

تطبیق تاریخچه ای

و

پیش بینی رفتار مخزن نفت

جی. آر. گیلمن

چت ازگن

مترجم :

دکتر علی اکبر رحمانی

عضوهیئت علمی دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

سرشناسه: گیلمن، جیمز آر.

Gilman, James R

عنوان و نام پدیدآور: تطبیق تاریخچه‌ای و پیش‌بینی رفتار مخزن نفت / جی. آر. گیلمن، چت ازگن؛ مترجم علی‌اکبر رحمانی.

مشخصات نشر: قزوین: الای اندیشه، ۱۳۹۴.

مشخصات ظاهری: ۱۵۰ ص.: مصور، جدول، نمودار.

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۸۷۳-۸-۷-۷ ۱۹۰۰۰۰ ریال

وضعیت فهرست نویسی: فیفا

یادداشت: عنوان اصلی: Reservoir Simulation: History Matching and Forecasting

یادداشت: واژه‌نامه

یادداشت: کتابخانه

موضوع: نفت -- مهندسی مخازن زیر زمینی -- شبیه‌سازی

شناسه افزوده: ازگن، چت

شناسه افزوده: Zeng, Chet

شناسه افزوده: رحمانی، علی‌اکبر، ۱۳۳۱ - مترجم

رده بندی کنگره: ۶۱۰۱۴ / ک۵ / TN۸۷

رده بندی دیویی: ۶۴۲/۳۳۸۲

شماره کتابشناسی ملی: ۳۸۴۰۰۴

تطبیق تاریخچه‌ای و پیش‌بینی رفتار مخزن نفت

مترجم: علی‌اکبر رحمانی

ناشر: آلائی اندیشه

تایپ و صفحه آرایی: سیمایید، نشر

ویراستار: شهره کریمی

لیتوگرافی چاپ و صحافی: افق بی پایان

طراح جلد: مهندس کامیل رحمانی

شمارگان: ۵۰۰

نوبت چاپ: اول-پاییز ۱۳۹۵

قیمت: ۱۹۰۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۴۸۷۳-۸-۷-۷

نشانی: قزوین - ملا صدرا - اندیشه ۴ - پلاک ۲۰

مرکز پخش: انتشارات دانش-نگار، میدان انقلاب، خیابان اردیبهشت، نبش وحید

نظری، ۶۶۴۰۰۱۴۴

پیشگفتار

”شبیه‌سازی ریاضی رفتار مخزن، برای کمک به درک فرآیندهای مخزن و پیش‌بینی رفتار مخزن، مورد استفاده قرار می‌گیرد... علاوه بر این، شبیه‌سازی به عنوان ابزاری برای توضیح مخزن، به منظور یادگیری بیشتر درباره‌ی ماهیت فیزیکی مخزن به کار می‌رود... این کاربرد، در اکثر مطالعات مخزن، امری اساسی است و یکی از کاربردهای برجسته‌تر شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.“

این بیان از مقالتهای حدود ۴۰ سال قبل [۴۹]، که در آن، مؤلفان توسعه‌ی پیش‌بینی ”دقیق، مناسب و اقتصادی ج. پان“ی در هندسه‌ی دو بُعدی را توضیح دادند، آرایه شد. مدل بزرگ (۸۰۰ بلوکی) آنها، ۱۰۰ مرحله را در ۱۰ دقیقه، در IBM 360 اجرا کرد. از ۴۰ سال تا کنون، شبیه‌ساز مخزن، به تجارت بزرگی تبدیل شده و ابزاری است که به وسیله‌ی هزاران مهندس مخزن در سراسر دنیا، جهت کمک به تصمیمات مدیریت مخزن، مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، به نظر ما، اگر شبیه‌سازی مخزن درست به کار برده شود، به توسعه‌ی مخزن دقیق‌تر، مناسب‌تر و اقتصادی‌تر منجر خواهد شد. نظریه کتاب، به نحوی است که قابل درک و مقدمه‌ی واضحی برای نواحی تطبیق تاریخچه‌ای (history match) پیش‌بینی مخزن، برای کسانی که با مهندسی مخزن (برای مثال، دانشمندان علوم زمین، مهندسان تولید، مدیران) به طور مشترک کار می‌کنند و نیاز به تغییر یا به کارگیری نتایج شبیه‌سازی جریان دارند، می‌باشد. چون منابع مناسبی در این زمینه وجود دارند، در نتیجه تلاش نمی‌شود کتاب، مانند کتاب راس، یا کتاب مرجع در اختیار خوانندگان قرار داده شود [۱۶ و ۱].

