

# مقایسه آزمایشگاهی عملکرد پلیمر پلی‌آکریل‌آمید و ماده فعال سطحی زیستی رامنولپید در ازدیاد برداشت نفت با استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای همگن و ناهمگن

سمیرا امیری<sup>۱</sup>، صفورا کریمی<sup>۱\*</sup>، مجتبی شفیعی<sup>۱</sup> و محمدرضا عصار<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۳

## چکیده

در سالیان اخیر مطالعات زیادی در مورد استفاده از مواد فعال سطحی در زمینه افزایش برداشت از مخازن نفتی انجام شده است که عموماً شامل مقایسه عملکرد ماده فعال سطحی زیستی با ماده فعال سطحی شیمیایی بوده است. ولی تاکنون تحقیقات اندکی در مورد مقایسه عملکرد مواد فعال سطحی زیستی و پلیمرها و همچنین، تأثیر دما بر برداشت نفت صورت گرفته است. لذا در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی اثر دما بر عملکرد ماده فعال سطحی زیستی رامنولپید با تزریق در میکرومدل شیشه‌ای و مقایسه عملکرد آن با پلیمر پلی‌آکریل‌آمید آنیونی پرداخته شده است. برای این منظور نتایج حاصل از سیلاب‌زنی به کمک ماده فعال سطحی زیستی موردنظر با نتایج سیلاب‌زنی با آب شور و پلی‌آکریل‌آمید مقایسه شده است. آزمایشات در دو دمای ۲۵ °C و ۷۵ °C و در دو میکرومدل همگن و ناهمگن انجام شد. نتایج نشان داد که در مدل همگن درصد ازدیاد برداشت در اثر سیلاب‌زنی با ماده فعال سطحی زیستی رامنولپید در دو دمای مورد مطالعه به ترتیب ۴۸ و ۶۲٪ است که در مقایسه با آب به ترتیب ۹ و ۱۳٪ افزایش برداشت نفت داشته است. این درحالی است که در سیلاب‌زنی با پلیمر مقادیر به ترتیب ۶۱ و ۷۰٪ به دست آمد. در مدل ناهمگن نیز شرایط به همین صورت به دست آمد. بدین ترتیب که درصد ازدیاد برداشت در اثر سیلاب‌زنی با ماده فعال سطحی زیستی رامنولپید در دو دمای مورد مطالعه به ترتیب ۴۱ و ۵۱٪ بود که در مقایسه با آب عملکرد بالاتر و در مقایسه با پلیمر عملکرد پایین‌تری داشت. به‌طور کلی، در دمای بالاتر میزان ازدیاد برداشت در هر دو مدل همگن و ناهمگن تحت سه سیلاب‌زنی انجام شده، بیشتر بود.

**کلمات کلیدی:** ازدیاد برداشت نفت، میکرومدل شیشه‌ای، سیلاب‌زنی، رامنولپید، پلیمر

\*مسئول مکاتبات

s.karimi@jsu.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2021.4266.2929)

## مقدمه

میکروبی نفت است. در این میان، رامنولیپید<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین و قوی‌ترین انواع مواد فعال سطحی زیستی است که توسط بعضی از باکتری‌ها مانند سودمناس آرجینوزا<sup>۲</sup> تولید می‌شوند. رامنولیپید جزء گروه گلیکولیپیدهای قرار می‌گیرند که حاوی یک یا دو مولکول رامنوز در اتصال به یک یا دو مولکول بتا هیدروکسی کربوکسیلیک اسید<sup>۳</sup> می‌باشند. این مواد فعال سطحی زیستی می‌توانند کشش سطحی آب را تا ۲۵ mN/m کاهش دهند [۱۰]. بخش آب‌دوست رامنوز به وسیله اتصال گلیکوزیدی به دنباله اسید چرب لیپیدی متصل است. رامنولیپیدها به‌صورت ترکیبی از انواع مختلف تولید می‌شوند. رامنولیپیدهای اصلی باکتری سودمناس آرجینوزا شامل رامنولیپید نوع ۱، نوع ۲، نوع ۳ و نوع ۴ می‌باشند. رامنولیپید نوع ۱ یک مونو رامنولیپید با یک واحد رامنوز است؛ درحالی‌که رامنولیپید نوع ۳ شامل دو واحد رامنوز و به‌عنوان دی رامنولیپید شناخته می‌شود. علاوه بر این، رامنولیپید نوع ۲ و نوع ۴ توسط باکتری سودمناس آرجینوزا در مقادیر بسیار کم تولید می‌شوند. این رامنولیپیدها تنها شامل یک بتاهیدروکسی کربوکسیلیک اسید هستند [۱۱]. مواد فعال سطحی زیستی با کاهش کشش سطحی نفت و سنگ بستر، باعث کاهش نیروی موینگی (که مانعی برای خروج نفت از خلال منافذ سنگ بستر است) می‌شوند. همچنین، امولسیونکنندگی مواد فعال سطحی زیستی به جدا شدن نفت از سطح سنگ کمک می‌کند. این درحالی است پلیمرها سبب افزایش ویسکوزیته آب می‌شوند و با تزریق آن‌ها به درون سنگ مخزن، لایه نفتی را تقریباً به‌طور کامل از جداره سنگ مخزن جدا کرده و سیال تزریقی با جداره تماس پیدا می‌کند.

یکی از مسائل مهم در بخش انرژی و اقتصاد کلان مملکتی، نگهداری از ذخیره نفت خام کشور به‌عنوان ثروت اکنون و میراثی برای آیندگان است. این مسأله مهم با مدیریت یکپارچه مخازن با اهداف حداکثرسازی سودآوری مخازن، بیشینه کردن بازیافت آن‌ها و حداقل نمودن هزینه‌های تولید انجام خواهد شد [۱]. امروزه به‌دلیل محدود بودن مخازن نفت سبک در دنیا، ازدیاد برداشت نفت از مخازن نفت سنگین مورد توجه قرار گرفته است. در فرآیند برداشت اولیه از مخازن نفت سنگین فقط امکان برداشت حدود ۵٪ نفت وجود دارد که با استفاده از روش‌های ازدیاد برداشت ثانویه این میزان به حدود ۱۵-۱۰٪ می‌رسد [۲-۴]. یکی از روش‌های مؤثر در افزایش برداشت نفت، استفاده از مواد فعال سطحی است. با تزریق این مواد و استفاده از ساز و کارهای حاکم بر این فرآیند می‌توان میزان نفت بیشتری را از درون مخازن برداشت کرد. با توجه به اینکه ازدیاد برداشت از مخازن نفتی با استفاده از فن‌آوری زیستی از روش‌های جدید در جهت افزایش تولید نفت از مخازن است، استفاده از مواد فعال سطحی زیستی در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵-۹]. فعال‌کننده‌های سطحی زیستی یکی از فرآورده‌های مهم در میکروبیولوژی صنعتی می‌باشند که توسط میکروارگانیسم‌ها به‌ویژه باکتری‌ها، قارچ‌ها و مخمرها تولید می‌شوند. این ترکیبات فعال سطحی به‌دلیل دارا بودن مزایایی از قبیل کاهش کشش سطحی و بین سطحی، مقاومت دمایی و تجزیه‌پذیری در صنایع مختلف مانند نفت و پتروشیمی، داروسازی، پزشکی، کشاورزی، آرایشی و نساجی اهمیت بسیار دارند. بنا به دلایلی نظیر تنوع زیاد، کم خطر بودن برای محیط زیست، سمیت کمتر و قابلیت بازگشت به محیط زیست، استفاده از مواد فعال سطحی زیستی بر فعال‌کننده‌های شیمیایی ترجیح داده می‌شود. یک زمینه مهم در استفاده از مواد فعال سطحی زیستی، ازدیاد برداشت

1. Rhamnolipid  
2. Pseudomonas Aeruginosa  
3. Hydroxy-fatty Acid $\beta$

می‌توان مواردی از جمله امکان مطالعه مشاهده‌ای، امکان ایجاد و استفاده از محیط‌های متخلخل متنوع و متفاوت و شبه واقعی، طولانی نبودن مدت زمان آزمایش، استفاده کمتر از حجم سیال مخزن و سیال تزریقی، امکان تکرار آزمایش به دفعات، امکان بررسی وقایع و مکانیزم‌های جابه‌جایی فازها در محیط‌های متخلخل متفاوت در مقیاس حفره را نام برد و از آنجا که بازده در مقیاس حفره در فرآیندهای ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز اهمیت ویژه‌ای دارد و کنترل کننده بازده نهایی مخزن است، اهمیت دستگاه میکرومدل به‌عنوان تنها دستگاه موجود برای مطالعه در مقیاس حفره تلقی می‌شود. میکرومدل شیشه‌ای با حک کردن الگوی شبکه‌ای و یا با استفاده از عکس‌های حاصل از مقطع نازک سنگ روی شیشه ساخته می‌شود. ابعاد حفره و گلوگاه‌ها در میکرومدل شیشه‌ای در حدود چندین میکرون است. از نظر ترشوندگی، میکرومدل‌های شیشه‌ای معمولاً بسیار آب‌دوست هستند، زیرا خصوصیات شیمی سطح شیشه شبیه به ماسه‌سنگ است [۱۲]. لازم به ذکر است با وجود مزایای ذکر شده در استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای، به دلیل پایین بودن تحمل فشار شیشه، در صورت استفاده از نفت سنگین و پمپ‌های قوی، احتمال شکستن میکرومدل تحت فشار بالا وجود دارد. از این‌رو، اغلب آزمایشات در این تجهیزات در فشار اتمسفری انجام می‌شود. با توجه به اینکه آزمایشات میکرومدل‌ها بیشتر بر پایه مشاهدات کیفی استوار است این مطلب خطای عددی قابل ملاحظه‌ای در محاسبات ایجاد نمی‌کند. علاوه بر آن، مطالعات نشان می‌دهد که برای بررسی حرکت سیال در محیط متخلخل مخصوصاً زمانی که از سیال مایع اشباع شده است، اختلاف فشار دو طرف محیط متخلخل تعیین‌کننده جریان است و میزان فشار ورودی و خروجی به‌تنهایی تأثیر چندانی بر نحوه حرکت سیال نخواهد داشت. از این‌رو، تمام آزمایشات سیلاب‌زنی در فشار اتمسفری انجام می‌شود [۱۲-۱۴].

