیقاً در بالای گمانه مستقر گردد. به همین علت شاخص مناسبی برای تعیین موقعیت نمونه است. بعد از این مرحله، سامانه تزریق از روی نمونه کنار رفته و نوبت به تزریق سیال به داخل گمانه رسید (شکل ۶-۲۶).

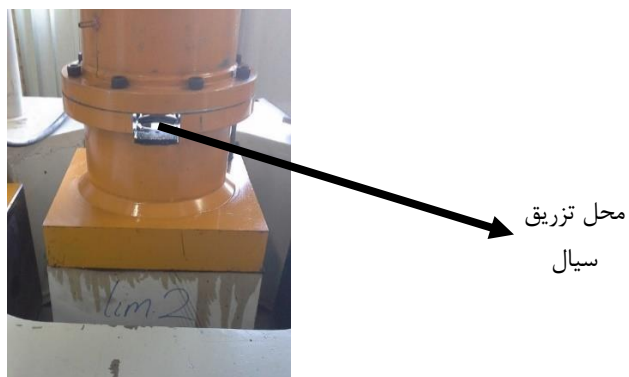


شکل ۶-۲۶- پر کردن گمانه با روغن هیدرولیک

در پایان نیز، مجدداً سامانه تزریق با دقت، بر روی سنگ قرار گرفت. پس از آماده سازی نمونه، بار قائم از طریق جک قائم و سامانه تزریق، با هدف: ۱. آب بندی گمانه و ۲. اعمال تنش قائم، بر روی نمونه اعمال و با استفاده از پیچ تنظیم فشار (که بر روی مخزن روغن جانمایی شده است)، تثبیت شد. لازم به ذکر است که در برخی آزمایش‌های انجام شده در این مرحله، از اعمال بارهای جانبی صرف‌نظر شده و فقط بار قائم بر روی نمونه اعمال شد است. پس از تثبیت فشار قائم بر روی نمونه، مقداری سیال، مشابه سیالی که در گمانه تزریق شده بود، در داخل سامانه ریخته (شکل ۶-۲۷) و تزریق آن به داخل گمانه انجام می‌شود. تزریق سیال، باعث افزایش فشار در داخل گمانه و در نتیجه وقوع شکست در دیواره آن می‌گردد (شکل‌های ۶-۲۸ و ۶-۲۹).

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

فشار شکست، هم از طریق فشار سنج نصب شده بر روی مخزن هیدرولیک و هم از طریق اطلاعات ثبت شده بر روی کامپیوتر، قابل تشخیص است.



شکل ۶-۲۷- اعمال فشار قائم بواسطه سامانه تزریق و پر کردن آن با سیال تزریقی



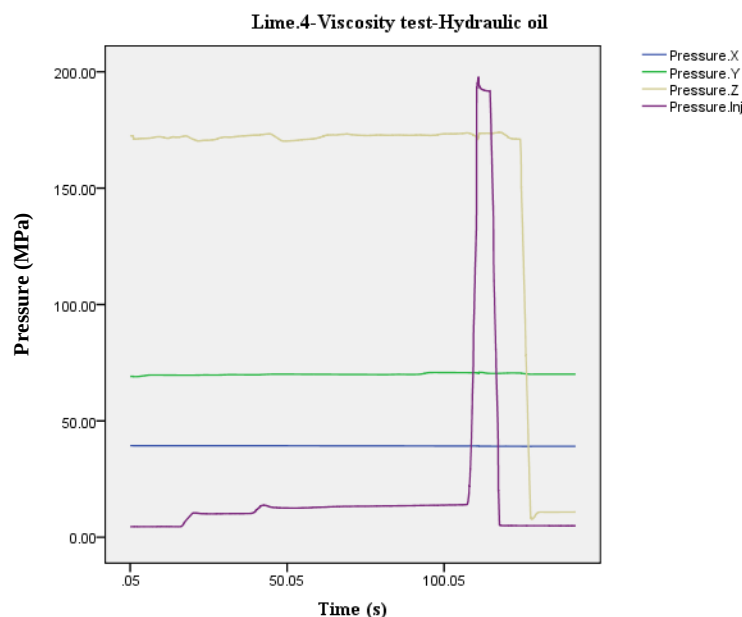
شکل ۶-۲۸- شکستگی ایجاد شده بر روی نمونه



شکل ۶-۲۹- نمونه شکسته شده در اثر تزریق سیال

در ادامه نیز نمودار تغییرات فشار-زمان در شکل ۶-۳۰ و نتایج بدست آمده، در جدول شماره ۶-۲ ارائه شده‌اند.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۳۰- نمودار فشار - زمان نمونه شماره ۴- سیال روغن هیدرولیک ۴۶H

پس از وقوع شکست، به ترتیب، تزریق سیال به داخل گمانه و اعمال فشارهای قائم و جانبی بر روی نمونه، متوقف می شوند. سپس، با کنار رفتن سامانه تزریق و ایجاد دسترسی بر روی نمونه، راستای شکستگی ایجاد شده، مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که در برخی از آزمایش‌ها، راستای شکستگی عمود بر تنش افقی حداقل (شکل ۶-۳۱) و در برخی دیگر بصورت مورب گسترش یافتند (شکل ۶-۲۸).

گسترش مورب و غیر متعارف^۱ شکستگی‌ها می تواند به علت وجود درزه در نمونه باشد. البته بررسی دقیق تر این پدیده مستلزم انجام آزمایش‌های بعدی بر روی نمونه‌های مشابه است.

^۱ با توجه به تنش‌های جانبی اعمال شده بر روی نمونه، پیش بینی می‌شود که راستای شکستگی عمود بر تنش افقی حداقل باشد.



شکل ۶-۳۱- شکستگی ایجاد شده در نمونه شماره ۸

پس از اتمام آزمایش بر روی نمونه مرمریتی شماره ۸، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی این دسته از نمونه‌ها (نمونه‌های طبیعی) و نمونه‌های بتنی اولیه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و مشخص شد که شکل غیر دقیق بتن و ناهمگنی آن باعث شد که به سمت استفاده از نمونه‌های طبیعی برویم. ولی ناپیوستگی‌های موئین سنگ نیز در نتایج آزمایش‌ها تاثیرگذار بود. به همین دلیل مجدداً تصمیم به استفاده از نمونه‌های بتنی، با هندسه‌ای دقیق‌تر و ترکیبی مناسب‌تر، گرفته شد. همان طور که اشاره شد، کیفیت و ترکیب نمونه‌هایی که در ادامه مورد استفاده قرار می‌گیرند، با کیفیت و ترکیب نمونه‌های بتنی که قبلاً ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند متفاوت است. در نمونه‌های جدید، سعی شده است تا با صرف وقت و دقت بیشتر در روند ساخت بتن، نمونه‌هایی همگن، مکعبی و با سطوح صاف ساخته شود زیرا تجربه نشان داد که خطای هندسی ساخت نمونه بایستی در حداقل مقدار خود باشد. از نظر ترکیب مواد اولیه نیز، در نمونه‌های جدید، نسبت ماسه^۱ به سیمان و آهک به ترتیب ۳ به ۱ و ۳ به ۰/۲۵ است و مقدار آب اضافه شده به ترکیب، ۰/۲۳ واحد نسبت به ماسه است. ذکر این نکته نیز لازم است که هریک از نمونه‌های جدید، همچون نمونه‌های قبل، پس از ۲۸

^۱ منحنی دانه بندی ماسه استفاده شده در ترکیب، پیوست است.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

روز و با رسیدن به مقاومت 18MPa ، استفاده می‌شوند. با توجه به مصالح استفاده شده در ترکیب، جرم مخصوص نمونه‌ها نیز بطور متوسط 1670Kg/m^3 بوده است.

نکته مهم دیگر آن است که در این مرحله، آزمایش‌ها، همزمان با دو هدف انجام شدند. یعنی نحوه انجام آزمایش‌ها طوری برنامه ریزی شد تا نتایج بدست آمده از آن‌ها، هم برای تحلیل تاثیر قطر گمانه بر فشار شکست و هم برای تحلیل تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست قابل استناد باشند. به همین دلیل، در بخش تشریح آزمایش‌ها که در ادامه ارائه می‌گردد، هر دو هدف بالا، همزمان دنبال می‌شود. بایستی به این نکته نیز اشاره کرد که در تجزیه و تحلیل نهایی نیز نتایج بدست آمده در این مرحله ملاک عمل قرار گرفت و نتایج بدست آمده در مراحل قبلی، به علت نتایج دور از انتظار که دلایل آن هم قبلاً تشریح گردید، کنار گذاشته شدند.

