

شبیه سازی ژل پلاگ برای اصلاح درجای تراوایی

محمد مهدی حقیقی، احمدرضا عبدشاهی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Email: Mehdihighi@aut.ac.ir
Email: Ahmadreza.abdshahi@aut.ac.ir

چکیده

این پژوهش به بررسی عملکرد ژل پلاگ در شبیه‌ساز اکلیپس برای انحراف آب و اصلاح تراوایی با استفاده از ژل‌های سیلیکات می‌پردازد. هدف، ارزیابی توانایی مدل‌های پلیمری موجود در شبیه‌سازی فرآیندهای بستن لایه دزد و انحراف آب است. با توجه به اهمیت مدیریت پایدار منابع در صنعت نفت و گاز، مطالعه از مدل‌های دوبعدی برای تست حساسیت استفاده کرده و نتایج آن می‌تواند به بهینه‌سازی روش‌های شبیه‌سازی و استراتژی‌های عملیاتی کمک کند. نتیجه‌گیری کلی نشان می‌دهد اکلیپس تا حدی می‌تواند این فرآیندها را شبیه سازی کند.

واژه های کلیدی: شبیه ساز اکلیپس، ژل پلاگ، مدل سازی، اصلاح درجای تراوایی.

۱. مقدمه و هدف

در طول عمر یک میدان نفتی، تولید در سه مرحله انجام می‌شود: در بازیافت اولیه، نفت به دلیل فشار اولیه مخزن و انرژی طبیعی آن، شامل پنج مکانیسم محرک گاز محلول، کلاهدک گاز، آب، تخلیه گرانشی و ترکیبی به‌صورت طبیعی استخراج می‌شود. با کاهش فشار، در بازیافت ثانویه، از تزریق آب یا گاز برای جابجایی نفت استفاده می‌شود. با این حال، پس از این دو مرحله، حجم زیادی از نفت همچنان در مخزن باقی می‌ماند که نیاز به روش‌های افزایش بازیافت نفت مرحله سوم را ایجاد می‌کند [۱]. روش‌های افزایش بازیافت نفت حرارتی به دلیل تلفات حرارتی بالا و نگرانی‌های زیست‌محیطی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاربرد محدودی دارند، به‌ویژه در مخازن عمیق، مناطق نازک یا سفره‌های نامناسب. از این رو، روش‌های غیرحرارتی، به‌ویژه شیمیایی، به دلیل راندمان بالا و سهولت کاربرد، توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند. در این میان، پلیمرها به‌عنوان بخشی از روش‌های شیمیایی، با مکانیسم کاهش نفوذپذیری نامتناسب و تورم، نقش مهمی در بهبود بازیافت نفت ایفا می‌کنند. استفاده از پلیمرها نه تنها میزان آب مورد نیاز برای تزریق را کاهش می‌دهد، بلکه مشکلات ناشی از قطع آب در چاه‌های تولیدی را نیز کاهش می‌دهد. این موضوع در محیط‌های خشک با دسترسی محدود به آب و در چاه‌های دریایی که نیاز به تصفیه آب تولیدی است، اهمیت ویژه‌ای دارد [۲].

به دلیل بلوغ بیشتر میادین نفتی غول پیکر و کمبود اکتشافات، سیل پلیمری قادر به حفظ فاکتورهای بازیابی به اندازه کافی بالا برای برآورده کردن انتظارات تقاضای عرضه نفت نیست. ناهمگونی مخزن به دلیل وجود مناطق دزد، لایه های نفوذپذیری بالا و شبکه های شکستگی طبیعی که چاه های تزریق را به تولیدکنندگان متصل می کند، محققان را مجبور کرده تا روش های دیگری را برای کاهش این مشکلات بررسی کنند. سیستم ژل پلیمری یکی از روش های مسدود کردن لایه های با نفوذپذیری بالا و هدایت آب تزریق شده به لایه های با نفوذپذیری کم است، در نتیجه راندمان جارو را بهبود می بخشد [۳]. روش امیدوارکننده برای کاهش قطع آب چاه نفت تولیدی و کاهش اشباع باقیمانده نفت، استفاده از ژل پلیمری مانند پلی آکریل آمید است. ژل های پلیمری به دلیل توانایی عالی کنترل پروفیل، آماده سازی آسان و خاصیت کاهش نفوذپذیری نامتناسب به طور گسترده در مخازن بالغ مورد استفاده قرار می گیرند [۴].

شبیه سازی عددی ابزار بسیار مهمی برای بهینه سازی طراحی افزایش بازیافت نفت میدان و پیش بینی عملکرد مخزن است، شبیه سازی ژل ذرات پیچیده است زیرا نیاز به توصیف رفتار فاز در تفسیرهای ماکروسکوپی و برهمکنش ذرات در میکروسکوپی دارد. در عین حال، به دلیل رژیم های جریان مختلف و اندازه ذرات اعمال شده، انتقال ژل ذرات در شکست نیاز به مدل های شبیه سازی مجزا از انتقال در ماتریس دارد. بنابراین، مطالعات شبیه سازی ژل ذرات شامل سه مقیاس مختلف است. مدل مقیاس دانه شبیه سازی سطح منافذ است که می تواند برهمکنش های ذره-ذره و ذره-سیال را مشخص کند که در آن خواص ژل ذرات بر رژیم های جریان در محیط متخلخل غالب است. مدل مقیاس مغزه مدل های جریان لوله مویرگی و مدل های مبتنی بر مغزها شبکه منفذی اشاره دارد که در آن فعل و انفعالات حلقوی ذره-منفذ بر رژیم های جریان ژل ذرات در محیط متخلخل غالب است. مدل شکست به مدل های حاوی کانال های شکستگی یا شکستگی اطلاق می شود که در آن ها خواص جریان سیال غیرنیوتنی ژل های ذرات بر رژیم های جریان ژل ذرات غالب است [۵].

