

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

گرایش ژئومکانیک نفت

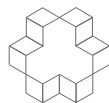
بررسی ترموپورومکانیکی ایجاد و گسترش شکافت هیدرولیکی در حفرات عمودی و افقی یکی از چاه‌های شمال غرب ایران
نگارش:

امیر طاهری

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

بررسی ترموپورومکانیکی ایجاد و گسترش شکافت هیدرولیکی در حفرات عمودی و افقی یکی از چاه‌های شمال غرب ایران

توسط امیر طاهری صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی معدن - ژئومکانیک در تاریخ
مورد تأیید قرار دادند.

۱- استاد راهنما: آقای دکتر حسن قاسم‌زاده امضاء

۲- استاد مشاور صنعتی: آقای دکتر یاسر ارجمند امضاء

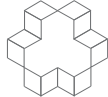
۳- ممتحن خارجی: آقای دکتر محمدرضا آصف امضاء

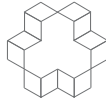
۴- ممتحن داخلی: آقای دکتر محمدعلی ایران‌منش امضاء

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی: آقای دکتر محمدعلی ایران‌منش امضاء

دانشکده‌ی عمران

تاریخ:

شماره: تاریخ:	اظهارنامه دانشجو	 تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
این جانب امیر طاهری دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن - ژئومکانیک دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان: بررسی ترموپورومکانیکی ایجاد و گسترش شکافت هیدرولیکی در حفرات عمودی و افقی یکی از چاه‌های شمال غرب ایران بازارهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر حسن قاسم‌زاده توسط شخص این جانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید هست. در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط این جانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت کرده‌ام. امضاء دانشجو: تاریخ:		

شماره: تاریخ:	حق طبع، نشر و مالکیت نتایج	 تاسیس ۱۳۰۷ دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده و استاد/استادان راهنمای آن می باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد. ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست. ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد. * توجه: این فرم می بایست پس از تکمیل، در نسخ تکثیر شده قرار داده شود.		

تقدیم به:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگان؛
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است؛
به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید؛
و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،
این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم
با سپاس از سه وجود مقدس:
آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم...
موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم...
و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...
پدرم...
مادرم...
و برادر و خواهرانم که بدون شک همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگی‌ام بوده‌اند...

قدردانی:

تشکر قلبی و لسانی خود را از استاد عالی قدر جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده که یافتن موضوع مورد علاقه و دلخواه خود را در نقطه اوج بحران مدیون همکاری ها و راهنمایی های بی دریغ ایشان هستم؛ و نمی دانم که با چه زبانی و با کدامین واژگان محبتشان را ارج نهم بی نهایت سپاسگزارم و به راستی انجام این رساله بدون نظرهای صائب، پیگیری های دلسوزانه و تشویق های امیدبخش ایشان میسر نبود. لطف و مهربانی بی شائبه شان همیشه در خاطرم خواهد ملند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را عهده دار گردیدند و در تمامی مراحل انجام رساله از راهنمایی های مدبرانه ایشان استفاده نمودم ابراز می دارم و توفیقات روزافزون ایشان را توأم با صحت و سعادت خواستارم.

از جناب آقای دکتر یاسر ارجمند که در امر مشاوره این رساله مساعدت نمودند و در این امر نهایت مراقبت، توجه و دقت خود را مبذول فرموده اند کمال تشکر و امتنان را دارم و برای ایشان از خداوند سلامت و سعادت ابدی را خواهانم.

چکیده

درک و کنترل رشد ترک‌ها در طول عملیات شکست هیدرولیکی (HF) برای افزایش بهره‌وری از مخازن نفت، گاز و پروژه‌های زمین‌گرمایی از اهمیت بالایی برخوردار است. تجزیه و تحلیل ساختاری انتشار ترک و تأثیر آن بر جریان سیال به دلیل پیچیدگی خواص سنگ و جنبه‌های فیزیکی شکست سنگ و رشد ترک، یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. تفسیر دقیق از تعاملات پیچیده بین تغییر شکل سنگ، جریان سیال، انتقال حرارت و گسترش ترک‌های ناشی از تزریق سیال، برای طراحی شبکه شکست هیدرولیکی به شدت ضروری است.

در این پژوهش، از یک مدل عددی برای شبیه‌سازی شکست سنگ و گسترش شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود. مطالعه بر روی تأثیر تغییر شکل سنگ، جریان سیال و انتقال حرارت بر روی فرایندهای شکست با استفاده از تحلیل حرارتی-هیدرو-مکانیکی (THM) تمرکز دارد. مسائل مربوط به اتصالات حرارتی-هیدرو-مکانیکی به طور گسترده در مهندسی زیرزمینی مانند شکست هیدرولیکی و توسعه سیستم‌های زمین‌گرمایی (EGS) تشخیص داده شده است. تزریق سیال سرد به مخازن گرم باعث تغییر فشار سازند و دما می‌شود و در نتیجه، هندسه ترک در محیط متخلخل تغییر می‌کند.