از آنجا که مراحل و روند انجام آزمایش‌ها در این بخش مشابه آزمایش‌های قبل بوده است، تنها تصاویر مربوط به آن ارائه و نتایج بدست آمده در جدول ارائه می‌شود.



شکل ۶-۳۲- جانمایی نمونه در مرکز محفظه



شکل ۶-۳۳- جانمایی نمونه در مرکز محفظه با استفاده از جک‌های قائم و جانبی



شکل ۶-۳۴- تثبیت نمونه به کمک جک‌های جانبی

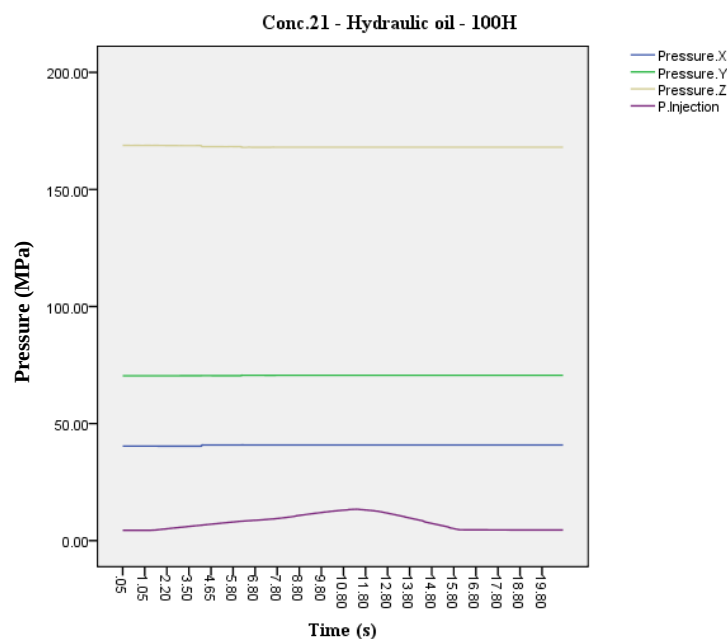


شکل ۶-۳۵- پر کردن گمانه با روغن هیدرولیک ۴۶H



شکل ۶-۳۶- راستای شکستگی ایجاد شده در نمونه بتنی

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۳۷- نمودار فشار - زمان نمونه Conc.21- سیال روغن هیدرولیک ۱۰۰H

۶-۳-۵- نتایج آزمایش‌ها

با توجه به اهداف تعیین شده در این تحقیق، تعداد ۳۸ آزمایش بر روی نمونه‌های طبیعی (مرمریت) و مصنوعی (بتن) انجام شد که از این تعداد، ۹ آزمایش بر روی مرمريت و ۲۹ آزمایش بر روی بتن (بتن مرحله اول و بتن مرحله دوم) انجام شد. در ادامه، نتایج بدست آمده در هر آزمایش به همراه شرایط هر یک از آنها (مانند مقدار تنش‌های اعمال شده، ویسکوزیته سیال و قطر چال مرکزی)، در جدول ۶-۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۶-۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده برای بررسی تاثیر ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست

ردیف	جنس نمونه	نام نمونه	قطر سوراخ (mm)	تنش در راستای محور X-بر روی نمونه (MPa)		تنش در راستای محور Y-بر روی نمونه (MPa)	تنش در راستای محور Z-بر روی نمونه (MPa)	نوع سیال	هدف	فشار شکست (بر روی نمونه) (MPa)
۱		Conc.1	۵۰	۰		۰	۸,۱۸	نفت	تست ویسکوزیته	۹۶,۱۹
۲		Conc.2	۵۰	---	---	---	---	نفت	تست ویسکوزیته	ناموفق

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

۲۰۶,۴۲	تست ویسکوزیته	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۰,۵۶	۲,۰۹	۰,۷۶	۵۰	Conc.3	بتن	۳
۷	تست ویسکوزیته	روغن هیدرولیک ۴۶H	۸,۱۸	۰	۰	۵۰	Conc.4		۴
ناموفق	تست ویسکوزیته	روغن هیدرولیک ۴۶H	۵,۱۱	۰	۰	۵۰	Conc.5		۵
ناموفق	تست قطر گمانه	روغن هیدرولیک ۴۶H	۵,۵	۰	۰	۳۰	Conc.6		۶
۱۴,۳۸	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc. 7		۷
۱۰,۰۵	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.8		۸
۱۱,۶۲	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.9		۹
۱۴,۴۵	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.10		۱۰
۱۷,۵۱	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.11		۱۱
۱۷,۳۰	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.12		۱۲
۱۴,۱۴	تست قطر گمانه و	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.13		۱۳

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

	ویسکوزیته سیال								
۱۴,۲۹	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.14		۱۴
۱۳,۳۴	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.15		۱۵
۱۳,۶۸	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.16		۱۶
۱۲,۲۴	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.17		۱۷
۱۷,۱۳	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.18		۱۸
۱۲,۷۴	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.19		۱۹
۱۲,۵۸	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.20		۲۰
۱۳,۴۳	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.21		۲۱
۱۱,۹۴	تست قطر گمانه و	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.22		۲۲

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

	ویسکوزیته سیال								
۱۲,۶	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۵۰	Conc.23		۲۳
۱۴,۳۲	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.24		۲۴
۱۳,۲	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.25		۲۵
۱۳,۶۵	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.26		۲۶
۱۵,۶۵	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۱۰۰H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۳۰	Conc.27		۲۷
۱۴,۵۲	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.28		۲۸
۱۱,۵۹	تست قطر گمانه و ویسکوزیته سیال	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۲,۱۴	۲,۵	۱,۴	۸۰	Conc.29		۲۹
۳۰	تست قطر گمانه	روغن هیدرولیک ۴۶H	۱۱,۹	۰	۰	۶۳	Lim.1	مرمریت	۳۰
۳۴	تست ویسکوزیته	روغن هیدرولیک ۶۸H	۱۱,۹	۰	۰	۶۳	Lim.2		۳۱

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

۳۲	Lim.4	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	نفت	تست ویسکوزیته	شکست اتفاق نیفتاد
۳۳	Lim.4	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	روغن هیدرولیک ۴۶H	تست ویسکوزیته	۱۹۷
۳۴	Lim.5	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	نفت	تست ویسکوزیته	شکست اتفاق نیفتاد
۳۵	Lim.5	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	روغن هیدرولیک ۴۶H	تست ویسکوزیته	۱۴
۳۶	Lim.6	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	روغن هیدرولیک ۶۸H	تست ویسکوزیته	نشت روغن به علت وجود درزه
۳۷	Lim.7	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	روغن هیدرولیک ۶۸H	تست ویسکوزیته	۲۲,۴
۳۸	Lim.8	۶۳	۱,۴	۲,۵	۱۱,۹	روغن هیدرولیک ۴۶H	تست ویسکوزیته	۲۳,۴۶

