

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شبیه سازی کاربردی اساسی مخزن (جلد اول)

تورگی ارتکین

جمال ابوفاسم

گرگری کینگ

مترجم:

دکتر علی اکبر رحمانی

عضو هیات علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

مرتضی	ارتکین، تورگای
عنوان و نام پدیدآور	Ertekin, Turgay
مشخصات نشر	شبهه سازی کاربردی مخزن / ارتکین تورگای، جمال ابوقاسم، گرگوری کینگ؛ مترجم علی اکبر رحمانی.
مشخصات ظاهری	قزوین: الای اندیشه، ۱۳۹۳.
شابک	ج۲: مصور، جدول، نمودار.
وضعیت فهرست نویسی	۴۹۵۰۰۰ ریال؛ ج۱: ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۸۷۳-۲-۵
یادداشت	۹۷۸-۶۰۰-۹۴۸۷۳-۳-۲
یادداشت	فیبا
یادداشت	عنوان اصلی: Basic applied reservoir simulation, C.2001.
موضوع	واژه نامه
موضوع	کتابنامه
موضوع	نفت -- مهندسی مخازن زیر زمینی -- شبیه سازی
موضوع	نفت -- مهندسی مخازن زیر زمینی -- الگوهای ریاضی
موضوع	نفت -- مهندسی -- شبیه سازی
موضوع	نفت -- مهندسی -- الگوهای ریاضی
شناسه افزوده	کینگ، گرگوری آر. ۱۹۵۷-م.
شناسه افزوده	King, Gregory R.
شناسه افزوده	ابوقاسم، جمال حسین
شناسه افزوده	Abou - Kassem, Jamal Hussein
شناسه افزوده	رحمانی، علی اکبر، ۱۳۳۱- مترجم
رده بندی کنگر	۶۶۲/۳۸۱
رده بندی دیویی	۶۶۲/۳۸۱
شماره کتبخانی ملی	۴۴۳۵۶۹

عنوان: شبهه سازی اساسی کاربردی مخزن (جلد اول)

مترجم: علی اکبر رحمانی

ویراستار: شهره گرمی

ناشر: قزوین: الای اندیشه

طراح جلد: مهندس کمیل رحمانی

چاپ اول: پاییز ۱۳۹۳

لبنوگرافی چاپ و صحافی: سعیدی / قم

تیراز: ۵۰۰ دوره

قیمت دوره: ۴۹۵۰۰۰ ریال

مقدمه

رایانه‌های پرسرعت به روش‌های مختلفی در طول نیم قرن، بخشی از زندگی ما محسوب شده‌اند. انفجار الکترونیکی که در دو دهه‌ی گذشته شاهد آن بوده‌ایم، شبیه‌سازی مخزن را از رویکرد محرمانه به جعبه‌ایزار عملی، با اهمیت فوق‌العاده تبدیل کرده است. با کاربرد این جعبه‌ایزار امروزه، جامعه‌ی مهندسی این شانس را دارد که نه تنها پیچیدگی‌های دینامیک جریان سیال در مخازن را به میزان رو به افزایشی بلکه ویژگی‌های دینامیک جریان سیال در چاه‌ها، الگوهای جریانی به وجود آمده در درون سوراخ‌های (perforations) مجاور، برهم‌کنش چاه‌های عمودی، کج، افقی و چندجانبی و مخزن و پیچیدگی‌های ویژگی مخزن را درک کند. این نواحی، فقط بخش کوچکی از موضوعات چالش‌برانگیزی را که در توسعه‌ی بهینه‌ی مخازن هیدروکربنی نقش‌های بحرانی ایفا می‌کنند و در تکمیل بهینه‌سازی پروژه‌های هزینه‌بری که می‌توانند با شبیه‌سازی عددی مورد تحقیق قرار گیرند، آرایه می‌نمایند.

