بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه تربیت مدرّس
دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی عمران-خاک و پی

مدل‌سازی عددی شکست‌هیدرولیکی در مخازن شکسته‌شده طبیعی

مصطفی ملاعلی

استاد راهنما:

دکتر محمود یزدانی

استاد مشاور:

دکتر علی‌اکبر گلشنی

تیر ۱۳۹۰

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

آقای مصطفی ملاعلی پایان نامه ۶ واحدی خود را با عنوان **مدل سازی عددی پدیده شکست هیدرولیکی در مخزن شکسته طبیعی** در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۲۹ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه کارشناسی ارشد خاک وپی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر محمود یزدانی	استادیار	
استاد مشاور	دکتر علی اکبر گلشنی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر مصطفی شریف زاده	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر محمد تقی احمدی	استاد	

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ ~~رساله دکتری~~ نگارنده در رشته عمران - حمل و نقل است که در سال ۹۰ در دانشکده مهندسی عمران - مهندسی راه‌آهن دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار ~~خانم~~/جناب آقای دکتر محمود یزدانی ، مشاوره سرکار ~~خانم~~/جناب آقای دکتر علی اکبر گلشن و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مصطفی ملاعلی دانشجوی رشته عمران - حمل و نقل مقطع کارشناسی ارشد

تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: مصطفی ملاعلی

تاریخ و امضا:

۹۰/۱۰/۲۴

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸٤/٤/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی

امضاء

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

چکیده

کشور عزیز ما ایران از منابع عظیم نفت و گاز برخوردار است و هم اکنون بیش از یکصد سال از فرآیند استخراج نفت وگاز می‌گذرد. برای بهره‌برداری بهینه و احیای مخازن نفتی کشور، لازم است که عملیات اضافی روی آنها صورت گیرد. یکی از این روش‌ها، عملیات شکست هیدرولیکی است.

در این پژوهش برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته از روش اجزا محدود توسعه‌یافته استفاده شده است. در این روش در اثر اعمال توابعی، گره‌های اطراف ترک غنی می‌شوند و در نتیجه درجات آزادی بیشتری اختیار می‌کنند. در روش اجزا محدود توسعه یافته، ترک به صورت مجازی مدل می‌گردد و نیازی به تطبیق مش با ترک نیست. همچنین نیازی به استفاده از المان‌های تکینه در نوک ترک نخواهد بود.

در این تحقیق برای انجام مدل‌سازی، یک برنامه کامپیوتری در محیط Matlab به روش اجزا محدود توسعه یافته نوشته شده است که در آن برای مدل‌سازی شکست هیدرولیکی، تغییرشکل مکانیکی ناشی از فشار سیال بر روی سطح ترک و جریان سیال در ترک کاپل شده‌اند. همچنین اثر ترک موجود در انتشار شکست هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفته است. برای صحت‌سنجی برنامه کامپیوتری، نتایج آن با حل تحلیلی KGD موجود مقایسه شده است. در این تحلیل فشار گمانه با افزایش طول ترک افزایش پیدا می‌کند درحالی‌که بازشدگی در محل گمانه با افزایش زمان کاهش می‌یابد. همچنین در بحث بررسی اثر ترک ازپیش موجود در انتشار شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته نشان داده شد که اگر انرژی انتشار شکست هیدرولیکی به اندازه کافی برای غلبه بر تنش نرمال بزرگ باشد یعنی نسبت G/G_c^{frac} بزرگترین باشد، ترک از پیش موجود باز خواهد شد، در غیر این صورت شکست هیدرولیکی مانند حالت کلاسیک آن منتشر خواهد شد.

کلید واژه: شکست‌هیدرولیکی، شکست‌هیدرولیکی در مخازن شکسته‌شده طبیعی، اجزا محدود توسعه‌یافته، مکانیک شکست.