شبیه‌سازی مخزن، در حال توسعه است و در ۴۰ سال گذشته، رشته‌های جدید ظاهر و رشته‌های قدیمی از رده خارج شده‌اند. امید است که این کتاب، وقتی که به درستی مورد استفاده قرار گیرد، حالت فعلی فناوری را با برجسته‌کردن پتانسیل عظیم آن شکل دهد و در عین حال تلاش می‌کند مشکل ذاتی و مراحل نامربوط بالقوه‌ای را که سر راه کارورز کم‌تجربه، قرار دارند، مشخص نماید. اگر چه مشکلاتی در فناوری وجود دارند ولی شبیه‌سازی جریان همراه با تعیین ویژگی مخزن جدید، به اثبات رسانده است که روش‌های بسیار مؤثری برای مدیریت توسعه‌ی مخازن می‌باشند. در اینجا باید کلمه‌ی ”جدید“ مورد تأکید قرار گیرد: آن، توانایی ساختن زمین‌تصاویر (geoimages) مخازن بوده که تمام محدودیت‌های زمین‌شناختی ایستا (static geological)، زمین‌فیزیکی (geophysical) و سنگ‌فیزیکی (petrophysical) را که باعث تغییر عمده‌ای در انجام شبیه‌سازی جریان و تطبیق

تاریخچه‌ای شده‌اند، در بر می‌گیرد [۵۷]. فصل ۲، این موضوع را بیشتر مورد توجه قرار می‌دهد. در حالی که، شبیه‌سازهای جریان، "تمام" جزئیات فیزیک جریان را شامل نمی‌کنند، چندین سال توسعه و تجربه به طور شفاف نشان داده است که مطالعات شبیه‌سازی به خوبی طراحی شده، همراه با تعیین ویژگی مناسب زمین‌شناختی - مخزن، یکی از بهترین راه‌های مدیریت توسعه‌ی مخزن می‌باشد. ابزار اساسی به طور وسیعی توسعه یافته است ولی هنوز بر اساس مفاهیم ساده‌ای مانند قانون داریسی (Darcy) و گسترش آن به جریان چندفازی، به وسیله‌ی روابط احتمالات نسبی تجربی، استوار می‌باشد. از این که ابزار تا چه وسعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، و نه تنها به فرمول‌بندی و بازدهی رمزگذاری بلکه به ره مونه‌ای دقیق از کارورزان بستگی دارد.

پس از بخش مقدمه، کتاب با توجه به مراحل اصلی جهت انجام مطالعه‌ی شبیه‌سازی برای اهداف تطبیق تاریخچه‌ای و پیش‌بینی، تنظیم شده است. مراحل، که معمولاً به روش خطی ساده در نظر گرفته نشده است شامل موارد زیر می‌باشد:

- ۱- ساختن مدل‌های مخزن زمین‌شناختی و سیال اولیه
- ۲- انتخاب شبیه‌سازی (۱) مخزن
- ۳- بهبودبخشیدن و تأیید مدل مخزن از طریق تطبیق تاریخچه‌ای
- ۴- پیش‌بینی و مدیریت کمی کردن به قطعیت‌ها (uncertainties) با طرحهای توسعه‌ی پیشنهادی

فصل نهایی، روندهای ممکن آتی در نواحی شبیه‌سازی، جریان مخزن و تطبیق تاریخچه‌ای را مورد بحث قرار خواهد داد. در ضمیمه‌ها، تمرینی از تطبیق تاریخچه‌ای به منظور ترسیم قدرت روش‌ها به کمک تطبیق تاریخچه‌ای جدید در اختیار خوانندگان قرار داده شده است. مجموعه‌ی داده‌ها از مؤلفان کتاب موجود می‌باشد.

