

## کاربرد تست‌های ردیاب تک چاهی و بین چاهی در پایش و ارزیابی عملکرد پروژه‌های ازدیاد برداشت نفت

مهدی زلفی، نغمه علی محمدی سلمانی، مرکز تحقیقات نفت تهران- دانشگاه صنعت نفت

### چکیده

ارزیابی و پایش عملکرد یک فرآیند ازدیاد برداشت یکی از مراحل کلیدی در مدیریت و موفقیت یک پروژه ازدیاد برداشت نفت است. تست‌های ردیاب، ابزاری موثر برای مانیتورینگ و مشخصه‌سازی مخزن به منظور کاهش ریسک و افزایش بازده است. مشخصه‌سازی اشباع نفت باقیمانده و مسیر تراوای بین چاهی در فرآیندهای ازدیاد برداشت معمولاً توسط ردیاب‌های شیمیایی و رادیواکتیو انجام می‌شود و معمولاً تست‌های ردیاب بصورت تک چاهی یا بین چاهی انجام می‌شود. مهمترین کاربرد آنها نیز تعیین ارتباط بین چاهی و اشباع نفت باقیمانده است. تست ردیاب شامل تزریق ردیاب همراه سیالات تزریقی (آب یا گاز) و مانیتورینگ آن در چاه‌های مجاور یا همان چاه است. ردیاب می‌تواند یک جزء سیال یا ایزوتوپ بی اثر باشد که در مخزن مورد آزمایش موجود نیست. اما معایب ردیاب‌ها قیمت بالای مواد مورد استفاده بعنوان ردیاب، زمان بر بودن جمع‌آوری داده و روش‌های تحلیلی تشخیصی، هزینه‌بر بودن آنالیز آزمایشگاهی و خطرات ایمنی مواد مورد استفاده است. مشخصات یک ردیاب خوب شامل قیمت پایین، پایداری در شرایط مخزن، استفاده آسان و سازگاری با محیط زیست است. همچنین ارائه روش‌های تشخیص و تفسیر سریع و مقرون بصره موجب گسترش این تکنولوژی می‌شود.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۱۰/۰۸

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۱۱/۲۸

### واژگان کلیدی:

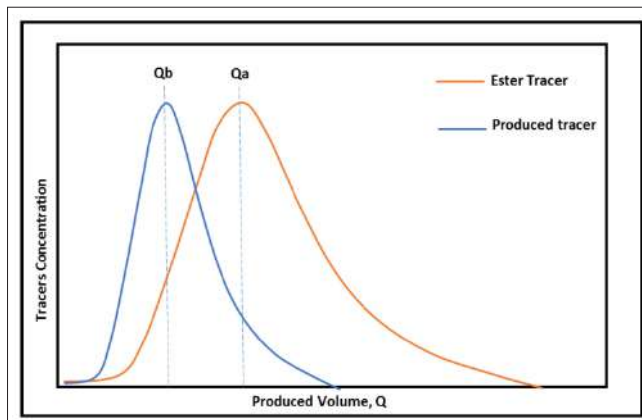
تست ردیاب، ازدیاد برداشت، اشباع نفت باقیمانده، تفسیر کیفی و کمی، پایش

### مقدمه

استفاده از حلال یا ماده شیمیایی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، تست ردیاب با تخمین میزان افزایش حجم جاروب شده و ضریب بازیافت ناشی از فرآیندهای ازدیاد برداشت نقش مهمی در زمینه ازدیاد برداشت دارد.

استفاده میدانی از ردیاب‌ها نشان از نقش بسزای آنها در تعیین خصوصیات مهم مخزن مانند ناهمگنی مخزن و اشباع سیالات دارد. تست‌های ردیاب به دو نوع تست‌های بین چاهی و تک چاهی تقسیم می‌شود. در تست‌های بین چاهی، ردیاب‌ها به یک یا چند چاه تزریق شده و از بقیه چاه‌ها تولید می‌شود. در حالی که در تست‌های تک چاهی، ردیاب‌ها به یک چاه تزریق شده و پس از مدت زمانی از بستن چاه، از همان چاه تولید می‌شود. این دو نوع تست مزایا و معایب متفاوتی دارند. بعنوان مثال، تست‌های بین چاهی به مساحت بیشتری از مخزن مورد بررسی دسترسی دارند و در نهایت اطلاعات بیشتری را جمع‌آوری می‌کنند. اما بازیافت ردیاب ممکن است سال‌ها به طول انجامد و آنالیز نتایج بدست آمده می‌تواند بسیار پیچیده باشد. از جمله اطلاعاتی که از تست‌های بین چاهی حاصل می‌شود، روند کلی حرکت سیالات در مخزن، لایه‌بندی، ناهمگنی سطحی، روند جریانات قطری در مخزن و اشباع سیالات است. در مقابل، انجام تست ردیاب تک چاهی کمتر از ۳ هفته زمان می‌برد. بعلاوه عدم قطعیت کمتری در آنالیز نتایج آن وجود دارد و چون

