

تخمین محدودهٔ محتمل ضریب بازیافت برای تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در محیط شکافدار با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها

تیم خسروی* پژوهشکده ازدیاد برداشت

سیدامیر میرعلینی، بهزاد رستنی، دانشگاه تهران

چکیده

شبیه‌سازی عددی جهت شناخت تأثیر عوامل مختلف بر رفتار مخزن، غالباً مستلزم صرف وقت و هزینهٔ زیاد است. طراحی آزمایش‌ها و روش سطح پاسخ به همراه شبیه‌سازی موتی-کارلو، یک چارچوب آماری مؤثر جهت بررسی اثر پارامترهای متعدد با استفاده از سناریوهای محدود شبیه‌سازی و به‌منظور تخمین دقیق محدودهٔ پاسخ فراهم می‌آورد.

در این مطالعه، از مدل شبیه‌سازی مربوط به یک آزمایش تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در یک سیستم شکافدار، برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان بازیافت نفت از مغزه استفاده شده است. چالش‌های مرتبط با مدل کردن نفوذ ملکولی در سیستم‌های شکافدار در نرم‌افزار E300 در مطالعات پیشین توضیح داده شده و شیوهٔ صحیح شبیه‌سازی این فرایند مشخص گردیده است.

در مرحلهٔ اول، مؤثرترین پارامترها بر بازیافت نفت با استفاده از حساسیت‌سنجی شناسایی می‌شود. سپس، به‌منظور اندازه‌گیری کمی میزان اهمیت هر پارامتر، از طریق طراحی آزمایش‌ها، یک سطح پاسخ با استفاده از مدل شبیه‌سازی ساخته شده محاسبه می‌گردد. برای این منظور، روش باکس-بنکن به کار گرفته شده و ضریب بازیافت به صورت یک چندجمله‌ای درجه دوم در قالب تابعی از پنج پارامتر مخزنی تخمین زده می‌شود. در نهایت، محدودهٔ عددی محتمل برای میزان بازیافت نفت با استفاده از شبیه‌سازی موتی-کارلو محاسبه می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد که مؤثرترین پارامترهای دارای تأثیر مثبت بر میزان بازیافت نفت، به ترتیب تراوایی ماتریس، قطر مغزه و ضرایب نفوذ ملکولی هستند؛ درحالی‌که تراوایی شکاف بر روی ضریب بازیافت نفت تأثیر منفی دارد. محتمل‌ترین مقدار تخمین زده شده (P50) برای میزان بازیافت از ماتریس ۷۱/۵ درصد است. همچنین مقادیر خوش‌بینانه (P10) و بدبینانه (P90) برای ضریب بازیافت، به ترتیب ۸۱/۳ و ۵۵ درصد به‌دست آمد.

واژگان کلیدی | تزریق دی اکسید کربن، شکاف، طراحی آزمایش‌ها، سطح پاسخ

مقدمه

میزان ذخایر هیدروکربنی، حساسیت‌سنجی، پیش‌بینی عملکرد مخازن و بررسی میزان عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. پنگ و گوپتا (۲۰۰۴) و پنگ و همکاران (۲۰۱۲) تعدادی از این پروژه‌ها را ذکر کرده‌اند [۳ و ۴].

از نتایج طراحی آزمایش‌ها برای تولید سطح پاسخ - یک مدل تحلیلی پیش‌بینی‌کننده (معمولاً یک چندجمله‌ای با درجهٔ پایین) برآزش شده به روش حداقل مربعات که پاسخ موردنظر را به صورت تابعی از فاکتورهای مهم ورودی توصیف می‌کند - استفاده می‌شود. این سطح پاسخ به‌دست آمده می‌تواند جهت انجام شبیه‌سازی موتی-کارلو و بررسی میزان عدم قطعیت در خروجی مدل مورد استفاده قرار گیرد.

طراحی آزمایش‌ها روشی برای انتخاب آزمایش‌ها در راستای بیشینه نمودن اطلاعات حاصله از هر آزمایش و ارزیابی آماری میزان تأثیر پارامترهای ورودی مختلف است [۱]. این روش برای اولین بار در دهه بیست میلادی توسط فیشر به‌عنوان یک روش سیستماتیک برای تشخیص رابطهٔ میان فاکتورهای مختلف (متغیرهای ورودی یا مستقل) با پاسخ موردنظر (متغیر خروجی یا وابسته) معرفی شد.

از طراحی آزمایش‌ها در شبیه‌سازی مخازن استفاده نشد تا این که "چو" در سال ۱۹۹۰ برای اولین بار از این روش جهت پیش‌بینی عملکرد بخارزنی در مخازن نفت‌سنگین بهره‌گرفت [۲]. پس از آن، این روش در صنعت نفت و گاز برای اهداف متعددی از قبیل تخمین

* نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (khosravi.inbox@gmail.com)

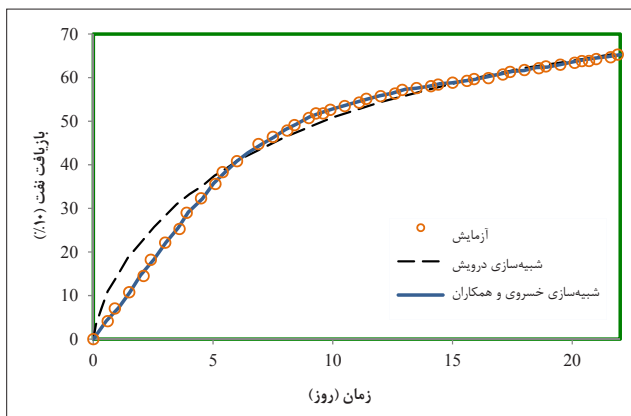


بازده بالاتری دارد.

