بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده مهندسی

پایان نامه دکتری عمران

گرایش مدیریت منابع آب و هیدرولیک

عنوان :

مدلسازی جریانهای دوفازی در محیط متخلخل با استفاده از روش گالرکین ناپیوسته

استاد راهنما:

دکتر حمید رضا غفوری

اساتید مشاور:

دکتر حسین محمد ولی سامانی

دکتر مهرداد تقی زاده منظری

نگارنده:

مهدی جامعی

خرداد ماه 1394

تأییدیهٔ صحت و اصالت نتایج و مجوز بهره برداری

کلیهٔ نتایج این رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار سایر محققین را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. همچنین پاسخگویی و مسئولیت در قبال صحت نتایج، به عهده اینجانب خواهد بود.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شهید چمران اهواز می باشد و هر گونه تکثیر، اقتباس و نسخه برداری طبق مقررات کتابداری دانشگاه مجاز می باشد.

نام و نام خانوادگی : مهدی جامعی

شماره دانشجویی : 8 9 4 1 4 0 4

این مجموعه را تقدیم می کنم به:

ساحت مقدس امام عصر (عج)

روح پدر بزرگوارم ... که یادش همواره گرمابخش لحظات حساس زندگیست

مادر عزیز و مهربانم برای دعای خیرش که همواره بدرقه راهم بود و در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده است

تقدیم به همسر مهربانم

به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است و طی مدت دوره دکتری از هیچ کوششی فروگذار نبود.

و البته دختر غردسالم که خداوند از برکت وجودش گره مشکلاتم را یکی پس از دیگری باز نمود.

تقدیم به خواهران و برادرانم و علی الخصوص اخوی بزرگوارم جناب آقای پروفسور مسعود جامعی که با وجود مسافت دور، مرا در تدوین مقالات پژوهشی و... یاری نمود.

از استاد و برادر گرامیم جناب پروفسور حمیدرضا غفوری بسیار سپاسگذارم که با راهنماییهای ارزنده خود مسیر تحقق اهداف این رساله را هموار نمودند.

از جناب پروفسور مهرداد تقی زاده منظری که با دراختیار گذاردن برخی منابع مرا در امر تحقیق یاری رسانید.

همچنین بر خود لازم می دانم از آقایان پروفسور حسین محمد ولی سامانی، دکتر علی حقیقی، پروفسور محمد محمودیان شوشتری و دکتر آرش ادیب و سایر عزیزانی که در دوره دکتری افتخار شاگردی ایشان را داشتم تقدیر و تشکر نمایم. همچنین یاد مرحوم دکتر محمود بینا را بعنوان مشوق و همکار، گرامی می دارم.

همچنین از دوستان گرامیم، آقایان دکتر سید احسان حسینی و مهندس نیما آتشی بدلیل کمکهایشان، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین لازمست تا از محققینی که بدون هر گونه چشم داشتی، با اینجانب از طریق ایمیل در ارتباط بوده و بنده را در تهیه این رساله مرا یاری رسانیدند، تقدیر نمایم:

دکتر حسین حتیت از شرکت شورون

دکتر برنادو کاکبرن از دانشگاه مینه سوتا

دکتر الکساند ارن از دانشگاه پاریس

دکتر توماس ورولیک از دانشگاه پاریس

دکتر وینس اروین از دانشگاه کلمسون

دکتر دانیله بوفی از دانشگاه پاریس

دکتر ایگور موزالفسکی از دانشگاه سائوپائولو

دکتر آرنورد داگلاس از دانشگاه آستین تگزاس

دکتر پیری میکیسکا از دانشگاه پراگ

دکتر باتریس ریویه از دانشگاه پیتسبورگ

فهرست مطالب

فرم ارزشیابی ..... الف

اهدا نامه ..... ث

قدردانی ..... ج

فهرست مطالب ..... ح

فهرست شکل‌ها و نمودارها ..... ز

فهرست جدول‌ها ..... ض

فهرست علائم و نشانه ها ..... ط

چکیده پایان‌نامه به زبان فارسی ..... غ

فصل اول

مقدمه، طرح مساله و مروری بر تحقیقات پیشین 1

1-1- موضوع پژوهش 1

1-2- اهمیت و ضرورت وبیان مسئله 2

1-3- اهداف رساله 6

1-4- پرسشها و فرضیات اولیه 8

1-5- تعریف اصطلاحات و مفاهیم مهم 9

1-6- نوآوریهای ارائه شده در رساله 10

1-7- ساختار رساله 11

فصل دوم

مروری بر تحقیقات پیش 13

2-1- پیشینه تحقیقات در زمینه مدلسازی جریانهای دو فازی در محیطهای 13

2-2- جایگاه تحقیقات این رساله میان سایر مطالعات 18

فصل سوم

معادلات حاکم بر جریانهای دوفازی در محیط متخلخل 24

3-1- خصوصیات سیال و محیط متخلخل 25
3-1-1- لزجت (گرانروی) 27
3-1-2- تخلخل 27
3-1-3- درجه اشباع 28
3-1-4- دانسیته (چگالی) 29
3-2- تعاریف پایه در جریانهای دوفازی (امتزاج ناپذیر) 29
3-2-1- درجه اشباع باقیمانده و درجه اشباع موثر 31
3-2-2- روابط فشار مویینگی 31
3-2-3- نیروی کشش سطحی 33
3-2-4- فشار مویینگی ورودی (داخل شوندگی) 35
3-2-5- نفوذ پذیری نسبی 36
3-2-6- تحرک پذیری و تابع کسر جریان هر فاز 38
3-3- معادله جریان تک فاز در محیط متخلخل 39
3-3-1- قانون بقای جرم در جریان تک فازی 39
3-3-2- قانون دارسی 41
3-4- قانون بقای جرم در محیط چند فازی 42
3-5- فرمول بندی روابط فشار و درجه اشباع فاز ترکننده 44
3-5-1- معادله فشار فاز ترکننده 44
3-5-2- معادله درجه اشباع 45
3-5-3- شرایط مرزی معادلات حاکم 47
3-6- توصیف رفتار معادلات حاکم براساس روابط بروکس-کری 49