مقدمه‌ی مترجم

اولین سؤالی که به ذهن متبادر می‌شود، این است که “تطبیق تاریخچه‌ای” چیست؟ به طور ساده، تطبیق تاریخچه‌ای، فرایند ساختن مجموعه‌ای از مدل‌های عددی (که مخزن را نشان می‌دهند) است که داده‌های مشاهد شده و اندازه‌گیری شده را توضیح می‌دهد. در حین فرایند کالیبره کردن مدل، مهم است که موارد زیر مورد توجه قرار گیرند:

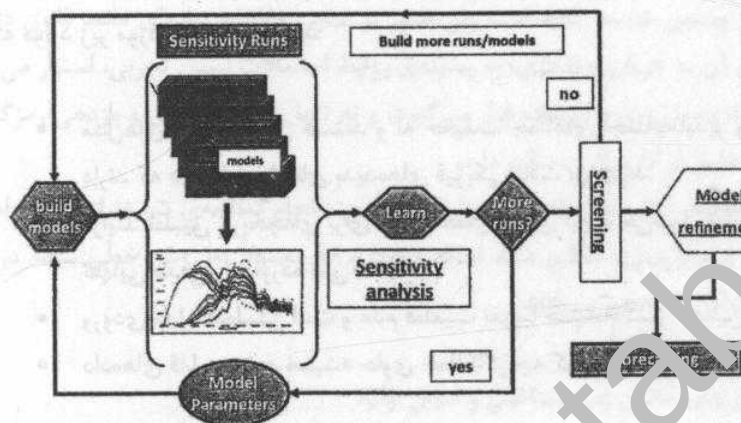
- مدل‌های مخازن، مدل هستند و نه حقیقت. خطاهای اجتناب‌ناپذیر و تقریبهایی وجود دارند که در تمام مدل‌های پدیده‌های فیزیکی یافت می‌شوند.
- فرایند تطبیق تاریخچه‌ای برای هدف تصمیم‌گیری ایجاد می‌شود. تطبیق تاریخچه‌ای به تشابه هدف را آهسته نمی‌کند.
- ورودی مدل نام‌مشنز است و عدم قطعیت تقریباً همیشه کمتر تخمین زده می‌شود.
- داده‌های قابل مشاهده حای خطا (اگر چه کوچک) می‌باشند.

تطبیق تاریخچه‌ای باید در مفهوم کلی، کم کردن عدم قطعیت، که تطبیق تاریخچه‌ای فقط بخشی از آن است، در نظر گرفته شود. بررسی تصمیم‌گیری مناسب، عدم قطعیت خروجی باید مورد ارزیابی قرار گیرد. ارزیابی عدم قطعیت همیشه ذهنی است. تطبیق تاریخچه‌ای، باید به ایجاد مدل عدم قطعیت، که پس از آن برای تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار می‌گیرد، کمک کند.

جریان کار مدل‌سازی تصمیم‌یافته‌ی مخزن

تطبیق تاریخچه‌ای، برحسب جریان کار مدل‌سازی کلی مخزن، که در زیر، صورت، طرح‌واره نشان داده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. چندین عنصر اساسی برای مدل‌سازی مخزن، نبود دارند که در بیشتر (اگر نه همه) جریان کار مشترک می‌باشند. اولاً، حداقل، یک مدل ساخته می‌شود (چون در مدلی که ساخته می‌شود به پارامترهای مدل احتیاج دارد و در نتیجه ساختن چندین مدل به پارامترهای زیادی نیاز خواهد داشت). مهندس (یا دانشمندان علوم مربوط به زمین پارامترها را از طریق اجزای حساسیت تغییر می‌دهد. “تحلیل حساسیت”، جهت تعیین این که کدام یک از پارامترهای مدل تأثیر برجسته‌ای بر پاسخ‌های مدل دارند، فرایند یادگیری از این اجزای می‌باشد. “غربال‌گری” (screening)، فرایند انتخاب مدل بوده که ممکن است تکراری باشد و با نمونه‌گیری