تست ردیاب<sup>۱</sup> ابزاری قدرتمند برای مانیتورینگ مخزن است. کسب اطلاعات دقیق از مخزن با صرف حداقل هزینه‌ها حاصل پیشرفت‌های اخیر در زمینه تکنولوژی ردیاب‌ها است. هدف از تکنولوژی ردیاب‌ها بهبود توصیف مخزن از طریق پاسخ دادن به ابهامات مربوط به ارتباط در مخزن و ارزیابی پتانسیل فرآیندهای بازیافت ثانویه و ثالثیه و نیز ترسیم نقشه جریان در مخزن و مکان‌یابی آب و گاز تزریقی به مخزن است. پیاده‌سازی و آنالیز یک تست ردیاب پیش از انجام فرآیندهای ازدیاد برداشت، اطلاعات مهم مورد نیاز برای متوازن نمودن حجم متخلخل جاروب شده و بهینه نمودن



نمودار معمول تولید ردیاب برای تفسیر تست ردیاب تک چاهی

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (m.zallaghi@put.ac.ir)

محدود به ناحیه کوچکتري از مخزن مورد مطالعه است اطلاعات کمتری به دست می آید.

تست ردیاب شیمیایی تک چاهی<sup>۲</sup> در سه دهه اخیر بعنوان روش قابل اعتمادی برای اندازه گیری اشباع نفت باقیمانده استفاده شده است. اساس این روش بر مبنای اختلاف زمان رسیدن دو ردیاب به سر چاه است (جابجایی زمانی). در واقع، بخشی از ردیاب تفکیک شونده‌ای که در مخزن تزریق می‌شود به فاز نفت باقیمانده وارد شده و بخش دیگر آن تحت یک واکنش هیدرولیز قرار گرفته و ردیاب دیگر را تولید می‌کند. این فرآیند هیدرولیز در بازه زمانی چند روزه‌ای که چاه بسته می‌شود، رخ می‌دهد. پس از آن تولید از چاه آغاز شده و نمونه‌های سرچاهی برای بازگشت ردیاب‌ها آنالیز می‌شوند. در آنالیز نمونه‌های برگشتی معمولاً غلظت ردیاب بر حسب حجم تولیدی رسم می‌شود (شکل ۱-). اشباع نفت باقی مانده<sup>۳</sup> براساس اختلاف زمان رسیدن دو ردیاب (قله دو نمودار) و مقدار ضریب تفکیک قابل محاسبه است. ضریب تفکیک خصوصیتی فیزیکی است که غلظت ردیاب‌ها در فاز آبی و نفتی در حالت تعادل را نشان می‌دهد.

تست ردیاب بین چاهی<sup>۴</sup> برای ارزیابی ناهمگنی مخزن، ارتباط بین چاه‌ها، موانع جریان، نواحی پرتراوا هرزروی<sup>۵</sup>، شکستگی‌های ارتباط دهنده چاه‌های تولیدی-تزریقی، مسیرهای جریان و اشباع نفت باقیمانده استفاده می‌شود. بعنوان مثال، زمان میان‌شکن شدن کوتاه ردیاب، نشان‌دهنده وجود یک کانال تراواست. در مقابل، اگر میان‌شکن شدن هرگز اتفاق نیفتد، نشان از عدم ارتباط چاه تولیدی و تزریقی دارد. هرگونه تاخیر در پاسخ ردیاب نیز نشان‌دهنده موانع جریان یا مسیرهای جریان جهت‌دار است. مزیت تست ردیاب بین چاهی نسبت به آزمایش افت فشار در این است که ارزیابی مستقیمی از یک جفت چاه تولیدی-تزریقی به دست می‌آورد. در حالی که آزمایش افت فشار، انتقال‌پذیری متوسط مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهد. تست ردیاب بین چاهی شامل تزریق یک یا چند ردیاب به همراه سیالات تزریقی و به دنبال آن تزریق سیال بدون ردیاب به مخزن و مانیتورینگ ردیاب در چاه‌های تولیدی است.