فصل چهارم

گسسته سازی معادلات جریانهای دوفازی با استفاده از روشهای گالرکین ناپیوسته 52
4-1- جایگاه روش گالرکین ناپیوسته در بین روشهای المان محدود 52
4-2- مروری مختصر بر پیشینه روش گالرکین ناپیوسته 57
4-3- مزایای روش گالرکین ناپیوسته 59
4-4- تفاوتهای ساختاری روشهای المان محدود پیوسته CG و ناپیوسته DG 62
4-4-1- تعداد درجات آزادی 63
4-4-2- شرایط مرزی دیریشله 64
4-4-3- درجه دقت 64
4-4-4- بقای جرم 64
4-5- انواع معادلات دیفرانسیلی جزئی پرکاربرد در علوم مهندسی 64
4-5-1- معادلات هذلولوی 65
4-5-2- معادلات سهموی 65

4-5-3- معادلات بیضوی 66
4-6- تقسیم بندی انواع روشهای گالرکین ناپیوسته (DG) 66
الف) روشهای پنالتی داخلی (یا روشهای پایه) 67
ب) روشهای بر مبتنی بر شارهای عددی 67
4-7- معرفی اصطلاحات و مبانی ریاضی روشهای عددی گالرکین ناپیوسته 68
4-7-1- تعاریف دامنه، انواع وجوه و بردار نرمال 69
4-7-2- فضای های گسسته چند جمله ای و درجات آزادی 70
4-7-3- مفاهیم "پرش" و "متوسط" در گالرکین ناپیوسته 72
4-8- گسسته سازی مکانی معادلات جریانهای دوفازی 74
4-8-1- گسسته سازی مکانی معادله فشار 76
4-8-2- گسسته سازی مکانی معادله درجه اشباع 87
4-9- گسسته سازی زمانی معادلات حاکم 92
الف) استراتژی اول: معرفی روش حل متوالی ضمنی (Seq.S) 93
ب) استراتژی دوم: معرفی روش Improved IMPES 94
4-9-1- گسسته سازی زمانی معادلات حاکم بر اساس استراتژی حل متوالی ضمنی (Seq.S) 97
4-9-2- گسسته سازی زمانی معادلات حاکم بر اساس استراتژی Improved IMPES 107
4-10- بازسازی و نگاشت میدان سرعت در فضای H(div) 118
4-11- معرفی محدود کننده های شیب 124
4-11-1- محدود کننده شیب یک بعدی 126
4-11-2- محدود کننده دورلوفسکی اصلاح شده در المانهای مثلثی 129
4-11-3- محدود کننده شیب چاونت-جافر اصلاح شده در المانهای بی ساختار مثلثی 134

فصل پنجم

معرفی مدل، صحت سنجی، کاربرد و تحلیل حساسیت آن 139
5-1- معرفی مدل 139
5-1-1- روال اصلی (Main Solver) 140
5-1-1-1- زیر روال حلگر معادله فشار (Pressure_Solution) 140
5-1-1-2- زیر روال حلگر معادله درجه اشباع (Saturation_solution) 141
5-1-1-3- زیر روال تعیین مولفه های نرمال سرعت (Advanced_velocity) 141
5-1-1-4- زیر روال محدود کننده شیب (Slope_limiter) 141
5-2- معرفی زیر روال های عمومی 142
5-1-2-1- زیر روال ساخت اطلاعات مدل گالرکین ناپیوسته (Generic2d) 142
5-1-2-2- زیرروال تبدیل مختصات نقاط گوسی از دستگاه محلی به عمومی بر روی وجوه (Convert_ksi_to_xy) 142
5-1-2-3- زیر روال تبدیل مختصات دکارتی به مختصات سطحی (Convert_xy_to_L1L2) 142