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فصل ۱- کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۱
۱-۲- مخازن نفتی ایران ۱
۱-۳- روش‌های تحریک مخازن نفتی ۴
۱-۳-۱- اسیدکاری ۴
۱-۳-۱-۱- اسیدکاری پوسته چاه ۵
۱-۳-۱-۲- تزریق اسید جهت تعریض نمودن مجراهای ریز سازند ۵
۱-۳-۲- شکست هیدرولیکی ۵
۱-۴- مدل‌سازی شکست هیدرولیکی ۶
۱-۵- فصل‌های پایان‌نامه ۷

فصل ۲- شکست هیدرولیکی ۹

۲-۱- شکست هیدرولیکی ۹
۲-۱-۱- کاربردهای شکست هیدرولیکی ۱۲
۲-۱-۲- عناصر نگهدارنده و قابلیت هدایت هیدرولیکی ترک ۱۲
۲-۱-۳- سیالات مورد استفاده در فرآیند شکست هیدرولیکی ۱۳
۲-۱-۳-۱- سیالات پایه آبی ۱۴
۲-۱-۳-۲- سیالات پایه نفتی ۱۴
۲-۱-۳-۳- سیالات پایه الکی ۱۵
۲-۱-۳-۴- سیالات پایه فوم ۱۵
۲-۱-۴- مدل‌های شکست هیدرولیکی ۱۶
۲-۲- شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته شده طبیعی ۲۰
۲-۲-۱- مرور مطالعات تئوری و آزمایشگاهی اثر ترک‌های طبیعی بر انتشار شکست هیدرولیکی ۲۱
۲-۲-۲- تقاطع بین شکست هیدرولیکی و ترک طبیعی ۲۴

فصل ۳- اجزا محدود توسعه یافته ۲۷

۳-۱- مقدمه ۲۷
۳-۲- مروری بر کارهای انجام شده در زمینه XFEM ۲۸
۳-۳- فرمولاسیون اجزا محدود توسعه یافته ۳۲
۳-۳-۱- اجزامحدود ایزو پارامتریک ۳۲

۳-۳-۲- اصول XFEM شکست هیدرولیکی ۳۴
۳-۳-۲-۱- اصول کار مجازی شکست هیدرولیکی ۳۴
۳-۳-۲-۲- گسسته سازی XFEM ۳۶
۳-۳-۲-۳- معادلات حاکم بر اجزا محدود توسعه یافته ۴۰
۳-۴- انتگرال‌گیری روی المان‌های ترک خورده ۴۳
۳-۵- معیار شدت تنش ۴۵
۳-۵-۱- روش تطبیق جابجایی ۴۶
۳-۵-۲- انتگرال دامنه ۴۶
۳-۶- بهم‌آمیختگی ترک ۴۸
۳-۷- رشد ترک ۵۱
۳-۷-۱- مروری بر روابط حاکم بر رشد ترک ۵۱

فصل ۴- کاربرد مکانیسم شکست در روش شکست هیدرولیکی ۵۴

۴-۱- مقدمه ۵۴
۴-۲- رویکرد مکانیک شکست در گسیختن هیدرولیکی ۵۶
۴-۲-۱- محاسبه $K_I(P_a)$ و $K_I(P_w)$ ۵۸
۴-۲-۲- محاسبه $K_I(S_H)$ ۶۰
۴-۲-۳- محاسبه $K_I(S_h)$ ۶۱
۴-۲-۴- جمع آثار قوا ضرایب شدت تنش ۶۱

فصل ۵- مدل سازی شکست هیدرولیکی ۶۷

۵-۱- مدل کاپل شده شکست هیدرولیکی ۶۷
۵-۲- معادلات حاکم ۶۸
۵-۳- گسسته سازی معادله جریان ۷۰
۵-۴- اثرتوأمان جریان سیال و تغییرشکل سنگ ۷۲
۵-۵- معیار انتشار ترک ۷۶

فصل ۶- برنامه کامپیوتری، صحت‌سنجی و نتایج ۸۰

۶-۱- مقدمه ۸۰
۶-۲- برنامه کامپیوتری مکانیک شکست ۸۱
۶-۲-۱- ترک لبه‌ای در یک صفحه محدود تحت کشش تک محوری ۸۳
۶-۳- مثال‌های عددی و بررسی صحت نتایج ۸۶
۶-۳-۱- مدل KGD ۸۶
۶-۳-۲- مدل‌سازی شکست هیدرولیکی کلاسیک و صحت‌سنجی نتایج آن ۸۸
۶-۳-۲-۱- بررسی اثر تغییرات دبی و ویسکوزیته سیال ۹۱

