



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری

مهندسی عمران - گرایش مکانیک خاک و پی

مدل سازی حرکت نفت در محیط متخلخل الاستوپلاستیک به روش چند مقیاسی و مش بندی تطبیقی

**Modeling of Oil Transport in Elastoplastic Porous Media Using a
Multiscale Method with Adaptive Mesh Refinement**

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم زاده

تحقیق و نگارش:

محمد صنایع پسند

شهریور ۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



۱۳۰۷
دانشگاه خوارزمی
دانشکده مدیریت
دفتر تحصیلات تکمیلی

فرم تأیید انجام اصلاحات مربوط به رساله
کارشناسی ارشد / دکترا

سرپرست محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده عمران

احتراماً بدینوسیله تایید می گردد که اصلاحات مورد نظر در رساله کارشناسی ارشد / دکترا
دانشجو **مهدی به** رشته **مکانیک** تحت عنوان: **مطالعه تجربی و عددی رفتار پلاستیک در ورقهای فولادی**
به سرپرستی آقای دکتر **قاسم زاده** که در تاریخ **۱۳۹۸/۰۶/۳۱** دفاع نموده است در متن لحاظ گردیده است.
ضمناً یک نسخه از رساله کارشناسی ارشد ایشان تحویل اینجانب گردید.

۱- آقای دکتر **مجتبی سزالی** استاد راهنما امضاء

۲- آقای دکتر **استاد مشاور** امضاء

۳- آقای دکتر **عضو هیات داوران** امضاء

۴- آقای دکتر **حمیدی** عضو هیات داوران امضاء

۵- آقای دکتر **زهره** عضو هیات داوران امضاء

۶- آقای دکتر **سلطانی** عضو هیات داوران امضاء

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: مدل سازی حرکت نفت در محیط متخلخل الاستوپلاستیک به روش چند مقیاسی و مش بندی تطبیقی

استاد راهنما: دکتر حسن قاسم زاده

دانشجو: محمد صنایع پسند

شماره دانشجویی: ۹۱۲۲۷۳۶

اینجانب محمد صنایع پسند دانشجوی دوره دکتری مهندسی عمران گرایش مکانیک خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تأیید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو

تاریخ

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده 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 می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
- همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم بہ پدر و مادر عزیز

ہمسفرِ کارِ مہربان

و فرزندِ نازنینم

تشکر و قدردانی

برخود لازم می دانم از راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی دریغ و دلسوزانه استاد گرامی، جناب آقای دکتر حسن قاسم زاده قدردانی نمایم. آنچه که بنده در طول سال‌های گذراندن دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترا از ایشان فرا گرفته ام، فراتر از مسائل علمی و پژوهشی بوده است. همچنین از آقایان پروفسور علی پاک، پروفسور امیر حمیدی، دکتر سعید اصیل قره باغی و دکتر مجید سلطانی که با حضور پربارشان در جلسات مختلف در تکمیل این اثر به اینجانب کمک نموده و با راهنمایی‌های ارزشمندشان به غنای آن افزودند، سپاسگزارم.

محمد صنایع پسند

شهریور ۱۳۹۸

مخازن نفتی دارای لایه‌بندی‌هایی با درجات بالای ناهمگنی در گستره مقیاس‌های مختلف هستند. شبیه‌سازی کامل حرکت فازهای سیال در محیط متخلخل مخازن نفتی و محاسبه دقیق تغییرشکل-های فاز جامد بالاتر از توانایی محاسباتی رایانه‌های امروزی است. در نتیجه در مدل‌سازی‌های جدید مخازن هیدروکربنی، فازهای سیال و جامد در مقیاس خود مورد ارزیابی می‌گیرند. با توجه به تأثیر محاسبه دقیق تغییرشکل‌های فاز جامد در نتایج مدل‌سازی، استفاده از مدل‌های کشسان-خمیری (کشسان-خمیری) ضروری است. به دلیل تفاوت قابل توجه تغییرشکل‌های فاز جامد در بخش‌های مختلف مخزن پس از استفاده از مدل کشسان-خمیری و بیشتر بودن این تفاوت در مخازن ترک‌دار غیرهمگن، لزوم استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی^۱ (AMR) در محاسبات فاز جامد احساس می‌شد.

در این پایان‌نامه در ابتدا معادلات فازهای سیال مدل M^3GM^2 که یکی از مدل‌های با قابلیت بالا در بررسی مخازن هیدروکربنی است، با در نظر گرفتن اثرات موئینگی و ضریب حلالیت گاز در نفت بازنویسی شدند. سپس در بخش محاسبات تغییر شکل‌های فاز جامد این مدل به جای روش کشسان (الاستیک) خطی از یک مدل کشسان-خمیری که برای محیط متخلخل غیراشباع واسنجی شد، استفاده گشت. برای همگرا شدن بهتر نتایج و بالاتر بردن دقت آن‌ها، در مش‌بندی فاز جامد نیز از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی استفاده شد. این مدل به عنوان مدل ارتقاء یافته M^3GM با نام IM^3GM^3 معرفی گردید. نتایج حاصل شده از آنالیز مخازن مختلف همگن و غیرهمگن، نشان دهنده نزدیک شدن نتایج دقت مدل ارتقاء یافته به آنالیزهای انجام شده با مش‌بندی ریز بود.

