

مروری بر سازوکارها در فرایند ازدیاد برداشت میکروبی نفت

هادی آذرخوا، آرزو جعفری^{*}، سید محمد موسوی، محمد حسین شعبانی، سیده افروز کابلی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

عموماً اکثر نفت درجا بعد از روش‌های متعارف در مخزن باقی می‌ماند و برای تولید این نفت باقی‌مانده روش‌های متنوع ازدیاد برداشت نفت به کار گرفته می‌شود. در گذشته، بیشتر نفت به خصوص در مخازن بالغ، به دلیل گران‌قیمت بودن روش‌های برداشت رها می‌شده‌اند. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در انتخاب روش ازدیاد برداشت، پتانسیل اقتصادی روش انتخاب شده می‌باشد. ازدیاد برداشت میکروبی نفت یک روش کم‌هزینه است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و محصولات متابولیکی آنها نفت‌های باقی‌مانده در حفرات را تولید می‌کند. علاوه بر هزینه‌ی کم، بازیافت بهتر نفت با به‌کارگیری سازوکارهای مختلف، زیست تخریب‌پذیر بودن محصولات و مقابله با هدررفت با استفاده از میکروارگانیسم‌های بومی از دیگر مزایای این روش می‌باشد. بیوسورفکتانت، بیوپلیمر، بیوگاز، بیواسید و بیومس از جمله متابولیت‌هایی هستند که توسط باکتری‌ها ترشح می‌شوند و هر کدام به نوبه خود با تغییر خواص فیزیکی نفت و یا تاثیر بر خلل و فرج سنگ مخازن، برداشت نفت را تسهیل می‌کنند. در این تحقیق، برای اولین بار سعی شده است که با مروری بر تحقیقات مختلف انجام شده، به بررسی میکروسکوپیکی سازوکارهای مختلف در ازدیاد برداشت میکروبی نفت پرداخته شود و با در نظر گرفتن مزایا و معایب هر کدام از این سازوکارها و همچنین چالش‌های موجود در آن، کارایی این روش را بررسی کرده تا بتوان کاستی‌های آن را بهبود بخشید.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۱۰/۲۵

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۱۱/۰۴

واژگان کلیدی:

ازدیاد برداشت میکروبی، پتانسیل اقتصادی، زیست تخریب‌پذیر، سازوکارهای مختلف، محصولات زیستی

مقدمه

در سال‌های اخیر، نفت همواره به‌عنوان یکی از منابع مهم و حیاتی انرژی مطرح بوده است و همواره جوامع در تلاش بوده‌اند تا با کشف مخازن جدیدتر و یا افزایش و بهبود تولید نفت در مخازن و میادین موجود، به رشد اقتصادی نایل شوند. استفاده صحیح از منابع نفتی به منظور افزایش طول عمر آنها و برخورداری نسل‌های آینده از این ذخایر خدادادی امری ضروری است؛ لذا مدیریت مخازن یا به‌عبارتی دیگر، به‌کارگیری روش‌های مناسب به‌منظور حفظ و صیانت از مخازن، بالابردن راندمان تولید و حفظ آن در حد مطلوب در طول زمان، امری ضروری می‌باشد. مراحل تولید از مخازن هیدروکربنی را می‌توان به سه فاز اصلی تقسیم کرد: در فاز اول نفت با انرژی طبیعی مخزن تولید می‌شود. فاز دوم پس از افت فشار مخزن شروع شده و هدف، مقابله با شدت کاهش فشار با تزریق آب و یا گاز است. فاز سوم شامل استخراج نفت باقی‌مانده از فازهای اولیه و ثانویه توسط یک سری روش‌هاست. همان‌طور که بیان شد یکی از مهم‌ترین مراحل تولید، مرحله‌ی ازدیاد برداشت است. زیرا طی روش‌های تولید اولیه و ثانویه‌ی نفت تنها حدود ۳۵ - ۵۵ درصد از مخازن، نفت برداشت می‌شود [۱، ۲]. قبل از انتخاب روشی برای ازدیاد برداشت، باید ضررها و سودهای احتمالی را در نظر گرفته شوند تا روش مناسب برای آن مخزن به‌خصوص برگزیده شود. در گذشته، بیشتر نفت به خصوص در مخازن بالغ به خاطر روش‌های گران‌قیمت رها می‌شده‌اند. اما امروزه به خاطر

