

بررسی آزمایشگاهی اثر درجه سنگینی نفت در تزریق آب کربناته و مقایسه آن در تزریق ثانویه و ثالثیه

محمد جواد شکری افرا، بهزاد رستمی*، محسن بهالو هوره و حمیدرضا نوروزی

انستیتو مهندسی نفت، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۵/۴/۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

تزریق آب کربناته (آب اشباع از دی‌اکسیدکربن)، یکی از روش‌های ازدیاد برداشت است که در طول این فرآیند دی‌اکسیدکربن بدون ایجاد فاز جدیدی، از فاز آبی به فاز نفت منتقل می‌شود. به دلیل انحلال‌پذیری بیشتر دی‌اکسیدکربن در نفت نسبت به آب (در دما و فشار یکسان)، دی‌اکسیدکربن از آب به نفت منتقل می‌شود و در اثر انحلال دی‌اکسیدکربن در نفت، ویسکوزیته نفت کاهش یافته و درعین حال نفت متورم می‌شود که در بالا بردن میزان بازیافت نهایی موثر خواهد بود. در این میان، مطالعات اندکی اثر درجه سنگینی نفت را در تزریق ثانویه و ثالثیه آب کربناته در ماسه فشرده مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه سعی شده است با استفاده از انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه در دما و فشار مخزن با استفاده از نفت یکی از مخازن ایران، اثر سنگینی نفت در بازیافت بررسی شود. نتایج نشان می‌دهد با کاهش API و افزایش میزان گرانیوی نفت اگر چه میزان بازیافت کلی چه در تزریق آب کربناته و چه در تزریق آب نمک کاهش پیدا می‌کند اما در تزریق آب کربناته به علت بهبود تحرک‌پذیری نفت نسبت به سیال تزریقی، عملکرد تزریق آب کربناته نسبت به آب نمک افزایش پیدا خواهد کرد، به طوری که اگر تزریق به صورت ثانویه انجام شود میزان بازیافت نفت نسبت به حالت تزریق ثالثیه بیشتر خواهد بود. همچنین با سنگین تر شدن نفت اختلاف میزان بازیافت آب نمک و آب کربناته افزایش می‌یابد که بیانگر اولویت تزریق آب کربناته در مخازن نفت سنگین خواهد بود.

کلمات کلیدی: آب کربناته، درجه سنگینی نفت، ازدیاد برداشت نفت، سیلاب زنی مغزه، مکانیسم تولید.

مقدمه

مشکل اساسی در تزریق دی‌اکسیدکربن در بسیاری از مخازن گزارش شده است [۲]. این بازده پایین به صورت چشمگیری تماس بین نفت باقی مانده در مخزن و دی‌اکسیدکربن تزریقی را کاهش می‌دهد، در نتیجه عملکرد تزریق دی‌اکسیدکربن به شدت کاهش می‌یابد. افزایش ازدیاد برداشت با استفاده از تزریق دی‌اکسیدکربن، نیاز به منابع فراوان و در

تزریق دی‌اکسیدکربن به عنوان روشی اثبات شده در ازدیاد برداشت شناخته می‌شود، در حالی که به علت ویسکوزیته پایین دی‌اکسیدکربن و در نتیجه تحرک‌پذیری بالای آن، با بازده جاروب پایینی همراه است [۱]. بازده پایین جاروب مخزن به عنوان یک

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
brostami@ut.ac.ir

بنابراین جهت ارتقاء بازده ازدیاد برداشت دو فرآیند قبلی، از روش تزریق آب کربناته استفاده می‌شود. در تزریق آب کربناته، دی‌اکسید کربن در آب یا آب‌نمک، قبل از تزریق به مخزن حل می‌شود. به علت انحلال پذیری بالای دی‌اکسید کربن در نفت، دی‌اکسید کربن از آب به نفت انتقال یافته و خواص سیال مخزن را تغییر می‌دهد [۱۰]. تزریق آب کربناته می‌تواند تماس بیشتری را بین گاز و نفت نسبت به تزریق گاز به صورت فاز آزاد ایجاد کند. به‌عنوان یک روش ازدیاد برداشت، تزریق آب کربناته نه تنها می‌تواند ویسکوزیته نفت را کاهش و نسبت تحرک پذیری را بهبود ببخشد بلکه می‌تواند تنش سطحی بین آب و نفت را نیز کاهش دهد. اثر تورم که به علت انحلال گاز در نفت به وجود می‌آید سبب ارتباط مجدد قطرات نفت جدا افتاده شده و بازیافت بیشتر می‌شود [۱۱]. مطالعات متعددی برای بررسی و ارزیابی اثر آب کربناته در تولید نفت انجام شده است [۱۲ تا ۱۶]. برای آگاهی از مکانیسم‌های تزریق آب کربناته در مقیاس حفره، از آزمایش‌های میکرومدل با جریان مستقیم فشار بالا استفاده شده است که نشان می‌دهد بازیافت نفت اضافی در هر دو نفت سنگین و سبک توسط مکانیسم‌های مختلفی صورت می‌پذیرد و اثر غالب ازدیاد برداشت توسط تزریق آب کربناته در نفت سبک، تورم نفت و ارتباط مجدد نفت‌های جدا افتاده در فضای حفرات می‌باشد، در حالی که در نفت‌های سنگین کاهش ویسکوزیته علت اصلی ازدیاد برداشت است [۱]. کچوت و همکاران با سیلاب زنی مغزه توسط آب کربناته و استفاده از نمونه دکان خالص و نفت مرده به عنوان سیال مخزنی نشان دادند، تزریق آب کربناته در هر دو بازیافت ثانویه و ثالثیه در فرآیند بازیافت نفت باعث افزایش ازدیاد برداشت خواهد شد. در این میان تزریق ثالثیه آب کربناته باعث ازدیاد بیشتر نفت نسبت به تزریق آب شده و از نظر

دسترس از این گاز دارد، همچنین به علت بازیافت پایین و رسیدن سریع گاز به چاه تولیدی و نیاز به جداسازی دی‌اکسید کربن و تزریق دوباره گاز، اجرای پروژه تزریق از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد [۱ و ۲].