دوباره پارامترهای مدل به ساختن مدل‌های بیشتری احتیاج داشته باشد. مرحله‌ی "تصفیه‌ی مدل"، مدل‌های منتخب را از طریق غربال‌گیری بر می‌گزیند و قبل از رسیدن مرحله‌ی نهایی در جریان کار، که اغلب، تولید آتی را از مخزن پیش‌بینی می‌کند، آنها را تصفیه می‌نماید.



نمودار طرح‌واره‌ی جریان کار مدل، شامل عناصر زیر می‌شود: پارامترها، اجراها و تحلیل حساسیت، غربال‌گری و تصفیه‌ی مدل

در اصل، تطبیق تاریخچه‌ای، انتخاب مدل‌های غراب (ایستا و دینامیکی) را تطبیق می‌دهد و در حقیقت، صورت مرحله‌ی غربال‌گری در نظر گرفته می‌شود، که با تصفیه‌ی مدل دنبال می‌شود. در رویکردهای قدیمی، غربال‌گری، اغلب به وسیله‌ی دانشمند علوم زمین، که فقط یک مدل تکی را بدون در نظر گرفتن تولید قدیمی (فقط داده‌های ایستا) انتخاب می‌کند، صورت می‌گیرد. تصفیه‌ی مدل، جهت تطبیق مدل تکی، داده‌های تولید قدیمی، وظیفه‌ی مهندس مخزن است. این فرآیند تطبیق قدیمی دستی، بسیار وقت‌گیر است و اغلب، تصفیه‌ی مدل، به مدلی منجر می‌شود که تفاوت قابل ملاحظه‌ای با مدل به دست آمده به وسیله‌ی دانشمندان علوم زمین دارد که از طریق غربال‌گری انتخاب شده است.

مشوقان بسته‌های نرم‌افزاری تطبیق تاریخچه‌ای پیچیده (و گران‌قیمت)، اغلب مدافع این نظر هستند که مراحل تحلیل حساسیت، غربال‌گری و تصفیه‌ی مدل، تماماً می‌توانند در یک رویکرد جعبه-سیاه تکی، عملی شوند. به هر حال، حقیقت این است که یک رویکرد تکی برای تمام محیط مناسب نیست. به ویژه آنچه که مهم است، الزاماً روش تطبیق تاریخچه‌ای نیست بلکه پارامترسازی مدل مخزن

و جریان کار مورد استفاده برای ساختن مدل‌های مخزن در حین تطبیق تاریخچه‌ای می‌باشد که در زیر به آن پرداخته می‌شود.

جریان کار ساختن مدل مخزن

همان طور که توضیح داده شد، تطبیق تاریخچه‌ای دستی قدیمی، شامل اصلاح مدل جریان سیال در حین فرآیند تصفیه‌ی مدل می‌شود. اگر چه در سال‌های اخیر به این نظریه دست یافته‌اند که تطبیق تاریخچه‌ای، به رویکرد میان‌رشته‌ای، که باید شامل گروهی از دانشمندان علوم زمین و مهندسان مخزن شود، احتیاج دارد، ولی رویکرد قدیمی، هنوز در بیشتر روش‌های تطبیق تاریخچه‌ای به کمک نرم‌افزار، به کار برده می‌شود. ایجاد مدل زمین‌شناختی، که اساس مدل جریان سیال می‌باشد (شاید به مرحله‌ی افزایش مقیاس بین زمین‌مدل و مدل جریان احتیاج داشته باشد) ایجاد می‌گردد. شبیه‌سازی جریان اجرا می‌شود و اصلاحات تطبیق تاریخچه‌ای از مدل جریان اعمال می‌گردند. این رویکرد، می‌تواند چندین نقص داشته باشد که عبارتند از:

- هر گونه اصلاحاتی که در مدل جریان سیال صورت می‌گیرند، در مدل زمین‌شناختی اولیه به کار برده نمی‌شوند و ممکن است با داده‌ی زمین‌شناختی که برای ایجاد مدل زمین‌شناختی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، سازگاری نداشته باشند.
- فقط پارامترها و خواص در مدل جریان سیال، می‌توانند اصلاح شوند. تمام پارامترهای نامطمئن در زمینه مدل نمی‌توانند به طور مستقیم در جریان کار تطبیق تاریخچه‌ای، اصلاح گردند.

فقط در دهه‌ی اخیر، پژوهشگران و تولیدکنندگان نرم‌افزارها، تلاش کردند تا فرآیند مدل‌سازی زمین‌شناختی را در درون حلقه‌ی تطبیق تاریخچه‌ای شامل نمایند. در این جریان کار، الگوریتم تطبیق تاریخچه‌ای، می‌تواند پارامترهای نامطمئن را در مدل‌های زمین‌شناختی و جریان، اصلاح نماید. این جریان کار، بعضی از مشکلات را که در بالا یادآوری شدند، حل می‌کند و جریان کاری است که انتظار می‌رود به مدل‌های تطبیق تاریخچه‌ای بهتری منجر شود. به هر حال، اجرای آن مشکل‌تر است.

صرف‌نظر از جریان کار تطبیق تاریخچه‌ای، مهندس مخزن و گروه زمین‌مدل‌ساز، چندین وظیفه‌ی مهم دارند که هیچ روش تطبیق تاریخچه‌ای نمی‌تواند به طور خودکار انجام دهد:

- تفسیر داده‌های مخازن

- پارامترسازی مدل (های) مخزن

- تصمیم‌گیری درباره‌ی عدم قطعیت پارامترهای ورودی و داده‌های مخزن

این وظایف، الزاماً، تصمیم‌گیری‌های ذهنی هستند و درباره‌ی کیفیت مدل (بنابراین تطبیق تاریخچه‌ای)، دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشند. به طور واضح، تفاسیر، فرضیات و تصمیمات گروه زمین‌مدل‌ساز، که در نهایت به مدل عددی مخزن منجر می‌شود، باید به چالش کشیده شوند و در حین فرآیند مدل‌سازی، مورد سؤال قرار گیرند و سرانجام شکست تطبیق تاریخچه‌ای، اغلب بر اثر تفاسیر، فرضیات و تصمیمات نادرست، به وسیله‌ی گروه مدل‌سازی می‌باشد و روش تطبیق تاریخچه‌ای به کمک نرم‌افزار نقش ندارد.

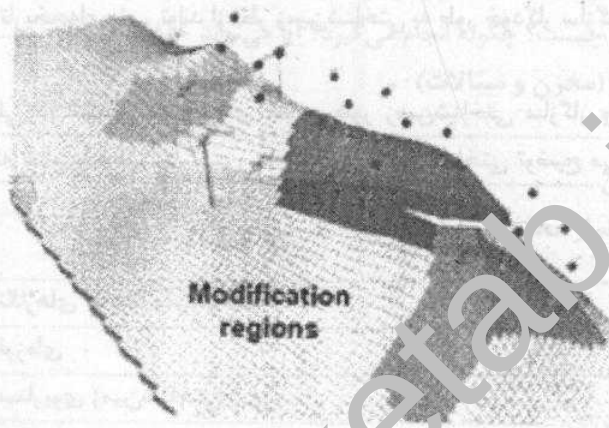
اکنون این پرسش مطرح می‌شود که این تفاسیر، فرضیه‌ها و تصمیمات (که مدل اولیه نامیده می‌شود)، قبل از شروع تطبیق تاریخچه‌ای، چگونه غربال‌گری می‌شوند؟ یکی از راه‌های پیشنهادی، که در اینجا توضیح داده می‌شود، از "روش‌های فضای متریک" استفاده می‌کند.