اهداف پژوهش شبیه سازی ژل پلاگ برای اصلاح درجای تراوایی، شبیه سازی عملکرد ژل پلاگ ها در اصلاح تراوایی به در چاه های تولیدی، قطع آب و فرایند های تزریق آب می باشد. که می توان این اهداف را به صورت زیر شرح داد:

- مروری کلی بر اهمیت شبیه سازی ژل پلاگ ها برای اصلاح تراوایی
- بررسی پیشینه پژوهشی موضوع شبیه سازی ژل پلاگ برای اصلاح درجای تراوایی
- بررسی ژل پلاگ ها محدودیت و مزایا آن ها
- شبیه سازی ژل پلاگ برای اصلاح درجای تراوایی و ارائه نتایج
- بررسی و جمع بندی نتایج

۲. تئوری و پیشینه تحقیق

با افزایش نیاز جهانی به نفت، تولید در بسیار از میادین همراه با آب بسیار زیاد است. برای تولید اقتصادی از چاه ها و بهبود ضریب راندمان جاروبی، استفاده از ژل پلاگ ها به صورت کاهش نفوذپذیری نامتناسب انجام می گردد. با توجه به پیچیدگی عملیات درمان با ژل و بهینه سازی آن نیازمندی به مطالعات آزمایشگاهی، میدانی و شبیه سازی روز افزون است. اما با توجه به مقرون به صرف تر بودن و مقیاس شبیه سازی های عددی گزینه ای مناسب برای بهینه سازی درمان ژل می

باشند. در این بخش، با بررسی پژوهش‌های انجام شده در این صنعت، اهمیت و ضرورت مدلسازی ژل پلاگ برای اصلاح درجای تراوایی، نشان داده شده است.

چن و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک رویکرد مدل‌سازی مکانیکی برای جابجایی سورفکتانت میکروسفر ژل برای افزایش بازیافت نفت پس از سیل پلیمری ارائه کردند. این مطالعه توسعه یک مدل جفت شده را مورد بحث قرار می‌دهد که خواص حمل و نقل میکروسفرهای ژل را با برهمکنش‌های پلیمر و سورفکتانت ادغام می‌کند، مکانیسم‌های مهاجرت و عوامل حفظ را بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی تجزیه و تحلیل می‌کند [۶].

در سال ۲۰۲۲، کایا و همکاران از جعبه ابزار شبیه‌سازی مخزن متلب برای توسعه مدل‌های عددی برای شاخه‌های مغزهدون شکستگی، شکستگی و درمان شده با ژل پلیمری مورد استفاده کردند. آزمایش‌های سیلاب روی این شاخه‌ها انجام شد و نتایج با شبیه‌سازی‌ها مقایسه شد. اثرات شکستگی و درمان ژل پلیمری بر بازیافت نفت و اشباع آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که شکستگی‌ها بازیابی هیدروکربن را کاهش می‌دهند، در حالی که درمان ژل پلیمری با بهبود راندمان جاروب، بازیابی را افزایش می‌دهد [۷].

در سال ۲۰۲۳، احمد و همکاران در مطالعه خود با استفاده از اصلاح‌کننده نفوذپذیری نسبی ها، مانند بنتونیت پیوندی پلیمری، در چاه‌های با تولید آب بالا دارند بررسی کرده که به طور موثری تولید آب را کاهش داده و بازیافت نفت را افزایش دهد. با ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی و شبیه‌سازی در مقیاس آزمایشی، موثرترین استراتژی درمان را می‌توان برای به حداکثر رساندن عملکرد چاه بهینه کرد [۸].

خلاصه از پژوهش‌های پیشین با توجه به اهداف، روش و نتیجه را می‌توان در جدول شماره ۱ مشاهده کرد.

جدول ۱- بررسی پژوهش‌های پیشین با توجه به اهداف، روش‌ها.

پژوهش	اهداف	روش	نتیجه
[۹]	بررسی امکان استفاده از گزینه پلیمری در اکلیپس برای شبیه سازی فرآیند لنجراف آب سیلیکات است.	گزینه پلیمر در اکلیپس است، یک نرم افزار تجاری که معمولا برای شبیه سازی مخازن در صنعت نفت استفاده می شود.	این مطالعه نشان داد که گزینه پلیمری در اکلیپس می‌تواند برای شبیه‌سازی انحراف آب با استفاده از سیلیکات‌ها استفاده شود، هرچند با برخی محدودیت‌ها.
[۶]	افزایش کارایی بازیافت نفت با کاهش مسائل مربوط به کلنال آب در مخازن بالغ، تعمیق درک تعاملات بین میکروکره های ژل، سورفکتانت ها و پلیمرها، توسعه ابزاری پیش بینی برای ساده سازی اجرای پروژه و	اکلیپس به عنوان یک شبیه ساز معیار برای اعتبارسنجی ماژول سورفکتانت جدید توسعه یافته و مدل تعامل بین	یک مدل مکانیکی جدید است که خواص حمل و نقل میکروسفرهای ژل، پلیمرها و سورفکتانت‌ها را برای افزایش بازیافت نفت پس از سیل پلیمر، همراه با فرمول‌بندی معادلات جدید برای

	بهبود شیوه های صنعت از طریق بینش های ارزشمند است.	میکروسفرهای ژل و سورفکتانت ها	مهاجرت فیلتراسیون و دینامیک ترکیب می کند.
[۱۰]	۱. ارزیابی تکنیک های سیلاب شیمیایی ۲. بهبود ژل ذرات پراکنده ۳. ایجاد یک مدل ریاضی ۴. انجام شبیه سازی عددی ۵. مقایسه ژل ذرات پراکنده با سیلاب پلیمر	یک مدل ریاضی جدید را برای ادامه شبیه سازی عددی کنترل پروفایل جرای ژل ذرات پراکنده توسط شبیه ساز UTCHEM.	توسعه و اعتبارسنجی یک مدل ریاضی برای کنترل انطباق ژل ذرات پراکنده دو فاز و سه جزئی (ژل پلیمری پراکنده) در مخازن خلاصه کرد که یک مدل ریاضی جدید را معرفی می کند که به طور موثر رفتار ذرات ژل ذرات پراکنده را شبیه سازی می کند. تحت شرایط مختلف، از جمله جذب آنها بر روی سطوح منافذ گلو و اثرات ضعیف برشی نازک کننده هنگام ورود به مخازن.
[۱۱]	هدف این مطالعه بررسی و تحلیل لثی بخشی و عملکرد درمان های کاهش نفوذپذیری نامتناسب در سناریوهای مختلف در چاه های تولید نفت و گاز است. هدف این مطالعه شناسایی شرایطی است که تحت آن تیمارهای کاهش نفوذپذیری نامتناسب نتایج بهتری به همراه دارند، بررسی عواملی مانند رژیم های جریان، موقعیت لایه های با نفوذپذیری بالا و زمان بندی اعمال درمان.	مدل سازی رفتار ژل های درجا مورد استفاده در فرآیندهای کاهش پلیمر دوگانه در محیط شبیه سازی مخزن STARS	کاهش نفوذپذیری نامتناسب در رژیم های جریان تحت سلطه ویسکوز و مخازن ضخیم تر مؤثرتر است. موقعیت لایه های زمین شناسی نیز مهم است، به طوری که لایه های با نفوذپذیری بالا در پایین برای کاهش نفوذپذیری نامتناسب مفیدتر از لایه های بالا هستند. درمان های کاهش نفوذپذیری نامتناسب به طور ایده آل در شرایط رانش آب لبه و در قطع های آب کمتر برای نتایج بهینه اجرا می شوند. جریان متقاطع بین لایه های مخزن عملکرد کاهش نفوذپذیری نامتناسب را به ویژه در مخازن با شکستگی هیدرولیکی افزایش می دهد، اگرچه پارامترهای شکست می توانند بر این امر تأثیر بگذارند. با این

