

الحمد لله رب العالمين

اصول مدلسازی سامانه‌های حوضه و نفت

توماس هنت شل

آرمین اینگوکاراف

دکتر علی اکبر رحمانی

عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

سرشناسه	هانچل، توماس Hantschel, Thomas
عنوان و نام پدیدآور	اصول مدلسازی سامانه‌های حوضه و نفت / توماس هنت‌شل، آرمین اینگوکاراف ؛ [مترجم] علی‌اکبر رحمانی.
مشخصات نشر	قزوین: آلائی اندیشه، ۱۳۹۳.
مشخصات طاهری	۵۵۰ ص.: مصور، جدول، نمودار (رنگی).
شابک	۲۷۵۰۰۰ ریال : 978-600-94820-3-0
وضعیت فهرست نویسی	فیبا
یادداشت	عنوان اصلی: Fundamentals of basin and petroleum systems modeling, c2009.
یادداشت	واژه‌نامه.
یادداشت	کتابنامه: ص. ۲۵۳.
یادداشت	نمایه.
موضوع	حوضه‌ها (زمین‌شناسی) -- الگوهای ریاضی
موضوع	کامپیوترها -- شبیه‌سازی
شناسه افزوده	کائورآوف، آرمین ای.
شناسه افزوده	Kauerauf, Armin I.
شناسه افزوده	رحمانی، علی‌اکبر، ۱۳۳۱ - مترجم
رده بندی کنگره	۱۳۹۳ الف ۵۳ / QE۶۱۵
رده بندی دیویی	۵۵۱ / ۴۲
شماره کتابشناسی ملی	۲۶۳۵۷۲۰

عنوان: اصول مدلسازی سامانه‌های حوضه و نفت

مترجم: علی‌اکبر رحمانی

ویراستار: شهره کریمی

ناشر: قزوین: آلائی اندیشه

طراح جلد: مهندس کیمیل رحمانی

چاپ اول: پاییز ۱۳۹۳

لیتوگرافی چاپ و صحافی: سعیدی / قم

تیراژ: ۵۰۰ نسخه

قیمت: ۲۷۰۰۰۰ ریال

پیشگفتار

جای بسی خوشحالی است که پیشگفتاری را بر این کتاب، "اصول مدلسازی سامانه‌های حوضه و نفت" می‌نویسم. برای ما دانشمندان علوم زمین (geoscientists) این امر که دو فیزیکدان برجسته، با سوابق علمی به ترتیب در روشهای عددی مکانیک پیوسته و در فیزیک آماری (statistical physics)، بتوانند در شبیه‌سازی عددی (numerical simulation) زمین‌فرایندهای (geoprocesses) پیچیده، ورود پیدا کنند، یک امتیاز محسوب می‌شود. علاقه‌ی وصف ناپذیر مولفان کتاب، توماس هنتشل و آرمین اینگو کاراف (Thomas Hantschel and Armin Ingo Kauerauf)، در علوم زمین و صبر آنها با زمین‌شناسان (geologists)، زمین‌شیمی‌دانان (geochemists)، رسوب‌شناسان (sedimentologists) و زمین‌شناسان ساختاری (structural geologists) توصیفی‌تر، نوشتن این کتاب، رفتار برجسته و کمی‌جوانب ریاضی و فیزیکی زمین‌فرایندهای بسیار پیچیده را ممکن ساخته است. علاوه بر علاقه‌ی تحقیقاتی در حین بحث‌صبورانه‌ی ایشان با متخصصان زمین‌شناختی فوق، آنها تجربه‌ی عملی زیادی را به وسیله‌ی همکاری با سامانه‌های اکتشاف یکپارچه (integrated) کسب کردند. کتاب آنها، مرحله‌ی مهمی در پیشرفت علوم زمین جدید خواهد بود.