۶-۳-۳- مدل‌سازی برخورد شکست هیدرولیکی با ترک طبیعی از پیش موجود..... ۹۴
۶-۳-۳-۱- تقاطع ترک‌ها..... ۹۴
۶-۳-۳-۲- مدل‌سازی شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته و صحت‌سنجی نتایج آن..... ۹۶
فصل ۷- نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱۰۰
۷-۱- نتیجه‌گیری..... ۱۰۰
۷-۲- موضوعات پیشنهادی..... ۱۰۲
فهرست مراجع..... ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول ۶-۱ مقادیر نرمالایز شده ضریب شدت تنش برای ابعاد مش و طول ترک مختلف..... ۸۵
جدول ۶-۲ داده‌های ورودی برای مقایسه مدلKGD و مدل عددی..... ۸۹
جدول ۶-۳ داده‌های ورودی برای شبیه‌سازی انحراف ترک..... ۹۷

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱ طرح‌واره شکست هیدرولیکی در چاه‌های نفت و گاز..... ۹
شکل ۲-۲ طرحواره پروسه شکست هیدرولیکی در چاه‌های نفت وگاز..... ۱۰
شکل ۲-۳ مقطع افقی یک چاه قائم تحت تنش‌های برجا و فشار گمانه..... ۱۱
شکل ۲-۴ طرحواره هندسی ترک KGD..... ۱۷
شکل ۲-۵ طرحواره هندسی ترک PKN..... ۱۸
شکل ۲-۶ طرح واره هندسی ترک شعاعی..... ۱۹
شکل ۲-۷ تقاطع شکست هیدرولیکی و ترک طبیعی..... ۲۲
شکل ۲-۸ سناریوهای محتمل جهت انتشار شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته..... ۲۵
شکل ۲-۹ طرح واره جداسازی و بازشدگی ترک از پیش موجود توسط شکست هیدرولیکی
(سمت راست گسیختگی برشی، سمت چپ گسیختگی کششی)..... ۲۵
شکل ۳-۱ یک المان محدود ایزوپارامتریک..... ۳۳
شکل ۳-۲ طرحواره دامنه ترک خورده..... ۳۵
شکل ۳-۳ طرحواره جریان سیال در ترک..... ۳۵
شکل ۳-۴ نمایش گره‌های غنی‌شونده در یک المان‌بندی ترک‌دار
(دایره:گره‌هایی که بوسیله تابع پله‌ای غنی‌سازی می‌شوند، مربع:گره‌هایی که بوسیله توابع تکینه غنی‌سازی می‌شوند)..... ۳۸
شکل ۳-۵ سیستم مختصات محلی در نوک ترک..... ۳۸
شکل ۳-۶ توابع غنی‌ساز نوک ترک الاستیک..... ۳۹
شکل ۳-۷ تقسیم‌بندی مثلثی (سمت چپ)، تقسیم‌بندی ذورنقه‌ای (سمت راست)..... ۴۴
شکل ۳-۸ ایجاد المان‌های یک بعدی بر روی سطح ترک..... ۴۵
شکل ۳-۹ نقاط گوسی بر روی سطح ترک..... ۴۵
شکل ۳-۱۰ مقادیر گرهای تابع Q..... ۴۹
شکل ۳-۱۱ بهم‌آمیختگی ترک‌ها..... ۵۰
شکل ۳-۱۲ توابع علامت برای ترک‌های جزئی (A) و جزئی ترک اصلی (B) تابع علامت جدید برای تقاطع ترک‌ها(C)..... ۵۰
شکل ۴-۱ نمودار فشار-زمان در شکست هیدرولیکی..... ۵۵
شکل ۴-۲ گسترش ترک گریفیث در آزمایش شکست هیدرولیکی..... ۵۷
شکل ۴-۳ تنش مماسی عمل کننده بر ترک گریفیث..... ۵۸
شکل ۴-۴ نمایش قسمتی از حجم سنگ تنشهای دوردست S_H و S_h و P_W و P_a اعمالی به دیواره گمانه
و ترک به طول a و شعاع R..... ۵۸
شکل ۴-۵ تفکیک تنش‌های تشکیل‌دهنده شکست هیدرولیکی به چهار بخش..... ۵۹
شکل ۴-۶ تابع بدون بعد $h+1$ درمقابل طول نرمال شده ترک..... ۵۹
شکل ۴-۷ تابع بدون بعد f درمقابل طول نرمال شده..... ۶۰

