

## چالش‌های مدل‌سازی پدیده‌های نزدیک بحرانی در تزریق دی‌اکسید کربن

مریم خسروی\* • پژوهشکده‌ی ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

مصطفی علیزاده<sup>۱</sup> • دانشگاه تهران

### چکیده

سال‌هاست که مدل‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل مخزن با استفاده از شبیه‌سازهای مختلف صنعتی و غیرصنعتی بررسی و مطالعه می‌شود. این شبیه‌سازها بسته به شرایط ترمودینامیکی سیالات، نوع محیط متخلخل و پدیده‌ی مورد مطالعه، ممکن است ضعیف یا قدرتمند ظاهر شوند. در این میان تسلط محقق بر معادلات حاکم و نقاط ضعف و قوت ابزار شبیه‌سازی خود بسیار حائز اهمیت است؛ چراکه محقق باید هنگام مدل‌سازی به تمامی فرضیات و منابع خطای مؤثر بر نتایج، اشراف کامل داشته باشد.

مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهند که در حین تزریق دی‌اکسید کربن در فشار نزدیک بحرانی (نزدیک امتزاجی) پدیده‌های نزدیک بحرانی (از جمله ترشوندگی نزدیک بحرانی و جریان مارانگونی) تأثیر به‌سزایی بر مقدار بازیافت نفت دارند. در این مقاله برخی نقاط ضعف شبیه‌سازها در مدل‌سازی این پدیده‌ها نشان داده می‌شود. در شرایطی که مارانگونی بازیافت را تا حدود ۳۵ درصد افزایش داده نتایج شبیه‌سازی هیچگونه تأثیری از آن نمی‌پذیرد. همچنین ترشوندگی نزدیک بحرانی در آزمایشگاه سبب می‌شود بازیافت نفت در شرایط نزدیک بحرانی بیش از شرایط غیرامتزاجی و حتی امتزاجی تک‌تماسه شود. در حالی که مدل‌سازی تزریق امتزاجی تک‌تماسه، به کسب بیشترین ضریب بازیافت از مغزه منتج می‌گردد. در این مطالعه ضمن معرفی دو پدیده‌ی مذکور، چالش‌ها و دلایل بروز خطاهای شبیه‌سازی آنها نیز مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

### اطلاعات مقاله

\* در بافت:

۹۳/۱۲/۲۲

\* ارسال برای داوری:

۹۴/۱/۲۹

\* پذیرش:

۹۴/۹/۱۶

### واژگان کلیدی

شبیه‌سازی  
تزریق دی‌اکسید کربن  
شکاف/ماتریس  
ترشوندگی نزدیک بحرانی  
مارانگونی  
نزدیک امتزاجی

### مقدمه

و گاز مجازی قرار می‌گیرند. اما کماکان ضعف در توصیف صحیح میان‌رویه، مشکلات فراوانی در مدل‌سازی پدیده‌های سطحی مختلف ایجاد می‌کند که از آن جمله می‌توان به جریان مارانگونی و ترشوندگی بحرانی اشاره کرد.

### ۱- مارانگونی

از جمله مکانیسم‌های مؤثر بر جریان سیال، پدیده‌ی مارانگونی است که در مهندسی نفت به اشتباه بیشتر در قالب نیروهای موئینه بررسی شده است. نخستین بار وبر<sup>۴</sup> در ۱۸۵۴ مارانگونی را مطالعه کرد [۱] و بعدها در ۱۸۶۵ مارانگونی<sup>۵</sup> آنرا در قالبی مشخص معرفی نمود [۲]؛ وی اظهار داشت هنگامی که در میان‌رویه‌ی فازهای مجاور، در اثر گرادیان غلظت، دما یا الکتریسیته، گرادیان تنش میان‌رویه وجود داشته باشد جریانی از نقاط با تنش میان‌رویه‌ی کم به سمت نقاط با تنش میان‌رویه‌ی زیاد ایجاد می‌شود.

در ۲۰۱۴ خسروی و همکاران تأثیر شگرف مارانگونی را بر تزریق دی‌اکسید کربن اثبات کردند و گزارش دادند که در تزریق نزدیک به

در اکثر نرم‌افزارهای تجاری، جریان سیالات در محیط متخلخل از طریق ترکیب معادلات پیوستگی<sup>۲</sup> و دارسی توصیف می‌شود. موازنه‌ی جرم برای هر جزء در هر سل جداگانه بررسی می‌شود. سپس این معادلات در کنار معادلات کمکی (نظیر تعریف فشار موئینی و اشباع سیالات) و با استفاده از شرایط اولیه‌ی مسأله و شرایط مرزی به صورت عددی حل می‌شوند؛ در حالی که اغلب شرایط مرزی روی مرزهای فیزیکی و ثابت مسأله تعریف خواهند شد.