ارزش علمی و عملی، زمین‌علوم جدید، تا حد زیادی به تشخیص روابط درونی پیچیده‌ی فرایندهای تکی، از قبیل تراکم، جریان گرما، پستال و جرم، سینتیک واکنش و غیره و به کمی‌کردن تکراری زنجیره‌ی کلّ فرایند، متکی است. کاربرد هوشمندانه‌ی رایانه‌های پرسرعت جدید، تمام موارد فوق را ممکن ساخته است.

سایه‌ها، مدلسازی حوضه، به صورت "نظم‌تورفتگی" (niche discipline) در نظر گرفته می‌شد که عمدتاً توسط زمین‌شیمی‌دانان منتشر و به کار گرفته می‌شد. چه خطا و درک غلط! تضادّ مطلق حقیقت است. مدلسازی حوضه عملاً تمام رشته‌های زمین‌علمی را یکپارچه می‌کند، درک کمی‌بی‌نظیر زنجیره‌های کلّ فرایند را ممکن می‌سازد و ناسازگاری‌ها یا عدم قطعیت‌ها (uncertainties) در مبنای دانش ما را فراهم می‌نماید. به طور خلاصه، رویکرد مدلسازی حوضه، مرحله‌ی رو به جلوی بزرگی در زمین‌علوم جدید محسوب می‌شود. این کتاب چالشی برای مدرّسان دانشگاهی در علوم زمین و همچنین برای دانشمندان و مهندسان در صنعت نفت و معدن، می‌باشد. چالش، تعلیم جوانترها می‌باشد به نحوی که بتوانند همگام با مرز بین علوم مطلق با زمینه‌ی فیزیکی و ریاضی و زمین‌علوم قدیمی و برعکس، حرکت کنند.

در سال ۱۹۸۴، پرفسور برنارد تیسوت (Bernard Tissot) و من در دیباچه‌ی چاپ دوم کتابمان "تشکیل و وقوع نفت" نوشتیم "واضح است که مدلسازی رایانه‌ای باقی خواهد ماند و ممکن است این رشته را متحوّل نماید. رایانه، به عنوان ابزار عملی برای آزمایش ایده‌ها و نظریه‌های زمین‌شناختی و در

صورت لزوم جهت فراهم نمودن نرم افزار کافی برای فرایندهای زمین شناختی بسیار پیچیده، مورد استفاده قرار می گیرد. از مزایای شبیه سازی رایانه ای فرایندهای زمین شناختی، اصول فیزیکی یا فیزیکی - شیمیایی مختل نشده و همچنین برای اولین بار ضریب زمان زمین شناختی، که قبلاً برحسب میلیون ها سال، به جای دهها سال فعلی، اندازه گیری می شد، با رایانه های پرسرعت با حافظه های بزرگ فرایند می گردد. در نتیجه، عصر کمی کردن حقیقی در علوم زمین، فرا رسیده است. ما معتقدیم که این رویکرد کمی، به کمک رایانه تأثیر اقتصادی و عقلانی بر صنعت نفت، عمدتاً بر اکتشاف خواهد داشت^۱ در حقیقت، تمام این حالات به منتهای ظهور رسیده است و حتی بیشتر، مدلسازی حوضه، تفسیر هوشمندانه ای داده های زمین شناختی به دست آمده، توسط روش های زمین فیزیکی، زمین شناختی و زمین شیمیایی، را تقویت کرده و عمق می بخشد و در نتیجه اطلاعات ساکن را به درک فرایند دینامیکی تبدیل می کند.

من به مؤلفان برای ارائه این کتاب درسی عالی، تبریک می گویم و از جامعه ی علوم زمین درخواست می کنم از نعمت اطلاعات علمی فراهم شده در این کتاب، بهره مند شوند. این کتاب به ما کمک می کند بر درک و کمی کردن آنچه که در زیر زمین به وقوع پیوسته، بیفزاییم.