#### ۱- پیشینه تحقیق

تست‌های ردیاب در دو حالت تک چاهی و بین چاهی طراحی و اجرا می‌شوند. ردیاب‌ها اغلب برای ارزیابی طرح‌های ازدیاد برداشت استفاده می‌شود. تست ردیاب شیمیایی تک چاهی<sup>۶</sup> در یک چاه انجام می‌شود و شامل تزریق سیال آبی حاوی ردیاب شیمیایی

و تولید آن در همان چاه است. برای تهیه آب تزریقی معمولاً از آب تولید شده از خود سازند استفاده می‌شود. این یک روش درجا برای اندازه گیری اشباع سیالات در مخزن است که در آن اغلب اشباع نفت باقیمانده و در برخی موارد اشباع آب ذاتی اندازه گیری می‌شود. اخیراً این تست برای اندازه گیری جریان کسری آب/نفت در اشباع سیالات اندازه گیری شده برای حالت دو فاز متحرک آب و نفت گسترش یافته است. این روش در ابتدا برای تعیین اشباع نفت هدف قبل از آغاز عملیات ازدیاد برداشت نفت استفاده می‌شود تا اثربخشی عامل ازدیاد برداشت در یک چاه پایلوت اندازه گیری شود و سپس برای اندازه گیری اشباع آب اولیه به منظور ارزیابی بهتر، حجم نفت درجا استفاده می‌شود. اندازه گیری جریان کسری، یک ورودی واقع بینانه برای مدل‌های شبیه‌سازی مورد استفاده در محاسبه عملکرد سیلابزنی فراهم می‌کند.

تست ردیاب بین چاهی<sup>۷</sup> با استفاده از یک جفت چاه تزریقی و تولیدی برای بررسی ارتباط بین چاه تزریقی و تولیدی (مسیر حرکت سیال)، زمان میان‌شکن شدن سیال تزریقی، ارزیابی بازده جارویی و توزیع اشباع سیالات، طراحی و اجرا می‌شود. تخمین زمان میان‌شکن شدن در ارزیابی مدل‌های استاتیک و دینامیک برای بررسی طرح‌های پایلوت ازدیاد برداشت ضروری است. داده‌های تست ردیاب تنها منبع کسب اطلاعات در مورد انتقال جرم از مشاء یک چاه تزریقی خاص درون مخزن است. با تفسیر داده‌های تولیدی ردیاب (غلظت بر حسب زمان) ارتباط بین چاه تزریقی و تولیدی مانند توپولوژی مخزن بدست می‌آید.

الاباد و همکاران (۲۰۱۶) برای تعیین اشباع سیالات، یک تست ردیاب تک چاهی در یک مخزن کربناته طراحی و اجرا کردند. مخزن مورد بررسی مخزنی ناهمگن با لایه‌های سنگ آهک با تراوایی متغیر کم تا زیاد و تخلخلی در محدوده ۲۰ تا ۳۰ درصد به همراه لایه‌های پراکنده دولومیت و پوش سنگ بسیار سخت از ایندیریت بود. تست ردیاب به منظور تعیین اشباع نفت باقیمانده پیش از اجرای پایلوت بهبود باز یافت نفت و در محدوده بالغی از مخزن و نزدیک به چاه‌های تزریقی آب انجام شد. نتایج تست میدانی، اشباع نفت باقیمانده برابر  $0/5 \pm 21/7$  درصد تعیین کرد. به علاوه، موازنه مواد ردیاب نشان داد که بیش از ۹۸ درصد از ردیاب تزریقی دوباره تولید شده است. بعبارت دیگر، میزان جذب ردیاب ناچیز بوده است. الموتیری و همکاران (۲۰۱۵) در مطالعه خود تست‌های ردیاب انجام شده در دو چاه از مخزن کربناته ساما<sup>۸</sup> را با استفاده از دو مدل تک چاهی شبیه‌سازی کردند. تطابق خوب موازنه مواد ردیاب

باقی می‌ماند. هر دو ردیاب توسط همان چاه تزریقی در فاصله چند روز دریافت می‌شوند و اشباع نفت باقیمانده براساس اختلاف مدت زمان رسیدن به چاه، تخمین زده می‌شود.

