

## طراحی پایلوت ازدیاد برداشت - چالش‌ها و راه کارها

محمد پروازدوانی\*، سید مهدیا مطهری، حسن گلقدشتی، پژوهشگاه صنعت نفت

## چکیده

بر اساس نقشه راه ازدیاد برداشت، برای مواجهه و کاهش ریسک سرمایه گذاری در پروژه‌های ازدیاد برداشت با توجه به عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی - مخزنی و هزینه بالای اجرایی کردن این پروژه‌ها، از رویکرد سیستماتیک منتهی به پایلوت میدانی ازدیاد برداشت استفاده می‌شود. با توجه به تجربیات کسب شده در طراحی پایلوت ازدیاد برداشت، می‌توان چالش‌های آن را در سه دسته آزمایشگاهی، تعمیم نتایج آزمایشگاه به مدل و در نهایت، مدل‌سازی و طراحی دسته‌بندی کرد. در این مقاله با بیان این چالش‌ها، راهکارهایی برای بهبود طراحی پایلوت ازدیاد برداشت در این سه حوزه ارائه می‌شود. راهکارهای ارائه شده در این سه حوزه عبارت‌اند از: سیلاب‌زنی مغزه توسط سیالات مخزنی با رویکرد ازدیاد برداشت، استفاده از فناوری پیشرفته رصد حرکت سیال در مغزه، شبیه‌سازی در مقیاس مغزه و استفاده از توابع شبه‌جریانی بر اساس انطباق تاریخچه، انتخاب منطقه پایلوت، شبیه‌سازی برشی و استفاده از شبیه‌سازهای جانبی برای مدل کردن پدیده‌های ویژه از جمله رسوب آسفالتین.

## اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۴/۱۲

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۵/۱۹

## واژگان کلیدی:

ازدیاد برداشت، طراحی پایلوت، چالش‌های آزمایشگاهی، تعمیم‌پذیری، چالش‌های مدل‌سازی

## مقدمه

شلمبرژر در شکل ۱- نشان داده شده است. بر اساس این شکل که مبین نقشه راه ازدیاد برداشت است، بعد از تهیه طرح توسعه مقدماتی میدان، با غربالگری روش‌های ازدیاد برداشت و انتخاب روش یا روش‌های اولویت‌دار، بررسی‌های آزمایشگاهی روش (های) ازدیاد برداشت منتخب قابل انجام است. سپس نتایج این آزمایش‌ها به مدل‌های مخزنی تعمیم داده شده و بر اساس مدل‌سازی انجام شده، طراحی پایلوت انجام می‌شود. با اجرای پایلوت در میدان و کسب بازخورد از آن می‌توان عدم قطعیت پارامترهای عملکرد ازدیاد برداشت را کاهش و طراحی سناریوی ازدیاد برداشت با ریسک کمتر برای کل میدان انجام داد.

با توجه به شکل ۱-، اولین مرحله از نقشه ازدیاد برداشت، غربالگری است که شامل غربالگری در سه سطح مرسوم، زمین‌شناسی و پیشرفته است. در غربالگری مرسوم، هر روش ازدیاد برداشت بر اساس مقادیر متوسط پارامترهای مخزن موردنظر و مقایسه با مقادیر مطلوب آن پارامتر برای به کارگیری روش ازدیاد برداشت مذکور، تأیید یا رد می‌شود. در غربالگری زمین‌شناسی، با بررسی جزئی‌تر شباهت‌های مخزن موردنظر با مخازن مشابه از جمله مکانیزم تولید و محیط رسوبی مشابه، روش‌های ازدیاد برداشت انتخاب شده از مرحله قبل اولویت‌بندی می‌شود. در غربالگری پیشرفته، با استفاده از پایگاه داده دانشی و استفاده از روش‌های کاهش ابعاد از جمله آنالیز اجزای اصلی<sup>۱</sup>، می‌توان

بر اساس بند ۱۴ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی، افزایش ذخایر راهبردی نفت و گاز کشور به منظور اثرگذاری در بازار جهانی نفت و گاز و تأکید بر حفظ و توسعه ظرفیت‌های تولید نفت و گاز ضرورت دارد. از سوی دیگر افزایش یک درصد ضریب بازیافت می‌تواند منجر به استحصال تقریبی ۷ میلیارد بشکه نفت خام بیشتر از میداین هیدروکربنی شود (با احتساب تقریبی ۷۰۰ میلیارد بشکه نفت در جا کشف شده) [۱]. با اتخاذ نگرش نظام‌مند به فرایند تولید، افزایش ضریب بازیافت می‌تواند از طریق بهبود عملکرد سیستم مخزن یا چاه یا تأسیسات سطح‌الارضی حاصل شود. در حوزه مخزن می‌توان از روش‌های ازدیاد برداشت از جمله تزریق مواد شیمیایی، تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی گاز، تزریق آب یا آب با درجه شوری کم برای افزایش ضریب بازیافت استفاده کرد. یک چالش اساسی در به کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت عدم قطعیت ناشی از کمبود یا فقدان اطلاعات زمین‌شناسی و مخزنی است. این عدم قطعیت در کنار هزینه‌های زیاد برای انجام پروژه‌های ازدیاد برداشت منجر به افزایش ریسک سرمایه‌گذاری در پروژه‌های ازدیاد برداشت می‌شود. از اینرو برای مواجهه و کاهش این ریسک، از رویکرد نظام‌مند منتهی به اجرای این پروژه‌ها در مقیاس پایلوت استفاده می‌شود. این رویکرد شامل مرحله‌ای از فعالیت‌هاست که نمونه ارائه شده توسط شرکت

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (parvazdavanim@ripi.ir)

در جدول ۱- نشان داده شده است. چالش اول تهیه نمونه سیالات و مغزه‌های مناسب و نماینده برای انجام آزمایش‌ها می‌باشد. این انتخاب باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان شرایط مخزن در شرایط آزمایشگاهی بازسازی شود. در مورد تهیه نمونه سیال مناسب لازم است تا بنا به هدف مورد استفاده از پروتکل‌های مناسب تهیه نمونه بهره‌برداری گردد. به‌عنوان مثال امروزه جهت آزمایش‌های آسفالتین سعی بر استفاده از نمونه گیرهای دارای فشار جبرانی است تا از کاهش فشار و رسوب آسفالتین مربوطه درون نمونه گیر که ریسک تغییر این پارامتر را بالا می‌برد، جلوگیری شود. شکل ۲- شماتیک کلی این دستگاه نمونه گیر را نشان می‌دهد (slb.com/labs). در کنار این مسئله، دقت مناسب در نگهداری صحیح از سیال<sup>۲</sup> و همگن سازی مناسب سیال قبل از استفاده نیز باید مورد توجه قرار گیرد. انتقال نمونه سیال بدون تغییر فاز در آنالیز ویژه سیالات، تهیه نمونه‌های نماینده برای مطالعات تضمین جریانی و جلوگیری از فلش نمونه سیال در زمان انتقال از مزایای استفاده از این دستگاه است. از طرفی بنا به محدود بودن تعداد آزمایش‌های صورت گرفته، نمونه سنگ‌های انتخاب شده برای آزمایش‌ها باید به گونه‌ای باشد که حداقل نماینده بخش اعظمی از میدان باشد. در این راه استفاده از روش‌های دسته‌بندی سنگ مخزن

تشخیص داد که مخزن موردنظر در کدام خوشه از این پایگاه قرار می‌گیرد. بعد از شناسایی شماره خوشه مترتیب مخزن موردنظر، می‌توان درصد مطلوب بودن استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت مختلف را به دست آورد.