واژه‌های کلیدی: اصلاح مش‌بندی تطبیقی، کشسان-خمیری، چندمقیاسی، چندفیزیکی، ژئومکانیک، موئینگی، محیط متخلخل

^۱Adaptive mesh refinement

^۲Multiscale Multiphysics Multiphases Geomechanical Model

^۳Improved Multiscale Multiphysics Multiphases Geomechanical Model

فهرست مطالب

نکیده.....	ذ
لیست تصاویر.....	ص
لیست جداول.....	ظ
علائم و اختصارات.....	غ
فصل اول: معرفی تحقیق و هدف از انجام آن.....	۲
۱-۱- طرح مسئله و اهمیت مطالعه.....	۳
۱-۲- اهداف مطالعه.....	۵
۱-۳- ضرورت تحقیق.....	۷
۱-۴- روش تحقیق.....	۸
۱-۵- نوآوریهای تحقیق.....	۹
۱-۶- ساختار رساله پیشنهادی.....	۱۱
فصل دوم: مروری بر ادبیات تحقیق.....	۱۳
۱-۲- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- کلیاتی از مخازن هیدروکربنی و عوامل مؤثر بر مدل سازی آنها.....	۱۴
۳-۲- کلیاتی در ارتباط با محیطهای متخلخل.....	۲۰
۳-۲-۱- فشار موئینگی در محیط متخلخل غیراشباع مخازن نفتی.....	۲۴
۳-۲-۱-۱- پدیده مکش.....	۳۴
۳-۲-۲- نفوذپذیری در محیط متخلخل غیراشباع مخازن نفتی.....	۳۶
۴-۲- مدل کردن بخش جامد محیط متخلخل مخزن نفتی.....	۴۰
۴-۲-۱- نحوه مدل کردن تغییر شکل های بخش جامد محیط متخلخل با مدل های کشسان-خمیری خاک.....	۴۲
۴-۲-۲- تاریخچه مدل های کشسان-خمیری استفاده شده برای آنالیز فاز جامد.....	۴۵
۵-۲- کلیاتی از روش چندمقیاسی.....	۵۶
۶-۲- کلیاتی از محیط چندفیزیکی.....	۵۹
۷-۲- نحوه مدل سازی های مخازن نفتی با استفاده از روش چندمقیاسی.....	۵۹

۵۹	۲-۷-۱-روش‌های بالا مقیاسی
۶۰	۲-۷-۲-روند استفاده از روش چندمقیاسی در مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی
۶۳	۲-۷-۳-جفت‌سازی حرکت سیال و تغییر شکل فاز جامد
۶۵	۲-۸-۱-اصلاح مش‌بندی شبکه در نواحی مورد نیاز با استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی
۶۵	۲-۸-۱-نیاز به اصلاح مش‌بندی و معرفی روش‌های موجود
۷۱	۲-۸-۲-نحوه دسته‌بندی داده‌ها:
۷۵	۲-۸-۳-الگوریتم روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR):
۷۸	۲-۸-۴-ساختن درخت AMR:
۷۹	۲-۸-۵-نحوه دسته‌بندی اطلاعات در روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR):
۸۲	۲-۸-۶-حساسیت روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR) به پارامترها:
۸۴	۲-۸-۷-نحوه انتقال داده‌ها و آنالیز مسئله پس از اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR):
۸۷	۲-۸-۸-اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR) در مسئله‌هایی با تغییر مکان‌های بزرگ
۸۸	۲-۸-۹-استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR) در مسائل وابسته به زمان
۹۰	۲-۸-۱۰-معرفی مولفه‌های اصلی در اصلاح مش‌بندی تطبیقی
۹۰	۲-۸-۱۰-۱-هموارسازی متغیرهای داخلی
۹۱	۲-۸-۱۰-۲-برآورد خطا:
۹۷	۲-۸-۱۰-۳-نحوه تولید مش‌بندی جدید
۹۹	۲-۸-۱۱-مشکلات پیش رو در استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی
۱۰۰	۲-۹-خلاصه فصل
۱۰۱	فصل سوم: معادلات، نحوه گسترش‌سازی و اندک‌شدن مدل ارتعاشی یاقه
۱۰۲	۳-۱-مقدمه
۱۰۳	۳-۲-معادلات حاکم
۱۰۳	۳-۳-فرضیات پایه
۱۰۵	۳-۴-۱-معادلات حاکم بر فازهای سیال
۱۰۵	۳-۴-۱-۱-معادلات بقای جرم
۱۰۷	۳-۴-۲-معادله بقای مومنتوم فازهای سیال
۱۰۸	۳-۵-۱-معادلات حاکم بر فاز جامد
۱۰۸	۳-۵-۱-۱-معادله بقای جرم فاز جامد