شکل ۴-۸ تابع بدون بعد g درمقابل طول نرمال شده. ۶۱
شکل ۴-۹ گرادیان شکست تنش‌های برابر محیط تابعی از طول ترک نرمال شده. ۶۳
شکل ۴-۱۰ فاکتور شدت تنش برای نسبتهای مختلف $\frac{S_h}{S_H}$ ۶۳
شکل ۴-۱۱ فشار شکست نرمال شده برای نسبت‌های مختلف S_H و S_h ۶۴
شکل ۴-۱۲ فشار شکست نرمال شده برای تنش‌های مختلف S_H ۶۴
شکل ۴-۱۳ تغییرات فاکتور شدت تنش با دانسیته. ۶۵
شکل ۵-۱ هندسه شماتیک از شکست هیدرولیکی ۶۸
شکل ۵-۲ فلوچارت شبیه‌سازی انتشار شکست هیدرولیکی ۷۵
شکل ۵-۳ مقادیرنرمالایز شده KII،KI وG برای مودI در زوایای مختلف (نرمالایز شده نسبت به حداکثر مقدار آنها). ۷۷
شکل ۵-۴ نرخ رهایی انرژی کافی برای رشد ترک در راستای ترک از پیش موجود که با خط قرمز نشان داده شده است (۸۰- درجه) وجود ندارد. ۷۷
شکل ۵-۵ رشد ترک در ترک از پیش موجود (۶۵- درجه). ۷۸
شکل ۶-۱ فلوچارت برنامه کامپیوتری مکانیک شکست بر پایه XFEM . ۸۲
شکل ۶-۲ صفحه تحت کشش با یک ترک لبه‌ای. ۸۳
شکل ۶-۳ مش‌بندی دامنه صفحه تحت کشش با ترک لبه‌ای. ۸۳
شکل ۶-۴ کانتور تنش σ_{XX}. ۸۵
شکل ۶-۵ کانتور تنش σ_{YY}. ۸۶
شکل ۶-۶ طرحواره مدل KGD . ۸۷
شکل ۶-۷ فشار ترک در گمانه برای مدل KGD و مدل عددی. ۹۰
شکل ۶-۸ بازشدگی ترک در گمانه برای مدل KGD و مدل عددی. ۹۰
شکل ۶-۹ طول ترک درمقابل زمان تزریق برای مدل KGD و مدل عددی. ۹۱
شکل ۶-۱۰ اثر نرخ تزریق سیال گوناگون برروی فشار. ۹۲
شکل ۶-۱۱ اثر نرخ تزریق سیال گوناگون برروی بازشدگی گمانه. ۹۲
شکل ۶-۱۲ اثر مقدارهای مختلف ویسکوزیته سیال در پروفیل فشار. ۹۳
شکل ۶-۱۳ اثر مقدارهای مختلف ویسکوزیته سیال بر بازشدگی. ۹۴
شکل ۶-۱۴ مقادیر بحرانی $G_{FRACTURE}/G_{ROCK}$ برای زوایای مختلف. ۹۵
شکل ۶-۱۵ برخورد ترک طبیعی با ترک هیدرولیکی $G_{FRACTURE}/G_{ROCK} = 0.3$ ۹۷
شکل ۶-۱۶ برخورد ترک طبیعی با ترک هیدرولیکی، $G_{FRACTURE}/G_{ROCK} = 0.9$ ۹۷
شکل ۶-۱۷ پروفیل فشار در طول شکست هیدرولیکی با ترک از پیش موجود و بدون آن. ۹۸
شکل ۶-۱۸ بازشدگی در طول شکست هیدرولیکی با ترک از پیش موجود و بدون آن. ۹۸