در مطالعه‌ی شبیه‌سازی مخزن، نباید به طور ساده به انجام کار رایانه‌ای محدود و نوشتن گزارش بر اساس نتایج به دست آمده از رایانه، اکتفا شود. به نظر ما، مطالعه‌ی شبیه‌سازی، بسیار گسترده می‌باشد. اولاً مهندس شبیه‌سازی، باید اهداف مطالعه‌ی شبیه‌سازی را مشخص کند. در نظر داشتن مجموعه‌ای از اهداف منطقی، به مهندس شبیه‌سازی در انتخاب رویکرد کافی که با دامنه‌ی مطالعه و همچنین ویژگی‌های مخزن و سیالات آن مشابهت دارد، کمک می‌کند. مرحله‌ی سوم فرایند، شامل تهیه‌ی داده‌های ورودی می‌شود. زمان صرف شده برای جستجوی داده‌های با کیفیت مطلوب، نشان‌دهنده‌ی زمانی است که درست صرف شده است؛ سپس مجموعه‌ای از داده‌هایی که به طور درونی پدیدارند، از هدر رفتن زمان جلوگیری خواهند کرد. چهارمین مرحله‌ی مطالعه‌ی شبیه‌سازی، شامل طراحی دقیق اجزائات رایانه‌ای است. در نتیجه، مهندس شبیه‌سازی باید تضمین کند که هر اجرای صورت گرفته "تیراندازی در تاریکی" را تداعی نمی‌کند. مرحله‌ی نهایی مطالعه‌ی شبیه‌سازی، شامل تحلیل نتایج و آماده‌سازی گزارشات خواهد بود. یک مهندس با تجربه، فوراً به نتایج آرایه شده در فایل‌های خروجی اکتفا نخواهد کرد. برای جلوگیری از وابستگی به نتایج آرایه شده توسط رایانه، طرح سوالات و یافتن پاسخ برای آنها، ضروری می‌باشد. بنابراین توجه به این نکته لازم است که هر مطالعه‌ی شبیه‌ساز، امضای مهندس شبیه‌سازی و نه رایانه و رمز رایانه‌ای را که در مطالعه مورد استفاده قرار گرفت، با خود به همراه داشته باشد.

ار تکیین تور گای

جمال ابوقاسم

گر گوری کینگ

مقدمه‌ی مترجم

شبیه‌سازی مخزن، بخشی از مهندسی مخزن است که در آن، مدل‌های رایانه‌ای، برای پیش‌بینی جریان سیالات (به‌طور شاخص، نفت، آب و گاز) از درون محیط‌های متخلخل، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

شرکت‌های نفت و گاز، مدل‌های شبیه‌سازی مخزن را جهت توسعه‌ی میداین جدید به کار می‌برند. مدل‌ها در میداین توسعه‌یافته که پیش‌بینی‌های تولید جهت کمک به تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری، لازم می‌باشند، نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. چون ساخت و نگهداری یک مدل قوی و قابل اطمینان، اغلب وقت‌گیر و پرهزینه است، مدل‌ها به‌طور شاخص فقط زمانی که تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری بزرگ به صورت رقابتی می‌باشند، ساخته خواهند شد. توسعه‌ی نرم‌افزار شبیه‌سازی، زمان توسعه‌ی یک مدل را کاهش داده است. مدل‌ها، می‌توانند با استفاده از رایانه‌های شخصی، به جای ایستگاه‌های کاری گران‌قیمت، نیز قابل اجرا باشند.

برای میداین جدید، مدل‌ها با شناسایی تعداد چاه‌های لازم، تکمیل بهینه‌ی چاه‌ها، نیازهای فعلی و بعدی در استخراج مصنوعی (با تزریق گاز و غیره) و تولید نفت، آب و گاز مورد نظر، ممکن است به توسعه کمک نمایند.

در مدیریت پویای مخزن، مدل‌ها، ممکن است جهت ازدیاد باز یافت نفت، به وسیله‌ی شکستگی هیدرولیکی، مؤثر باشند. چاه‌های بسیار منحرف یا افقی، می‌توانند نمایش داده شوند و نرم‌افزار تخصصی، ممکن است در طراحی شکستگی هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرد و در نتیجه، در مدل میدان، تولید بهبود می‌یابد. همچنین، ازدیاد باز یافت نفت، با حفظ فشار، تزریق مجدد گاز تولید شده یا تزریق آب به درون آبخوان، می‌تواند ارزیابی شود. سیلاب‌زنی آب که به جابه‌جایی بهبود یافته‌ی نفت منجر می‌شود، با استفاده از شبیه‌سازی مخزن، به طور معمول، قابل ارزیابی است.

برای فرایندهای میدانی موفق، کاربرد فرایندهای ازدیاد باز یافت نفت به ویژگی‌های نیاز دارد. مطالعات مدل در این ارزیابی، می‌توانند مفید واقع شوند. فرایندهای ازدیاد باز یافت نفت، شامل جابه‌جایی هم‌امیز به وسیله‌ی گاز طبیعی، CO_2 یا نیتروژن و غرقاب‌سازی شیمیایی (بسیار، قلیا، ترسان با ترکیبی از این‌ها)، می‌باشد. ویژگی‌های خصوصی در نرم‌افزار شبیه‌سازی برای نشان دادن این فرایندها، احتیاج می‌باشند. در بعضی از کاربردهای هم‌امیز، پس‌زدن جبهه‌ی سیلاب، که پخش عددی نیز نامیده می‌شود، ممکن است یکی از مشکلات محسوب گردد. شبیه‌سازی مخزن، برای شناسایی فرصت‌ها جهت افزایش تولید نفت در ذخایر نفت سنگین، به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. باز یافت نفت با پایین آوردن گرانیوز نفت (با تزریق بخار یا آب داغ)، بهبود یافته است. فرایندهای شاخص، عبارتند از: تزریق بخار (بخار تزریق می‌شود و آنگاه نفت از همان چاه تولید می‌شود) و بخارروبی (تزریق کننده‌های بخار و تولیدکنندگان نفت جدای از هم هستند). این فرایندها، برای توضیح انتقال گرما به سیالات موجود و سازند، تغییرات خواص حاصله و افت گرما به خارج از سازند، به شبیه‌سازهایی با ویژگی‌های خاصی احتیاج دارند.

