



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری

مهندسی عمران - مکانیک خاک و پی

مدلسازی چند مقیاسی حرکت نفت در محیط متخلخل تغییر شکل پذیر

Multiscale Modeling of Oil Transport in Deformable Porous Media

اساتید راهنما

دکتر سید امیرالدین صدر نژاد

دکتر حسن قاسم زاده

نگارش:

احسان طاهری

بهمن 93

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأیید یت داوران

اظهارنامه دانشجو

موضوع پایان نامه: مدل سازی چندمقیاسی حرکت نفت در محیط متخلخل تغییر شکل پذیر

اساتیدراهنما: دکتر سید امیرالدین صدرنژاد، دکتر حسن قاسم زاده

دانشجو: احسان طاهری

شماره دانشجویی: 8617736

اینجانب احسان طاهری 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. بعلاوه 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

1- حق چاپ و تکثیر این پایاننامه 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.

2- 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 پایاننامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می دانم از زحمات و حمایت‌های بی دریغ و دلسوزانه اساتید گرامی، جناب آقای **پروفسور سیدامیرالدین صدرنژاد** و جناب آقای **دکتر حسن قاسم زاده** قدردانی نمایم. بدون تردید در طول مدت دوره دکتری مطالب بسیاری را نزد ایشان آموختم. آن‌چه که بنده از ایشان فرا گرفتم محدود به پژوهش پیش‌رو نیست، بلکه مرا با آموزه‌هایشان در درک مسائل رهنمون ساختند. همچنین از آقایان **دکتر فرزین کلانتری**، **پروفسور مهرداد منظری**، **پروفسور علی پاک** و **دکتر مهرزاد شمس** که با حضور پربارشان در جلسات مختلف در تکمیل این اثر به اینجانب کمک نموده و بارانمایی‌های ارزشمندشان به غنای آن افزودند، سپاس‌گزارم.

همچنین از خانواده و همسر که در طول این مدت مرا یاری و همراهی نمودند، قدردانی می‌نمایم.

احسان طاهری

بهمن 1393

چکیده

مخازن نفتی دارای لایه‌بندی‌هایی با درجات بالای ناهمگنی در گستره مقیاس‌های مختلف می‌باشد. علاوه بر آن، پدیده‌های مختلف فیزیکی رفتار سیال را در سلسله مراتب متفاوت تحت تأثیر قرار می‌دهند. اما به هر روی شبیه‌سازی کامل حرکت فازهای سیال و تغییر شکل‌های فاز جامد که در برگیرنده تمام این مقیاس‌ها باشد بالاتر از گستره توانایی محاسباتی سخت‌افزارهای متداول امروزی می‌باشد. از این رو جهت غلبه بر این کمبود هر پدیده فیزیکی می‌بایست در گستره تأثیر خود مورد ارزیابی قرار گیرد. در این تحقیق حرکت فازهای سیال و تغییر شکل فاز جامد توسط ساختارهای جداگانه در مقیاس‌های مختلف تعیین خواهند گردید. در این رساله روش اجزاء محدود با روش چندمقیاسی احجام محدود برای حل معادلات فازهای سیال و فاز جامد ترکیب گردیده‌اند. برهم‌کنش فازهای سیال و فاز جامد از طریق تنیدگی دو طرفه تکرار شونده برقرار گردیده است. در این روند، الگوی ترکیبی چندمقیاسی چندفیزیکی ژئومکانیکی M^3GM ارائه شده است. الگوی M^3GM نه تنها خصوصیات روش چندمقیاسی احجام محدود را در بردارد بلکه با استفاده از ویژگی‌های روش اجزاء محدود ارتقاء یافته است.

از سوی دیگر همچنین شرایط مرزی دریکله که اعمال آن در روش چندمقیاسی با مشکلاتی همراه است از طریق روش شرایط مرزی با المان‌های کمکی اصلاح شده (TDVBC) بدون کاهش پهنه زمین‌شناختی فراهم گردیده است. در نهایت، آثار مکانیکی محیط اطراف مخزن که در تعیین تغییر شکل‌ها و بازدهی مخزن مؤثر می‌باشند از طریق فنرهای معادل سختی گره‌ای در مرزهای مکانیکی اعمال شده و الگوی ارتقاء یافته M^3GMSR با در نظر گرفتن تأثیر سنگ‌های پیرامون مخزن ارائه گردیده است. جهت کنترل صحت عملکرد الگوهای ارائه شده نتایج حاصل از الگو با نتایج حل‌های تحلیلی و یا حل بر روی مقیاس ریز از مراجع معتبر مقایسه و نتایج مطلوبی حاصل گردیده است.