تست ردیاب بین چاهی در محدوده چند صد متر بین چاه تزریقی و تولیدی انجام می‌شود. مفهوم اساسی در این نوع تست، تزریق ردیاب شیمیایی یا رادیواکتیو منحصر به فرد و پایداری است که با سنگ یا نفت مخزن واکنش نمی‌دهد. تعیین میانگین اشباع نفت باقیمانده براساس جداسازی کارمو توگرافی ردیاب‌ها در مخزن انجام می‌شود. در این تست هنگامی که ردیاب تزریقی به چاه تولیدی می‌رسد، غلظت تولیدی موجب اغتشاش در نمودار پاسخ ردیاب می‌شود. این امر به دلیل حرکت آب در مخزن در مسیرهای جاری مختلف با دبی متفاوت است. بازده جارویی معمولاً براساس زمان میان‌شکن شدن - هنگامی که بر حسب تابعی از دبی جمع می‌شود - آب تزریقی رسم شود - توصیف می‌شود. میان‌شکن شدن زود هنگام نشان‌دهنده کانالی شدن آب از طریق مسیرهای با تراوایی بالا است. میان‌شکن شدن دیر هنگام نیز نشان‌دهنده ارتباط ضعیف با قابلیت گذردهی کم بین چاه تزریقی و تولیدی است.

یکی از ملزومات اجرای روش‌های ازدیاد برداشت در مقیاس میدانی، ارزیابی اقتصادی و آنالیز ریسک است که تصمیم‌گیری در مورد سناریوی مناسب را تسهیل می‌کند. کاربرد پایش و ارزیابی عملکرد در پروژه‌های ازدیاد برداشت به منظور مشخصه‌سازی روند اجرای فرآیند، منجر به اثر بخشی بیشتر و افزایش بازدهی اقتصادی می‌شود.

هزینه اقتصادی اجرای طرح پایش تست‌های ردیاب برای یک فرآیند ازدیاد برداشت به منظور افزایش عملکرد و مشخصه‌سازی بهتر فرآیند برای تصمیم‌گیری صحیح در اجرای آن در مقابل دیگر هزینه‌های احتمالی در اثر شکست پروژه ناچیز است. بنابراین توجه‌پذیری اقتصادی برای اجرای انجام تست‌های ردیاب به منظور پایش یک طرح ازدیاد برداشت از منظر اقتصادی نیز پذیرفته شده است. پیش‌نیازهای استفاده از این فناوری در ایران شامل فراهم نمودن چارچوب‌های لازم برای طراحی و اجرای این تکنیک‌ها، تجهیز شرکت‌های عملیاتی به امکانات مورد نیاز، نیروی انسانی آموزش دیده و مهارت بالا جهت اجرا و آنالیز و استفاده از نتایج است. همچنین توسعه روش‌های کنونی برای انطباق‌پذیری با شرایط مخازن موجود در کشور و در نهایت ایجاد بسترهای مدیریتی و اقتصادی برای اطمینان بکارگیری این روش‌ها بعنوان پیش‌نیازهای مهم در استفاده از این فناوری‌ها در صنعت نفت است.

تست‌های انجام شده نشان داد که مدل‌های ایجاد شده بخوبی قادر به شبیه‌سازی رفتار مخزن کربناته پیچیده در اطراف دو چاه مورد بررسی است. بعلاوه مدل‌سازی تست‌های ردیاب نشان داد که مخزن مورد مطالعه، برخلاف فرضیات پیشین، مخزنی با تخلخل دوگانه و تراوایی دوگانه نیست. این مطالعه نشان داد که پخش شدگی<sup>۹</sup> مهمترین پارامتر کنترل‌کننده جریان ردیاب‌های شیمیایی در مخزن مورد بررسی است.