شبیه‌سازهای تفاضل متناهی قدیمی، در شبیه‌سازی مخزن، برای کار نظری و عملی، از همه بیشتر مورد توجه می‌باشند. شبیه‌سازی تفاضل متناهی مرسوم، با سه مفهوم فیزیکی، مشخص می‌گردد: بقای جرم، رفتار

فازی سیال همدم و تقریب دارسی جریان سیال از درون محیط‌های متخلخل. شبیه‌سازهای گرمایی (که بیشتر از همه برای کاربردهای نفت خام سنگین به کار می‌روند)، بقای انرژی را به این لیست اضافه می‌کنند و اجازه می‌دهند دماها در درون مخزن تغییر کنند.

روش‌های عددی و رویکردهایی که در شبیه‌سازهای جدید رایج هستند، به صورت زیر می‌باشند:

۱- اکثر برنامه‌های شبیه‌سازی تفاضل متناهی، ساخت نمایش‌های سه‌بعدی برای کاربرد در مدل‌های میدان کامل یا چاه تکی را ممکن می‌سازند. تقریب‌های دوبعدی در مدل‌های مفهومی مختلف، از قبیل مقاطع و مدل‌های شبکه‌ی شعاعی دوبعدی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- از نظر تئوری، مدل‌های تفاضل متناهی، گسسته‌شدن مخزن را با استفاده از شبکه‌های ساخته شده و ساخته نشده پیچیده‌تر، برای نشان دادن دقیق هندسه‌ی مخزن، ممکن می‌سازند. تصفیه‌های شبکه‌های محلی (شبکه‌ی کوچک‌تری که در شبکه درشت‌تر گنجانده شده) نیز ویژگی‌هایی هستند که به وسیله‌ی بسیاری از شبیه‌سازها، جهت نشان دادن دقیق‌تر تأثیرات جریان چندفازی در مجاورت سوراخ چاه، ارایه می‌شوند. وقتی که موضوعاتی از قبیل مخروط‌سازی آب و گاز در مخازن، مورد تحلیل قرار می‌گیرند، این "شبکه‌بندی تصفیه شده" در مجاورت سوراخ‌های چاه‌ها، بسیار مهم تلقی می‌گردد.

۳- نمایش گسل‌ها و تراگسیلندگی‌های آنها، ویژگی‌های پیشرفته‌ای هستند که در بسیاری از شبیه‌سازها موجود می‌باشند. در این مدل‌ها، تراگسیلندگی‌های جریان میان‌بلوکی برای لایه‌های غیرمجاور، در خارج از ارتباطات مجاور- به مجاور مرسوم، باید محاسبه شود.

۴- شبیه‌سازی شکستگی طبیعی (که به تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه معروف است)، ویژگی پیشرفته‌ای است که هیدروکربن‌ها را در بلوک‌های زمینه‌ی فشرده مدل‌سازی می‌کند. جریان، از بلوک‌های زمینه‌ی فشرده به شبکه‌های شکستگی تراواری که بلوک‌ها را محاصره می‌کنند، به سمت چاه‌ها به وقوع می‌پیوندد.

۵- شبیه‌سازی نفت سیاه، تغییرات ترکیب هیدروکربن‌ها را وقتی که میدان در حال تولید است در نظر نمی‌گیرد. مدل ترکیبی، مدل پیچیده‌تری است که در آن، خواص فشار- حجم- دمای فازهای نفت و گاز در یک معادله‌ی حالت، به صورت مخلوطی از اجزای سازنده، برازش شده است. آنگاه، شبیه‌ساز از معادله‌ی حالت برای ردیابی دینامیکی حرکت فازها و اجرای سازنده در میدان، استفاده می‌کند.

مدل شبیه‌سازی، تغییر اشباع‌شدگی سه‌فاز (نفت، آب و گاز) و فشار هر فاز را در هر بلوک در هر مرحله‌ی زمان، محاسبه می‌کند. در نتیجه‌ی فشار رو به کاهش، مانند مطالعه‌ی تهی‌شدگی مخزن، گاز، از نفت آزاد خواهد شد. اگر فشارها در نتیجه‌ی تزریق آب یا گاز افزایش یابند، دوباره گاز در فاز نفت حل خواهد شد.