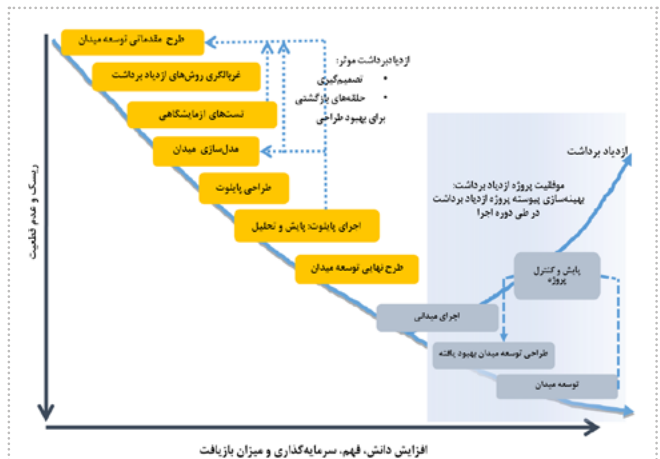
پس هدف اصلی از انجام پایلوت، کاهش عدم قطعیت پارامترهای عملکردی در ازدیاد برداشت از جمله ضریب جاروب عمودی، اشباع نفت باقیمانده، ضریب جاروب سطحی، تزریق پذیری، بهره‌دهی، تخمین ضریب بازیافت و زمان میان‌شکن شدن سیال ناخواسته (آب یا گاز) است. طراحی پایلوت باید به گونه‌ای باشد که زمان و هزینه‌های اجرای پایلوت، کمینه و دستیابی به اهداف پایلوت، بیشینه باشد. در ادامه و با توجه به تجربیات کسب شده از انجام تست‌های آزمایشگاهی ازدیاد برداشت، تعمیم نتایج آزمایش‌ها به مدل و در نهایت مدل‌سازی و طراحی پایلوت، چالش‌ها و راهکارهای پیشنهادی تشریح می‌شوند.

### ۱- چالش‌ها و راهکارها در بخش آزمایشگاهی

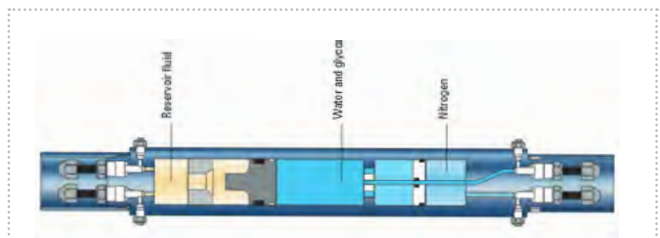
این مرحله از نقشه راه ازدیاد برداشت شامل آزمایش‌های سیلاب‌زنی در مقیاس مغزه و محیط آزمایشگاه ازدیاد برداشت است. سه چالش این مرحله که منجر به کسب داده‌های نادرست یا ناکافی آزمایشگاهی می‌شوند در کنار راهکارها

۱ | چالش‌ها و راهکارهای آزمایشگاهی

ردیف	چالش	راهکار
۱	تهیه نمونه سیالات و مغزه‌های مناسب و نماینده	استفاده از روش‌های نمونه‌گیری مناسب متناسب با هدف مورد استفاده، مطالعه کامل بر روی سیالات مخزن در جهت تعیین تعداد نمونه سیالات و سنگ‌های مختلف در کل میدان
۲	عدم استفاده از سیالات مخزنی (نفت زنده/آب سازندی) در آزمایش‌های ویژه مغزه	استفاده از آزمایشگاه ازدیاد برداشت با استفاده از نفت زنده و آب سازندی مخزن
۳	نداشتن تخمین از میزان آسیب سازند در طول مسیر حرکت سیال در مقیاس مغزه و نیز عدم پایش جبهه حرکتی سیال جهت کمک به انجام تعمیم‌پذیری نتایج آزمایشگاه به مدل	استفاده از تکنولوژی‌های مدرن آزمایشگاهی (ساخت و به کارگیری دستگاه‌های سیلاب‌زنی با تعداد بالای حسگر فشاری میانی نگهدارنده مغزه [۳] / استفاده از فناوری NMR جهت دنبال نمودن جبهه حرکتی سیال [۴])
۴	هزینه جاری است	سرمایه‌ای می‌شود



۱ | نقشه راه ازدیاد برداشت و جایگاه یابی مراحل منتهی به پایلوت در آن [۲]



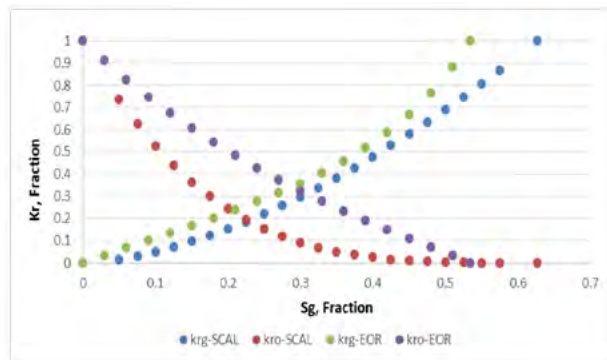
۲ | سل‌های انتقالی فشار جریانی

و انتخاب نمونه مناسب با توجه به خصوصیات آماری گستره سنگ موجود نیز حائز اهمیت است.