فصل ۱- کلیات

۱-۱- مقدمه

کشورهای خاورمیانه ۶۰ درصد مخازن قطعی نفت جهان و ۴۰ درصد مخازن گاز طبیعی دنیا را دارا هستند[۱]. مخازن خاورمیانه عمدتاً سن مزوزوئیک، تله از نوع ساختمانی، سنگ مخزن کربناته، عمق مخزنی متوسط (کمتر از ۴/۵کیلومتر) و قابلیت بازیافت دارند، که در ۶۰ سال اخیر اکتشاف یافته‌اند[۲]. کشور ما از لحاظ منابع نفتی و گازی به ترتیب مقام سوم و دوم را در جهان دارد. در واقع ۱۰ درصد کل نفت کره زمین (۱۳۲/۵ بیلیون بشکه) و ۱۶ درصد کل گاز کشف شده جهان (۹۷۱ تریلیون فوت مکعب) در سرزمین ما قرار دارد. تنها کشورهای عربستان‌سعودی و کانادا ذخیره نفتی بیشتری از ایران دارند. در مورد مخازن گازی نیز کشور روسیه رکورد بالاتری از ایران را داراست [۴،۳]. تاریخچه تولید اقتصادی نفت در خاورمیانه با اکتشاف مخزن نفتی (مسجدسلیمان) در سال ۱۹۰۸ در ایران آغاز شد. در سال‌های بعد اکتشافات با میادین نفتی در کویت (۱۹۳۷) و عربستان سعودی (۱۹۳۸) ادامه یافت. قسمت اعظم مخازن ایران در پهنه زمین‌شناسی زاگرس و حوضه خلیج‌فارس واقع شده است. در حدود ۴۳ درصد مخازن ایران جزء مخازن بزرگ و بسیار بزرگ محسوب می‌شوند که تعداد ۶۴ مخزن گازی و نفتی را شامل می‌شود.

روش اکتشاف اکثر مخازن هیدروکربنی ایران، بررسی‌های لرزه‌ای و زمین‌شناسی بوده است ولی در برخی موارد تراوش هیدروکربن‌ها به سطح زمین موجب اکتشاف میادین شده است. برای مثال مخازن مسجد-سلیمان، نفت‌شاه، آقاجری، نفت سفید به این طریق یافت شده‌اند.

۱-۲- مخازن نفتی ایران

جنس سنگ‌های مخزن مختلف است و هر یک دارای ویژگی‌های خاص خود است، اما همه این سنگ‌ها باید متخلخل و ترآوا باشند. دو نوع سنگ مخزن وجود دارد:

۱. ماسه سنگی[1]: این نوع سنگ بهترین سنگ مخزن است. اندازه ذرات آن در حد اندازه دانه‌های ماسه (یک هشتم تا یک شانزدهم اینچ) است. پراکندگی تخلخل درون این نوع سنگ، تا حد زیادی همسان است و به همین دلیل رفتارهای منظمی از خود نشان می دهد. سنگ‌های ماسه سنگی معمولاً دارای درصد تخلخل بالایی هستند و برداشت از این نوع مخازن بسیار آسان‌تر است و درصد بیشتری از نفت این مخازن قابل بازیابی است. مشکل این مخازن آن است که همراه با نفت، ماسه نیز از چاه استخراج می‌شود و برداشت ماسه از این نوع مخازن زیاد است؛ این خود باعث آسیب رساندن به دستگاه‌ها و تجهیزات بهره‌برداری می‌شود. به همین دلیل باید با روش‌هایی، ذرات ماسه را در جای خود محکم کرد تا مانع از حرکت آن‌ها به سمت چاه شد.

۲. سنگ مخزن آهکی یا کربناته[2]: سنگ‌های آهکی نمونه‌ی دیگر سنگ‌های مخزن هستند. تخلخل این سنگ‌ها معمولاً پایین است و کمتر از تخلخل سنگ‌های ماسه سنگی است. تخلخل این نوع سنگ‌ها بیشتر از نوع شکاف‌هایی است که دراثر عوامل مختلفی مثل فشار، انحلال و .... در سنگ ایجاد شده است. رفتار این نوع مخازن زیاد منظم نیست. شناخت رفتار مخازن آهکی بسیار مشکل است.

صرفاً از لحاظ تعداد مخازن و بدون توجه به حجم هیدروکربن‌ها تقریباً ۹۰ درصد مخازن بزرگ ایران کربناته و ۱۰ درصد ماسه سنگی می‌باشد[۲]. به نظر می‌رسد از لحاظ حجم هیدروکربنی نیز نسبت مخازن کربناته به ماسه سنگی تقریباً ۹ به ۱ صادق باشد. مخازن اهواز، نوروز، فریدون، ابوذر، فروزان و سروش از مخازن بزرگ ماسه سنگی و برخی از مشهورترین مخازن بزرگ کربناته شامل میدان پارس جنوبی، آزادگان، آسماری، هفت کل، بی‌بی حکیمه و خانگیران است.