در این نوع نگاه خاص به محیط متخلخل، میان‌رویه‌ی<sup>۳</sup> دو فاز، تعریف مشخصی ندارد. در هر سل تعادل ترمودینامیکی، مستقل از سل‌های اطراف حل می‌شود. این امر مشکلات فراوانی در مدل‌سازی نفوذ مولکولی ایجاد می‌کند؛ چراکه در واقعیت باید دو فاز در میان‌رویه به تعادل برسند و اجزاء از میان‌رویه به داخل هر فاز نفوذ کنند. شرکت شلمبرجر در این مورد خاص برای فرار از مشکل مذکور در ۲۰۱۴ از روشی ریاضی استفاده کرده است. بدین ترتیب که با توجه به شرایط دمایی و فشاری، دو فاز مجازی نفت و گاز تعادلی تعریف می‌شوند و نفت و گاز واقعی به‌جای تعامل مستقیم با یکدیگر در تعامل با نفت

\*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (khosravi.inbox@gmail.com)

فیلمی پیوسته روی سنگ پخش شده و نرخ تخلیه‌ی ثقیلی در زمان‌های آغازین آزمایش‌ها افزایش یابد. در همان سال خسروی و همکاران اثبات کردند که ترشوندگی نزدیک بحرانی در تزریق دی‌اکسید کربن در ماتریس نیز اتفاق می‌افتد؛ اما منجر به تغییر الگوی کلی تولید (کسب پیشینه‌ی نفت در فشار بیش از MMP) نمی‌شود. این ویژگی سبب می‌شود به‌ویژه در مخازنی که ناهمگنی سنگ مخزن زیاد است تزریق نزدیک بحرانی (نزدیک امتزاجی) بسیار مؤثرتر از تزریق امتزاجی عمل کند؛ در حالی که هزینه‌های فشرده‌سازی یا غنی‌سازی آن بسیار کمتر است.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و روش‌ها

در آزمایش‌های انجام شده در آزمایشگاه به‌منظور ساده‌سازی تحلیل پدیده‌ها، آزمایش‌های پایه بر اساس استفاده از دی‌اکسید کربن و دکان خالص طراحی شده‌اند. در همین راستا باید بر اساس خواص فیزیکی دکان و دی‌اکسید کربن، مدل مورد اعتمادی جهت پیش‌بینی رفتار فازی سیالات در شرایط مختلف تهیه شود تا در مرحله‌ی طراحی آزمایش‌ها و تحلیل نتایج مورد استفاده قرار گیرد. همچنین جهت ثابت ماندن نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی (با استفاده از نرم‌افزار PVTi)، نمودارهای P-T و محل قرارگیری نقاط بحرانی مخلوط دی‌اکسید کربن و دکان در حین منطبق‌سازی، از گزارش‌های آزمایشگاهی موجود درباره‌ی

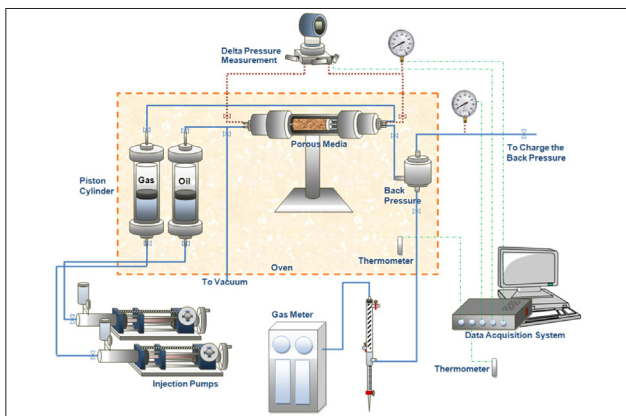
امتزاجی‌ای که هنوز سطح تماسی بین نفت و گاز وجود دارد و گرادیان تنش میان‌رویه نسبت به بزرگی تنش میان‌رویه زیاد است، مارانگونی نمود بیشتری دارد تا در تزریق امتزاجی‌ای که در آن سطح تماس از بین می‌رود یا تزریق غیرامتزاجی‌ای که نفت حالت یکپارچه‌ی خود را از دست می‌دهد و نسبت گرادیان تنش سطحی به مقدار آن بسیار کم است. آنها همچنین با استفاده از روش‌های تحلیلی نشان دادند که در شرایط نزدیک امتزاجی تغییرات تنش میان‌رویه به نسبت غلظت دی‌اکسید کربن در فاز مایع بسیار شدید است و بنابراین اعداد مارانگونی محاسبه شده در این رژیم بسیار بزرگ هستند. نتایج آزمایشگاهی آنها نیز وجود جریان‌های قوی مارانگونی را در شرایط نزدیک بحرانی اثبات می‌کند؛ به‌صورتی که در این رژیم، بازیافت نفت تا حدود ۳۵ درصد افزایش می‌یابد [۳].

تا کنون در شبیه‌سازی‌های تجاری، مارانگونی با تعریف خاص آن در میان‌رویه مدل‌سازی نشده است. جهت مدل‌سازی جریانات ناشی از مارانگونی در سیستم‌های غیرمتخلخل مطالعات متعددی انجام شده است. از جمله این مطالعات می‌توان به کار استرلینگ<sup>۴</sup> اشاره کرد [۴]. وی معادلات نویر-استوکس دوبعدی را با معادلات نفوذ مولکولی در میان‌رویه کوپل کرد و شرایط مرزی مسأله را با موازنه‌ی تنش‌های برشی در میان‌رویه تعریف نمود.