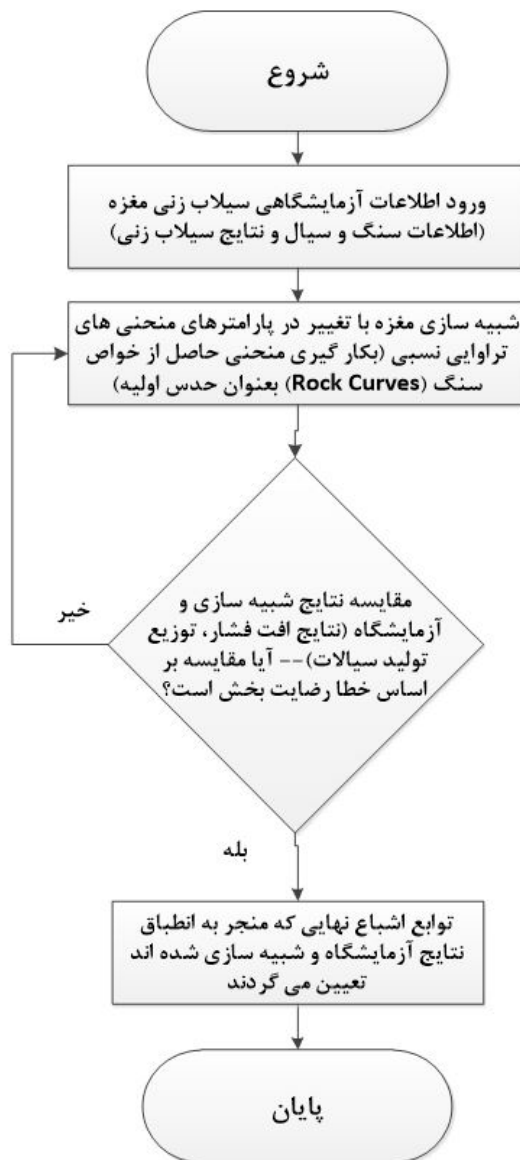
چالش دوم عدم استفاده از سیالات مخزنی (نفت زنده و آب سازندی) در آزمایش‌های ویژه مغزه<sup>۳</sup> است که به موجب آن نقاط انتهایی منحنی‌های تراوایی نسبی و فشار موینگی به همراه میزان انحنا برای شبیه‌سازی سناریوهای ازدیاد برداشت قابل اعتماد نخواهد بود. به عبارت دیگر بر اساس استانداردهای جهانی [۵] در آزمایش‌های ویژه مغزه برای کاهش زمان انجام آزمایش‌ها، از سیال زنده مخزنی استفاده نمی‌شود و از این رو اثر آسفالتین، اسیدیته و غیره به همان میزانی که در حالت واقعی مخزن وجود دارد بر روی منحنی‌های تراوایی نسبی دیده نمی‌شود. برای رفع این چالش باید در آزمایشگاه ازدیاد برداشت از نمونه سیال مخزنی متناسب استفاده شود. به طور مثال شکل-۳ مقایسه‌ای بین منحنی تراوایی نسبی حاصل از آزمایش‌های ویژه مغزه با نتایج حاصل از آزمایشگاه ازدیاد برداشت را نشان می‌دهد که مبین تفاوت قابل توجه در منحنی‌های تراوایی نسبی است. علت این تفاوت مربوط به استفاده نمودن از نفت زنده مخزنی در آزمایشگاه ازدیاد برداشت و نفت مرده در آزمایشگاه خواص سنگ است. استفاده از نفت مرده در آزمایشگاه خواص سنگ به دلیل بالاتر بودن درصد اجزاء سنگین آن امکان تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به مقداری غیر واقعی از نفت دوستی را فراهم می‌آورد که باعث کاهش مقادیر منحنی تراوایی نسبی فاز غیر ترشونده (نفت) و انحنا بیشتر منحنی می‌گردد.

چالش سوم ناشی از عدم استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته آزمایشگاهی جهت پایش رفتار سیال در محیط متخلخل می‌باشد. به طور مثال عدم وجود حس‌گرهای فشاری چندگانه در طول مغزه موجب تخمین میانگین از میزان آسیب سازند در طول مسیر حرکت سیال در مغزه می‌گردد و در نتیجه نمی‌توان میزان تراوایی آسیب دیده را در مغزه‌های با ناهمگونی بالا به طور دقیق تخمین زد. برای رفع این چالش از دستگاه‌های سیلاب‌زنی با تعدادی حس‌گر فشاری استفاده می‌شود. از این طریق با ورود داده‌های بیشتر به عنوان پاسخ سیستم به فرایند مذکور می‌توان ضمن بررسی اثر ناهمگونی محتمل در طول مغزه به نمودارهای یکنواخت تری از توزیع افت فشار در سرتاسر مغزه و در نتیجه محاسبات دقیق‌تر تغییرات تراوایی دست یافت [۳].

از مصادیق دیگر کاربرد تکنولوژی‌های پیشرفته آزمایشگاهی در این حوزه، استفاده از فناوری انجام آزمایش‌های رزونانس مغناطیس هسته‌ای (NMR) می‌باشد. استفاده از این تکنولوژی منجر به دریافت اطلاعات بیشتر و دقیق‌تر از داخل محیط متخلخل در فضای آزمایشگاهی در حین اجرای فرایند ازدیاد برداشت خواهد گردید. از این موارد می‌توان به پایش جبهه



شکل ۳ | مقایسه نوعی منحنی تراوایی نسبی گاز-نفت حاصل از آزمایش ازدیاد برداشت و آنالیز ویژه مغزه



شکل ۴ | الگوریتم تعیین توابع اشباع حاصل از آزمایشات ازدیاد برداشت

پارامترهای مستقیم از جمله فشار، دبی تزریق و تولید سیالات و پارامترهای غیر مستقیم از جمله تراوایی نسبی و فشار موینگی است که بدست آوردن دسته دوم مستلزم اعمال روش های تحلیلی، نیمه تحلیلی و عددی بر روی دسته اول است. شبیه سازی در مقیاس مغزه و در محیط مجازی (نرم افزارهای شبیه سازی کامپیوتری) روشی عددی است که به دلیل در نظر گرفتن واقعیت های حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل دقت بالاتری داشته و از الگوریتم بهینه سازی برای کمیته سازی تفاوت نتایج آزمایشگاه و شبیه سازی مقیاس مغزه استفاده می کند که مراحل آن برای پارامتر تراوایی نسبی به طور نمونه در شکل-۴ نشان داده شده است. بدیهی است که در بررسی هر مکانیزم پارامترهای متنوعی حائز اهمیت می باشد که باید در جهت تعیین آنها تلاش صورت پذیرد. در ادامه به دو مورد مهم دیگر که تعیین مدل سیال مناسب و پارامترهای مرتبط با آسیب سازندی آسفالتین می باشد، اشاره خواهد شد.

یکی دیگر از کاربردهای شبیه سازی مقیاس مغزه، تعیین مدل سیال معتبر در کنار تعیین توابع اشباع جریانی است. یکی از عدم قطعیت ها در شبیه سازی رفتار سیال مخزن، گروه بندی اجزا سیال<sup>۴</sup> است. برای انتخاب بهترین گروه بندی با لحاظ کردن رفتار دینامیکی سیال از شبیه سازی مدل لوله قلمی استفاده می شود که در آن، ضریب بازیافت در فشارهای مختلف ترسیم می گردد. بر این اساس در قدم اول آزمایش مذکور بدون گروه بندی اجزا سیال شبیه سازی می شود. سپس انتخاب های مختلف گروه بندی اجزا سیال شبیه سازی شده و بهترین گروه بندی اجزا سیال از نقطه نظر باز تولید نتایج شبیه سازی آزمایش لوله قلمی در حالت گروه بندی نشده اجزا سیال، انتخاب می شود.