۱۰۹	۳-۵-۲-معادله بقای مومنتوم فاز جامد
۱۱۰	۳-۶-معادلات ساختاری
۱۱۱	۳-۶-۱-روابط سهم فازها
۱۱۲	۳-۶-۲- رابطه نفوذپذیری نسی
۱۱۲	۳-۶-۳-روابط تنش و کرنش (معادلات فاز جامد)
۱۲۶	۳-۶-۴-روابط تغییرات دانسیته فاز سیال
۱۲۶	۳-۷-جمع بندی معادلات
۱۲۸	۳-۸-الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی ارتقاء یافته (IM ³ GM)
۱۲۹	۳-۸-۱-گسسته سازی فازهای سیال و ساختار MSFV
۱۳۶	۳-۹-نحوه به روزرسانی مش بندی در روش اصلاح مش بندی تطبیقی (AMR) :
۱۳۸	۳-۱۰-استفاده از روش اصلاح مش بندی تطبیقی (AMR) در مدل ارتقاء یافته:
۱۴۰	۳-۱۰-۱-نحوه اصلاح مش بندی و برآورد خطا در مدل ارتقاء یافته:
۱۴۱	۳-۱۱-گسسته سازی فاز جامد با ساختار اجزاء محدود
۱۴۵	۳-۱۲-اندرکنش چندفیزیکی فازهای سیال و فاز جامد
۱۴۸	۳-۱۳-شرایط مرزی و شرایط اولیه
۱۵۰	۳-۱۴-شرایط مرزی به هنگام شونده
۱۵۱	۳-۱۵-لحاظ نمودن اثرات محیط پیرامونی مخزن با استفاده از فنرهای پیرامونی
۱۵۳	۳-۱۶-نحوه مدل سازی مخازن هیدروکربنی با مدل ارتقاء یافته IM ³ GM
۱۶۱	۳-۱۷-خلاصه فصل
۱۶۲	فصل هفتم: نتایج و نتیجه گیری
۱۶۳	۴-۱-مقدمه
۱۶۴	۴-۲-جریان سیال در مخزن متخلخل هیدروکربنی همگن پنج نقطه ای
۱۶۹	۴-۲-۱- بررسی نحوه شبکه بندی در صحت نتایج
۱۷۳	۴-۳-جریان سیال و تغییر شکل فاز جامد در مخزن متخلخل هیدروکربنی همگن پنج نقطه ای
۱۷۸	۴-۴-جریان سیال و تغییر شکل فاز جامد در مخزن متخلخل هیدروکربنی ترک دار پنج نقطه ای
۱۷۸	۴-۵-جریان سیال و تغییر شکل فاز جامد در مخزن متخلخل هیدروکربنی ناهمگن پنج نقطه ای
۱۸۲	۴-۶-جریان سیال به صورت پیوسته از میان دو لایه نفوذناپذیر
۱۸۶	۴-۷-مدل سازی جریان سیال در محیط متخلخل بسیار ناهمگن

۴-۸- لحاظ نمودن اثرات محیط پیرامونی مخزن با استفاده از فنرهای پیرامونی.....	۱۸۸
۴-۹- خلاصه فصل.....	۱۹۲
فصل پنجم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهاد جهت ادامه تحقیق.....	۱۹۴
۵-۱- جمع بندی و نتیجه گیری	۱۹۵
۵-۲- پیشنهادها جهت ادامه تحقیق	۱۹۷
فهرست منابع و مراجع.....	۱۹۹
پیوست ۱.....	۲۲۹
نمونه برگه بندی و انتقال داده ها در روش پند میانی	۲۲۹
پیوست ۲.....	۲۴۱
تولاب شکل، پشت کرده ای و شملت مربوط	۲۴۱
پیوست ۳.....	۲۴۳
روابط ساختاری نمودن پذیری - درجه اشباع و یا نمودن پذیری - تلفظ	۲۴۳

لیست تصاویر

- شکل ۲-۱- طبیعت رفتار جریان در درون حفره‌های محیط متخلخل [۴۷ و ۴۳]..... ۲۳
- شکل ۲-۲- شبکه مدل شده برای لوله‌های موئین در محیط متخلخل که لوله‌های سفید آن در ارتباط با هوا هستند [۴۷]..... ۲۳
- شکل ۲-۳- مدل کردن موئینگی در محیط متخلخل با لوله‌های موازی و با طول و قطر یکسان [۴۰]..... ۲۶
- شکل ۲-۴- مدل کردن موئینگی در محیط متخلخل با در نظر گرفتن انحراف و انحنا برای لوله‌های موئین [۵۱]..... ۲۶
- شکل ۲-۵- مدل کردن موئینگی در محیط متخلخل با لوله‌های مقاطع متغیر [۵۲]..... ۲۷
- شکل ۲-۶- شرایط ترشوندگی مختلف که ممکن است در سطح تماس بین آب و نفت اتفاق افتند [۴۰]..... ۳۰
- شکل ۲-۷- رفتار آب باقیمانده در مدل ارائه شده توسط ویلر و همکاران [۱۴۵]..... ۴۷
- شکل ۲-۸- منحنی تسلیم نرمال LC، منحنی‌های مرزی SI و SD و تکامل تدریجی آنها در وضعیت تنش ایزوتروپیک [۱۵۵]..... ۵۲
- شکل ۲-۹- سطوح تسلیم شماتیک در وضعیت تنش سه محوری [۱۵۵]..... ۵۳
- شکل ۲-۱۰- حرکت منحنیهای تر شدن اولیه و خشک شدن ثانویه به دلیل تغییر شکل حجمی پلاستیک [۱۵۵]..... ۵۴
- شکل ۲-۱۱- دو روش الگوسازی در مخازن نفتی. ردیف بالا: رویکرد غیرمستقیم با استفاده از روش بالا مقیاسی، ردیف پایین: رویکرد مستقیم [۱۹۳]..... ۵۹
- شکل ۲-۱۲- الف) پراکندگی داده‌ها در دسته‌های تودرتو ب) ایجاد مش بندی یکنواخت بر روی تصویر الف [۲۵۶]..... ۷۲
- شکل ۲-۱۳- مثالی از یک AMR دوبعدی با دو سطح اصلاح. در هر سطح از اصلاح دقت بیشتری در زیر شبکه‌ها اعمال شده است [۲۵۶]..... ۷۷
- شکل ۲-۱۴- مراحل ساختن درخت AMR در چهارچوب یک ریزبرنامه [۲۵۶]..... ۷۹
- شکل ۲-۱۵- مراحل دسته بندی داده‌ها در چهارچوب یک ریزبرنامه. λ سطحی از درخت است که دسته بندی از آن شروع می شود [۲۵۶]..... ۸۲
- شکل ۲-۱۶- دسته بندی اطلاعات بر روی مجموعه ای از اطلاعات نشان داده شده در شکل ۲-۱۲ اعمال شده است. (الف) شش شبکه به شکلی ساخته شده اند که شبکه های صفر و ۳ به ترتیب ۳ و ۲ زیر شبکه دارند. (ب) درخت AMR که تمام شبکه های ساخته شده را به هم متصل می کند. (ج) دسته بندی درون شبکه ۳ موضوعات را به دسته های ۳ و ۴ بر اساس فاصله موضوعات از پیرامون دسته ها تخصیص داده است. (د) دسته بندی در شبکه صفر. دسته بندی از سطح ۱ تا سطح صفر گسترش یافته است. (ه) دسته بندی نهایی شامل ۴ دسته می باشد [۲۵۶]..... ۸۳