۴-۶- نتیجه گیری

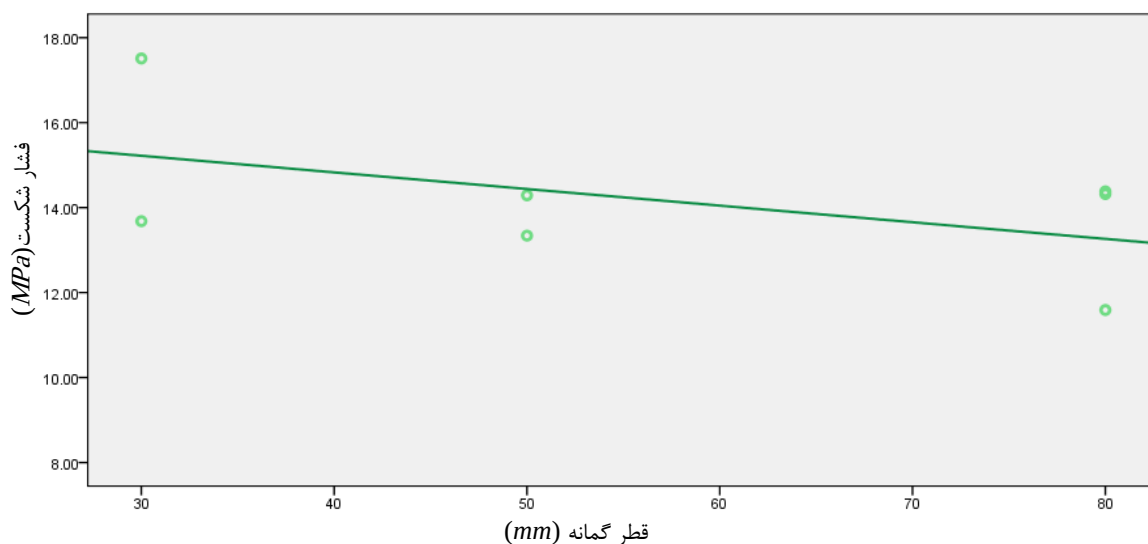
در این فصل، تاثیر تغییرات دو مؤلفه قطر چال و نوع سیال بر روی فشار شکست در روش شکست هیدرولیکی مورد ارزیابی قرار گرفت. در همین راستا آزمایش های متعددی بر روی نمونه هایی از دو جنس مختلف (نمونه های مرمیتی و بتنی) انجام شد که نتایج بدست آمده از آن ها در این بخش ارائه می گردند. لازم به ذکر است که با توجه به آن که تعداد نمونه های طبیعی مورد آزمایش که نتیجه ی منطقی به همراه داشتند، کم بود و امکان تحلیل آن ها وجود نداشت، تنها نتایج بدست آمده از آزمایش های انجام شده بر روی نمونه های بتنی مورد بررسی قرار گرفتند.

۴-۶-۱- تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست

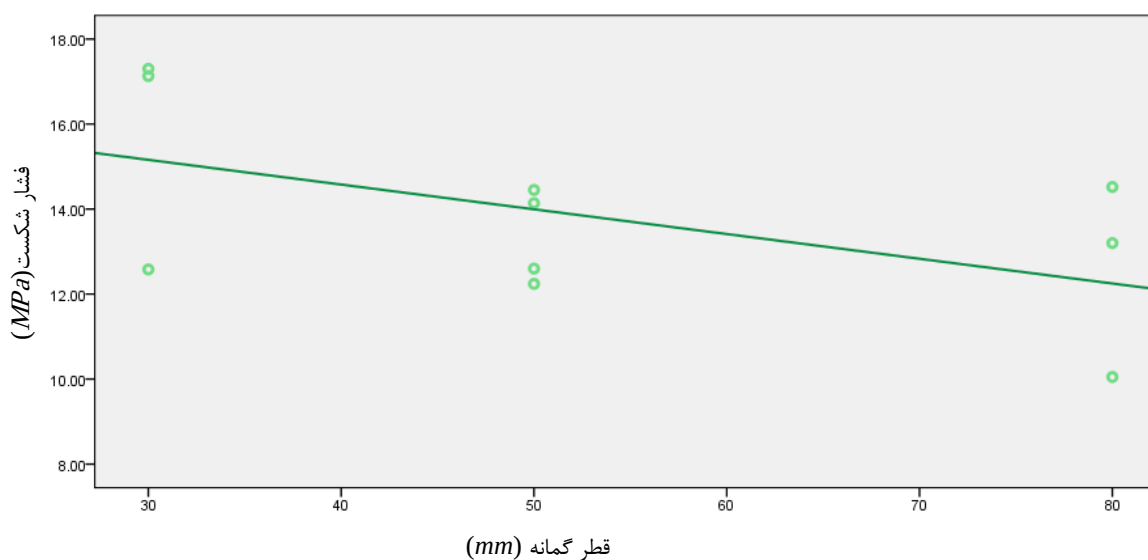
به منظور بررسی تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست، چال های مرکزی با سه قطر متفاوت ۳۰mm، ۵۰mm و ۸۰mm در نمونه های مختلف ایجاد شدند و نمونه ها با سه سیال مختلف روغن های هیدرولیک ۴۶H، ۶۸H و ۱۰۰H پر و در سه مرحله مورد آزمایش قرار گرفتند.

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

در مرحله اول، چند نمونه دارای چال مرکزی با قطر ۳۰ mm، در مرحله دوم، چند نمونه دارای چال مرکزی با قطر ۵۰ mm و در مرحله سوم، چند نمونه دارای چال مرکزی با قطر ۸۰ mm بوسیله سیال‌های مورد نظر، آزمایش شدند. نتایج بدست آمده از این تحقیق در شکل‌های ۳۸-۶، ۳۹-۶ و ۴۰-۶ ارائه شده‌اند.

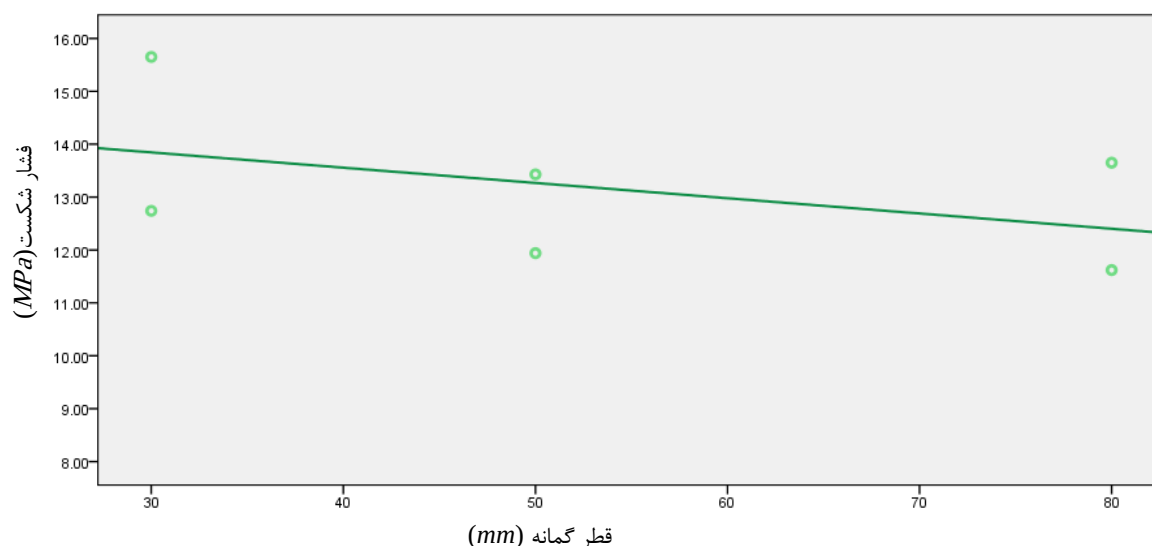


شکل ۳۸-۶- تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۴۶H



شکل ۳۹-۶- تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۶۸H

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



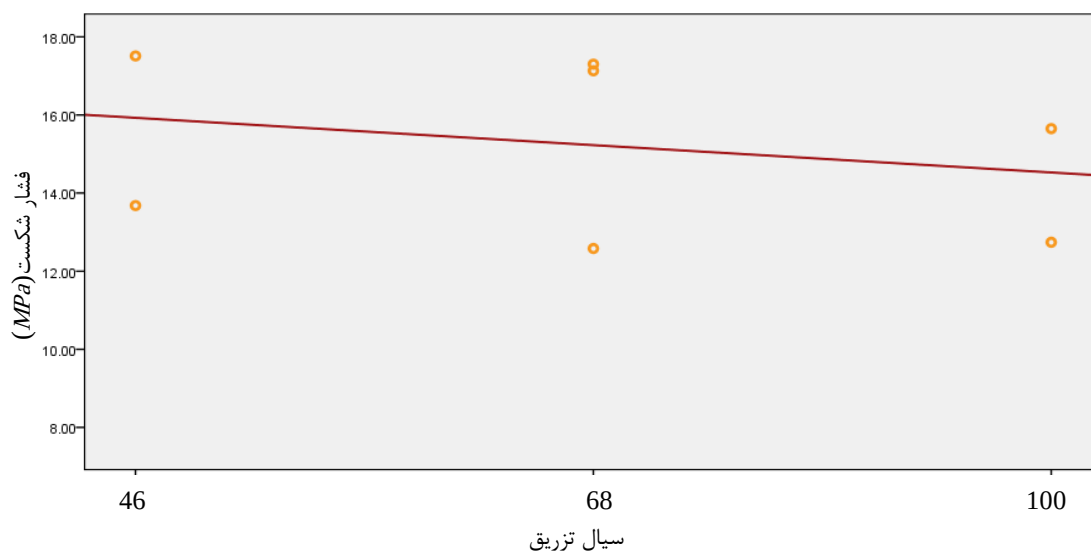
شکل ۶-۴- تغییرات فشار شکست نسبت به قطر گمانه - روغن هیدرولیک ۱۰۰H

همان طور که در تصاویر بالا مشخص است، با افزایش قطر چال، فشار شکست کاهش می‌یابد. که این روند در هر سری از آزمایش‌هایی که با سیال‌های مختلف انجام شده است، قابل تشخیص است و می‌توان اینگونه تفسیر کرد که با افزایش قطر چال، ضخامت گوشته کاهش می‌یابد و همین امر باعث می‌شود تا با افزایش قطر چال فشار شکست کاهش یابد.