به عنوان یک چالش عملی، فرآیند شکست هیدرولیکی معمولاً شامل تغییر فشار سیال ناشی از تزریق مایع شکستگی، نشست مایع و گسترش ترک‌ها با رفتار سنگ‌های شکننده و ناهمگونی‌های تنش‌های باقیمانده می‌شود. در این پایان‌نامه، تغییر شکل حرارتی-هیدرو-مکانیکی و جریان سیال غیر هم‌دما در محیط شکسته مورد مطالعه قرار می‌گیرند. سپس، از روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) برای گسسته‌سازی مدل استفاده می‌شود و مدل توسعه یافته با استفاده از مدل‌های تحلیلی گسترش شکست و انتقال حرارت اعتبارسنجی می‌شود. علاوه بر این، در طراحی مخازن زمین‌گرمایی و نفت، مهندسان می‌توانند از شکست حرارتی که در هنگام انتقال حرارت بین جریان تزریق شده و ماتریس سنگ اتفاق می‌افتد، برای تخمین تغییرات شکستگی‌های ایجاد شده و تعیین نفوذپذیری جدید استفاده نمایند. این تنش‌های حرارتی با استفاده از تحلیل (THM) تشخیص داده می‌شوند و تأثیر آن‌ها بر گسترش ترک‌ها در طول فرآیند شکست هیدرولیکی در مخزن با استفاده از مکانیک آسیب و الگوریتم‌های بارگذاری حرارتی برای سطوح تازه شکسته شده بررسی می‌شود و در نهایت، افزایش میزان تولید نفت و تحلیل منحنی کاهش تولید برای تخمین بهبود استخراج هیدروکربن از مخازن با نفوذپذیری کم محاسبه می‌شود.

کلمات کلیدی: ژئومکانیک- شکست هیدرولیکی (HF)- تحلیل ترموهیدرومکانیک (THM)- انتقال حرارت- گسترش ترک- ایجاد شکستگی- شبیه‌سازی عددی- المان محدود توسعه یافته (XFEM)

فهرست مطالب:

ح	چکیده.....
۱	فصل اول مقدمه.....
۱-۱	پیشگفتار.....
۲	۱-۲ اهمیت موضوع.....
۳	۱-۳ ضرورت تحقیق.....
۵	۱-۴ ساختار پژوهش.....
۶	۲ فصل دوم کلیات و مروری بر ادبیات پژوهش.....
۷	۱-۲ مقدمه.....
۷	۲-۲ مدل مکانیکی زمین (MEM-۱D).....
۸	۱-۲-۲ خواص همگن و روابط اساسی مدل مکانیکی زمین.....
۱۲	۳-۲ مکانیزم های شکست.....
۱۳	۱-۳-۲ حالت های مختلف شکست در سنگ.....
۱۴	۱-۱-۳-۲ شکست کششی.....
۱۵	۲-۱-۳-۲ شکست برشی.....
۱۶	۳-۱-۳-۲ شکست بر اثر فشار تراکمی.....
۱۷	۲-۳-۲ تاثیر فشار منفذی (حفره‌ای) بر شکست سنگ.....
۱۸	۳-۳-۲ تاثیر فشار محصورکننده‌ی جانبی.....
۲۰	۴-۲ معیار شکست موهر-کلمب.....
۲۲	۵-۲ نفوذپذیری مخزن.....
۲۲	۶-۲ تاثیر ناهمگنی در سنگ‌ها.....
۲۳	۷-۲ روش‌های عددی.....
۲۴	۱-۷-۲ روش المان محدود توسعه‌یافته.....
۲۶	۸-۲ تحلیل منحنی کاهش (DCA) تولید نفت و گاز.....
۲۶	۱-۸-۲ منحنی کاهش آریس.....

۲۸	۹-۲ مروری بر ادبیات پژوهش
۳۶	۳ فصل سوم معرفی نرم افزار و معادلات حاکم
۳۷	۱-۳ مقدمه
۳۸	۲-۳ معادلات سازنده و حاکم ژئومکانیکی
۳۸	۱-۲-۳ تغییر شکل سنگ
۳۹	۲-۲-۳ جریان سیال شکست
۳۹	۱-۲-۲-۳ جریان سیال در ماتریس سنگ
۴۰	۲-۲-۲-۳ جریان سیال در ترک
۴۱	۳-۲-۳ انتقال حرارت
۴۱	۱-۳-۲-۳ انتقال حرارت در ماتریس
۴۲	۲-۳-۲-۳ انتقال حرارت در ترک
۴۲	۴-۲-۳ معیار شکست در شکست هیدرولیکی با تاثیر THM
۴۳	۵-۲-۳ مرحله‌ی زمانی فرآیند تنیدگی کامل
۴۴	۶-۲-۳ حل ترمو-هیدرو-مکانیکی با روش عددی المان محدود توسعه یافته
۴۷	۷-۲-۳ گره‌های المان
۴۸	۳-۳ معرفی نرم افزار
۴۸	۱-۳-۳ نرم افزار تحلیلی آباکوس
۴۹	۱-۱-۳-۳ روش تحلیلی نرم افزار آباکوس
۵۰	۲-۱-۳-۳ مراحل مدل سازی و نحوه‌ی کار با نرم افزار
۵۱	۳-۱-۳-۳ ماژول‌های کاربردی نرم افزار آباکوس
۵۱	۴-۳ صحت سنجی عددی
۵۲	۱-۴-۳ روش تحلیلی KGD
۵۴	۲-۴-۳ مدل تحلیلی دما
۵۶	۳-۴-۳ صحت سنجی مقاله
۵۶	۱-۳-۴-۳ فرضیات مقاله‌ی مورد نظر