واژه‌های کلیدی: چندمقیاسی، چندفیزیکی، ژئومکانیک، تغییر شکل، محیط متخلخل، اندرکنش

فهرست مطالب

چکیده.....خ

فهرست مطالب.....د

لیست تصاویر.....ز

لیست جداول.....ص

فصل اول: طرح مسئله و اهمیت مطالعه.....1

1-1- طرح مسئله و اهمیت مطالعه.....2

1-2- اهداف مطالعه.....5

1-3- روش تحقیق.....6

1-4- نوآوری‌های تحقیق.....6

1-5- ساختار رساله.....8

فصل دوم: کلیات چندمقیاسی، چندفیزیکی و مروری بر ادبیات تحقیق.....10

2-1- کلیاتی از چندمقیاسی.....11

2-2- کلیاتی از چندفیزیکی.....15

2-3- مروری بر ادبیات تحقیق.....16

2-3-1- روش‌های تحلیلی آماری.....17

2-3-2- روش‌های بالا مقیاسی.....19

2-3-3- روش‌های چندمقیاسی.....22

2-3-4- جفت‌سازی حرکت سیال و تغییر شکل فاز جامد.....27

30	فصل سوم: معادلات اصلی، گستره سازی و اندرکنش فازهای سیال و فاز جامد.....
31	3-1- مقدمه.....
32	3-2- معادلات حاکم.....
32	3-3- فرضیات پایه.....
35	3-4- معادلات حاکم بر فازهای سیال.....
35	3-4-1- معادلات بقای جرم.....
37	3-4-2- معادله بقای ممنتوم فازهای سیال.....
37	3-5- معادلات حاکم بر فاز جامد.....
37	3-5-1- معادله بقای جرم فاز جامد.....
38	3-5-2- معادله بقای ممنتوم فاز جامد.....
39	3-6- معادلات ساختاری.....
39	3-6-1- رابطه پیوستگی درجه اشباع.....
40	3-6-2- رابطه نفوذپذیری نسبی.....
41	3-6-3- روابط تنش و کرنش.....
41	3-6-4- روابط تغییرات دانسیته فاز سیال.....
42	3-7- جمع بندی معادلات.....
44	3-8- الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی (M^3GM).....
44	3-8-1- گستره سازی فازهای سیال و ساختار MSFV.....
54	3-8-2- گستره سازی فاز جامد و ساختار FE.....
58	3-8-3- اندرکنش چندفیزیکی فازهای سیال و فاز جامد.....
64	3-8-4- شرایط مرزی و شرایط اولیه.....

- 66 3-9- الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی و شرایط مرزی به هنگام شونده (IM^3GM)
- 67 3-10- الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی با فنرهای پیرامونی (M^3GMSR)
- 69 3-11- شرایط مرزی با المانهای کمکی اصلاح شده (TDVBC)
- 70 3-12- خلاصه

فصل چهارم: صحت نبی و ارائه نتایج 72

- 73 4-1- مقدمه
- 74 4-2- مسئله تزریق آب در محیط یک بعدی
- 79 4-3- مسئله تزریق آب در ربع محیط مربعی با پنج گمانه با نفوذپذیری همگن
- 83 4-4- حرکت سیال از میان دو دیواره ضخیم کم تراوا
- 91 4-5- بررسی نحوه شبکه بندی در صحت نتایج در تزریق در یک محیط ناهمگن
- 97 4-6- مسئله تحکیم خاک اشباع
- 99 4-7- مسئله تزریق آب در محیط با نفوذپذیری همگن در محیط متخلخل تغییر شکل پذیر
- 107 4-8- مسئله تزریق آب در محیط ناهمگن
- 109 4-9- مسئله تزریق آب در ربع محیط متخلخل همگن تغییر شکل پذیر با لایه های سنگ پیرامونی
- 113 4-10- تزریق در محیط ناهمگن تغییر شکل پذیر با لایه های سنگ پیرامونی
- 117 4-11- خلاصه فصل

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات 118

- 119 5-1- جمع بندی
- 120 5-2- نتایج حاصله
- 122 5-3- پیشنهادات جهت ادامه تحقیق

124	 فهرست منابع و مراجع
139	 ضمیمه الف: روابط ساختاری نفوذپذیری و درجه اشباع
144	 ضمیمه ب: توابع شکل هشت گره‌ای و مشتقات مربوطه
145	 ضمیمه ج: روابط ساختاری نفوذپذیری - تخلخل