همچنین تزریق ثانویه آب سبب ایجاد لایه‌های آبی بین قطرات نفت ایزوله شده در حفرات می‌شود و عملکرد تزریق دی‌اکسید کربن در تزریق ثالثیه را کاهش می‌دهد. این اثر انسداد آب^۱، از تماس مستقیم گاز و نفت جلوگیری کرده و در نتیجه بازده انحلال گاز در نفت کاهش پیدا می‌کند [۱]. این اثر به صورت آزمایشگاهی [۳]، مشاهده‌ای [۴] و تئوری [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. از دیدگاه ذخیره گاز نیز، ذخیره دی‌اکسید کربن به عنوان فاز آزاد در مخزن خطر شدید انتشار به خارج از مخزن را به دنبال دارد [۶].

مرحله تکمیلی ازدیاد برداشت بر اساس روش تزریق مستقیم دی‌اکسید کربن، تزریق متناوب آب و گاز می‌باشد. گاز تزریقی در این فرآیند، مخلوطی از گاز طبیعی مایع و دی‌اکسید کربن است. تزریق متناوب آب و گاز سبب بهبود و اصلاح تحرک پذیری بالای گاز و همچنین تحرک پذیری پایین سیال مخزن می‌شود [۷]. در این فرآیند تزریق آب و گاز در دوره‌های زمانی مشخصی انجام می‌شود [۸]. عملکرد تزریق متناوب آب و گاز تحت تأثیر عوامل زیادی همچون شرایط مخزن، خواص سیالات، تکنیک تزریق و عوامل تزریق همچون نسبت و اندازه توده‌های تزریقی آب و گاز می‌باشد [۷]. تزریق متناوب آب و گاز به علت ازدیاد برداشت بیشتر نسبت به تزریق مستقیم گاز در صنعت نفت مورد توجه قرار گرفته است، در حالی که به علت حضور لایه‌های آب بین قطرات جدا افتاده نفت در حفرات، عملکرد ضعیفی را به دنبال دارد. اثر انسداد آب از تماس مستقیم گاز و نفت جلوگیری کرده و در نتیجه میزان انحلال دی‌اکسید کربن در آب کاهش پیدا می‌کند [۹].

1. Water Blocking Effect
2. Water Alternating Gas

نشان داد که تزریق آب کربناته باعث ازدیاد برداشت بیشتر نفت در حدود ۱۲ تا ۲۳٪ حجم حفرات نسبت به تزریق آب در تزریق ۵ حجم فضای متخلخل سنگ می‌شود، درحالی‌که در مدل شیشه‌ای، تورم قطرات نفت احاطه شده توسط آب در اثر نفوذ دی‌اکسیدکربن موجود در آب به نفت مشاهده می‌شود.

با توجه به مطالعات صورت گرفته، افزایش ازدیاد برداشت توسط تزریق آب کربناته اثبات شده است اما تاکنون اثر درجه سنگینی نفت برای تعیین اولویت تزریق آب کربناته یا آب‌نمک به مخزن به صورت متمرکز مورد مطالعه قرار نگرفته است، لذا در این مطالعه سعی شده است که این اثر توسط سیلاب‌زنی مغزه در ماسه سنگ فشرده در دما و فشار مخزن در تزریق ثانویه و ثالثیه آب کربناته مورد بررسی قرار گیرد و میزان ازدیاد برداشت نفت نسبت به تزریق آب‌نمک مقایسه و عوامل مؤثر در تولید بیشتر آب کربناته مورد بررسی قرار گیرند.

روش کار

مشخصات ماسه

ماسه‌های استفاده شده در این مطالعه مربوط به یکی از مخازن جنوب ایران می‌باشد. جهت از بین بردن نفت و آب‌نمک موجود درون ماسه‌ها از تولوئن و متانول استفاده شده است. مشخصات ماسه‌های فشرده در آزمایشات در جدول ۱ آورده شده است. قطر همه مغزه‌ها ۳/۷۶ cm می‌باشد.

جدول ۱ مشخصات مغزه‌های مورد استفاده.

شماره آزمایش	نفت مخزن	طول (cm)	تخلخل (%)	تراوایی (داری)	اشباع آب کاهش نیافتنی (%)
۱	A	۲۰/۲	۳۱/۲	۵/۸	۲۱/۱
۲	B	۲۰/۵	۳۳/۲	۵/۵	۲۶/۱
۳	C	۲۰/۳	۳۱/۷	۵/۹	۱۹
۴	A	۲۰/۹	۳۱/۳	۵/۴	۱۹/۸
۵	B	۲۰/۵	۳۱/۴	۵/۹	۱۷/۸
۶	C	۲۰/۵	۳۱	۶	۱۴/۵
۷	B	۲۰/۵	۳۲/۲	۵/۷	۱۷/۹

ذخیره دی‌اکسید کربن، ۴۶٪ میزان گاز تزریقی در تزریق آب کربناته در مخزن ذخیره می‌شود [۱۰]. بازیافت نفت توسط تزریق آب کربناته، امکان ذخیره گاز به صورت محلول در فضای حفرات را نیز فراهم می‌کند. این فرآیند خطر مهاجرت گاز را به علت نیروی شناوری گاز از بین می‌برد. علاوه بر این، آب کربناته به علت چگال‌تر بودن نسبت به آب‌نمک موجود در مخزن، در قسمت پایینی مخزن جای گرفته و به صورت ایمن ذخیره می‌شود [۱۷]. نتایج آزمایش‌های مارتین و همکاران حاکی از افزایش ۱۲٪ ازدیاد برداشت به علت تزریق آب کربناته است. همچنین ازدیاد برداشت نفت به صورت مستقیم، متناسب با میزان کربناته شدن آب است و میزان بسیار کمی از ازدیاد برداشت نفت در کربناته شدن پایین آب مشاهده می‌شود که این اثر در نفت‌هایی با API سبک‌تر شدیدتر می‌باشد [۱۸].

پرز و همکاران میزان آشام آب کربناته در مخازن شکافدار را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که آب کربناته توانایی تولید نفت بیشتری (حدود ۱۰-۱۶٪) نسبت به آب غیراشباع دارد [۱۹]. مساوات و ترابی نیز تزریق ثالثیه آب کربناته را بررسی و دریافتند که با افزایش فشار، میزان بازیافت در حدود ۸/۲٪ افزایش می‌یابد که این امر نشان دهنده انحلال بیشتر گاز دی‌اکسید کربن در آب تزریقی است [۲۰]. نتایج آزمایش‌هایی که توسط قسمت تحقیقاتی شرکت شل بر روی تزریق آب کربناته در محیط متخلخل [۲۱] و مدل شیشه‌ای [۲۲] انجام شد،

مشخصات نفت

تمام نفت‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نفت‌های خام میادین ایران می‌باشند. به علت وجود احتمال آب به صورت امولسیون در نفت از دی‌امولسی‌فایر و گرما دادن جهت جداسازی آب از نفت استفاده شد. گرانیروی نفت‌ها و تنش میان رویه آب‌نمک-نفت و آب‌کربناته-نفت اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که گرانیروی‌ها و تنش میان رویه در دمای ۸۰°C و فشار ۲۰۰۰ پام اندازه‌گیری شده است که در جدول ۲ آورده شده است.