۵۸.....	۲-۳-۴-۳ مدل سازی عددی انتشار ترک
۵۸.....	۳-۳-۴-۳ ترک باله ای شکل
۶۰.....	۴-۳-۴-۳ نتایج صحت سنجی عددی
۶۱.....	۵-۳-۴-۳ رشد ترک در شرایط کششی (Mode I)
۶۴.....	۶-۳-۴-۳ رشد ترک تحت تنش برشی (Mode II)
۶۵.....	۵-۳ تاثیر فشار محصور کننده
۶۶.....	۶-۳ وابستگی مش در مسائل رشد ترک
۶۶.....	۷-۳ مشخصات و داده های ژئومکانیکی مخزن مورد مطالعه
۶۷.....	۸-۳ جمع بندی فصل
۶۹.....	۴ فصل چهارم مدل سازی ترمو-هیدرو-مکانیکی ایجاد و گسترش ترک
۷۰.....	۱-۴ مقدمه
۷۰.....	۲-۴ اجرای مدل سازی فرآیند شکست هیدرولیکی
۷۱.....	۱-۲-۴ انتشار ترک در چاه با انجام عملیات مشبک کاری
۷۹.....	۲-۲-۴ مدل سازی فرآیند شکست هیدرولیکی با تاثیر تزریق سیال خنک
۸۷.....	۳-۴ نفوذپذیری معادل مخزن ، برداشت تجمعی و تحلیل نمودار کاهش DCA
۹۱.....	۴-۴ تحلیل حساسیت تاثیر ویژگی های سنگ بر تولید تجمعی
۹۲.....	۱-۴-۴ تخلخل
۹۳.....	۲-۴-۴ نفوذپذیری
۹۴.....	۳-۴-۴ مدول الاستیته
۹۵.....	۱-۳-۴-۴ مدول یانگ بالا
۹۵.....	۲-۳-۴-۴ مدول یانگ پایین
۹۶.....	۴-۴-۴ فشار منفذی
۹۶.....	۱-۴-۴-۴ افزایش موانع تنشی:
۹۷.....	۲-۴-۴-۴ محدودیت طول ترک:
۹۷.....	۳-۴-۴-۴ مانع جریان سیال:

۹۷.....	۴-۴-۴ آسیب به سازند:
۹۷.....	۴-۴-۵ تنش برجا
۹۸.....	۴-۴-۵-۱ تاثیر تضاد تنش بالا
۹۸.....	۴-۴-۵-۲ تاثیر تضاد تنش پایین
۹۹.....	۴-۴-۶ دمای مخزن
۱۰۰.....	۴-۵ جمع بندی فصل
۱۰۲.....	۵ فصل پنجم جمع بندی و پیشنهادها
۱۰۳.....	۵-۱ نتیجه گیری
۱۰۷.....	۵-۲ توصیه ها و پیشنهادات آتی
۱۱۰.....	مراجع و منابع

فهرست اشکال:

- شکل ۱-۲ مراحل کامل مدل مکانیکی زمین ۸
- شکل ۲-۲ چرخه‌ی فشار-زمان نشت سیال استاندارد ۱۲
- شکل ۳-۲ منحنی تنش-کرنش نرمال یک ماده‌ی شکننده ۱۳
- شکل ۴-۲ شماتیک انواع حالت شکست در سنگ ۱۴
- شکل ۵-۲ معیار شکست موهر-کلمب و شکست کششی ۱۵
- شکل ۶-۲ معیار شکست موهر-کلمب و شکست کششی ۱۶
- شکل ۷-۲ جهت‌گیری مجدد دانه‌ها بر اثر فشار همه‌جانبه ۱۷
- شکل ۸-۲ تأثیر فشار منفذی بر حالت‌های تنش مؤثر ۱۸
- شکل ۹-۲ منحنی تنش-کرنش (الف) نوعی کوارتز (ب) نوعی مرمر [۱۵] ۱۹
- شکل ۱۰-۲ نتایج آزمایش‌های فشار سه‌جانبه بر روی (الف) ماسه‌سنگ (ب) شیل رسی [۱۶] ۲۰
- شکل ۱۱-۲ شماتیک معیار شکست موهر-کلمب با حد کات آف کشش (Tension cut-off) ۲۲
- شکل ۱۲-۲ شماتیک روش XFEM با استفاده از توابع غنی‌سازی ۲۵
- شکل ۱-۳ فرآیند انتشار شکستگی هیدرولیکی مبتنی بر سیال ۴۳
- شکل ۲-۳ مسیر شکست بر اساس نوع مش بندی [۷۵] ۴۸
- شکل ۳-۳ شماتیک یک مدل‌سازی در ABAQUS ۵۰
- شکل ۴-۳ نیمه طول ترک در حل عددی در مقابل مدل تحلیلی KGD ۵۳
- شکل ۵-۳ حداکثر عرض ترک در حل عددی در مقابل مدل تحلیلی KGD ۵۳
- شکل ۶-۳ شماتیک انتقال حرارت در محیط ترک ۵۵
- شکل ۷-۳ مقایسه توزیع دما بین روش‌های عددی و تحلیلی ۵۵
- شکل ۸-۳ تکامل شکستگی‌های ترک دوبعدی بال از یک ترک از قبل موجود توسط (حالت ترکیبی $KI + KII$) ۵۹
- شکل ۹-۳ رشد ترک باله‌ای دوبعدی در آزمایش فشار تک‌محوری [۷۹] ۵۹
- شکل ۱۰-۳ مش بندی مدل‌سازی دوبعدی عددی ۶۰
- شکل ۱۱-۳ ترک با زاویه‌ی ۶۰ درجه در مرکز مدل ۶۱
- شکل ۱۲-۳ شرایط مرزی ۶۱