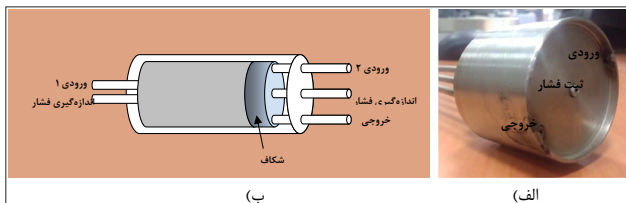
### ۲- ترشوندگی نزدیک بحرانی

کان<sup>۵</sup> در ۱۹۷۷ نظریه‌ی ترشوندگی نزدیک بحرانی را چنین عنوان می‌کند که وقتی دو فاز در شرایط نزدیک بحرانی و در مجاورت فاز سوم قرار دارند یکی از آن دو روی فاز سوم پخش شده و آن را تر می‌کند [۵]. ضخامت فیلم تشکیل شده بسیار کم است و با کاهش تنش میان‌رویه، به‌سرعت تا حد چند مولکول کاهش می‌یابد. با افزایش سطح تماس دو فاز پدیده‌های سطحی بسیار مهم می‌شوند. این پدیده در رسیدن به شرایط نزدیک امتزاجی از طریق افزایش فشار یا تغییر درصد ترکیب اجزاء نیز اتفاق می‌افتد.

در ۲۰۱۴ خسروی و همکاران از مطالعه‌ی آزمایشگاهی و تحلیل تزریق دی‌اکسید کربن در فشارهای مختلف در یک سیستم ماتریس/شکاف نشان دادند که بیشترین میزان بازیافت نفت در فشار نزدیک امتزاجی اتفاق می‌افتد. آنها توضیح دادند که در تزریق دی‌اکسید کربن در شکاف، تبخیر و تورم دو عامل اصلی تولید نفت هستند [۶]. در شرایط نزدیک بحرانی، ترشوندگی نزدیک بحرانی از طرفی سبب افزایش سطح تماس فاز نفت و گاز شده و نرخ تبخیر نفت را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر سبب تسریع حل شدن دی‌اکسید کربن در نفت و در نتیجه تورم آن می‌گردد. همچنین ترشوندگی نزدیک بحرانی سبب می‌شود فاز نفت به‌صورت



شکل ۱ | نمای تجهیزات آزمایشگاهی تزریق دی‌اکسید کربن در ماتریس یا شکاف



شکل ۲ | درپوش مغزه‌ی نگهدار:

(الف) درپوش متداول (ب) درپوش لازم جهت مدل‌سازی شکاف

شامل ۱۵ آزمایش جداگانه جهت انجام در آزمایشگاه تعریف شد:

- تزریق دی اکسید کربن در مغزه‌ی اشباع از دکان
- تزریق دی اکسید کربن در شکاف مجاور ماتریس اشباع از دکان
- تزریق دی اکسید کربن در شکاف مجاور اشباع از ترکیب دکان و پروپان (جدول-۱)

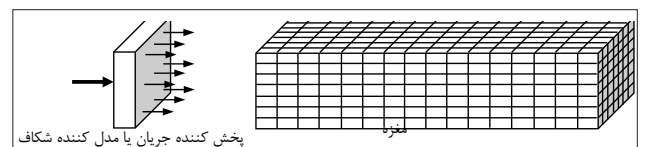
در آنالیزهای شبیه‌سازی از نتایج سری نخست جهت تخمین تراوایی نسبی سیالات در مغزه استفاده می‌شود. در سری دوم آزمایش‌ها، تراوایی نسبی حساب شده از سری نخست استفاده می‌گردد تا مقدار بازیافت از ماتریس در فشارهای مختلف پیش‌بینی شده و از تفاوت پیش‌بینی مدل و مقادیر آزمایشگاهی اثر ترشوندگی نزدیک بحرانی تحقیق به دست آید. در این دو سری آزمایش درجه‌ی آزادی ترمودینامیکی سیستم سیالات صفر است. بنابراین در طول یک آزمایش، تنش میان‌رویه در تمامی نقاط سنگ ثابت و یکتا باقی می‌ماند و امکان وقوع پدیده‌ی مارانگونی وجود ندارد. در سری سوم آزمایش‌ها درجه‌ی آزادی ترمودینامیکی سیستم سیالات یک است و نقاط مختلف ماتریس، مقادیر مختلف تنش میان‌رویه را تجربه می‌کنند. بنابراین نتایج این آزمایش‌ها متأثر از اثر مارانگونی است که تفاوت داده‌های آزمایشگاهی سری دوم و سوم مؤید این امر خواهد بود. اگر مدل سیالات سری دوم از دکان/دی اکسید کربن به دکان/پروپان/دی اکسید کربن تبدیل شود انتظار می‌رود نتایج آزمایشگاهی سری سوم تأیید گردند. از تفاوت این مدل و نتایج سری سوم، توانایی شبیه‌سازها در مدل‌سازی مارانگونی بررسی می‌شود.