مشخصات آب‌نمک و آب‌کربناته

آب‌نمک مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از آب مقطر و نمک سدیم کلرید در غلظت ۴۰۰۰۰ ppm تهیه شده است. دانسیته و گرانیروی آب‌نمک تهیه شده در دما و فشار آزمایش اندازه‌گیری شده و در جدول ۳ آورده شده است. جهت تهیه آب‌کربناته نیز از آب‌نمک ۴۰۰۰۰ ppm سدیم کلرید استفاده شده است. دی‌اکسیدکربن مورد استفاده در تهیه آب‌کربناته دارای خلوص ۹۹/۹۹٪ بوده است. مقدار دی‌اکسیدکربن محلول در آب‌نمک مورد استفاده در دما و فشار آزمایش، ۱۸/۹ cc استاندارد گاز در ۱ cc از آب‌نمک محاسبه شده است [۲۳].

تجهیزات آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش‌های تزریق آب‌کربناته از مجموعه دستگاه‌های آزمایشگاهی دما و فشار بالا استفاده شده است. این تجهیزات شامل پمپ تزریق پیستونی^۱، مخازن جابجایی سیال تزریقی^۲، مغزه نگه‌دار^۳، آون گرمایی^۴ و رگلاتور تثبیت فشار^۵ هستند. شماتیکی از تمام وسایل استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. تجهیزات ذکر شده از قسمت آزمایشگاه تزریق گاز انستیتو مهندسی نفت دانشگاه تهران مورد استفاده قرار گرفتند.

شیوه انجام آزمایش‌ها

پس از اینکه طول ماسه فشرده به‌اندازه مورد نظر تهیه شد در مغزه نگه‌دار قرار داده می‌شود و فشار جانبی توسط پمپ اعمال می‌شود. فشار جانبی اعمال شده در همه آزمایش‌ها ۱۰۰۰ پام بیشتر از فشار منفذی بوده است. پس از اطمینان از هم‌دما شدن سل‌های انتقال و مغزه نگه‌دار با دمای آون، فرآیند ایجاد اشباع آب کاهش نیافتنی آغاز می‌شود. در این فرآیند نفت به مغزه نگه‌دار که به‌صورت عمودی قرار دارد، از بالا تزریق می‌شود و آب خروجی در لوله‌های مدرج جمع‌آوری می‌گردد.

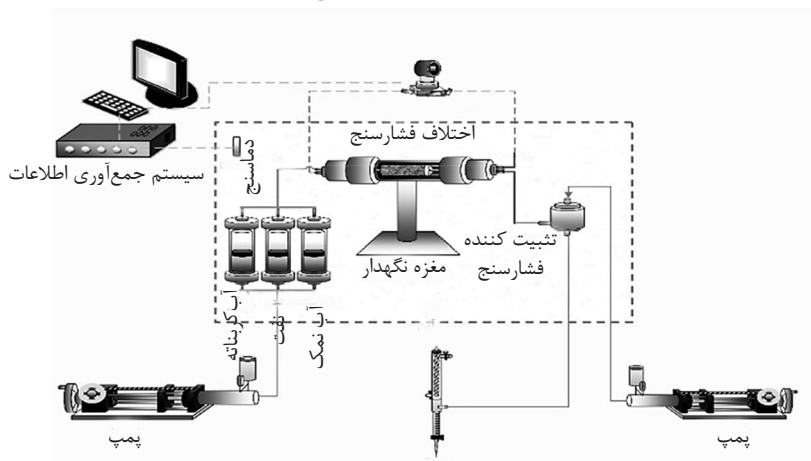
جدول ۲ گرانیروی نفت و تنش میان رویه آب‌نمک و آب‌کربناته با نفت.

نوع نفت	گرانیروی در دمای ۸۰ °C و فشار ۲۰۰۰ پام برحسب cP	تنش میان رویه در دمای ۸۰ °C و فشار ۲۰۰۰ پام (mN/M)	
		آب‌نمک	آب‌کربناته
نفت A	۲/۷۷	۳۵/۳	۳۴/۷
نفت B	۴۰/۶	۳۲/۲	۳۰
نفت C	۲۸۲/۵	۲۹/۱	۲۷/۴

جدول ۳ گرانیروی و دانسیته آب‌نمک و آب‌کربناته.

نوع آب	گرانیروی در دمای ۸۰ °C و فشار ۲۰۰۰ پام برحسب cP	وزن مخصوص در دمای ۸۰ °C و فشار برحسب ۲۰۰۰ پام
آب‌نمک	۰/۴۰۱	۱/۰۰۴۹
آب‌کربناته	۰/۵۰۸	۱/۰۰۷۹

1. Positive Displacement Pump
2. Transfer Vessel
3. Core Holder
4. Oven
5. Back Pressure Regulator (BPR)



شکل ۱ شماتیک تجهیزات مورد استفاده در آزمایشات.

بلافاصله فرآیند تزریق سیالات انجام شده است. در قسمت اول از تزریق ثانویه آب کربناته جهت بازیافت نفت‌های A, B, C استفاده شده است و در قسمت بعد توانایی آب کربناته در بازیافت نفت در تزریق ثالثیه مورد بررسی قرار گرفت.