- شکل ۳-۱۳ (a) انتشار آسیب، (b) تکامل فشار و (c) تغییرات تنش در یک سنگ دویعدی (اندازه دامنه $L = 100$ متر) در طول تزریق مایع به یک شکستگی منفرد (طول $l = 20$ متر). تزریق از مرکز دامنه قرار دارد و سرعت تزریق $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ثابت است [۷۶] ۶۲
- شکل ۳-۱۴ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک زاویه دار در لحظه $t = 100 \text{ sec}$ ۶۳
- شکل ۳-۱۵ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک زاویه دار در لحظه $t = 900 \text{ sec}$ ۶۳
- شکل ۳-۱۶ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک زاویه دار در لحظه $t = 1800 \text{ sec}$ ۶۴
- شکل ۳-۱۷ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک زاویه دار در لحظه $t = 3600 \text{ sec}$ ۶۴
- شکل ۳-۱۸ شروع رشد ترک برشی در لحظه اعمال فشار در لحظه $t = 100 \text{ sec}$ ۶۵
- شکل ۴-۱ چاه با مشبک کاری زاویه دار و افقی وابسته به تنش های برجا ۷۲
- شکل ۴-۲ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه آغاز فرآیند ۷۳
- شکل ۴-۳ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه $t = 100 \text{ sec}$ ۷۳
- شکل ۴-۴ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه $t = 900 \text{ sec}$ ۷۴
- شکل ۴-۵ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه $t = 1800 \text{ sec}$ ۷۴
- شکل ۴-۶ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه $t = 2700 \text{ sec}$ ۷۵
- شکل ۴-۷ شماتیک مدل سازی مخزن با ترک موازی در لحظه $t = 3600 \text{ sec}$ ۷۵
- شکل ۴-۸ شماتیک آسیب سازند در لحظه $t = 100 \text{ sec}$ ۷۶
- شکل ۴-۹ شماتیک آسیب سازند در لحظه $t = 900 \text{ sec}$ ۷۶
- شکل ۴-۱۰ شماتیک آسیب سازند در لحظه $t = 1800 \text{ sec}$ ۷۷
- شکل ۴-۱۱ شماتیک آسیب سازند در لحظه $t = 2700 \text{ sec}$ ۷۷
- شکل ۴-۱۲ شماتیک آسیب سازند در لحظه $t = 3600 \text{ sec}$ ۷۸
- شکل ۴-۱۳ مش بندی مدل رشد ترک با ایجاد گرادیان دمایی ۸۱
- شکل ۴-۱۴ تغییرات دما حول ترک اولیه با تزریق ثابت در مدت زمان $t = 900 \text{ sec}$ ۸۱
- شکل ۴-۱۵ تغییرات دما حول ترک اولیه با تزریق ثابت در مدت زمان $t = 1800 \text{ sec}$ ۸۲
- شکل ۴-۱۶ تغییرات دما حول ترک اولیه با تزریق ثابت در مدت زمان $t = 2700 \text{ sec}$ ۸۲
- شکل ۴-۱۷ تغییرات دما حول ترک اولیه با تزریق ثابت در مدت زمان $t = 3600 \text{ sec}$ ۸۳
- شکل ۴-۱۸ تغییرات دما حول ترک اولیه با تزریق ثابت در مدت زمان $t = 7200 \text{ sec}$ ۸۳
- شکل ۴-۱۹ تغییرات نصف طول ترک با تأثیر و بدون تأثیر دمای سیال در مدت زمان تزریق ثابت سیال ۸۶

- شکل ۴-۲۰ تغییرات دهانه‌ی عرض ترک در دو حالت با تأثیر و بدون تأثیر دمای سیال تزریق در طول ترک در سازند ۸۶
- شکل ۴-۲۱ بازشدگی دهانه‌ی ترک با تأثیر و بدون تأثیر دمای سیال در مجاورت چاه و میانگین در طول ترک در مدت‌زمان تزریق ثابت سیال ۸۷
- شکل ۴-۲۲ تفاوت نفوذپذیری بهبود یافته و نفوذپذیری برجای مخزن با پیشروی در طول شکستگی هیدرولیکی ۸۸
- شکل ۴-۲۳ نمودار تجمعی پیش‌بینی تولید نفت با شکست هیدرولیکی حرارتی و بدون آن در مخزن مورد آزمایش ۹۰
- شکل ۴-۲۴ نمودار تفاوت تولید تجمعی هیدروکربن با و بدون شکستگی حرارتی ۹۱
- شکل ۴-۲۵ نمودار کاهش چاه مورد آزمایش با داده‌های ژئومکانیکی و میزان تخمین برداشت هیدروکربن سالانه از این مخزن در مقایسه با برداشت بدون انجام فرآیند شکست هیدرولیکی در چاه ۹۱
- شکل ۴-۲۶ تأثیر تخلخل بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۹۳
- شکل ۴-۲۷ تأثیر نفوذپذیری بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۹۴
- شکل ۴-۲۸ تأثیر مدول یانگ بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۹۵
- شکل ۴-۲۹ تأثیر فشار منفذی بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۹۶
- شکل ۴-۳۰ تأثیر تنش برجا بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۹۹
- شکل ۴-۳۱ تأثیر گرادیان دمایی بر تولید کلی مخزن تحت فرآیند شکست هیدرولیکی ۱۰۰

فهرست جداول:

جدول ۱-۳	پارامترهای ورودی اعتبار سنجی روش تحلیلی KGD [۲]	۵۲
جدول ۲-۳	پارامترهای تحلیل حرارتی [۷۴]	۵۴
جدول ۳-۳	مشخصات سنگ، آب و ترک [۷۳]	۵۷
جدول ۴-۳	پارامترهای موهر-کلمب برای حالت کششی (Mode I)	۶۲
جدول ۵-۳	داده‌های ژئومکانیکی استخراج شده از مطالعات شرکت اکتشاف ملی نفت ایران	۶۷
جدول ۱-۴	داده‌های مدل سازی حرارتی	۸۰
جدول ۲-۴	داده‌های مخزن برای تولید تجمعی سالانه و منحنی کاهش	۸۹
جدول ۳-۴	داده‌های ژئومکانیکی و مخزنی برای منحنی کاهش تولید	۸۹