تصفیه‌ی مدل

برای مدل‌های پیچیده‌ی مخزن و چندپارامتری از تطبیق تاریخچه‌ای، ممکن است به اثبات برسد تعداد معینی از چاه‌ها داده‌های قدیمی را تطبیق نمی‌کنند. این، اغلب در مخازن با فرآیندهای جابه‌جایی (مانند سیلابها)، که خواص میان‌چاهی با این تعیین تولید سیالات مهم می‌باشند، به وقوع می‌پیوندد. در این حالت، مهندس ممکن است دوست داشته باشد تطبیق تاریخچه‌ای را با تغییر خواص سنگ‌فیزیکی، مدل مخزن، بین تزریق‌کننده و تولیدکننده، تنبیه کند. چندین مشکل در این دستورالعمل وجود دارند. مهندس باید بداند کجا (در کدام یک از بلوک‌های شبکه) و به چه میزان خواص سنگ‌فیزیکی را اصلاح کند. مهندس همچنین باید تضمین کند که اصلاحات با داده‌های زمین‌شناختی مربوطه، که برای ایجاد مدل (همبستگی‌های مکانی، تفاسیر رخساره‌ها، نمودارهای ستونی، داده‌های لرزه‌ای) مورد استفاده قرار می‌گیرند، سازگار می‌باشند.

در عمل، این محدودیت نهایی اغلب نادیده گرفته می‌شود. به هر حال، نادیده گرفتن داده‌های زمین‌شناختی به مدل‌های پیش‌بینی‌کننده‌ی ضعیفی منجر می‌شوند. برای مثال، شکل زیر مدلی را نشان می‌دهد که در آن ناحیه‌های چندگانه تعریف شده‌اند. به طور شاخص، مهندس این نواحی را تعریف می‌کند و آنگاه به طور دستی (یا از طریق تطبیق تاریخچه‌ای به کمک نرم‌افزار) تراوایی و یا

تخلخل را برای تطبیق داده‌های چاه در درون ناحیه، اصلاح می‌کند. اگر چه این روش به تطبیق تاریخچه‌ای منجر نمی‌شود ولی ممکن است سؤال شود آیا این ناحیه‌ها از نظر زمین‌شناختی مفهوم پیدا می‌کنند یا خیر؟



ترجیح داده می‌شود که اصلاحاتی صورت گیرد که از نظر زمین‌شناختی، یکنواخت باقی می‌مانند و به اطمینان بهتر پیش‌بینی‌ها، منجر می‌شوند. تطبیق تاریخچه‌ای که از نظر زمین‌شناختی سازگار باشد، چگونگی یکپارچه‌سازی داده‌های تولید با منابع دیگر داده‌ها (از قبیل سوندهای مغزه‌ها با پیش‌بینی زمین‌شناختی لرزه‌ای، آزمایش‌های چاه‌ها و غیره) را به طور سازگار نشان می‌دهد.

تطبیق تاریخچه‌ای که با زمین‌شناختی سازگار باشد

تطبیق تاریخچه‌ای که با زمین‌شناختی سازگار باشد، به صورت زیر بیان می‌گردد:

- مطرح کردن مسأله‌ی تطبیق تاریخچه‌ای به صورت مسأله‌ی یکپارچه‌سازی داده‌ها، نه یک مسأله‌ی بهینه‌سازی
- توضیح داده‌های دینامیکی در فرآیند زمین‌مدل‌سازی به روش احتمالی که با داده‌های ایستا سازگار باشد.
- قضاوت ذهنی درباره‌ی آنچه که تثبیت شده است (یعنی، معلوم باشد، برای مثال، نمودار ستون تخلخل) و آنچه که نامطمئن است، بتواند اصلاح شود.