حال، شکستگی‌های هیدرولیکی گسترده‌تر ممکن است بر اثربخشی کاهش نفوذپذیری نامتناسب تأثیر منفی بگذارد و بر اهمیت عرض شکست در نتایج درمان تأکید کند.			
بازیابی اولیه نفت ۲۸.۵۷٪ در تجربی و ۲۸.۸۷٪ مدل عددی برای شاخه‌های مغزه شکسته اندازه‌گیری شد، با تیمار ژل پلیمری که بازیابی را تا ۴۲.۸۵٪ تجربی و ۴۰.۸۳٪ مدل عددی بهبود می‌بخشد، که اثربخشی درمان را نشان می‌دهد.	مدل‌سازی عددی از طریق جعبه ابزار شبیه‌سازی مخزن متلب	هدف این تحقیق بررسی اثرات شکستگی‌ها و درمان ژل پلیمری بر بازیافت نفت در حین سیل در شاخه‌های مغزه شکسته مصنوعی	[۷]

۳. مواد و روش‌ها

۳.۱ انواع مواد شیمیایی مورد استفاده در فرآیندهای افزایش بازیافت نفت شیمیایی

افزایش بازیافت نفت شیمیایی، به ویژه درمان ژل پلیمری، تمرکز بر مدل‌های شبیه‌سازی عددی است. از این رو در بخش‌های بعدی توضیحاتی در مورد سیستم ژل پلیمری ارائه شده است. علاوه بر این، از آنجایی که محلول پلیمری جزء اصلی هر سیستم ژل پلیمری است، شرح مختصری از انواع محلول‌های پلیمری و خواص رئولوژیکی آنها نیز ارائه و بررسی شده است.

- محلول‌های پلیمری: محلول‌های پلیمری از دهه‌های گذشته به‌عنوان یک روش مؤثر برای افزایش بازیافت نفت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اولین آزمایش‌ها توسط پای و سندیفور در سال ۱۹۶۴ انجام شد که نشان دادند این محلول‌ها قادر به کاهش نسبت تحرک و افزایش تولید نفت هستند. این روش در مناطق مختلفی از جمله ایالات متحده، چین، کانادا و آلمان با موفقیت به‌کار رفته است. به‌عنوان مثال، در میدان نفتی داجوینگ چین، سیلاب پلیمری منجر به بازیابی افزایشی ۱۲٪ نفت درجا شد. این روش به‌ویژه در مخازن نفت سنگین که ویسکوزیته بالایی دارند، کاربرد دارد. هدف اصلی استفاده از محلول‌های پلیمری، افزایش ویسکوزیته آب تزریقی و کاهش نسبت تحرک آب به نفت است که به بهبود راندمان جابجایی نفت کمک می‌کند. نسبت تحرک باید نزدیک یا

کمتر از یک باشد تا فرآیند مطلوب در نظر گرفته شود. ضریب مقاومت نیز به عنوان معیاری برای ارزیابی کاهش تحرک ناشی از تزریق پلیمر مطرح است [۱۲، ۱۳].

- ژل های پلیمری و میکروژل های پلیمری: سیستم های ژل پلیمری به عنوان راه حلی برای مشکلات ناشی از ناهمگونی مخازن نفتی، از جمله وجود مناطق دزد و رگه های نفوذپذیری بالا، مطرح شده اند. این سیستم ها با مسدود کردن لایه های با نفوذپذیری بالا و هدایت آب تزریقی به لایه های کم نفوذ، راندمان جاروب را بهبود می بخشند. در مقایسه با محلول های پلیمری خطی، سیستم های ژل پلیمری سه بعدی کاهش نفوذپذیری بیشتری ایجاد می کنند و می توانند گرادیان فشار بالاتری در مناطق سارق ایجاد کنند که منجر به ضریب مقاومت باقیمانده بالاتری می شود. به عنوان مثال، نیدهام و همکاران (۱۹۷۴) گزارش کردند که ضریب مقاومت باقیمانده آب نمک پس از استفاده از سیستم ژل پلیمری به ۱۶ تا ۱۸ رسید، در حالی که این مقدار برای محلول های پلیمری تنها ۳ بود. ژل های تشکیل شده نه تنها قادر به جریان در محیط متخلخل نیستند، بلکه از نظر حرارتی و مکانیکی پایدارتر از محلول های پلیمری هستند. این ویژگی ها باعث می شوند که ژل ها بتوانند به صورت انتخابی به مناطق دزد نفوذ کنند و بدون آسیب به لایه های کم نفوذ، عملکرد بهینه ای داشته باشند [۳].