١ فصل اول مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

از زمانی که شکست هیدرولیکی در حدود دهه ۱۹۳۰ توسط گریب و استوسر^۱ [۱] معرفی شد، این تکنیک به طور فعال در توسعه مخازن غیرمتعارف و سیستم‌های زمین‌گرمایی پیشرفته (EGS) مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از این فرآیند برای افزایش بهره‌وری با افزایش خلل و شکاف موجود در مخزن ضروری است. برای طراحی شبکه‌های شکست موفق، درک برهم‌کنش‌های پیچیده تغییر شکل سنگ، جریان سیال و تبادل حرارت در انتشار شکستگی بسیار مهم است. با این حال، وجود چندین چالش ژئومکانیکی مانند نفوذپذیری بسیار کم، عدم قطعیت در خواص سنگ و پیچیدگی رشد ترک، طراحی را پیچیده می‌کند. عملاً، یک فرآیند شکست هیدرولیکی شامل پدیده‌های فیزیکی پیچیده‌ای مانند جریان سیال چند فاز، انتقال حرارت رسانا و همرفتی و رشد ترک بسیار پیچیده در هندسه‌های پیچیده است. بنابراین، هنگامی که شکستگی ناشی از سیال با استفاده از روش‌های عددی مدل‌سازی می‌شود، از فرآیند شکست هیدرولیکی برای ساده‌سازی فشار هیدرولیکی پیوسته از طریق مسیر شکست ناشی از تزریق سیال استفاده می‌شود.

با این حال، دشوارترین جنبه در شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی نحوه توصیف پدیده‌های همزمان فعل‌وانفعالات پیچیده جریان سیال و تغییر شکل سنگ در یک مخزن متخلخل است؛ زیرا تغییرات مکانی و زمانی تنش‌های مخزن با تزریق سیال، مشکلات عددی را در حین حل فرآیندهای تنیدگی کامل افزایش می‌دهد. وجود شکستگی‌ها به طور کیفی جریان سیال را که اصولاً از طریق این شبکه‌های شکستگی در توده سنگ تغییر می‌کند و جریان سیال بر روی نواحی با روزنه کوچک شکستگی‌ها متمرکز می‌شود. تفسیر عددی صحیح و تجزیه و تحلیل مکانیزم شکست توده سنگ، انتشار شکست ناپیوسته در اشکال پیچیده، تأثیر بر جریان سیال و تأثیر دما بر شبکه شکستگی نکات کلیدی برای ایجاد و توسعه شکست هیدرولیکی قابل اعتماد است.

۲-۱ اهمیت موضوع

مطالعه رفتارهای ژئومکانیکی با تمرکز بر ارزیابی اثر متقابل تنش، فشار، دما، خواص مکانیکی، شکستگی‌های طبیعی و شکستگی‌های هیدرولیکی در توده سنگ، به دلیل نقش حیاتی آن در شناسایی و توسعه میدان‌های نفت و گاز، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. در سال‌های اخیر، علاقه به شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی کاملاً تنیده شده افزایش یافته است. با این حال، به دلیل رفتار همراه تغییر شکل سنگ، جریان سیال و انتقال حرارت تحت رژیم‌های تنش مختلف، مقابله با این مشکل بسیار چالش‌برانگیز است. پیش‌از این چندین شبیه‌ساز شکست هیدرولیکی دوبعدی، شبه سه‌بعدی و مسطح سه‌بعدی مبتنی بر مکانیک خطی الاستیک (LEFM)^۲ توسعه داده شده‌اند. این شبیه‌سازها تنها زمانی به خوبی کار می‌کنند که هندسه شکستگی به سادگی

^۱ Grebe and Stoesser

^۲ linear elastic fracture mechanics

محدود به یک صفحه باشد مانند مدل KGD^2 [۲] و PKN^3 [۳]. مدل PKN برای شکستگی‌های طولانی که دارای ارتفاع محدود و سطح مقطع عمودی بیضوی هستند، قابل استفاده است، در حالی که مدل KGD برای شکستگی‌های کوتاه استفاده می‌شود که در آن فرضیات کرنش صفحه برای مقاطع افقی قابل اعمال است و محاسبه‌ی عرض مستقل از ارتفاع است. با این حال، تحریک مخازن نفتی و زمین‌گرمایی معمولاً شامل شکستگی‌های متعدد ناشی از فشار هیدرولیکی است که فرآیند شکستگی را با پیچ‌خوردگی و بسته شدن زود هنگام شکستگی با تعامل شبکه‌های شکست پیچیده می‌کند. در مسائل عملی، مسیرهای گسیختگی متغیر هستند و به خواص تغییر شکل ماده، استحکام مواد و ناهمگونی سنگ بستگی دارند که به‌طور بحرانی بر انتشار شکستگی هیدرولیکی تأثیر می‌گذارند.