دیتریچ ولت (Dietrich Welte)

مقدمه‌ی مؤلفان

در اواخر سال‌های ۱۹۷۰، "مدلسازی حوضه" به صورت اصطلاحی برای توصیف مدلسازی کمی فرایندهای زمین‌شناختی در حوضه‌های رسوبی (sedimentary basins) بر اساس مقیاس‌های زمان (geological timescales) زمین‌شناختی، معرفی شد. در آن زمان، مدل‌های حوضه در مدلسازی جریان گرما و آب منفذی، یا توجه به تراکم و شیمی کنترل شده به وسیله‌ی حرارت تولید هیدروکربن، کاربرد عمده‌ای داشتند. از آن زمان تا کنون، مدل‌های مربوط به زمین‌شناختی، شیمیایی و حمل، بهبود چشم‌گیری داشته‌اند. مدلسازی حوضه به چهار چوب پیچیده و یکپارچه‌ی بسیاری از فرایندها، از قبیل جریان سیال چندفازی (multiphase) مهاجرت و انباشت، طرح‌های پیشرفته‌ی واکنش برای تبدیل‌های آلی و معدنی یا تکتونیک‌های (tectonics) (زمین‌ساختی‌های) تراکمی (compressional) و کششی (extensional)، تبدیل شد.

اصطلاح "مدلسازی حوضه" نه تنها برای مدلسازی فرایندها در رسوبات، مورد استفاده قرار می‌گیرد بلکه برای مدلسازی فرایندهای پوسته‌ای (crustal) و جریان حرارت و جرم گوشته (mantle)، جهت پیش‌بینی نوع حوضه‌ی رسوبی و فرونشست تکتونیکی مربوطه، نیز به کار می‌رود. ما اسم‌گذاری "مدل‌های پوسته‌ای" را برای این نوع تحلیل ترجیح می‌دهیم. به طور مشخص، فرایندها در پوسته به طور نزدیکی با حوضه‌ی رسوبی مرتبط می‌باشند و در نتیجه مدل‌های حوضه‌ی یکپارچه و پوسته‌ای نیز توسعه یافته‌اند.

علاوه بر تحقیق علمی محض، همیشه انگیزه‌ی تجاری برای مدلسازی حوضه به عنوان وسیله‌ای برای درک، کمی‌کردن و پیش‌بینی مخازن (repositories) نفت، وجود داشته است. از آغاز، صنعت نفت حامی اصلی برای توسعه‌ی ابزارهای مدلسازی حوضه، جهت ارزیابی اکتشاف و منبع بوده است. با گذشت زمان، تعدادی از ابزار تخصصی و انواع مختلفی از شبیه‌سازهای (simulators) مدلسازی حوضه، و همراه با آنها اصطلاح‌شناسی‌های جدید از قبیل "مدلسازی سامانه‌های نفت"، "ارزیابی خطر اکتشاف (exploration risk)" یا "تحلیل پی‌جویی و نفوذ (prospect and play analysis)" توسعه یافته‌اند.

ما، مؤلفان کتاب، هر دو فیزیکدان با تمرکز بر مدلسازی عددی و طراحی نرم‌افزار، هستیم. از سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۷ تا کنون ما به ترتیب قسمت‌های عمده‌ی نسل‌های مختلف نرم‌افزار شبیه‌سازی تجاری حوضه، پترمودود (petromod) را توسعه داده‌ایم. علاوه بر این، ما چندین دوره‌ی آموزشی درباره‌ی موضوع نظریه و اصول بنیادی در پشت مدلسازی حوضه را در اختیار علاقمندان قرار داده‌ایم. دوره‌های آموزشی، حاوی میزان قابل ملاحظه‌ای از ریاضیات، فیزیک و شیمی - شالوده‌های اساسی ابزار نرم‌افزار - می‌باشند. شبیه‌سازی کامل یک حوضه زمین‌شناختی واقعی، الگوهای جریان سیال پیچیده و انباشت را نشان می‌دهند که تفسیر آنها مشکل می‌باشد. ما بر این اعتقادیم که درک اساسی نظریه در پشت ابزار برای خوب یاد گرفتن مدل‌ها، با جزئیات ضروری است.

