Archive of SID

شبیه سازی آزمایش لوله قلمی با استفاده از شبیه ساز Eclipse

Slim tube test simulation using Eclipse simulator software

امید چیتگر*، محمد رضا اصفهانی، عزت اله کاظم زاده، جعفر ولی، حبیب اله صدیقی،
پژوهشگاه صنعت نفت
chitgaro@ripi.ir

چکیده
یکی از ضروری ترین مطالعاتی که قبل از شروع تزریق گاز در مخازن هیدروکربوری صورت می گیرد امتزاجی یا غیرامتزاجی بودن تزریق است. از مهمترین پارامترها در تزریق امتزاجی، حداقل فشار امتزاج می باشد. در این تحقیق با استفاده از داده های آنالیز سیال مخزن، حداقل فشار امتزاج با استفاده از دو شبیه ساز PVTi و Eclipse300 شبیه‌سازی و تعیین گردید. به این منظور ابتدا نفت یک مخزن بوسیله ی نرم افزار PVTi شبیه‌سازی شده و حداقل فشار امتزاجی برای چهار گاز مختلف محاسبه شد. سپس یک مدل ترکیبی از این آزمایش با استفاده از شبیه ساز Eclipse300 ساخته شد و مقادیر به دست آمده از این مدل با نتایج PVTi مقایسه شد. در نهایت با توجه به خروجی شبیه‌سازها مشخص شد که می شود جهت حصول اطمینان از تعیین معالات حالت انتخاب شده در شبیه ساز PVTi، از مدل ترکیبی حداقل فشار امتزاج را شبیه سازی و مجددا محاسبه نمود.

واژگان کلیدی
شبیه سازی ؛ لوله قلمی ؛ حداقل فشار امتزاجی ؛ تزریق گاز ؛ PVTi ؛ Eclipse

Abstract
One the most necessary study before initiation of gas injection to the hydrocarbon reservoirs is investigation of miscibility or immiscibility of injection. Minimum miscibility pressure is one of the most important parameters in miscible injection. In this study, by using of reservoir fluid analysis, minimum miscibility pressure was estimated and determined by PVTi and Eclipse300 Softwares. At first, Oil of one reservoir was simulated by PVTi and minimum miscibility pressure was measured for four different gas. Then, the compositional model of this experiment was made by Eclipse300 and the values obtained by this model compared with the results of PVTi. Finally, according to the results of simulators, it is concluded that the minimum miscibility pressure can be simulated and measured by compositional model for obtaining assurance in determination of selected state model in PVTi.

www.SID.ir

Archive of SID

www.Reservoir.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تزریق گاز یکی از قدیمی‌ترین فرآیندهای ازدیاد برداشت در مخازن نفتی می‌باشد. این روش هم می‌تواند به عنوان عامل جابجا کننده نفت مخزن و هم به عنوان یک عامل جهت حفظ فشار و انرژی مخزن در مراحل مختلف تولید از مخزن ارزیابی شود. با توجه به رویکرد تولید صیانتی و حداکثری از مخازن ، تزریق گاز جایگاه ویژه‌ای در دنیا پیدا کرده است. با در نظر داشتن ویژگی‌های منابع کشور از لحاظ دارا بودن منابع گازی و نیز رفتار مخازن نفتی ایران از لحاظ نفت دوست بودن، گزینه تزریق گاز می‌تواند یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها جهت تولید حداکثری از مخازن ایران باشد. انتخاب گاز تزریقی در پروژه ازدیاد برداشت، وابسته به شرایط دمایی و فشاری مخزن، ترکیبات نفت مخزن و در دسترس بودن گاز تزریقی و هزینه تهیه آن می‌باشد. قابلیت امتزاج‌پذیری بین سیال تزریقی و نفت مخزن و بازدهی جابجایی توسط آزمایش لوله قلمی تخمین و محاسبه می‌شود. قبل از انجام پروژه های تزریق گاز، به منظور جلوگیری و کاهش اثرات انگشتی‌شدن، ویسکوزیته، تفکیک ثقلی و همگنی، بایستی آزمایشاتی طراحی و اجرا شوند.