5-1-2-4- زیر روال توابع شکلی یا آزمون (Shape_function) 143
5-1-2-5- زیر روال محاسبه نفوذ پذیری نسبی و پارامترهای مربوطه (Relative_perm) 143
5-1-2-6- زیر روال نگاشت بردار نرمال سرعت از فضای راویارت-توماس به فضای گالرکین ناپیوسته (Raviart_Thomas) 144
5-1-2-7- زیر روال تعیین نقاط گوسی مربوط به انتگرال گیری عددی (Quadrature_roles) 144
5-1-2-8- زیر روال تعیین مقدار اسکالر در نقاط گوسی (Gaussian_value) 144
5-1-2-9- زیر روال مشتق تابع کسر جریان (f_w) (der_fractional) 144
5-2- صحت سنجی مدل 146
5-2-1- حل مسئله هذلولوی باکلی-لورت 146
5-2-2- حل مسئله بیضوی مک ورتر 153
5-3- کاربرد مدل و حل مسائل عددی 156
5-3-1- مسئله چاههای پنجگانه 157
5-3-2- چاههای پنجگانه در محیط ناهمگن 163
5-3-3- مسئله باکلی-لورت دو بعدی در محیط ناهمگن تصادفی 169
5-3-4- مسئله مخزن بسیار ناهمگن 172
5-3-5- مسئله موانع موازی کم نفوذپذیر 176
5-4- آنالیز حساسیت مدل 181
5-4-1- تحلیل حساسیت پارامتر نفوذ پذیری (K) 181
5-4-2- تحلیل حساسیت پارامتر فشار مویینگی داخلی (P_d) 182
5-4-3- تحلیل حساسیت نسبت لزجت فاز ترکننده به غیر تر کننده ($\alpha = \frac{\mu_w}{\mu_n}$) 183
5-4-4- تحلیل حساسیت ضریب تخلخل (ϕ) 184
5-4-5- تحلیل حساسیت ضریب توزیع حفرات (ζ) 185
5-4-6- تحلیل حساسیت پارامتر پنالتی ($\sigma_p \geq 0$) در فرمولاسیون مقیاس شده 186
5-4-7- تحلیل حساسیت پارامتر پنالتی ($\sigma_p \geq 0$) در فرمولاسیون مقیاس نشده 187

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات 189
6-1- نتیجه گیری 189
6-2- پیشنهادات 193

ضمیمه آ

سایر فرمولاسیون های پرکاربرد در مدلسازی جریانهای دوفازی 195
آ-1- فرمولاسیون فشار فاز ترکننده - درجه اشباع فاز غیرترکننده 195
آ-2- فرمولاسیون فشار فاز ترکننده - فشار فاز غیر ترکننده 196
آ-3- فرمولاسیون فشار کل - درجه اشباع ترکننده 197

آ-4- فرمولاسیون معادلات فشار – درجه اشباع در فرم هذلولوی 198

ضمیمه ب

روشهای گالرکین ناپیوسته مبتنی بر شار های عددی 199

ب-1- روش گالرکین ناپیوسته رانج-کوتا برای حل مسائل هذلولوی (انتقال-غالب) 199

ب-2- روش گالرکین ناپیوسته محلی(LDG) و حل معادلات مرتبه دو (بیضوی) 203

ب-3- مقایسه روشهای پنالتی داخلی و روشهای مبتنی بر شارهای عددی (محلی) گالرکین ناپیوسته در حل معادلات بیضوی 207

ضمیمه ج

تئوری انتقال متناظر (نگاشت) المانهای مثلثی، انتگرال عددی و انتقال برداری پیولا 210

ج-1- تئوری انتقال متناظر (نگاشت) مختصات از المان مرجع به المان 210

ج-2- انتگرال گیری عددی سطحی بر روی الماهای مثلثی 216

ج-3- انتگرال گیری عددی روی وجوه المانها 217

ج-4- معرفی توابع انترپولاسیون و تئوری انتقال پیولا (Piola) در فضای برداری H(div) 219

ضمیمه د

جمع بندی فرمولهای بکار رفته در رساله 222

د-1- فرمولاسیون حاکم بر جریانهای دوفازی 222

د-2- روابط نفوذ پذیری نسبی و فشار مویینگی بروکس-کری 223

د-3- فرم نهایی گسسته سازی معادله فشار، معرفی ماتریسها و بردارهای معلوم 223

د-4- فرم نهایی گسسته سازی معادله درجه اشباع و معرفی ماتریسها و بردارهای معلوم 225