شکل ۲- ۱۷-بروزرسانی مش‌بندی و انتقال داده‌ها از مش‌های قدیم به جدید از طریق درونیایی گره‌های در معادلات بیضوی [۲۴۹]..... ۹۰

شکل ۳- ۱- تعیین پارامترهای δ , F , p^* و δin از روی نمودار [۱۵۸]..... ۱۲۲

شکل ۳- ۲- نمونه ای دوبعدی از مخازن پنج نقطه‌ای ترک‌دار با سلول‌های مربعی پس از یک و دومرحله اصلاح مش‌بندی تطبیقی با سازمان با ضریب اصلاح ثابت ۲..... ۱۳۸

شکل ۳- ۳- المان ۸ گره‌ای در مختصات کلی (سمت راست) و محلی (سمت چپ)..... ۱۴۲

شکل ۳- ۴- نمایش سلول درشت، سلول کمکی و شبکه ریز داخلی، همچنین مرزهای سلول کمکی. المان هشت گره‌ای در سمت چپ نمایش داده شده است..... ۱۴۷

شکل ۳- ۵- اعمال شرایط مرزی در مرزهای سلول درشت..... ۱۵۰

شکل ۳- ۶- شرایط مرزی به روزشونده در اطراف سلول کمکی..... ۱۵۱

شکل ۳- ۷- شرایط مرزی و سنگهای پیرامون مخزن متخلخل تغییر شکلپذیر..... ۱۵۳

شکل ۳- ۸- اعمال سختی معادل گره‌های درمرزهای مخزن با محیط پیرامون..... ۱۵۳

شکل ۳- ۹- نمایی از مخازن متخلخل نفتی و نحوه تزریق به داخل آن‌ها و استحصال نفت از آن‌ها..... ۱۵۴

شکل ۳- ۱۰- نحوه مش‌بندی مخازن متخلخل نفتی در مدل‌سازی عددی. الف) خطوط تیره مش‌بندی درشت و خطوط خط‌چین روشن شبکه درشت دوگانه، ب) خطوط خط‌چین تیره شبکه ریز در یک سلول درشت و ج) شبکه ریز در یک سلول درشت پس از یک مرحله اصلاح مش‌بندی تطبیقی را نشان می‌دهند..... ۱۵۶

شکل ۳- ۱۱- چهار بخش و هشت مرحله روش احجام محدود چندمقیاسی [۱۷۴]..... ۱۵۷

شکل ۳- ۱۲- الگوریتم نحوه آنالیز یک گام زمانی در مدل ارتقاء یافته..... ۱۵۸

شکل ۴- ۱- مقایسه بین فشار آب در مخزن متخلخل نفتی همگن در شرایط لحاظ نمودن فشار موئینگی (الف) و لحاظ نمودن آن (ب)..... ۱۶۶

شکل ۴- ۲- مقایسه بین فشار آب در مخزن متخلخل نفتی همگن در شرایط لحاظ نمودن و لحاظ نمودن فشار موئینگی در مجاورت چاهک تزریق (الف) و مجاورت چاهک برداشت (ب)..... ۱۶۶

شکل ۴- ۳- مقایسه بین درجه اشباع نفت در مخزن متخلخل نفتی همگن در شرایط لحاظ نمودن فشار موئینگی در مجاورت چاهک تزریق (الف) و مجاورت چاهک برداشت (ب)..... ۱۶۷

شکل ۴- ۴- تعداد تکرارهای لازم برای به‌دست آوردن فشار پایستار در مجاورت چاهک برداشت..... ۱۶۸