از دیگر کاربردهای شبیه سازی مقیاس مغزه، تعیین پارامترهای غیر مستقیم ضرایب دقیق (آلفا، بتا و گاما) در فرایند تشکیل و رسوب آسفالتین برای استفاده در مدل دینامیکی بر اساس نتایج آزمایش های ویژه سنگ و سیال مخزن است. در صورت دسترسی به تجهیزات آزمایشگاهی می توان آزمایش های مخصوصی برای تعیین بازه این ضرایب انجام داد [۶]. در صورت عدم دسترسی به این تجهیزات می توان با تحلیل حساسیت و استفاده از روش های بهینه سازی، مقادیر این ضرایب را با شبیه سازی مقیاس مغزه به دست آورد.

چالش دیگر، تعمیم پذیری نتایج از آزمایشگاه به مقیاس درشت دانه سلول شبیه سازی است. دو علت اصلی برای استفاده از روش های تعمیم پذیری، تغییر اندازه سلول های شبیه سازی و ناهمگونی مخزنی است. برای مواجهه با این چالش از روش های تعمیم پذیری صریح و ضمنی استفاده می شود. روش های صریح همان روش های میانگین گیری

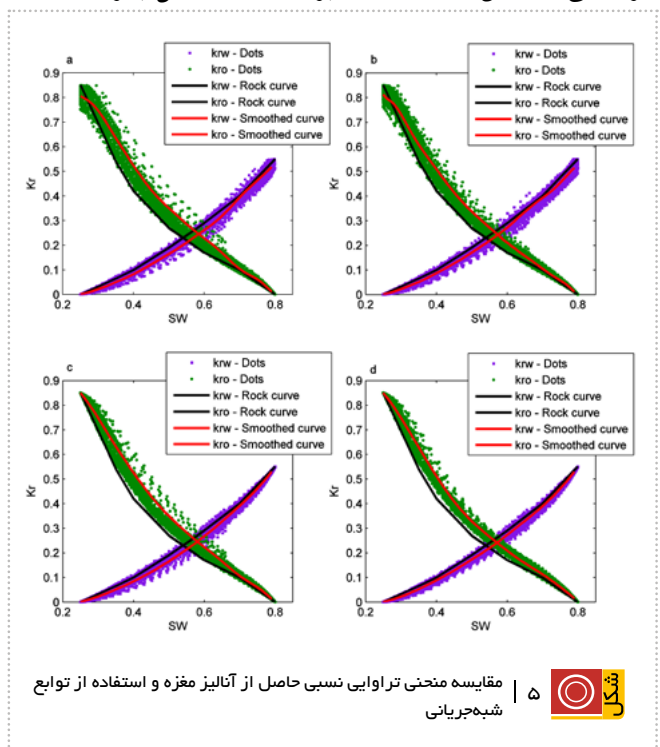
حرکت سیال و تغییرات دینامیک اشباع سیالات در طول مغزه نام برد که این توانایی را به کاربر خواهد داد تا مدل دقیق تری از طبیعت فرایند را شبیه سازی کند. مطمئناً این داده ها در کنار داده های مرسوم نظیر تولید و اختلاف فشار جنبه های دقیق تری از فرایند را نشان خواهند داد.

در کل در اجرای سناریوی ازدیاد برداشت در آزمایشگاه باید بنا به صورت مسئله و مکانیزم اتفاق افتاده در میدان در حین اجرای روش ازدیاد برداشت، عدد بدون بُعد مربوطه در هر دو حالت اجرای میدانی و آزمایشگاهی معادل همدیگر قرار می گیرند. به عنوان مثال در یک سیلاب زنی متداول در یک مخزن غیر شکافدار، عدد بدون بُعد موینگی نقش بازی می کند. لحاظ نکردن درست این محدوده در آزمایشگاه منجر به تخمین نادرست پارامترهای مورد نظر سناریوی ازدیاد برداشت مربوطه خواهد گردید [۴]. با رفع چالش های فوق از طریق راهکارهای ارائه شده می توان نتایج آزمایشگاهی دقیق تری به دست آورد.

## ۲- چالش ها و راهکارها در بخش تعمیم نتایج آزمایشگاه به مدل مخزن

این مرحله در واقع پلی برای حرکت از مرحله تست های آزمایشگاهی به سوی مدل سازی و طراحی است. دو چالش عمده این مرحله عبارت اند از تعیین مقادیر پارامترهای غیر مستقیم از آزمایش های ازدیاد برداشت و تعمیم پذیری آنها به مقیاس درشت دانه سلول های شبیه سازی.

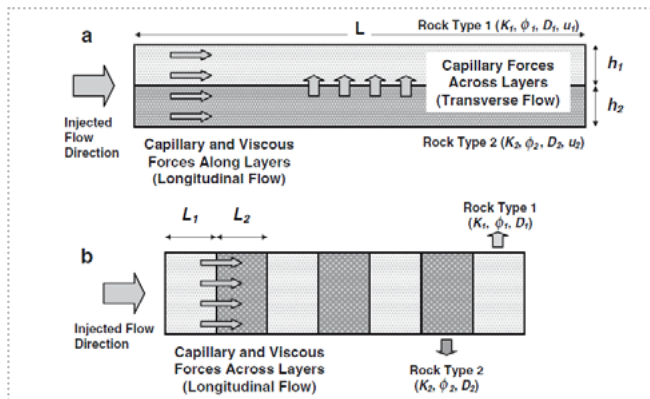
خروجی آزمایش های ازدیاد برداشت مشتمل بر دو دسته