مغزه‌ی استفاده شده در این آزمایش‌ها از یک سنگ ماسه‌ای رخنمون به دست آمده تا ضمن مقاومت بیشتر در برابر دی اکسید کربن که سبب استهلاک کمتر سنگ می‌شود، تخلخل و تراوایی آن نیز بیشتر باشد. تراوایی این سنگ ۱۷۶ میلی دارسی، تخلخل آن حدود ۱۷ درصد و مجموع حجم تخلخل هیدروکربنی آن حدود ۱۵/۵ سی سی است؛ در حالی که قطر و طول مغزه به ترتیب ۳/۸ و ۸ سانتی متر است. شکل ۱- نمای تجهیزات مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. مغزه‌ی نگهدار<sup>۱۰</sup>، دستگاه تثبیت فشار<sup>۱۱</sup> (BPR) و سل‌های انتقال<sup>۱۲</sup> سیالات داخل آون قرار گرفته‌اند. سیالات با استفاده از پمپ، با نرخ ثابت ۱۰ سی سی در ساعت به سنگ یا شکاف تزریق می‌شوند؛ در حالی که BPR در خروجی، فشار را ثابت نگه می‌دارد. سیالات تولید شده به جداکننده هدایت می‌شوند و مایع و گاز تولیدی به ترتیب در بورت مدرج و دستگاه جمع‌آوری گاز<sup>۱۳</sup> جمع می‌گردند. بالای بورت مدرج، یک مبرد نصب شده تا از ورود بخارات دکان به دستگاه جمع‌آوری گاز جلوگیری شود.

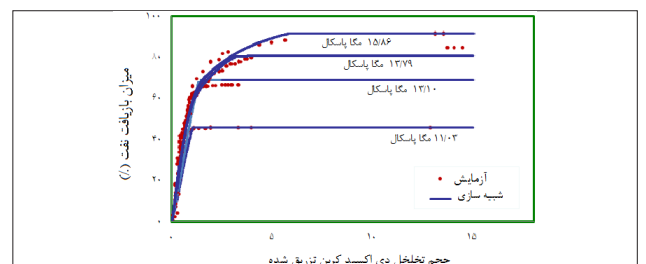
داده‌هایی نظیر فشار شکاف، فشار BPR، اختلاف فشار دو سر مغزه (DP)<sup>۱۴</sup> و دمای داخل و خارج آون توسط یک سیستم ثبت داده<sup>۱۵</sup> ذخیره

نقاط بحرانی ترکیب دی اکسید کربن و دکان استفاده شد. بر اساس دماهای گزارش شده از مخازن ایران و با در نظر گرفتن محدودیت‌های آزمایشگاهی و رفتار فازی دکان و دی اکسید کربن، دمای آزمایش‌ها ۸۰ درجه‌ی سانتی گراد در نظر گرفته شد. پس از آماده‌سازی مدل شبیه‌سازی، جهت تشخیص رژیم‌های امتزاجی ضروری است پیش‌بینی صحیحی از تغییرات تنش میان‌رویه (IFT) با فشار در دست داشت. در این مطالعه با استفاده از مدل پاراکور و چگالی‌های منطبق شده با مقادیر آزمایشگاهی، IFT محاسبه می‌شود. سپس پیش‌بینی شبیه‌ساز از تغییرات IFT با نتایج آزمایشگاهی که قبلاً توسط جورجیادیس<sup>۱۶</sup> ارائه شده بود [۷] مقایسه می‌گردد. برای مطالعه‌ی پدیده‌ی مارانگونی، باید درجه‌ی آزادی سیستم نفتی حداقل یک باشد تا امکان تغییر IFT وجود داشته باشد. برای افزایش درجه‌ی آزادی، در ادامه‌ی آزمایش‌ها، یک جزء نفتی دیگر به دکان اضافه می‌شود. در آزمایش‌های شکاف، غلظت کلی دی اکسید کربن در نزدیکی شکاف زیاد است و با دور شدن از شکاف و رفتن به سمت قسمت‌های داخلی ماتریس غلظت کلی دی اکسید کربن کمتر می‌شود. بنابراین IFT در مسیر اصلی (شکاف) کمتر خواهد بود. با اضافه کردن کمی پروپان به دکان، با افزایش غلظت کلی دی اکسید کربن، IFT افزایش می‌یابد و در نتیجه IFT در مسیر اصلی بیشتر خواهد بود. بر این اساس انتظار می‌رود جریان مارانگونی میان‌رویه، نفت و گاز را به سمت شکاف هدایت کند.