- شکل ۴-۵- تغییرات γ در تکرارهای مختلف در زمان $2/5 \times 10^5$ ثانیه در مجاورت چاهک برداشت ۱۶۹
- شکل ۴-۶- مقایسه بین فشار آب در مخزن متخلخل نفتی همگن در شرایط لحاظ نمودن فشار موئینگی در شرایط شبکه بندی درشت 3×3 و شبکه بندی ریز 11×11 (الف) و در شرایط شبکه بندی درشت 11×11 و شبکه بندی ریز 3×3 (ب) ۱۷۱
- شکل ۴-۷- مقایسه بین فشار آب در مخزن متخلخل نفتی همگن در شرایط لحاظ نمودن فشار موئینگی با شبکه بندی های درشت متفاوت در مجاورت چاهک تزریق (الف) و مجاورت چاهک برداشت (ب) ۱۷۳
- شکل ۴-۸- توزیع فشار آب در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل پس از PVI $0/1$ در شرایط مدل سازی با (الف) مش بندی ریزدانه (ب) مدل M^3GM (ج) مدل IM^3GM ۱۷۳
- شکل ۴-۹- توزیع فشار آب در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل پس از PVI $0/1$ در شرایط مدل سازی با (الف) مش بندی ریزدانه (ب) مدل M^3GM (ج) مدل IM^3GM ۱۷۴
- شکل ۴-۱۰- توزیع تغییر شکل فاز جامد در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل پس از PVI $0/1$ در شرایط مدل سازی با مدل IM^3GM ۱۷۵
- شکل ۴-۱۱- تغییرات نرخ استحصال مخزن هیدروکربنی متخلخل در شرایط مدل سازی با (الف) بدون در نظر گرفتن تغییر شکل (ب) مدل M^3GM (ج) مدل IM^3GM ۱۷۵
- شکل ۴-۱۲- توزیع تغییر شکل فاز جامد در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل (الف) در نقطه A در شرایط مدل سازی با مدل M^3GM ، (ب) در نقطه A در شرایط مدل سازی با مدل IM^3GM ، (ج) در نقطه B در شرایط مدل سازی با مدل M^3GM و (د) در نقطه B در شرایط مدل سازی با مدل IM^3GM ۱۷۶
- شکل ۴-۱۳- توزیع فشار آب در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل ترک دار در شرایط مدل سازی با مدل IM^3GM (الف) پس از PVI $0/1$ (ب) پس از PVI $0/1$ ۱۷۸
- شکل ۴-۱۴- لگاریتم طبیعی نفوذپذیری مطلق برگرفته شده از لایه بیستم SPE 10 ۱۷۹
- شکل ۴-۱۵- توزیع فشار آب در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل غیرهمگن پس از PVI $0/11$ در شرایط مدل سازی با مدل (الف) M^3GM (ب) IM^3GM ۱۸۰
- شکل ۴-۱۶- توزیع درجه اشباع نفت در یک چهارم مخزن هیدروکربنی متخلخل غیرهمگن پس از PVI $0/11$ در شرایط مدل سازی با مدل (الف) M^3GM (ب) IM^3GM ۱۸۰
- شکل ۴-۱۷- مقایسه بین فشار آب در مخزن متخلخل نفتی غیرهمگن در نقاط مختلف ۱۸۱
- شکل ۴-۱۸- مقایسه بین درجه اشباع نفت در مخزن متخلخل نفتی غیرهمگن در نقاط مختلف ۱۸۲
- شکل ۴-۱۹- محدوده مسئله تحت آنالیز، موقعیت لایه های نفوذناپذیر و مرزهای ورودی و خروجی جریان ۱۸۴

- شکل ۴-۲۰- توزیع فشار آب در محیط متخلخل غیرهمگن دربرگیرنده دو لایه نفوذناپذیر پس از ۲۰ روز پس از آنالیز با مدل‌های الف) M^3GM ب) IM^3GM ۱۸۴
- شکل ۴-۲۱- توزیع فشار آب در محیط متخلخل غیرهمگن دربرگیرنده دو لایه نفوذناپذیر پس از آنالیز با مدل IM^3GM در بالا و پایین دو لایه ۱۸۴
- شکل ۴-۲۲- لگاریتم طبیعی نفوذپذیری لایه فوقانی SPE10 به همراه خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی فازهای سیال و محیط متخلخل ۱۸۷
- شکل ۴-۲۳- توزیع فشار آب در محیط متخلخل بسیار غیرهمگن پس از $PVI = 0.132$ در آنالیز با مدل‌های الف) ریزمقیاس ب) IM^3GM ۱۸۷
- شکل ۴-۲۴- توزیع درجه اشباع نفت در محیط متخلخل بسیار غیرهمگن پس از $PVI = 0.132$ در آنالیز با مدل‌های الف) ریزمقیاس ب) IM^3GM ۱۸۷
- شکل ۴-۲۵- لگاریتم طبیعی نفوذپذیری لایه فوقانی SPE10 به همراه خصوصیات فیزیکی فازهای سیال ۱۸۹
- شکل ۴-۲۶- المانهای درشت فاز جامد و شرایط مرزی (بالا) و مشخصات ژئوتکنیکی مخزن (پایین) ۱۹۰
- شکل ۴-۲۷- مقایسه نرخ استحصال نفت در مخزن هیدروکربنی با درنظر گرفتن مدول الاستیسیته‌های مختلف برای سنگ‌های پیرامون مخزن ۱۹۱
- شکل ۴-۲۸- تغییر شکل در مخزن هیدروکربنی پس از $PVI = 0.085$ الف) در شرایط محیط پیرامونی صلب ب) با درنظر گرفتن مدول الاستیسیته ۵ MPa برای سنگ‌های پیرامون مخزن ۱۹۱
- شکل پ-۱-۱- نحوه تفکیک مسئله به دوبخش عمومی و خصوصی و تعیین شرایط مرزی به کمک حل مسئله به صورت کاهش یافته بر بعد [۲۲] ۲۳۳
- شکل پ-۱-۲- چگونگی اعمال شارهای ناشی از گرهای پیرامون سلول درشت. همچنین نحوه نامگذاری شارهای مربوط به هر یک از المانهای کمکی و رئوس آنها [۲۲] ۲۳۴
- شکل پ-۱-۳- نمایش اعمال شرایط مرزی نیومن بر سلولهای درشت جهت به‌دست آوردن فشارهای پایستار، همچنین المان کمکی که توابع پایهای در آن نیاز به بروز رسانی دارند [۲۲] ۲۳۸