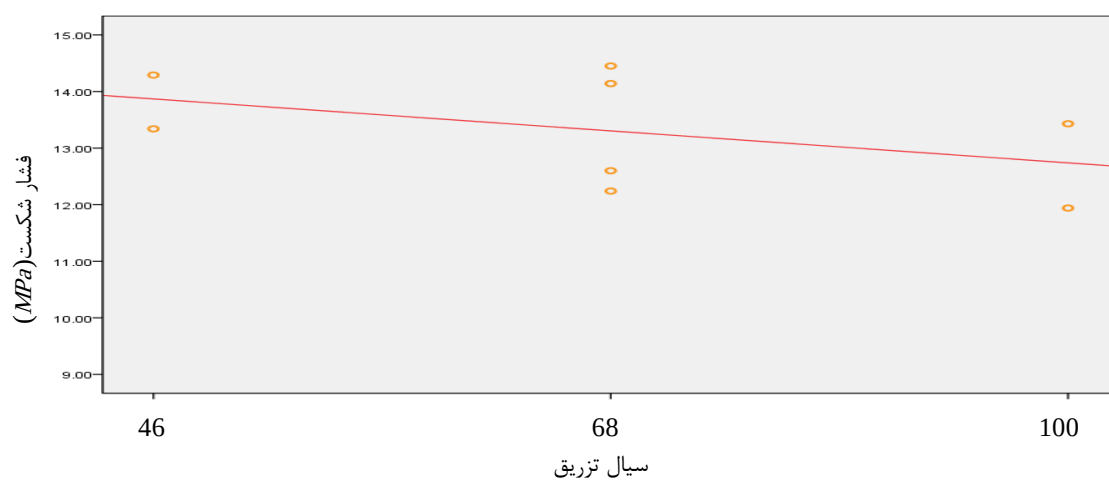
۶-۴-۲- تاثیر نوع ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست

با هدف بررسی تاثیر نوع ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست، سه نوع روغن هیدرولیک ۴۶H، ۶۸H و ۱۰۰H (مشابه بخش قبل) برای پر کردن چال‌های مرکزی نمونه‌های مورد آزمایش انتخاب شدند. لازم به ذکر است که با توجه به آن که نمونه‌ها، از نظر قطر چال مرکزی به سه دسته تقسیم شده بودند (۳۰mm، ۵۰mm و ۸۰mm)، این بخش از تحقیق نیز مشابه بخش قبل سه مرتبه تکرار شد و تاثیر نوع ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست با سه نوع نمونه (از نظر قطر چال مرکزی) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده، در شکل‌های ۶-۴۱، ۶-۴۲ و ۶-۴۳ ارائه شده‌اند.

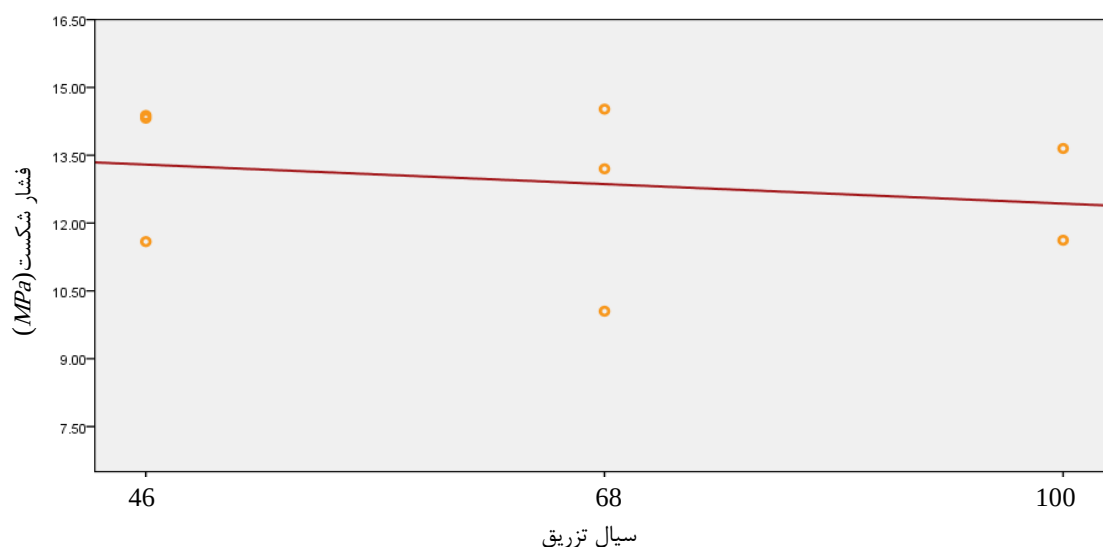
فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۴۱- تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۳۰ mm



شکل ۶-۴۲- تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۵۰ mm



شکل ۶-۴۳- تغییرات فشار شکست نسبت به ویسکوزیته سیال - قطر گمانه ۸۰ mm

با توجه به تصاویر بالا، فشار شکست و ویسکوزیته سیال رابطه‌ای معکوس با یکدیگر دارند. به عبارت دیگر، با افزایش ویسکوزیته، فشار شکست کاهش می‌یابد. که این رابطه می‌تواند اینگونه تفسیر شود که هر چه ویسکوزیته بالاتر می‌رود انتقال نیرو و تنش به دیواره بهتر انجام می‌شود و احتمال نفوذ سیال نیز به داخل نمونه کاهش می‌یابد.

۶-۴-۳- آنالیز حساسیت

یکی از اقدامات اساسی، تعیین میزان حساسیت فشار شکست نسبت به تغییرات دو مولفه‌ی ویسکوزیته سیال و قطر چال است. به همین منظور می‌توان با در نظر گرفتن هریک از مولفه‌های فوق، میزان حساسیت آن‌ها را به کمک معادله زیر، نسبت به فشار شکست ارزیابی نمود. که هرچه مقدار بدست آمده از آنالیز مذکور به یک نزدیک‌تر باشد نشان دهنده تاثیر بیشتر مولفه مذکور بر روی فشار شکست است (Monjezi et al., 2010).