۱- آزمایش تزریق امتزاجی دی اکسید کربن

درویش (۲۰۰۶) یک سری آزمایش‌های تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در سیستم شکافدار را در شرایط مخزن (دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳۰۰ بار) با استفاده از مغزه‌هایی به طول ۶۰ و قطر ۴/۶ سانتی‌متر انجام داد [۵]. نگهدارنده مغزه طوری طراحی شده بود که یک شکاف به عرض دو میلی‌متر مغزه را احاطه می‌کرد. تراوایی ماتریس و شکاف که به ترتیب در ابتدا با نفت زنده مخزن و گاز دی اکسید کربن اشباع شده بودند، ۴ و ۸۰ میلی‌داری اندازه‌گیری گردید. دی اکسید کربن به مدت ۲۲ روز با نرخ ۶ سانتی‌متر مکعب بر ساعت از بالای مدل به داخل صفحه شکاف بالایی تزریق می‌شد و نفت و گاز از پایین مدل تولید می‌گردید. شمای کلی مدل در شکل ۱- نشان داده شده است.

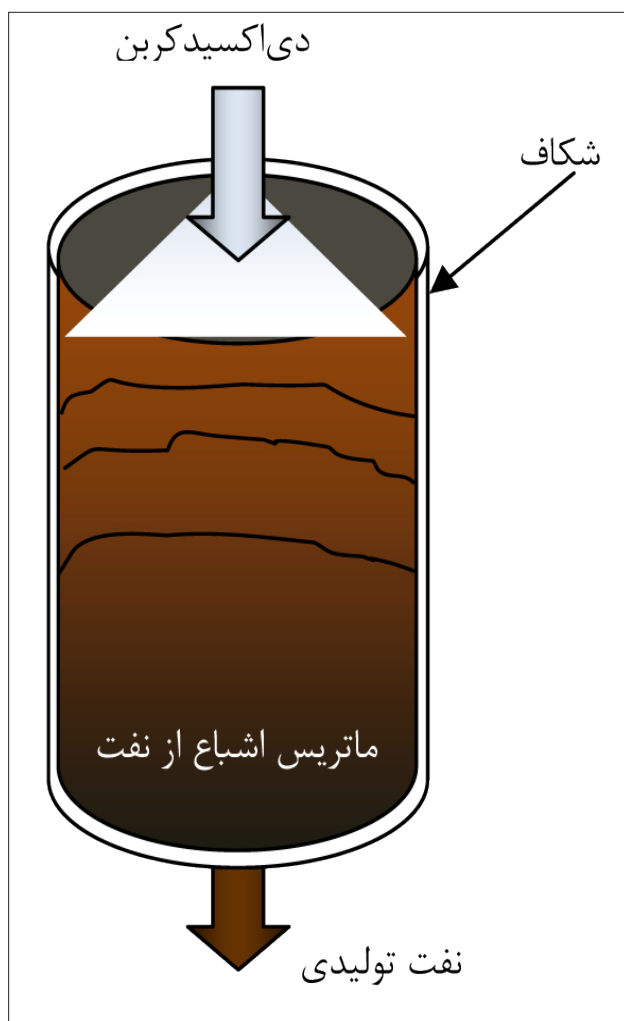
خسروی و همکاران (۲۰۱۲) مباحثی را در رابطه با چالش‌های مرتبط با مدل کردن نفوذ ملکولی در سیستم‌های شکافدار با استفاده از نرم‌افزار E300 مطرح نموده و از روش مناسبی (نفوذ ملکولی بین فازی) که در سال ۲۰۰۸ توسط شلومبرژه معرفی شده بود، برای غلبه بر این مشکلات استفاده نمودند [۶]. روش اصلاح شده سیگموند به همراه رابطه و یلکه برای محاسبه ضرایب مؤثر نفوذ ملکولی در این مدل به کار گرفته شد [۷]. همچنین از اطلاعات آزمایشگاهی گزارش شده توسط درویش، شامل نتایج آزمایش‌های آنالیز رفتار سیال برای تنظیم معادله حالت پنگ-رابینسون با استفاده از ۱۳ جزء سازنده برای سیال استفاده گردید. فشار اشباع نفت برابر ۲۴۲ بار و نسبت گاز به نفت برابر ۱۳۳/۲ استاندارد سانتی‌متر مکعب



۲ | مقایسه نتایج واقعی با نتایج شبیه‌سازی درویش (۲۰۰۶) و خسروی و همکاران (۲۰۱۲)