معمولاً یک پروژه‌ی شبیه‌سازی میدان توسعه‌یافته، به "تطبیق تاریخچه‌ای"، که تولید میدان قدیمی و فشارها با مقادیری محاسبه شده، مقایسه می‌گردند، احتیاج دارد. در سال‌های اخیر، ابزار بهینه‌سازی، از قبیل MEPO، برای سرعت‌بخشیدن این فرایند و همچنین بهبودبخشیدن کیفیت تطبیق حاصله، کمک کرده‌اند. پارامترهای مدل، طوری تنظیم می‌شوند تا تطبیق معقولی بر مبنای میدان (و معمولاً برای تمام چاه‌ها) حاصل گردد. به‌طور معمول، برش‌های آب تولید شده یا نسبت‌های آب- نفت و نسبت‌های گاز- نفت، تطبیق داده می‌شوند.

بدون مدل‌های تفاضل متناهی، ارزیابی‌های بازیافت و آهنگ‌های نفت، می‌تواند با استفاده از روش‌های تحلیلی متعدد نیز محاسبه شود که عبارتند از: معادلات موازنه‌ی جرم (شامل روش هاولنا- اوده و تارنر) (Havlena- Odeh+ Tärner)، روش‌های منحنی جریان کسری (جابه‌جایی یک‌بعدی باکلی- لورت

(Buckley- Leverett)، روش دئیتز (Deitz) برای ساختارهای شیب‌دار، مدل‌های مخروط‌سازی، روش‌های تخمین بازدهی روش برای غرقاب‌سازی‌های آب و تحلیل منحنی کاهش. این روش‌ها، قبل از ابزار شبیه‌سازی مرسوم، به عنوان مدل‌های به طور محاسباتی ارزان، بر اساس توضیح مخزن همگن ساده، توسعه یافته بودند. عموماً، روش‌های تحلیلی نمی‌توانند تمام جزئیات مخزن یا فرایند معین را برآورده کنند ولی به‌طور شاخص از نظر عددی سریع هستند و به اندازه‌ی کافی قابل اطمینان می‌باشند. آنها در مخزن فعلی، عموماً به عنوان ابزار ارزیابی غربال‌گری یا مقدماتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در صورت محدود بودن داده‌ها بحرانی بودن زمان، یا در مطالعات وسیع به عنوان ابزار پیش‌غربال‌گری (اگر تعداد زیادی از فرایندها و یا فناوری‌ها قرار است مورد ارزیابی قرار گیرند)، روش‌های تحلیلی مناسب می‌باشند. روش‌های تحلیلی، اغلب در دانشگاه‌ها یا درون سازمان‌ها، توسعه یافته و تقویت می‌شوند.

نکسوس (Nexus)، یک شبیه‌ساز مخزن نفت و گاز، می‌باشد که توسعه‌یافته است و به وسیله‌ی شرکت‌های نفت و گاز در سرتاسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد.

کتاب پیش‌رو، یکی از جامع‌ترین منابعی است که شبیه‌سازی کاربردی اساسی مخزن را با قلمی شیوا عرضه می‌کند که خوانندگان محترم خود به کامل بودن آن پی خواهند برد. قضاوت درباره‌ی محتوای کتاب به پژوهشگران شبیه‌سازی مخزن سپرده می‌شود.

از تمام عزیزانی که در به ثمر رسیدن این اثر با اینجانب همکاری نموده‌اند، به ویژه همسر عزیزم که ویراستاری ادبی کتاب را عهده‌دار شدند، کمال تشکر را دارم. با توجه به محدود بودن دانش اینجانب، بدون شک لغزش‌های ترجمه‌ای و برداشت‌های نادرست از متون، ممکن است نظر خوانندگان قهیم را جلب نماید که مزید امتنان خواهد بود کمبودها را به اطلاع برسانند تا در چاپ‌های بعدی برطرف گردد. در خاتمه از مدیر و اعضای محترم کمیته‌ی انتشارات شرکت ملی نفت ایران که امکان نشر این اثر را فراهم آوردند، به ویژه عنایت و همکاری‌هایی که سرکار خانم عذرا فائزی مبذول داشتند، صمیمانه سپاسگزاری نموده و توفیق همه‌ی عزیزان را از خداوند متعال خواهانم.