لیست تصاویر

- شکل 2-1: مقیاس‌های مختلف در یک مخزن نفتی 11
- شکل 2-2: گستره مقیاس‌های شاخص در محیط مخزن [46] 13
- شکل 2-3: نمودار اثر هال پیچ و هال پیچ معکوس 16
- شکل 2-4: دو روش الگوسازی در مخازن نفتی بالا: رویکرد غیرمستقیم با استفاده از روش بالا مقیاسی، پایین: رویکرد مستقیم [53] 17
- شکل 2-5: روش‌های تحلیلی تعیین نفوذپذیری معادل که برای حالت‌های خاصی از جریان صادق هستند 18
- شکل 2-6: معادل‌سازی نفوذپذیری با استفاده از روش بالا مقیاسی 20
- شکل 2-7: اعمال شرایط مرزی بر روی محیط گسترده‌تر از مرزهای سلول درشت [53] 21
- شکل 2-8: ثابت نبودن شرایط مرزی بر روی مرزها در محیطی با نفوذپذیری ناهمگن 22
- شکل 2-9: مراحل و تفاوت‌های روش بالامقیاسی و چند مقیاسی 23
- شکل 3-1: نحوه تفکیک مسئله به دو بخش عمومی و خصوصی و تعیین شرایط مرزی به کمک حل مسئله به صورت کاهش یافته بر بعد 47
- شکل 3-2: چگونگی اعمال شارهای ناشی از گره‌های پیرامون سلول درشت، همچنین نحوه نامگذاری شارهای مربوط به هر یک از المان‌های کمکی و رئوس آنها 50
- شکل 3-3: نمایش اعمال شرایط مرزی نیومن بر سلولهای درشت جهت به دست آوردن فشارهای پایستار، همچنین المان کمکی که توابع پایه‌ای در آن نیاز به بروز رسانی دارند 54
- شکل 3-4: المان 8 گره‌ای در مختصات کلی (سمت راست) و محلی (سمت چپ) 55
- شکل 3-5: نمایش سلول درشت، سلول کمکی و شبکه ریز داخلی، همچنین مرزهای سلول کمکی، المان هشت گره ای در سمت چپ نمایش داده شده است 59
- شکل 3-6: الگوریتم حرکت سیال در محیط متخلخل تغییر شکل‌پذیر 62
- شکل 3-7: نحوه همگرایی سلول‌های درشت و سلول‌های ریز [139] 63
- شکل 3-8: اعمال شرایط مرزی در مرزهای سلول درشت 65

- شکل 3-9: شرایط مرزی به روزشونده در اطراف سلول کمکی 66
- شکل 3-10: شرایط مرزی و سنگ‌های پیرامون مخزن متخلخل تغییر شکل‌پذیر 68
- شکل 3-11: اعمال سختی معادل گره‌ای درمرزهای مخزن با محیط پیرامون 68
- شکل 3-12: شرایط مرزی با المان‌های کمکی اصلاح شده (TDVBC) 70
- شکل 4-1: ترکیب‌بندی آزمایش تزریق آب در سنگ مخزن 75
- شکل 4-2: نتایج میزان برداشت نفت به دست آمده از حل به روش چندمقیاسی و نتایج آزمایشگاهی 77
- شکل 4-3: نتایج فشار در سه نقطه مختلف به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی (بالا) و روش چندمقیاسی (پایین) 78
- شکل 4-4: نتایج به دست آمده از حل به روش چندمقیاسی (بالا سمت راست)، Geiger و همکاران (بالا سمت چپ) و وایت و لوییس (پایین) 80
- شکل 4-5: نتایج فشار به دست آمده از حل به روش چندمقیاسی و حل ارائه شده بر روی ریز مقیاس، همچنین نتایج فشار به دست آمده ناشی از نفوذپذیری نسبی درجه دو 82
- شکل 4-6: نتایج درجه اشباع به دست آمده از حل به روش چندمقیاسی و حل بر روی مقیاس ریز 83
- شکل 4-7: تزریق آب در محیط متخلخل با لایه‌های ضخیم کم تراوا و نقاط در نظر گرفته شده جهت تاریخچه فشار 84
- شکل 4-8: شبکه‌بندی در روش چندمقیاسی متداول و روش TDVBC 85
- شکل 4-9: منحنی هم میزان فشار پس از بیست روز در محیط متخلخل با لایه‌های کم تراوا 86
- شکل 4-10: مقایسه تاریخچه فشار در پهنه محیط در نقاط A,B,C&D 86
- شکل 4-11: نسبت پردازش (CTR) مابین روش حل مستقیم و روش چندمقیاسی با المان‌های کمکی اصلاح شده 90
- شکل 4-12: لگاریتم طبیعی نفوذپذیری مطلق برگرفته شده از لایه بیستم SPE10 92
- شکل 4-13: کانتورهای فشار و درجه اشباع نفت به دست آمده از شبکه بندی (5×5-9×9) روش چند مقیاسی پس از 0.11 PVI 93
- شکل 4-14: تاریخچه فشار به دست آمده بر روی نقاط A,B,C از شبکه بندی‌های مختلف روش چند مقیاسی 94
- شکل 4-15: تاریخچه درجه اشباع نفت به دست آمده بر روی نقاط A,B از شبکه بندی‌های مختلف روش چند مقیاسی 96
- شکل 4-16: شرایط مرزی و بارگذاری ستون خاک، مشخصات فیزیکی سیال و محیط متخلخل 97
- شکل 4-17: روند تنزیل فشار آب منفذی حاصله از حل عددی M^3GM و حل تحلیلی 98
- شکل 4-18: منحنی نرخ تحکیم در مقابل فاکتور بدون بعد جذر زمان حاصله از حل عددی M^3GM و حل تحلیلی 99