تزریق امتزاجی

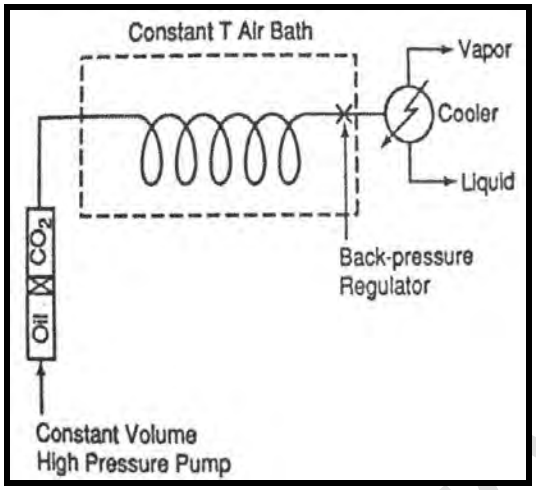
تزریق امتزاجی گاز یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید نفت بوده و به عنوان یک روش مهم در صنعت ازدیاد برداشت شناخته می‌شود. علی‌رغم کاهش و نوسان قیمت نفت، تولید به روش تزریق گاز در این سال‌ها تنها روشی است که به‌طور پیوسته در حال توسعه می‌باشد. تزریق گاز هیدروکربنی بعد از تزریق بخار روشی است که بیشترین بازیافت نفت را داشته و با تلاش‌هایی که به‌منظور کاهش احتراق گاز صورت گرفته است، تزریق گاز به عنوان یکی از انتخاب‌های مهم به منظور افزایش بازیافت نفت در حال حاضر و آینده مطرح می‌باشد. با گذشت زمان طولانی از آغاز پروژه‌های ازدیاد برداشت از مخازن، در حال حاضر جزئیات و پارامترهای مؤثر بر روش‌های افزایش بازدهی توسط گاز به خوبی مشخص شده است. اگرچه مطالعات جامع و گسترده‌ای بر خواص دی‌اکسیدکربن (CO_2) و نیتروژن (N_2) و گازهای هیدروکربنی در شرایط مخزن و نوع مکانیزم جابجایی آنها صورت گرفته است اما رنج گراویته، فشار و عمق برای هر یک از این روش‌ها در شرایط گوناگون متفاوت می‌باشد. به طورکلی این روش‌ها بیشتر در مخازن عمیق کاربرد داشته و معمولا" انتخاب نهایی بستگی به شرایط مخزن، قیمت و در دسترس بودن گاز مورد نظر دارد.

آزمایش لوله قلمی

آزمایش لوله قلمی اولین بار توسط اُرر و سیلوا معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. این ابزار از یک لوله از جنس استیل که حدود ۵/۱۶ اینچ قطر و دارای طولی حدود ۴۰ فوت می‌باشد، تشکیل شده است(شکل ۴). این لوله به صورت پیچیده یا حلقوی و در جهت محور xها (افقی) می‌باشد. بنابراین در این آزمایش سیال به صورت افقی حرکت کرده و تأثیر نیروی ثقلی بسیار ناچیز می‌گردد. محیط متخلخل مورد استفاده در اکثر موارد مصنوعی بوده که این موضوع موجب ایجاد نفوذپذیری بالا در لوله و اطمینان از یکنواخت بودن فشار فرآیند می‌شود. مواد پرکننده لوله نیز به محیط متخلخل طبیعی (مانند مخزن) شباهت ندارند. بنابراین لوله قلمی نمی‌تواند به طور صددرصد راندمان صحیح فرآیند را محاسبه نماید. اما نتایج آن مورد قبول و مورد استفاده قرار می‌گیرد. لازم به‌ذکر است که این آزمایش یکی از آزمایشات معمول جهت بررسی رفتار فازی و محاسبه راندمان جابجایی فرآیند می‌باشد. در این روش پمپ سیستم، نیروی لازم جهت حرکت سیال درون محیط متخلخل را فراهم و فشار نیز توسط back pressure regulator کنترل می‌گردد. در طول دوره آزمایش لوله حلقوی و سایر بخش‌ها در دمای ثابت نگه داشته می‌شوند. در قسمت بیرون‌ریز لوله حلقوی نیز سیال‌ها جمع‌آوری و اندازه‌گیری می‌شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