این کتاب با حمایت معنوی و مالی سازمان بسیج اساتید به چاپ رسیده است، که جای بسی تشکر دارد

الحمد لله رب العالمین

خرداد ۱۳۹۲

فهرست عناوین

فصل اول

۱-۱. مقدمه	۱
۲-۱. ضرورت شبیه‌سازی مخزن	۱
۳-۱. رویکردهای مدل‌سازی مرسوم	۲
۳-۱. روش‌های قیاسی	۲
۲-۳-۱. روش‌های عملی	۲
۳-۳-۱. روش‌های ریاضی	۶
۴-۱. رویکرد شبیه‌سازی مخزن	۱۰
۱-۴-۱. مدل‌های عددی	۱۱
۲-۴-۱. طبقه‌بندی شبیه‌ساز مخزن	۱۲
۳-۴-۱. کاربرد شبیه‌سازی مخزن	۱۵
۵-۱. اظهارات پایانی	۱۶
۶-۱. پروژه‌ی مربوط به فصل	۱۸
تمرین‌ها	۱۹

فصل دوم

۱-۲. مقدمه	۲۱
۲-۲. مفاهیم اساسی مهندسی مخزن	۲۱
۱-۲-۲. پتانسیل سیال	۲۱
۲-۲-۲. قانون دارسی	۲۵
۳-۲-۲. جریان حالات پایا و ناپایا	۲۸
۳-۲. خواص سنگ و سیال مخزن	۲۹
۱-۳-۲. خواص سنگ	۲۹
۳-۳-۲. خواص سیال و سنگ	۵۱
۴-۳-۲. مدل‌های تراوایی نسبی دوفازی	۵۷
۵-۳-۲. مدل‌های تراوایی نسبی سه‌فازی	۵۸
۴-۲. قانون بقای جرم	۶۳
۱-۴-۲. بقای جرم برای جریان تک‌فازی در یک بُعد	۶۴
۲-۴-۲. بقای جرم برای جریان تک‌فازی در چندبُعدی‌ها	۶۶

۶۷	۵-۲. معادله‌ی اساسی جریان تک‌فازی
۶۷	۶-۲. پروژه‌ی مربوط به فصل
۶۷	۲-۶-۲. تخلخل و تراوایی
۷۰	۳-۶-۲. خواص سیال
۷۳	۴-۶-۲. تراوایی نسبی
۷۵	۵-۶-۲. فشار موئین
۷۵	تمرین‌ها

فصل سوم

۸۳	۱-۳. مقدمه
۸۴	۲-۳. حساب دیفرانسیل اساسی
۸۴	۱-۲-۳. مشتقات و دیفرانسیل گیری
۹۴	۲-۲-۳. دیفرانسیل گیری جزئی
۹۶	۳-۲-۳. بسط سری تیلور
۹۸	۳-۳. معادلات اساسی دیفرانسیل
۹۹	۱-۳-۳. تعاریف اساسی. متغیرهای وابسته و غیر وابسته
۱۰۰	۲-۳-۳. حل معادلات دیفرانسیل
۱۰۱	۳-۳-۳. شرایط اولیه و مرزی
۱۰۲	۴-۳-۳. عملگرهای دیفرانسیل برداری
۱۰۴	۴-۳. حساب دیفرانسیل متناهی
۱۰۴	۱-۴-۳. عملگرهای تفاضل متناهی
۱۱۱	۲-۴-۳. رابطه‌ی بین مشتق و عملگرهای تفاضل متناهی
۱۱۵	۵-۳. جبر خطی بنیادی
۱۱۵	۱-۵-۳. نماد و عملیات اسکالر
۱۱۶	۲-۵-۳. نماد و عملیات بردار
۱۱۹	۵-۳. نماد و عملیات ماتریس
۱۲۴	۴-۵-۳. نمایش معادلات جبری
۱۲۵	تمرین‌ها

فصل چهارم

۱۲۹	۱-۴. مقدمه
۱۲۹	۲-۴. معادله‌ی پیوستگی در هندسه‌های مختلف جریان‌ها
۱۳۴	۳-۴. استخراج معادلات تعمیم‌یافته‌ی جریان

۱۳۴	۱-۳-۴. معادله‌ی جریان در مختصات قائم
۱۴۰	۲-۳-۴. معادله‌ی جریان در مختصات استوانه‌ای
۱۴۵	۴-۴. اشکال مختلف معادلات جریان
۱۴۵	۱-۴-۴. معادله‌ی جریان سیال تراکم‌ناپذیر
۱۴۸	۲-۴-۴. معادله‌ی جریان سیال به طور جزئی تراکم‌پذیر
۱۵۲	۳-۴-۴. معادله‌ی جریان سیال تراکم‌پذیر
۱۵۴	۵-۴. شرایط اولیه و مرزی
۱۵۵	۱۰-۵-۴. فشار ویژه بر روی مرز- مسأله‌ی دیرچلیت (Dirchlet)
۱۵۶	۲-۵-۴. گرادیان فشار ویژه بر روی مرز- مسأله‌ی نیومن (Newmann)
۱۵۷	۳-۵-۴. گرادیان فشار و ویژگی‌های فشار بر روی مرز
۱۶۰	۶-۴. پروژه‌ی مربوط به فصل
۱۶۱	۱-۶-۴. فرمول‌بندی جریان سیال تراکم‌ناپذیر برای مخزن A-1
۱۶۱	۲-۶-۴. فرمول‌بندی جریان سیال به طور جزئی تراکم‌ناپذیر برای مخزن A-1
۱۶۱	۳-۶-۴. فرمول‌بندی جریان سیال تراکم‌پذیر برای مخزن A-1