[1] Sand stone Reservoir
[2] Carbonate Reservoir

ایـران دارای مخـازن شکسـته بـزرگ و بسـیار بزرگـی مـی‌باشـد کـه غالبـاً سـنگ مخـزن آنهـا سـازند آسماری با سن الیگو میوسن مـی‌باشـد مخـازن آقـاجری، بـی‌بـی حکیمـه، هفـت کـل، سـلیمان (کـوه آسـماری)، کـازرون (کـوه دشـتک)، لالـی (کـوه پابـده-گـورپی)، گچسـاران (کـوه پـاهین)، پـاریس، پازانان، کرنج، پـر سـیاه و مسـجد سـلیمان از ایـن جملـه مخـازن هسـتند. همچنـین شکسـتگی گـروه بنگسـتان در مخـزن بـل حـوران و یامامـا در مخـزن دورود (هـر دو بـه سـن کرتاسـه) عامـل اصـلی ایجاد مخزن بوده است[۵].

مخازن نفتی ایران دارای سـاختار متفـاوتی نسـبت بـه مخـازن نفتـی دنیـا مـی‌باشـند. همـان‌طـور کـه اشـاره شـد، اکثـر ایـن مخـازن سـاختاری کربناتـه داشـته و تنهـا ۱۰ درصـد از آن‌هـا دارای سـاختار ماسه‌ای هستند. از طرفـی، بخـش نسـبتاً زیـادی از نفـت موجـود در ایـن مخـازن سـنگین بـوده و بـه آسـانی قابـل استحصـال نمـی‌باشـند. مقایسـه‌ای بـین مخـازن نفـت ایـران و سـایر کشـورهای جهـان صـورت گرفتـه اسـت. ضـریب بازیافـت نفـت بـرای اکثـر مخـازن هیـدروکربنی ایـران در حـدود ۲۴ درصد گـزارش شـده اسـت کـه ایـن مقـدار بسـیار کمتـر از ضـریب بازیافـت متـداول نفـت در جهـان می‌باشـد. از اینـرو مـی‌تـوان گفـت کـه در کشـور مـا ایـران میـزان نفـت بـاقی‌مانـده در یـک مخـزن هیـدروکربنی نسـبت بـه مقـدار برداشـت شـده از آن بسـیار زیـاد اسـت. بنـابراین چنانچـه نفـت استحصال نشده مخازن اسـتخراج نگـردد، در آینـده‌ای نـه چنـدان دور بـا کـاهش شـدید در تولیـد از مخازن نفتی روبرو خواهیم شد.

از طرفی دیگر بسـیاری از مخـازن نفـت و گـاز بـا نفوذپـذیری بـالا در نقـاط مختلـف جهـان، در حـال تمام شدن هسـتند. از ایـن رو، تـأمین مـواد خـام اولیـه مـورد نیـاز بـرای مصـارف گونـاگون صـنعتی، بعضـاً از مخـازن بـا نفوذپـذیری پـایین صـورت مـی‌گیـرد. همچنـین پـس از اسـتخراج طـولانی مـدت محصـولات هیـدروکربنی، فشـار طبیعـی و اولیـه مخـزن نفتـی کـاهش یافتـه و تـرک‌هـای اولیـه در مخزن مسدود می‌شوند و تولیـد مخـازن پـایین مـی‌آیـد. بنـابراین بـرای بهـره‌بـرداری بهینـه و احیـای

ایـن مخـازن، لازم اسـت کـه عملیـات اضـافی روی ایـن نـوع مخـازن صـورت گیـرد. ایـن عملیـات اضافی، افزایش بازده چاه را در پی دارد.

۱-۳- روش‌های تحریک مخازن نفتی

دستیابی به نقاط مختلف مخازن نفت از طریق حفر چاه در مخزن مورد نظر انجام می‌شود. پس از حفر چاه، نفت بوسیله جریان در محیط سنگی به طرف چاه حرکت نموده و نفت استحصال شده از طریق چاه به خارج منتقل می‌گردد. جریان ورودی از مخزن به چاه ندرتاً مطابق دبی پیش‌بینی شده است زیرا در اثر پایین بودن نفوذپذیری مخزن و یا صدمات وارده شده به مخزن محدودیتی در جریان سیال ایجاد شده و مجاری انتقال سیال از مخزن به چاه مسدود می‌گردد. جهت رفع این مشکل و افزایش ارتباط چاه با مخزن معمولاً از روش‌های تحریک استفاده می‌شود.