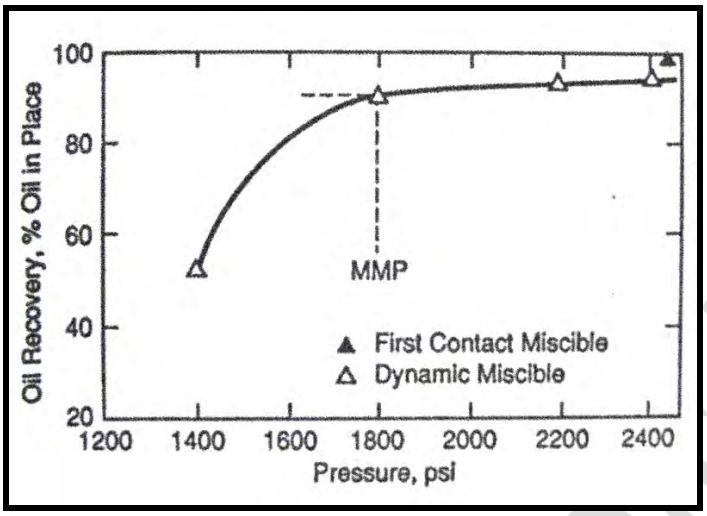


شکل۴- ساختار درونی دستگاه لوله قلمی

برای انجام آزمایش، یک نمونه از سیال که می‌خواهد جابجا شود در دستگاه و محیط متخلخل قرار می‌گیرد. سپس سیستم را در دما و back pressure regulator را در فشار جابجایی مورد نظر تنظیم و سیال جابجاکننده در دبی ثابت تزریق می‌گردد. پیشرفت دبی خطی و به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از آنچه که در شرایط واقعی مخزن رخ داده و در زمان منطقی و مناسبی کامل می‌شود، انجام می‌پذیرد. به‌طورکلی افت فشار در سیستمی که دارای درزه‌ها یا شکاف‌های کوچک بوده بیشتر می‌باشد. در ادامه بازدهی تولید در زمان انگشتی‌شدن سیال تزریقی محاسبه و ثبت می‌شود. این آزمایش در فشارهای گوناگون اما با شرایط ثابت چندین بار تکرار می‌گردد. سپس جهت مشخص نمودن حداقل فشار امتزاجی (MMP) در فرآیند جابجایی، بازده نفت بر حسب فشار مانند شکل ۵ رسم می‌شود. در سال‌های اولیه ابداع این روش، MMP به فشاری اطلاق می‌شد که در آن بازیافت لوله قلمی به صد در صد می‌رسید. بعدها این عقیده تغییر یافت و امروزه فشاری که در آن دو خط مستقیم عبورکننده از داده‌های ضریب بازدهی بر فشار یکدیگر را قطع می‌کنند به عنوان MMP شناخته می‌شود. به‌عبارت دیگر MMP فشاری است که در آن شیب نمودار تغییر و نمودار شکسته می‌شود. بنابراین از این نقطه به بعد با افزایش فشار تزریق، بازدهی جابجایی تغییر چندانی نمی‌کند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- محاسبه MMP با استفاده از داده‌های آزمایش لوله قلمی

خواص سیالات

آزمایشاتی نظیر تعیین ترکیبات، تعیین فشار اشباع، آزمایشات تبخیر مرحله‌ای (Differential liberation)، مطالعه ویسکوزیته، آزمایشات دستگاه تفکیک کننده (Separation test) بر روی نفت مخزن انجام شده است که از نتایج آن‌ها در شبیه‌سازی سیال استفاده خواهد شد. بعضی از نتایج در جداول۴ و ۵ نشان داده شده است

جدول ۴ خواص نفت

Bubble Point (Pb) (Psia @ res. Cdts)	۳۶۴۴
GOR liquid composit (scf/stbo)	۸۶۱/۳۸
Bo at Pb (rb/stb)	۱/۴۷۱
Oil density (Surf.) (kg/m3- API)	۸۸۱/۹۷۷-۳۳

جدول ۵ اجزای تشکیل دهنده سیالات

ترکیبات	درصد مولی در نفت مخزن	درصد مولی در سیال تک فازگاز طبیعی

www.SID.ir

Archive of SID

N2	۰/۲۹	۱/۱۳
CO2	۲/۲۸	۲/۰۳
C1	۴۲/۸۵	۷۵/۰۱
C2	۶/۵۵	۶/۵۹
C3	۵/۱۸	۴/۱۳
iC4	۱/۴۴	۱/۰۶
nC4	۲/۸۴	۱/۹۲
iC5	۱/۴۹	۰/۸۶
nC5	۱/۷۴	۰/۹۱
C6	۳/۰۹	۱/۲۳
C7	۴/۲۶	۱/۲۹
C8	۴/۵۸	۱/۱۱
C9	۳/۶۵	۰/۹
C10	۳/۰۸	۰/۶۵
C11	۲/۳۵	۰/۳۸
C12	۲/۰۸	۰/۲۹
C13	۱/۸۵	۰/۱۶
C14	۱/۲۸	۰/۱۱
C15	۰/۷۹	۰/۰۷
C16	۰/۶۴	۰/۰۵
C17	۰/۵۲	۰/۰۴
C18	۰/۵	۰/۰۳
C19	۰/۴۴	۰/۰۲
C20+	۶/۲۳	۰/۰۳
TOTAL	۱۰۰	۱۰۰

نفت مخزن

پس از وارد کردن در صد اجزای افزار PVTi نوبت به شبیه‌سازی اجزای این سیالات زیاد است، باعث تطابق با آزمایشات دشوار شود شبیه‌سازی مخزن معادلات جریان انجام شود، زیاد بودن تعداد اجزا و ایجاد مشکلات در حل معادلات آمدن بر این مشکل روش گروه یکسان بودن وزن مولکولی استوار مولکولی مشابه در یک گروه قرار مشابه هستند. به توجه به iC4 و nC4 با هم گروه‌بندی می دارای ایزومر هستند نیز مشابه سیال ونتایج آزمایشات به مدل نرم می‌رسد. با توجه به اینکه تعداد می‌شود که شبیه‌سازی سیال و همچنین با توجه به اینکه در در هر گرید برای تمامی اجزا باید باعث کند شدن سرعت شبیه‌سازی می‌شود. بنابراین یک راه بر فارغ بندی است. این روش بر پایه است، به گونه‌ای که اجزایی با وزن می‌گیرند. زیرا آنها دارای خواصی توضیحات داده شده اجزایی مانند شوند و این در مورد باقی اجزا که است. این نکته قابل ذکر است که این مسئله در مورد اجزای غیر هیدروکربونی صادق نیست. به عنوان مثال N_2 معمولا با C1 و Co_2 با C2 گروه‌بندی می‌شوند. پس از گروه‌بندی اجزا، باید خواص سیال چک شود تا در صورت مشاهده تغییرات زیاد نسبت به حالت اولیه ، روش گروه‌بندی اصلاح شود. جدول ۸ گروه بندی انجام شده در نفت را نمایش می دهد.