در مطالعه حاضر، از مدل شبیه‌سازی مربوط به یک آزمایش تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در یک سیستم شکافدار برای بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان بازیافت نفت استفاده شده است. در مرحله اول، مؤثرترین پارامترها بر بازیافت نفت با استفاده از حساسیت‌سنجی شناسایی می‌شوند. سپس، به منظور اندازه‌گیری کمی میزان اهمیت هر پارامتر، از طریق طراحی آزمایش‌ها یک سطح پاسخ با استفاده از مدل شبیه‌سازی ساخته شده محاسبه می‌گردد و ضریب بازیافت به صورت تابعی از پارامترهای مؤثر مخزنی تخمین زده می‌شود. سطح پاسخ تولید شده به عنوان جایگزینی برای شبیه‌سازی عددی جهت ارزیابی سریع مدل مخزن در شبیه‌سازی مونتی-کارلو استفاده می‌شود تا محدوده عددی محتمل برای ضریب بازیافت نفت به دست آید. این روش به مراتب از شبیه‌سازی مخزن سریعتر بوده و



۱ | شمای کلی مدل مغزه و شکاف ساخته شده توسط درویش (۲۰۰۶)



پرفشار شدن مدل شده، تولید را متوقف می‌سازد. بنابراین، نمی‌توان مقدار آن را زیاد تغییر داده و برای طراحی آزمایش‌ها به کار برد. برای بررسی تأثیر نرخ تزریق، مدل‌های شبیه‌سازی با دبی‌های مختلف تزریق گاز تولید گردید و در هر مدل، به اندازه ۵ برابر حجم اولیه نفت مغزه، گاز تزریق گردید. شکل ۳- نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه نرخ تزریق کمتر باشد، گاز، فرصت بیشتری برای نفوذ به درون ماتریس و تماس با نفت در جای اولیه داشته و بهتر در آن حل می‌شود. انحلال بیشتر گاز درون نفت از یک سو امتزاج نفت و گاز را تسریع کرده و نیروهای نامطلوب مؤینه را از بین می‌برد و از سوی دیگر، به نوبه خود منجر به تماس بیشتر گاز و نفت و تشدید نفوذ ملکولی میان آن‌ها می‌شود. برای این حالت، منحنی بازیافت نفت خمیده تر است، که نشان می‌دهد مکانیزم نفوذ ملکولی نقش مهمی در تولید نفت ایفا می‌کند. اما با زیاد شدن دبی تزریق، گاز، فرصت کافی برای نفوذ به نفت درون ماتریس نداشته و منحنی، به حالت خطی نزدیک تر می‌شود، که نشان می‌دهد نفوذ ملکولی تأثیر چندانی بر تولید نفت نداشته و ریزش ثقلی، مکانیزم غالب در تولید نفت است. در نرخ تزریق پایین، بازیافت نفت در مراحل اولیه تولید، به دلیل تأثیر سریع تر نفوذ ملکولی، نسبت به نرخ تزریق بالا که ریزش ثقلی، مکانیزم مؤثر در آن است، بیشتر است؛ اما پس از گذشت مدتی، اثر نفوذ ملکولی رو به کاهش می‌گذارد، درحالی‌که رانش ثقلی کماکان تأثیر خود را به صورت خطی حفظ می‌کند. بنابراین، اختلاف بازیافت این دو حالت به مرور زمان کاهش یافته و پس از مدتی به هم می‌رسند.

همچنین، با حساسیت سنجی مشخص شد، فاکتورهایی مانند تراوایی نسبی و تخلخل، تأثیر چندانی بر بازیافت نفت ندارند، زیرا در تزریق امتزاجی، منحنی‌های تراوایی نسبی به هر شکلی که باشند، به حالت خطی نزدیک می‌شوند و تغییر تخلخل نیز فقط میزان نفت در جای اولیه را تغییر می‌دهد.

تغییر دما و فشار سیستم موجب عوض شدن خواص نفت شده و پارامترهای دیگری نیز مانند گرانروی و چگالی نفت و گاز وجود دارند که کنترل مقادیرشان در شبیه‌سازی ترکیبی آن‌ها به راحتی امکان‌پذیر نیست. با توجه به این که تغییر پارامترهای مذکور با تغییر ماهیت سیال همراه است، تأثیر آن‌ها به تنهایی قابل بررسی نبوده و از آن‌ها نیز نمی‌توان برای طراحی آزمایش‌ها استفاده کرد.

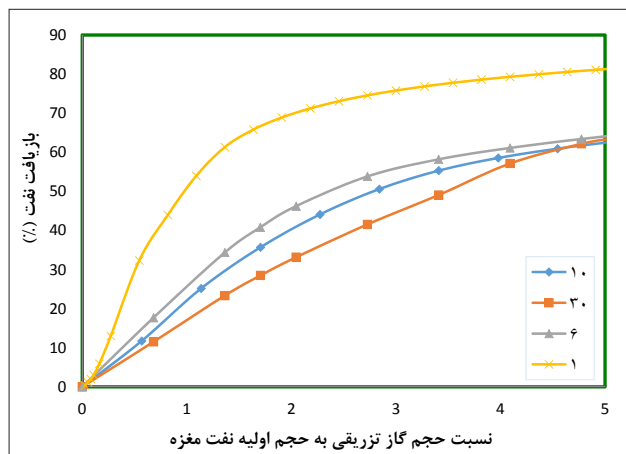
بر استاندارد سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شده بود.

شکل ۲- مقایسه میان نتایج اندازه‌گیری شده از آزمایش را برای میزان بازیافت نفت با نتایج شبیه‌سازی درویش و خسروی و همکاران نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نتایج گزارش شده توسط خسروی و همکاران به خوبی بر نتایج واقعی منطبق بوده و مدل ساخته شده قابلیت شبیه‌سازی صحیح نفوذ ملکولی میان ماتریس و شکاف و سایر پدیده‌های مؤثر در تولید نفت از مغزه در این آزمایش را داراست. از این رو می‌توان از شبیه‌سازی با مدل ساخته شده به جای انجام آزمایش‌های واقعی که مستلزم وقت و هزینه زیاد هستند، جهت بررسی عوامل گوناگون استفاده کرد.