- شکل 4-19: تزریق آب در پهنه مخزن، همچنین مشخصات فیزیکی سیال و ژئوتکنیکی محیط متخلخل 100
- شکل 4-20: منحنی هم میزان فشار به دست آمده از حل بر مقیاس اصلی با استفاده از 44×44 سلول ریز (سمت راست) و توسط M^3GM با استفاده از 4×4 سلول درشت (سمت چپ) بعد از $0.01PVI$ (بالا) و بعد از $0.1 PVI$ (پایین) 101
- شکل 4-21: سهم نفت از چاه برداشت در شبیه‌ساز اول (بدون در نظر گرفتن تغییر شکل)، الگوی M^3GM و با در نظر گرفتن تغییر شکل بر روی مقیاس ریز 102
- شکل 4-22: کانتور تغییر شکل در پهنه مخزن پس از $0.1 PVI$ تزریق آب 103
- شکل 4-23: سهم نفت از چاه برداشت توسط الگوی M^3GM با سختی اصلاح شده 105
- شکل 4-24: تغییر شکل در مخزن در نقاط A,B 107
- شکل 4-25: لگاریتم طبیعی نفوذپذیری مشتق شده از لایه بالایی SPE10، همچنین خصوصیات فیزیکی و ژئومکانیکی فازهای سیال و محیط متخلخل 108
- شکل 4-26: شبیه‌سازی در مقیاس ریز (بالا)، شبیه‌سازی M^3GM (پایین)، کانتور فشار (چپ) و درجه اشباع آب (راست) بر روی لایه بالای SPE10 پس از $0.132 PVI$ 109
- شکل 4-27: شبیه‌سازی تغییر مکان محیط متخلخل توسط M^3GM بر روی لایه بالای SPE10 پس از $0.132 PVI$ 109
- شکل 4-28: مخزن با در نظر گرفتن لایه‌های سنگ پیرامون 110
- شکل 4-29: نرخ برداشت مخزن در حالت‌های مختلف 111
- شکل 4-30: تاریخچه فشار در نقاط A,B,C داخل مخزن 112
- شکل 4-31: لگاریتم طبیعی نفوذپذیری مشتق شده از لایه بالایی SPE10، همچنین خصوصیات فیزیکی سیال 114
- شکل 4-32: المانهای درشت فاز جامد و شرایط مرزی (بالا)، مشخصات ژئوتکنیکی مخزن (پایین) 115
- شکل 4-33: نرخ برداشت نفت در حالت‌های کشسان، شبه کشسان با لایه‌های سنگ پیرامونی 116
- شکل 4-34: تغییر شکل محیط مخزن در حالت کشسان (سمت راست) و شبه کشسان (سمت چپ) 116

لیست جداول

جدول 1-3: انتقال پذیری شارهای اعمالی از گره‌های پیرامونی به هرسلول درشت.....	52
جدول 1-4: فراسنج‌های در نظر گرفته شده در آزمایش تزریق آب در سنگ مخزن.....	76
جدول 2-4: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی.....	79
جدول 3-4: مقایسه هزینه محاسباتی روش چند با مقیاسی با المان‌های کمکی اصلاح شده با حل مستقیم بر روی	
مقیاس ریز.....	91

علائم و اختصارات

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

فصل اول:

معرفی تحقیق و هدف از انجام آن

1-1- طرح مسئله و اهمیت مطالعه

بسیاری از مسائل فیزیکی نظیر حرکت سیال در مخازن نفتی و رفتار مکانیکی مواد کامپوزیتی دارای محیطی با مقیاس‌های مختلف می‌باشند [1-8]. به عنوان نمونه مخازن نفتی دارای بازه گسترده‌ای از مقیاس در حد میکرون برای مقیاس منفذی¹ تا حد چند ده متر متناسب با ابعاد مخزن می‌باشد [1]. با توجه به رشد تکنولوژی در زمینه حفاری، روش‌های ژئوفیزیکی، بررسی رفتارهای فیزیکی مختلف و پیشرفت روش‌های مختلف آماری، الگوهای زمین‌شناختی² پیچیده‌ای برای مخازن نفتی که حاوی اطلاعات بسیاری در مقیاس ریز هستند، ارائه گردیده است [9-16].