- انواع سیستم های ژل پلیمری بر اساس فرآیند ژل سازی: ژل شدن فرآیندی است که طی آن یک مایع به دلیل تشکیل شبکه سه بعدی از زنجیره های پلیمری، به حالت نیمه جامد (ژل) تبدیل می شود. این فرآیند معمولاً با روش های شیمیایی یا فیزیکی و از طریق اتصال دهنده های عرضی صورت می گیرد که مولکول های پلیمری را به هم متصل می کنند و مایع را درون شبکه به دام می اندازند. در صنعت نفت، محلول ژلانت (حاوی پلیمرها و اتصال دهنده های عرضی) به مخزن تزریق می شود و تحت تأثیر عواملی مانند دما، pH و شوری، ژل تشکیل می شود. این ژل با ایجاد یک سد، جریان سیال را منحرف کرده و با کاهش تولید آب، بازیافت نفت را افزایش می دهد. عوامل کلیدی در این فرآیند شامل زمان ژل شدن، قدرت ژل و شرایط محیطی (مانند دما و شوری) است. همچنین، نفوذ ژلانت به مناطق با نفوذپذیری پایین و کنترل دقیق فرآیند تزریق برای موفقیت عملیات ضروری است. سیستم های ژل پلیمری بر اساس ترکیبات و کاربردهایشان به سه دسته تقسیم می شوند:

- ژل مبتنی بر مونومر درجا
- ژل مبتنی بر پلیمر درجا
- ژل های ذرات از پیش ساخته شده

۳.۲ ژل پلاک

ژل پلاک راهکاری است که در کاربردهای مختلف، عمدتاً در صنعت نفت و گاز، برای مدیریت جریان سیال در محیط های متخلخل مانند مخازن استفاده می شود. این ژل ها با استفاده از پلیمرهای متقاطع ایجاد می شوند که می توانند مقادیر زیادی مایعات را جذب کنند و به طور موثر جریان آب یا سایر مایعات را مسدود یا تغییر مسیر دهند و در عین حال به نفت یا گاز اجازه می دهند آزادانه تر جریان پیدا کند [۱۴].

۳.۲.۱ عوامل موثر بر ژل های پلیمری

هنگام ارزیابی ژل های پلیمری برای کاربردهایی مانند افزایش بازیابی نفت و انحراف مایع، چندین فاکتور حیاتی باید در نظر گرفته شود. این عوامل بر اثربخشی و کارایی تیمارهای ژل در شرایط مخزن مختلف تأثیر می گذارد. به طور خلاصه عوامل کلیدی به شرح زیر است [۱۵]:

- پایداری حرارتی: ژل باید دمای مخزن را به ویژه در محیط های با دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی گراد تحمل کند. لذا ترکیب شیمیایی ژل باید دارای پایداری حرارتی باشد، پایداری حرارتی ژل اغلب تحت تأثیر غلظت پلیمر در ژل است.
- فرآیند ژل سازی: توانایی مدیریت زمان تشکیل ژل بسیار مهم است، زیرا ژل شدن کنترل نشده می تواند منجر به چالش های عملیاتی شود. برای کنترل این امر ما نیازمند درک شرایط دینامیکی هستیم؛ به عنوان مثال ژل شدن در یک محیط پویا، جایی که سیالات هنوز در حال حرکت هستند، می تواند بر کیفیت نهایی ژل و عملکرد آن تأثیر بگذارد.
- رفتار تورم: رفتار تورم ژل را می توان به دو صورت مورد بررسی قرار داد:
 - نسبت تورم: حجم تورم ذرات ژل به طور قابل توجهی بر اثربخشی آنها تأثیر می گذارد. یک ژل با طراحی خوب باید میزان تورم کنترل شده داشته باشد.
 - اندازه ذرات: اندازه های مختلف (به عنوان مثال، میکروژل ها در مقابل ذرات با اندازه میلی متر) از نظر قابلیت تورم و تزریق رفتار متفاوتی دارند.
- سازگاری شیمیایی: ژل های پلیمری باید بتوانند از نظر شیمیایی با فرایند تزریق و محیط مخزن سازگار باشند. یکی از موارد مهم سازگاری با آب سازندی است، برهمکنش بین ژل و آب سازند، به ویژه از نظر شوری و یون های چند ظرفیتی، می تواند به طور قابل توجهی بر عملکرد ژل تأثیر بگذارد. و مورد دیگری که می توان به آن اشاره داشت پایداری برشی است، به دلیل اینکه ژل باید یکپارچگی خود را در شرایط برشی در طول تزریق حفظ کند و در محیط متخلخل جریان یابد.
- شرایط محیطی: شرایط محیطی موثر بر ژل های پلیمری را می توان به دو صورت مورد بررسی قرار داد:
 - ◆ حساسیت PH: برخی از ژل ها ممکن است به تغییرات PH حساس باشند و بر خاصیت تورم و ژل شدن آنها تأثیر بگذارد
 - ◆ وجود گازها: اثرات گازهایی مانند CO_2 یا H_2S در مخزن می توانند عملکرد و پایداری ژل را تغییر دهد.

۳.۲.۲ فعال و غیرفعال شدن ژل های پلیمری

فعال سازی و غیرفعال سازی پلاگ های ژل در مخازن نفت، فرآیندهای حیاتی در عملیات های افزایش بازیافت نفت، به ویژه در هنگام سیل پلیمری است که راندمان جارو و کنترل جریان سیال را افزایش می دهد. فعال سازی شامل تزریق عوامل ژل سازی (مانند پلیمرها) به مخزن است که در آن با یون های آب نمک تعامل می کنند تا یک ساختار ژل شبکه ای ایجاد کنند که می تواند جریان سیال را در نزدیکی چاه های تولید مسدود کند و به طور موثر نفوذپذیری را کاهش دهد. این با

جذب مولکول های پلیمری بر روی سطوح سنگ تکمیل می شود. برعکس، غیرفعال سازی شامل استفاده از درمان های شیمیایی، تنظیمات PH یا افزایش دما برای حل کردن ساختار ژل است که امکان بازیابی نفوذپذیری و عملکرد بهینه تولید را فراهم می کند. اثربخشی این فرآیندها تحت تأثیر عواملی مانند انواع پلیمرهای مورد استفاده، خواص آب نمک و شرایط مخزن قرار می گیرد و تضمین می کند که پلاگ های ژل می توانند به طور استراتژیک در طول عملیات افزایش بازیافت نفت فعال و غیرفعال شوند [۱۶].