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} \cdot x_{jk}}{\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \sum_{k=1}^m x_{jk}^2} \quad (2)$$

در رابطه فوق: x_i : مولفه ورودی (ویسکوزیته سیال و قطر چال) و x_j : مولفه خروجی (فشار شکست)

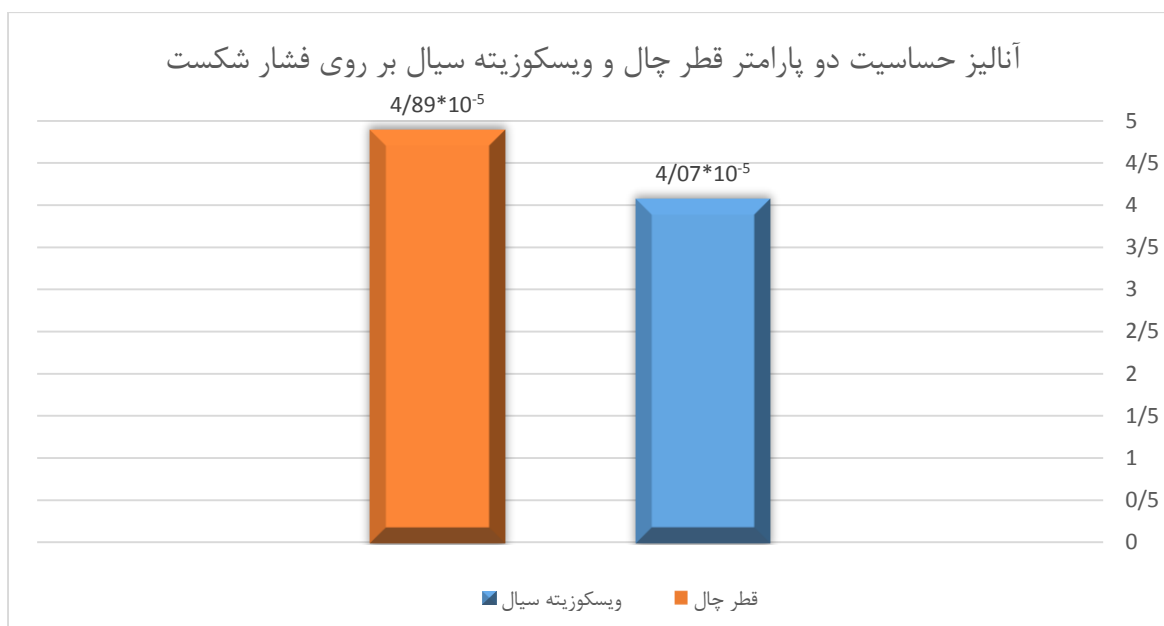
فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت در جدول ۳-۶ و شکل ۴۴-۶ نشان داده شده است.

جدول ۳-۶: آنالیز حساسیت

ردیف	مولفه ورودی		مولفه خروجی	$R_{ij} \times 10^{-5}$	
	ویسکوزیته سیال	قطر چال	فشار شکست	ویسکوزیته سیال	قطر چال
۱	۴۶	۳۰	۱۷,۵۱	۴,۰۷	۴,۸۹
۲	۴۶	۳۰	۱۳,۶۸		
۳	۴۶	۵۰	۱۳,۳۴		
۴	۴۶	۵۰	۱۴,۲۹		
۵	۴۶	۸۰	۱۱,۵۹		
۶	۴۶	۸۰	۱۴,۳۲		
۷	۴۶	۸۰	۱۴,۳۸		
۸	۶۸	۳۰	۱۷,۳		
۹	۶۸	۳۰	۱۷,۱۳		
۱۰	۶۸	۳۰	۱۲,۵۸		
۱۱	۶۸	۵۰	۱۲,۶		
۱۲	۶۸	۵۰	۱۲,۲۴		
۱۳	۶۸	۵۰	۱۴,۴۵		
۱۴	۶۸	۵۰	۱۴,۱۴		
۱۵	۶۸	۸۰	۱۴,۵۲		
۱۶	۶۸	۸۰	۱۳,۲		
۱۷	۶۸	۸۰	۱۰,۰۵		
۱۸	۱۰۰	۳۰	۱۲,۷۴		
۱۹	۱۰۰	۳۰	۱۵,۶۵		
۲۰	۱۰۰	۵۰	۱۱,۹۴		
۲۱	۱۰۰	۵۰	۱۳,۴۳		
۲۲	۱۰۰	۸۰	۱۳,۶۵		
۲۳	۱۰۰	۸۰	۱۱,۶۲		

فصل ششم: بررسی تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال و قطر چال بر روی فشار شکست



شکل ۶-۴۴- آنالیز حساسیت

همانطور که در جدول ۳-۶ و شکل ۶-۴۴ نشان داده شده است، تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست بیشتر از تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال بر آن است.

فصل هفتم

نتایج و پیشنهادات

۱-۷- نتایج

در این تحقیق تاثیر تغییرات سه مؤلفه طول بازه تزریق، قطر چال و نوع سیال بر روی فشار شکست مورد بررسی قرار گرفته است. که نتایج بدست آمده، به شرح زیر هستند:

۱-۱-۷ طول بازه تزریق

بر مبنای داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده، مشخص گردید که با افزایش طول بازه تزریق، مقدار فشار شکست کاهش می‌یابد و برای فواصل بیش از حدود ۷ cm و یا نسبت طول بر قطر بیش از حدود ۷، تاثیر آن (طول بازه تزریق) ناچیز است.

این نتیجه‌گیری، به استاندارد ASTM و ISRM برای آزمون‌های شکست هیدرولیکی که مقدار ۶ را برای حداقل نسبت طول بازه تزریق به قطر گمانه پیشنهاد می‌کنند، نزدیک است.

۲-۱-۷ قطر چال مرکزی

به منظور بررسی تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست، آزمایش‌های متعددی، در ۳ مرحله بر روی نمونه‌های بتنی انجام شد و در هر مرحله، یک نوع روغن هیدرولیک به عنوان سیال تزریق انتخاب گردید. در واقع، انجام آزمایش‌ها در ۳ مرحله، برای پایین آوردن میزان اشتباه و بالا بردن سطح اطمینان به نتایج حاصل از آزمایش‌ها بود.

با توجه به نتایج بدست آمده در این بخش، مشخص گردید که با افزایش قطر چال مرکزی، فشار شکست کاهش می‌یابد. یعنی، قطر چال و فشار شکست، رابطه‌ای معکوس با یکدیگر دارند.

۳-۱-۷ نوع (ویسکوزیته) سیال

روند بررسی تاثیر نوع سیال بر روی فشار شکست نیز همچون روند بررسی تاثیر قطر چال بود. به عبارت دیگر، برای کسب سطح اطمینان بالاتر، این بخش از تحقیقات نیز در ۳ مرحله برنامه‌ریزی و اجرا شد و در هر مرحله نمونه‌هایی از یک جنس ولی با قطر چال مرکزی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفتند.

در حقیقت در هر مرحله، تمامی مؤلفه‌ها، ثابت در نظر گرفته می‌شدند و تنها، نوع سیال بود که تغییر می‌نمود.

بر اساس نتایج حاصل از آزمایش‌های متعدد انجام شده، مشخص گردید که رابطه ای معکوس بین ویسکوزیته سیال و فشار شکست برقرار است و با افزایش یکی از آن‌ها، دیگری کاهش می‌یابد. یادآور می‌شود، با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده مشخص شد که تاثیر تغییرات قطر چال بر روی فشار شکست بیشتر از تاثیر تغییرات ویسکوزیته سیال بر روی فشار شکست است.

۲-۷- پیشنهادات

با توجه به آن که:

- علاوه بر ۳ مؤلفه، طول بازه تزریق، قطر چال و نوع سیال، که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، مؤلفه‌های متعدد دیگری (مانند دبی سیال، عمق، دانه بندی نمونه و ...) نیز بر روی نتایج بدست آمده از روش شکست هیدرولیکی موثر هستند.
- عمر روش شکست هیدرولیکی و مطالعات آزمایشگاهی بر روی آن در ایران بسیار کوتاه بوده و روشی نو است.

پیشنهادهای زیر ارائه می‌گردند:

۱. با هدف ارائه مدلی جامع از نتایج بدست آمده و بالا بردن سطح اطمینان به نتایج حاصل از روش شکست هیدرولیکی، تاثیر همزمان پارامترهای موثر بر فشار شکست (مانند ویسکوزیته سیال، عمق، حرارت، خصوصیات مکانیک سنگی، قطر گمانه و ...)، مورد مطالعه و ارزیابی قرار بگیرد.

۲. دستگاه‌هایی با امکانات بیشتر (مانند توانایی اعمال حرارت بر روی نمونه و یا اعمال فشار منفذی بر روی آن و ...) نسبت به دستگاه مورد استفاده در این تحقیق، توسعه داده شوند. این

امر کمک شایانی به برآورده شدن نیازهای سخت افزاری برای مطالعه و بررسی جامع‌تر آزمایشگاهی، بر روی روش شکست هیدرولیکی می‌نماید.

۳. انجام پژوهش‌های میدانی و اجرای روش شکست هیدرولیکی در مقیاس واقعی و ایجاد ارتباط بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج میدانی.