این الگوهای زمین‌شناختی عموماً بر پایه چینه‌شناسی³، رسوب‌شناسی⁴ و تفسیر و ارزیابی‌های آماری⁵ تهیه می‌گردند. این الگوها عموماً با شبکه‌های با اندازه‌ای در حدود 10-50 متر در راستاهای افقی و 0/1-1 متر در راستای عمودی ارائه می‌شوند [1,17]. در واقع ابتدا مقیاس منفذی به وسیله آزمایش‌های متعدد و روابط آماری به مقیاس زمین‌شناسی تبدیل [1,18] و با معادل‌سازی جهت مقیاسی بالاتر به منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. دلایل مختلفی در به کارگیری اینگونه معادل‌سازی‌ها نقش دارند. ابتدا اینکه جریان در مخزن تحت تأثیر پارامترهایی در مقیاس مکانیک پیوسته⁶ (که عموماً در مقیاسی در حدود 10-1000 متر می‌باشد) رخ می‌دهد. اما مطلب اصلی در این زمینه توجه به این نکته است که نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مخزن توانایی شبیه‌سازی برای حدود 10^5 - 10^6 المان را دارد [19]. تعداد دقیق المان‌ها بستگی به الگوی شبیه‌ساز (نفت مرده⁷، نفت سیاه⁸، ترکیبی⁹) دارد. اما از سوی دیگر الگوهای زمین‌شناسی دارای المان‌هایی در حدود 10^8 - 10^7 المان می‌باشند [17]. تعداد المان‌های الگوی زمین‌شناسی نیز با توجه به بافت و ابعاد مخزن

¹ Pore scale

² Geological

³ Stratigraphy

⁴ Sedimentology

⁵ Statistic

⁶ Continuum mechanic

⁷ Dead oil

⁸ Black oil

⁹ Compositional

متفاوت می‌باشد. از طرف دیگر بیشتر پارامترهای مخزن با عدم قطعیت همراه هستند و برای از بین بردن ابهامات گاهی تا هزاران اجرا برای تعیین تغییرات لازم است. از این‌رو شبیه‌سازی آن‌ها با مقیاس منفذی غیرممکن و یا غیرمقبول می‌باشند.

از طرف دیگر چنان‌که در ابتدا ذکر شد شبیه‌سازی مخزن با طیف گسترده‌ای از مقیاس‌های متفاوت همراه است و هر پدیده فیزیکی در گستره خاصی تأثیرگذار است. همچنین با گسترش علم و پیشرفته‌تر شدن روش‌های استخراج، معادلات دیگری اضافه می‌گردند، که در صورتی که هر پدیده فیزیکی در جایگاه خود بررسی گردد، هم از حجم معادلات کاسته گردیده و هم دقت در تعیین پارامترها بالا می‌رود. در نهایت استفاده از روش چندمقیاسی با تفکیک مقیاس و جداکردن المان‌ها، امکان ایجاد برنامه با قابلیت حل موازی¹ را فراهم می‌آورد.

با توجه به مطالب عنوان شده تلاش گسترده‌ای از اوایل دهه 60 میلادی آغاز گردید [20, 21]. اصول روش‌ها مبتنی بر میانگین‌گیرهای مختلف، روش‌های آماری و روش‌های تحلیلی بود [20]. پس از آن در اوایل دهه 90 و رشد تکنولوژی و پیشرفت یارانه‌ها، روش‌های عددی متنوعی ارائه گردید [22]. در تمامی روش‌های ارائه شده که اصولاً به نام روش‌های مقیاس بالا² نامیده می‌شوند، سعی در تخمین نفوذپذیری به نحوی است که نفوذپذیری حاصل در برگیرنده خصوصیات در مقیاس پایین‌تر باشد. در واقع ناهمگنی موجود در مقیاس پایین به صورت همگن در مقیاس بالاتر با در نظر گرفتن تأثیر آن ایجاد می‌گردد. روش‌های فوق چنان‌که از نام آن‌ها نیز پیداست روش چندمقیاسی نبوده و در واقع روش ارتقاء به مقیاس بالاتر می‌باشند که حل معادلات بر روی آن مقیاس صورت می‌گیرد. در سال 1997 بر پایه کار وو و هو³ روش چندمقیاسی⁴ بنا گردید [23]. از ضعف‌های الگوی فوق پایستار نبودن جرم در حل معادلات بود. از این رو مدل‌های مختلفی در زمینه ترکیبی⁵، روش پایستار دو مقیاسی زیر شبکه¹ و روش چندمقیاسی احجام محدود² ارائه گردیده‌اند.