لیست جداول

جدول ۱-۲- مشخصات بعضی از میادین کربناته شکاف‌دار ایران [۳۷] ۱۷

جدول ۳-۱-تعریف پارامترهای مدل کشسان-خمیری معرفی شده و مقادیر این پارامترها برای دو نمونه مختلف.....	۱۱۵
جدول ۳-۲-مراحل مختلف روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی (AMR) در مدل ارتقاء یافته برای محاسبه تغییرشکل‌های فاز جامد[۱۵۹].....	۱۴۰
جدول ۴-۱-پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی مخزن و عدد موئینگی فازهای سیال	۱۶۵
جدول ۴-۲-مقایسه هزینه محاسباتی روش چند با مقیاسی با حل مستقیم بر روی مقیاس ریز	۱۷۰
جدول ۴-۳-پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی مخزن مثال دوم	۱۷۴
جدول ۴-۴-هزینه محاسباتی حل مثال جریان آب در بین دولایه نفوذناپذیر پس از ۱۰۰ گام زمانی برای روش‌های حل با مش‌بندی ریز، M^3GM و IM^3GM با درنظر گرفتن 10^4 سلول ریز.....	۱۸۶
جدول پ-۱-انتقال پذیری شارهای اعمالی از گره‌های پیرامونی به هرسلول درشت[۲۲].....	۲۳۶

علامت و اختصارات

W_u^t	بردار ضرایب وزنه پهنه	A	مساحت سلول‌های ریز مقیاس
$\overline{W}_u^t$	بردار ضرایب وزنه مرزها	B_α	ضریب تشکیل حجمی فاز
نشانه های یونانی		C_c	ضریب تراکم پذیری
		C_v	ضریب تحکیم
β	محدوده همگرایی	D_e	ماتریس کشسانی
ϵ	بردار کرنش های فاز جامد	D_{ep}	ماتریس کشسان خمیری
ϵ_{vol}	کرنش حجمی	E	مدول برجهندگی
ρ_α	دانسیته فازهای سیال	g	بردار شتاب گرانش
Φ_k^h	ماتریس توابع پایه‌ای	H_{dr}	طول مسیر زهکشی
Φ^h	ماتریس توابع اصلاحی	I	ماتریس واحد
Ω_k	بردار سلول‌های درشت	K	ماتریس نفوذ پذیری مطلق
Ω^h	بردار سلول‌های کمی	kr_α	نفوذ پذیری نسبی فاز
ϕ	تخلخل فاز جامد	L	مشتق مماسی سازگار اسکلت خاک
ν	ضریب پواسون فاز جامد	M	معکوس ضریب تراکم پذیری حجمی
μ_α	گرانروی فاز	$\dot{m}_\alpha$	چشمه و چاهک فاز
σ	ماتریس تنش کل	N_u	تابع شکل
σ'	ماتریس تنش مؤثر	$\tilde{n}^h$	بردار واحد عمود بر سطح
λ_α	ماتریس قابلیت تحرک فازهای سیال	p	فشار سیال
		p'	فشار ریز مقیاس ناپایستار
		p''	فشار ریز مقیاس پایستار
		p_f	فشار تحلیل ریز مقیاس
		S_α	درجه اشباع فاز
		t	زمان
		$\bar{t}$	بردار نیروی خارجی
		T_v	فاکتور بدون بعد زمان
		u	بردار تغییر شکل فاز جامد
		v_α	سرعت فازهای سیال
		v_s	سرعت فاز جامد
		w	سرعت نسبی

فصل اول:

معرفی تحقیق و هدف از انجام آن

۱-۱- طرح مسئله و اهمیت مطالعه

برای مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی نیاز به ترکیبی از علوم زمین‌شناسی، مکانیک خاک، و مکانیک سیالات است. با انجام مدل‌سازی، شناخت رفتار مخزن در گذشته و حال و همچنین پیش‌بینی رفتار آن در آینده به دست می‌آیند. هرچه کیفیت نتایج مدل‌سازی انجام شده بر روی یک مخزن بیشتر باشد، مدیریت آن مخزن به نحو بهتری انجام می‌شود. در گذشته با توجه به وقت‌گیر بودن مطالعات و شبیه‌سازی مخازن و همچنین هزینه بالای انجام آن‌ها، مدیریت تنها بر روی مخازن بزرگ و خاص انجام می‌شد. اما امروزه تمامی مخازن مدیریت می‌گردند و در نتیجه شبیه‌سازی مخازن رونق بیشتری پیدا کرده است. با توجه به موارد بیان شده، بالاتر بردن دقت مدل‌سازی مخازن و همچنین کاستن زمان انجام مدل‌سازی و حجم محاسبات آن امری ضروری بوده که مورد استقبال بسیاری قرار خواهد گرفت.