جدول ۸- نتایج گروه‌بندی نفت مخزن

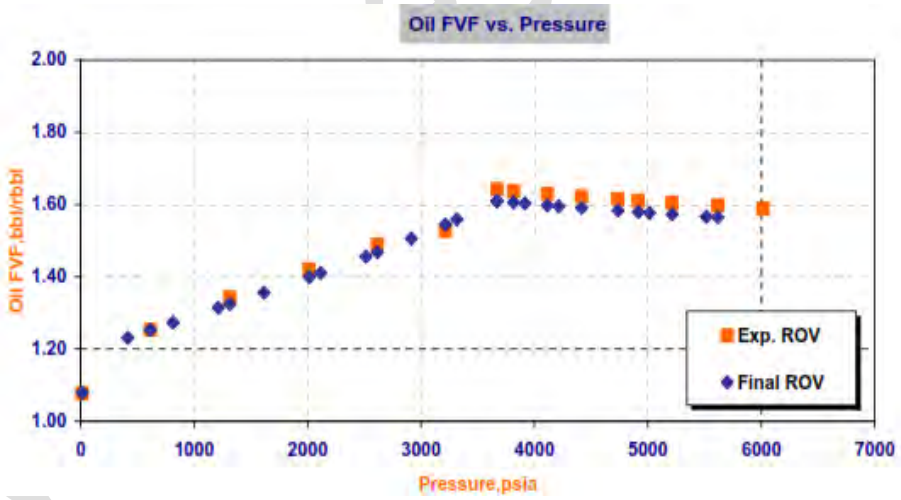
اجزا	درصد مولی ٪
N2-C1	۴۳/۱۴
CO2-C2	۸/۸۳

www.SID.ir

Archive of SID

C3-C4	۹/۴۶
C5-C6	۶/۳۲
C7 to C11 117g/mol	۱۷/۹۲
C12 to C18 189g/mol	۷/۶۶
C19+ 489g/mol	۶/۶۷

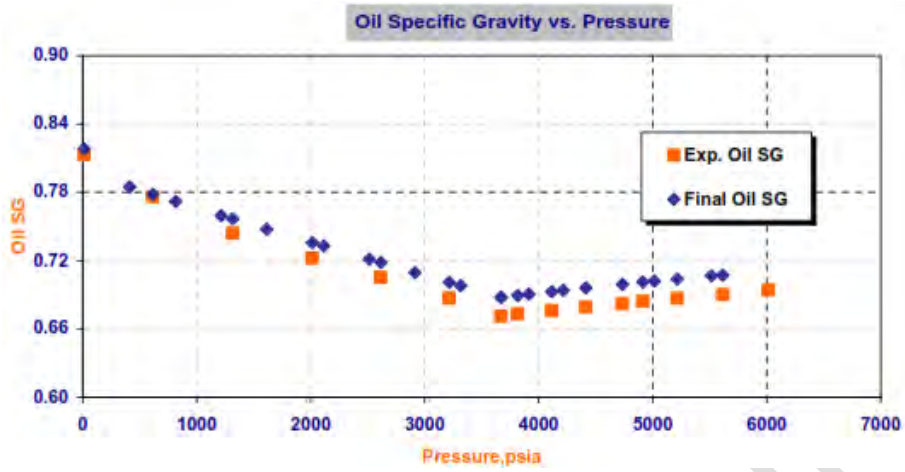
بعد از گروه‌بندی کردن تطابق پارامترهای آزمایشگاهی و شبیه سازی انجام می گردد. برای ایجاد مدل سیال باید یک مدل از معادلات حالت موجود در شبیه ساز انتخاب شده و به وسیله آن تطابق انجام گردد. در این نمونه معادله حالت انتخاب شده Peng-Robinson است که نسب به دیگر مدل ها تطابق بهتر را با داده های آزمایشگاه نشان می دهد. همچنین مدل انتخابی برای گرانرویی Lohrenz-bray-clark است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در شکل های ۶ تا ۸ نتایج تطابق نفت مخزن نشان داده شده است.