¹ Parallel computing

² Upscaling

³ Wu and Hou

⁴ Multiscale

⁵ Mixed

در تمامی روش‌های نام برده سعی بر پایستار بودن جرم در مقیاس پایین می‌باشد. از بین روش‌های فوق روش چندمقیاسی احجام محدود مقبولیت و گسترش بیشتری یافته است. این الگوها از سال 2003 بر پایه کار جنی³ و همکاران بنیان‌گذاری گردید[24]. این الگو تنها برای یک فاز و بدون در نظر گرفتن کاپیلاری، حلالیت فشارپذیری و در حالت دو بعدی ارائه گردید. در این الگو برای لحاظ کردن ناهمگنی متأثر از مقیاس پایین توابع پایه‌ای تعریف می‌گردد که با حل معادلات بیضوی⁴ فشار بر روی هر زیرپهنه به دست می‌آیند. همچنین جهت حل معادلات جریان با تعریف توابع پایه‌ای دیگری پایستار بودن جرم بر روی مقیاس پایین که از اهمیت اساسی برخوردار است را تضمین می‌کند. پس از آن الگو گسترش پیدا کرد و برای حالت چندفازی نیز ارائه گردیدند[25-30]. در تمامی پیشرفت‌های صورت گرفته در کمتر از یک دهه اخیر بر روی این الگوها، که برای محیط متخلخل ارائه گردیده، تأثیر تنش مؤثر بر روی ساختار خاک که موجب تغییر در تخلخل و در نتیجه نفوذپذیری می‌شود نادیده گرفته شده است.

با توجه به آنچه در بالا ذکر شد الگوهای ارائه شده تنها برای محیط‌های تغییر شکل‌ناپذیر صادق می‌باشند و معادله تعادل برای محیط متخلخل در نظر گرفته نشده است. همچنین باید در نظر داشت، برخی از مخازن جهان تغییر شکل‌پذیر بوده و موارد متعددی از صدمه دیدن تجهیزات سطحی (مانند میدان نفتی اکوفیسک⁵ [31, 32]، ناپایداری چاه [33, 34] و همچنین آسیب‌های زیست‌محیطی (مانند میدان نفتی گوس گریک⁶ و میدان گازی گرونینگن⁷) [35, 36] ناشی از تغییر مکان‌های محیط متخلخل گزارش شده‌اند. از این‌رو با توجه به تغییر شکل‌های بزرگی که در مناطق مختلف نظیر مخزن باچاکوئرو⁸ [37]، میدان نفتی ویلمینگتن⁹ [38] میدان گازی راونا¹⁰ [39, 40] و موارد

¹ Numerical subgrid upscaling method

² Multiscale Finite Volume (MSFV)

³ Jenny

⁴ Elliptic

⁵ Ekofisk

⁶ Goose greek

⁷ Groningen

⁸ Bachaquero

⁹ Wilmington

¹⁰ Ravena

دیگری که علاقه‌مندان می‌توانند به کتاب لوییس و شرفلر¹ در سال 1988 رجوع نمایند [41]، اهمیت این مسئله مشخص می‌گردد. همچنین قابل ذکر است سازندهایی نظیر آسماری و میدان نفتی آغاجاری ایران نیز در حیطه جریان موجود تغییر شکل‌پذیر می‌باشند [42, 43]. در همین زمینه، فولادی مقدم و همکاران با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی رادار² در میدان نفتی آغاجاری تغییر شکلی در حدود 19 میلی‌متر را در مدت زمان کوتاهی ثبت کردند. با توجه به موارد اشاره شده و در نظر گرفتن این مهم که تغییر مکان‌های فاز جامد نه تنها موجب ایجاد صدمه به تأسیسات بالادستی شده، بلکه سبب تغییر مسیر جریان نیز خواهد شد. از این‌رو بررسی تنش در محیط مخزن و تغییر شکل‌های ایجاد شده اهمیت می‌یابد.

2-1- اهداف مطالعه

با توجه به وجود تجهیزات استحصال و فراورش 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، هدف از پایان‌نامه حاضر به دست آوردن تغییر شکل در محیط مخزن با در نظر گرفتن هر پدیده فیزیکی در مقیاس مناسب می‌باشد. روند در نظر گرفته شده به طریقی است که الگوی عددی ارائه شده توانایی تعیین تغییر شکل 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 را در محیط متخلخل تغییر شکل‌پذیر شبیه‌سازی نماید. از این‌رو می‌تواند در صنعت نفت و یا سایر مسائلی که ارتباط فازهای سیال و تغییر شکل جامد در آن‌ها مطرح می‌باشد مورد استفاده قرار گیرد.