الوتیبی و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه‌ای نتایج حاصل از روش‌های مختلف برای تعیین اشباع نفت باقیمانده شامل لاگ‌های پتروفیزیکی و مغزه و نیز تست ردیاب تک چاهی را با هدف تعیین اشباع نفت باقیمانده یک مخزن کربناته پیش از تزریق دی اکسید کربن با هم مقایسه کردند. این مطالعه تطابق خوبی بین نتایج حاصل از مغزه و لاگ‌های پتروفیزیکی (۶۰-۷۰ درصد) نشان داد، در حالی که نتایج بدست آمده از تست ردیاب تک چاهی بسیار کمتر از نتایج حاصل از مغزه و لاگ است (۲۱ درصد). دلیل اصلی این تفاوت آن است که تست ردیاب، اشباع نفت باقیمانده را تعیین می‌کند، در حالی که لاگ و مغزه، اشباع نفت باقیمانده را اندازه‌گیری می‌کند.

بورساکس و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای به بررسی نتایج حاصل از تست‌های ردیاب تک چاهی در یک مخزن کربناته دریایی با دما و شوری بالا پرداختند. این تست‌ها با هدف ارزیابی بازدهی پایلوت ازدیاد برداشت شیمیایی تک چاهی طراحی و انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که روش تست ردیاب تک چاهی روش قابل اعتمادی برای تعیین اشباع نفت باقیمانده است.

جین و همکاران (۲۰۱۵) با اندازه‌گیری اشباع نفت باقیمانده قبل و بعد از تست پایلوت تک چاهی تزریق سورفکتانت<sup>۱۰</sup>، با استفاده از تست ردیاب تک چاهی بازده روش ازدیاد برداشت شیمیایی را در مخزنی با شوری بالا بررسی کردند.

## ۲- بحث و بررسی

ناهمگنی مخزن اغلب تخمین صحیح اشباع باقیمانده توسط آنالیز مغزه و داده‌های فشار موینگی را با محدودیت روبرو می‌کند. تست ردیاب شیمیایی تک چاهی، اندازه‌گیری در جای غیرمستقیم اشباع نفت باقیمانده در حجم بیشتری از مخزن نسبت به مغزه و لاگ‌های چاه‌پیمایی را فراهم می‌کند. عمق جستجوی این روش حدود ۱۰ تا ۱۴ فوت از دیواره چاه و حدود ۲۰ تا ۳۰ فوت از طول چاه است. تکنیک ردیاب تک‌چاهی براساس جدایش زمانی دریافت دو ردیاب است که یکی درون نفت و دیگری بطور انحصاری در آب

## نتیجه گیری

می کند، اما نتایج فوری دارد. تست ردیاب بین چاهی برای تخمین میانگین اشباع نفت بین چاه تزریقی و تولیدی و مسیر حرکت سیال استفاده می شود که اغلب در مدت زمان یک تا دو روز انجام می شود. در این تست در تولید وقفه ای ایجاد نمی شود و نتایج پس از میان شکن شدن ردیاب قابل تفسیر است. همچنین دیگر موارد استفاده از این تست شامل ناهمسان گردی و تعیین موانع جریان در مخزن، ارزیابی بازده جاروبی، مشخصه سازی ناهمگنی مخزن و تخمین سرعت سیالات است. روش های تفسیر این تست شامل مقایسه زمان رسیدن قله، آنالیز توزیع زمان اقامت، روش برون یابی و روش ترسیم است. داده های این تست ها اطلاعات مستقلى برای توصیف بهتر مخزن در ناحیه پایلوت و بهبود مدل دینامیک مخزن فراهم می کند.

تست های ردیاب تک چاهی و بین چاهی برای اندازه گیری در جای اشباع فاز غیر متحرک (معمولاً اشباع نفت باقیمانده در فرآیند جابجایی) و تعیین ارتباط بین چاه تزریقی و تولیدی در ناحیه مورد نظر مخزن استفاده می شوند. این روش در مقایسه با چاه آزمایشی توصیف دقیق تری از مخزن در مقیاس کوچک دارد. در گذشته بیشتر ردیاب های مورد استفاده معمولاً مواد رادیواکتیو بوده اند، در حالی که با توسعه تکنولوژی ردیاب های شیمیایی در دهه اخیر، ردیاب های شیمیایی جایگزین آنها شده اند. تست ردیاب شیمیایی تک چاهی برای مشاهده تغییرات اشباع نفت در یک چاه و اطراف آن استفاده می شود و معمولاً مدت زمان انجام آن یک تا دو هفته است. این تست اگر چه در تولید وقفه ایجاد