د-5- روابط محدودکننده شیب چاوئت-جافر 227

د-6- روابط تعیین درجات آزادی و نگاشت میدان سرعت 228

مراجع 231

فهرست شکل‌ها و نمودارها

شکل(1-1) تزریق آب در مخزن نفت در مرحله استحصال ثانویه و سطح تماس مشترک آب و نفت 5
شکل (2-1) جایگاه تحقیق حاضر در زمینه مدلسازی عددی جریانهای دوفازی 19
شکل (2-2) تکنیک های بکار رفته در مدل ارائه شده در رساله حاضر 23
شکل(3-1) دو سیال امتزاج ناپذیر در یک المان نمونه خاک 25
شکل(3-2) انواع آلاینده های امتزاج ناپذیر LNALs و DNAPLs 26
شکل(3-3) زاویه تماس و کشش سطحی ایجاد شده بین فازهای ترکننده و غیرترکننده 30
شکل(3-4) انحنای ایجاد شده در اثر کشش سطحی 33
شکل(3-5) سطح تماس مشترک دو سیال (راست)، اثرموئینگی آب در لوله (چپ) 35
شکل(3-6) المان استوانه ایی در جهت محور X ها 39
شکل(4-1) نحوه گسسته سازی محیط (الف) به روش المانها محدود پیوسته در مقایسه با (ب) روش گالرکین ناپیوسته 56
شکل(4-2) شبکه المان بندی بی ساختار با المانهای شش گرهی و درجات آزادی منطبق بر آنها 60
شکل(4-3) قابلیت مدلسازی ناپیوستگی ها با استفاده از اعمال توابع تقریبی ناپیوسته در گالرکین ناپیوسته 61
شکل(4-4) شبکه مستطیلی با گره های آویزان در نسخه المان بندی تظریف انطباقی 61
شکل (4-5) توابع خطی و غیر خطی برای تقریب زدن یک تابع: توابع تقریب گسسته (چپ) توابع تقریب پیوسته (راست) 62
شکل(4-6) نمایش هندسی سطوح تماس بین المانها و بردار نرمال المانهای مجاور 69
شکل(4-7) مفهوم پرش و متوسط در گالرکین ناپیوسته 72
شکل(4-8) نمودار گردش کار مدلسازی جریانهای دوفازی تراکم ناپذیر به روش حل متوالی(Seq.S) 94
شکل(4-9) نمودار گردش کار مدلسازی جریانهای دوفازی تراکم ناپذیر به روش Improved IMPES 96
شکل(4-10) قطر محاطی المان ρ_T و قطر المان h_T (چپ) قطر محیطی المان ϱ_T (راست) 109
شکل(4-11) نگاشت میدان سرعت ناپیوسته در فضای $H(\mathrm{div})$ به فضای برداری پیوسته (رنگ سیاه میدان سرعت قبل از نگاشت، رنگ قرمز: میدان سرعت بعد از نگاشت) 120
شکل(4-12) درجات آزادی محلی در فضاهای RT_0 و RT_1 123
شکل(4-13) میدان برداری توابع شکلی RT_0 در المانهای مثلثی 124
شکل(4-14) بازساخت خطی تکه ای در روش MUSCL 127
شکل(4-15) محدود کننده شیب در مدلسازی یک بعدی با تقریب خطی به ازای مقادیر متفاوت ϖ 128
شکل(4-16) حل مسئله یک بعدی هذلولوی بدون محدود کننده شیب (چپ) با محدود کننده شیب (راست) 129
شکل(4-17) الگوی گرادیان تقریب خطی در یک المان مثلثی با رویکرد حذف اکسترمم مهای محلی 130
شکل(4-18) الگوی اصلاح شیب در المان ABC با استفاده از محدودکننده شیب دورلوفسکی – اوشر – انگکویست در فرم اصلی 131

شکل(4-19) شکل اصلاح شیب در المانهای مرزی با استفاده از محدودکننده شیب دورلوفسکی-اوشر-انگکویست اصلاح شده برای وجوه با شرط مرزی رابین (چپ) وجوه با شرط مرزی نیومن(راست)..... 133
شکل(4-20) الگوی محدود کننده شیب شاونت-جافر در المانهای مثلثی در $\mathcal{T}_h$..... 136
شکل(4-21) الگوی محدود کننده شیب شاونت-جافر در المانهای مرزی: برای وجوه با شرط مرزی رابین (چپ) وجوه با شرط مرزی نیومن(راست)..... 138
شکل(5-1) نمودار گردش کار کد تهیه شده برای مدلسازی جریانهای دوفازی با روشهای گالرکین ناپیوسته (DG)..... 145
شکل(5-2) (چپ) شبکه "باسامان" مسئله باکلی-لورت با تقسیمات $\Delta x = {}^{L}/_{32}$ (راست) هندسه و شرایط مرزی..... 147
شکل(5-3) مقایسه پروفیل توزیع فشار (چپ) درجه اشباع (راست) در امتداد محور x پس از 180 و 360 روز با استفاده از حل متوالی (Seq.S) ضمنی $(r_p = \{1,2\}, r_s = 1, RT_0)$ با مدلهای ارائه شده توسط گرونیگر و پاک-صمیمی..... 149
شکل(5-4) مقایسه پروفیل توزیع فشار (چپ) درجه اشباع (راست) در امتداد محور x پس از 180 و 360 روز با استفاده از روش IMPES کلاسیک $(r_p = \{1,2\}, r_s = 1, RT_{(r_p-1)})$ با مدلهای ارائه شده توسط گرونیگر و پاک-صمیمی..... 150
شکل(5-5) مقایسه پروفیل طولی مقادیر درجه اشباع به کمک روش المان محدود سنتی با روشهای حل متوالی (Seq.S) (بالا) و IMPES کلاسیک (پایین) روش گالرکین ناپیوسته در مدل حاضر..... 151
شکل(5-6) هندسه و شرایط مرزی مسئله بیضوی مک ورتر..... 154
شکل(5-7) شبکه المان بندی ساختار یافته مسئله مک ورتر(تعداد 512 المان) با تقسیمات $\Delta x = 0.05$ و $\Delta y = 0.4$..... 155
شکل(5-8) مقایسه پروفیل درجه اشباع فشار در امتداد محور x با مدل حاضر، مدل باستین و حل تحلیلی معادله پس از 8000 ثانیه باستین..... 156
شکل(5-9) (چپ) هندسه و شرایط مرزی مسئله چاههای پنجگانه (راست) شبکه المان بندی بی سامان مدل..... 158
شکل(5-10) مقایسه توزیع فشار (بالا) و درجه اشباع آب (پایین) در امتداد پروفیل قطری $x = y$ با استفاده از نسخه OBB-DG در مدل حاضر و نتایج مدل کلیبر و ریویه با شبکه ریز یکنواخت..... 159
شکل(5-11) مقایسه کانتورهای توزیع فشار فاز ترکننده پس از 7.5، 15، 22.5 و 30 روز (A) با روش حل متوالی (Seq.S) ضمنی در مدل حاضر (B)، مدل گالرکین ناپیوسته کلیبر و ریویه با المان بندی تطابقی (C) مدل گالرکین ناپیوسته کلیبر و ریویه با شبکه ریز یکنواخت..... 160
شکل(5-12) مقایسه کانتورهای توزیع درجه اشباع فاز ترکننده پس از 7.5، 15، 22.5 و 30 روز (A) با روش حل متوالی (Seq.S) ضمنی در مدل حاضر (B)، مدل گالرکین ناپیوسته کلیبر و ریویه با المان بندی تطابقی (C) مدل گالرکین ناپیوسته کلیبر و ریویه با شبکه ریز یکنواخت..... 161
شکل(5-13) مقایسه کانتورهای توزیع درجه اشباع فاز ترکننده پس از 15 و 30 روز (چپ) با استفاده محدود کننده شیب دورلوفسکی اصلاح شده (راست) و محدود کننده شیب شاونت-جافر اصلاح شده..... 162
شکل(5-14) (چپ) هندسه و شرایط مرزی مسئله (راست) شبکه مثلثی بدون ساختار با 1129 المان..... 163