فصل پنجم

۱۶۹	۱-۵. مقدمه
۱۷۰	۲-۵. ساخت و خواص شبکه‌های تفاضل متناهی
۱۷۱	۱-۲-۵. سامانه‌های شبکه‌ای بلوک مرکزدار
۱۷۲	۲-۲-۵. سامانه‌های شبکه‌ای با توزیع نقطه‌ای
۱۷۳	۳-۲-۵. هندسه‌های شبکه‌ی سطحی
۱۸۳	۴-۲-۵. هندسه‌ی شبکه‌ی عمودی
۱۸۵	۳-۵. تقریب تفاضل متناهی مشتق مکانی
۱۸۵	۳-۵. تقریب درباره‌ی شبکه‌ی یکنواخت در یک بعد
۱۸۷	۲-۳-۵. تقریب درباره‌ی یک شبکه‌ی غیریکنواخت در یک بعد
۱۸۸	۳-۳-۵. تقریب در ابعاد چندگانه
۱۹۰	۴-۵. تقریب تفاضل متناهی مشتق زمان
۱۹۰	۱-۴-۵. تقریب تفاضل پسر و برای معادله‌ی جریان
۱۹۱	۲-۴-۵. تقریب تفاضل پیشرو برای معادله‌ی جریان
۱۹۲	۳-۴-۵. تقریب تفاضل مرکزی برای معادله‌ی جریان
۱۹۳	۵-۵. اجرای شرایط مرزی و اولیه
۱۹۳	۱-۵-۵. اجرای شرایط اولیه
۱۹۴	۲-۵-۵. اجرای شرایط مرزی

۲۰۴	۵-۶. فرمول‌بندی‌های تفاضل متناهی و ضمنی.....
۲۰۴	۵-۶-۱. فرمول‌بندی صریح.....
۲۱۸	۵-۶-۲. فرمول‌بندی ضمنی.....
۲۲۷	۵-۶-۳. خطای برشی، پایداری و تحلیل یکنواختی طرح‌های تفاضل متناهی.....
۲۳۸	۵-۷. پروژه‌ی مربوط به فصل.....
۲۴۲	تمرین‌ها.....

فصل ششم

۲۴۷	۶-۱. مقدمه.....
۲۴۸	۶-۲. رفتار عبارات مربوط به منبع یا چاه.....
۲۴۸	۶-۲-۱. مروری بر روابط عملکرد درون‌شارش (IPRS).....
۲۵۳	۶-۲-۲. مدل‌های چاه برای شبیه‌سازی مخزن.....
۲۸۵	۶-۳. شبیه‌سازی چاه تکی.....
۲۸۶	۶-۴. کاربرد شبکه‌های هیبرید در بلوک‌های چاه‌ها.....
۲۸۹	۶-۵. جفت‌کردن مدل‌های هیدرولیکی مخزن و سوراخ چاه.....
۲۹۵	۶-۶. پروژه‌ی مربوط به فصل.....
۲۹۷	تمرین‌ها.....

فصل هفتم

۳۰۳	۷-۱. مقدمه.....
۳۰۴	۷-۲. معادلات تفاضلی در شکل ماتریس.....
۳۰۴	۷-۲-۱. معادلات تفاضلی برای مسائل جریان ۱D.....
۳۱۱	۷-۲-۲. معادلات تفاضل برای مسائل جریان ۲D.....
۳۱۵	۷-۲-۳. معادلات تفاضل برای مسائل جریان ۳D.....
۳۱۹	۷-۳. روش‌های حل.....
۳۱۹	۷-۳-۱. روش‌های مستقیم.....
۳۳۹	۷-۳-۲. معادلات تفاضل برای مخازن با مرزهای نامنظم.....
۳۴۱	۷-۳-۳. ترتیب بلوک‌های شبکه‌ها.....
۳۴۶	۷-۳-۴. روش‌های تکراری.....
۴۱۲	۷-۳-۵. مقایسه‌ی حل‌کننده‌های مستقیم و تکراری.....
۴۱۲	۷-۴. پروژه‌ی مربوط به فصل.....
۴۱۵	تمرین‌ها.....