¹ Lewis and Schrefler

² Differential Interferometric SAR

3-1- روش تحقیق

در این پایان نامه ابتدا معادلات اصلی مدنظر قرار می‌گیرند. با توجه به اهداف مورد نظر، معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، معادلات بقای ممنتوم در فازهای مختلف می‌باشد. جهت تشکیل دستگاه معادلات ابتدا فازهای سیال و فاز جامد با توجه به ماهیت فیزیکی مدنظر جداگانه گسسته-سازی گردیده‌اند. جهت فازهای سیال ساختار احجام محدود و برای معادله تعادل و تغییر شکل فاز جامد روش اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر معادلات اصلی، یک سری معادلات ساختاری در فازهای سیال و فاز جامد جهت برقراری ارتباط بین پارامترهای اصلی و پارامترهای وابسته مورد استفاده قرار گرفته است. پس از تفکیک فازهای مختلف، اثر متقابل فازهای سیال و فاز جامد توسط حلقه خارجی با روش نیوتن رافسون برقرار گردیده است. در نهایت الگویی تحت عنوان M^3GM^1 جهت شبیه‌سازی حرکت سیال و تعیین تغییر شکل‌های محیط متخلخل ارائه گردیده است. علاوه بر آن با توجه به اثر محیط پیرامون مخزن، لایه‌های سنگ خارج از مخزن توسط فنرهای شبیه‌سازی شده‌اند و به M^3GM اضافه گردیده‌اند، تا تطبیق با شرایط واقعی به شکل صحیح‌تری لحاظ شود. الگوی نهایی تحت عنوان M^3GMSR^2 قابلیت شبیه‌سازی مخزن با در نظر گرفتن محیط اطراف مخزن را دارا می‌باشد. پس از تکمیل سیستم‌های معادلات و برقراری اثر متقابل عملکرد الگوهای ارائه شده M^3GM و M^3GMSR توسط مسائل شاخص مورد بررسی قرار گرفته و نتایج تحقیق ارائه شده است.

4-1- نوآوری‌های تحقیق

- 1- مطالعات کتابخانه‌ای نشان می‌دهد، مدل‌سازی مخازن با توجه به حجم گسترده آن‌ها دارای تعداد متعدد المان و هزینه مدل‌سازی بالا می‌باشند. از این‌رو نیاز به روش‌هایی است که به طریقی تعداد المان‌ها کاهش یافته و تأثیر عوامل تأثیرگذار نظیر نفوذپذیری در مقیاس ریز به طریقی در

¹ Mixed Multiscale Multiphysic Geomechanical Model

² Mixed Multiscale Multiphysic Geomechanical Model with Sorounded Rock

پهنه‌های درشت‌تر لحاظ گردد. از طرف دیگر تأثیر و اندرکنش فاز جامد با فازهای سیال در بسیاری از مخازن امری مهم می‌باشد. در این رساله با توجه به وجود فیزیک‌های مختلف در مقیاس‌های متفاوت، تأثیر هر پدیده فیزیکی در پهنه تأثیر خود لحاظ شده و در اندرکنش با فازهای دیگر در نظر گرفته شده است. با استفاده از این روش، هزینه محاسباتی به شدت کاهش می‌یابد. این رویکرد با توجه به این‌که در مخازن نفتی شبیه سازی‌های متعددی جهت به دست آوردن حالت بهینه برای تعیین محل چاه‌های تزریق و برداشت صورت می‌گیرد، اهمیت و ارزش بیشتری می‌یابد.

- با توجه به اینکه هر یک از فازهای سیال و جامد دارای مشخصات خاص خود می‌باشند، در این پایان‌نامه از ساختارهای جداگانه‌ای جهت مدل‌سازی آن‌ها استفاده شده است. با توجه به امکان تفسیر فیزیکی روشن و در نظر گرفتن پایداری جرمی ذاتی از ساختار احجام محدود برای فازهای سیال استفاده شده است. همچنین با توجه به ماهیت غیرخطی تغییر مکان در پهنه فاز جامد از روش اجزاء محدود جهت مدل‌سازی فاز جامد بهره برده شده است. این ساختار امکان اضافه نمودن مدل‌های پیچیده تنش-تغییر مکان را به الگو خواهد داد. همچنین با توجه به ساختارهای جداگانه فازهای مختلف امکان مانور بر روی هر یک از فازها بنا به ضرورت و یا شرایط خاص مخازن مختلف فراهم می‌گردد.