۴. با توجه به آن که روش شکست هیدرولیکی با دو هدف اصلی، تعیین تنش‌های برجا در اعماق زمین و تحریک چاه‌های نفتی، اجرا می‌شود، پیشنهاد می‌شود با اجرای این روش در پروژه‌های عظیم نفتی و احداث سازه‌های زیرزمینی در ایران:

الف) راندمان و میزان استخراج نفت را افزایش داد.

ب) راستا و اندازه تنش‌های برجا را در محل احداث سازه‌های زیرزمینی (مانند تونل) تعیین نمود. که این امر باعث صرفه جویی اقتصادی در اجرای این گونه پروژه‌ها می‌شود.

Aoyagi Kazuhei, Ishida Tsuyoshi, Murata Sumihiko, Yamamoto Koji, Sekine Kotaro. (2013) "Experiments to investigate effects of the intermediate principal stress on the borehole breakout development." 6th Int. Symp. On In-Situ Rock Stress, Sendai, Japan.

ASTM, American Society For Testing and Materials. (1997) "Standard Test Method for Determination of the In-Situ Stress in Rock Using the Hydraulic Fracturing Method."

Barla, G., P. Bertacchi, A. Zaninetti, P. P. Rossi and I. Vielmo, (1986) "Hydraulic Fracturing Testing Method For Rock Stress Measurement In Italy", International symposium on rock stress and rock stress measurements, Stockholm, 1-3 september.

Bennour, Z., T. Ishida., Y, Nagaya., Y, Nara., Y, Chen., Q, Chen., Y, Nakayama., K, Sekine and Y, Nagano. (2014) "Fracture Development and Mechanism in Shale Cores by Viscous Oil, Water and L-CO₂ injection." In 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Brudy, Martin. (1995) "Determination of in-situ stress magnitude and orientation to 9 km depth at the KTB site." PhD diss., Universität Karlsruhe.

Bredehoeft, J. D. R., G. Wolf, W. S. Keys and Eugene Shuter. (1975) "Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin." Colorado, Geological Society of America Bulletin, v. 87, p. 250-258, 17 figs, Doc. no. 60211.

Chang Chandong, and Bezalel Haimson. (2000) "True triaxial strength and deformability of the German Continental Deep Drilling Program (KTB) deep hole amphibolite." Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) 105, no. B8: 18999-19013.

Cheon, D. S., S. JEON, C. Park, and C. Ryu. (2006) "An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions." Tunnelling and Underground Space Technology 21, no. 3-4.

Crawford, B. R., B. G. D. Smart, I. G. Main, and F. Liakopoulou-Morris. (1995) "Strength characteristics and shear acoustic anisotropy of rock core subjected to true triaxial compression." In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, vol. 32, no. 3, pp. 189-200. Pergamon.

Cheung, L. S., and B. C. Haimson. (1989) "Laboratory study of hydraulic fracturing pressure data—How valid is their conventional interpretation."

International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 26. No. 6. Pergamon.

Chitralla Yashwanth. (2011) "Laboratory study of fluid induced hydraulic fractures –Hypocenter locations, source mechanism, frequency analysis and microscopic observations." Master of Science Thesis, University of Oklahoma.

Detournay, Emmanuel E., and Alex E. Cheng. (1992) "Influence of pressurization rate on the magnitude of the breakdown pressure." In the 33th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

EPA, Environmental Protection Agency, (2004) "Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs", Department of Energy - Hydraulic Fracturing White Paper, EPA 816-R-04-003.

Evans, K. and T. Engelder. (1989) "Some Problems in Estimating Horizontal Stress Magnitudes in “Thrust” Regimes." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Abstr, Vol. 26, No. 6, pp. 647-660,.

Frash, Luke P., and Marte Gutierrez. (2012) "Development of a new temperature controlled true-triaxial apparatus for simulating enhanced geothermal systems (EGS) at the laboratory scale." In 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-194.

Frash Luke, Gutierrez Marte and Hampton Jesse. (2013) "Scale Model Simulation of Hydraulic Fracturing for EGS Reservoir creation using a Heated True-Triaxial Apparatus.", <http://dx.doi.org/10.5772/56113>.

Frash, Luke P., Marte Gutierrez, and Jesse Hampton. (2014) "True-triaxial apparatus for simulation of hydraulically fractured multi-borehole hot dry rock reservoirs." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 70: 496-506.

Guo, F., N. R. Morgenstern and J. D. Scott. (1993) "Interpretation of Hydraulic Fracturing Breakdown Pressure." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, Abstr, Vol. 30, No. 6, pp. 617-626.

GCTS Testing System, <http://www.gcts.com>.

GDS Instruments, <http://www.gdsinstruments.com>.

Haimson, Bezalel C., and Zhongliang Zhao. (1991) "Effect of borehole size and pressurization rate on hydraulic fracturing breakdown pressure." In the 32nd US

Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

Haimson Bezalel and Chang Chandong. (2000) "A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock, and its use to determine rock strength and deformability of Westerly granite." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 37. 285-296.

Haimson, Bezalel C., and Chandong Chang. (2002) "True triaxial strength of the KTB amphibolite under borehole wall conditions and its use to estimate the maximum horizontal in situ stress." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 107, no. B10: ETG-15.

Haimson, Bezalel. "True triaxial stresses and the brittle fracture of rock. (2006) "In *Rock Damage and Fluid Transport, Part I*, pp. 1101-1130. Birkhäuser Basel.

Hosseini, Seyed Mehran. (2012) "Hydraulic fracture mechanism in unconsolidated formations." Master of Science Thesis, the University of Texas.

Huang, Bingxiang, Changyou Liu, Junhui Fu, and Hui Guan. (2011) "Hydraulic fracturing after water pressure control blasting for increased fracturing." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48, no. 6: 976-983.

Haimson, B.C. and F.H. Cornet. (2003) "ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of preexisting fractures (HTPF)." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 1011–1020.

Haimson B and C Fairhurst. (1969) "In-Situ Stress Determination at Great Depth By Means Of Hydraulic Fracturing." *Rock Mechanics-Theory and Practice*, chapter 28.

Hayashi Kazuo, Sato Akira, and Ito Takatoshi. (1997) "In situ stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass with many planes of weakness." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34.1, 45-58,.

Healy, John H., and Mark D. Zoback. (1988) "Hydraulic fracturing in situ stress measurements to 2.1 km depth at Cajon Pass, California." *Geophysical Research Letters* 15.9, 1005-1008.

Hiroiyuki Shimizu, Sumihiko Murata and Tsuyoshi Ishida. (2011) "The distinct element analysis for hydraulic fracturing in hard rock considering fluid viscosity and particle size distribution". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, 712–727.

Inui, S., Ishida, T. Nagaya, Y. Nara, Y. Chen, Y., and Chen, Q. (2014) "AE monitoring of Hydraulic Fracturing Experiments in Granite Blocks Using supercritical CO₂, Water and Viscous Oil." In 48th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

Ismail, Mostafa A., Shambhu S. Sharma, and Martin Fahey. (2005) "A small true triaxial apparatus with wave velocity measurement." *Geotechnical Testing Journal* 28, no. 2.

Ito, Takatoshi and k. Hayashi. (1991) "Physical Background to the Breakdown Pressure in Hydraulic Fracturing Tectonic Stress Measurements." In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, vol. 28, no.4, pp. 285-293. Pergamon.

Ito, Takatoshi. (2008) "Effect of pore pressure gradient on fracture initiation in fluid saturated porous media: Rock." *Engineering Fracture Mechanics* 75 no.7, 1753-1762.

Jian Zhou, Yan Jin and Mian Chen. (2010) "Experimental investigation of hydraulic fracturing in random naturally fractured blocks." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, P. 1193–1199.

Jinli Miao, Jia Xuena, and Cheng Cheng. (2011) "The Failure Characteristics of Granite under True Triaxial Unloading Condition." *Procedia Engineering* 26. 1620-1625.

Jinsong Huang, D. V. Griffiths and Sau-Wai Wong. (2011) "In situ stress determination from inversion of hydraulic fracturing data." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 48, 476–481.

Kang, H., Zhang, X., Si, L., Wu, Y. and Gao, F. (2010) "In-situ stress measurements and stress distribution characteristics in underground coal mines in China." *Engineering Geology* 116, 333–345.