## پانویس ها

- |   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 1- Tracer Test                              | 6- Single-well chemical tracer (SWCT) |
| 2- Single Well Chemical Tracer Tests(SWCTT) | 7- Inter-well tracer tests (IWTT)     |
| 3- Remaining Oil Saturation (ROS)           | 8- SAMA                               |
| 4- Interwell Gas Tracer Test(IWGTT)         | 9- Dispersivity                       |
| 5- Thief zones                              | 10- Surfactant                        |

## منابع

- [1] Sanni, M., Abbad, M., Kokal, S., Ali, R., Zefzafy, I., Hartvig, S., Huseby, O. Reservoir Description Insights from an Inter-Well Chemical Tracer Test. SPE-188060-MS. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2427- April, Dammam, Saudi Arabia, 2017.
- [2] Huseby, O., Hartvig, S., K., Jevanord, K., Dugstad, Ø., Assessing EOR Potential from Partitioning Tracer Data. SPE-172808-MS. SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, 811- March, Manama, Bahrain, 2015.
- [3] [http://petrowiki.org/Single\\_well\\_chemical\\_tracer\\_test](http://petrowiki.org/Single_well_chemical_tracer_test)
- [4] Cubillos H, Bozorgzadeh M, Montes J, Mayorga H, Bonilla S, Quintanilla G, Lezana P, Panadero A, Romero P. The Value of Inter-Well and Single Well Tracer Technology for De-Risking and Optimizing a CEOR Process – Caracara Field Case. SPE-174397-MS. EUROPEC, 14- June, Madrid, Spain, 2015.
- [5] Shook G M, Sharma A, Pope G A. Early-Time Analysis of Tracers for use in Enhanced-Oil-Recovery Flood Optimization. SPE 169109. SPE Improved Oil Recovery Symposium, 1216- April, Tulsa, 2015.
- [6] Al-Shalabi, Luo H, Delshad M, Sepehrmoori K. Single-Well Chemical-Tracer Modeling of Low-Salinity-Water Injection in Carbonates. SPE 173994. SPE Western Regional Meeting, 27-30 April, Garden Grove, California, 2015.
- [7] AlAbbad M, Balasubramanian S, Sanni M, Kakal S, Zefzafy I, Adam F, Alhajji A. Single-well Chemical Tracer Test for Residual Oil Measurement: Field Trial and Case Study. SPE-182811-MS. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2528- April, Dammam, Saudi Arabia, 2016. [8] Dugstad O. Well-to-Well Tracer Tests. Petroleum Engineering Handbook, Vol. 5-Reservoir Engineering and Petrophysics, Chap. 6, 651683-.
- [9] Al-Mutairi F, Tiwari S, Baroon B, Abdullah M, Pathak A. Simulation of Single Well Chemical Tracer Tests Conducted in Carbonate Reservoir. SPE-175282-MS. SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference, 1114- October, Mishref, Kuwait, 2015.
- [10] AlOtaibi F, AlOsaimi F, Sanni M, Kokal S, Ali R, Alhashboul A. Remaining Oil Saturation Measurements for CO<sub>2</sub>-EOR Pilot in Saudi Arabia. SPE-188146-MS. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2427- April, Dammam, Saudi Arabia, 2017
- [11] Bursaux R, Peltier S, Nguyen M, Romero C, Morel D. Single Well Tracer Test Results in a High Temperature, High Salinity Offshore Carbonate Reservoir for Chemical EOR Pilot Evaluation. SPE-179579-MS. SPE Improved Oil Recovery Conference, 1113- April, Tulsa, USA, 2016.
- [12] Jin L, Jamili A, Harwell J H, Shiau B J, Roller C. Modeling and Interpretation of Single Well Chemical Tracer Tests (SWCTT) for pre and post Chemical EOR in two High Salinity Reservoirs. SPE-173618-MS. SPE Production and Operations Symposium, 15- March, Oklahoma, USA, 2015.