- با توجه به اینکه تغییر شکل مخزن از سختی محیط اطراف خود نیز تأثیر می‌پذیرد، لازم است تا سیستم مخزن با سنگ‌های پیرامون خود توسط یک مدل به طور کامل مدل‌سازی گردد. اما مدل‌سازی این پهنه وسیع با توجه به تعداد بالای المان، بسیار زمان‌بر و یا حتی غیرممکن است. از این‌رو با اعمال سختی گره‌ای ضمن حذف فیزیکی محیط اطراف مخزن، تأثیرات وجود آن بر وجوه مخزن در نظر گرفته شده است.

- اعمال شرایط مرزی دریکله در الگوهای چندمقیاسی با محدودیتهایی همراه است. در این تحقیق با اصلاح المانهای کمکی بر روی مرزها روشی جهت اعمال شرایط مرزی دریکله ارائه گردیده است.

5-1- ساختار رساله

فعالیت‌های صورت گرفته در این رساله در قالب بخش‌های زیر تشریح و بیان می‌گردد:

- فصل دوم مبانی اولیه روش چندمقیاسی را مطرح نموده و مقیاس‌های مختلف موجود در مخزن را ارزیابی می‌نماید. همچنین روش‌های مختلف و پیشرفت‌های انجام گرفته در زمینه مقیاس بالا و چندمقیاسی، در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این فصل همچنین کلیاتی از چندفیزیکی ارائه گردیده، ضرورت و تاریخچه مختصری از نحوه تنیدن حرکت فازهای سیال و تغییر شکل فاز جامد اشاره شده است.
- فصل سوم به ارائه معادلات اصلی خواهد پرداخت. با توجه به تغییر شکل‌پذیری محیط متخلخل (حرکت نسبی جامد و سیال) معادلات حاکم در هر فاز بیان گردیده است. با در نظر گرفتن این نکته که اصولاً معادلات اصلی حاکم بر الگو پاسخگوی مجهولات و حل معادلات نمی‌باشند، روابط ساختاری حاکم بر فازهای سیال و جامد نیز در این فصل ارائه می‌گردند. این فصل همچنین جمع‌بندی معادلات را در بر خواهد داشت. معادلات حاکم بر الگو به صورت متوالی بیان گردیده و دستگاه معادلات حاکم بسته می‌شود. در این بخش فازهای سیال با روش احجام محدود و فاز جامد با روش اجزاء محدود گسسته‌سازی شده است. همچنین اندرکنش میان آن‌ها توسط الگوریتم مشخصی بیان گردیده است. الگوی ارائه شده با توجه به در نظر گرفتن فیزیک‌های مختلف در فازهای سیال و جامد، مقیاس‌های متفاوت در حل معادلات مربوطه، در نظر گرفتن ساختارهای حل متفاوت برای فازهای مربوطه و همچنین در نظر گرفتن تغییر شکل‌پذیری فاز

جامد الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی¹ و یا به اختصار M^3GM نام‌گذاری گردیده است. در ادامه همچنین با اصلاح فرض محلی در روش چندمقیاسی و در نظر گرفتن شرایط مرزی به صورت دقیق‌تر، الگوی مربوطه اصلاح شده و با به‌روزرسانی توسط حلقه تکرار، الگوی اصلاح شده تحت عنوان iM^3GM^2 ارائه می‌گردد. در این بخش همچنین روشی جهت اعمال شرایط مرزی دریکله بر روی سطوح مرزی با اصلاح سلول‌های درشت کمکی ارائه گردیده است.

همچنین باید در نظر داشت، شرایط مرزی مکانیکی برای تغییر شکل‌های محیط متخلخل، به صورت کاملاً صلب و یا آزاد نمی‌باشند. از این‌رو الگوی M^3GM بر مبنای آثار ناشی از اندرکنش سنگ‌های محیط پیرامون ارتقاء یافته و تأثیر محیط اطراف توسط فنرهایی در مرزهای محیط متخلخل اعمال گردیده و الگوی چندمقیاسی چندفیزیکی ترکیبی ژئومکانیکی با فنرهای پیرامونی³ و یا به اختصار M^3GMSR ارائه گردیده است.

- فصل چهارم به مقایسه و بررسی نتایج حاصله از M^3GM با حل مسئله بر روی مقیاس‌های ریز خواهد پرداخت. همچنین نتایج به دست آمده توسط M^3GMSR با نتایج M^3GM و حل بر روی مقیاس ریز و بدون تغییر شکل را مورد بررسی قرار داده تا تأثیر تغییر شکل در محیط مخزن و عملکرد لایه‌های اطراف مخزن مشخص گردد.
- فصل پنجم رساله نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاد جهت تحقیقات آتی اختصاص یافته است.

¹ Multiscale Multiphysic Mixed Geomechanical Model

² iterative Multiscale Multiphysic Mixed Geomechanical Model

³ Multiscale Multiphysic Mixed Geomechanical Model with Surrounding Rock