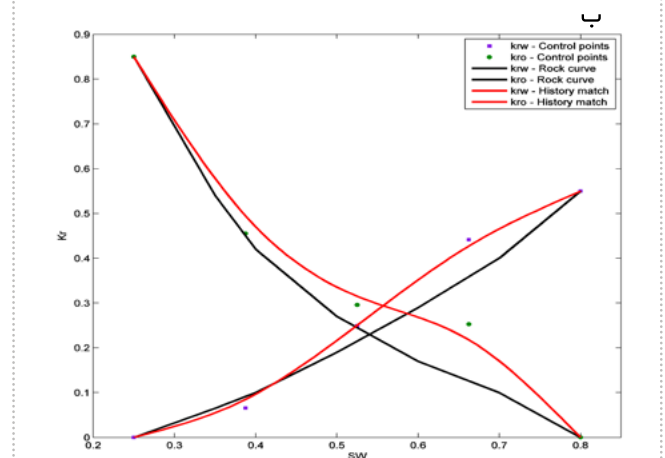
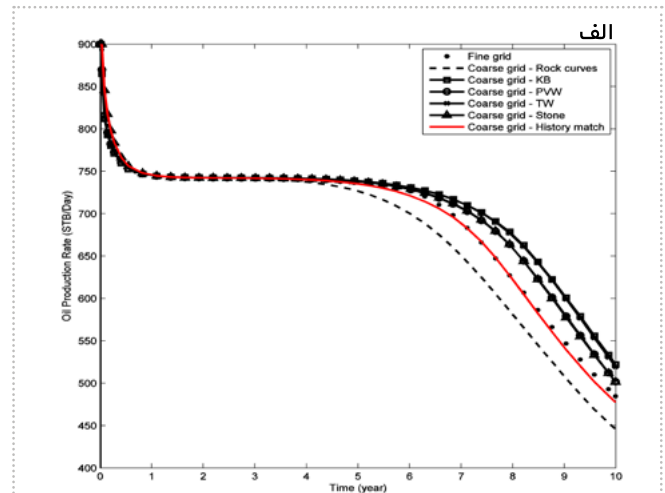
شبه‌جریانی، برطرف کردن اثر نامطلوب پراکندگی عددی<sup>۸</sup> ناشی از تغییر اندازه مقیاس مغزه به مدل ریزدانه است. شکل-۵ نمونه‌ای از مقایسه منحنی تراوایی نسبی حاصل از آنالیز مغزه و استفاده از توابع شبه‌جریانی را نشان می‌دهد. در این شکل منحنی قرمز رنگ معرف روند تراوایی نسبی انطباق شده بر نتایج تراوایی نسبی حاصل از اندازه بلوک‌های متفاوت در شبیه‌سازی درشت دانه می‌باشد. این شکل نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی دینامیکی در مقیاس میدانی با سلول‌های

ریاضی از جمله توانی<sup>۵</sup> می‌باشند که با استفاده از آنها خواص استاتیک از جمله تخلخل، اشباع و تراوایی برای سلول‌های بزرگ‌تر تعیین می‌گردند. در روش‌های ضمنی که برای تعمیم‌پذیری پارامترهای دینامیک جریانی مفید می‌باشد، از توابع شبه‌جریانی<sup>۶</sup> یا انطباق تاریخچه استفاده می‌شود. در توابع شبه‌جریانی هدف تعیین یک رابطه تحلیلی بر اساس وزن‌دهی به پارامترهای دینامیک جریانی از جمله سرعت، تحرک‌پذیری و یا کسر جریانی<sup>۷</sup> سیالات است که جهت افزایش مقیاس منحنی‌های اشباع از جمله تراوایی نسبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

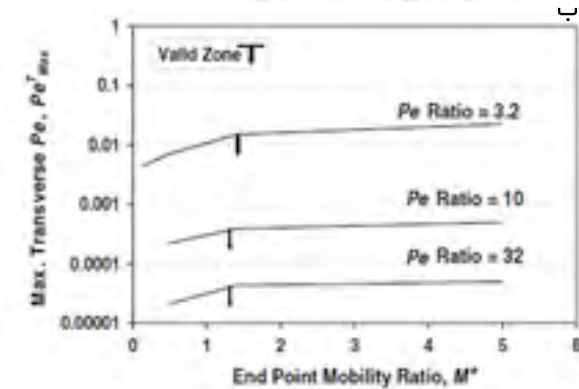
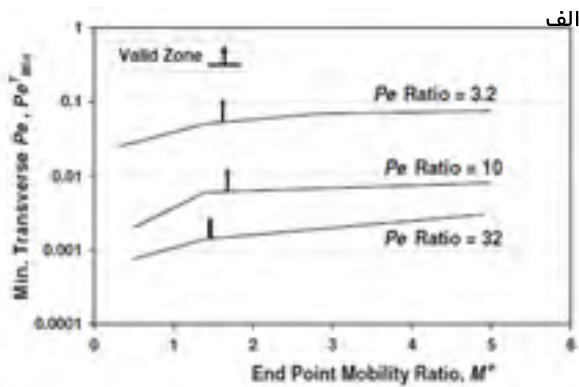
در شرایطی که علت استفاده از روش‌های تعمیم‌پذیری، تغییر اندازه سلول‌های شبیه‌سازی علیرغم همگن بودن مدل مخزنی باشد، عمدتاً از توابع شبه‌جریانی استفاده می‌شود. این تعمیم‌پذیری در حالت تسری نتایج از مقیاس مغزه به مدل ریزدانه شبیه‌سازی اتفاق می‌افتد. کارکرد توابع



شکل ۷ | بررسی رژیم‌های جریانی در مخازن ناهمگون (a) دویعدی، (b) تک‌بعدی



شکل ۶ | الف) مقایسه منحنی تراوایی نسبی حاصل از روش انطباق تاریخچه با روش آنالیز مغزه، (ب) مقایسه نتایج تولیدی مقیاس درشت‌دانه بر اساس به‌کارگیری توابع اشباع جریانی متفاوت (آنالیز مغزه، توابع شبه‌جریانی و انطباق تاریخچه)



شکل ۸ | بازه اعتباری عدد بی‌بعد پکلت برای هر یک از روش‌های تعمیم‌پذیری تحت رژیم جریانی (الف. ویسکوز، ب. فشارمویینه)