بحث و نتایج

مشخصات آزمایش‌ها به همراه نتایج شامل نوع نفت، شیوه تزریق، سیال تزریقی و ضریب بازیافت در میان‌شکنی در جدول ۴ آورده شده است. دما و فشار آزمایش‌ها با توجه به دما و فشار مخزنی که نفت از آن انتخاب شده در دمای 80°C و فشار ۲۰۰۰ پام می‌باشد. برای بررسی بهتر نتایج، تزریق ثانویه و ثالثیه در دو گروه مجزا مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

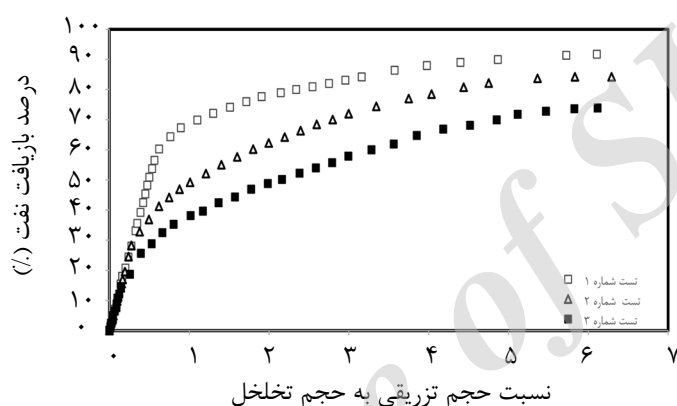
تزریق ثانویه

در شکل ۲ میزان بازیافت نفت‌های A تا C در تزریق ثانویه آب کربناته برحسب حجم متخلخل تزریقی رسم شده است. با توجه به شکل در قسمتی از نمودار که داده‌های تولیدی از خط راست اولیه به سمت پایین منحرف می‌شوند زمان میان‌شکنی آب کربناته رخ می‌دهد که با افزایش گرانیوی نفت مخزن، به علت نامناسب‌تر شدن نسبت تحرک‌پذیری زمان میان‌شکنی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش گرانیوی نفت‌های مورد آزمایش مقدار بازیافت نهایی را نیز کاهش می‌دهد. بیشترین مقدار بازیافت در نفت A که دارای کمترین گرانیوی است، به‌دست آمده است.

پس از خروج نفت از پایین مغزه نگهدار که در کمتر از یک حجم متخلخل رخ می‌دهد دبی تزریق نفت به‌صورت مرحله‌ای افزایش می‌یابد. نفت به مقدار دو برابر حجم متخلخل به ماسه فشرده تزریق می‌شود. در این زمان که دیگر آبی از ماسه فشرده تولید نمی‌شود مغزه نگهدار به حالت افقی تغییر وضعیت داده و به تثبیت‌کننده فشار متصل می‌شود. در این مرحله فشار منفذی داخل ماسه فشرده و فشار جانبی آن به‌صورت پلکانی افزایش می‌یابد تا اینکه به فشار آزمایش یعنی ۲۰۰۰ پام برسد. در این شرایط کمی نفت به مغزه نگهدار تزریق می‌شود تا این که تراوایی ماسه فشرده در اشباع آب کاهش نیافتنی اندازه‌گیری شود. پس از اتمام این مراحل زمان آغاز آزمایش فرار می‌رسد. جهت تزریق ثانویه، آب کربناته به مغزه نگهدار تزریق می‌شود. اگر نوع تزریق ثالثیه باشد ابتدا آب‌نمک به مغزه نگهدار تزریق شده و پس از تزریق چند حجم متخلخل و عدم تولید نفت، آب کربناته به آن تزریق خواهد شد. تمام آزمایشات به صورت تزریق با نرخ ثابت ۳۶ cc در ساعت انجام شده‌اند. در خروجی، نفت تولیدی و پس از میان‌شکنی، آب و نفت تولیدی در لوله مدرج ۱۰ cc جمع‌آوری می‌شود. با داشتن زمان تعویض هر لوله و مقدار حجم آب و نفت تولیدی در هر کدام از آن‌ها می‌توان نمودار تولید برحسب زمان را به‌طور کامل رسم کرد. در همه آزمایشات پس از ساخت ماسه فشرده، اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی، ایجاد اشباع آب همزاد، فشار افزایشی صورت گرفته و

جدول ۴ نتایج کلی آزمایشات.

شماره آزمایش	نفت مخزن	شیوه تزریق	سیال تزریقی	بازیافت در میان‌شکنی (%)	بازیافت نهایی آب‌نمک (%)	بازیافت نهایی آب‌کربناته (%)
۱	A	ثانویه	آب‌کربناته	۵۶/۵	-	۹۱/۷
۲	B	ثانویه	آب‌کربناته	۲۸/۳	-	۴۸/۲
۳	C	ثانویه	آب‌کربناته	۱۴/۵	-	۷۳/۱
۴	A	ثالثیه	آب‌نمک - آب‌کربناته	۴۶/۴	۶۳/۷	۶۸/۵
۵	B	ثالثیه	آب‌نمک - آب‌کربناته	۱۸/۵	۳۶/۴	۷۴/۱
۶	C	ثالثیه	آب‌نمک - آب‌کربناته	۱۰/۵	۲۳/۶	۶۲/۲
۷	B	ثانویه	دی‌اکسیدکربن	۱۷/۲	-	۵۲/۸



شکل ۲ میزان بازیافت تزریق ثانویه آب‌کربناته.

بیشتر از سایر نفت‌ها می‌باشد. مقایسه شکل ۳ و شکل ۴ بیانگر این نکته است که مقدار نهایی بازیافت در تزریق ثانویه برای همه نفت‌ها بیشتر از مقدار آن در حالت ثالثیه است.

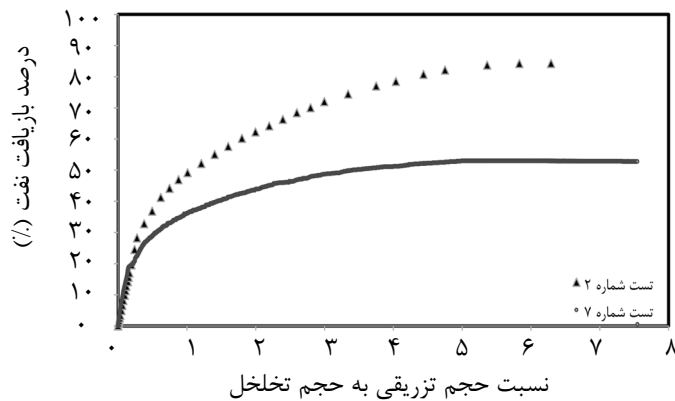
بررسی اثر درجه سنگینی و گرانی نفت

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، افزایش گرانی به صورت سیستماتیک در کاهش مقدار بازیافت در میان‌شکنی و کاهش مقدار بازیافت نهایی یک حجم متخلخل و کاهش مقدار بازیافت نهایی در تزریق ثانویه آب‌کربناته تأثیرگذار است. یکی از دلایل کاهش مقدار تولید، نسبت تحرک‌پذیری آب‌کربناته تزریقی و نفت موجود در مخزن است. جهت جابجایی ایده‌آل و حرکت کاملاً پیوستونی سیال تزریقی و سیال موجود در مخزن، نسبت تحرک‌پذیری باید نزدیک به یک باشد.