علاوه بر این، جریان سیال در شکستگی‌ها، انتشار شکستگی هیدرولیکی را در شرایط فشار بالا پیچیده می‌کند؛ بنابراین تنش‌های مخزن از نظر مکانی و زمانی در ترکیب‌های پیچیده بین تغییر شکل سنگ، فشار منفذی و دما متفاوت است. رفتارهای تنیدگی پیچیده مکانیزم‌های شکست سنگ، جریان سیال در شکستگی‌ها و هندسه ترک پیچیده چالش‌های عددی بسیار دشواری را برای اجرای شکست هیدرولیکی ایجاد می‌کند؛ بنابراین، یک روش ساده‌سازی برای مسئله پیچیده برای توسعه شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی ضروری است. در این مطالعه، فرآیندهای پیچیده شکستگی هیدرولیکی به سه فرآیند تنیده شده ساده‌سازی شدند:

۱- تغییر شکل سنگ ناشی از فشار هیدرولیکی

۲- جریان سیال (فشار سیال) در شکستگی‌های ناشی از تزریق سیال

۳- تأثیر دما بر شبکه‌ی شکستگی (دهانه ترک، نفوذپذیری و افزایش میزان تولید سالانه در مخزن موردنظر)

با این وجود، شبیه‌سازهای مخزن معمولی تنها یک پارامتر ساده، یعنی تراکم‌پذیری منافذ را برای اصلاح تداخل معرفی می‌کنند که برای در نظر گرفتن اثرات ژئومکانیکی واقعی کافی نیست. برای برخی از مخازن حساس به تنش، مانند مخازن کم تراکم، بسیار فشرده، مخازن گسل دار و شکسته، اثرات ژئومکانیکی می‌تواند بر جریان محیط متخلخل غالب باشد. از این رو برای نگاه واقع‌گرایانه به شرایط استخراج از مخازن غیرمتعارف و محاسبه‌ی دقیق‌تر میزان تولید نفت، استفاده از بررسی‌های ترمو-پورو-مکانیکی (THM)^۵ امری حیاتی و ضروری هست.

۱-۳ ضرورت تحقیق

هدف اصلی این پژوهش ارائه تفسیر عددی برای فرآیندهای شکست هیدرولیکی پیچیده برای افزایش بهره‌وری از مخازن غیرمتعارف هست. قبل تر چندین شکست هیدرولیکی در مخازن ایران صورت گرفته است که تمامی آن‌ها به دلیل عدم وجود علم بررسی ژئومکانیک به صورت تخصصی، به طریقی ناموفق بوده و به شکست منتهی شده است؛ از این رو این مبحث حیاتی برای افزایش بهره‌وری مخازن نفت نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

^۲ Geertsma and De Klerk

^۴ Perkins and Kern

^۵ Thermo-Hydro-Mechanical

برای شبیه‌سازی فرآیندهای تنیده شده، عوامل کلیدی زیر برای طراحی شبکه‌ی پیچیده‌ی شکست هیدرولیکی در مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند. فرضیات این پژوهش عبارتند از:

ابتدا فرض می‌شود که توده سنگ متخلخل به‌طور کامل با جریان سیال تحت قانون دارسی اشباع شده است و پاسخ مخزن توسط فرآیندهای تنیده شده تغییر شکل سنگ، فشار منفذی و دما در طول انتشار شکست هیدرولیکی با استفاده از تجزیه و تحلیل ترمو-هیدرو-مکانیکی (THM) کاملاً تنیده شده تحت حاکمیت قوانین بقای جرم، مومنتوم و انرژی توصیف می‌شود [۴].

جریان سیال در داخل شکستگی‌ها به‌صورت غیرقابل تراکم و تک فاز با جریان نیوتنی در نظر گرفته می‌شود، به‌طوری‌که توزیع فشار هیدرولیکی در داخل شکستگی‌ها با شرایط مرزی بدون جریان در نوک ترک حل می‌شود. رشد ترک با استفاده از معیار نرخ رهاسازی حداکثر انرژی مدل‌سازی می‌شود.

از قوانین حاکمیت انتقال دما (رسانایی) برای بررسی و تأثیر سیال شکستگی سرد درون مخازن با دمای بالا برای ایجاد ترک‌های با نفوذپذیری بیشتر استفاده می‌شود.

در نتیجه، توضیحات بهتری برای پیچیدگی شکست و فرآیندهای تنیده شده می‌توان به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی عددی اطلاعات مهمی را برای طراحی عملیات شکست هیدرولیکی فراهم می‌کند. از نظر عددی، رفتار ترک ناپیوسته برای اعمال یک مدل المان محدود مبتنی بر محیط پیوسته بسیار چالش‌برانگیز است، زیرا ناپیوستگی قوی منجر به ناپایداری راه‌حل می‌شود و به حل‌کننده ماتریس در مقیاس بزرگ نیاز دارد؛ بنابراین این پژوهش باهدف یافتن یک مدل عددی قوی برای توصیف رفتار شکست پیچیده در مخازن با نفوذپذیری بسیار کم با استفاده از مکانیک شکست برای ایجاد یک شبکه شکستگی از روش المان محدود توسعه‌یافته (XFEM) برای شبیه‌سازی رشد ترک و تنیدگی با تأثیر حرارت، استفاده می‌کند. لازم به ذکر است که درک تأثیر تغییرات تنیدگی تغییر شکل سنگ، فشار منفذی و دما در طول فرآیند برای توسعه مخزن و عملکرد طولانی‌مدت آن امری حیاتی است.

یک پدیده شکست حرارتی ثانویه معمولاً هنگامی مشاهده می‌شود که سیال خنک شده به مخزن داغ تزریق می‌شود، به‌خصوص اگر اختلاف دما بین تزریق سیال سرد و دمای مخزن زیاد باشد. این موضوع برای یک مخزن زمین‌گرمایی بسیار مهم است. رشد ترک ناشی از حرارت ممکن است بهره‌وری چاه را پس از یک دوره قابل توجه تزریق پایدار افزایش دهد [۵]. هنگامی که یک سیال شکست سرد به یک مخزن داغ تزریق می‌شود، سنگ مخزن با سرد شدن سنگ در طول تبادل گرما منقبض می‌شود و در نهایت با افزایش تنش در مخزن، شروع شکستگی ناشی از حرارت را آغاز می‌کند. در این پژوهش پدیده شکست حرارتی ثانویه با استفاده از مدل عددی المان محدود توسعه‌یافته مورد مطالعه و شبیه‌سازی قرار گرفت و در انتها به بررسی و تحلیل میزان برداشت از مخزن مورد مطالعه پرداختیم.