بعضی از پژوهشگران، به اشتباه معتقدند که اگر موارد زیر برآورده شوند، روش تطبیق تاریخچه‌ای ویژه "از نظر زمین‌شناختی سازگار" می‌باشد:

- عبارت "پیشین" یا عبارت "یکنواخت‌ساز" در تابع هدف یا
- پارامترهای G و G در حلقه‌ی تطبیق تاریخچه‌ای وجود داشته باشند، روش تطبیق تاریخچه‌ای، نمی‌تواند از نظر زمین‌شناختی به طور خودکار سازگار شود.

ایده‌ی اصلی در تطبیق تاریخچه‌ای که به طور زمین‌شناختی سازگار می‌باشد، کاربرد مدل‌های احتمال است که تمام داده‌ها را در حین ساختن مدل زمین‌شناختی توضیح می‌دهد و شامل موارد زیر می‌شود:

- نگارهای -ها، سازه‌ها
- لرزه‌ای
- سناریوی زمین‌شناختی
- تولید

اکثر نرم‌افزارهای رایج تطبیق تاریخچه‌ای (و روشی)، مسأله را با این دیدگاه مدّظر قرار نمی‌دهند. مزیت این رویکرد، بررسی هر گونه کاهش عدم سازگاری، به روش سیستماتیک و محتمل می‌باشد. روش‌های زمین‌آماري، می‌توانند برای استخراج این مدل‌های احتمال مورد استفاده قرار گیرند.

از مرکز اطلاع رسانی و کتابخانه‌ی مرکزی شرکت ملی نفت ایران که این کتاب را در اختیار اینجانب قرار دادند کمال تشکر را دارم.

الحمد لله رب العالمين

آذر ۱۳۹۲

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی و تطبیق تاریخچه‌ای

- ۱-۱. شبیه‌ساز مخزن چیست؟ آیا آن یک مدل مخزن است؟ ۲
- ۲-۱. آیا شبیه‌سازها با هم تفاوت دارند؟ ۷
- ۳-۱. آیا روش درستی برای انجام شبیه‌سازی، وجود دارد؟ ۹
- ۴-۱. تطبیق تاریخچه‌ای چیست؟ چگونه انجام می‌گیرد؟ آیا می‌تواند خودکار شود؟ ۱۰

فصل ۲: ساختن مدلها (مخزن و سیالات)

- ۱-۲. مدل مخزن "۳ ستا" ۱۳
- ۲-۲. مدل "سیال" و "رن" ۱۸

فصل ۳: انتخاب شبیه‌ساز مخزن

- ۱-۳. مقدمه ۲۱
- ۱-۱-۳. معادلات پایستگی (conservation) ۲۱
- ۲-۱-۳. معادله‌ی مشخصه برای مواد سنگین ۲۳
- ۳-۱-۳. شرایط اولیه و مرزی ۲۶
- ۴-۱-۳. اجزای شبیه‌ساز ۲۷
- ۵-۱-۳. فرمول‌بندیها ۲۸
- ۶-۱-۳. راه حل معادلات خطی ۳۰
- ۲-۳. انواع شبیه‌سازهای ویژه ۳۱
- ۱-۲-۳. شبیه‌سازهای ترکیبی ۳۱
- ۲-۲-۳. شبیه‌سازهای گرمایی ۳۲
- ۳-۲-۳. شبیه‌سازهای شیمیایی ۳۳
- ۴-۲-۳. شبیه‌سازهای زمین‌مکانیکی ۳۳
- ۵-۲-۳. شبیه‌سازهای محیط‌های دوگانه ۳۴
- ۳-۳. انتخاب شبیه‌ساز ۳۵
- ۴-۳. خلاصه ۳۶

فصل ۴: کالیبره کردن مدل (تطبیق تاریخچه‌ای کردن)

- ۲-۴. اهمیت مدل ایستا ۳۸
- ۲-۴. اهمیت طرح شبکه‌ی شبیه‌سازی ۳۹
- ۳-۴. داده‌های دینامیکی برای تطبیق تاریخچه‌ای ۴۲