شکل(5-15) پروفیل قطری فشار(Pa) به ازای مقادیر مختلف پنالتی - مسئله چاه های پنجگانه در مخزن ناهمگن با استفاده از نسخه پنالتی داخلی NWIP-DG 165
شکل(5-16) پروفیل قطری درجه اشباع (-) به ازای مقادیر مختلف پنالتی - مسئله چاه های پنجگانه در مخزن ناهمگن 165
شکل(5-17) مقایسه توزیع میدان فشار آب در 7/5، 15، 22/5 و 30 روز (چپ) با استفاده از استراتژی حل متوالی مدل حاضر ($\sigma_F = 50$) (راست) و مدل گالرکین ناپیوسته OBB-DG ارائه شده توسط کلیبرو ریویه با المانهای تطابقی 166
شکل(5-18) مقایسه توزیع درجه اشباع در 7/5، 15، 22/5 و 30 روز (چپ) با استفاده از استراتژی حل متوالی مدل حاضر ($\sigma_F = 50$) (راست) و مدل گالرکین ناپیوسته OBB-DG ارائه شده توسط کلیبر و ریویه با المانهای تطابقی 167
شکل(5-19) مقایسه توزیع درجه اشباع اطراف ناحیه کم نفوذ پذیر پس از 15 و 30 روز (چپ) با استفاده از استراتژی حل متوالی مدل حاضر ($\sigma_F = 10$) با استفاده از محدودکننده شیب دورلوفسکی اصلاح شده (راست) شاونت-جافر اصلاح شده 168
شکل(5-20) (چپ) شرایط مرزی و شبکه بندی المان (راست) نفوذپذیری تصادفی (با مقیاس log(k) لگاریتم مبنای دارسی ($k \in (10^{-12} - 10^{-10}m^2)$ 169
شکل(5-21) کانتور متغیرهای اصلی برای مدتهای 10،5، 15و 20 روز (چپ) با استفاده از روشSWIP-DG : توزیع فشار فازترکننده (Pa) (راست) توزیع درجه اشباع فاز ترکننده (-) 171
شکل(5-22) (چپ) شرایط مرزی و شبکه المان بندی(راست)، هندسه مسئله باکلی-لورت دو بعدی 172
شکل(5-23) کانتور درجه اشباع برای مدت زمانهای 17/5، 35، 52/5و70 روز (چپ) با استفاده از نسخه NWIP با روش IMPES کلاسیک (R=1) (راست) روش OBB مدل تهیه شده توسط کلیبر و ریویه 174
شکل(5-24) مقایسه کانتورهای درجه اشباع برای مدت زمانهای 35 70 روز (چپ) به روش Improved IMPES و R= 4 (راست) و روش IMPES کلاسیک وR=1 175
شکل(5-25) (چپ) هندسه و شبکه المان بندی مدل با تعداد 1646 المان (ساختار نیافته) (چپ) و شرایط مرزی مسئله (راست) 176
شکل(5-26) (چپ) کانتور های فشار و خطوط جریان (راست) و کانتور های سه بعدی فشار برای مدت 30 و 60 روز به روش Improved IMPES و (R=5) 178
شکل(5-27) کانتورهای درجه اشباع برای مدت 15، 30، 45 و 60 روز به روش Improved IMPES و (R=5) 179
شکل(5-28) مقایسه کانتورهای درجه اشباع برای زمان های 45 و60 روز (پایین) به روش Improved IMPES (R=5) برای مدل حاضر و(بالا) IMPES کلاسیک(R=1) برای مدل پایه 179
شکل(5-29) مقایسه پروفیل طولی (X, Y=75) (چپ) درجه اشباع (راست) و فشار برای مدت 60 روز به روشهای Improved IMPES (R=5) و روش IMPES کلاسیک (R=1) با مدل پایه 180
شکل(5-30) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه نسبت به نفوذ پذیری: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-) 182
شکل(5-31) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه نسبت به فشار موبینگی ورودی: (چپ) پروفیل فشار فاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-) 183