۳.۳ شبیه سازی اکلیپس

شبیه سازی یک تکنیک محاسباتی است که برای مدل سازی و تقلید سیستم ها یا پدیده های دنیای واقعی به کار می رود. این روش با استفاده از برنامه های کامپیوتری و مدل های ریاضی، رفتار سیستم ها را شبیه سازی کرده و به کاربران اجازه می دهد تا سناریوهای مختلف را بدون نیاز به آزمایش فیزیکی بررسی کنند. شبیه سازی در زمینه های مختلفی مانند مهندسی، اقتصاد، علوم اجتماعی و مراقبت های بهداشتی کاربرد دارد و به شناسایی مشکلات بالقوه یا طراحی سیستم های جدید کمک می کند. شبیه ساز اکلیپس یک چارچوب قدرتمند است که از شبیه سازی های همزمان پشتیبانی می کند و امکان اجرای موازی فرآیندها را فراهم می کند. این سیستم به طور خودکار بخش های مناسب شبیه سازی را روی معماری های مختلف (مانند تک پردازنده ها، ماشین های حافظه مشترک و شبکه های با اتصال آزاد) تکرار می کند و قابلیت اجرای برنامه ها بدون تغییر در محیط های متفاوت را دارد. اکلیپس همچنین دارای ویژگی تحمل خطا است که در صورت بروز مشکلات، شبیه سازی را ادامه داده یا اجزای معیوب را مجدداً راه اندازی می کند. فرآیند شبیه سازی در اکلیپس شامل تعریف مدل، ورودی ها، تولید نمونه ها، ترکیب آمار و گزارش گیری است. این سیستم با استفاده از ساختارهای سطح بالا و مترجم های مناسب، اطمینان حاصل می کند که شبیه سازی ها به صورت کارآمد و سازگار اجرا شوند. در نهایت، نتایج شبیه سازی جمع آوری و از طریق توابع گزارش استاندارد یا سفارشی ارائه می شوند. اکلیپس با مدیریت مؤثر جنبه های همزمانی و انتزاعات سطح بالا، یک ابزار ساده و قدرتمند برای شبیه سازی پدیده های پیچیده ارائه می دهد [۱۷].

۴. شبیه سازی

۴.۱ تنظیم مدل

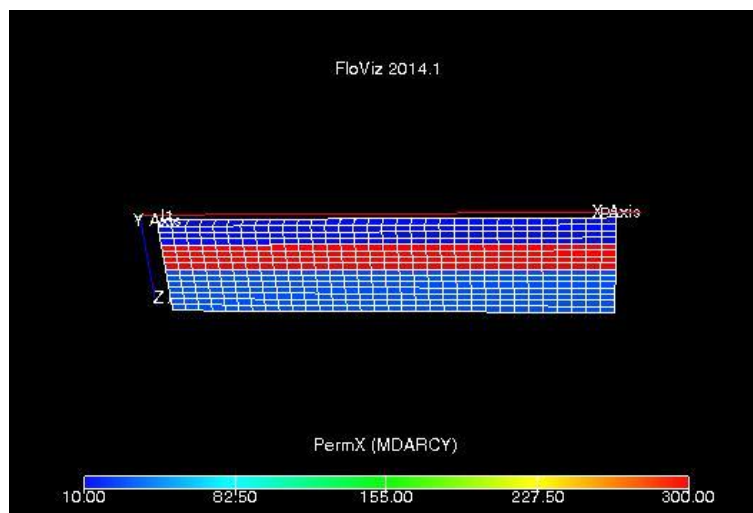
برای هدف این مطالعه از دو مدل مصنوعی دو بعدی استفاده شده است. مدل الف به استفاده از ژل های سیلیکات برای انحراف آب و مدل ب برای بستن لایه دزد با ژل های سیلیکات توسعه یافته است.

۴.۲ توضیحات مدل دو بعد الف

۴.۲.۱ شرح شبکه

شبیه سازی روی یک مخزن با دو لایه تولیدی که تراوایی لایه کمتر از لایه پایینی است انجام می شود شکل ۴.۱ نمای ۲ بعدی مخزن را نشان می دهد. شبیه سازی حاضر روی سیستمی در مختصات کارتزین با ۴۴۸ بلوک اجرا شده است که در جهت X، ۳۲ بلوک و در جهت Y، ۱ بلوک وجود دارد. و در جهت Z، ۱۴ بلوک وجود دارد. عمق تماس نفت گاز و تماس

آب و نفت به ترتیب ۱۹۰۰ متر و ۲۵۰۰ متر است. فشار در تماس گاز و نفت که به عنوان فشار مبنا نیز در نظر گرفته می شود ۲۷۰ بار است.



شکل ۱- نمای ۲ بعدی مخزن الف.

۴.۲.۲ اطلاعات چاه

دو چاه در این مخزن تعریف شده است. چاه تولید در مختصات (۱،۱،۱) و چاه تزریق در مختصات (۳۲،۱،۱) قرار دارد. و در تمام لایه ها مشبک کاری انجام شده است. خلاصه ای از اطلاعات چاه در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات چاه در مدل دوبعدی الف.

نام چاه	ناحیه مشبک شده	قطر چاه (m)	فشار ته چاهی (bar)
۱۱	۴-۱۴، ۱، ۱	۰.۲	۳۷۰
۱P	۴-۱۴، ۱، ۳۲	۰.۲	۱۲۰

۴.۲.۳ خواص سنگ

فازهای سیال موجود در مدل آب، نفت، گاز و گاز محلول هستند. با این حال، هیچ گاز آزاد در مدل ها وجود ندارد زیرا مدل ها همیشه بالاتر از فشار نقطه حباب هستند. جدول ۳ تخلخل و نفوذپذیری برای هر لایه در شبکه را نشان می دهد.

جدول ۳- تخلخل و نفوذپذیری در مدل دوبعدی الف.

تراوایی در جهت Z	تراوایی در جهت Y	تراوایی در جهت X	تخلخل	لایه
۰.۱	۱۰	۱۰	۰.۲	۱-۳
۵	۳۰۰	۳۰۰	۰.۲	۴-۷
۵	۳۰	۳۰	۰.۲	۸-۱۴

۴.۳ گزینه پلیمر

۴.۳.۱ مدل‌سازی کاهش نفوذپذیری

عامل بسیار مهمی که موفقیت فرآیند انحراف آب با سیلیکات‌ها را تعیین می‌کند، کاهش نفوذپذیری نسبی به آب است که پس از تشکیل ژل به دست می‌آید. اصطلاح مرتبط با کاهش نفوذپذیری ضریب مقاومت باقیمانده است که به طور متعدد در تئوری بیان شده است. برای محاسبه کاهش نفوذپذیری سنگ در اکلیپس، ضریب مقاومت باقیمانده در زیر کلمه کلیدی **PLYROCK** در گزینه پلیمر مشخص می‌شود.