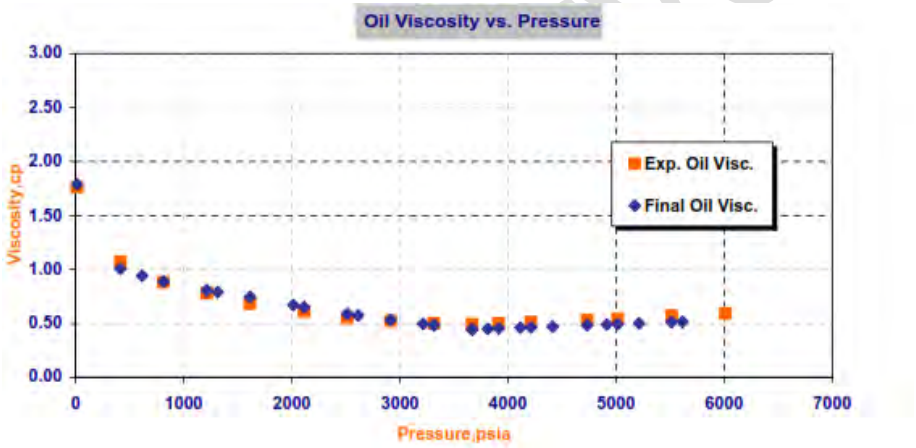
شکل ۹- نتایج تطابق ضریب حجمی نفت مخزن

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰- نتایج تطابق دانسیته نفت مخزن



شکل ۱۱- نتایج تطابق گرانروی نفت مخزن

نمونه گاز لایه گازی

در این مرحله نمونه گرفته شده از مخزن مورد آزمایشاتی، از جمله تعیین ترکیبات، تعیین نقطه شبنم، آزمایشات حجم ثابت، مطالعه ویسکوزیته، ضریب انحراف و چگالی گاز قرارگرفته است که از نتایج آن‌ها در شبیه‌سازی سیال استفاده می‌شود. نتایج تعیین نقطه شبم در جدول ۹ نشان داده شده است.

جدول ۹- نتایج آزمایشات نمونه گازی

دما (^{o}F)	تعیین نقطه شبنم (Psi)
۷۰	۳۸۴۴

www.SID.ir

Archive of SID

۱۵۰	۴۲۳۵
۲۲۸	۴۲۸۰

پس از وارد کردن در صد اجزای سیال ونتایج آزمایشات به مدل نرم افزار نوبت به شبیه‌سازی می‌رسد. باز هم برای اینکه تعداد اجزای این سیال زیاد است، برای فارغ آمدن بر این مشکل از روش گروه‌بندی استفاده می‌کنیم. مجدد پس از گروه بندی اجزا، باید خواص سیال چک شود تا در صورت مشاهده تغییرات زیاد نسبت به حالت اولیه ، روش گروه‌بندی اصلاح شود. در این نمونه از گاز گروه C7+ به گروههای بیشتری تقسیم شده‌اند. . گروه‌بندی نمونه گاز لایه گازی در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۰- نتایج گروه‌بندی نمونه گاز

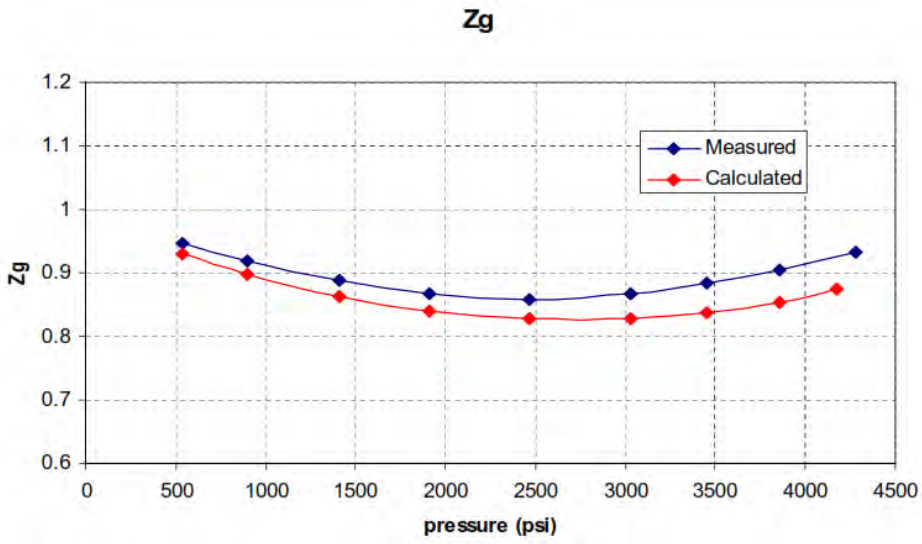
اجزا	درصد مولی ٪
N2-C1	۷۶/۱۵۵
CO2-C2	۸/۶۲۲
C3	۴/۱۳۱
C4	۲/۹۸۱
C5+ 92.46 g/mol	۶/۳۰۱
C10+ 159.36 g/mol	۱/۷۸
C20+ 306 g/mol	۰/۰۳

بار دیگر برای ایجاد یک مدل از موجود انتخاب آن تطابق انجام نمونه نیز معادله Peng-Robinson است که نسبت به دیگر مدل ها تطابق بهتری را با داده‌های آزمایشگاه نشان می‌دهد. مدل انتخابی برای گرانرویی نیز همان مدل Lohrenz-bray-clark اصلاح شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در شکل‌های۱۲ تا ۱۴ نتایج تطابق گاز نشان داده شده است.