در اثر افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی، سیال از روی نفت عبور نکرده و پدیده انگشتی شدن اتفاق نمی‌افتد و به‌صورت عرضی در سنگ مخزن جاروب را انجام می‌دهد. همچنین می‌توان گفت که ترشوندگی محیط متخلخل به‌میزان بیشتری به‌سمت آب‌دوست تغییر می‌کند که سبب افزایش میزان بازیافت نفت می‌شود. پلیمر و ماده فعال سطحی زیستی هر دو ماده فعال سطحی بوده و با تزریق محلول ماده فعال سطحی به درون سنگ مخزن، قسمت آب‌گریز مولکول‌های این مواد با سطح نفت‌دوست تماس پیدا می‌کند و سر آب‌دوست آن در فاز آبی قرار می‌گیرد. این امر موجب افزایش برهم‌کنش دیواره سطح سنگ و فاز آبی شده و نتیجه آن این است که از برهم‌کنش دیواره سطح سنگ و فاز نفتی کاسته می‌شود. این پدیده سبب تغییر ترشوندگی سطح روزنه به آب‌دوست شده و نتیجه آن جدا شدن نفت چسبیده به جداره و بازیافت بیشتر نفت است. این اختلاف عملکرد این دو دسته از مواد، محققان حاضر را بر آن داشت به مقایسه تأثیر آنها در ازدیاد برداشت بپردازند. استفاده از روش‌های آزمایشگاهی در زمینه ازدیاد برداشت نفت به‌علت هزینه‌های کمتر و امکان تکرار بیشتر، امری ضروری و مقرون به‌صرفه است. میکرومدل شیشه‌ای یک محیط متخلخل شفاف است که برای بررسی و مطالعه رفتار حرکت سیال و شیوه جابه‌جایی فازها در مقیاس حفره استفاده می‌گردد. شفاف بودن این دستگاه آن را برای دیدن وقایع در مقیاس حفره ارزشمند و در مقایسه با سایر دستگاه‌ها در مطالعات مهندسی مخازن نفت گاز بسیار متمایز می‌کند. این درحالی است که انجام دادن آزمایش بر روی سنگ واقعی این امکان را فراهم نمی‌کند. می‌دانیم که در مخازن زیرزمینی از قبیل نفت، گاز و آب، نحوه حرکت سیالات مشخص ناست. بنابراین، استفاده از میکرومدل شیشه‌ای می‌تواند امکان انجام مطالعات پایه و توسعه تئوری‌های انتقال پدیده‌ها و نیز مشاهده کمی و کیفی وقایع در این سیستم‌ها مشخص کند. از مزایای این دستگاه

سپوع مخزن، موجب بهبود بازده جاروب نفت می‌شوند. نتایج به این صورت بود که پلی اکریل آمید آب‌کافتی پایداری مناسبی در شوری، دما و سرعت برش زیاد ندارد و گرانیروی آن در شرایط مخزن به‌ویژه شوری زیاد کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر، گرانیروی محلول آبی پلیمر در مجاورت عامل قلیایی مانند سدیم هیدروکسید بهبود می‌یابد. در نتیجه، سیلاب‌زنی پلیمری-قلیایی نسبت به سیلاب‌زنی پلیمری به‌تنهایی دارای ضریب بازیافت بهتری است [۱۵]. یوسفوند و همکارانش، به بررسی پایداری و سیلاب‌زنی ذرات نانوسیلیکا، در محلول SDS /NaCp/HPAM برای بازیابی نفت سنگین پرداختند. آزمون‌های پایداری آنها نشان داد نمک عامل اصلی بی‌ثباتی در محلول پلیمری/نانوسیلیکا/نمک است. علاوه‌بر آن، آزمون‌های جذب نشان داد که ۴۲/۱۴۵٪ از SDS روی سطح ذرات نانوسیلیکا جذب شده است. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که سیلاب‌زنی پلیمر/نانوسیلیکا/ ماده فعال سطحی در بهترین حالت حدود ۳۷٪ بازیابی نفت را بهبود بخشید [۱۶]. مرادی و همکارانش محدودیت‌های سختی پلیمر پلیاکریلامید هیدرولیز شده (HPAM) را در دماهای مختلف مطالعه کردند. براساس نتایج آنها شوری، سختی و دما متقابلاً زنجیره پلیمری را تحت تأثیر قرار می‌دهند و به‌صورت مستقل نمی‌توانند مورد بررسی قرار گیرند. همچنین، از لحاظ ملاحظات اقتصادی، پایین بودن غلظت پلیمر مورد نیاز با هدف قرار دادن گرانیروی مهم است. از این‌رو، HPAM برای مخازن با شوری بالا توصیه نمی‌گردد. گرچه تعریف شوری بالا با توجه به محدودیت‌های موجود و شرایط مخزن متفاوت است [۱۷]. امانی سیلاب‌زنی با ماده فعال سطحی زیستی یک لیپو پپتید سیکلیک را درون میکرومدل شیشه‌ای انجام داد. این ماده فعال سطحی زیستی فعالیت سطحی خوبی را از خود نشان داد به‌طوری‌که توانست در غلظت ۵۰ mg/p کشش سطحی آب را از ۶۹ به ۲۶ mN/m و کشش بین سطحی را از ۳۸ به ۲ mN/m کاهش دهد.

بنابراین استفاده از میکرومدل شیشه‌ای می‌تواند امکان انجام مطالعات پایه و توسعه تئوری‌های انتقال پدیده‌ها و نیز مشاهده کمی و کیفی وقایع در این سیستم‌ها مشخص کند. اما شیشه به‌دلیل داشتن جنس ظریف توانایی تحمل فشار بالای مخازن را ندارد و اگر فشار افزایش یابد شیشه شکسته می‌شود و دلیل استفاده از فشار اتمسفری این موضوع است.

چن و همکارانش، به مطالعه مقایسه‌های بین سیلاب‌زنی آلکالین غیرآلی/پلیمر، سیلاب‌زنی آلکالین آلی/پلیمر برای بهبود بازیافت نفت از طریق سیلاب‌زنی میکرومدل پرداختند. نتایج آنها نشان داد که بازیابی نفت با استفاده از سیلاب‌زنی اتیلن دی‌آمین-HPAM بیشتر از سیلاب‌زنی NaOH-HPAM و سیلاب‌زنی Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-HPAM است. امولسیون کردن به وضوح در سیلاب‌زنی اتیلن دی‌آمین-HPAM دیده می‌شود (از طریق سیلاب‌زنی میکرومدل) که در سیلاب‌زنی NaOH-HPAM و سیلاب‌زنی Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-HPAM مشاهده نشد. همچنین، اضافه کردن NaOH و Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> می‌تواند به‌طور قابل توجهی ویسکوزیته پلیمر را کاهش دهد در حالی که افزودن اتیلن دی‌آمین ویسکوزیته پلیمر را کمی افزایش می‌دهد [۱۳]. یوسفوند و همکارانش نیز، ازدیاد برداشت نفت با استفاده از پلیمر/نانوسیلیکا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوسیلیکا قادر است ازدیاد برداشت را بهبود بخشد زیرا نانوذرات قادرند ویسکوزیته سیال تزریق شده را افزایش دهند و همچنین، ترشوندگی روزه‌ها را به آب‌دوست تغییر دهند. در بهترین حالت در سیلاب‌زنی پلیمری به‌وسیله نانوذرات نانوسیلیکا (NPF) ۳۵٪ ازدیاد برداشت نفت بهبود یافت [۱۴]. معصوم شعبان و همکارانش مروری بر پلیمرهای محلول در آب به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده تحرک‌پذیری بر ازدیاد برداشت نفت انجام دادند. در فرآیند ازدیاد برداشت نفت، پلیمرها با افزایش گرانیروی فاز آبی یا کاهش نفوذپذیری از طریق جذب سطحی زنجیره‌های پلیمری روی