۴.۳.۲ برنامه تزریق پلیمر

تزریق سیلیکات در راب انجام شد. سیل اولیه آب به مدت ۴ سال از ۱ ژانویه ۲۰۲۴ تا ۱ ژانویه ۲۰۲۸ در مخزن انجام شد و پس از آن راب پلیمری (سیلیکات) در فاصله ۱ سال از ۱ ژانویه ۲۰۲۸ تا ۱ ژانویه ۲۰۲۹ از چاه II تزریق شده است.

۴.۴ توضیحات مدل دوبعد ب

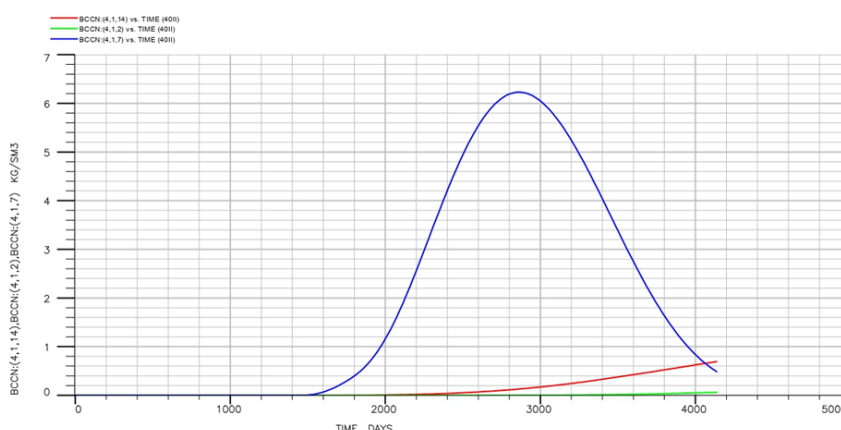
مدل دو بعدی ب دارای مشخصات یکسان با مدل الف در همه موارد به جز برنامه تزریق است. برنامه تزریق برای مدل دو بعدی ب به شرح زیر است:

ژل‌های سیلیکات در مختصات (۱،۱، ۳۲) از چاه تولیدی در بازه زمانی ۱ ژانویه سال ۲۰۲۸ تا ۱۶ ژانویه سال ۲۰۲۸ تزریق می‌گردد. بدین معنا که چاه تولیدی (P1) از ابتدا یعنی ۱ ژانویه ۲۰۲۴ شروع به تولید کرده و تا تاریخ ۳۰ دسامبر ۲۰۲۷ تولیدش را ادامه می‌دهد و سپس بسته شده و چاه فرضی I2 که در واقع در همان محل چاه تولیدی قرار دارد و در ۴ لایه، لایه ۴ تا ۷ پرفوریت شده در ۱ ژانویه ۲۰۲۸ تحت تزریق ژل پلاگ قرار می‌گیرد و تا زمان ۱۶ ژانویه این فرایند ادامه می‌یابد و سپس چاه فرضی I2 بسته شده و چاه تولیدی P1 باز شده و تولید از آن مجددا صورت می‌گیرد.

۵. نتایج و بحث

۵.۱ نتایج غلظت ژل پلاگ در مدل الف

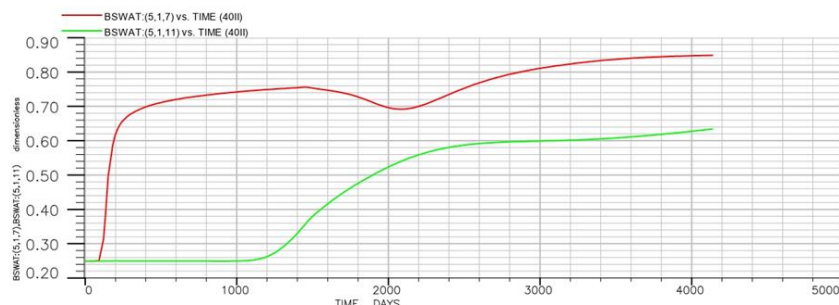
همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، پس از شروع تزریق، ژل سیلیکات بیشتر در لایه دزد (۴-۷) تجمع یافته‌اند. این مشاهدات با فرضیه اولیه ما در مورد رفتار سیال در سازند در طول فرآیند بهبود بازیافت نفت همسو می‌باشد. تجمع ژل سیلیکات در این لایه خاص نشان می‌دهد که مواد تزریق شده به دنبال مسیریابی با کمترین مقاومت هستند. علاوه بر این، تجمع در لایه دزد، تفاوت‌های نفوذپذیری در مخزن را برجسته می‌کند، که در تعیین دینامیک جریان سیال بسیار مهم است. وجود ژل سیلیکات در این لایه ممکن است نشان دهنده این باشد که فرآیند ژل شدن توسط فعل و انفعالات بین سیالات تزریق شده و ماتریس سنگ آغاز شده است که منجر به کاهش نفوذپذیری در مناطق مجاور و انحراف بعدی جریان به سمت لایه دزد می‌شود. این پدیده می‌تواند پیامدهای قابل توجهی برای کارایی کلی فرآیند بازیابی داشته باشد، زیرا ویسکوزیته افزایش یافته از شاخه‌های ژل می‌تواند به بسته شدن مناطق با نفوذپذیری بالا کمک کند و سیال بیشتری را مجبور به ورود به مناطق کم تولید کند.



شکل ۲- غلظت ژل پلاگ در لایه‌های مخزن مدل الف.