اکثر مدلسازهای حوزه، در مؤسسات تحقیقاتی علمی یا صنعت نفت، زمین‌شناسان با تجربه‌ای هستند که از حوزه‌های دانشگاهی کاملاً متفاوت می‌باشند. بنابراین، آنها ممکن است با ریاضیات و علوم کمی مرتبط با نرم‌افزار، آشنا نباشند. این عمل از نظر زمین‌شناختی، به وفور آثار چاپ شده‌ی عالی درباره‌ی مدلسازی حوزه منجر می‌شود ولی مطالعه‌ی جامع در رابطه با ریاضیات، فیزیک و علوم رایانه-ای را در بر نمی‌گیرد.

قبل از هر چیز کتاب سعی می‌کند مقدمه‌ای بر سوابق ریاضی و فیزیکی مدلسازی حوزه برای زمین‌شناسان و کاشفان نفت باشد. به طور همزمان، کتاب، نظریه‌ی عمیق‌تر در پشت سر مدل‌ها را در اختیار (زمین) فیزیک‌دانان، ریاضی‌دانان و دانشمندان علوم رایانه‌ای، قرار می‌دهد. وقتی که برای حضار میان‌رشته‌ای مطلب نوشته می‌شود، پیدا کردن موازنه‌ای بین عمق و جزئیات اطلاعات از یک طرف و سوابق تحصیلی مختلف خوانندگان از طرف دیگر، یک چالش محسوب می‌شود. درک تمام جزئیات برای فهم اصول اساسی، ضروری نیست. ما امیدواریم این کتاب برای تمام گروه‌ها مفید واقع شود.

با این کتاب، ما درصدد ایجاد کتاب مرجع هستیم که تصویر وسیعی از موضوع، شامل لیست‌های جامعی از مقادیر کوتاهی‌ها برای اکثر پارامترها از قبیل خواص سنگ و سیال و سینتیک زمین‌شیمیایی را در اختیار قرار دهد. امید است آنچه که جمع‌آوری شده، بتواند کار بسیاری از مدلسازان را آسان کند. کتاب، سعی نمی‌کند مقدمه‌ای بر اصول زمین‌شناختی تشکیل حوزه و نه به عنوان معلم خصوصی برای مدلسازی عملی حوزه، باشد. مطالعات موردی شامل نشده‌اند. جلد دوم که بر مطالعات موردی و جنبه‌های عملی کاربرد متمرکز شده، برای آینده طراحی گردیده است.

متخصصان در رسوب‌شناسی (sedimentology)، سنگ‌شناسی (petrology)، درون‌زایش (diagenesis) (دیاژنز)، تحلیل درزگیر گسل (fault seal)، شکستگی (fracturing) (هیدرولیکی)، مکانیک سنگ (rock mechanics)، مباحث مربوط به معانی اعداد (numerics) و آمار (statistics)، بعضی از رویکردها را در این کتاب بسیار ساده می‌بینید ولی ما عملاً به این نتیجه رسیدیم که کتاب را برای درک میان‌رشته‌ای وسیع در اختیار همگان قرار دهیم. همزمان، احساس می‌کنیم که در بسیاری از مواقع ایده‌هایی را ارایه می‌کنیم که انگیزه‌ی مطالعات بیشتر را فراهم می‌کنند.

تمرکز اصلی، بر مدل‌ها و ویژگی‌های عددی، بوده است. به طور طبیعی، تمایل به تمرکز بر خصوصیات ویژه‌ای که خود ما برای پترومات توسعه داده‌ایم، وجود دارد ولی اکثر مدل‌های اصلی برای برنامه‌های نرم‌افزار دانشگاهی و تجاری نیز قابل کاربرد می‌باشند، از آنجایی که آثار چاپی زیادی توسط گروه‌های توسعه‌ای دیگر درباره‌ی بنیادها، نظریه و پارامترهای کار آنها وجود ندارند ما قادر نبودیم منابع مناسب را در بحث خودمان وارد نماییم.