به افزایش آبدوستی قابل نسبت دادن است. به طوری که در نتیجه‌ی این مکانیزم‌ها، تحرک نفت افزایش یافته و سبب ازدیاد برداشت نفت می‌شود [۱۹]. کامارا و همکاران، به مطالعه کاربرد ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید، که از باکتری سودمناس آرچینوزا ساخته شده بود؛ در فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی پرداختند. این باکتری از خاک گرفته شده بود. رامنولیپید توانست کشش سطحی آب را به طور مؤثری از ۷۲ به ۳۵/۲۶ mN/m کاهش دهد و نشان داد که این ماده فعال سطحی زیستی ظرفیت خوبی برای امولسیون سازی نفت (با نرخ امولسیون سازی ۰/۶۹٪) دارد. بهترین نتیجه مربوط به حالتی بود که غلظت ماده فعال سطحی زیستی ۱۰۰٪ بالاتر از CMC و نفت دارای درجه‌ی API ۲۱/۹۰ بود. با توجه به آزمایشات انجام گرفته بهترین نتیجه بازیافت نهایی ۵۰/۴۵±۰/۷۹ برداشت نفت بود که ۱۱/۹۰±۰/۳۹ مربوط به ازدیاد برداشت میکروبی (MEOR) بود. مقایسه نتایج حاصل از رامنولیپید با دیگر مواد فعال سطحی زیستی سنتر شده نشان داد که رامنولیپید به صورت مؤثر می‌تواند در روش ازدیاد برداشت میکروبی مورد استفاده قرار گیرد [۲۰]. خادم الحسینی و همکارانش به بررسی کارایی انواع مواد فعال سطحی در ازدیاد برداشت نفت با تزریق در میکرومدل شیشه‌ای پرداختند. در این پژوهش، از مواد فعال سطحی رامنولیپید، SDS و SDBS استفاده کردند. رامنولیپید مورد استفاده با ۴۰٪ برداشت نفت و کاهش کشش سطحی آب به ۲۸ mN/m بیشترین تأثیر را بر ازدیاد برداشت نفت نسبت به بقیه‌ی مواد فعال سطحی داشت [۵]. ملک محمودی و همکارانش به بررسی پاک‌سازی خاک آلوده به نفت خام به روش زیستی با استفاده از رامنولیپید پرداختند. در این پژوهش، از رامنولیپید و ماده فعال سطحی SDS استفاده کردند و در نهایت برداشت توسط رامنولیپید و SDS به ترتیب ۷۵/۱۷ و ۷۶/۹۲٪ بوده است. همچنین، رامنولیپید توانست کشش سطحی آب را به ۲۶/۸ mN/m برساند.

همچنین، آزمایش‌های جابه‌جایی نفت خام درون میکرومدل نشان داد بعد از سیلاب‌زنی با آب در حدود ۱۰/۱٪ بهبود بر ازدیاد برداشت نفت با تزریق محلول ماده فعال سطحی زیستی به دست می‌آید [۱۸]. امانی سیلاب‌زنی با ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید توسط میکرومدل شیشه‌ای را انجام داد. در این تحقیق، رامنولیپید کشش سطحی را از ۷۰ mN/m به ۲۸ mN/m کاهش داد. این ویژگی تأیید می‌کند رامنولیپید پتانسیل خوبی برای کاربرد در ازدیاد برداشت به روش میکروبی دارد. همچنین در آزمایش‌های مشاهده‌ای، اثر رامنولیپید در ازدیاد برداشت نفت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد با تزریق رامنولیپید با غلظت ۱۲۰ mg/p، در حدود ۵٪ ازدیاد برداشت برای نفت خام حاصل می‌شود [۱۰].

آدو و همکارانش به بررسی آزمایشگاهی استفاده ترکیبی از شوری کنترل شده و مواد فعال سطحی زیستی در ازدیاد برداشت نفت پرداختند. برای این امر از دو ماده‌ی رامنولیپید و پروتئین آنزیم به صورت جداگانه استفاده کردند. نتایج نشان داد که در اثر افزایش شوری رامنولیپید، کشش بین سطحی سیال افزایش می‌یابد. در آزمایش حلالیت، در صورتی که شوری بالا باشد نمی‌توان از رامنولیپید استفاده کرد. در آزمایش امولسیون سازی هر دو ماده می‌توانند نفت را امولسیون کنند که به صورت کلی پروتئین آنزیم در شوری بالا عملکرد موفق تری دارد و در مدت زمان کوتاهی که با نفت در تماس است آن را امولسیون می‌کند. در حالی که رامنولیپید در شوری پایین عملکرد امولسیون سازی موفق تری دارد. نتایج اندازه‌گیری کشش بین سطحی در آزمایشات نشان داد که کاهش کشش سطحی در طی فرآیند سیلاب‌زنی به منظور بهبود ازدیاد برداشت، در نتیجه‌ی استفاده از رامنولیپید و پروتئین آنزیم بسیار قوی است. به طور کلی، تأثیر رامنولیپید بر تولید نفت به ترکیبی از مکانیزم‌های کاهش کشش سطحی، امولسیون سازی و سوق دادن ترشوندگی

آزمایشات در دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C انجام گرفته است. در مطالعه حاضر، ابتدا ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید تولید و سپس آزمایش‌های مربوط به ازدیاد برداشت نفت و مقایسه عملکرد آن با آب و پلیمر پلی اکریل آمید آنیونی انجام گرفته است. در ادامه، روش انجام آزمایشات و نتایج به دست آمده گزارش شده است.

### مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر ابتدا میکرومدل‌های شیشه‌ای طراحی و ساخته و سپس آزمایش‌های سیلاب‌زنی آب در دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C و فشار ۱ atm انجام شد. در ادامه، آزمایش‌های سیلاب‌زنی پلیمری با پلی اکریل آمید صنعتی انجام شد. سپس، عملکرد ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید در شرایط عملیاتی یکسان بر ازدیاد برداشت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن با سیلاب‌زنی پلیمری و آبی مقایسه گردید. در نهایت، با تحلیل نتایج به دست آمده از دو دیدگاه ماکروسکوپی و میکروسکوپی مشخص شد که برای انجام یک فرآیند ازدیاد برداشت مناسب در شرایط مخزن (به عنوان مثال دمای بالا) کدام سیلاب‌زنی عملکرد بهتری خواهد داشت.

### مواد لازم

#### ماده فعال سطحی زیستی

رامنولیپید مورد استفاده در تحقیق حاضر از طریق کشت میکروبی سودوموناس آرجینیوس تولید شده است. دستگاه‌های مورد نیاز این کشت عبارتند از: هود میکروبی که برخلاف هودهای شیمیایی خروجی ندارند. جریان هوا در این هود آرام است. جریان هوا درون هود توسط یک پمپ برقرار می‌شود و یک لامپ UV جهت استریل کردن درون هود تعبیه شده است. از محیط هود برای انجام کشت‌ها در فضای استریل استفاده شده است. دستگاه شیکر انکوباتور که کار رشد باکتری‌ها و تولید رامنولیپید در این دستگاه انجام می‌شود.

در نتیجه، رامنولیپید را جایگزین خوبی برای مواد فعال سطحی شیمیایی در صنعت می‌توان پیشنهاد داد [۱۱]. ژوالی لی و همکاران به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر در مقیاس میکروسکوپی بر تغییر ترشوندگی در مخازن کربناته پرداختند. نتایج به دست آمده از آزمایشات متعدد صورت گرفته توسط ایشان حاکی از این بود که تزریق پلیمر علاوه بر آنکه از طریق مکانیزم اصلی در سطح ماکروسکوپی مبنی بر افزایش گراندروی، تحرک نفت را افزایش می‌دهد، بلکه در سطح میکروسکوپی نیز پلیمر موجب تغییر ترشوندگی شده و در نتیجه به عنوان عاملی مضاعف، موبیلیتی نفت را بهبود می‌بخشد. همچنین ایشان با اندازه‌گیری داده‌های به دست آمده همچون زاویه‌های تماس و نیروی چسبندگی مشاهده کردند که در صورت افزایش دما و غلظت پلیمر، ترشوندگی به میزان بیشتری به آب‌دوستی تغییر می‌یابد [۲۱]. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه ازدیاد برداشت نفت، ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید کارآیی خوبی در مقایسه با سایر مواد فعال سطحی به‌ویژه مواد فعال سطحی شیمیایی دارد. اما تاکنون مقایسه‌ای بین عملکرد این ماده فعال سطحی زیستی با پلیمرها در فرآیند ازدیاد برداشت نفت صورت نگرفته است. علاوه بر آن، تأثیر دما بر عملکرد مواد فعال سطحی زیستی در پژوهش‌های گذشته کمتر مورد توجه قرار گرفته است و اغلب تحقیقات به دمای محیط محدود شده‌اند. این در حالی است که دما بر عملکرد ماده فعال سطحی زیستی و همچنین پلیمر بسیار تأثیرگذار است. از طرفی، برای کاربردی کردن نتایج و استفاده از آن‌ها در طراحی فرآیندهای ازدیاد برداشت مرحله سوم در مخازن واقعی نفت سنگین، بهتر است شرایط آزمایشگاهی به شرایط عملیاتی نزدیک‌تر گردد. از این‌رو در این مطالعه، تأثیر دما بر عملکرد ماده فعال سطحی زیستی رامنولیپید و پلیمر پلی اکریل آمید و آب شور مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته است. برای این منظور،