۵.۲ نتایج اشباع آب در مدل الف

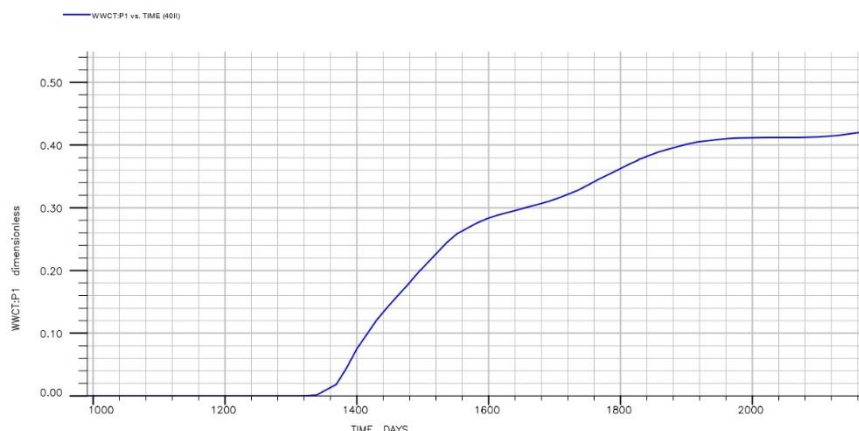
همان‌طور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، اشباع آب پس از تزریق ژل سیلیکات در لایه دزد کاهش پیدا کرد است؛ و در لایه‌هایی که تراوایی کمترین دارند اشباع آب افزایش یافته است. که می‌توان نشان دهند عملکرد موثر ژل‌های سیلیکات در انحراف جریان آب باشد.



شکل ۳- اشباع آب در لایه های مخزن مدل الف.

۵.۳ برش آب در مخزن و چاه در مدل الف

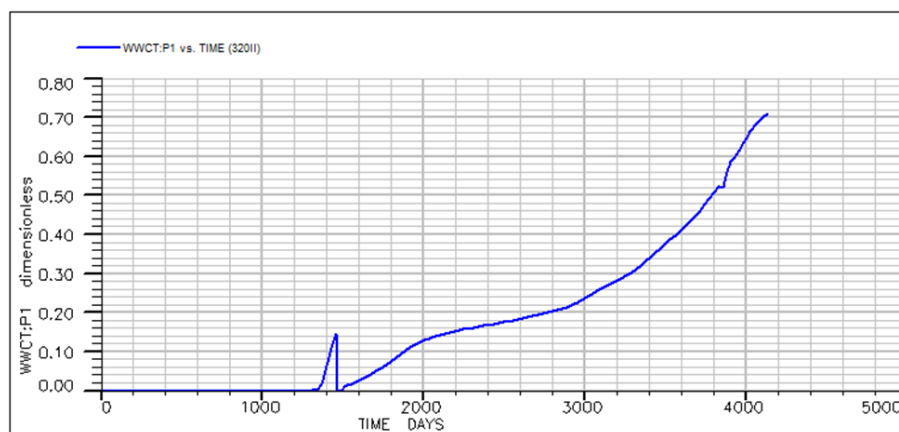
با توجه به شکل ۴ می توان مشاهده کرد که شیب افزایشی برش آب پس از تزریق ژل سلیکات کاهش داشته است. اما روند افزایش برش آب متوقف نشده است که این امر می تواند به علت کم بودن میزان ژل سلیکاته در هر راب باشد. یا با توجه به ۳ احتمال میرود که گزینه پلیمر در نرم افزار اکلیپس ۱۰۰ نمی تواند خواص ژل گونه ژل های سلیکاته را به طور کامل شبیه سازی کند و پس از گذشت بازه زمانی تقریباً دو سال این خواص در آب حل می شوند.



شکل ۴- برش آب در چاه تولیدی مدل الف.

۵.۴ برش آب در مخزن و چاه در مدل ب

با توجه به شکل شماره ۴ و شکل شماره ۵ می توان مشاهده کرد که با تزریق ژل پلاگ از چاه تولیدی یا همان چاه فرضی I2 در لایه های دزد سبب شده که تولید آب پس از تزریق میزان برش آب کنترل شده است. و میزان تولید و شیب افزایش میزان تولید در مقایسه با مدل الف بسیار کمتر بوده که نشان دهنده این است که ژل های سلیکات به عنوان ژل پلاگ توانایی مناسبی در کنترل میزان برش آب در چاه را دارا می باشند همچنین میتوان گفت شبیه ساز اکلیپس در مدلسازی ژل پلاگ ها تا عملکردی قابل قبولی را دارا می باشد. اما باید توجه داشت که با توجه به استفاده از کلید واژه پلیمر برای این شبیه سازی میزان جامد بودن ژل تا حدی کافی ممکن است تثبیت نشده باشد.



شکل ۵- برش آب در چاه تولیدی مدل ب.

۵.۵ نتیجه گیری

استفاده از ژل های سیلیکات در اصلاح درجا نفوذپذیری در مخازن نفت پیامدهای قابل توجهی برای افزایش فرآیندهای بازیافت نفت دارد. یافته‌های حاصل از مدل‌سازی انجام شده با اکلیپس ۱۰۰ بینش‌های ارزشمندی را در مورد اینکه چگونه می‌توان دینامیک جریان سیال را از طریق استفاده استراتژیک از شاخه‌های ژل دستکاری کرد، ارائه می‌کند.

- تزریق ژل پلاگ ها به لایه دزد می تواند تا حد خوبی میزان برش آب را کنترل کند و آن را به کاهش بدهد یا روند صعودی آن را متوقف یا آرام کند.
- شبیه ساز اکلیپس می تواند تا حد قابل قبولی در مدل‌سازی ژل پلاگ ها عمل کند. ژل سیلیکات ترجیحاً در لایه سارق (فاصله های ۴-۷) تجمع می یابد و این فرضیه را تقویت می کند که سیالات از مسیرهایی با کمترین مقاومت عبور می کنند. این نشان دهنده تغییرات قابل توجه نفوذپذیری در مخزن است که برای درک رفتار سیال و دینامیک جریان در طول بازیافت نفت افزایش یافته بسیار مهم است.
- فعل و انفعالات بین ژل تزریق شده و ماتریکس سنگ منجر به کاهش نفوذپذیری در مناطق اطراف می شود. این منجر به انحراف جریان به سمت لایه دزد می شود که ممکن است با هدایت سیال به مناطقی که عملکرد ضعیفی دارند، کارایی فرآیند بازیابی را افزایش دهد.
- مشاهدات پس از تزریق، کاهش اشباع آب را در لایه سارق که ژل در آن وجود دارد، نشان می دهد، در حالی که لایه های مجاور با نفوذپذیری کم، اشباع آب را افزایش می دهند. این ظرفیت ژل سیلیکات را برای منحرف کردن جریان آب به طور موثر تعیین می کند، که برای بهینه سازی استخراج منابع بسیار مهم است.
- رفتار ردیاب های تزریقی پس از تزریق ژل سیلیکات، حرکت دیفرانسیل سیال را از طریق لایه های مختلف نفوذ پذیر برجسته می کند. به طور خاص، ردیاب شماره ۱ از میان لایه‌های سارق حرکت می‌کند، در حالی که ردیاب شماره ۲، تزریق شده پس از حلزون ژل سیلیکات، حرکت به لایه‌های نفوذپذیری پایین‌تر را نشان داد. این نشان