با توجه به اینکه هر پدیده فیزیکی در گستره خاصی تأثیرگذار است، شبیه‌سازی مخازن نفتی با طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های متفاوت همراه می‌شود. این مخازن دارای بازه گسترده‌ای از مقیاس در حد میکرون برای مقیاس منفذی^۱ تا حد چند ده متر متناسب با ابعاد مخزن هستند [۸-۱۱]. در شرایط مدل‌سازی مخازن نفتی با مقیاس منفذی تعداد المان‌های یک مخزن بیش از تعداد المان‌هایی که یک نرم افزار توانایی مدل‌سازی با آن‌ها را دارد، خواهد شد [۹ و ۱۰]. در صورتی که هر پدیده فیزیکی در مقیاس اثرگذار بودن خود بررسی گردد، از حجم معادلات کاسته شده و دقت در تعیین پارامترها نیز بالا می‌رود. روش چندمقیاسی احجام محدود^۲ با توجه به پایستار بودن جرم در آن برای مدل‌سازی مخازن نفتی مناسب‌تر بوده و رایج شده است.

مخازن زیرزمینی نفتی به دو دسته کلی مخازن ماسه‌سنگی و کربناته تقسیم می‌شوند. بیش از دو سوم از مخازن نفتی دنیا از جنس ماسه‌سنگی هستند. این مخازن بیشتر در کشورهای حوزه آمریکای لاتین، مرکزی، شمالی و

^۱Pore scale

^۲Multiscale Finite Volume (MSFV)

بخشی از آفریقا وجود داشته و کشورهای حوزه خلیج فارس بیشتر مخازنشان که حدود ۹۰ درصد برآورده می‌شود، از نوع کربناته هستند. تحلیل و نفوذپذیری این دو نوع مخزن بسیار باهم فاصله متفاوت هستند. مخازن کربناته به صورت شبکه‌هایی از ترک‌ها که سیالات را از خود عبور می‌دهند و بلوک‌های جامد که تنها تغذیه کننده شبکه ترک‌ها هستند، مدل می‌شوند. عمده مخازن ماسه‌سنگی به صورت محیط‌های متخلخل همسان و همگن مدل شده و معادلات فازهای سیال و جامد به صورت جداگانه برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

تولید نفت و درصد بازیافت مخازن ماسه‌سنگی چندین برابر مخازن کربناته است. بیشترین درصد بازیافت مخازن ماسه‌سنگی برای مخازن همگن و همسان کشور مکزیک با حدود ۶۰ درصد بازیافت است. درصد بازیافت مخازن کربناته زیر ۳۰ درصد است. درصد بازیافت مخازن ماسه‌سنگی ایران حدود ۳۰ درصد و درصد بازیافت مخازن کربناته ایران حدود ۲۴ درصد است. جهت افزایش درصد بازیافت مخزن، معمولاً از روش‌های تحریک استفاده می‌شود. روش تحریک متداول در مخازن کربناته، اسیدکاری است به طوری که در این روش اسید با سنگ مخزن واکنش داده و آن را حل می‌نماید و باعث افزایش تراوایی و مرتفع شدن انسداد مجاری عبور سیالات خواهد شد. نمونه ای از اثرات اسید بر روی پارامترهای مقاومتی و تراوایی سنگ در مرجع [۱۰] آمده است. در مخازن ماسه‌سنگی به دلیل عدم واکنش اسید با ماسه‌سنگ، جهت تحریک از روش شکست هیدرولیکی استفاده می‌شود. در این روش در مخزن ترک‌های مصنوعی ایجاد می‌شوند. مدلی که توانایی مدل نمودن این ترک‌ها را داشته باشد، ارزش بالایی خواهد داشت.

با توجه به اینکه مخازن زیرزمینی در محیط‌های متخلخل شکل گرفته‌اند، این مخازن تغییر شکل پذیر هستند. تغییر مکان‌های این مخازن نه تنها موجب ایجاد صدمه به تأسیسات بالادستی شده، بلکه سبب تغییر مسیر جریان، ناپایداری چاه و آسیب‌های زیست‌محیطی نیز خواهد شد [۲۲-۱۱]. برای مثال نمونه‌هایی از این آسیب‌ها

قبلا در مخازن میدان‌های نفتی اکوفیسک^۱ و گوس گریک^۲ و میدان گازی گرونینگن^۳ [۲۸-۲۳] گزارش شده است. در ایران نیز سازندهایی نظیر آسماری و میدان نفتی آغاچاری تغییر شکل‌پذیر هستند [۲۹ و ۳۰]. با افزایش نامنظمی در محیط که می‌تواند ناشی از غیرهمگن بودن آن و یا تفاوت گرادیان فشار در مناطق مختلف محیط باشد، کرنش‌های بیشتری در محیط ایجاد می‌شوند. در راستای بالاتر بردن دقت مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی کرنش‌های فاز جامد باید به نحو صحیح در مدل‌سازی لحاظ شده و تأثیر آن‌ها بر نحوه استحصال نفت بررسی گردد.

۱-۲- اهداف مطالعه

در رساله‌ی پیش رو برای مدل‌سازی جریان آب و نفت در محیط متخلخل، از مدل ارائه شده توسط طاهری [۲۲] به عنوان مدل پایه استفاده شده است. این مدل به صورت دوبعدی نوشته شده و در آن از روش اجزاء محدود برای مدل‌سازی فاز جامد و از روش چندمقیاسی احجام محدود برای مدل‌سازی فازهای سیال استفاده شده است. همچنین این مدل توانایی تعیین تغییر شکل محیط متخلخل را با در نظر گرفتن تأثیرات ژئومکانیکی سنگ مخزن و محیط اطراف را دارد. رابطه تنش-کرنش فاز جامد در مدل پایه، کشسان بوده و از تأثیر پارامترهایی نظیر موئینگی و حلالیت فازهای سیال در هم نیز در آن صرف‌نظر شده است. در این رساله موارد زیر به مدل پایه اضافه شده اند:

- برای محاسبات رابطه تنش-کرنش فاز جامد از یک مدل دقیق کشسان-خمیری که برای محیط متخلخل واسنجی (کالیبره) شده، استفاده شده است.