۲- حساسیت سنجی

قدم اول برای طراحی آزمایش‌ها، مشخص کردن پارامترهای مؤثر بر میزان تولید از مغزه است. بدین منظور، از مدل شبیه‌سازی ساخته شده برای انجام حساسیت سنجی بر روی میزان بازیافت نفت از مغزه استفاده شده است. در ابتدای کار، پارامترهای متعددی برای استفاده در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده بود که از آن جمله می‌توان به دما، فشار، نرخ تزریق، تخلخل، تراوایی مطلق ماتریس، تراوایی نسبی ماتریس، تراوایی مطلق شکاف، ضریب نفوذ ملکولی، طول مغزه، قطر مغزه، ویسکوزیته و چگالی سیالات اشاره کرد.

در بررسی‌های بعدی و در جریان تطبیق تاریخچه تولید مشخص شد، پاره‌ای از این فاکتورها به دلیل محدودیت‌های عملیاتی قابل استفاده نیست. به عنوان مثال، اگر نرخ تزریق از مقدار مشخصی کمتر شود، باعث افت فشار شده و اگر از مقدار مشخصی بالاتر رود، منجر به



شکل ۳ | تأثیر تغییرات نرخ تزریق دی اکسیدکربن بر بازیافت نفت (بر حسب سانتی‌متر مکعب بر ساعت)



هر پارامتر به همراه تأثیر توأم آنها بر روی پاسخ مخزن که در این مطالعه همان میزان بازیافت نفت است، با استفاده از طراحی آزمایش‌ها بررسی می‌شود.

روش‌های متعددی برای طراحی آزمایش‌ها موجود است که برخی از آن‌ها به دلیل برخورداری از امتیازات ویژه، در مقایسه با دیگر روش‌ها کاربرد بیشتری دارند. طراحی فاکتوریل کامل، فاکتوریل جزئی، پلاکت-برمن، طراحی ترکیبی مرکزی، باکس-بنکن و طراحی D-optimal از پرکاربردترین این روش‌ها هستند.

طراحی باکس-بنکن (۱۹۶۰) به دلیل برخورداری از مزایای فراوان به صورت گسترده‌ای در مطالعات مخزنی به کار گرفته شده است. تعداد آزمایش‌های

در نهایت، پس از آنالیز حساسیت، با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود و حذف پارامترهایی که تأثیر آن‌ها بر بازیافت نفت قابل چشم‌پوشی بود، پنج عامل مؤثر به‌عنوان پارامترهای ورودی نهایی در طراحی آزمایش‌ها انتخاب شدند. این پارامترها عبارتند از تراوایی ماتریس و شکاف، قطر و طول مغزه و ضرایب نفوذ ملکولی. این پنج فاکتور در مرحله بعدی جهت طراحی آزمایش‌ها و محاسبه سطح پاسخ به کار گرفته می‌شود.

۳- طراحی آزمایش‌ها

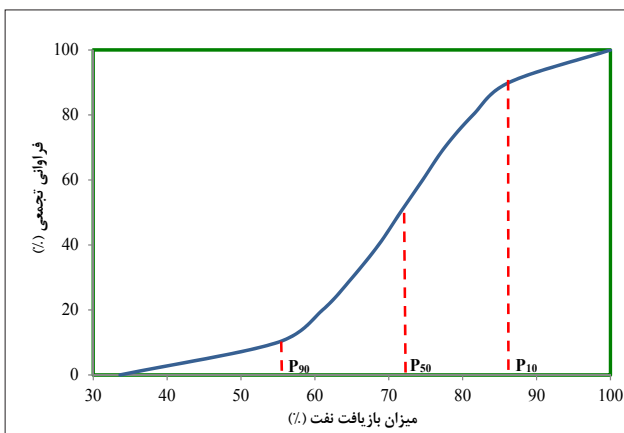
پس از تعیین پارامترهای ورودی توسط آنالیز حساسیت، اثر مستقیم