شکل(5-32) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه در مورد نسبت وزیسکوزیته: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-)..... 184
شکل(5-33) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه نسبت به تخلخل: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-)..... 185
شکل(5-34) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه درمورد ضریب توزیع حفرات ζ: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-)..... 186
شکل(5-35) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه نسبت به پارامتر پنالتی مقیاس شده: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-)..... 187
شکل(5-36) تحلیل حساسیت مدل چاه های پنجگانه در مورد پنالتی مقیاس شده در روش NIPG: (چپ) پروفیل فشارفاز ترکننده (Pa) (راست) پروفیل درجه اشباع فاز ترکننده (-)..... 188
شکل(ب-1) رد تابع u_h در المان های مجاور T^+ و T^-..... 201
شکل (ب-2) تفاوت شمائیک روشهای گالرکین ناپیوسته پنالتی داخلی و محلی در حل معادلات بیضوی (عملگر انتشار)..... 209
شکل(ب-3) دو المان مجاور با وجه مشترک - خط قرمز: محل تبادل شار..... 209
شکل(ج-1) نگاشت متناظر المان مرجع $\hat{T}$ به المان T..... 210
شکل(ج-2) (راست) المان مرتبه اول خطی 3 گرهی (چپ) دستگاه مختصات سطحی..... 211
شکل(ج-3) توابع انترپولاسیون در المانهای مثلثی مرتبه اول..... 213
شکل(ج-4) توابع انترپولاسیون در المانهای مثلثی مرتبه دوم شش گرهی..... 215
شکل(ج-5) نقاط انتگرال گیری گوسی به ازای درجات تقریب مختلف..... 216
شکل(ج-6) المان مرجع یک بعدی مرتبه اول خطی (راست) و مرتبه دوم (چپ)..... 218
شکل(ج-7) نقاط انتگرال گیری گوس ـ ژندر به ازای تعداد 2 و 3 نقطه گوسی..... 218
شکل(ج-8) نگاشت المان مثلثی از المان فیزیکی به المان مرجع..... 220

نمودار (3-1) فشار مویینگی - درجه اشباع برای رابطه بروکس – کری(الف) و رابطه وان گنختون (ب) به ازای ضرائب مختلف λ و n..... 32
نمودار(3-2) اثر پسمانده درنمودار فشار مویینگی– درجه اشباع..... 34
نمودار (3-3) نفوذ پذیری نسبی - درجه اشباع برای رابطه بروکس – کری و وان گنختون به ازای ضرائب مختلف λ و n..... 38
نمودار (3-4) نحوه تغییرات P_c و $\frac{dP_c}{dS_w}$ به ازای مقادیر درجه اشباع برای روابط بروکس - کری..... 50
نمودار (3-5) تغییرات k_{rn}، k_{rw}، f_w و $\frac{df_w}{dS_w}$ به ازای مقادیر درجه اشباع برای روابط بروکس - کری..... 51
نمودار (4-1) انواع تقسیمات روشهای المان محدود..... 52
نمودار (4-2) آمار سالانه مقالات ارائه شده درباره کاربرد روش گالرکین ناپیوسته در علوم ریاضی از دهه 70 میلادی تاکنون..... 53
نمودار(4-3) نسبت درجات آزادی گالرکین ناپیوسته (DG) به کلاسیک (CG) با تعداد المانها و درجات تقریب..... 63

فهرست جدول‌ها

جدول (4-1) تعداد درجات آزادی در المانهای مثلثی به ازای ابعاد مدلسازی d و درجات چند جمله ای برای روش گالرکین ناپیوسته 71

جدول (4-2) حداکثر عدد کورانت به ازای درجات تقریب چند جمله ایی k و مرتبه رانج -کوتا 111

جدول (4-3) برخی از پارامترهای روشهای گسسته سازی رانج-کوتا بر حسب مرتبه دقت 111

جدول (5-1) مشخصات فیزیکی سیال و محیط متخلخل مسئله (شبه یک بعدی) باکلی - لورت 147

جدول (5-2) خطای نرم $L_2 - error$ و ضریب همگرایی متغیر های اصلی پس از گذشت 360 روز ($r_p = 2, r_s = 1, RT_0$) با استفاده از استراتژی حل متوالی (Seq.S) ضمنی 152

جدول (5-3) خطای نرم $L_2 - error$ و ضریب همگرایی متغییر های اصلی پس از گذشت 360 روز ($r_p = 2, r_s = 1, RT_1$) روش های IMPES کلاسیک و بهبود یافته 152

جدول (5-4) نسبت زمان پردازش روش Improved IMPES به روش IMPES کلاسیک ($r_p = 2, r_s = 1, RT_1$) 153

جدول (5-5) مشخصات فیزیکی سیالات و محیط متخلخل مسئله مک ورتر 154

جدول (5-6) مشخصات فیزیکی سیالات و محیط متخلخل مسائل چاه های پنجگانه 157

جدول (5-7) مشخصات فیزیکی سیالات و محیط متخلخل - مسئله باکلی-لورت دو بعدی 163

جدول (5-8) مشخصات فیزیکی سیالات و محیط متخلخل - مسئله صفحات موازی کم نفوذپذیر 178