ناهمگونی در آن سلول می‌شود. در این شرایط در قدم نخست با استفاده از توابع شبه‌جریانی حدس اولیه‌ای برای سلول درشت‌دانه شبیه‌سازی به‌دست آمده و سپس با هدف کمینه کردن اختلاف بین منحنی تولید شبیه‌سازی شده در دو حالت ریزدانه و درشت‌دانه از تطابق تاریخچه استفاده می‌شود. شکل ۶-الف نمونه‌ای از مقایسه منحنی تراوایی نسبی تعمیم‌پذیری شده حاصل از روش ضمنی انطباق تاریخچه را با منحنی‌های تراوایی نسبی آنالیز مغزه نشان می‌دهد. برای صحت‌سنجی توابع اشباع تولید شده نتایج تولید نفت روزانه بر اساس به‌کارگیری توابع اشباع جریانی متفاوت (آنالیز مغزه، توابع شبه‌جریانی و انطباق تاریخچه) با یکدیگر مقایسه شده‌اند تا روش بهینه تعمیم‌پذیری که منجر به باز تولید نتایج مقیاس ریزدانه می‌گردد، تعیین شود [۸]. همانطور که در شکل ۶-ب دیده می‌شود روش‌های مختلفی از توابع شبه‌جریانی از جمله Kyte & Berry، وزن‌دهی بر اساس حجم حفره<sup>۱۰</sup>، بر اساس گذردهی سیالات<sup>۱۱</sup> و Stone برای مقایسه با نتایج انطباق تاریخچه و منحنی‌های آزمایشگاه خواص سنگ مطرح شده است. برای صحت‌سنجی روش‌های تعمیم‌پذیری فوق، باید بنابه صورت مسئله و مکانیزم اتفاق افتاده در میدان در حین اجرای روش ازدیاد برداشت، عدد بدون بُعد مربوطه در هر دو حالت اجرای میدانی و آزمایشگاهی معادل همدیگر قرار گیرند. به عنوان مثال در مورد مطالعاتی که مربوط به مخازن ناهمگون با تفاوت تراوایی لایه‌ای بالا می‌باشد (شکل ۷-ب)، از دو عدد بی‌بُعد پکلت<sup>۱۲</sup> و نسبت تحرک‌پذیری<sup>۱۳</sup> استفاده می‌شود. بر این اساس مقادیر این اعداد بدون بُعد برای سلول‌های با مقیاس کوچک‌تر محاسبه و نمودار توزیع فراوانی آن ترسیم می‌شود. مقادیر همین اعداد در مدل با مقیاس بزرگ‌تر هم محاسبه و نمودار توزیع فراوانی آن هم ترسیم می‌شود. در صورتی می‌توان گفت تعمیم‌پذیری صحیح بوده که این دو نمودار توزیع فراوانی از تطابق خوبی برخوردار باشند. بر این اساس بازه اعتباری عدد بی‌بُعد پکلت برای هر یک از روش‌های تعمیم‌پذیری تحت رژیم جریانی (ویسکوز و یا فشارمویینه) در شکل ۸- نشان داده شده است [۸].

برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه ازدیاد برداشت که در دما و فشار بالا انجام می‌شوند نیز همانند توابع

درشت‌دانه نمی‌توان از منحنی‌های تراوایی نسبی آنالیز مغزه استفاده نمود و باید برای عدم به‌وجود آمدن پراکندگی عددی به سراغ توابع شبه‌جریانی رفت [۷]. اما در شرایطی که علت استفاده از روش‌های تعمیم‌پذیری علاوه بر تغییر اندازه سلول شبیه‌سازی، ناهمگونی مخزنی نیز باشد، علاوه بر توابع شبه‌جریانی از روش انطباق تاریخچه هم استفاده می‌شود (الگوریتم شبیه‌سازی مشابه شکل ۴- است). این تعمیم‌پذیری در حالت تسری نتایج از مقیاس ریزدانه به مقیاس درشت‌دانه<sup>۹</sup> شبیه‌سازی اتفاق می‌افتد. ممکن است یک سلول درشت‌دانه شبیه‌سازی متشکل از چندین گروه سنگی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی باشد که منجر به

۲ | چالش‌ها و راهکارهای مدل‌سازی و طراحی

ردیف	چالش	راهکار
۱	انتخاب منطقه پایلوت مناسب و نماینده جهت تسری نتایج حاصل از اجرای پایلوت به مقیاس میدانی	انتخاب ناحیه مشابه از لحاظ مقادیر پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مخزن و حداقل بودن برهم‌کنش تولید از مخزن با منطقه پایلوت
۲	زمان زیاد شبیه‌سازی ترکیبی فرایندهای ازدیاد برداشت در مقیاس تمام مخزن	ساخت مدل برشی از ناحیه پایلوت
۳	تعیین الگوی تزریقی-تولیدی	انتخاب الگوی پایلوت با توجه به اهداف پایلوت
۴	شبیه‌سازی پدیده‌های جانبی تولید از جمله آسفالتین	بررسی فنی مدل‌های استاتیک (ترمودینامیکی) و دینامیک (هیدرودینامیکی) پدیده جانبی و استفاده از شبیه‌سازهای برتر هر حوزه
۵	عدم توانایی نرم‌افزارهای موجود در شبیه‌سازی پدیده‌ها در درون چاه مانند رسوب آسفالتین بر دیواره چاه و اثر نامطلوب آن در پیش‌بینی فشار سرچاهی	تهیه جداول VFP مربوطه توسط نرم‌افزارهای جداگانه مختص آن برای زمان‌های مختلف و به‌روزرسانی آن در نرم‌افزار برای لحاظ کردن اثر پدیده‌ها مانند جذب سطحی آسفالتین بر دیواره چاه

جدایش فازی  
آسفالتین

تجمع ذرات جامد  
آسفالتین

نشست رسوبات

آسیب سازند

۹ | روند شبیه‌سازی رسوب آسفالتین در نرم‌افزار اکتلیپس

چالش اول انتخاب منطقه پایلوت است. برای غلبه بر این چالش باید منطقه‌ای به عنوان پایلوت انتخاب شود که دارای دو ویژگی باشد: ویژگی اول امکان تسری نتایج حاصل از اجرای پایلوت به کل میدان است. به عبارتی دیگر، باید از جهت پارامترهای استاتیکی مثل تراوایی و دینامیکی مثل رفتار فشاری، ناحیه پایلوت به گونه‌ای انتخاب شود که رفتاری شبیه کل میدان داشته باشد، به گونه‌ای که بازخورد منطقه پایلوت را بتوان به قسمت عمده‌ای از میدان نسبت داد و با ریسک پایین روش مذکور را در دیگر نقاط میدان اجرا کرد. به عنوان ویژگی دوم، ناحیه پایلوت باید در جایی واقع شود که تولید از چاه‌های خارج از پایلوت اثری روی نتایج پایلوت نداشته باشد به نحوی که بتوان داده‌های درستی از پایلوت به دست آورد. از طرفی در صورت ایجاد مشکل در اجرای پایلوت مشکلی در سطح وسیع برای دیگر نقاط میدان و تولید آن به وجود نیاید که بدین طریق ریسک اجرای پایلوت و تبعات آن کاهش پیدا خواهد کرد. برای این منظور می‌توان ناحیه‌ای از مخزن را انتخاب کرد که میانگین خواص

اشباع وابسته به مقیاس هستند و از این رو در تغییر مقیاس از مغزه به پایلوت باید تصحیحاتی در این مقادیر داد. در کل می‌توان به اهمیت اعمال تغییر اندازه بلوک‌ها بر روی پارامترهای حاصل از آزمایش‌ها اذعان داشت که با عدم انجام این کار از اعمال دقیق نتایج به دست آمده در مدل کوتاهی شده و ممکن است نتایج کاملاً متمایز با واقعیت را پیش روی قرار دهد. هر چند که این امر توسط بسیاری از شرکت‌های فعال در این زمینه نادیده گرفته می‌شود ولی گلوگاه ورود نتایج مراحل قبل جهت تعیین بازخورد میدانی بوده و از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

### ۳- چالش‌ها و راهکارها در بخش مدل‌سازی و طراحی

این مرحله از نقشه راه ازدیاد برداشت شامل مدل‌سازی و طراحی در مقیاس پایلوت و محیط مجازی (نرم‌افزارهای شبیه‌سازی) است. پنج چالش این مرحله که منجر به طراحی نادرست پایلوت می‌شوند در کنار راهکارها در جدول ۲- نشان داده شده است.