نتایج بررسی رفتار فازی دو نفت دکان خالص و دکان ترکیب شده با پروپان نشان می‌دهد که خواص مختلف آنها از جمله تغییرات چگالی، گرانشی، تورم و فشار بحرانی تقریباً با هم برابرند و بنابراین نتایج آزمایش‌های متناظر آنها قابل قیاس است. بر این اساس سه دسته آزمایش



شکل ۳ | مدل طراحی شده در E300 شامل ۱۶×۷×۷ سل برای شبیه‌سازی مغزه و ۷×۷ سل برای شبیه‌سازی شکاف یا پخش‌کننده‌ی تزریق



شکل ۴ | تطابق نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در آزمایش‌های تزریق دی اکسید کربن در مغزه



می‌شوند. پمپ‌های تزریقی که به سیستم ثبت و ضبط اطلاعات مجهزند نیز زمان، فشار و میزان تزریق را ذخیره می‌کنند. در این طراحی جهت مدل‌سازی شکاف، فضایی خالی به ضخامت ۳ میلی‌متر در داخل درپوش مغزه‌ی نگهدار در نظر گرفته شده (شکل ۲-۳ الف) که در قسمت بالای آن یک ورودی برای تزریق سیال وجود دارد. جهت جلوگیری از خروج سیالات به سمت ماتریس، در حین تزریق گاز به فضای شکاف، مانعی فلزی برای روی این ورودی طراحی شده تا سیالات را به درون شکاف هدایت کند. خروجی دیگری در پایین این فضا به عنوان خروجی و یکی در بخش میانی به منظور اندازه‌گیری فشار ساخته شده است. در این طرح، سیالات قابلیت تزریق به ماتریس یا شکاف را به ترتیب از طریق ورودی یک یا دو دارند. جهت اشباع سنگ، نفت از ورودی یک به مغزه تزریق می‌شود و در حالی که ورودی دو بسته است از خروجی خارج می‌شود. در طول تزریق دی‌اکسید کربن، ورودی یک بسته شده، گاز از ورودی دو وارد فضای شکاف می‌گردد، از کنار سنگ عبور کرده و از خروجی تولید می‌شود.

#### ۵- بحث و بررسی

ابتدا داده‌های واقعی نمودارهای تراوایی نسبی و فشار موئینگی در طول تزریق دی‌اکسید کربن در مخزنی ماسه‌ای، مبنای تولید نمودارهای لازم در مدل‌های مختلف قرار گرفته‌اند. با توجه به تفاوت مقدار نفت باقیمانده در آزمایش‌های مختلف، ضروری است بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مقدار نقاط انتهایی در نمودارها بهینه شوند. از مهم‌ترین متغیرها در فرآیند منطبق‌سازی مدل با نتایج آزمایشگاهی، مقادیر فشار موئینگی و به‌ویژه حد آستانه‌ی آن است. تعریف فشار موئینگی در مدل باعث می‌شود در گذر از فاز نفت به فاز گاز، طیفی از اشباع نفت دیده شود. در شرایطی که فشار موئینگی صفر است ناحیه‌ی گذرا وجود ندارد و تغییرات اشباع نفت صفر و یک خواهد بود. با افزایش فشار موئینگی در اشباع نفت باقیمانده، مقدار نفت تولیدی در انتهای شبیه‌سازی کمتر خواهد شد و منحنی ضریب بازیافت بر حسب زمان یا حجم گاز تزریقی زاویه‌دارتر شده و در نقطه‌ی میان‌شکنی شکستگی دیده می‌شود.

هنگام شبیه‌سازی تزریق گاز در شبیه‌سازهای صنعتی، اشباع نفت باقیمانده پشت جبهه‌ی گاز صفر می‌شود. در واقع در این قسمت‌ها محاسبات تبخیر ناگهانی در هر بازه‌ی زمانی مستقل از محاسبات جریان سیال حل می‌شوند و بنابراین بخش اعظم نفت موجود در سل تبخیر می‌گردد. روش‌های مختلفی برای عبور از این مشکل یا حل آن پیشنهاد شده که از جمله‌ی آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

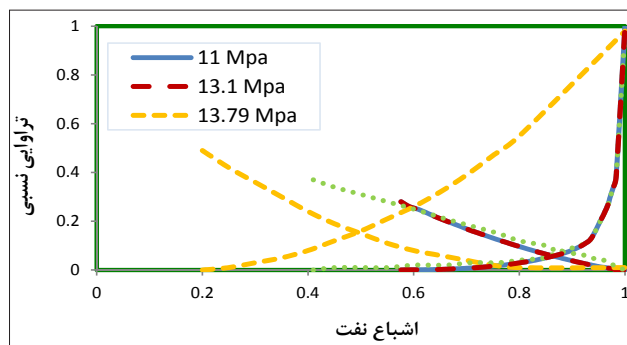
■ افزودن جزئی بسیار سنگین به نفت که سبب عوض شدن رفتار فازی نفت می‌گردد.

■ کاهش تخلخل مؤثر تا بخشی از نفت اصلاً تولید نشود. این روش تنها در مدل‌های فشار ثابت مؤثر است.