جدول (ب-1) شارهای حل مسائل بیضوی به روش گالرکین ناپیوسته محلی 207

جدول (ج-1) نقاط گوسی انتگرال گیری بر روی المان مثلثی 217

جدول (ج-2) نقاط انتگرال گیری گوس لژندر روی وجوه المان 219

فهرست علائم و نشانه ها

نام متغییر	تعریف پارامتر
CFL	عدد کورانت، $[-]$
d	بعد مدلسازی
D_{Fp}	ضریب پخش معادله فشار، $[(m^3s)/kg]$
D_{Fs}	ضریب پخش معادله درجه اشباع، $[(m^3s)/kg]$
$DS_{w,max}$	بیشینه تغیرات درجه اشباع، $[-]$
F	وجه المان
$\mathcal{F}_b^h$	مجموعه وجوه مرزی
$\mathcal{F}_h^i$	مجموعه وجوه داخلی
$\|F\|_{d-1}$	طول وجه F ، $[m]$
f_w	تابع کسر جریان، $[-]$
K	تانسور نفوذپذیری ذاتی، $[m^2]$
k_{rn}	نفوذ پذیری نسبی فاز غیر ترکننده، $[-]$
k_{rw}	نفوذ پذیری نسبی فاز ترکننده، $[-]$
$k_{T,F}$	مولفه نرمال نفوذپذیری، $[m^2]$
$\mathcal{L}$	عملگر محدودکننده شیب
n_F	بردار نرمال واحد وجه F
$\mathcal{N}_k$	تعداد رئوس المان در فرایند محدود شدگی
P_c	فشار مویینگی، $[Pa]$
P_d	فشار مویینگی ورودی، $[Pa]$
$\mathbb{P}_r^d$	فضای چند جمله ای تکه ای مرتبه r
P_{dir}	فشار مرزی دیریشله، $[Pa]$
P_w	فشار فاز ترکننده، $[Pa]$
q_n	ترم چشمه و چاه فاز غیرترکننده، $[kg/m^2s]$
q_t	درجات آزادی نرمال سرعت، $[ms^{-1}]$
q_w	ترم چشمه و چاه فاز ترکننده، $[kg/m^2s]$

RT_0	فضای راویارت - توماس مرتبه پایین
S_e	درجه اشباع موثر، $[-]$
S_{in}	درجه اشباع ورودی، $[-]$
S_w	درجه اشباع فاز ترکننده، $[-]$
T	نمایه المان
$\|T\|_d$	سطح مقطع المان، $[m^2]$
$\mathcal{T}_h$	دامنه شبکه المانهای مثلثی
$\mathfrak{T}_h$	مجموعه المانهای احاطه کننده گره i
u_α	سرعت فاز ، $[ms^{-1}]$
u_t	سرعت کل، $[ms^{-1}]$
$\mathbf{V}_{r_p}$	فضای ابعادی محدود متغیر فشار
$\mathbf{V}_{r_s}$	فضای ابعادی محدود متغیر درجه اشباع
$w_{\mathcal{F}}$	ضریب وزنی عملگر متوسط وزنی
X	فضای برداری
حروف یونانی	-
γ	عبارت پنالتی کل، $[m/s]$
γ_B	بزرگی بردار نرمال سرعت، $[ms^{-1}]$
$(\gamma)_F$	متوسط ضرائب هارمونیک ضرائب انتشار
Δt^n	اندازه بازه زمانی، $[s]$
δ	دلتای کرونکر
ζ	ضریب توزیع حفرات، $[-]$
η	ضریب متقارن کننده
κ	ضریب انتشار معادله درجه فشار، $[(m^3s)/kg]$
Γ_{in}	مرز وردی
Γ_{out}	مرز خروجی
Γ_D, Γ_N	مرزهای نیومن و دیریشله
λ_α	تحرک پذیری فاز، $[(ms)/kg]$

μ_n	ویسکوزیته فاز غیر ترکننده. $[kg/(ms)]$
μ_w	ویسکوزیته فاز ترکننده. $[kg/(ms)]$
ν	تابع آزمون
π	ضریب انتشار معادله درجه اشباع. $[(m^3 s)/kg]$
σ_F	نرم پنالتی
τ	زمان کل مدلسازی. $[s]$
ϕ	ضریب تخلخل
χ	متغیر مصنوعی شبه انتقال در معادله فشار. $[N.s/kg]$
Ψ	تابع انترپولاسیون برداری میدان سرعت
$\{\psi\}$	عملگر متوسط کلاسیک
$[\![\psi]\!]$	عملگر پرش
$\{\psi\}_w$	عملگر متوسط وزنی
Ω	دامنه
$\partial\Omega$	مرزهای بیرونی دامنه

لغت شناسی اصطلاحات فنی ریاضی

$L^2(\Omega)$	فضای لبـک. فضای برداری کامل می باشد که نرم آن با استفاده از ضرب داخلی محاسبه می شود.
$\mathbb{P}_r^d$	فضای چند جمله ای های تقریبی d متغیره با درجه کوچکتر و یا مساوی r تعریف می گردد.
$\mathbf{V}_r$	زیر فضای ناپیوسته تکه ای مرتبه r در فضای گسسته T_h معرفی می گردد.
RT_l	فضای راویارت توماس مرتبه l، جزء خانواده المان های محدود ترکیبی (Mixed Finite Element) می باشد که در حل مسائل بیضوی کاربرد دارند.
$H(\mathrm{div})$	فضای توابع برداری است بطوریکه مولفه نرمال آن در هر وجه داخلی دامنه پیوسته می باشد. در مسائل فیزیکی، این فضا نمایانگر شار انتشار می باشد.
$minmod$	تابع ریاضی می باشد که حداقلِ عناصر یک بردار را که دارای علامتی یکسان می باشند تعیین می نماید.

چکیده

نام خانوادگی : جامعی	نام: مهدی	شماره دانشجویی : 8941404
عنوان پایان نامه : مدلسازی جریانهای دوفازی در محیط های متخلخل با استفاده از روش گالرکین ناپیوسته		
استاد راهنما: دکتر حمید رضا غفوری		
اساتید مشاور: دکتر حسین محمد ولی سامانی، دکتر مهرداد تقی زاده منظری		
درجه تحصیلی: دکتری	رشته: مهندسی عمران	گرایش: مدیریت منابع آب و هیدرولیک
دانشگاه: شهید چمران اهواز	دانشکده: فنی و مهندسی	گروه : مهندسی عمران
تاریخ فارغ التحصیلی : 1394/03/06	تعداد صفحه: 239	

کلید واژه ها : روش گالرکین ناپیوسته، جریان دوفازی، IMPES ، محدودکننده شیب، نگاشت میدان سرعت، پقاء محلی.