مدلسازی حوزه، علمی است که چندین رشته را در بر می‌گیرد. ما امیدواریم دانشجویان، محققان و کاشفان نفت، با تجارب مختلف از کتاب آرایه شده، بهره‌مند خواهند شد.

توماس هنتشل

و

آرمین اینگوکاراف

مقدمه مترجم

حوضه‌های رسوبی، ساختارهای پیچیده‌ای هستند که انباشته‌های نفت و گاز می‌باشند. مدل‌سازی حوضه، فنی است که اجازه می‌دهد تاریخچه‌ی تدفین و دمای حوضه‌ی رسوبی دوباره ساخته شود. برای این منظور، خواص سنگ‌فیزیکی از قبیل رسانندگی گرمایی، ظرفیتهای گرمایی، تراوایی‌ها و غیره به واحدهای سنگ شناختی تخصیصی داده می‌شوند. بنابر قوانین فیزیکی و شیمیایی، تغییر این پارامترهای ویژه از قبیل دما و فشار می‌توانند محاسبه شوند.

توسط مدل‌سازی حوضه، نه تنها تاریخچه‌ی تدفین دمای یک حوضه‌ی رسوبی تعیین خواهد شد بلکه بلوغ سنگ منبع و در نتیجه بیرون راند و مهاجرت هیدروکربن نیز درک می‌شود. با این اطلاعات و کاربرد قوانین فیزیکی و شیمیایی، تاریخچه‌های تدفین و گرمایی محاسبه شده و برای ارزیابی هیدروکربنهای تولید شده و مهاجرت کرده و همچنین مسیرهای مهاجرت و خواص مخزن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

کتاب حاضر که با قلمی شیوا به نگارش درآمده، تمام جوانب حوضه‌های نفتی را مورد بررسی قرار می‌دهد. از تمام کسانی که مرا در به ثمر رسیدن این کتاب یاری نمودند، به ویژه همسر عزیزم که ویراستاری ادبی کتاب را عهده‌دار شدند، سرکار خانم نسرین مجابی که کارهای تایپ و سرکار خانم اکرم شالی که تنظیم نهایی را قبول زحمت فرمودند کمال تشکر را دارم.

الحمد لله رب العالمین

فروردین ۱۳۹۲

پیشگفتار

مقدمه‌ی مؤلفان

مقدمه‌ی مترجم

فصل ۱. مقدمه‌ای بر مدلسازی حوضه

۱-۱. تاریخچه	۱
۲-۱. فرایندهای زمین‌شناختی	۳
۳-۱. ساختار یک مدل	۹
۴-۱. مدلسازی سامانه‌های نفت	۲۴
۵-۱. مدلسازی جریان‌های کار	۲۷
۶-۱. اصلاح ساختار	۳۰
۷-۱. مقایسه با مدلسازی مخزن	۳۱
۸-۱. چشم‌انداز	۳۲
خلاصه	۳۲
منابع	۳۴

فصل ۲. فشار منفذی، تراکم و زمین‌ساختی‌ها (تکتونیک‌ها)

۱-۲. مقدمه	۳۵
۱-۱-۲. تنش‌های کلی	۳۵
۲-۱-۲. تشکیل فشار منفذی و جریان سیال	۳۷
۳-۱-۲. کاهش تراکم و تخلخل	۴۰
۲-۲. مدل‌های نوع ترزاقی	۴۲
۱-۲-۲. فرمول‌بندی اساسی	۴۳
۲-۲-۲. تراکم مکانیکی	۴۸
۳-۲-۲. تراوایی و گرانروی	۵۷
۴-۲-۲. انحلال‌های فشاری (pressure solutions) یک‌بعدی	۶۴
۵-۲-۲. انحلال‌های فشاری در دو و سه‌بعد	۶۸
۳-۲. فرایندهای ویژه‌ی تشکیل فشار	۷۳
۱-۳-۲. تراکم شیمیایی	۷۴
۲-۳-۲. مدل‌های انبساط سیال	۷۹