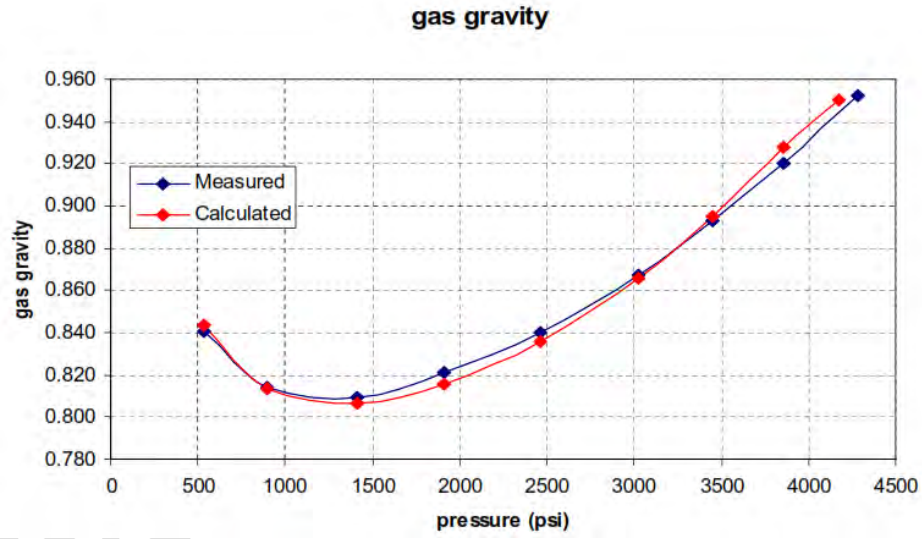
مدل سیال باید معادلات حالت شده و به وسیله گردد. در این حالت انتخاب شده

www.SID.ir

Archive of SID



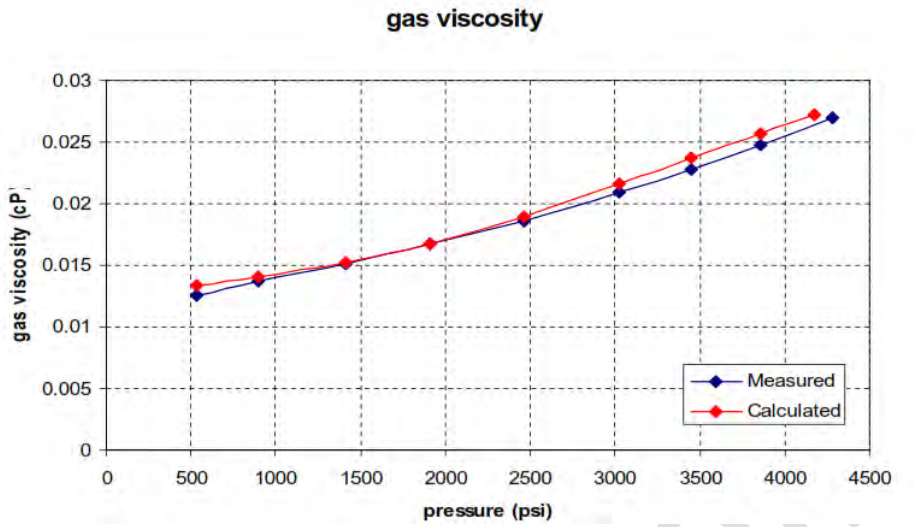
شکل ۱۲- نتایج تطابق ضریب تراکم گاز نمونه گازی



شکل ۱۳- نتایج تطابق گراویته گاز نمونه گاز

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۴- نتایج تطابق گرانروی نمونه گاز

شبیه سازی آزمایش لوله قلمی با استفاده از نرم افزار PVTi

در قسمت شبیه سازی سیال که با نرم افزار PVTi انجام می شود با کامل شدن مدل سیال می‌توان آزمایشاتی را نیز در آن طراحی کرد و نتایج آن را مشاهده نمود. از جمله این آزمایشات آزمایش لوله قلمی است که جهت تعیین حداقل فشار تزریق امتزاجی استفاده می‌شود. در این قسمت گاز های N2 ، CO2، C1 و گاز لایه گازی به عنوان گاز های تزریقی انتخاب شده و در محیط نرم افزار PVTi آزمایش لوله قلمی برای دو نمونه نفت موجود طراحی شده است.که نرم افزار با توجه به مدل سیال نفتی و گاز تزریقی و معادلات موجود آزمایش را شبیه سازی کرده و نتایج حداقل فشار امتزاجی را به عنوان خروجی می‌دهد. نتایج حاصل از این شبیه ساز در جدول ۱۱ آمده است .