و همکاران [۲۲] استفاده شده است. در این روش، ابتدا سعی شد نمونه میکروبی سودوموناس آرجنیوس به طور کامل همگن شود. سپس کمی از نمونه (۱۰۰ تا ۲۰۰ mg) به درون ظرف‌های ۵۰ میلی لیتری از محیط غنی سازی انتخابی ریخته شد و در دمای ۳۰ °C و سرعت ۲۰۰ rpm به مدت ۷ تا ۱۰ روز در شیکرانکوباتور قرار داده شد. ترکیب محیط کشت غنی سازی در جدول ۱ آمده است. محیط کشت مورد نیاز در دمای ۱۲۱ °C و فشار ۱/۵ atm به مدت ۲۰ min سترون شد. روغن سویا نیز در همین شرایط سترون و به صورت جداگانه به محیط کشت افزوده شد. پس از ۷ تا ۱۰ روز گرم خانه گذاری در شرایط بالا و زمانی که امولسیون نسبتاً پایداری تشکیل شد، از محیط کشت در سرم فیزیولوژی غلظت‌های مختلف تهیه و از آنها روی محیط جامد آگار مغذی<sup>۱</sup> کشت داده شد و پلیت‌ها در دمای ۳۰ °C به مدت ۲۴-۳۶ h گرم خانه گذاری شدند. سپس تک پرگنه‌های تشکیل شده از روی پلیت جداسازی و با نهایت دقت، خالص سازی انجام گرفت.

همچنین، از دستگاه اتوکلاوبرای استریل کردن مواد و وسایل استفاده می‌شود. سایر موارد مورد نیاز برای این کشت در جدول ۱ آورده شده است.

#### نفت و پلیمر مورد استفاده

همان طور که پیش از این اشاره شد، عملکرد ماده فعال سطحی زیستی در آزمایشات سیلابزنی با نتایج سیلابزنی با آب شور با غلظت ۱۵۰۰۰ ppm و پلیمر مقایسه شده است. نفت مورد استفاده در این آزمایش از یکی از چاه‌های نفت بنگستان برداشت شده است که جز نفت خام سنگین محسوب می‌شود. مشخصات فیزیکی مواد استفاده شده در دمای محیط در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است برای شستشوی مدل نیز از محلول‌های اتانول و تولوئن استفاده شده است.

#### روش‌ها

##### تولید رامنولیپید

برای تولید رامنولیپید از روش گفته شده توسط عباسی

جدول ۱ مقدار مواد مورد نیاز بر حسب گرم بر لیتر برای کشت میکروبی در تولید رامنولیپید

نوع مواد	محیط پیش کشت	محیط کشت	محیط نهایی
سولفات آمونیوم ( $NH_4NO_3$ )	-	۳	-
پتاسیم دی هیدروژن فسفات ( $KH_2PO_4$ )	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵
سولفات منیزیم هفت مولکول آب ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ )	۰/۲۵	۰/۳	۰/۲۵
عصاره مخمر	۱	۰/۵	۱
روغن سویا	-	۱۰۰	۴۰
نیتрат سدیم	۳	-	۳
گلوکز	۴۰	-	-

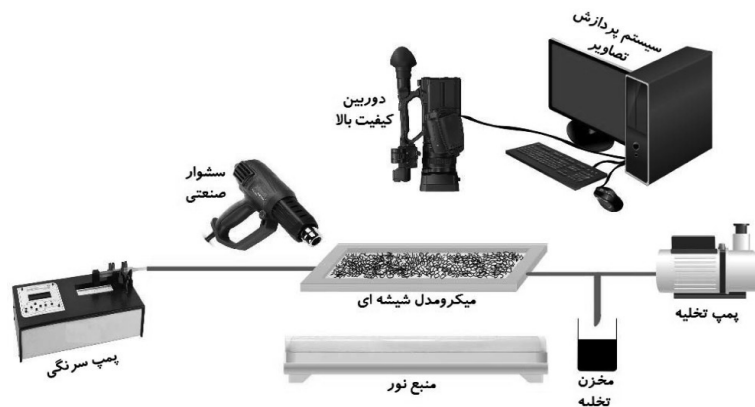
جدول ۲ مشخصات فیزیکی موارد استفاده شده در سیلابزنی

نفت	پلی اکریل آمید	رامنولیپید	
-	۲۰۰۰	۱۲۰	غلظت (ppm)
۲۳/۴۸	-	-	API
۰/۹۱۵۸	۰/۹۹۶۹	۰/۹۹۶۷	چگالی ( $cm^3/g$ )
۱۳۵/۲۹۸۲	۱۱۰/۱۶۰۴	۰/۹۸۶۳	ویسکوزیته (cp)

این کلنی‌ها برای بررسی توانایی تولید بیوسورفکتانت مورد استفاده قرار گرفتند. پیش از تلقیح باکتری‌ها به درون محیط تولید، تک‌تک کلنی‌ها در محیطی با ترکیب نشان داده شده در **جدول ۱** کشت داده شدند (پیش کشت محیط تولید) و به مدت یک شب در  $30^{\circ}\text{C}$  و  $200\text{ rpm}$  گرم‌خانه‌گذاری شدند. روز بعد به میزان  $2\%$  حجمی - حجمی از محیط پیش کشت به درون ظرف‌های  $250\text{ mL}$  دارای  $50\text{ mL}$  از محیط تولید تلقیح گردید و در  $30^{\circ}\text{C}$  و  $200\text{ rpm}$  به مدت  $4-7$  روز گرم‌خانه‌گذاری شد.

آزمایشات سیلاب‌زنی مجموعه‌ی آزمایشگاهی مورد استفاده **شکل ۱** از یک میکرومدل شیشه‌ای، یک منبع تولید کننده نور تعبیه شده در زیر میکرومدل، پمپ سرنگی با سرعت تزریق قابل تنظیم، یک دوربین کیفیت بالا

با قابلیت اتصال به سیستم کامپیوتر جهت پردازش تصاویر، سشوار صنعتی برای تنظیم دمای برروی میکرومدل و یک پمپ خلأ برای تزریق و جاری کردن سیال درون میکرومدل تشکیل شده است. میکرومدل‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر به دو صورت همگن و ناهمگن در نظر گرفته شده است که توسط نرم‌افزار کُرل طراحی شده است. مشخصات میکرومدل‌ها و همچنین شکل آنها به ترتیب در **جدول ۳** و **شکل ۲** آورده شده است. در ابتدا و انتهای میکرومدل‌ها همان‌طور که در **شکل ۲** نشان داده شده است، مسیرهایی برای ورود و خروج سیال طراحی شده است. برای مدل همگن به منظور توزیع یکنواخت‌تر سیال درون میکرومدل و همچنین، خروج راحت‌تر آن از سیستم شبکه‌ای برای این مسیره‌ها در نظر گرفته شده است.

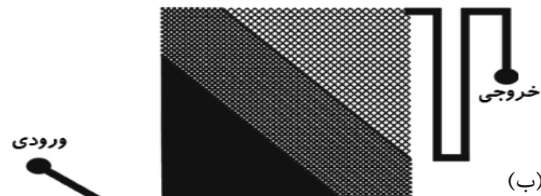
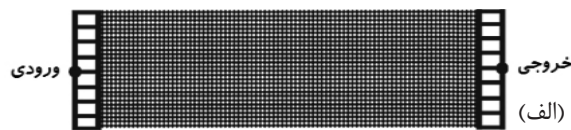


شکل ۱ مجموعه آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایش سیلاب‌زنی

جدول ۳ مشخصات میکرومدل‌های شیشه‌ای مورد استفاده در مطالعه حاضر (اندازه‌ها برحسب میلی‌متر)

عمق	عرض	طول	تخلخل (%)	قطره حفره‌ها	قطر گلوگاه	مشخصات	
						نوع مدل	
۰/۰۷۲	۵۰	۱۰۰	۶۷/۴۴	۱/۵۳	۰/۲۶	همگن	
۰/۰۷	۸۰	۸۰	۶۷/۴۴	۲/۰۷	۰/۷۷	ناحیه اول	
				۱/۲۵	۰/۱۷	ناحیه دوم	
				۰/۴۵	۰/۰۷	ناحیه سوم	





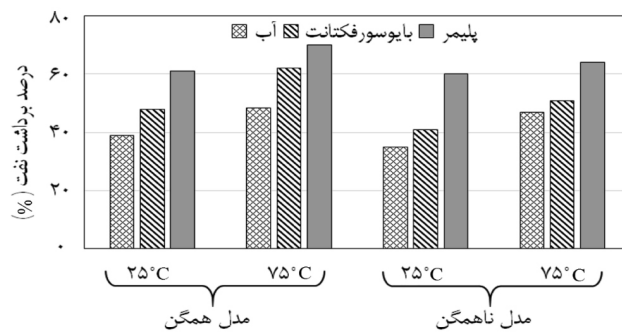
شکل ۲ تصویر میکرومدل‌های طراحی شده در نرم افزار کِرل: الف) همگن و ب) ناهمگن