۱ | مشخصات آزمایش‌های طراحی شده و میزان بازیافت متعلق به هر یک از آن‌ها

شماره تست	قطر مغزه (cm)	طول مغزه (cm)	ضریب نفوذ ملکولی	تراوایی ماتریس (md)	تراوایی شکاف (md)	بازیافت نفت (%)	شماره تست	قطر مغزه (cm)	طول مغزه (cm)	ضریب نفوذ ملکولی	تراوایی ماتریس (md)	تراوایی شکاف (md)	بازیافت نفت (%)
۱	۱	۵	۰	۴	۸۰	۴۳	۲۲	۴/۶	۱۱۵	-۱	۴	۸۰	۷۷/۷
۲	۲/۸	۵	۰	۴	۸۰	۸۲	۲۳	۴/۶	۵	۱	۴	۸۰	۷۵/۵
۳	۱	۱۱۵	۰	۴	۸۰	۶۱	۲۴	۴/۶	۱۱۵	-۱	۴	۸۰	۷۶/۵
۴	۲/۸	۱۱۵	۰	۴	۸۰	۸۲	۲۵	۱	۶۰	۰	۰/۰۱	۸۰	۵۷/۸
۵	۶/۴	۶۰	-۱	۰/۰۱	۸۰	۲۲	۲۶	۸/۲	۶۰	۰	۰/۰۱	۸۰	۶۶/۸
۶	۶/۴	۶۰	۱	۰/۰۱	۸۰	۶۳/۵	۲۷	۱	۶۰	۰	۷/۹۹	۸۰	۶۲/۵
۷	۶/۴	۶۰	-۱	۷/۹۹	۸۰	۸۶/۵	۲۸	۸/۲	۶۰	۰	۷/۹۹	۸۰	۸۶/۳
۸	۶/۴	۶۰	۱	۷/۹۹	۸۰	۸۱/۵	۲۹	۴/۶	۶۰	-۱	۴	۸	۹۱/۵
۹	۶/۴	۵	۰	۴	۸	۸۹/۵	۳۰	۴/۶	۶۰	۱	۴	۸	۸۹
۱۰	۶/۴	۱۱۵	۰	۴	۸	۹۰	۳۱	۴/۶	۶۰	-۱	۴	۱۵۲	۶۰/۵
۱۱	۶/۴	۵	۰	۴	۱۵۲	۶۸/۷	۳۲	۴/۶	۶۰	۱	۴	۱۵۲	۷۷/۴
۱۲	۶/۴	۱۱۵	۰	۴	۱۵۲	۷۱/۷	۳۳	۱	۶۰	۰	۴	۸	۷۶/۵
۱۳	۱	۶۰	-۱	۴	۸۰	۳۴	۳۴	۸/۲	۶۰	۰	۴	۸	۹۱/۲
۱۴	۲/۸	۶۰	-۱	۴	۸۰	۷۹/۶	۳۵	۱	۶۰	۰	۴	۱۵۲	۵۸/۷
۱۵	۱	۶۰	۱	۴	۸۰	۶۱	۳۶	۸/۲	۶۰	۰	۴	۱۵۲	۷۷/۶
۱۶	۲/۸	۶۰	۱	۴	۸۰	۸۲/۴	۳۷	۴/۶	۵	۰	۰/۰۱	۸۰	۴۱/۱
۱۷	۶/۴	۶۰	۰	۰/۰۱	۸	۶۰/۶	۳۸	۴/۶	۱۱۵	۰	۰/۰۱	۸۰	۶۴
۱۸	۶/۴	۶۰	۰	۷/۹۹	۸	۹۰/۵	۳۹	۴/۶	۵	۰	۷/۹۹	۸۰	۸۳/۶
۱۹	۶/۴	۶۰	۰	۰/۰۱	۱۵۲	۶۰	۴۰	۴/۶	۱۱۵	۰	۷/۹۹	۸۰	۸۲
۲۰	۶/۴	۶۰	۰	۷/۹۹	۱۵۲	۷۳/۵	۴۱	۴/۶	۶۰	۰	۴	۸۰	۷۳/۲
۲۱	۶/۴	۵	-۱	۴	۸۰	۸۲							

۱- را برای ضرایب نفوذ ملکولی هر یک از اجزای سازنده نفت و گاز نشان می دهد.

پس از به دست آمدن نتایج شبیه سازی، با استفاده از محاسبات و روش های آماری، یک چند جمله ای درجه دوم به دست می آید که درصد بازیافت نفت را به صورت تابعی از متغیرهای ورودی بیان می کند. پس از بهینه سازی رابطه به دست آمده و حذف جملات کم اثر، با استفاده از آزمون های آماری مربوطه یک رابطه نهایی برای میزان بازیافت نفت در این آزمایش محاسبه گردید:



شکل ۴ نمودار فراوانی تجمعی بازیافت نفت به دست آمده از شبیه سازی موتی-کارلو

مورد نیاز (یا سناریوهای شبیه سازی) در این روش، برای تعداد مشخصی پارامتر ورودی، بسیار کمتر از دیگر روش ها (مانند طراحی فاکتوریل) است؛ این امر به خصوص با افزایش تعداد پارامترهای ورودی اهمیت پیدا می کند. همچنین، به دلیل آن که برای هر پارامتر سه مقدار ورودی تعریف می شود، روش باکس-بنکن امکان بررسی و اندازه گیری تأثیر ترکیبات دوتایی از پارامترها را علاوه بر تأثیر یگانه و مستقیم هر یک از آن ها فراهم می آورد [۹۸].

در این قسمت، با استفاده از روش باکس-بنکن، تعداد ۴۱ آزمایش طراحی گردید؛ مدل مربوط به هر آزمایش، ساخته و اجرا شد و میزان بازیافت نفت پس از تزریق گاز به میزان ۱۰ برابر حجم اولیه نفت ماتریس با دبی ۶ سانتی متر مکعب بر ساعت برای هر آزمایش به دست آمد. جدول ۱- مشخصات هر یک از آزمایش ها را به همراه ضریب بازیافت به دست آمده، نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود، مقادیر پارامترها طوری در نظر گرفته شده است که مرتبه بزرگی هر فاکتور حداقل بین حدود یک (در مورد قطر مغزه) تا سه درجه (در مورد تراوایی ماتریس) تغییر کند. بدین ترتیب، می توان اطمینان حاصل کرد که میزان تغییر هر پارامتر جهت مشاهده تأثیر آن بر روی پارامتر هدف کافی است.