به‌طور کلی دو روش اسیدکاری و شکست هیدرولیکی جهت تحریک وجود دارند که روش انتخابی مورد استفاده به هدف نهایی فرآیند تحریک بستگی دارد.

۱-۳-۱- اسیدکاری

هدف از تزریق اسید به چاه، ایجاد ارتباط بهتر بین سازند چاه از طریق حل کردن قسمت‌هایی از محیط کربناته اطراف، در اسید است که در نتیجه بهره‌وری چاه بهبود یافته و با افت فشار مخزن میزان تولید افزایش می‌یابد. تسهیل و افزایش جریان سیال از سازند به داخل چاه ممکن است به یکی از حالات زیر انجام گیرد:

۱. مجراهایی که هیدروکربن از آن عبور می‌کند تا به داخل چاه برسد ممکن است در اثر مواد مسدود کننده‌ای مانند مواد رسوبی گل حفاری مسدود گردند. در این حالت اسید با حل کردن آن‌ها، این منفذها را باز نموده و عبور هیدروکربن ها را آسان می‌کند.

۲. اسید مجراهای تنگ سازند را تعریض نموده و عبور سیالات را آسان تر می‌نماید.

۱-۳-۱-۱- اسیدکاری پوسته چاه

متداول‌ترین و آسان‌ترین حالت، اسیدکاری پوسته چاه است. هدف از تزریق اسید در این حالت برطرف نمودن مواد رسوبی است که توسط گل حفاری در پوسته نزدیک حفره چاه بجا مانده است. این مواد ممکن است تا ۱۵ سانتی‌متر اطراف حفر چاه نفوذ نموده و نفوذ پذیری طبیعی همین ناحیه را تا مقدار زیادی کاهش دهد. در چنین شرایطی تزریق اسید می‌تواند بهره‌وری چاه را تا چندین برابر افزایش دهد. اگر افت فشار پوسته تعیین شده باشد می‌توان اثر تزریق اسید را از قبل پیش‌بینی نموده و به نتیجه تزریق اسید مطمئن بود.

۱-۳-۱-۲- تزریق اسید جهت تعریض نمودن مجراهای ریز سازند

در این حالت مقدار افزایش بهره‌وری چاه به مقدار اسید مصرف شده بستگی دارد و مقدار اسید مصرف شده به صرفه اقتصادی و امکان تزریق آن مربوط می‌شود.

این روش اسیدکاری معمولاً جهت چاه‌هایی استفاده می‌شود که اندازه‌گیری افت فشار نشان دهد که میزان افت فشار در فواصل نزدیک به دیواره چاه زیاد بوده و چاه دارای مقدار تولید اقتصادی مناسب باشد.

۱-۳-۲- شکست هیدرولیکی

ایجاد شکستگی مصنوعی یکی از روش‌های رایج در جهت انگیزش چاه‌ها برای افزایش تولید نفت و گاز می‌باشد. پروسه شکست هیدرولیکی به عملیاتی اطلاق می‌شود که طی آن، سیالی با فشاری بیشتر از تنش برجای منطقه به محل مخصوصی از چاه که توسط پکرها ایزوله شده است، تزریق شده و درنهایت زمانی که فشار سیال از تنش‌های برجای حاکم بر منطقه فراتر رود، شکست هیدرولیکی رخ خواهد داد. در شکست هیدرولیکی، شکستگی‌هایی از دیواره‌ی چاه به سوی سازند تولیدکننده نفت یا گاز ایجاد می‌شود. این تکنولوژی بارها در دنیا مورد استفاده قرار گرفته و هم اکنون نیز در حال استفاده است. فناوری شکست هیدرولیکی می‌تواند تولید یک چاه را حداقل تا دو برابر افزایش دهد. پیشینه استفاده از این روش به سال ۱۹۳۰ بر

می‌گردد که در یکی از مخازن آمریکا انجام شد. اما اولین بار در سال ۱۹۴۹ از این روش به صورت تجاری و با بهره‌دهی اقتصادی استفاده شد و به خاطر موفقیتی که در افزایش تولید آن چاه نفتی داشت، سریعاً گسترش یافت. در حال حاضر بیش از نیمی از چاه‌های گازی و نفتی آمریکا بدون فن‌آوری شکست هیدرولیکی، قادر به تولید نیستند. امروزه در منطقه آمریکای شمالی ایجاد شکست هیدرولیکی در حدود ۷۰٪ مربوط به چاه‌های گازی و ۵۰٪ مربوط به چاه‌های نفتی است. تولید نفت در تمام چاه‌هایی که از تکنولوژی شکست هیدرولیکی استفاده می‌کنند ۲ تا ۵ برابر شده است.