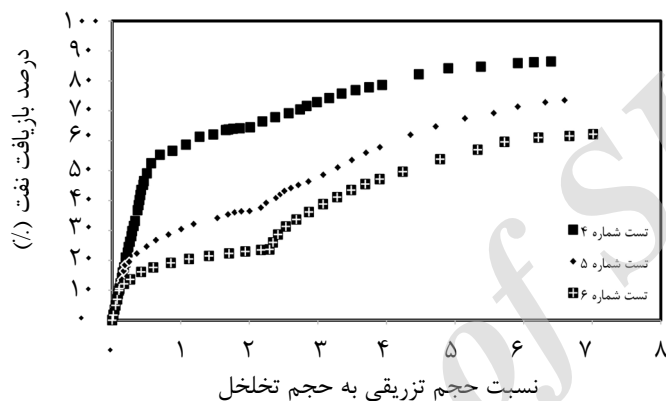
آزمایش دیگری که در حالت ثانویه انجام شده است، تزریق گاز دی‌اکسیدکربن در ماسه فشرده، حاوی نفت B می‌باشد. این آزمایش جهت مقایسه حالت‌های مختلف تزریق در بازیافت از این نفت در نظر گرفته شده است. نتایج کاهش توانایی تولید در استفاده از دی‌اکسیدکربن به جای آب‌کربناته را نشان می‌دهد. این اثر از کاهش شدید گرانی و سیال تزریقی به وجود می‌آید.

تزریق ثالثیه

در تزریق ثالثیه ابتدا آب‌نمک تزریق شده است، پس از اینکه سرعت تولید نفت به صفر رسید و تولید آن متوقف شد، تزریق آب‌کربناته آغاز می‌شود. اندکی پس از آغاز تزریق آب‌کربناته تولید نفت مجدداً آغاز می‌شود. در این آزمایش‌ها نیز مقدار بازیافت در نفت A که دارای گرانی کمتر است، هم در تزریق آب و هم در تزریق آب‌کربناته



شکل ۳ مقایسه میزان بازیافت دی‌اکسیدکربن در برابر آب‌کربناته.



شکل ۴ میزان بازیافت نالئیه آب‌کربناته.

همان‌طور که در رابطه ۱ مشخص است هر چه ویسکوزیته سیال تزریقی بیشتر شود و یا ویسکوزیته سیال درون مخزن کمتر شود نسبت حرکت‌پذیری به یک و حالت ایده‌آل نزدیک‌تر می‌شود.

$$M = \left(\frac{K_{rw}}{\mu_w} \right) \left(\frac{\mu_o}{K_{ro}} \right) \quad (1)$$

که K_{ro} و K_{rw} به ترتیب تراوایی نسبی آب و نفت و μ_o و μ_w ویسکوزیته آب و نفت هستند. در جدول ۵ مقادیر نسبت ویسکوزیته‌ها به عنوان نمایانگر نسبت حرکت‌پذیری محاسبه شده برای نفت‌های مختلف آمده است که همه مقادیر موجود در جدول بالاتر از عدد یک می‌باشند. مقدار تولید در زمان میانشکنی تابع عوامل متفاوت نظیر نسبت حرکت‌پذیری، تنش میان رویه، دبی تزریق، میزان ناهمگونی محیط متخلخل و ... می‌باشد.

در این آزمایشات طبق جدول ۲ تنش میان رویه آب‌کربناته-نفت تفاوت چندانی را با هم ندارند. از طرفی دبی تزریق هم در همه آزمایشات برابر است.

ماسه‌های استفاده شده از یک جنس بوده و طبق جدول ۱ دارای تخلخل و تراوایی مشابهی هستند؛ لذا عامل کنترل‌کننده مقدار تولید در زمان میانشکنی نسبت حرکت‌پذیری خواهد بود. از آنجایی که همه مقادیر گزارش شده در جدول بالاتر از یک می‌باشند، انتظار رفتار کاملاً پیوستونی وجود ندارد، اما تا زمان میانشکنی مقدار تولیدی برابر با مقدار تزریقی خواهد بود. هر چه نسبت حرکت‌پذیری بالاتر می‌رود، توانایی آب‌کربناته جهت جاروب سطح در تماس با ماسه کمتر می‌شود که موجب ایجاد کانال توسط آب‌کربناته از میان نفت و بروز پدیده انگشتی شدن خواهد شد. این اتفاق، میانشکنی زودتر را برای نفت‌های سنگین‌تر به همراه داشت. میانشکنی زودتر برای نفت‌های سنگین‌تر، باعث به جا ماندن نفت بیشتر و مناطق جاروب نشده خواهد شد. با تزریق پیوسته آب‌کربناته، مقداری از دی‌اکسیدکربن آب به نفت وارد شده و موجب تورم و کاهش گرانیروی آن خواهد شد.

جدول ۵ نسبت تحرک پذیری، ضریب تورم نفت های A,B,C

نوع نفت	نسبت ویسکوزیته ها	کل تولید/تولید پس از میانشکنی (%)	ضریب تورم	گرانروی نفت اشباع (cP)	نفت تولید شده بر اثر تورم (%)	کاهش نسبت ویسکوزیته ها (%)
نفت A	۵/۵	۳۸/۴	۱/۲۶	۲	۱۱/۳	۲۷/۸
نفت B	۷۹/۹	۶۶/۴	۱/۲۳	۲۰	۱۶/۵	۵۰/۷
نفت C	۵۵۶/۱	۸۰/۲	۱/۱۶	۷۰	۱۳/۷	۷۵/۲