فصل هشتم

۴۳۱	۱-۸. مقدمه
۴۳۲	۲-۸. مسأله‌ی جریان تراکم‌ناپذیر تک‌فازی
۴۳۳	۱-۲-۸. تقریب تفاضل متناهی معادله‌ی جریان سیال تراکم‌ناپذیر
۴۳۴	۲-۲-۸. محاسبه‌ی تراگسندگی‌ها برای معادله‌ی جریان تراکم‌ناپذیر
۴۳۷	۳-۲-۸. اجرای نماد ماتریس برای معادله‌ی جریان تراکم‌ناپذیر
۴۴۰	۴-۲-۸. بررسی شرایط مرزی با نماد ماتریس
۴۴۱	۵-۲-۸. حل معادلات تفاضل متناهی برای جریان تراکم‌ناپذیر
۴۴۹	۶-۲-۸. معادله‌ی جریان تراکم‌ناپذیر در حضور گرادیان‌های عمیق
۴۵۴	۷-۲-۸. بررسی موازنه‌ی جرم برای مسأله‌ی جریان تراکم‌ناپذیر
۴۵۴	۳-۸. مسأله‌ی جریان سیال به طور جزئی تراکم‌پذیر تک‌فازی
۴۵۵	۱-۳-۸. تقریب تفاضل متناهی مسأله‌ی جریان سیال به طور جزئی تراکم‌پذیر
۴۵۸	۲-۳-۸. پیشرفت انحلال فشار با زمان
۴۶۴	۳-۳-۸. بررسی موازنه‌ی جرم برای مسأله‌ی جریان به طور جزئی تراکم‌پذیر
۴۶۵	۴-۸. مسأله‌ی جریان تراکم‌پذیر تک‌فازی
۴۶۸	۱-۴-۸. خطی‌سازی مسأله‌ی جریان
۴۸۱	۲-۴-۸. بررسی موازنه‌ی جرم برای مسأله‌ی جریان تراکم‌پذیر
۴۸۲	۵-۸. تحلیل محاسبه‌ی موازنه‌ی جرم مورد استفاده در شبیه‌سازی مخزن
۴۹۱	۶-۸. پروژه‌ی مربوط به فصل
۵۰۰	تمرین‌ها

فصل نهم

۵۲۵	۱-۹. مقدمه
۵۲۶	۲-۹. معادلات بقای جرم در سامانه‌ی جریان چندفازی
۵۳۱	۳-۹. معادلات جریان در جریان چندفازی
۵۳۵	۴-۹. مدل‌های جریان برای سامانه‌های اساسی جریان
۵۳۵	۱-۴-۹. مدل جریان نفت و آب
۵۳۷	۲-۴-۹. مدل جریان نفت و گاز
۵۳۹	۳-۴-۹. مدل جریان نفت-آب-گاز
۵۴۳	۵-۹. تقریب تفاضل متناهی معادلات جریان
۵۴۳	۱-۵-۹. مجزآسازی معادلات جریان چندفازی
۵۸۰	۲-۵-۹. خطی‌سازی معادلات جریان چندفازی
۶۱۸	۳-۵-۹. معادلات تفاضل متناهی

۶۳۵	۶-۹ روش‌های حل معادلات تفاضل چندفازی
۶۳۵	۱-۶-۹ روش راه‌حل همزمان، SS
۶۵۲	۲-۶-۹ روش IMPES
۶۶۹	۳-۶-۹ روش SEQ
۷۰۵	۴-۶-۹ مقایسه و انتخاب روش‌های حل
۷۰۹	۷-۹ رفتار مسائل ویژه نسبت به جریان چندفازی
۷۰۹	۱-۷-۹ رفتار شرایط اولیه
۷۱۴	۲-۷-۹ طرز عمل شرایط مرزی
۷۱۷	۳-۷-۹ رفتار تولید سیال
۷۲۵	۴-۷-۹ رفتار تزریق سیال
۷۳۱	۵-۷-۹ رفتار عدم پیوستگی فاز گازی و رویکرد دمای جوش متغیر
۷۳۲	۶-۷-۹ رفتار شیب تراوایی‌های نسبی
۷۳۳	۷-۷-۹ انتخاب خودکار بازه‌ی زمان
۷۳۵	۸-۹ پروژه‌ی مربوط به فصل
۷۳۵	۱-۸-۹ مسأله‌ی جریان سه فازی
۷۴۰	۲-۸-۹ مسأله‌ی تزریق آب دوفازی
۷۴۴	تمرین‌ها