۴۲	 ۱-۳-۴. انواع کنترل چاه
۴۴	 ۲-۳-۴. محدودیت‌های فشار
۴۴	 ۳-۳-۴. چاه‌های تزریق
۴۵	 ۴-۳-۴. تکمیل چاه‌ها
۴۶	 ۵-۳-۴. شاخص‌های چاه‌ها
۴۸	 ۶-۳-۴. تجهیزات سطحی
۴۸	 ۴-۴. داده‌هایی که باید تطبیق داده شوند
۴۸	 ۱-۴-۴. آه گها، نسبت‌ها و حجم‌ها
۴۹	 ۲-۴-۴. شا. ی ایستا
۵۰	 ۳-۴-۴. نیمرخهای فشار و اشباع‌شدگی
۵۱	 ۴-۴-۴. فشارها؛ جاری
۵۱	 ۵-۴-۴. نیمرخهای زبید؛ ریو
۵۲	 ۶-۴-۴. شوری
۵۲	 ۷-۴-۴. ترکیبها
۵۲	 ۸-۴-۴. آزمایشهای تداخل
۵۲	 ۹-۴-۴. اطلاعات لرزه‌ای FD
۵۳	 ۵-۴. اصلاح پارامتر در حین تطبیق تاریخچه‌ی
۵۷	 ۶-۴. فرایندی برای تطبیق تاریخچه‌ای
۶۱	 ۷-۴. تطبیق تاریخچه‌ای به کمک رایانه
۶۶	 ۸-۴. روش تطبیق تاریخچه‌ای به کمک نرم‌افزار
۶۶	 ۱-۸-۴. روشهای خوب گردایان
۶۷	 ۲-۸-۴. طراحی آزمایش‌ها یا طراحی آزمایشی (ED)
۶۹	 ۳-۸-۴. مدل‌سازی سطح پاسخ
۷۰	 ۴-۸-۴. روشهای پارامتری (parametric methods)
۷۱	 ۵-۸-۴. فیلترهای مجموعه‌ی کالمن (EnKF) (Ensemble Kalman Filters)
۷۱	 ۶-۸-۴. روشهای هوش مصنوعی (artificial Intelligence)
۷۲	 ۷-۸-۴. روشهای هیبرید (hybrid)
۷۲	 ۸-۸-۴. وارونی زمان حرکت (traveltime inversion)
۷۳	 ۹-۸-۴. راه حل‌های چندگانه

۷۸	۹-۴ خلاصه
----	-----------

فصل ۵: پیش‌بینی‌ها جهت طراحی توسعه و ارزیابی عدم قطعیت

۸۱	۱-۵. شرایط مرزی پیش‌بینی
۸۴	۲-۵. محدودیت‌ها و اقدامات دینامیکی
۸۶	۳-۵. طراحی توسعه
۸۸	۱-۳-۵. تعیین محل چاه
۹۰	۲-۳-۵. تعمیرات چاه‌ها
۹۰	۳-۳-۵. محدودیت‌های تجهیزات
۹۱	۴-۵. تحلیل عدم قطعیت
۹۲	۵-۵. شناسایی پارامترهای نام‌آشنا
۹۴	۶-۵. توسعه‌ی مدل نماینده
۹۶	۷-۵. ارزیابی احتمال
۹۹	۸-۵ خلاصه

فصل ۶: چالش‌های آتی

۱۰۲	۱-۶. فیزیک و شیمی بهبودیافته
۱۰۴	۲-۶. بازدهی محاسباتی بهبودیافته
۱۰۵	۳-۶. یکپارچه‌سازی بهبودیافته
۱۰۶	۴-۶. خودکارسازی جریان‌های کار
۱۰۷	۵-۶ خلاصه

ضمیمه‌ی A

۱۰۸	مثالی از تطبیق تاریخچه‌ای
-----	---------------------------

ضمیمه‌ی B

۱۱۰	مثالی از تطبیق تاریخچه‌ای به کمک نرم‌افزار
۱۱۵	منابع
۱۲۰	نامگذاری
۱۲۳	واژگان انگلیسی - فارسی
۱۲۶	واژگان فارسی - انگلیسی
۱۲۹	نماینده‌ها
۱۳۱	نمادها