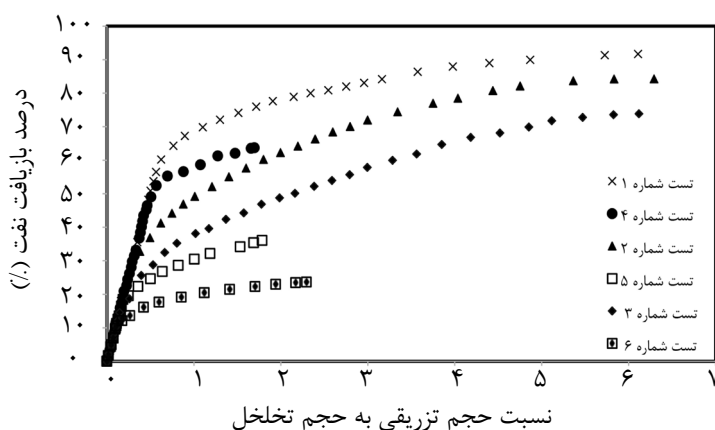
نفت، متفاوت می باشد و این تفاوت با افزایش API بیشتر می شود. به طوری که با افزایش گرانروی و سنگین شدن نفت ضریب نفوذ دی اکسیدکربن در نفت کاهش می یابد [۲۶]. این امر کنترل کننده سرعت انحلال دی اکسیدکربن در نفت و تورم می باشد، لذا با سبک شدن نفت تولید بیشتر در زمان میان شکنی دور از انتظار نخواهد بود. نکته دیگری که باید به آن توجه کرد، زمان رخداد میان شکنی در این آزمایش هاست که با انحلال دی اکسیدکربن در نفت گرانروی آن کاهش می آید و باعث بهبود بیشتر نسبت تحرک پذیری در نفت های سنگین تر می شود. پس در زمان میان شکنی هم تورم رخ خواهد داد و هم کاهش گرانروی که مورد دوم در نفت های سنگین غالب است. اما نتایج به دست آمده خلاف این امر را گزارش می دهد. با توجه به زمان میان شکنی که در نفت A نسبت به نفت های B و C به ترتیب دو و چهار برابر دیرتر صورت می گیرد، دی اکسیدکربن که دارای ضریب نفوذ بیشتری در این نفت است، زمان بیشتری جهت نفوذ به آن را نیز در اختیار خواهد داشت. اما در نفت های سنگین تر به علت مقدار کمتر ضریب نفوذ و زمان تماس بسیار کم، مقدار تورم و کاهش گرانروی در آنها تاثیر کمتری داشته است. در نتیجه در این قسمت می توان گفت به علت بیشتر بودن ضریب نفوذ گاز و مدت زمان بیشتر آب کربناته و نفت قبل از میان شکنی برای نفت سبک، دی اکسیدکربن بیشتری به نفت مخزن نفوذ کرده و موجب تولید بیشتر نفت در میان شکنی شده است.

تورم حاصل در نفت های موجود در مخزن سبب پیوستن قطرات نفت به هم و حرکت مجدد نفت توسط تزریق آب بعدی می شود. مقادیر ضریب تورم محاسبه شده [۲۴] برای نفت ها در جدول ۵ آورده شده است. همچنین مقادیر گرانروی نفت در صورتی که نفت ها به صورت کامل از دی اکسیدکربن اشباع شوند محاسبه شده [۲۵] و در جدول ۵ آمده است.

اگر اتمام تزریق آب کربناته که در آن تولید نفت متوقف شده است، مقارن با اشباع نفت از دی اکسیدکربن فرض شود، می توان عامل تولید نفت پس از میان شکنی را در تورم و کاهش گرانروی نفت جستجو کرد. ستون پنجم و ششم از جدول ۵ به ترتیب مقدار تولید از نفت به جامانده در زمان میان شکنی بر اثر تورم و مقدار کاهش نسبت ویسکوزیته ها بر اثر کاهش گرانروی نفت را نشان می دهد. این دو عامل به صورت مستقیم بر تراوایی نسبی آب کربناته و نفت مؤثر می باشند.

مقایسه تزریق ثانویه آب نمک و آب کربناته

همان طور که شکل ۵ روند تولید تزریق ثانویه آب کربناته و آب نمک را نشان می دهد. اولین تفاوت تزریق آب کربناته و آب نمک در زمان میان شکنی و مقدار بازیافت نفت آشکار می شود. همانطور که قبلا ذکر شد تا زمان میان شکنی مقدرا تولید برابر مقدار تزریق بوده و هر دو نمودار بر روی خط با شیب واحد قرار می گیرند. همانطور که در جدول ۶ مشخص است با افزایش گرانروی سیال تزریقی نسب تحرک پذیری کاهش می یابد. درصد کاهش نسبت ویسکوزیته برای هر سه نفت به یک اندازه می باشد. اما تفاوت در میان شکنی برای سه نمونه



شکل ۵ روند تولید نفت در تزریق ثانویه آب کربناته و آب نمک.

جدول ۶ نسبت‌های تحرک‌پذیری آب نمک-نفت و آب کربناته-نفت در تزریق ثانویه.

نوع نفت	گرانروی نفت به گرانروی آب نمک	گرانروی نفت به گرانروی آب کربناته	تفاوت بازیافت آب کربناته و آب نمک در میان‌شکنی (%)	ضریب نفوذ دی‌اکسیدکربن در نفت (m^2/s)
نفت A	۶/۹۲	۵/۵	۱۰/۱	$۲/۲۵ \times 10^{-9}$
نفت B	۱۰/۱/۵	۷۹/۹	۹/۸	$۶/۳۶ \times 10^{-10}$
نفت C	۷۰۶	۵۵۶/۱	۴	$۲/۵۵ \times 10^{-10}$

کرده و تاثیر به سزایی در تولیداز این مخازن دارد. مقایسه تزریق ثالثیه آب نمک و آب کربناته مخازن بسیاری در دنیا توسط آب سیلاب‌زنی شده‌اند، یا به علت بالا آمدن آبده توسط آب در برگرفته شده‌اند و یا اینکه در حال سیلاب‌زنی با آب می‌باشند. تزریق آب کربناته یا تعویض سیال تزریقی در این سه دسته از مخازن می‌تواند راهی ارزان برای افزایش تولید نسبت به سایر روش‌ها باشد. در ابتدا با مقایسه نتایج حاصل از تزریق ثانویه و ثالثیه آب کربناته که در شکل ۵ نشان داده شده است مشخص می‌شود که مقدار تولید در حالت ثانویه بیش از مقدار آن در حالت ثالثیه می‌باشد. این امر به علت کمتر بودن بازده جاروب آب نمک نسبت به آب کربناته است. حاصل این اتفاق ایجاد مسیرهایی با مقاومت کمک در برابر تزریق ثالثیه آب کربناته و عدم دسترسی به موقع آب کربناته به نفت‌های به‌جامانده می‌باشد. در جدول ۷ مقدار تفاوت این دو مقدار و درصد بهبود تولید ثانویه نسبت به ثالثیه گزارش شده است.