۳ | معیارهای انتخاب نوع پایلوت

پایلوت با چاه‌های تولیدی				پایلوت تک چاه تزریقی				عدم قطعیت پارامترهای عملکردی ازدیاد برداشت	
پنج نقطه‌ای معکوس تکرار شونده	پنج نقطه‌ای شمال	پنج نقطه‌ای معکوس با چاه‌های مشاهده‌ای	پنج نقطه‌ای معکوس	پایلوت با دو چاه	با چندین چاه مشاهده‌ای در سطح‌های مختلف	با چندین چاه مشاهده‌ای در یک خط	با یک چاه مشاهده‌ای		تک چاه (میکرو پایلوت)
									ضریب جاروب عمودی
									اشباع نفت باقی مانده
									ضریب جاروب افقی
									تزریق پذیری
									بهره‌دهی
									میان‌شکن شدن سیال تزریقی
									تخمین ضریب باز یافت
									رسوب آسفالتین، وکس و ذرات جامد
									طراحی تزریق متناوب آب و گاز

آسفالتین در سیال نفتی (مدل مایع<sup>۶</sup>، جامد<sup>۷</sup> و پلیمری<sup>۸</sup>)، می‌باید مدلی انتخاب گردد که نزدیک‌ترین نتایج پیش‌بینی به نتایج آزمایش دما و فشار بالای فیلتراسیون<sup>۹</sup> آسفالتین را به همراه داشته باشد. در این میان ماژول WinProp نرم‌افزار CMG که از مدل مایع استفاده می‌کند نتایج دقیق‌تری را به همراه دارد. بر این اساس می‌باید مدل استاتیک توسط نرم‌افزار CMG ساخته شود و سپس مدل متناسب و همگون سیال در PVTi که ورودی مدل سیال سازگار با اکلیپس را به همراه می‌آورد، ایجاد گردد. چالش پنجم عدم توانایی نرم‌افزارهای موجود در شبیه‌سازی پدیده‌ها در درون چاه مانند رسوب آسفالتین بر دیواره چاه می‌باشد که موجب عدم تطابق تاریخچه فشار سرچاهی<sup>۱۰</sup> می‌شود. در بسیاری از مخازن از جمله مخازن نفت سبک با GOR بالا، مشکل اساسی، رسوب ذرات ریزدانه و نرم آسفالتین بر دیواره چاه و ایجاد نوعی اصطکاک بیشتر است که منجر به کاهش فشار سرچاهی می‌شود. با توجه به نداشتن نرم‌افزاری برای تهیه جداول عملکرد سیال در ستون چاه سازگار با پدیده آسفالتین، می‌توان با کنترل پارامترهایی از قبیل (فاکتور تجمع<sup>۱۱</sup> و اصطکاک<sup>۱۲</sup>) در نرم‌افزارهای موجود از جمله PIPESIM جداول عملکرد ستون چاه<sup>۱۳</sup> را برای زمان‌های مختلف به دست آورد. با انجام این کار نتایج شبیه‌سازی فشار سرچاهی بر داده‌های میدانی فشاری تطابق بهتری دارند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به انجام پروژه‌های ازدیاد برداشت در سه مقیاس مغزه، پایلوت و کل میدان هیدروکربنی، پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های کاربردی برای ارتباط نتایج این سه مقیاس با یکدیگر تعریف و انجام شود. عدم برقراری ارتباط مناسب میان این سه بخش از حصول نتیجه مطلوب جلوگیری خواهد کرد. پل ارتباطی از یک مقیاس به مقیاس دیگر از نقاط مغفول مانده این حوزه است که کمتر به آن توجه شده است و نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و جامع‌تری می‌باشد.

در بخش آزمایشگاهی مرتبط با طراحی پایلوت ازدیاد برداشت برای مواجهه با چالش‌های تهیه نمونه سیالات و مغزه‌های مناسب و نماینده، عدم استفاده از سیالات مخزنی (نفت زنده/آب سازندی) در آزمایش‌های ویژه مغزه و نداشتن تخمین از میزان آسیب سازند در طول مسیر حرکت سیال در مقیاس مغزه و در نهایت عدم پایش جبهه حرکتی سیال جهت کمک به انجام تعمیم‌پذیری نتایج آزمایشگاه به مدل به ترتیب از راهکارهای زیر استفاده می‌شود:

- استفاده از روش‌های نمونه‌گیری مناسب متناسب با هدف مورد

مخزنی در آن نزدیک به مقدار میانگین خواص مخزنی در کل مخزن باشد. به علاوه فاصله ناحیه پایلوت از چاه‌های تولیدی حداقل دو برابر فاصله چاه‌ها در میدان باشد.

چالش دوم زمان زیاد شبیه‌سازی ترکیبی فرایندهای ازدیاد برداشت در مقیاس تمام مخزن است که راهکار مواجهه با آن، ساخت مدل برشی<sup>۱۴</sup> از ناحیه پایلوت می‌باشد. برای کاهش زمان و هزینه انجام شبیه‌سازی‌ها مخصوصاً برای فرایندهای ازدیاد برداشت که باید از مدل‌های ترکیبی شبیه‌سازی استفاده کرد، از مدل برشی استفاده می‌شود. به دلیل عدم امکان استفاده از مدل‌های برشی با مرز فشاری متغیر در شبیه‌سازی ترکیبی، می‌توان از مدل آغازسازی شده با شرایط مشخص پارامترها در مرز منطقه برشی استفاده نمود.

چالش سوم تعیین الگوی تزریقی-تولیدی در منطقه پایلوت است. به عبارت دیگر از چند چاه و با چه آرایشی باید در ناحیه پایلوت استفاده کرد. برای این منظور باید الگو طوری باشد که دستیابی به اهداف پایلوت یعنی کاهش عدم قطعیت پارامترهای عملکردی را فراهم آورد. به عنوان نمونه در جدول-۳ معیارهای انتخاب نوع پایلوت نشان داده شده است. این جدول مبین قابلیت‌های هر نوع پایلوت برای مشخص کردن یک پارامتر عدم قطعیت دار خاص است. رنگ سبز مبین قابلیت‌های آن نوع پایلوت برای از بین بردن عدم قطعیت یک پارامتر ازدیاد برداشت مشخص، رنگ زرد کاهش غیربهبوده عدم قطعیت و رنگ قرمز یعنی اینکه آن نوع پایلوت اثری در کاهش عدم قطعیت آن پارامتر ازدیاد برداشت ندارد [۹].