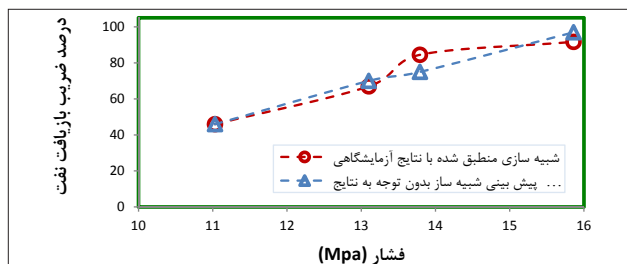
می‌شوند. پمپ‌های تزریقی که به سیستم ثبت و ضبط اطلاعات مجهزند نیز زمان، فشار و میزان تزریق را ذخیره می‌کنند. در این طراحی جهت مدل‌سازی شکاف، فضایی خالی به ضخامت ۳ میلی‌متر در داخل درپوش مغزه‌ی نگهدار در نظر گرفته شده (شکل ۲-۳ الف) که در قسمت بالای آن یک ورودی برای تزریق سیال وجود دارد. جهت جلوگیری از خروج سیالات به سمت ماتریس، در حین تزریق گاز به فضای شکاف، مانعی فلزی برای روی این ورودی طراحی شده تا سیالات را به درون شکاف هدایت کند. خروجی دیگری در پایین این فضا به عنوان خروجی و یکی در بخش میانی به منظور اندازه‌گیری فشار ساخته شده است. در این طرح، سیالات قابلیت تزریق به ماتریس یا شکاف را به ترتیب از طریق ورودی یک یا دو دارند. جهت اشباع سنگ، نفت از ورودی یک به مغزه تزریق می‌شود و در حالی که ورودی دو بسته است از خروجی خارج می‌شود. در طول تزریق دی‌اکسید کربن، ورودی یک بسته شده، گاز از ورودی دو وارد فضای شکاف می‌گردد، از کنار سنگ عبور کرده و از خروجی تولید می‌شود.

#### ۴- مدل شبیه‌سازی

با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار E300 در مدل‌سازی مغزه‌ی



شکل ۵ | تغییرات نمودارهای تراوایی نسبی نفت و گاز بر حسب اشباع نفت با تغییر فشار در آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن در مغزه



شکل ۶ | مقایسه‌ی عملکرد شبیه‌ساز به‌صورت وابسته یا تابع نتایج آزمایشگاهی (آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن در مغزه؛ سیستم دوجزئی)

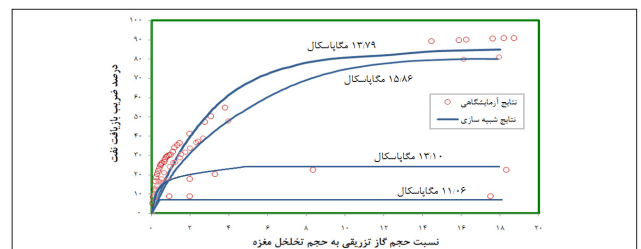
با بررسی نمودارهای تراوایی نسبی استفاده شده و مقایسه آنها روی یک نمودار (شکل-۵) معلوم می‌شود که برای تطابق نتایج آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها لازم است در آزمایش ۱۳/۷۹ مگاپاسکال نمودارهای تراوایی نسبی تا حد قابل ملاحظه‌ای به نمودارهای ضربدری نزدیک شوند. در حالی که در آزمایش ۱۵/۸۶ مگاپاسکال تنها باید نقاط انتهایی تغییر کنند (آن هم نه به اندازه‌ی آزمایش ۱۳/۷۹ مگاپاسکال). این مسأله نشان‌دهنده‌ی آنست که در آزمایش ۱۳/۷۹ مگاپاسکال اتفاقی می‌افتد که سبب می‌شود تولید بسیار بیشتر از حد مورد انتظار باشد. با در نظر گرفتن شواهد موجود، ضربدری شدن نمودارها در فشار نزدیک بحرانی را می‌توان ناشی از ترشوندگی نزدیک بحرانی دانست. این در حالی است که تنها از نتایج آزمایش مغزه نمی‌توان وقوع این پدیده را استنتاج کرد و بدین ترتیب با استفاده‌ی صحیح از ابزار شبیه‌ساز، وجود پدیده‌ی فعال اثبات می‌گردد.

از طرفی اگر بر اساس مدل منطبق شده‌ی آزمایش ۱۱ مگاپاسکال، نتایج سایر آزمایش‌های دوجزئی مغزه با استفاده از نمودارهای وابسته‌ی IFT پیش‌بینی شوند درصد بازیافت نفت مطابق شکل ۶- تغییر می‌کند. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد نرم‌افزار به‌صورت خودکار اثر

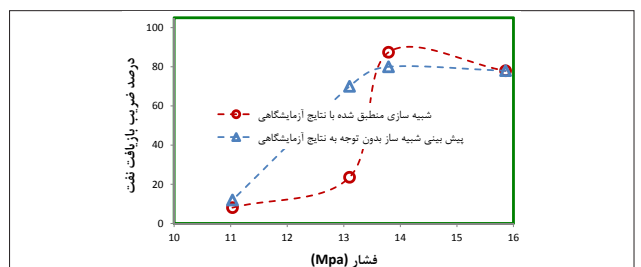
حذف درصد مشخصی از نفت تولیدی، به‌عنوان  $S_{om}$  و با استفاده از فاکتور آلفا. بدین ترتیب نفت موجود به دو دسته با ترکیب درصدی یکسان تقسیم می‌شود و به دسته‌ای که قرار نیست تولید شود آلفا یا ضریب عبوردهی<sup>۱۶</sup> صفر تعلق می‌گیرد.