همان‌طور که در جدول ۷ در مقایسه تولید نفت در تزریق ثانویه آب نمک و آب کربناته مشاهده می‌شود، ستون اول حاصل تفاضل مقادیر نهایی تولید در آب کربناته و آب نمک است. ستون دوم از تقسیم ستون اول بر مقدار نهایی بازیافت در تزریق آب نمک به‌دست آمده است که این مقدار نشان دهنده میزان بهبود تولید در اثر استفاده از تزریق ثانویه آب کربناته نسبت به آب نمک می‌باشد. مشهود است که با افزایش گرانروی و کاهش API نفت به علت تورم و کاهش چشمگیر مقدار گرانروی و نسبت تحرک‌پذیری، مقادیر بهبود حاصل از تزریق آب کربناته افزایش می‌یابد. ستون سوم به مقایسه نسبی آب کربناته جهت تولید نفت پس از میان‌شکنی، نسبت به تولید نفت حاصل از تزریق آب نمک پس از میان‌شکنی می‌پردازد. مقادیر این ستون نشان‌دهنده توانایی زیاد آب کربناته در تولید نفت به جا مانده پس از میان‌شکنی است. همچنین با مقایسه این اعداد برای نفت‌های مختلف می‌توان دریافت که استفاده از آب کربناته نسبت به آب نمک برای نفت‌های سنگین تر بهبود بیشتری در بازیافت نفت حاصل

جدول ۷ میزان بهبود تولید در تزریق آب کربناته.

نوع نفت	تفاوت بازیافت نهایی ثانویه نسبت به ثالثیه (%)	درصد بهبود ثانویه به ثالثیه (%)	مشارکت آب کربناته از تولید نهایی تزریق ثالثیه (%)	سرعت میانگین تولید در تزریق ثالثیه آب کربناته (cc/min)	سرعت میانگین تولید در تزریق ثانویه آب کربناته (cc/min)
نفت A	۵/۲	۶	۲۶/۴	۰/۵۵	۰/۵۲۳
نفت B	۱۰/۱	۱۳/۶	۵۰/۹	۰/۰۸۹	۰/۴۶۵
نفت C	۱۰/۹	۱۷/۵	۶۲/۱	۰/۱۱۷	۰/۳۵۶

در تزریق ثالثیه آب کربناته مقادیر میانگین سرعت تولید در بازه افزایش API نفت افزایش می‌یابد و با اعداد موجود در سه ستون اول جدول ۷ نسبت مستقیم دارد. در تزریق آب کربناته مقادیر سرعت تولید افزایش می‌یابند تا اینکه به مقدار حداکثر برسد، پس از آن مجدداً روند نزولی یافته تا اینکه به صفر برسد و تولید نفت متوقف شود. در این بازه، کاهش نسبت تحرک پذیری و همچنین وجود گاز دی‌اکسید کربن موجب افزایش مقدار جاروب نفت و ایجاد بانک نفت جلوی جبهه تزریق خواهد شد. حجم این بانک نفت، به علت اثر نامطلوب آب در جاروب نفت A و وجود نفت در دسترس بیشتر در این حالت، بیشتر می‌باشد، لذا در این نفت سرعت متوسط تولید و سرعت لحظه‌ای در ابتدای تزریق آب کربناته و بیشینه سرعت حاصل از آن دارای مقدار بیشتری نسبت به سایر نفت‌ها خواهد بود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه دو دسته آزمایش تزریق ثانویه و ثالثیه آب کربناته در ماسه‌های تمیز با استفاده از سه نوع نفت متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه به صورت خلاصه عبارت‌اند از:

- با کاهش API و افزایش گرانیروی نفت بازیافت حاصل از تزریق آب‌نمک و آب کربناته کاهش می‌یابد. در این حالت به علت تشدید انحراف نسبت تحرک پذیری از مقدار ایده‌آل و عدم جاروب صحیح و نامناسب مخزن، نفت بیشتری در مخزن

در نفت سبک‌تر مقدار تولید حاصل از هر دو روش ثانویه و ثالثیه بیشتر از سایر نفت‌ها بوده و مقدار نهایی آنها به هم نزدیک‌تر می‌باشد. به بیان دیگر تزریق آب پیش از تزریق آب کربناته در نفت‌های سنگین‌تر به علت انحراف شدید نسبت تحرک پذیری از مقدار ایده‌آل دارای تأثیر بسیار نامطلوبی در بازه جاروب از طریق ایجاد کانال و انگشتی شدن مسیر تولید خواهد داشت که این امر سطح جاروب نشده زیادی را در مخزن به جا خواهد گذاشت. طبق این توضیح در نفت‌های سنگین‌تر حجم نفت‌های باقی‌مانده در مخزن بیشتر می‌باشد و در صورت تزریق آب کربناته مقدار نفت بیشتری جهت تولید در دسترس آب کربناته خواهد بود. شکل ۵ بیان‌گر این موضوع است که عمده تولید نفت در نفت‌های سبک‌تر از طریق تزریق آب نمک صورت می‌گیرد، اما با افزایش گرانیروی، نقش آب کربناته در تولید بهبود می‌یابد. اعداد جدول ۷ نشان‌دهنده مقدار مشارکت آب کربناته در تولید نهایی هستند، در حالی که در نفت سنگین ۶۲٪ از کل بازیافت، حاصل تزریق آب کربناته است، در نفت سبک آب کربناته تنها ۲۶٪ از تولید نهایی سهم دارد؛ به عبارت دیگر تزریق آب کربناته برای مخازن نفت سنگین که آب گرفته شده‌اند مزایا و ارزش افزوده بیشتری خواهد داشت.

همان‌طور که در جدول ۷ آورده شده است سرعت لحظه‌ای تولید و سرعت میانگین تولید در بازه تزریق آب کربناته با افزایش گرانیروی کاهش می‌یابد که مطابق با روند تولید نفت در آن می‌باشد؛ اما

- بازیافت حاصل از تزریق ثانویه آب کربناته بیشتر از مقدار آن در تزریق ثالثیه می‌باشد. دلیل این رخداد عدم جاروب مناسب آب‌نمک تزریق شده قبل از آب کربناته می‌باشد. به علت تشدید این اتفاق در نفت سنگین نفت بیشتری در دسترس آب کربناته جهت تولید قرار دارد. از این رو سهم تولید ثالثیه آب کربناته در نفت سنگین بیشتر از سهم آب‌نمک خواهد بود، اما در نفت سبک آب‌نمک مشارکت بیشتری در تولید دارد.

علائم و نشانه‌ها

D : داریسی

M : نسبت تحرک پذیری

K_{rw} : تراوایی نسبی آب (D)

K_{ro} : تراوایی نسبی نفت (D)

μ_w : ویسکوزیته آب (cP)

μ_o : ویسکوزیته نفت (cP)

باقی خواهد ماند که نتیجه آن کاهش مقدار بازیافت حاصل از این روش‌هاست.