امانی و همکاران [۱۵] است. نتایج سیلاب‌زنی شامل درصد برداشت نفت در میکرومدل‌های همگن و ناهمگن حاوی نفت در دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C توسط هر سه ماده آب و پلیمر و رامنولیپید در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ نیز تصاویر ماکروسکوپی سیلاب‌زنی توسط سه ماده مذکور به ترتیب در میکرومدل همگن و ناهمگن نشان داده شده است. در شکل ۳٪ برداشت نفت نسبت به دما در سه ماده‌ی آب، پلیمر پلی‌اکریل‌آمید و رامنولیپید در دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C نشان داده شده است. در شکل ۴ تصاویر ماکروسکوپی برداشت نفت در مدل همگن و در شکل ۶ تصاویر ماکروسکوپی مربوط به مدل ناهمگن در دو دمای یاد شده، نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ تا ۵ مشخص است، میزان برداشت نفت برای هر سه ماده و در هر دو میکرومدل در اثر افزایش دما تغییر یافته و در دمای بالاتر بیشتر بوده است. هنگامی که دما افزایش پیدا می‌کند، ویسکوزیته مواد و نفت کاهش یافته و حرکت سیالات بهبود می‌یابد و درصد برداشت افزایش پیدا می‌کند. در دمای ۲۵ °C برداشت توسط آب شور در مدل همگن ۳۹٪ و در دمای ۷۵ °C ۴۸/۳٪ بوده است. در دمای ۲۵ °C برداشت توسط رامنولیپید در مدل همگن ۴۸٪ و در دمای ۷۵ °C ۶۲٪ بوده است. در دمای ۲۵ °C برداشت توسط پلیمر پلی‌اکریل‌آمید در مدل همگن ۶۱٪ و در دمای ۷۵ °C ۷۰٪ بوده است.

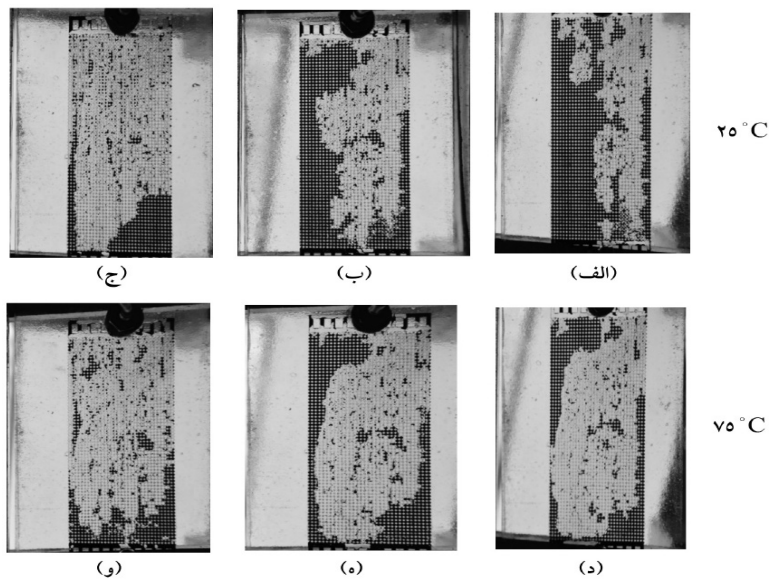
در مدل ناهمگن به خاطر شکل خاص این مدل، مسیرها بر روی قطر اصلی در نظر گرفته شده‌اند. برای انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی ابتدا میکرومدل توسط پمپ سرنگی و پمپ خلأ با نفت اشباع شده است. سپس سیال مورد نظر (آب، محلول پلیمری و یا محلول ماده فعال سطحی زیستی) با دبی  $1 \mu\text{L}/\text{min}$  در میکرومدل تزریق شد. هم‌زمان با انجام آزمایش‌ها و در بازه زمانی ۵ min از میکرومدل عکس گرفته و عکس‌ها جهت پردازش به کامپیوتر منتقل شدند. برای پردازش تصاویر از نرم‌افزار IMAGE J (V.1.51) استفاده و درصد برداشت با استفاده از روش تحلیل پیکسل محاسبه شد. تمامی آزمایشات در دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C و در غلظت بهینه انجام گرفت که نتایج آن در قسمت بعد ارائه شده است.

## نتایج و بحث

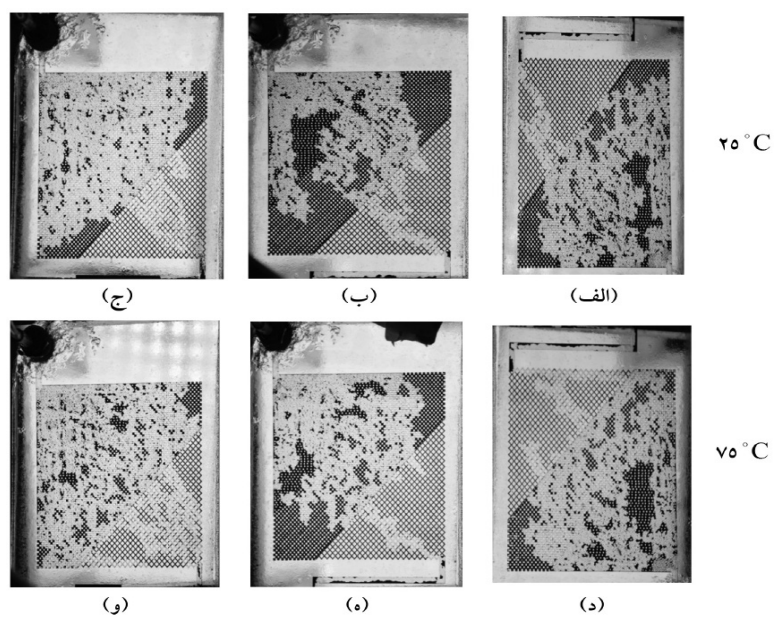
به منظور انجام آزمایشات ابتدا لازم است که غلظت‌های بهینه عملیاتی را به دست آوریم. برای این منظور آزمایشات اولیه برای سیلاب‌زنی پلیمر با غلظت‌های ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ppm انجام شد و مشاهده شد که در غلظت ۲۰۰۰ ppm برداشت توسط پلی‌اکریل‌آمید هیدرولیز شده بیشتر است. همچنین، با انجام آزمایشات مختلف غلظت ۱۲۰ ppm برای سیلاب‌زنی توسط محلول رامنولیپید انتخاب شد. این مقدار در تطابق با غلظت انتخابی توسط



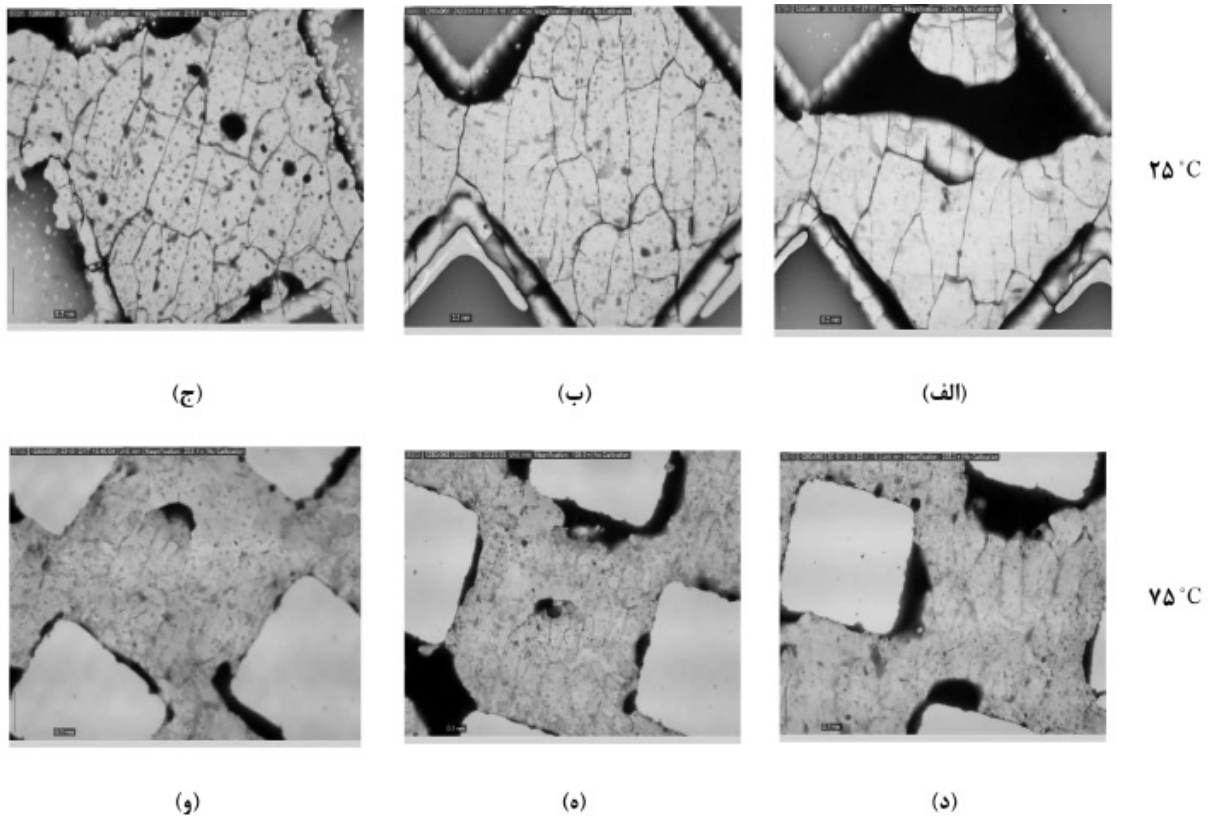
شکل ۳ درصد ازدیاد برداشت نفت (%) توسط آب، رامنولیپید و پلی اکریل آمید در میکرومدل های همگن و ناهمگن در دو دمای مورد آزمایش