۸۴	۴-۲. کالیبره کردن فشار اضافی
۸۷	۵-۲. مدل‌های زمین‌مکانیکی
۸۷	۶-۲. تنش و دگرشکلی
۹۲	۱-۶-۲. تحلیل گسیختگی (failure analysis)
۹۸	۷-۲. گسل‌ها
۱۰۳	۸-۲. دیرینه‌مدل‌ها (palco-models)
۱۰۳	۱-۸-۲. پله‌پله کردن رویه‌ادی
۱۰۶	۲-۸-۲. دیرینه‌پله‌پله کردن (paleo-stepping)
۱۰۸	۳-۸-۲. روراندگی (overthrusting)
۱۱۱	خلاصه
۱۱۲	منابع
	فصل ۳. تحلیل جریان گرما
۱۱۵	۱-۳. مقدمه
۱۱۶	۲-۳. مدل‌های یک‌بعدی
۱۱۷	۱-۲-۳. مدل‌های حالت پایا
۱۱۹	۲-۲-۳. تأثیر موقت (گذرا)
۱۲۴	۳-۳. رسانندگی گرمایی
۱۲۴	۱-۳-۳. توابع سنگ و ماده‌ی معدنی
۱۲۷	۲-۳-۳. توابع سیال منفذی
۱۲۹	۴-۳. ظرفیت گرمایی ویژه
۱۳۰	۱-۴-۳. توابع سنگ و ماده‌ی معدنی
۱۳۱	۲-۴-۳. توابع سیالات منفذی
۱۳۲	۵-۳. گرمای پرتوزاد
۱۳۳	۶-۳. معادله‌ی جریان گرمای سه‌بعدی
۱۳۷	۱-۶-۳. همرفت گرمایی
۱۳۸	۲-۶-۳. توده‌های نفوذی ماگمایی
۱۳۹	۳-۶-۳. یخبندان دائم
۱۴۱	۷-۳. دماهای فصل مشترک رسوب - آب
۱۴۴	۸-۳. مدل‌های پوسته‌ای برای پیش‌بینی جریان گرمایی قاعده‌ای
۱۴۹	۱-۸-۳. اصل هم‌ایستایی
۱۵۳	۲-۸-۳. مدل‌های جریان گرما

۱۵۶	۳-۸-۳. پیش‌فرایند کردن پوسته‌ای جریان کار
۱۵۸	۳-۹. کالیره کردن جریان گرما
۱۶۰	۳-۹-۱. مثالی از جریان کار برای کالیره کردن گرمای سه‌بعدی
۱۶۴	خلاصه
۱۶۵	منابع
	فصل ۴. تولید نفت
۱۶۷	۴-۱. مقدمه
۱۶۹	۴-۲. سینتیک واکنش پذیری توزیع شده
۱۷۳	۴-۳. سینتیک تولید نفت
۱۷۶	۴-۳-۱. سینتیک کلی
۱۷۸	۴-۳-۲. سینتیک نفت - گاز
۱۸۲	۴-۳-۳. سینتیک ترکیبی
۱۸۷	۴-۴. پارامترهای کالیره کردن گرمایی
۱۸۷	۴-۴-۱. بازتابندگی و پترینیت
۱۹۵	۴-۴-۲. زیست‌نشانگرهای مولکولی
۱۹۷	۴-۴-۳. مقادیر T_{max}
۲۰۰	۴-۴-۴. مولکول شکنی ایزوتوپی
۲۰۰	۴-۴-۵. تحلیل رد شکافت
۲۰۴	۴-۵. جذب (سطحی)
۲۱۰	۴-۶. زیست‌تباهی
۲۱۳	۴-۷. تحلیل سنگ منبع
۲۱۶	خلاصه
۲۱۷	منابع
	فصل ۵. تحلیل سیال
۲۲۰	۵-۱. مقدمه
۲۲۲	۵-۲. فاز آب
۲۲۴	۵-۳. مدل‌های مخلوط‌های دوتایی و نفت سیاه
۲۲۹	۵-۴. معادلات حالت
۲۳۴	۵-۴-۱. قوانین آمیختگی
۲۳۵	۵-۴-۲. تعادل فاز (phase equilibrium)
۲۳۶	۵-۵. محاسبات سریع