فصل دهم

۷۵۵	۱-۱۰ مقدمه
۷۵۸	۲-۱۰ اهداف مطالعه
۷۵۹	۳-۱۰ تحلیل داده‌ها
۷۶۳	۱-۳-۱۰ داده‌های زمین‌فیزیکی و زمین‌شناختی
۷۶۸	۲-۳-۱۰ داده‌های مهندسی
۸۰۸	۳-۳-۱۰ دقت ناسازگاری‌های داده‌ها
۸۰۸	۴-۱۰ ساخت مدل
۸۰۹	۱-۴-۱۰ انتخاب مدل
۸۱۹	۲-۴-۱۰ مجزاسازی (گسسته‌سازی) مدل
۸۲۳	۳-۴-۱۰ تخصیص خواص بلوک شبکه
۸۴۹	۵-۱۰ تطبیق تاریخچه‌ای
۸۵۰	۱-۵-۱۰ اهداف تطبیق تاریخچه‌ای
۸۵۱	۲-۵-۱۰ انتخاب روش تطبیق تاریخچه‌ای
۸۵۲	۳-۵-۱۰ انتخاب داده‌های تولید برای مشخص کردن و تطبیق دادن

۱۰-۵-۳-۱	انتخاب داده‌های تولید - تزریق برای مشخص کردن چاه‌های تولید	۸۵۲
۱۰-۵-۴	انتخاب داده‌های مخزن برای مطابقت دادن	۸۵۷
۱۰-۵-۵	مطابقت داده‌های مخزن برای تطبیق با تولید تاریخچه‌ای	۸۵۸
۱۰-۵-۶	کیفیت تطبیق تاریخچه‌ای	۸۶۳
۱۰-۶-۶	پیش‌بینی‌های عملکرد مخزن	۸۶۴
۱۰-۶-۱	انتخاب موارد پیش‌بینی	۸۶۴
۱۰-۶-۲	مدیریت مخزن در شبیه‌سازی مخزن	۸۶۵
۱۰-۶-۳	معتبر ساختن و تحلیل پیش‌بینی‌های شبیه‌سازی	۸۷۰
۱۰-۷	توصیه‌ی نهایی	۹۷۱
۱۰-۸	پروژه‌ی مربوط به فصل	۸۷۳
	تمرین‌ها	۸۷۶

فصل یازدهم

۱۱-۱	مقدمه	۸۸۷
۱۱-۲	رابطه‌ی بین شبیه‌سازی عددی مخزن و رویکرد موازنه‌ی جرم قدیم	۸۸۸
۱۱-۲-۱	معادله‌ی موازنه‌ی کلی جرم	۸۸۹
۱۱-۲-۲	روش موسکات (Muskat) برای مخازن با رانش گاز محلول	۸۹۴
۱۱-۳	رابطه‌ی بین شبیه‌سازی عددی مخزن و روش‌های تحلیلی	۸۹۷
۱۱-۳-۱	تحلیل گذار فشار	۸۹۷
۱۱-۳-۲	تحلیل پاکلی - لورت	۹۰۰
۱۱-۴	رابطه‌ی بین شبیه‌سازی عددی مخزن و تحلیل منحنی افت	۹۰۳
۱۱-۴-۱	منحنی‌های افت آرپ	۹۰۴
۱۱-۴-۲	منحنی‌های از نوع تولید	۹۱۵
۱۱-۵	خلاصه	۹۱۶

ضمیمه‌ی A

	درون‌یابی جدولی	۹۲۱
	درون‌یابی خطی	۹۲۳
	درون‌یابی درجه‌ی دوم	۹۲۴
	درون‌یابی لاگرانژی	۸۲۶
	درون‌یابی اسپلین (Spline)	۹۲۸
	معادله برای اسپلین مکعبی طبیعی درون‌یابی‌کننده	۹۲۹
	محاسبه‌ی گشتاورها (مشتقات دوم) اسپلین	۹۳۱

۹۳۴.....	ارایه‌ی داده‌ها با استفاده از پردازش منحنی
۹۳۵.....	برازش کمترین مربعات خطی
۹۳۹.....	چندجمله‌ای متعامد
۹۴۰.....	برازش کمترین مربعات غیرخطی

ضمیمه‌ی B

۹۴۵.....	معادلات جریان دوفازی
۹۴۶.....	معادلات جریان سه‌فازی
۹۴۷.....	ADIP بلوک
۹۴۷.....	SIP بلوک

ضمیمه‌ی C

۹۵۱.....	رایانه‌های پردازش‌کننده‌ی اسکالر
۹۵۳.....	رایانه‌های پردازش‌کننده‌ی برداری
۹۵۴.....	رایانه‌های پردازش‌کننده‌ی موازی
۹۵۷.....	RISC
۹۵۹.....	واژگان انگلیسی - فارسی
۹۶۳.....	واژگان فارسی - انگلیسی
۹۶۶.....	نمایه‌ها
۹۷۳.....	نمادها