شکل ۴ تصاویر ماکروسکوپی برداشت نفت در میکرومدل همگن توسط: (الف و د) آب شور، (ب و ه) رامنولیپید و (ج و و) پلی اکریل آمید در دو دما



شکل ۵ تصاویر ماکروسکوپی برداشت نفت در میکرومدل ناهمگن توسط: (الف و د) آب شور، (ب و ه) رامنولیپید و (ج و و) پلی اکریل آمید در دو دما



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی برداشت نفت در میکرومدل توسط: (الف و د) آب شور، (ب و ه) رامنولیپید و (ج و و) پلی اکریل آمید در دو دما

بیشتری از نفت به تله افتاده در تماس است که منجر به میزان بیشتری از برداشت نفت، در مقایسه با تزریق آب می شود و پدیده انگشتی شدن در سیلاب زنی با این مواد فعال سطحی رخ نمی دهد. بدین معنا که به دلیل اختلاف ویسکوزیته نفت و سیال تزریقی، اگر نفت ویسکوزتر از سیال تزریقی باشد، سیال از روی آن به صورت انگشت یک دست حرکت کرده و در عرض میکرومدل حرکت نمی کند و نفت زیادی درون میکرومدل باقی می ماند. افزوده شدن مواد فعال سطحی به آب مقطر سبب کاهش ویسکوزیته (گرانروی) سیال تزریقی و بهبود نسبت تحرک دو فاز می شود و محلول تزریقی می تواند به نقاط کم تراوا نفوذ کند. لذا، توسعه جانبی جبهه سیال تزریقی بیشتر و حرکت آن پیوسته تر شده که خود باعث افزایش بازده جاروب و افزایش میزان برداشت نفت می شود. در فرآیند سیلاب زنی با پلیمر، پلیمر تزریقی تمایل بیشتری

همچنین، مقدار برداشت نفت توسط پلیمر و ماده فعال سطحی زیستی نسبت به آب شور در هر دو دما بیشتر بوده که این مسأله بیانگر نقش مؤثر این دو ماده در ازدیاد برداشت است. به علاوه، تصاویر ماکروسکوپی نشان می دهند که آب تزریق شده با حجم اندکی از نفت در تماس است. همچنین جبهه جریان پخش شدگی عرضی بسیار کمی دارد و تمایل آن برای نفوذپذیری بسیار ناچیز است. به طوری که با باز شدن مسیری به سمت قسمت خروجی محیط متخلخل، آب از این مسیر برای گذر از بستر متخلخل استفاده می کند. لذا، قسمت عمده نفت درون میکرومدل در معرض جبهه سیال تزریقی واقع نشده که منجر به کاهش بازده جاروب و لذا، میزان پایین برداشت نفت می شود. در فرآیند سیلاب زنی محلول های پلیمر و ماده فعال سطحی زیستی، سیال تزریقی مسیر بیشتری را در میکرومدل طی می کند و با حجم

نفث افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده رانولپید توانایی بیشتری در کاهش کشش بین سطحی داشته و در هر دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C این‌روند یکسان است.

**شکل ۶** تصاویر میکروسکوپی سیلاب‌زنی آب شور و محلول‌های پلیمری و ماده فعال سطحی زیستی را نشان می‌دهد. مطابق شکل در سیلاب‌زنی با آب شور قسمت عمده نفث از روی دیواره جاروب شده است اما هنوز لایه نازکی از نفث به دیواره چسبیده است. در تزریق رانولپید کاهش بیشتر ضخامت لایه نفتی دیده شده است که بیانگر تأثیر مثبت این ماده فعال سطحی در تغییر ترشوندگی است. همان وضعیت پس از سیلاب‌زنی پلیمری مشاهده شد. با توجه به شکل، پلیمر تزریقی لایه نفتی را تقریباً به‌طور کامل از جداره جدا کرده و سیال تزریقی با جداره تماس پیدا کرده است و می‌توان گفت که ترشوندگی محیط متخلخل، در مقایسه با سایر مواد فعال سطحی، به‌میزان بیشتری به‌سمت آب‌دوست تغییر کرده است که سبب افزایش میزان بازیافت نفث شده است. با تزریق محلول ماده فعال سطحی به درون میکرومدل، قسمت آب‌گریز مولکول‌های این مواد با سطح نفث‌دوست شده میکرومدل تماس پیدا می‌کنند و سر آب‌دوست آن در فاز آبی قرار می‌گیرد.

به پخش شدن داشته و توانسته بخش بیشتری را در میکرومدل، در مقایسه با دو ماده دیگر، جاروب کند و لذا نفث بیشتری را در مسیر حرکت خود جابه‌جا می‌کند. در دمای بالاتر با وجود کاهش ویسکوزیته مواد، از آنجا که ویسکوزیته نفث نیز کاهش زیادی دارد باعث بهبود حرکت نفث و در نتیجه افزایش برداشت شده است [۲۸ و ۲۹]. در **جدول ۴ و ۵** تغییرات ویسکوزیته و کشش سطحی در دو دمای مورد آزمایش ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو دمای ۲۵ و ۷۵ °C رانولپید کشش سطحی نفث و آب را کاهش داده است. همچنین در اثر افزایش دما، رانولپید بیش‌ترین کاهش را در کشش سطحی آب ایجاد کرد. به‌طور کلی، در فرآیند تزریق محلول‌های حاوی مواد فعال سطحی، مولکول‌های این مواد در سطح مشترک نفث و آب تزریقی قرار می‌گیرند و کشش بین سطحی نفث و آب را کاهش می‌دهند. این امر سبب کاهش فشار موینگی در داخل منافذ و حفرات شده و این امکان فراهم می‌شود که محلول به سادگی به داخل حفرات نفوذ کرده و نفث به تله افتاده در این مناطق را جابه‌جا کند. بدین ترتیب، سیال تزریق شده دسترسی بیشتری به نفث درجا داشته، مسیر بیشتری را برای حرکت در بستر متخلخل طی می‌کند و در نتیجه میزان برداشت

**جدول ۴** ویسکوزیته نفث، آب شور، محلول پلیمری و محلول رانولپید در دو دمای مورد آزمایش

ویسکوزیته مواد (cp)				دما
محلول رانولپید	محلول پلیمری	آب شور	نفث	
۰/۹۸۶۳	۱۱۰/۱۶۰۴	۰/۹۸۷۷	۱۳۵/۲۹۸۲	۲۵ °C
۰/۴۴۷۹	۳۳/۲۸۵۴	۰/۴۶۴۳	۱۴/۲۰۶۲	۷۵ °C

**جدول ۵** کشش بین سطحی نفث و آب شور، محلول پلیمری و محلول رانولپید در دو دمای مورد آزمایش

کشش سطحی بین نفث و مواد (mN/m)			دما
محلول رانولپید	محلول پلیمری	آب شور	
۲۰/۴۲۸	۳۵/۷۶۹	۲۷/۳۲۲	۲۵ °C
۱۰/۵۹۴	۲۵/۸۵۵	۲۳/۹۰۷	۷۵ °C



نیز بر تغییر ترشوندگی مؤثر بوده است چراکه در دمای بالاتر ویسکوزیته نفت کاهش یافته و نفت بیشتری از سطح جدا می‌گردد. این نتایج برای هر دو مدل همگن و ناهمگن صادق بوده است. در فرآیند سیلاب‌زنی آب، به دلیل پایین بودن ویسکوزیته آب در مقایسه با نفت محبوس، تحرک آب به خوبی صورت نمی‌گیرد. در نتیجه، سرعت سیال تزریقی بالا است و سیال فرصت نفوذ به سایر نقاط حفرات را ندارد و از کوتاه‌ترین مسیر خود را به انتها (انتهای میکرومدل) می‌رساند. در سیلاب‌زنی پلیمر، افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی با بهبود تحرک، باعث می‌شود سیال تزریقی کندتر حرکت کرده و نفوذ به حفرات بیشتر شده و نفت به دام انداخته در حفرات را شسته و برداشت نفت افزایش یابد. ویسکوزیته آب شور در دمای  $25^{\circ}\text{C}$   $0.98 \text{ cp}$  است که در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  به مقدار  $0.46 \text{ cp}$  رسیده است و کاهش ویسکوزیته را شاهد بودیم. همچنین، کاهش  $12/5\%$  کشش بین سطحی را داشتیم. بنابراین، آب شور در اثر بالارفتن دما با کاهش ویسکوزیته و نیز کاهش کشش بین سطحی سبب افزایش برداشت نفت می‌گردد. ویسکوزیته پلیمر پلی‌اکریل آمید از  $110/160 \text{ cp}$  در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  به مقدار  $33/285 \text{ cp}$  در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  رسید که افت قابل ملاحظه‌ای است. همچنین در اثر بالا رفتن دما، کاهش  $27/7\%$  در کشش بین سطحی پلیمر و نفت مشاهده شد. از این‌رو، این پلیمر در اثر بالارفتن دما با کاهش ویسکوزیته به مقدار زیاد و همچنین، کاهش کشش بین سطحی سبب افزایش برداشت نفت شده است. در نهایت، ویسکوزیته رامنولیپید در دمای  $25^{\circ}\text{C}$   $0.986 \text{ cp}$  و در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  به مقدار  $0.447 \text{ cp}$  رسیده است که با کاهش ویسکوزیته همراه بوده است. همچنین، کشش بین سطحی ماده فعال سطحی زیستی و نفت در اثر بالا رفتن دما  $48\%$  کاهش داشته است. بنابراین، این ماده فعال سطحی زیستی در اثر بالارفتن دما با کاهش ویسکوزیته و همچنین