۲۴۱	۱-۵-۵. طبقه‌بندی نفت
۲۴۲	۲-۵-۵. مسیرهای PT
۲۴۳	۶-۵. پیش‌بینی خاصیت
۲۴۳	۱-۶-۵. چگالی
۲۴۹	۲-۶-۵. فشار نقطه‌ی جوش
۲۵۰	۳-۶-۵. نسبت گاز به نفت
۲۵۰	۴-۶-۵. ضریب حجم تشکیل نفت، B_o
۲۵۱	۵-۶-۵. گرانروی
۲۵۹	۶-۶-۵. کشش میان‌وجهی
۲۶۱	۷-۵. کالیبره کردن یک مدل سیال
۲۶۲	۱-۷-۵. کالیبره کردن و قسمت سنگین تقطیر سیال
۲۶۳	۲-۷-۵. تنظیم پارامترهای اجزای دروغین
۲۶۸	۳-۷-۵. تنظیم پارامتر برهم‌کنش دوتایی
۲۶۸	۸-۵. هیدرات‌های گازی
۲۷۱	خلاصه
۲۷۲	منابع

فصل ۶. مهاجرت و انباشت

۲۷۴	۱-۶. مقدمه
۲۷۵	۲-۶. سابقه‌ی زمین‌شناختی
۲۷۷	۳-۶. جریان دارسی چندفازی
۲۸۲	۱-۳-۶. فشار موین
۲۸۷	۲-۳-۶. فشار در مرزهای فازها
۲۹۲	۳-۳-۶. فرمول‌بندی جریان سه‌فازی بدون تغییرات فاز
۲۹۴	۴-۳-۶. معادلات جریان چندجزیی با تغییرات فازی
۲۹۶	۵-۳-۶. مدل نفت سیاه
۲۹۷	۴-۶. پخش
۲۹۸	۵-۶. مخازن
۳۰۰	۱-۵-۶. تحلیل مسیر جریان
۳۰۳	۲-۵-۶. تحلیل پهنه‌ی زهکشی
۳۱۰	۳-۵-۶. تحلیل انباشت
۳۱۲	۴-۵-۶. گسل‌ها و ویژگی‌های مقیاس کوچک

۳۱۵	۵-۵-۶ فشار اضافی و جریان آب
۳۱۶	۶-۵-۶ مخازن غیر ایده‌آل
۳۱۹	۶-۶ روش دورگه
۳۲۰	۱-۶-۶ تجزیه‌ی قلمرو
۳۲۳	۲-۶-۶ رخنه
۳۲۵	۳-۶-۶ جریان گسلی
۳۲۹	۷-۶ مدلسازی مسیر جریان
۳۳۱	۸-۶ نفوذ هجومی
۳۳۳	۱-۸-۶ سابقه‌ی فیزیکی
۳۴۰	۲-۸-۶ نفوذ در مقیاسهای طول میکروسکوپی
۳۴۲	۳-۸-۶ افزایش مقیاس دادن نفوذ میکروسکوپی
۳۴۵	۴-۸-۶ نفوذ هجومی تک‌فازی
۳۴۹	۵-۸-۶ مهاجرت دوفازی با جا به جایی
۳۵۰	۶-۸-۶ گسسته کردن تخصیص فضا و خاصیت
۳۵۶	۷-۸-۶ ناهمسانگردی
۳۵۸	۹-۶ بحث
۳۶۵	۱۰-۶ موازنه‌ی جرم‌ها
۳۶۶	۱-۱۰-۶ قوانین بنیادی بقای جرم
۳۷۰	۲-۱۰-۶ سامانه‌ی نفت
۳۷۲	۳-۱۰-۶ ساختارها و انباشت‌های مخزن
۳۷۵	خلاصه
۳۷۷	منابع