- در تزریق ثانویه آب کربناته، با کاهش API به علت کاهش سرعت انحلال و مقدار انحلال گاز در نفت زمان بیشتری جهت مشاهده تأثیر آب کربناته بر تولید نیاز است، به همین علت بیشتر تولید نفت پس از میانشکنی صورت می‌گیرد؛ اما در نفت‌های سبک‌تر به علت کاهش زمان موردنیاز جهت نفوذ گاز به نفت و همچنین مناسب بودن نسبت تحرک‌پذیری اکثر تولید در زمان میانشکنی رخ می‌دهد.

- از مقایسه تزریق ثانویه آب‌نمک و آب کربناته نتیجه می‌رود که استفاده از آب کربناته نفت بیشتری را نسبت به آب‌نمک تولید خواهد کرد. این تفاوت در نفت‌های سنگین‌تر بیشتر مشاهده می‌شود. در نمونه نفت C حدود ۴۹٪ و در نفت A حدود ۲۸٪ افزایش تولید حاصل می‌شود.

مراجع

- [1]. Sohrabi M., Riazi M., Jamiolahmady M., Ireland S. and Brown C., "Mechanisms of oil recovery by carbonated water injection," in SCA annual meeting, 2009.
- [2]. Patel P. D., Christman P. G. and Gardner J. W., "Investigation of unexpectedly low field-observed fluid mobilities during some CO₂ tertiary floods," SPE Reserv. Eng., Vol. 2, No. 4, pp. 507-513, 1987.
- [3]. Wylie P. and Mohanty K. K., "Effect of water saturation on oil recovery by near-miscible gas injection," SPE Reserv. Eng., Vol. 12, No. 4, pp. 264-268, 1997.
- [4]. Campbell B. T. and Orr Jr F. M., "Flow visualization for CO₂/crude-oil displacements," Soc. Pet. Eng. J., Vol. 25, No. 5, pp. 665-678, 1985.
- [5]. Grogan A. T., Pinczewski V. W., Ruskauff G. J. and Orr Jr F. M., "Diffusion of CO₂ at reservoir conditions: models and measurements," SPE Reserv. Eng., Vol. 3, No. 1, pp. 93-102, 1988.
- [6]. Solomon S., The Bellona Foundation-Fact sheet: CO₂ Storage. 2007.
- [7]. Jiang H., Nuryaningsih L. and Adidharma H., "The Study of timing of cyclic injections in miscible CO₂ WAG," in SPE Western Regional Meeting, 2012.
- [8]. Rogers J. D. and Grigg R. B., "A literature analysis of the WAG injectivity abnormalities in the CO₂ process," in SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, 2000.
- [9]. Lin E. C. and Huang E. T. S., "The effect of rock wettability on water blocking during miscible displacement," SPE Reserv. Eng., Vol. 5, No. 2, pp. 205-212, 1990.

- [10]. Kechut N. I., Sohrabi M. and Jamiolahmady M., "Experimental and numerical evaluation of carbonated water injection (CWI) for improved oil recovery and CO₂ storage," in SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 2011.
- [11]. Riazi M., Sohrabi M., Jamiolahmady M. and Ireland S., "Oil recovery improvement using CO₂-enriched water injection," in EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition, 2009.
- [12]. Fathollahi A. and Rostami B., "Carbonated water injection: Effects of silica nanoparticles and operating pressure," Can. J. Chem. Eng., Vol. 9999, pp. 1–8, 2015.
- [۱۳]. رضایی م، آیت اللهی س. ش. و ریاضی م، "تجمع و رسوب آسفالتین در نمونه های نفتی با دما و فشار بالا مقایسه تزریق آب و آب کربناته،" اولین همایش ملی توسعه میادین نفت و گاز، تهران، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۳.
- [۱۴]. کریمی م. ر، هنرور ب، عرب ابوسعیدی ز. و رحیمی ع، "مطالعه آزمایشگاهی تغییرات کشش بین سطحی آب کربناته و نفت کزنج،" سومین کنفرانس بین المللی نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی بارویکرد توسعه ارتباط دولت، دانشگاه صنعت، تهران، موسسه مدیران خبره نارون، ۱۳۹۵.
- [15]. Seyyedi M. and Sohrabi M., "Enhancing water imbibition rate and oil recovery by carbonated water in carbonate and sandstone rocks," Energy & Fuels, Vol. 30, No. 1, pp. 285–293, 2015.
- [16]. Dong Y., Dindoruk B., Ishizawa C. and Lewis E. J., "An experimental investigation of carbonated water flooding," in SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2011.
- [17]. Burton M. and Bryant S. L., "Eliminating buoyant migration of sequestered CO₂ through surface dissolution: implementation costs and technical challenges," SPE Reserv. Eval. Eng., Vol. 12, No. 3, pp. 399–407, 2009.
- [18]. Martin J. W., "Additional oil production through flooding with carbonated water," Prod. Mon., Vol. 15, No. 7, pp. 18–22, 1951.
- [19]. Perez J. M., Poston S. W. and Sharif Q. J., "Carbonated water imbibition flooding: an enhanced oil recovery process for fractured reservoirs," in SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, 1992.
- [20]. Mosavat N. and Torabi F., "Experimental evaluation of the performance of carbonated water injection (CWI) under various operating conditions in light oil systems," Fuel, Vol. 123, pp. 274–284, 2014.
- [21]. van Dijk C., "Carbonated water flood," in Shell Internal Research Report R 1189, 1965.
- [22]. Falls A. H., Cherubini A. A. and Seunson S., "The response of South Wasson/Clearfork crude to carbonated water in an etched-glass model," Shell Internal Research Report, 1986.
- [23]. Duan Z. and Sun R., "An improved model calculating CO₂ solubility in pure water and aqueous NaCl solutions from 273 to 533 K and from 0 to 2000 bar," Chem. Geol., Vol. 193, No. 3, pp. 257–271, 2003.
- [24]. Simon R. and Graue D. J., "Generalized correlations for predicting solubility, swelling and viscosity behavior of CO₂-crude oil systems," J. Pet. Technol., Vol. 17, No. 1, pp. 102–106, 1965.
- [25]. Welker J. R., "Physical properties of carbonated oils," J. Pet. Technol., Vol. 15, No. 8, pp. 873–876, 1963.
- [26]. McManamey W. J. and Woollen J. M., "The diffusivity of carbon dioxide in some organic liquids at 25 and 50 C," AIChE J., Vol. 19, No. 3, pp. 667–669, 1973.