این امر موجب افزایش برهم‌کنش دیواره سطح میکرومدل و فاز آبی شده و نتیجه آن این است که از برهم‌کنش دیواره سطح میکرومدل و فاز نفتی کاسته می‌شود. این پدیده سبب تغییر ترشوندگی سطح روزنه به سمت آب‌دوست شده و نتیجه آن جدا شدن نفت چسبیده به جداره و بازیافت بیشتر نفت است. نتایج فوق برای دمای  $25^{\circ}\text{C}$  بوده و این نتایج در دمای  $75^{\circ}\text{C}$  نیز برقرار است. به‌طور کلی، با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت که تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی، کاهش کشش بین سطحی و کاهش ویسکوزیته در اثر افزایش دما و افزایش ویسکوزیته آب در اثر افزودن ماده فعال سطحی به آن و تهیه محلول‌های فعال سطحی، ساز و کارهای حاکم بر فرآیند هستند که برآیند آنها موجب افزایش برداشت نفت شده و این نتیجه برای پلیمر تأثیر بیشتری داشته و تأثیر آنها بر روی رامنولیپید بیشتر از آب بوده است.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام چند آزمون سیلاب‌زنی در میکرومدل‌های شیشه‌ای همگن و ناهمگن و در دو دمای  $25^{\circ}\text{C}$  و  $75^{\circ}\text{C}$ ، عملکرد رامنولیپید با عملکرد پلیمر و آب در همین شرایط مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که در دمای بالاتر، درصد برداشت نفت توسط هر سه ماده و در هر دو مدل همگن و ناهمگن بیشتر بوده است. برداشت کلی توسط پلیمر پلی‌اکریل آمید نسبت به رامنولیپید و رامنولیپید نسبت به آب شور بیشتر بوده است. تغییر ترشوندگی یا آب‌دوستی برای پلیمر از رامنولیپید و آب بیشتر است. به همین خاطر باعث برداشت بیشتر شده است. سطح هرچه آب‌دوست‌تر باشد، آب راحت‌تر جایگزین نفت می‌گردد و برداشت بیشتر می‌شود. نفت باقی‌مانده روی سطح دیواره در سیلاب‌زنی پلیمر کمتر از آب و ماده فعال سطحی زیستی بوده است و نتایج نشان داد که پلیمر توانایی بیشتری در آب‌دوست کردن سطوح میکرومدل داشته است. بنابراین، برداشت توسط این ماده بیشتر است. دما

کاهش کشش بین سطحی به مقدار زیاد، سبب افزایش برداشت نفت می‌گردد. به‌طور کلی، تأثیر کشش بین سطحی در مقابل تأثیر ویسکوزیته در اثر

افزایش دما کمتر است. به همین دلیل است که برداشت توسط پلیمر در دمای بالاتر بیشتر است.

## مراجع

- [۱]. دهقان ع.ا.، ضرورت به‌کارگیری روش‌های ازدیاد برداشت در مخازن نفتی و راهبرد شرکت نفت فلات قاره ایران، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۹۸، صفحات ۲۱-۲۸، ۱۳۹۱.
- [2]. Sen R (2008) Biotechnology in petroleum recovery: The microbial EOR, *Progress in Energy and Combustion Science*, 34: 714-724.
- [3]. Ahmadi M A, Galedarzadeh M, Shadizadeh S R (2015) Wettability alteration in carbonate rocks by implementing new derived natural surfactant: enhanced oil recovery applications, *Transport in Porous Media*, 106, 3: 645-667.
- [4]. Ahmadi M A, Arabsahebi Y, Shadizadeh S R, Behbahani S S (2014) Preliminary evaluation of mulberry leaf-derived surfactant on interfacial tension in an oil-aqueous system: EOR application, *Fuel*, 117: 749-755.
- [۵]. خادم الحسینی ر.، جعفری آ.، موسوی م.، منطقیان م. (۱۳۹۸) مقایسه عملکرد ماده فعال سطحی زیستی تولید شده (رامنولیپید) و مواد فعال سطحی متداول (SDS، DTAB، CTAB و SDBS) در ازدیاد برداشت نفت. پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی - پلیمر، ۱، ۶۹-۸۰.
- [6]. Chakraborty S, Ghosh M, Chakraborti S, Jana S, Sen K K, Kokare C, Zhang L (2015) Biosurfactant produced from *Actinomyces nocardiformis* A17: characterization and its biological evaluation, *International Journal of Biological Macromolecules*, 79: 405-412.
- [7]. Geetha S, Banat I M, Joshi S J (2018) Biosurfactants: Production and potential applications in microbial enhanced oil recovery (MEOR), *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 14: 23-32.
- [8]. Zhou X, Dong M, Maini B (2013) The dominant mechanism of enhanced heavy oil recovery by chemical flooding in a two-dimensional physical model, *Fuel*, 108: 261-268.
- [9]. Kumar S, Mandal A (2016) Studies on interfacial behavior and wettability change phenomena by ionic and nonionic surfactants in presence of alkalis and salt for enhanced oil recovery, *Applied Surface Science*, 371: 42-51.
- [۱۰]. امانی ح. (۱۳۹۳) "مطالعه مشاهده‌ای ازدیاد برداشت میکروبی نفت با استفاده از میکرومدل، پژوهش نفت" شماره ۸۰، صفحات ۱۶۲-۱۶۹.
- [۱۱]. محمودی م. (۱۳۹۸) "بررسی پاک‌سازی خاک‌آلوده به نفت خام به‌روش زیستی با استفاده از بیوسورفکتانت رامنولیپید" پژوهش نفت، ۲۹، ۱۳۶-۱۴۷.
- [12]. AlDousary S (2012) Determining pore level mechanisms of alkaline surfactant polymer flooding using a micromodel, in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition SPE*, San Antonio, Texas, USA.
- [13]. Chen Z, Zhao X, Wang Z (2015) A comparative study of inorganic alkaline/polymer flooding and organic alkaline/polymer flooding for enhanced heavy oil recovery, 469: 150-157.
- [14]. Yousefvand H, Jafari A (2015) Enhanced oil recovery using polymer/nanosilica, 11: 565-570.
- [۱۵]. شعبان م، رضانی ا، سعادت آبادی م، احدیان م. (۱۳۹۶) "مروری بر پلیمرهای محلول در آب به‌عنوان عوامل کنترل تحرک در ازدیاد برداشت نفت. فصل‌نامه علمی - ترویجی بسپارش" ۳، ۳۸-۴۹.
- [16]. Yousefvand H A, Jafari A J J o P S (2018) Engineering, Stability and flooding analysis of nanosilica/NaCl/HPAM/SDS solution for enhanced heavy oil recovery, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 162: 283-291.
- [17]. Delamaide E (2018) Polymers and their limits in temperature, salinity and hardness: theory and practice, in *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Brisbane, Australia.
- [۱۸]. امانی ح. (۱۳۹۳) بررسی ازدیاد برداشت نفت به‌روش سیلاب‌زنی سورفکتین درون میکرومدل و مغزه. پژوهش نفت، شماره ۸۱، صفحات ۵۵-۶۵.
- [19]. Udoh T, Akanji L, Vinogradov J (2018) Experimental investigation of potential of combined controlled salinity and bio-surfactant csbs in enhanced oil recovery EOR processes, in *SPE Nigeria Annual International*



Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria.

[20]. Câmara J M D A, Sousa M A S B, Neto E B, Oliveira M C A (2019) Application of rhamnolipid biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* in microbial-enhanced oil recovery (MEOR), *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 3: 2333-2341.

[21]. Zholi L, Subhash A, Rubia M, Abdulkareem A, Zhenghe X, Ali Y (2020) Microscale effects of polymer on wettability alteration in carbonates, *Society of Petroleum Engineers*, 25: 1884-1894.

[22]. Abbasi H, Hamed M M, Lotfabad T B, Zahiri H S, Sharafi H, Masoomi F, Noghabi K A (2012) Biosurfactant-producing bacterium, *Pseudomonas aeruginosa* MA01 isolated from spoiled apples: physicochemical and structural characteristics of isolated biosurfactant, *Journal of Bioscience And Bioengineering*, 113, 2: 211-219.