۱-۴- مدل‌سازی شکست هیدرولیکی

امروزه از روش‌های عددی زیادی جهت مدل سازی شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود که روش اجزا محدود[1] از پرکاربردترین این روش‌هاست. اما اجزا محدود استاندارد به علت استفاده از چند جمله‌ای‌های جبری از مراتب مختلف به تنهایی قادر به مدل کردن ناپیوستگی‌ها از جمله شکست هیدرولیکی نمی‌باشد و برای مدل کردن ناپیوستگی‌ها، نیاز به تغییر در مش اطراف ناحیه ناپیوسته و نیز تغییر در ساختار داخلی المان‌ها را نیازمند می‌باشد. بنابراین بنابر اصل تفکیک پیوستگی که پایه اصلی روش اجزا محدود استاندارد است و با اعمال توابع غنی-ساز مناسب در این اصل، روش اجزا محدود توسعه یافته[2] پایه‌گذاری گردید. برای اولین بار، ملنک و همکارانش[3] در سال ۱۹۹۶ اصل تفکیک پیوستگی[4] را با اعمال توابع خاص جهت حل معادلات دیفرانسیل شرایط مرزی داخلی به کار گرفتند[۶]. بعدها در سال ۱۹۹۹ از همین روش برای مدل کردن ناپیوستگی‌ها در اجزا محدود استاندارد بهره گرفته شد.

[1] Finite Element Method
[2] Extended Finite Element
[3] Malenk
[4] Notion of Partition of Unity

در اثر اعمال توابع مناسب با توجه به اصل تفکیک پیوستگی، گره‌های اطراف ترک غنی می‌شوند و در نتیجه درجات آزادی بیشتری اختیار می‌کنند. به واسطه همین درجات آزادی بیشتر امکان تغییر در جابجایی‌های گره‌ای اطراف ترک فراهم می‌آید. در واقع ترک یا ناپیوستگی به صورت مجازی مدل می‌گردد و نیاز به تطبیق مش با ترک وجود ندارد. همچنین بدلیل اینکه شرایط تکینه[1] در نزدیکی نوک ترک نیز از طریق تابع خاصی در جابجایی‌ها گره‌های اطراف نوک ترک اعمال می‌شود لذا استفاده از المان‌های تکینه نیز در نوک ترک منتفی خواهد بود.

۱-۵- فصل‌های پایان‌نامه

در فصل اول کلیات مربوط به مخازن نفتی و روش‌های ازدیاد تولید و همچنین آشنایی مقدماتی با روش اجزا محدود توسعه‌یافته ارائه شده است. در فصل دوم به بررسی تفصیلی روش شکست هیدرولیکی، مدل‌های شکست هیدرولیکی و شکست هیدرولیکی در مخازن شکسته شده طبیعی پرداخته شده است.

فصل سوم به کلیات کارهای انجام شده و فرمول‌بندی روش اجزا محدود توسعه‌یافته و همچنین روش‌های تعیین معیار شدت تنش و رشد ترک پرداخته است. در فصل چهارم، کاربرد مکانیسم شکست در روش شکست هیدرولیکی ارائه شده است.

فصل پنجم نیز به مدل‌سازی شکست هیدرولیکی پرداخته است. در این فصل فرمول‌بندی جریان سیال و اثر توأمان جریان سیال و تغییرشکل سنگ و همچنین الگوریتم شبیه‌سازی انتشار شکست هیدرولیکی ارائه شده است.

فصل ششم به ارائه مثال‌ها، صحت‌سنجی و بررسی نتایج حاصل از برنامه پرداخته است. فصل هفتم نیز نتیجه‌گیری کلی از تمام فصول پایان‌نامه ارائه خواهد شد. در پایان برای ادامه کار تحقیقاتی در این شاخه پیشنهادهایی داده می‌شود.

[1] Singularity Condition