فصل ۷. تحلیل خطرپذیری

۳۸۲	۱-۷ مقدمه
۳۸۵	۲-۷ شبیه‌سازی مونت کارلو
۳۹۰	۱-۲-۷ توزیعات عدم قطعیت
۳۹۳	۲-۲-۷ پارامترهای عدم قطعیت استخراج شده
۳۹۴	۳-۲-۷ نمونه‌برداری ابرمکعب لاتین
۳۹۶	۴-۲-۷ همبستگی‌های عدم قطعیت
۳۹۹	۵-۲-۷ تحلیل نتایج
۴۰۱	۶-۲-۷ داده‌های مدل

۴۰۳	۳-۷. رویکرد بیزی
۴۰۸	۱-۳-۷. اطلاعات پیشین پارامترهای به دست آمده
۴۰۹	۲-۳-۷. همبستگی‌های پیشینیان
۴۰۹	۳-۳-۷. اطلاعات پیشین عدم وابستگی‌های اسمی
۴۱۱	۴-۷. نمونه‌برداری معین (Deterministic sampling)
۴۱۲	۱-۴-۷. طراحی مکعبی
۴۱۳	۲-۴-۷. طراحی‌های معین دیگر
۴۱۴	۵-۷. مدل‌های دگرگون شده
۴۱۵	۱-۵-۷. سطوح پاسخ
۴۱۸	۲-۵-۷. شبیه‌سازی گرمایی سریع
۴۲۲	۳-۵-۷. کریگینگ
۴۲۲	۴-۵-۷. شبکه‌های عصبی
۴۲۳	۵-۵-۷. روش‌های دیگر برای مدل‌سازی دگرگون شده
۴۲۳	۶-۵-۷. کالبره کردن با سری مونت کارلو زنجیر مارکوف (MCMC)
۴۲۴	خلاصه
۴۲۵	منابع

فصل ۸. روشهای ریاضی

۴۲۸	۱-۸. مقدمه
۴۲۹	۲-۸. کمیت‌های فیزیکی
۴۳۱	۳-۸. قوانین آمیختن و افزایش مقیاس
۴۳۵	۴-۸. تفاضل محدود
۴۳۷	۵-۸. روش عنصر محدود
۴۴۲	۶-۸. حجم‌های کنترل
۴۴۴	۷-۸. حل کننده
۴۴۵	۸-۸. موازی‌سازی
۴۴۸	۹-۸. تصفیه‌ی شبکه‌ی محلی (LGR)
۴۴۸	۱-۹-۸. شبکه‌ی تار تان
۴۴۹	۲-۹-۸. پنجره پنجره کردن
۴۵۰	۳-۹-۸. مدل جفتیده در مدل
۴۵۱	۴-۹-۸. گسل‌ها
۴۵۲	خلاصه

۴۵۳	منابع
۴۵۴	ضمیمه A
۴۶۱	ضمیمه B
۴۶۲	ضمیمه C
۴۶۶	ضمیمه D
۴۶۸	ضمیمه E
۴۷۵	ضمیمه F
۴۷۵	۱ - F
۴۷۷	۲ - F
۴۷۸	۳ - F
۴۷۹	۴ - F
۴۸۱	۵ - F
۴۸۲	۶ - F
۴۸۳	۷ - F
۴۸۸	ضمیمه G
۴۹۲	ضمیمه II
۴۹۵	ضمیمه I
۵۰۳	ضمیمه J
۵۰۵	ضمیمه K
۵۰۶	ضمیمه L
۵۰۸	ضمیمه M
۵۱۰	ضمیمه N
۵۱۳	واژگان انگلیسی - فارسی
۵۲۳	واژگان فارسی - انگلیسی
۵۳۲	نمایه