مطالعه جریانهای دوفازی در محیط های متخلخل در زمینه هایی چون ردیابی آلاینده های امتزاج ناپذیر، مدلسازی مخازن هیدروکربنی و علوم هیدرولوژی بسیار حائز اهمیت می باشد. با پیشرفت صنعت رایانه، استفاده از روشهای عددی دارای بقاء محلی و با دقت بالا پیش بینی رفتار جریانهای دوفازی در محیط های متخلخل را بنحو مطلوبی میسر نموده اند.

موضوع این رساله حل عددی جریانهای دوفازی تراکم ناپذیر، بر مبنای فرمولاسیون فشار ترکننده - درجه اشباع ترکننده و در نظر گرفتن شرط مرزی ترکیبی (رابین)، شرایط همدمایی و با استفاده از روش های پنالتی داخلی گالرکین ناپیوسته (SWIP،OBB و NWIP) می باشد. هدف اصلی این رساله، تعیین دقیق تر محل سطح تماس دو فاز سیالات امتزاج ناپذیر در محیطهای متخلخل، می باشد که غالبا به صورت یک جبهه نازک و کم عرض رخ می دهد. محوریت مسائل مطروحه در این مطالعه، کاربرد روش های توسعه یافته در استحصال ثانویه مخازن نفت می باشد. برای این منظور ابتدا معادلات حاکم در بعد مکانی با استفاده از روش گالرکین ناپیوسته گسسته سازی می گردند. سپس برای گسسته سازی زمانی معادلات از دو استراتژی مختلف تحت عنوان روش حل متوالی ضمنی (Seq.S) و روش فشار ضمنی-اشباع صریح بهبود یافته (Improved IMPES) با خاصیت TVD استفاده می شود. همچنین به منظور افزایش دقت نتایج مدلسازی، میدان سرعت حاصل با استفاده از پس فرایند نگاشت H(div) در فضای المان محدود ترکیبی راویارت -توماس بازسازی می شوند. در این پژوهش به منظور افزایش کارایی و دقت مدلسازی خصوصا در محیطهای ناهمگن، از نوع آوریهایی چون مقیاس نمودن ترمهای پنالتی و نیز کاربرد فرمولاسیون وزنی عملگر متوسط در محل تماس ناهمگنیها استفاده شده است. استفاده از چنین تکنیکهایی موجب کاهش ناپایداری در محیطهای ناهمگن می گردد. به منظور جلوگیری از نوسانات غیرفیزیکی نتایج، در پایان هر گام زمانی از محدود کننده شیب (گره - محور) غیر نوسانی چاونت - جافر اصلاح شده استفاده شده است که موجب تثبیت نتایج در محل سطح تماس مشترک دو فاز سیال می گردد.

مدل ارائه شده با استفاده از مسائل شناخته شده شبه یک بعدی باکلی - لورت و مک ورتر صحت سنجی شده است. نمونه های عددی متعددی با استفاده از هر دو استراتژی برای محیط های همگن و ناهمگن ارائه شده است که هدف از آنان بیان توانایی مدل در تسخیر جبهه نازک در محل تماس فاز سیالات در محیط متخلخل می باشد.

فصل اول

مقدمه، طرح مساله و مروری بر تحقیقات پیشین

هرگاه در محیط متخلخل، دو سیال امتزاج ناپذیر[1] یا حل نشدنی با یکدیگر در تماس باشند که تحت اثر مجموعه عواملی مانند گرادیان فشار، شتاب ثقل و فشار مویینگی در فضای منافذ محیط متخلخل حرکت نمایند به آن سیستم، جریان دو فازی[2] گفته می شود. بررسی جریانهای دوفازی در زمینه رد یابی آلاینده های امتزاج ناپذیر، مدیریت و احیا آبخوانهای آلوده به آلاینده ها، مدلسازی مخازن[3] هیدروکربنی و مطالعه بهینه سازی استحصال نفت کاربرد بسیار گسترده ای دارد.

امروزه مدلهای ریاضی جزء قدرتمندترین ابزار علوم مهندسی برای پیش بینی جریانهای دوفازی در محیط های متخلخل بسیار ناهمگن می باشند. بطوریکه با توسعه صنعت رایانه در جهان صنعتی امروز، موج استفاده از مدلسازی ریاضی و فناوری روشهای عددی قدرتمند به سرعت در حال پیشرفت می باشد. موضوع این رساله کاربرد یکی از این روشهای عددی قدرتمند در زمینه جریانهای دوفازی در محیطهای متخلخل (همگن و ناهمگن) می باشد. به منظور تبیین موضوع رساله، این فصل به بیان طرح مساله، اهداف رساله، تحقیقات پیشین در زمینه مدلسازی جریانهای دوفازی بطور عام و همچنین حل عددی این پدیده با استفاده از انواع روشهای گالرکین ناپیوسته[4] اختصاص دارد.

---

۱. Immiscible fluids
۲ Two-phase flow
۳ .Reservoir Simulation
۴ . Discontinuous Galerkin methods