جدول ۱۱- نتایج شبیه ساز PVTi

سیال تزریقی	حداقل فشار امتزاجی نفت مخزن (اتمسفر)
N2	>۱۰۰۰
CO2	۶۴۳
C1	۸۶۷
گاز لایه گازی	۶۰۲

www.SID.ir

Archive of SID

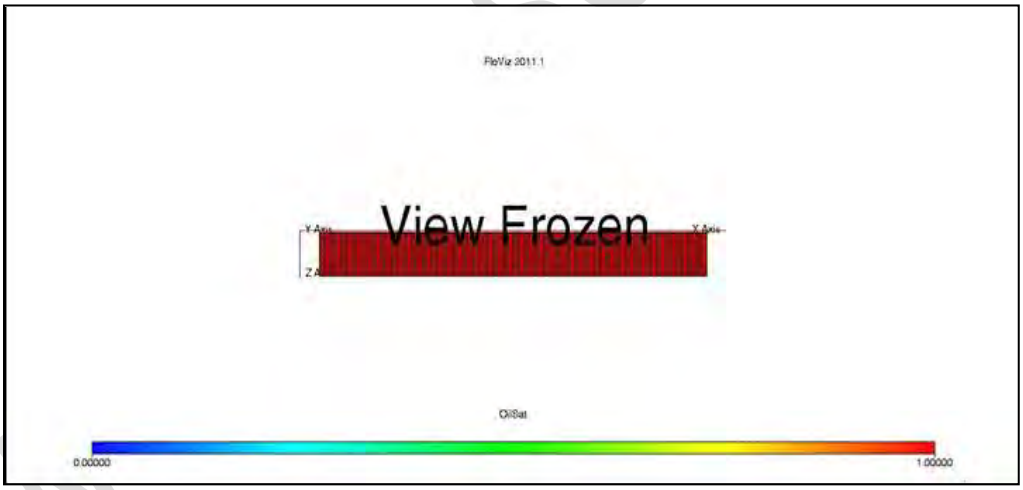
شبیه سازی آزمایش لوله قلمی با استفاده از نرم افزار ECLIPSE 300

جهت اطمینان از صحت نتایج این شبیه‌سازی آزمایش لوله قلمی را در نرم افزار Eclipse طراحی کرده و در فشارهای مختلف هر کدام از گازها را تزریق می‌کنیم. در این روش مخزنی با مشخصات جدول ۱۲ به منظور شبیه‌سازی آزمایش لوله قلمی طراحی می-شود.

جدول ۱۲- مشخصات طراحی لوله قلمی

طول (cm)	ارتفاع (cm)	تخلخل (٪)	تراوایی (md)
۱۰۰۰	۱	۱۰	۲۰۰۰

در شکل ۱۵ طراحی لوله نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- طراحی لوله قلمی در شبیه ساز Eclipse