چالش چهارم شبیه‌سازی دقیق پدیده‌های جانبی از جمله مطالعات تضمین جریانی<sup>۱۵</sup> در شبیه‌سازهای مرسوم به ویژه شبیه‌سازی رسوب آسفالتین در مخزن است. این مقوله در مخازن نفت نیمه‌سنگین تا سنگین که درصد همراه آسفالتین بالا می‌باشد، بنابر ناهمگونی و خواص ضعیف مخزنی می‌تواند در مخزن و نواحی اطراف چاه مشکل‌زا باشد. اما در مخازن نفتی سبک که میزان درصد جزء آسفالتین پایین می‌باشد عمدتاً مشکل رسوب آسفالتین در دیواره چاه و به صورت ذرات ریزدانه ظاهر می‌گردد که موجب تغییر رژیم جریانی چاه و کاهش فشار سرچاهی می‌شود.

برای رفع این چالش می‌باید در ابتدا مدل‌های ترمودینامیکی استاتیک و دینامیک نشست آسفالتین مورد بررسی دقیق قرار گیرد تا صحیح‌ترین مدل و شبیه‌ساز، برای مدل نمودن پدیده مذکور انتخاب گردد. عموماً برای مدل نمودن آسیب سازندی ناشی از نشست آسفالتین از نرم‌افزار اکلیپس استفاده می‌شود که شماتیک آن در شکل-۹ نشان داده شده است.

اما به دلیل وجود مدل‌های مختلف ترمودینامیکی، تشکیل



نتایج حاصل از اجرای پایلوت به مقیاس میدانی، زمان زیاد شبیه‌سازی ترکیبی فرایندهای ازدیاد برداشت در مقیاس تمام مخزن، تعیین الگوی تزریقی - تولیدی، شبیه‌سازی پدیده‌های جانبی تولید از جمله آسفالتین و در نهایت عدم توانایی نرم‌افزارهای موجود در شبیه‌سازی رسوب آسفالتین بر دیواره چاه و اثر نامطلوب آن در پیش‌بینی فشار سرچاهی به ترتیب از راهکارهای زیر استفاده می‌شود:

- انتخاب ناحیه مشابه از لحاظ مقادیر پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مخزن و حداقل بودن برهمکنش تولید از مخزن با منطقه پایلوت

- ساخت مدل برشی از ناحیه پایلوت، انتخاب الگوی پایلوت با توجه به اهداف پایلوت، بررسی فنی مدل‌های استاتیک (ترمودینامیکی) و دینامیک (هیدرودینامیکی) پدیده جانبی

- استفاده از شبیه‌سازهای برتر هر حوزه

- استفاده از جداول VFP برای زمان‌های مختلف و به‌روزرسانی آن در نرم‌افزار برای لحاظ کردن اثر جذب سطحی آسفالتین بر دیواره چاه

استفاده با مطالعه کامل بر روی سیالات مخزن در جهت تعیین تعداد نمونه سیالات و سنگ‌های مختلف در کل میدان - استفاده از آزمایشگاه ازدیاد برداشت با استفاده از نفت زنده و آب سازندی مخزن

- استفاده از تکنولوژی‌های مدرن آزمایشگاهی (ساخت و به‌کارگیری دستگاه‌های سیلاب‌زنی با تعداد بالای حس‌گر فشاری میانی نگهدارنده مغزه و فناوری NMR جهت دنبال نمودن جبهه حرکتی سیال)

دو چالش عمده تعمیم نتایج آزمایشگاهی به مدل‌سازی عبارت‌اند از تعیین پارامترهای غیرمستقیم از آزمایش‌های ازدیاد برداشت و تعمیم‌پذیری آنها به مقیاس درشت‌دانه سلول‌های شبیه‌سازی. برای مواجهه با این چالش‌ها به ترتیب از شبیه‌سازی در مقیاس مغزه و در محیط مجازی (نرم‌افزارهای شبیه‌سازی کامپیوتری) و توابع شبه‌جریانی یا انطباق تاریخچه استفاده می‌شود.

در بخش شبیه‌سازی مرتبط با طراحی پایلوت ازدیاد برداشت برای مواجهه با چالش‌های انتخاب منطقه پایلوت جهت تسری

#### پانویس‌ها

- |                                 |                                    |                                     |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Principal Component Analysis | 9. Fine to Coarse Grid             | 17. Solid Model                     |
| 2. Fluids Preservation          | 10. Pore Volume Weighted (PVW)     | 18. Polymer Model                   |
| 3. SCAL                         | 11. Transmissibility Weighted (TW) | 19. HPHT Filtration Test            |
| 4. Component Grouping           | 12. Peclet number                  | 20. Tubing Head Pressure (THP)      |
| 5. Power law                    | 13. Mobility ratio                 | 21. Hold Up Factor                  |
| 6. Pseudo Functions             | 14. Sector Model                   | 22. Friction Factor                 |
| 7. Fractional Flow              | 15. Flow Assurance Studies         | 23. Vertical Flow Performance (VFP) |
| 8. Numerical Dispersion         | 16. Liquid Model                   |                                     |

#### منابع

- [1] Section 3: Oil data: Upstream, OPEC Annual Statistical Bulletin, 2016
- [2] [www.slb.com/labs](http://www.slb.com/labs)
- [3] <http://dcitestsystems.com/core-analysis/core-flood-systems/>
- [4] EOR Brochure, Hydrocarbon Recovery Optimization, Shell Global Solutions International B.V. Kessler Park 1, 2288 GS Rijswijk, the Netherlands, April 2016
- [5] <http://www.ptslabs.com/advanced-properties>
- [6] Edo Boek, Ali Fadili, Michael John Williams, Johan Padding; Prediction of Asphaltene Deposition in Porous Media by Systematic Upscaling from a Colloidal Pore Scale Model to a Deep Bed Filtration Model, SPE 147539, SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver, Colorado, USA, 30 October-2 November 2011
- [7] Amir Fayazi, Hadi Bagherzadeh, Abbas Shahrabadi; Estimation of Pseudo Relative Permeability Curves for a Heterogeneous Reservoir with a New Automatic History Matching Algorithm, Journal of Petroleum Science and Engineering, January 2016, DOI: 10.1016/j.petrol.2016.01.013
- [8] SimaJonoud · Matthew D. Jackson, New criteria for the validity of steady-state upscaling, Transp Porous Med (2008) 71:53-73, DOI 10.1007/s11242-007-9111-x
- [9] Shashank Sharma, Davood Kamal, and Eisa Al-Maraghi; Miscible Gas EOR Pilot Design Decisions Driven by Linking EOR Performance Parameter to Uncertainties- A Kuwait Field Example, SPE-179831, SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Muscat, Oman, 21-23