جدول ۲- مقادیر پیشینه، مرکزی و کمینه ضرایب نفوذ ملکولی نفت و گاز

مقدار پائین	مقدار مرکزی	مقدار بالا	ضریب نفوذ ملکولی گاز (s/cm ²)	مقدار پائین	مقدار مرکزی	مقدار بالا	ضریب نفوذ ملکولی نفت (s/cm ²)
۱/۱×۱۰ ^{-۵}	۳/۸۶×۱۰ ^{-۴}	۷/۶۱×۱۰ ^{-۴}	N ₂	۳/۶۲×۱۰ ^{-۷}	۱/۲۷×۱۰ ^{-۵}	۵/۲×۵ ^{-۱۰}	N ₂
۹/۶۶×۱۰ ^{-۶}	۳/۳۹×۱۰ ^{-۴}	۶/۶۸×۱۰ ^{-۴}	CO ₂	۲/۷۸×۱۰ ^{-۷}	۹/۷۴×۱۰ ^{-۶}	۹۲/۱×۵ ^{-۱۰}	CO ₂
۱/۱×۱۰ ^{-۵}	۳/۸۶×۱۰ ^{-۴}	۷/۶۲×۱۰ ^{-۴}	C ₁	۳/۸۱×۱۰ ^{-۷}	۱/۳۳×۱۰ ^{-۵}	۶۳/۲×۵ ^{-۱۰}	C ₁
۷/۹×۱۰ ^{-۶}	۲/۷۷×۱۰ ^{-۴}	۵/۴۶×۱۰ ^{-۴}	C ₂	۱/۵۸×۱۰ ^{-۷}	۹/۰۵×۱۰ ^{-۶}	۷۹/۱×۵ ^{-۱۰}	C ₂
۶/۱۸×۱۰ ^{-۶}	۲/۱۷×۱۰ ^{-۴}	۴/۲۷×۱۰ ^{-۴}	C ₃	۱/۹۸×۱۰ ^{-۷}	۶/۹۶×۱۰ ^{-۶}	۳۷/۱×۵ ^{-۱۰}	C ₃
۵/۲۲×۱۰ ^{-۶}	۱/۸۳×۱۰ ^{-۴}	۳/۶۱×۱۰ ^{-۴}	C ₄	۱/۶۵×۱۰ ^{-۷}	۵/۷۹×۱۰ ^{-۶}	۱۴/۱×۵ ^{-۱۰}	C ₄
۴/۴۷×۱۰ ^{-۶}	۱/۵۷×۱۰ ^{-۴}	۳/۰۹×۱۰ ^{-۴}	C ₅	۱/۴×۱۰ ^{-۷}	۴/۹۱×۱۰ ^{-۶}	۶۹/۹×۶ ^{-۱۰}	C ₅
۴/۳۶×۱۰ ^{-۶}	۱/۴۹×۱۰ ^{-۴}	۲/۹۵×۱۰ ^{-۴}	C ₆	۱/۳۲×۱۰ ^{-۷}	۴/۶۴×۱۰ ^{-۶}	۱۵/۹×۶ ^{-۱۰}	C ₆
۳/۵×۱۰ ^{-۶}	۱/۲۳×۱۰ ^{-۴}	۲/۴۲×۱۰ ^{-۴}	C ₇ -C ₉	۱/۰۸×۱۰ ^{-۷}	۳/۷۸×۱۰ ^{-۶}	۴۴/۷×۶ ^{-۱۰}	C ₇ -C ₉
۲/۵۲×۱۰ ^{-۶}	۸/۸۳×۱۰ ^{-۵}	۱/۷۴×۱۰ ^{-۴}	C ₁₀ -C ₁₅	۷/۶۶×۱۰ ^{-۸}	۲/۶۹×۱۰ ^{-۶}	۳/۵×۶ ^{-۱۰}	C ₁₀ -C ₁₅
۱/۸۴×۱۰ ^{-۶}	۶/۴۸×۱۰ ^{-۵}	۱/۲۷×۱۰ ^{-۴}	C ₁₆ -C ₂₂	۵/۵۱×۱۰ ^{-۸}	۱/۹۳×۱۰ ^{-۶}	۸۱/۳×۶ ^{-۱۰}	C ₁₆ -C ₂₂
۱/۴۲×۱۰ ^{-۶}	۴/۹۹×۱۰ ^{-۵}	۹/۸۳×۱۰ ^{-۵}	C ₂₃ -C ₃₄	۴/۲×۱۰ ^{-۸}	۱/۴۷×۱۰ ^{-۶}	۹/۲×۶ ^{-۱۰}	C ₂₃ -C ₃₄
۱/۱۳×۱۰ ^{-۶}	۳/۹۵×۱۰ ^{-۵}	۷/۸×۱۰ ^{-۵}	C ₃₅₊	۳/۲۹×۱۰ ^{-۸}	۱/۱۵×۱۰ ^{-۶}	۲۸/۲×۶ ^{-۱۰}	C ₃₅₊

درصد بازیافت نفت = $(۳/۳۶ \times \text{قطر مغزه}) + (۳/۳۰ \times \text{تراوایی ماتریس}) + (۱۶/۲۲ \times \text{ضریب نفوذ ملکولی}) - (۰/۱۱ \times \text{تراوایی شکاف}) - (۲/۹۱ \times \text{ضریب نفوذ ملکولی} \times \text{تراوایی ماتریس}) + ۵۱/۹۷۳۷$