- می‌دهد که فرآیند ژل‌سازی می‌تواند الگوهای جریان را تغییر مسیر دهد، و به طور بالقوه بازیافت نفت را از مناطقی که قبلاً تولید کمتری داشتند، افزایش می‌دهد.
- روند مشاهده شده در نرخ قطع آب نشان دهنده کاهش شدید پس از تزریق ژل است. اگرچه روند افزایشی قطع آب متوقف نشده است، اما این ممکن است به حجم ناکافی ژل سیلیکات یا محدودیت در توانایی نرم افزار برای شبیه سازی دقیق دینامیک ژل فراتر از مدت زمان معین نسبت داده شود.
 - یافته‌ها بر اهمیت مدل‌سازی دقیق پلاگ‌های ژل در مخازن نفت برای بهینه‌سازی اصلاح نفوذپذیری و افزایش بازیافت نفت تأکید می‌کند:
 - ژل‌های سیلیکات که به درستی مستقر شده اند می‌توانند مسیرهای جریان سیالات تولید شده را به میزان قابل توجهی کنترل کنند، انحراف آب از مناطق با نفوذپذیری بالا را تسهیل کنند و قطع آب را به حداقل برسانند و منجر به بازیابی کارآمدتر شوند.
 - تعادل بهینه در غلظت ژل برای دستیابی به حداکثر فواید در عین حفظ امکان سنجی اقتصادی بسیار مهم است. معاوضه بین پیچیدگی عملیاتی و افزایش بهره وری باید به دقت مدیریت شود.
 - تحقیقات آینده باید با هدف بهبود تکنیک‌های مدل‌سازی برای شبیه سازی بهتر خواص منحصر به فرد ژل‌های سیلیکات، به ویژه به دلیل تعامل آنها با سنگ مخزن و قرار گرفتن در معرض طولانی مدت در شرایط مخزن باشد. این امر در پالایش فرمول‌های ژل و استراتژی‌های تزریق برای بهبود نتایج کلیدی خواهد بود.
- به طور خلاصه، استقرار ژل‌های سیلیکات یک راه امیدوارکننده برای افزایش بازیافت نفت با اصلاح دینامیک جریان و کاهش قطع آب است که ارتباط استراتژیک آنها در شیوه‌های مدیریت مخزن را تأیید می‌کند.

۶. مراجع

۱. Alagorni, A.H., Z.B. Yaacob, and A.H. Nour, *An overview of oil production stages: enhanced oil recovery techniques and nitrogen injection*. International Journal of Environmental Science and Development, 2015. 6(9): p. 693.
۲. Gbadamosi, A., et al., *Application of polymers for chemical enhanced oil recovery: a review*. Polymers, 2022. 14(7): p. 1433.
۳. Khamees, T.K., *Evaluation of the performance of different polymer gel systems as an in-depth gel treatment using numerical simulation*. 2020: Missouri University of Science and Technology.
۴. Rozhkova, Y.A., et al., *Review of microgels for enhanced oil recovery: Properties and cases of application*. Gels, 2022. 8(2): p. 112.
۵. Leng, J., M. Wei, and B. Bai, *Review of transport mechanisms and numerical simulation studies of preformed particle gel for conformance control*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021. 206: p. 109051.
۶. Chen, X., et al. *Mechanistic modeling of gel microsphere surfactant displacement for enhanced oil recovery after polymer flooding*. in *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. 2015. SPE.
۷. Kaya, O.A., I. Durgut, and S. Canbolat. *Numerical Modeling of Waterflooding Experiments in Artificially Fractured and Gel Treated Core Plugs by Embedded Discrete Fracture Model of a Reservoir Simulation Toolbox*. in *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control*. 2022. SPE.

۸. Ahmed, A.A., et al., *Experimental investigation and numerical simulation of relative permeability modifiers during water shut-off*. Geoenergy Science and Engineering, 2023. **230**: p. 212095.
۹. Anokwuru, V.C., *Simulation of water diversion using ECLIPSE Options*. 2015, University of Stavanger, Norway.
۱۰. Sun, G., et al., *Numerical simulation of in-depth profile control for dispersed particle gel in heterogeneous reservoirs*. Frontiers in Energy Research, 2023. **11**: p. 1106191.
۱۱. Alfarge, D., B. Bai, and A. Almansour, *Numerical simulation study to understand the performance of RPM gels in water-shutoff treatments*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018. **171**: p. 818-834.
۱۲. Wang, J. and M. Dong, *Optimum effective viscosity of polymer solution for improving heavy oil recovery*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009. **67**(3-4): p. 155-158.
۱۳. Guo, Z., et al., *A fast and effective method to evaluate the polymer flooding potential for heavy oil reservoirs in Western Canada*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013. **112**: p. 335-340.
۱۴. Bai, B., J. Leng, and M. Wei, *A comprehensive review of in-situ polymer gel simulation for conformance control*. Petroleum Science, 2022. **19**(1): p. 189-202.
۱۵. Bai, B., J. Zhou, and M. Yin, *A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control*. Petroleum exploration and development, 2015. **42**:(۴) p. 525-532.
۱۶. Wang, J., J. Cao, and S. Yuan, *Shear wave velocity prediction based on adaptive particle swarm optimization optimized recurrent neural network*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020. **194**: p. 107466.
۱۷. Sunderam, V. and V.J. Rego, *EclIPSe: A system for high performance concurrent simulation*. Software: Practice and Experience, 1991. **21**(11): p. 1189-1219.