۴-۱ ساختار پژوهش

در بخش ۱ از مقاله، انگیزه و اهداف این تحقیق به طور کامل شرح داده شده است. همچنین، چالش‌های عددی و مشکلات شبیه‌سازی در زمینه شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته و یک متدولوژی برای شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی پیشنهاد شده است.

در بخش ۲، در این بخش ابتدا به کلیات مسئله‌ی پژوهش از جمله حالت‌های شکست و معیار موهر کلمب و ساخت مدل مکانیکی زمین پرداخته و سپس نوع مدل‌سازی عددی که مناسب مبحث رشد ترک می‌باشد را از میان روش‌های عددی متعدد معرفی می‌کند. پس‌از آن، روش منحنی کاهش تولید معرفی و بحث خواهد شد. در انتها به مروری بر مطالعات گذشته در مبحث شکست هیدرولیکی و همچنین تاثیر THM بر شرایط عملیات می‌پردازیم.

در بخش ۳، روابط حاکم برای شکست سنگ ترد با استفاده از تئوری مکانیک آسیب پیوسته و مدل نرخ آزادسازی حداکثر انرژی بیان خواهد شد. قانون تکامل آسیب الاستیک - شکننده برای سنگ‌های شکننده بر اساس فرضیه نرخ اتلاف انرژی معادل ایجاد می‌شود. معادلات اساسی روش‌های طراحی شبیه‌سازی شکست هیدرولیکی و معادلات حاکم معرفی شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در انتها به معرفی نرم‌افزار آباکوس^۶ و ماژول‌های کاربردی آن در مبحث مدل‌سازی ژئومکانیکی و صحت سنجی داده‌های مرجع با استفاده روش عددی موردنظر در این نرم‌افزار می‌پردازیم.

در بخش ۴، با استفاده از داده‌های حفاری ارائه شده توسط شرکت اکتشاف ملی نفت ایران، شکست هیدرولیکی در مخزن نفتی و تأثیر حرارت بر هندسه ترک مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت، نمودارهای تجمیعی تولید هیدروکربن و منحنی کاهش تولید بدون شکست هیدرولیکی و با استفاده از آن بررسی و مقایسه می‌شوند. علاوه بر بررسی شکست هیدرولیکی در مخزن نفتی و تأثیر حرارت بر هندسه ترک، یک تحلیل حساسیت نیز انجام خواهد شد. این تحلیل حساسیت بر روی ویژگی‌های سنگ و مخزن مانند نفوذپذیری، تنش‌های محیطی، مدول یانگ، تخلخل و فشار منفذی صورت می‌گیرد. هدف از این تحلیل حساسیت، بررسی تأثیر تغییرات در این ویژگی‌ها بر تولید تجمعی در شرایط مختلف است.

در بخش ۵، جمع‌بندی کلی پژوهش، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی ذکر شده است.

^۶ ABAQUS

۲ فصل دوم کلیات و مروری بر ادبیات پژوهش

۲-۱ مقدمه

شکست هیدرولیکی یک فرآیند چندفیزیکی^۷ پیچیده است که در آن یک سیال با فشار مشخص به داخل سنگ تزریق می‌شود و این فشار هیدرولیکی باعث ایجاد و رشد ترک درون سنگ می‌شود. برای شبیه‌سازی این فرآیند، نیازمند مدل‌سازی چندین جزء هستیم. این جزءها عبارتند از: جریان سیال درون شکستگی، تغییر شکل مکانیکی محیط متخلخل به دلیل بار هیدرولیکی، گسترش ترک، نشست سیال شکست به داخل ساختار سنگ و تبادل دما بین سیال شکستگی و ساختار سنگ. با این حال، به دلیل وسعت و پیچیدگی فنی و اقتصادی سازندهای زیرزمینی، به طور عملی امکان دسترسی به ویژگی‌های ژئومکانیکی در همه فواصل لایه‌ها وجود ندارد. برای به دست آوردن این اطلاعات، می‌توان از مدل‌سازی ژئومکانیکی یک یا چند بعدی استفاده کرد. بنابراین، با استفاده از اطلاعات چاه‌نگاری، گزارش‌های حفاری و زمین‌شناسی منطقه، ما یک مدل‌سازی تک‌بعدی ژئومکانیکی انجام دادیم. این مدل‌سازی به ما امکان می‌دهد تا ویژگی‌های ژئومکانیکی مربوطه را در نقاط مورد نظر بررسی کنیم و نتایج را براساس اطلاعات موجود تجزیه و تحلیل کنیم.

با توجه به این مدل‌سازی تک‌بعدی ژئومکانیکی، می‌توانیم بررسی‌ها و تحلیل‌های لازم را برای درک بهتر از فرآیند شکست هیدرولیکی انجام دهیم. این نتایج به مهندسان نفت و تصمیم‌گیران صنعت نفت در انتخاب روش‌ها و استراتژی‌های بهینه برای طراحی و بهره‌برداری از مخازن نفتی کمک می‌کند. همچنین، این تحلیل حساسیت به ما امکان می‌دهد تا تأثیر ویژگی‌های سنگ و مخزن مانند نفوذپذیری، تنش‌های محیطی، مدول الاستیسیته، تخلخل و فشار منفذی بر تغییرات تولید تجمعی را در شرایط مختلف بررسی کنیم و بهینه‌سازی‌های ممکن را شناسایی کنیم.