از این رابطه مشخص می شود که قطر مغزه، تراوایی ماتریس و ضرایب نفوذ ملکولی، با بازیافت نفت رابطه مستقیم دارند. در حالی که این رابطه در مورد تراوایی شکاف برعکس است؛ زیرا، بالا رفتن تراوایی شکاف، اثری شبیه به بالا رفتن نرخ تزریق (که پیش از این درباره آن توضیح داده شد) دارد و منجر به کاهش میزان بازیافت نفت می شود. همچنین، رابطه به دست آمده بیانگر آن است که تأثیر قطر مغزه و تراوایی شکاف بر روی بازیافت نفت خطی بوده، در حالی که این تأثیر برای تراوایی ماتریس و ضرایب نفوذ ملکولی، غیرخطی است.

همان گونه که مشاهده می شود، در این رابطه، طول مغزه وجود ندارد که نشان می دهد این پارامتر، فاکتور تأثیر گذاری در بازیافت نفت از مغزه نبوده است. این امر می تواند به دلیل آن باشد که در حالت امتزاجی، میزان کشش بین سطحی گاز و نفت بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است و در این شرایط، نیروهای موئینه که در حالت غیرامتزاجی مانع بزرگی بر سر راه نفوذ گاز تزریقی از درون شکاف به ماتریس هستند، حذف شده و ارتفاع آستانه موئینه (کمترین ارتفاع بلوک ماتریس که به ازای آن، گاز تزریقی می تواند به کمک نیروهای ثقلی بر نیروهای موئینه غلبه کرده و به درون ماتریس نفوذ کند)، به صفر می رسد. در چنین حالتی، فارغ از زیاد یا کم بودن ارتفاع ماتریس، گاز تزریقی می تواند به درون مغزه نفوذ کرده و در صورت در اختیار داشتن زمان کافی، تمامی نفت درون مغزه را استخراج کند [۱۰].

از رابطه ۱- می توان جهت پیش بینی مقادیر بازیافت نفت حاصل از تزریق امتزاجی دی اکسید کربن در مغزه های احاطه شده توسط شکاف با مقادیر متفاوت قطر مغزه، تراوایی ماتریس و شکاف و ضرایب نفوذ ملکولی استفاده کرده و با به کارگیری روش مونتی- کارلو نحوه توزیع درصد بازیافت نفت را برای چنین سیستمی محاسبه نمود. لازم به یادآوری است که معادله به دست آمده صرفاً در محدوده های تعریف شده برای پارامترهای ورودی صادق بوده و در خارج از این محدوده، قدرت پیش بینی ندارد.

۴- شبیه سازی مونتی- کارلو

شبیه سازی مونتی- کارلو یک روش آماری قدرتمند برای تخمین

عدم قطعیت است که بیش از نیم قرن از عمر آن می گذرد و از سال ۱۹۶۹ نیز در صنعت نفت برای اهدافی مانند تخمین میزان نفت درجا، آنالیز موازنه مواد، آنالیز ریسک تعمیر چاه و تخمین بازیافت نهایی نفت استفاده شده است [۱۱].

در این قسمت، با استفاده از سطح پاسخ به دست آمده از طراحی آزمایش ها در بخش قبل، شبیه سازی مونتی- کارلو برای میزان بازیافت نفت انجام شده است؛ اما به جای تخمین عدم قطعیت، از این روش برای تخمین محدوده محتمل بازیافت نفت برای مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر استفاده گردیده است. بدین منظور، ۱۰۰۰ سناریوی تصادفی با در نظر گرفتن توزیع یکنواخت برای پارامترهای مؤثر در همان محدوده های تعریف شده قبلی تولید شد و با استفاده از نتایج محاسبه شده از رابطه ۱- مقادیر فراوانی به دست آمده برای بازه های مختلف درصد بازیافت نفت به دست آمد. مقدار متوسط بازیافت نفت به دست آمده از این روش، برابر ۷۱/۱ درصد و انحراف معیار آن ۱۲ درصد است. با استفاده از فراوانی های به دست آمده، نمودار فراوانی تجمعی برای درصد بازیافت نفت رسم (شکل ۴) و از روی آن، مقادیر بدینانه (P90)، محتمل (P50) و خوش بینانه (P10) برای درصد بازیافت نفت به ترتیب برابر با ۵۵، ۷۱/۶ و ۸۶/۳ درصد محاسبه گردید.

اختلاف بالای موجود میان مقادیر خوش بینانه و بدینانه (۳۱/۳ درصد)، به همراه مقدار زیاد انحراف از معیار به دست آمده (۱۲ درصد)، بیانگر وابستگی شدید میزان بازیافت نفت به چهار پارامتر مخزنی انتخاب شده است. این امر نشان می دهد که تغییر هر یک از فاکتورهای ورودی در محدوده تعریف شده منجر به ایجاد تغییر زیادی در میزان نفت تولیدی می گردد و با صرف هزینه برای اندازه گیری دقیق تر این پارامترها، تخمین دقیق تری از میزان نفت بازیافتی به دست می آید. همچنین، شکل ۵- میزان تأثیر هر یک از فاکتورها را بر روی بازیافت نفت نشان می دهد. مقادیر مثبت، نشان دهنده رابطه مستقیم پارامتر با بازیافت نفت و مقادیر منفی، نشان دهنده تأثیر معکوس پارامتر بر آن است که با نتایج بیان شده در مورد رابطه ۱- مطابقت دارد. همچنین می توان مشاهده نمود که در محدوده مورد بررسی، تراوایی ماتریس و قطر مغزه بیشترین تأثیر را داشته و پس از آن ها، تراوایی شکاف قرار دارد. اثر ضریب نفوذ ملکولی نیز نسبت به بقیه کمتر است.