تعریف قسمت غیرمتحرک به‌عنوان بخشی مجزا که ارتباط آن با بقیه‌ی مخزن شبیه سیستم‌های شکاف دار dual pore-dual perm، از طریق بزرگی مقدار ضریب انتقال<sup>۱۷</sup> کنترل می‌شود. این روش شبیه‌سازی را پیچیده‌تر می‌کند.

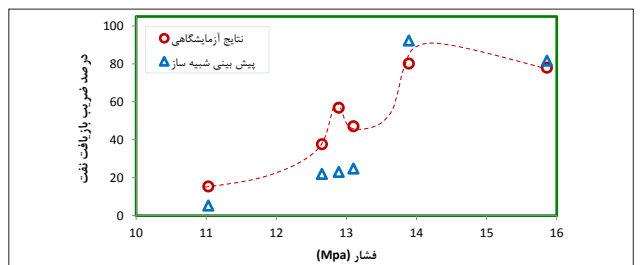
در این مطالعه سعی شده با کنترل فشار موئینگی و تراوایی نسبی و نیز کنترل ارتباط چاه با سل‌های مجاور آن، مقدار نفت در تماس با گاز و در نتیجه نحوه‌ی تولید نفت و مقدار اشباع باقیمانده‌ی آن تنظیم گردد. شکل ۴- نتایج آزمایشگاهی و مدل شبیه‌سازی را برای سری اول آزمایش‌ها نشان می‌دهد.



شکل ۷ | نتایج تطابق نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی در آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن در مغزه



شکل ۸ | مقایسه عملکرد شبیه‌ساز به‌صورت وابسته یا تابع نتایج آزمایشگاهی (آزمایش‌های تزریق دی‌اکسید کربن در مغزه؛ سیستم دوجزئی)



شکل ۹ | مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی آزمایش سه‌جزئی تزریق دی‌اکسید کربن در شکاف ( $CO_2/C_3/C_{10}$ )

نوع تزریق	تعداد اجزاء	اجزای نفت	شماره‌ی آزمایش	فشار (مگاپاسکال)	بازیافت نهایی (%)
۱۰۰٪ دکان	۱	۱	۱	۱۱/۰۳	۴۶/۰۴
	۲	۲	۲	۱۳/۱۰	۶۶/۹۷
	۳	۳	۳	۱۳/۷۹	۸۴/۴۸
	۴	۴	۴	۱۵/۸۶	۹۱/۷۰
۱۰۰٪ دکان	۵	۵	۵	۱۱/۰۳	۸/۰۹
	۶	۶	۶	۱۳/۱	۲۳/۵۹
	۷	۷	۷	۱۴/۰۲	۸۷/۴۲
	۸	۸	۸	۱۵/۸۶	۷۷/۹۹
۸۰٪ دکان ۲۰٪ پروپان	۹	۹	۹	۱۱/۰۳	۱۵/۳۹
	۱۰	۱۰	۱۰	۱۲/۶۵	۳۷/۶۵
	۱۱	۱۱	۱۱	۱۲/۸۹	۵۶/۹۰
	۱۲	۱۲	۱۲	۱۳/۱	۴۷/۱۵
	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳/۶۵	۵۴/۵۰
	۱۴	۱۴	۱۴	۱۳/۸۹	۸۰/۲۰
	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵/۸۶	۷۸/۰۰



نیست و نرم‌افزار نمی‌تواند آنرا شبیه‌سازی کند به نام ترشوندگی بحرانی، به تولید در این فشار کمک می‌کند. در این بخش مدل‌های شکاف منطبق شده در قسمت قبل مبنای کار قرار می‌گیرند و همان مدل‌ها در شرایطی اجرا می‌شوند که نفت اولیه ترکیبی دوجزئی دارد.

در شکل ۹- نتایج پیش‌بینی شبیه‌ساز برای ترکیب دکان و پروپان خلاصه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر رفتار فازی نفت و افزایش تعداد اجزاء، شبیه‌ساز نمی‌تواند ازدیاد برداشت ناشی از مارانگونی را پیش‌بینی کند و در نتیجه عدم مدل‌سازی صحیح جبهه‌ی گاز می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های نادرست و دور از واقع گردد. در این آزمایش‌ها، این نقیصه سبب شده حدود ۳۵ درصد خطا در پیش‌بینی شبیه‌ساز بوجود آید.