^۱Ekofisk

^۲Goose greek

^۳Groningen

- با استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی در مش‌بندی فاز جامد که سلول‌های درشت را در آنالیز چندمقیاسی پایه تشکیل می‌دهند، فقط در محل‌هایی که با توجه به تراکم داده‌ها و نتایج نیاز به دقت بیشتری باشد، مش‌بندی به صورت خودکار اصلاح می‌شود.

- معادلات فازهای سیال با لحاظ نمودن اثرات موئینگی بین فازها بازنویسی شده‌اند.

با توجه به وجود تجهیزات استحصال و فرآوری مستقر در روی سطح زمین و احتمال آسیب‌های ناشی از فرونشست زمین و همچنین تغییر مسیر و میزان جریان نفت با توجه به توزیع تنش و تغییر تخلخل‌های صورت گرفته، محاسبه تغییرشکل و اندرکنش آن با فازهای سیال اهمیت خاصی دارد. هدف از پایان‌نامه حاضر به‌دست آوردن تغییرشکل در محیط مخزن با دقت قابل توجه و در زمان آنالیز پایین و همچنین با در نظر گرفتن هر پدیده فیزیکی در مقیاس مناسب است. روند در نظر گرفته شده به طریقی است که الگوی عددی ارائه شده توانایی تعیین تغییرشکل محیط متخلخل را با در نظر گرفتن تأثیرات ژئومکانیکی سنگ مخزن و حتی محیط اطراف داشته باشد. با توجه به ابعاد گسترده مخازن هیدروکربنی، الگوی ارائه شده می‌تواند در زمان بسیار کمتر از الگوهای متداول حرکت سیال و تغییرشکل‌ها را در محیط متخلخل تغییرشکل پذیر شبیه‌سازی نماید. از این-رو می‌تواند در صنعت نفت و یا سایر مسائلی که ارتباط فازهای سیال و تغییرشکل فاز جامد در آن‌ها مطرح است، مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به وجود مخازن هیدروکربنی ماسه‌سنگی بسیار در کشور و خصوصیات متمایز آن‌ها، این الگو می‌تواند در صنعت نفت و یا سایر مسائلی که ارتباط فازهای سیال و تغییرشکل فاز جامد در آن‌ها مطرح است، مورد استفاده قرار گیرد. همچنین با توجه به این‌که در مخازن نفتی شبیه سازی‌های متعددی جهت به‌دست آوردن حالت بهینه برای تعیین محل چاه‌های تزریق و برداشت صورت می‌گیرد، این مدل دقت بالا و حجم محاسباتی اندک آن اهمیت و ارزش بیشتری می‌یابد.

۱-۳- ضرورت تحقیق

با توجه به نقش قابل توجه مدل‌سازی مخازن هیدروکربنی در برنامه‌ریزی، مدیریت و بررسی نحوه استحصال از آن‌ها، امروزه بالاتر بردن دقت مدل‌سازی این مخازن و همچنین کاهش زمان انجام آنالیز ضرورت قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. خصوصیات متمایز مخازن هیدروکربنی ماسه‌سنگی ایران همچون فشار زیاد، ناهمگنی و ناهمسان‌گرد بودن، ضخامت بالا، وسعت بسیار زیاد، وجود شکاف، وجود سنگ‌های متعدد و ایجاد ترک‌های مصنوعی در آن‌ها همگی باعث ناکارآمد شدن شیوه‌های معمول مدل‌سازی در مخازن ایران شده است. در نتیجه نیاز به ایجاد شیوه‌ای از مدل‌سازی که به صورت خودکار بتواند موارد ذکر شده در بالا را در مدل کردن مخازن ماسه‌ای مختلف در نظر بگیرد، احساس می‌شود. در صورت ایجاد این روش از مدل‌سازی علاوه بر اینکه مخازن موجود در زمان کمتری و در شرایط نزدیک به واقعیت مدل می‌شوند، امکان پیش‌بینی نتیجه‌ی ایجاد روش‌های تحریک بر روی هریک از مخازن نیز مهیا می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به عدم قطعیت داشتن بیشتر پارامترهای مخزن، برای از بین بردن ابهامات گاهی تا هزاران اجرا برای تعیین تغییرات لازم است. برای در نظر گرفتن موارد بالا در مدل‌سازی، می‌توان با استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی^۱ فقط در مناطقی که داده‌ها و نتایج از تراکم، ناهمسانی و ناهمگنی بیشتری برخوردار هستند و نیاز به افزایش دقت با ریزتر کردن مش‌بندی و یا کاهش بازه‌های زمانی است، آنالیز را تکرار نمود. این مناطق به صورت خودکار و توسط مدل شناسایی می‌شوند. در نتیجه روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی باعث کاهش حجم معادلات، افزایش سرعت انجام محاسبات و افزایش دقت محاسبات خواهد شد. همچنین با استفاده از روش اصلاح مش‌بندی تطبیقی می‌توان مخازن کربناته، محیط‌های متخلخل غیرهمگن و ترک دار و همچنین محیط‌هایی که شکل‌های نامنظمی دارند را نیز مدل نمود.

^۱Adaptive Mesh Refinement (AMR)