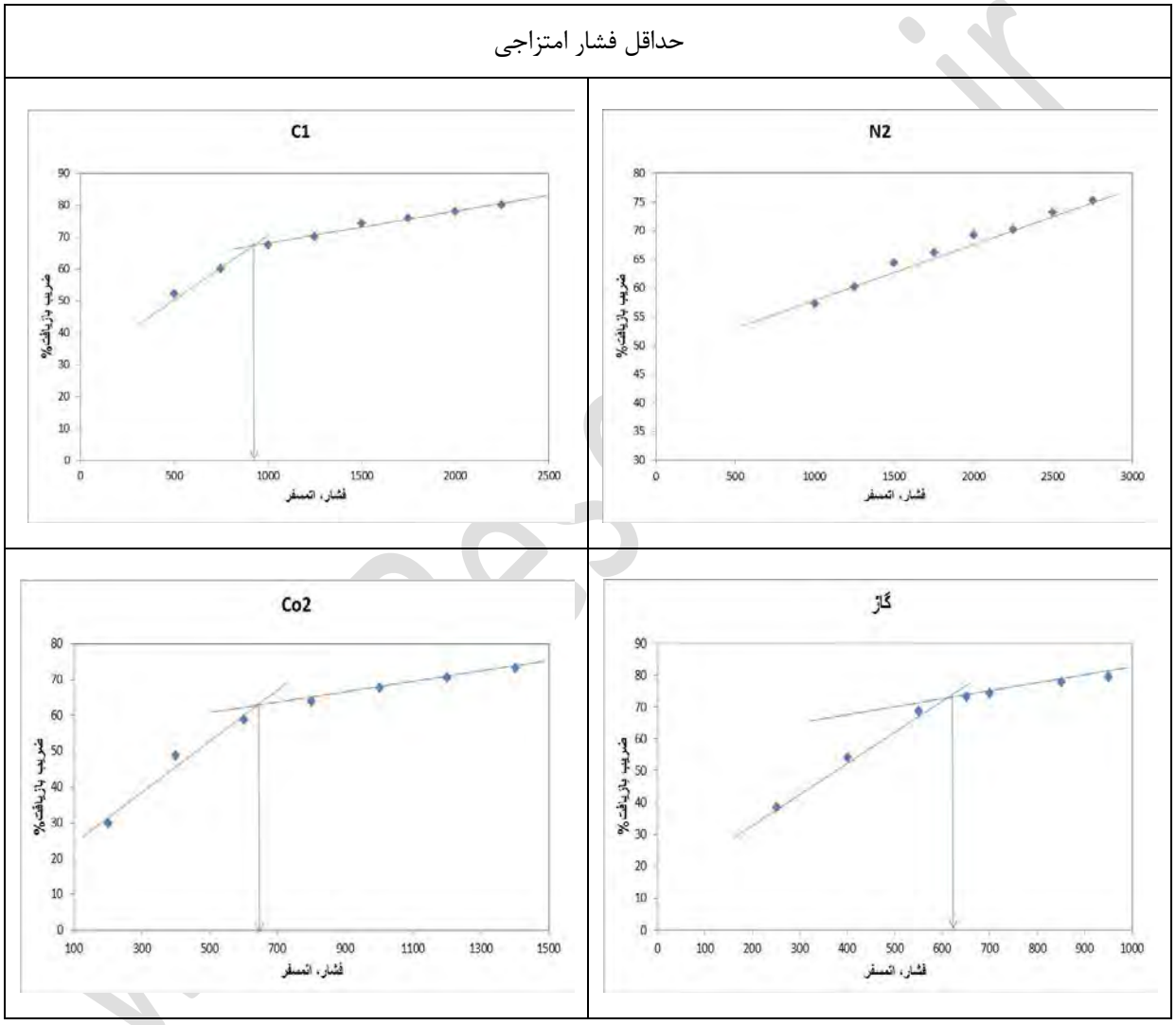
در هر آزمایش، یک گاز در فشارهای مختلف با نرخ ثابت تزریق شده و ضریب بازیافت آن در تزریق ۱,۲ برابر حجم خالی (pore volume) اندازه‌گیری می‌شود. سپس مقدار حداقل فشار امتزاجی از نمودار ضریب بازیافت بر حسب فشار محاسبه می شود.

www.SID.ir

Archive of SID

نفت مخزن

این گروه آزمایشات در دمای°F ۲۳۴ انجام می‌شود. هر یک از گازها در ۸ فشار تزریق مختلف به لوله تزریق می‌شود. ضریب بازیافت بر حسب فشار تزریق در شکل ۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱۷- نتایج آزمایش لوله قلمی جهت تعیین حداقل فشار امتزاجی در نفت مخزن

همانطور که از نمودارها پیداست ، مقدار مینیمم فشار امتزاجی از تقاطع دو خط راست بدست آمده با شیب های متفاوت محاسبه می گردد. نتایج این شبیه‌ساز (Eclipse300)، در جدول ۱۳ نمایش داده شده است .

جدول ۱۳- نتایج شبیه ساز Eclipse300

www.SID.ir

Archive of SID

حداقل فشار امتزاجی نفت مخزن (اتمسفر)	سیال تزریقی
>۱۰۰۰	N2
۶۴۵	CO2
۹۰۰	C1
۶۱۵	گاز لایه گازی

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده می توان جهت حصول اطمینان از شبیه سازی رفتار سیال مخزن با استفاده از نرم افزار PVTi که در مدلسازی مخزن اهمیت بسزایی دار از شبیه سازی آزمایش لوله قلمی با استفاده شبیه ساز (Eclipse300) استفاده نمود. حد اکثر اختلاف MMP مربوط به گاز C1 می باشد که برابر ۲/۲ پام می باشد.

منابع

1- Bermude l. & Russell t.j., “parametric Investigation of wag floods Above the mme”, paper spe 84366, Presentation at technical conference denver, 5-8. Oct 2007.

2- Jesus b., Ramachandran v. & martin j.b., “a multiscale methodology for simulating miscible gas injection projects applied to the rod field in algeria” spe 90247-ms, spe annual technical conference and exhibition, Houston, Texas, 26-29 September 2004.

3- Klov m. & Hustod n., “experimental investigation of various methods of tertiary gas injection”, paper spe 80579,presented at the 2003 society of petroleum engineers annual technical conference and exhibition, houston usa., 13-17. Apr 2003.

4- Lake l.w. & Holstein e.d., “petroleum engineering handbook; volume v, reservoir engineering and petrophysics”, society of petroleum engineers, 2007.

5- teknica petroleum services ltd. “enhanced oil recovery”, calgary, alberta, June 2001.

6- Nasir F.M. & Amiruddin N.A.” Miscible CO2 Injection; Sensitivity to Fluid Properties”, Paper SPE 115314, presentation at 2008 SPE ASIA.

www.SID.ir