#### نتیجه‌گیری

شبیه‌سازها برای مدل‌سازی میان‌رویه، مشکلاتی جدی دارند که ممکن است منجر به بروز خطاهای بسیار قابل‌تأمل در نتایج گردد. مثلاً در مدل‌سازی جریان مارانگونی، لازم است بجای حل ترمودینامیکی تعادل در هر سل، شرایط مرزی مسأله روی میان‌رویه تعریف شده و برآیند تنش‌های برشی در آن بررسی شود. در ترشوندگی نزدیک بحرانی، افزایش ناگهانی سطح تماس فازها و تبعات آن مانند افزایش تبخیر، تورم و افزایش پدیده‌های سطحی در نتایج شبیه‌سازی دیده نمی‌شوند. بنابراین در استفاده از شبیه‌ساز ضروری است با علم به پدیده‌های فعال، از امکانات نرم‌افزارها به‌درستی استفاده کرد. ■

ترشوندگی بحرانی را پیش‌بینی نمی‌کند اما می‌توان با تغییر مناسب نمودار تراوایی نسبی نتایجی منطقی به‌دست آورد.

نتایج نشان می‌دهند که نمودارهای تراوایی حاصل از آزمایش‌های مغزه، ترشوندگی نزدیک بحرانی و بیشینه‌ی نسبی در فشار نزدیک بحرانی را مدل‌سازی می‌کنند و این مطلب بار دیگر وقوع پدیده‌ی ترشوندگی نزدیک بحرانی در آزمایش‌های مغزه را تصدیق می‌کند. از طرفی اگر بر اساس مدل منطبق‌شده‌ی آزمایش ۱۵/۸۶ مگاپاسکال و با استفاده از دسته نمودارهای نسبی پیشنهادی نرم‌افزار، نتایج سایر آزمایش‌های دوجزئی شکاف پیش‌بینی شوند، ملاحظه می‌گردد که در فشار کمتر از فشار بحرانی، با افزایش فشار، درصد بازیافت نفت افزایش می‌یابد اما در فشار فوق بحرانی، با افزایش فشار، بازیافت به مقدار جزئی کاهش می‌یابد (شکل ۸-) و شبیه‌ساز، بیشینه‌ی نسبی را در فشار نزدیک بحرانی پیش‌بینی می‌کند. اما این مقدار حدود ۸ درصد کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است.

آنچه شبیه‌ساز در فشار نزدیک بحرانی پیش‌بینی کرده تنها برآیند نیروهای ثقلی و ویسکوز بوده است. اما در آزمایشگاه پدیده‌ی ترشوندگی بحرانی نیز وجود دارد. همچنین نرخ تخلیه در فشارهای کمتر از فشار بحرانی ثابت و برابر است و تنها در فشار فوق بحرانی کمی از آن کاسته می‌شود. این در حالی است که در طول آزمایش‌هایی که در آزمایشگاه انجام می‌شود نرخ تخلیه در فشار نزدیک بحرانی به طرز قابل‌توجهی بیش از سایر فشارهاست.

بنابراین پدیده‌ی دیگری که از جنس نیروهای ثقلی، ویسکوز یا موئینه

#### پانویس‌ها

- |                           |                                   |                                |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1. m.alizadeh91@gmail.com | 7. Cahn                           | 13. Gasmeter                   |
| 2. Continuity             | 8. Georgiadisa                    | 14. Differential Pressure (DP) |
| 3. Interface              | 9. Total Hydrocarbon Pore Volume  | 15. Data Acquisition System    |
| 4. Weber                  | 10. Core holder                   | 16. Transmissibility           |
| 5. Marangoni              | 11. Back-Pressure-Regulator (BPR) | 17. Transport Coefficient      |
| 6. Sternling              | 12. Transfer-vessel               |                                |

#### منابع

- [1] Weber, E. H. Mikroskopische Beobachtungen sehr gesetzmäßiger Bewegungen, welche die Bildung von Niederschlägen harziger Körper aus Weingeist begleiten Berichte Über die Verhandlungender Königlich Schsischen Gesellschaft der Wissenschaften. Mathematisch-Physische Classe, 1854, 57. {Tarry substances precipitated from alcoholic solutions.}
- [2] Marangoni, C., Sull' espansione delle gocce di un liquido galleggiante sulla superficie di altro liquido, Fusi, Pavia 16 (1865).
- [3] Khosravi, M., Bahramian, A., Emadi, M., Rostami, B., Roayaie, Effect of Marangoni Flow on Recovery of Bypassed Oil during CO<sub>2</sub> Injection. J. of Pet. Sci. and Eng. 114 (2014) 91 -98.
- [4] Sternling, C. V., Scriven, L. E., Interfacial Turbulence, Hydrodynamic Instability and the Marangoni Effect, AIChU. 5 (1959) 514 - 523.
- [5] Cahn, J. W., Critical point wetting, J. Chem. Phys., 66 (1977) 3667-3671.
- [6] Khosravi M, Bahramian A, Emadi M, Rostami B, Roayaie E, Mechanistic investigation of bypassed-oil recovery during CO<sub>2</sub> injection in matrix and fracture, Fuel, 117 (2014) 43 - 49.
- [7] Georgiadisa, A. Llovel, F., Bismarcka, A., Blasb, F. J., Galindo, A., Maitlanda, G. C., Truslera, J.P.M., Jacksona, G., Interfacial tension measurements and modelling of (carbon dioxide + n-alkane) and (carbon dioxide + water) binary mixtures at elevated pressures and temperatures, J. of Supercritical Fluids, 55 (2010) 743 - 754.