۲-۲ مدل مکانیکی زمین (MEM-1D)

مدل ژئومکانیک یا MEM^۸ توصیفی از خواص الاستیک و مقاومت سنگ، تنش‌های برجا و فشار منفذی به‌عنوان تابعی از عمق است که به ستون چینه‌شناسی ارجاع داده می‌شود. هنگامی که یک MEM ساخته می‌شود، می‌توان از آن برای هر تحلیل ژئومکانیکی استفاده کرد. یک نمودار روند اصولی از مراحل کلیدی MEM در شکل (۲-۲) نشان داده شده است. طیف گسترده‌ای از داده‌ها برای ساخت MEM استفاده شده است از جمله:

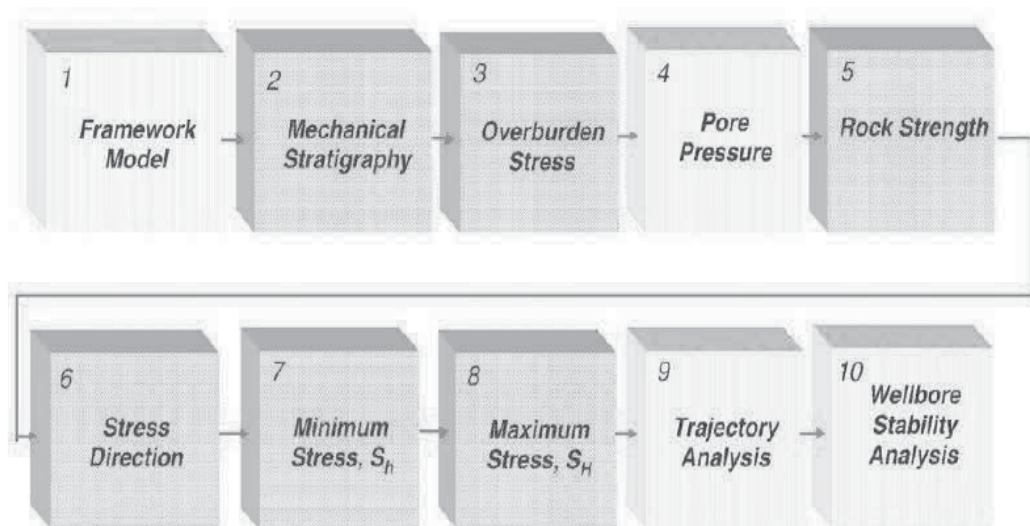
• لاگ‌های زمین‌شناسی (DTCO(Delta Sonic), DSI, Density(RHOB), Caliper,)

Gamma ray) که از گزارش اداره زمین‌شناسی به دست می‌آید

^۷ Multiphysics

^۸ Mechanical Earth Modeling

- لاگ‌های (CNLC, Permeability, Porosity) که از گزارش اداره‌ی مهندسی نفت به دست می‌آیند.



شکل ۱-۲ مراحل کامل مدل مکانیکی زمین

۱-۲-۲ خواص همکن و روابط اساسی مدل مکانیکی زمین

خواص سنگ نشان‌دهنده رفتار تغییر شکل سنگ است. رفتار تنش-کرنش سنگ به نوع سنگ بستگی دارد. برای مواد الاستیک همسانگرد، رفتار تنش-کرنش را می‌توان با دو پارامتر مدول یانگ و نسبت پواسون، توصیف کرد. خواص الاستیک سنگ ورودی‌های اساسی برای محاسبه‌ی استحکام سنگ و تنش‌های برجا هستند. خواص استاتیکی را می‌توان از منحنی‌های تنش-کرنش آزمایش‌های تراکم آزمایشگاهی تعیین کرد. اگر چگالی، سرعت فشاری و برشی در دسترس باشد، می‌توان خواص الاستیک دینامیکی را محاسبه کرد. همبستگی‌های کلی برای تعیین خواص الاستیک از اندازه‌گیری‌های DSI استفاده‌شده است که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند [۶]:

$$E_{dyn} = \rho \times V_s^2 \times \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \quad (Pa) \quad (1-2)$$

$$v_{dyn} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2V_p^2 - 2V_s^2} \quad (2-2)$$

$$G_{dyn} = \rho \times V_s^2 \quad (Pa) \quad (3-2)$$

$$K_{dyn} = \rho \times (V_p^2 - (\frac{4}{3})V_s^2) \quad (4-2)$$

که در آن ρ چگالی سنگ V_p سرعت امواج فشاری، V_s سرعت امواج برشی، E_{dyn} مدول الاستیک دینامیک، v_{dyn} نسبت پواسون دینامیک، G_{dyn} مدول برشی و K_{dyn} مدول حجمی دینامیک است. در شرایط دینامیکی که شامل انتشار یک موج الاستیک است، به نظر می‌رسد که سنگ‌ها واکنش سخت‌تری نسبت به بارگذاری استاتیکی مانند آزمایش‌های آزمایشگاهی مکانیکی یا تحت بارگذاری استاتیک در زمین یا نزدیک به چاه نشان می‌دهند. درواقع، هرچه سنگ ضعیف‌تر و انعطاف‌پذیرتر باشد، تفاوت بین خواص دینامیکی و خواص استاتیکی بیشتر است. از آنجایی که تغییر شکل و شکست چاه شامل فرآیندی نسبتاً کند در مقایسه با انتشار موج با فرکانس بالا است، داده‌های استاتیکی برای تحلیل‌های ژئومکانیک موردنیاز است. از معادلات لیزی^۹ [۷] برای محاسبه‌ی مدول یانگ و ضریب پواسون استاتیکی استفاده می‌شود که تطابق خوبی برای سنگ‌آهک و دولومیت دارد:

^۹ Lacy