Kapang Piyanat. (2012) "Shear Strength of Fracture in Sandstone under True Triaxial Stresses." Master of Science Thesis, Suranaree University of Technology.

Kizaki Akihisa, Tanaka Hiroharu and Sakaguchi Kiyotoshi. (2013) "Effects of Pore Water on Hydraulic Fracture Propagation using Super Critical Carbon Dioxide as Fracturing Fluid." 6th Int. Symp. On In-Situ Rock Stress, Sendai, Japan, 20-22.

Klee, G., F. Rummel, and A. Williams. (1999) "Hydraulic fracturing stress measurements in Hong Kong". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36.6, 731-741.

Klee G, Fritz Rummel and MeSy, (2002) "Äspö Hard Rock Laboratory Rock stress measurements at the Äspö HRL Hydraulic fracturing in boreholes KA2599G01 and KF0093A01." *Svensk Karnbranslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.*

Kumar, N., Varughese, A., Kapoor, V. K. and Dhawan, A. K. (2004) "In Situ Stress Measurement and Its Application For Hydro-Electric Projects—An Indian Experience in The Himalayas." *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 41, No. 3.

Lhomme, T. P., C. J. de Pater, and P. H. Helfferich. (2002) "Experimental study of hydraulic fracture initiation in Colton sandstone." *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference. Society of Petroleum Engineers.*

Ljunggren, C. Yanting Chang, Janson, T. and Christiansson, R. (2003) "An overview of rock stress measurement methods." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, 975–989.

Lockner, D., and Byerlee. J. D. (1977) "Hydrofracture in Weber sandstone at high confining pressure and differential stress." *Journal of Geophysical Research* 82, no. 14, 2018-2026.

Manthei, G., Eisenblatter, J and Kamlot, P., (2003) "Stress Measurements in salt mines using a special hydraulic fracturing borehole tool", *Geotechnical Measurements and Modelling*, 355-360,.

Majer, E. L., and Doe, T. W. (1986) "Studying hydrofractures by high frequency seismic monitoring." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Vol. 23. No. 3. Pergamon.

Manabu Takahashi, Hyuck Park, Naoki Takahashi, and Yukiyasu Fujii. (2013) "True triaxial tests—using permeability and extensional stress parameters to simulate geological history in rocks." *Geosystem Engineering* 16, no. 1: 75-82.

Masuda, K., Nishizawa, O., Kusunose, K., & Satoh, T. (1993) "Laboratory study of effects of In Situ stress state and strength on fluid-induced seismicity". *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*. Vol. 30. No. 1. Pergamon.

Matsunaga, I., H. Kobayashi, S. Sasaki, and T. Ishida. (1993) "Studying hydraulic fracturing mechanism by laboratory experiments with acoustic emission

monitoring". In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, vol. 30, no. 7, pp. 909-912. Pergamon.

Meifeng Cai and Hua Peng. (2011) "Advance of in-situ stress measurement in China." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 3 (4): 373–384.

Monjezi, M., Sayadi, A., Talebi, N., (2010) "Prediction of Backbreak Using Blasting Parameters." Journal of Mines, Metals and Fuels. 223-226.

Montgomery, C., and Smith. M. (2010) "Hydraulic Fracturing." NSI Technologies, December.

Nawrocki P. A. (2008) "Alterations of Breakdown Pressures in Rocks Exhibiting Stress-dependent Mechanical Properties." The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 1-6 October, Goa, India.

Oku, Haruyuki, Bezalel Haimson, and Sheng-Rong Song. (2007) "True triaxial strength and deformability of the siltstone overlying the Chelungpu fault (Chi-Chi earthquake), Taiwan." Geophysical research letters 34, no. 9.

Pine, R. J., Ledingham, P. and Merrifield, C. M. (1983) "In-situ Stress Measurement in the Carnmenellis Granite-II. Hydrofracture Tests at Rosemanowes Quarry to Depths of 2000 m." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20. No. 2. pp. 63-72.

Rao, K. S., and R. P. Tiwari. (2011) "Strength and Deformation Behavior of Jointed Rockmass under Polyaxial Stress State." Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Kochi.

Reinicke Andreas, Rybacki Erik, Stanchits Sergei, Huenges Ernst and Dresen Georg, (2010) "Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms-Implications from laboratory testing of tight sandstone-proppant systems", Chemie der Erde 70, S3, 107–117.

Rasouli, V. (2011) "A true triaxial stress cell to simulate deep downhole drilling conditions." SPE News.

Smart, B., and B. Crawford. (1993) "An innovative new cell for testing rock core under true triaxial stress states." In Soc. Core Analysts 7th Ann. Tech. Conf.

Smart, B. D. G., J. M. Somerville, and B. R. Crawford. (1999) "A rock test cell with true triaxial capability." Geotechnical & Geological Engineering 17, no. 3-4: 157-176.

Sriapai Tanapol. (2010) "True Triaxial Compressive Strengths of Maha Sarakham rock salt." Master of Science Thesis, Suranaree University of Technology.

Sture Stein, M. M. Alawi, and Hon-Yim Ko. (1988) "True triaxial and directional shear cell experiments on dry sand." Colorado Univ at Boulder Dept of Civil Environmental Architectural Engineering.

Sano, Osam, Hisao Ito, Atsuo Hirata, and Yoshiaki Mizuta. (2005) "Review of methods of measuring stress and its variations".

Satoh, H. and Yamaguchi, Y. (2009) "Laboratory Hydraulic Fracturing Tests for Core Materials Using Large Size Hollow Cylindrical Specimens". The 1st International Symposium on Rockfill Dams, China.

Schmitt Douglas R., Wilson Terry, Jarrard Richard, Paulsen Timothy, Pierdominici Simona, Wonik Thomas and Handwerger David. (2011) "ANDRILL Experiences with a Wireline Hydraulic Fracturing System for Minifrac Stress Measurements in Indurated Sediments". CSPG CSEG CWLS Convention.

Solberg, P., D. Lockner, and J. D. Byerlee. (1980) "Hydraulic fracturing in granite under geothermal conditions." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 17. No. 1. Pergamon.

Song, I., Suh, M., Sik Won, K. and Haimson, B., (2001) "A laboratory study of hydraulic fracturing breakdown pressure in tablerock sandstone". Geosciences Journal Vol.5, No. 3, p. 263-271.

Sung O. Choi, (2003) "Numerical Study on the Estimation of the Shut-in Pressure in Hydraulic Fracturing Test". Geosystem Eng., 6 (3), 55- 62.

SINTEF, Brief description of methods applied by SINTEF, (2005), In-Situ Rock Stress Measurements, SINTEF Civil and Environmental Engineering Rock and Soil Mechanics 7465 Trondheim, Norway.

Tian Jiayong, Yuanpeng Man, Zhoumin Xie and Hui Qi, (2008) "Influence of Stress on Elastic Wave Velocity Around a Borehole in Rocks", The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Thosuwan Roengchai. (2009) "Development of True Triaxial Load Frame using Cantilever System." Master of Science Thesis, Suranaree University of Technology.

Tiwari, R. P., and K. S. Rao. (2004) "Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41.

Tiwari, Rajendra P., and K. Seshagiri Rao. (2006-1) "Post failure behaviour of a rock mass under the influence of triaxial and true triaxial confinement." *Engineering geology* 84, no. 3: 112-129,.

Tiwari, Rajendra P., and K. S. Rao. (2006-2) "Deformability characteristics of a rock mass under true-triaxial stress compression." *Geotechnical & Geological Engineering* 24, no. 4: 1039-1063.

Ulf Lindfors, SwedPower AB Oskarshamn site investigation, (2007) "Hydraulic fracturing and HTPF rock stress measurements in borehole KSH01A". Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. ISSN 1651-4416. SKB P-04-310.

Van Dam, D. B., C. J. De Pater, and Remco Romijn. (1998) "Analysis of hydraulic fracture closure in laboratory experiments." *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, 8-10 July, Trondheim, Norway.

Wang, S.Y., Sun, L., A.S.K. Au, Yang, T.H. and Tang, C.A. (2009) "2D-numerical analysis of hydraulic fracturing in heterogeneous geo-materials." *Construction and Building Materials* 23, 2196–2206.