نتیجه گیری

در این مقاله از روش طراحی آزمایش ها جهت تخمین میزان تأثیر

مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار بر میزان نفت تولیدی از سیستم شکافدار بر اثر تزریق امتزاجی دی‌اکسید کربن بوده و در میان آن‌ها تراوایی ماتریس، بیشترین، و ضریب نفوذ ملکولی، کمترین تأثیر را دارد.

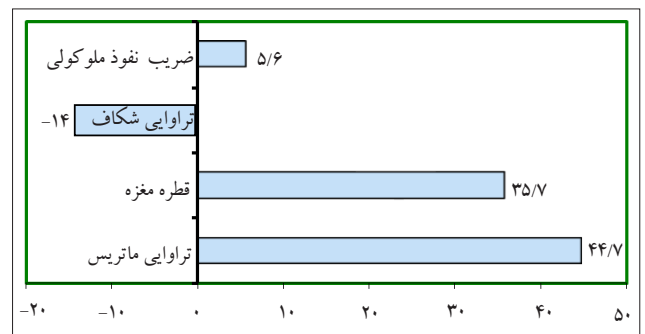
■ تراوایی ماتریس، قطر مغزه و ضریب نفوذ ملکولی با ضریب بازیافت نفت رابطه مستقیم و با تراوایی شکاف، رابطه عکس دارد.
 ■ طول مغزه تأثیر چندانی بر میزان نفت تولیدی بر اثر تزریق امتزاجی دی‌اکسید کربن ندارد.

■ مقدار ضریب بازیافت محتمل تخمین زده شده برای این سیستم برابر ۷۱/۶ درصد بوده که نشان می‌دهد تزریق امتزاجی دی‌اکسید کربن روش مناسبی برای تولید نفت از سیستم‌های شکافدار است.

■ اختلاف نفت تولیدی پیش‌بینی شده بر اثر تزریق امتزاجی دی‌اکسید کربن در مخازن شکافدار، برای مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر تعیین شده زیاد است؛ به طوری که بازیافت پیش‌بینی شده برای حالت خوش‌بینانه (P90) از ۸۶/۳ درصد به ۵۵ درصد برای حالت بدبینانه (P10) کاهش می‌یابد. ■

پارامترهای مختلف بر میزان بازیافت نفت از یک سیستم شکاف-ماتریس با استفاده از تزریق امتزاجی دی‌اکسید کربن استفاده گردید. همچنین از طریق شبیه‌سازی مونتی-کارلو، محدوده عددی محتمل میزان بازیافت نفت برای مقادیر مختلف فاکتورهای تأثیرگذار به دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، موارد زیر قابل ذکر است:

■ تراوایی ماتریس و شکاف، قطر مغزه و ضرایب نفوذ ملکولی



شکل ۵ | درصد تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر میزان بازیافت نفت

منابع

- [1] Myers, R.H. and Montgomery, D.C., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments", John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1995
- [2] Chu, C., "Prediction of steamflood performance in heavy oil reservoirs using correlations developed by factorial design method", Paper SPE 20020, SPE California Regional Meeting, Ventura, California, U.S.A., 1990
- [3] Peng, C.Y. and Gupta, R., "Experimental design and analysis methods in multiple deterministic modeling for quantifying hydrocarbon in-place probability distribution curve", Paper SPE 87002, Asia Pacific Conference on Integrated Modeling for Asset Management, Kuala Lumpur, Malaysia., 2004
- [4] Yang, G., Zhang, Y. and Li, S., "Uncertainty analysis of carbon sequestration in an inclined deep saline aquifer" AAPG bulletin, 2012
- [5] Darvish G.R., "Physical effects controlling mass transfer in matrix fracture system during CO₂ injection into chalk fractured reservoir", PhD dissertation, NTNU, Trondheim, Norway, 2006
- [6] Khosravi, M., Rostami, B. and Mirazimi, S.A., "Difficulties in simulating diffusive flux in matrix-fracture model", 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC, Copenhagen, Denmark, 2012
- [7] Da Silva, F. V., Belery, P., "Molecular Diffusion in Naturally Fractured Reservoirs: A Decisive Recovery Mechanism", paper SPE 19672, 1989
- [8] Chewaroungroj, J., "Improved Procedures for Estimating Uncertainty in Hydrocarbon Recovery Predictions", Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin, 2000
- [9] Eriksson, L., Johansson, E., Kettaneh-Wold, N., Wikstrom, C. and Wold, S., "Design of Experiments - Principles and Applications", 3rd Edition, UMETRICS Academy, Sweden, 2008
- [10] Van Golf-Racht, T.D., "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering", Developments in Petroleum Science, Vol. 12, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, 1982
- [11] Zhang, G., "Estimating Uncertainties in Integrated Reservoir Studies", Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, U.S.A., December 2003