# Comparison Experimental Study on Polyacrylamide and Rhamnolipid Biosurfactant Performance in Enhancement Oil Recovery in Homogenous and Non-homogenous Glass Micromodels

Samira Amiri<sup>1</sup>, Safoora Karimi<sup>1\*</sup>, Mojtaba Shafiee<sup>1</sup> and Mohammadreza Assari<sup>2</sup>

1. Chemical Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

2. Mechanical Engineering Department, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

s.karimi@jsu.ac.ir

DOI: 10.22078/pr.2021.4266.2929

Received: July/28/2020

Accepted: November/17/2020

## Introduction

Nowadays, due to the shortage of light oil reservoir in the world, enhancement oil recovery (EOR) in heavy oil reservoirs has received more attention. According to the studies, primary recovery in heavy oil reservoirs is limited to 5 percent which increases to about 10-15 percent by using EOR methods [1-3]. One of the suggested solutions to this problem is the use of biosurfactants, called Microbial Enhancement Oil Recovery (MEOR). Biosurfactants are important products of industrial microbiology which are produced by microorganisms. Due to high diversity, low risk to the environment, lower toxicity and ability to return to ecosystem, the use of biosurfactants is preferred to chemical surfactants. They decrease capillary pressure by decreasing Interfacial Tension (IFT) between oil and reservoir rock. Also, their emulsifying ability cause to separate oil from rock surfaces. One of the most important and powerful biosurfactants for this purpose is Rhamnolipid, which is produced by *pseudomonas aeruginosa* [4]. In the present study, firstly, Rhamnolipid Biosurfactant was produced. Then, EOR tests were implemented in two homogeneous and non-homogeneous glass micromodels. Finally, Rhamnolipid Biosurfactant performance as EOR injected fluid was compared with saltwater and anionic polyacrylamide polymer in the same condition.

## Materials and Methods

In this study, first of all glass micromodel was designed and made then saltwater flooding tests was performed in 1atm and two different temperature of 25 °C and 75 °C as the reference experiment. After that, flooding tests were conducted using polyacrylamide polymer and rhamnolipid at the same operating condition. Finally, the results were compared in term of quality and quantity.

Here, produced oil from Bangestan wells was used which is considered as heavy oil. Physical specifications of used materials in ambient temperature are summarized in Table 1.

Table 1 Physical specification of used material for flooding

	Oil	Polyacrylamide	Rhamnolipid
Concentration (ppm)	-	2000	120
API	23.48	-	-
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.9158	0.9969	0.9967
Viscosity (centipoise)	135.298	110.1604	0.9863

### Flooding Test

Two homogeneous and non-homogeneous micromodels were considered in this research which is designed by Corel software. First, micromodels were saturated by oil using syringe and vacuum pumps. Then, EOR fluid (saltwater, polymer solution, or biosurfactant solution) was

injected to the micromodels in 1  $\mu\text{l}/\text{min}$ . Simultaneously, in each 5 minutes, photos were taken from micromodels and transferred to computer to analyze. The temperature was controlled by an industrial drier. Figure 1 shows a schematic of the experimental setup.

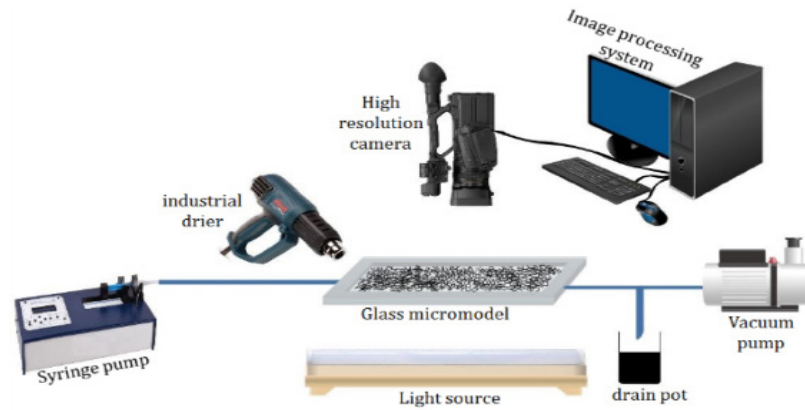


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

### Results and Discussion Phase Composition Analysis

Figure 2 shows the obtained results of flooding tests in two homogeneous and nonhomogeneous micromodels and 25 °C and 75 °C for three EOR fluid. Moreover, the microscopic photos taken during flooding test are shown in Fig. 3.

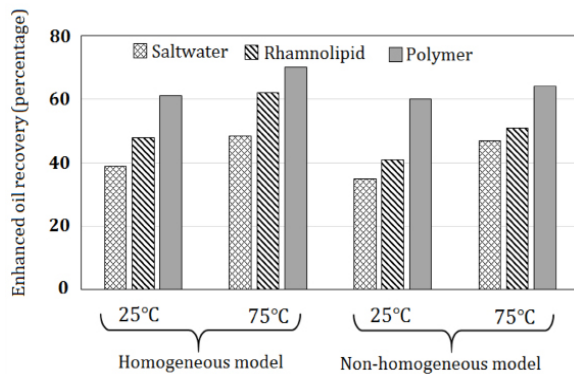


Fig. 2 Enhanced oil recovery percentage by saltwater, polymer and Rhamnolipid biosurfactant flooding in two micromodels and two temperature

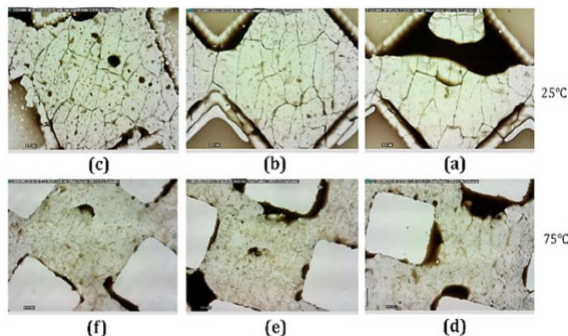


Fig. 3 Microscopic photo of oil recovery in micromodel by: a,d) Saltwater, b,e) Rhamnolipid, c,f) Polymer micromodels and two temperature

According to the results, the more temperature, the more oil recovery percentage resulted for three solution. Moreover, oil recovery percentage by polymer and biosurfactant had higher value than saltwater, which it indicates effective role of these two materials in EOR. Macroscopic images showed that injected saltwater touched with a small volume of oil and forward flow had little transverse diffusion and a very low tendency to diffuse (fingering phenomenon).

In flooding process of polymer and biosurfactant solution, the injected fluid traveled longer distance through micromodel, resulting in more recovery of trapped oil. Furthermore, adding surfactant to water caused viscosity reduction and improvement of mobility ratio. On the other word, rhamnolipid solution could penetrate into low permeability pores and consequently oil recovery enhanced. Polymer also had higher tendency to diffuse and can sweep much more part in the micromodel in comparison to other two materials. Tables 2 and 3 show the changes in viscosity and surface tension at the two tested temperatures.

Table 2 Viscosity changes at two temperature

Viscosity (centipoise)				Temp.
Rhamnolipid solution	Polymer solution	saltwater	oil	
0.9863	110.1604	0.9877	135.2982	25
0.4479	33.2854	0.4643	14.2062	75

Table 3 Surface tension recorded at two temperature

Surface tension between oil and substance (mN/m)			Temp.
Rhamnolipid solution	Polymer solution	saltwater	
20.428	35.769	27.322	25
10.594	25.855	23.907	75

As illustrated in Table 3, in both temperature, Rhamnolipid reduced surface tension between oil and water. Generally, the more temperature, the less interfacial tension. This can be justified that surfactant lies on a surface of oil and injected water and consequently decreases interfacial tension between oil and water. It reduces the capillary pressure in the pores and cavities, which leads to easily penetration of the solution into the pores and displaces the trapped oil in this area. Wettability change was greater as a result of polymer injection than Rhamnolipid and water.

### Conclusions

In this paper, several flooding tests were implemented in homogeneous and nonhomogeneous glass micromodel at two temperature of 25 and 75 °C and performance of Rhamnolipid biosurfactant and polymer and water were compared. Results showed at higher temperatures, oil recovery percentage by all three material in two homogeneous and nonhomogeneous micromodels was greater. The greatest total recovery was related to Polyacrylamide tests. On the other words, polymer was more capable to make the surface of micromodels water wet. Besides, the effect of temperature is not

negligible. So that the more temperature, the less oil viscosity and the more oil separation from micromodel surface. These results were true for both homogeneous and nonhomogeneous micromodels.

### References

1. Sen R (2008) Biotechnology in petroleum recovery: the microbial EOR, Progress in energy and combustion Science, 34, 6, 714-724.
2. Ahmadi M A, Galedarzadeh M, and Shadizadeh S R (2015) Wettability alteration in carbonate rocks by implementing new derived natural surfactant: enhanced oil recovery applications”, Transport in porous media, 106, 3, 645-667.
3. Ahmadi M A, Arabsahebi Y, Shadizadeh S R, Behbahani S S (2014) Preliminary evaluation of mulberry leaf-derived surfactant on interfacial tension in an oil-aqueous system: EOR application, Fuel, 117, 749-755.
4. Amani H (2016) A Visual Study of Microbial Enhanced Oil Recovery Using Micromodels, Journal of Petroleum Research, 24, 80: 162-169, in Persian.