Weber, N., P. Siebert, K. Willbrand, M. Feinendegen, C. Clauser, and T. P. Fries. (2013) "The XFEM with an Explicit-Implicit Crack Description for Hydraulic Fracture Problems." In *ISRM International Conference for Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*. International Society for Rock Mechanics.

Wei Hongchao, Li Lianggang, Wu Xiaoming and Hu Yule, (2011) "The Analysis and Theory Research on the Factor of Multiple Fractures During Hydraulic Fracturing of CBM Wells". *Xi'an International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines*, 231 –237.

Wen Meng, Chen Qun-Ce, Du Jian-Jun, Feng Cheng-Jun, Qin Xiang-Hui and An Qi-Mei, (2012) "In-Situ Stress Measurements in Singapore". *Chinese Journal of Geophysics* Vol.55, No.4, 2012, pp: 429–437.

Xingpeng Jing, (2011) "An Experimental Method on Hydraulic Fracturing of Coalbed Reservoir". *Xi'an International Conference on Fine Geological Exploration and Groundwater & Gas Hazards Control in Coal Mines*, 422-428.

Yang, T. H., Tham, L. G., Tang, C.A., Liang, Z. Z. and Tsui, Y., (2003) "Influence of Heterogeneity of Mechanical Properties on Hydraulic Fracturing in Permeable Rocks", Springer.

Yang, T.H., Tham, L.G., Wang, S.Y., Zhu, W.C., Li, L.C. and Tang, C.A., (2005) "Micromechanical Model for Simulating Hydraulic Fractures of Rock", *Advanced Materials Research* Vol. 9, pp 127-136.

Younessi, A., V. Rasouli, and B. Wu. (2012) "Experimental sanding analysis: thick walled cylinder versus true triaxial tests." In *Proceedings of 2nd southern hemisphere international rock mechanics symposium (SHIRMS)*, Sun City, South Africa.

Young Paul, (2012) "Rock Fracture Dynamics and Induced Seismicity", *Rock Fracture Dynamics Lab (RFDL)*, Lassonde Institute, University of Toronto.

Zang Arno, Stephansson Ove and Haimson Bezalel, (2009) "Stress Field of the Earth's Crust", *Springer Dordrecht Heidelberg London New York*, ISBN 978-1-4020-8443-0.

Zhang, Guang-Qing, and Tiegang Fan. (2014) "A high-stress tri-axial cell with pore pressure for measuring rock properties and simulating hydraulic fracturing." *Measurement* 49: 236-245.

Zhang, Lei, Claire A. Currie, and Douglas R. Schmitt. (2010) "Drilling Induced Core Fractures and Crustal Stress." *GeoCanada*.

Zhang, Xi, R. G. Jeffrey, A. P. Bunger, and Marc Thiercelin. (2011) "Initiation and growth of a hydraulic fracture from a circular wellbore". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 48, no. 6, 984-995.

Ziaie Moayed Reza, Izadi Ehsan and Fazlavi Mohsen, (2012) "In-situ stress measurements by hydraulic fracturing method at Gotvand Dam site, Iran". *Tubitak, Turkish J. Eng. Env. Sci.* 36, 179 – 194.

Zoback, Mark D., John H. Healy, and John C. Roller. (1977) "Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique." In *Stress in the Earth*, pp. 135-152. *Birkhäuser Basel*.

ترابی، سید رحمان، (۱۳۹۱) "مقدمه ای بر مکانیک سنگ". انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، چاپ چهارم.

ترابی، سید رحمان، (۱۳۹۵) "گزارش بازدید از آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه کرتین استرالیا".

دهقان علینقی، گشتاسبی کامران، آهنگری کاوه، جین یان، میسکیمینس جنیفر، (۱۳۹۳) " مطالعه آزمایشگاهی شکافت هیدرولیکی در مخازن هیدروکربوری"، پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.

فهیمی فر احمد، سروس حامد، (۱۳۸۹) "آزمایش های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها"، جلد دوم،
آزمون های صحرایی. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

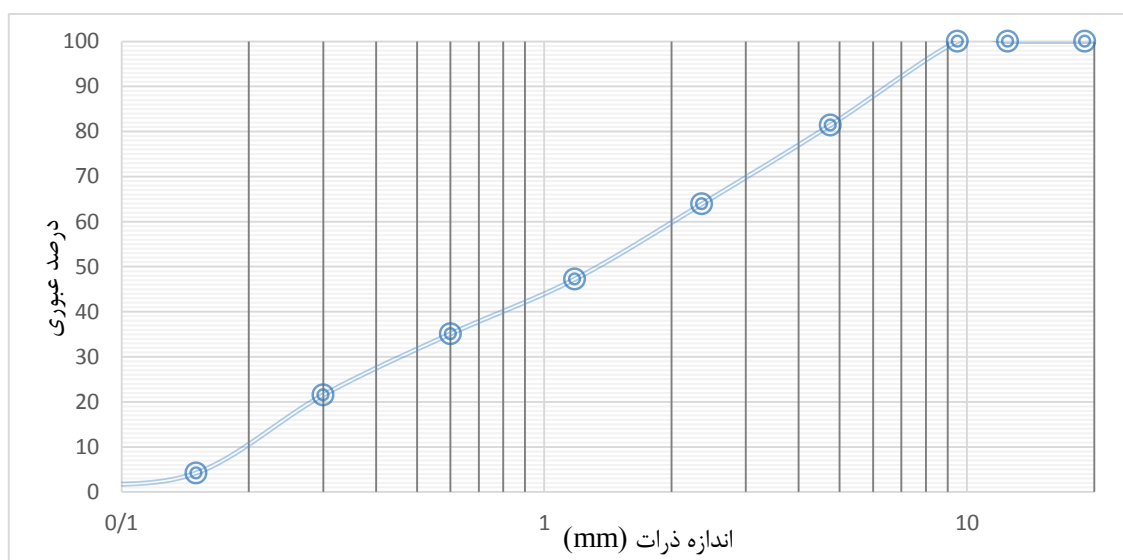
http://ibf.webarchiv.kit.edu/felslabor/felslabor8_en.html

<http://www.gcts.com>

<http://www.gdsinstruments.com>

پیوست

- منحنی دانه بندی ماسه استفاده شده در ترکیب



Abstract

Hydraulic fracturing method is the best known method for determining the magnitude and directions of the principle horizontal in situ rock stresses in the subsurface. Many investigations were conducted by researchers on the phenomenon as numerous parameters such as borehole diameter, pressure interval length and viscosity of fracturing fluid affect the results of the implementation of the hydraulic fracturing. However, there are vague hints about hydraulic fracturing method. As a result, more studies to determine the impact of various parameters on the process, are required. For this purpose, evaluation of the impact of distance between the packers on fracture pressure (breakdown pressure) in this procedure, was one of the subjects of this study. In this respect a laboratory physical model was designed and constructed and a significant number of tests were conducted. The results showed that by increasing the ratio of the length to the diameter of the interval the breakdown pressure decreases.

Then, a new apparatus which allows laboratory Hydraulic fracturing experiments under true triaxial compression was developed at Shahrood University of Technology and laboratory hydraulic fracturing experiments were conducted to investigate the dependence of breakdown pressure upon two factors which could influence the use of the hydrofrac technique for in-situ stress determinations namely: the viscosity of fluid and borehole diameter. In other words, in this study, by using the new apparatus it was examined to see if the fracture pressure will change with the viscosity of fluids and borehole diameter. The setup of the system was in an order that specimens of 30 by 30 by 30 cm³ were able to be tested. It should be noted that, three steel rods of 30, 50 and 80 mm outer diameter were buried in the center of the concrete, during consolidation, to create simulated boreholes of different diameters in the specimens to examine the impact of borehole diameter on hydraulic fracturing breakdown pressure. Meanwhile, 3 types of Hydraulic oils of different viscosity (46H, 68H and 100H) were injected inside the boreholes to examine the effect of viscosity of fracturing fluid. Results show that breakdown pressure decreases with increasing borehole diameter and also there is an inverse relationship between breakdown pressure and viscosity of fracturing fluid. In other words, it decreases with increasing viscosity of fracturing fluid.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Geophysics and Petroleum

**Laboratory modeling of hydraulic fracturing
process in true triaxial stress conditions**

Hamed Shirazi

Supervisor:

Dr. Seyed Rahman Torabi

July. 2017