کاهش قیمت نفت و با توجه به مشکلات اقتصادی، یک روش بهینه‌ی بازیافت انتخاب می‌شود؛ بنابراین توسعه‌ی روش‌های مقرون‌به‌صرفه که بیش‌ترین نفت ممکن را تولید کنند مورد توجه تحقیقات انرژی امروزی قرار گرفته‌اند. از همین رو، در سال‌های اخیر استفاده از میکروارگانیسم‌ها به منظور ازدیاد برداشت نفت از مخازن بسیار مورد توجه پژوهشگران بوده است. این روش به صورت گسترده در صنعت نفت مورد توجه قرار گرفته و حتی علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی فراوان، در مقیاس میدانی نیز مورد آزمایش قرار گرفته است [۳]. ازدیاد برداشت میکروبی نفت یک روش کم‌هزینه است که با استفاده از میکروارگانیسم‌ها و محصولات متابولیکی آنها نفت‌های باقی‌مانده در حفرات را تولید می‌کند. هزینه‌ی کم، بازیافت بهتر نفت با به‌کارگیری سازوکارهای مختلف، زیست تخریب‌پذیر بودن محصولات و مقابله با هدررفت با استفاده از میکروارگانیسم‌های بومی را می‌توان از مزایای اصلی این روش نام برد. با توجه به مزایای ذکر شده آن‌چنان‌که باید، از این روش در صنعت نفت و گاز استفاده نمی‌شود. اساس این روش بر پایه‌ی استفاده از متابولیسم میکروارگانیسم‌ها به منظور افزایش بازده و یا تولید موادی که باعث کاهش گرانشی نفت و انتقال آسان آن به سمت چاه‌های تولیدی می‌شود، بنا شده است؛ روش‌های میکروبی از روش‌های نوین افزایش بازده ذخایر به‌شمار می‌روند. در ادامه، به توضیح روش‌های ازدیاد برداشت میکروبی، سازوکارهای

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (ajafari@modares.ac.ir)

موجود و چالش‌های پیش‌رو در این حوزه پرداخته خواهد شد.

۱- ازدیاد برداشت نفت با استفاده از روش‌های میکروبی

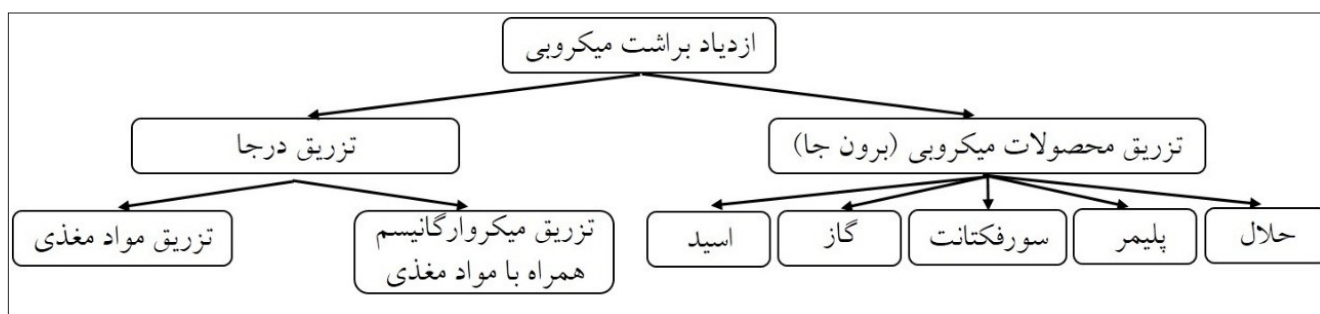
میکروپشناسی نفت که شاید مهم‌ترین موضوع در فرایند ازدیاد برداشت میکروبی است، بر روی قابلیت میکروارگانیسم‌ها در استفاده از منابع انرژی و کربن و متابولیت آنها تمرکز دارد [۴]. اگر چه هدف بیشتر فرایندهای ازدیاد برداشت میکروبی کاهش نفت باقی‌مانده در مخزن می‌باشد، اما پیاده‌سازی روش ازدیاد برداشت میکروبی می‌تواند متفاوت باشد. ازدیاد برداشت میکروبی نفت می‌تواند به یکی از روش‌های زیر انجام می‌گیرد: (آ) تزریق میکروارگانیسم‌های غیربومی^۱ همراه با مواد مغذی متناسب با رشد سلولی (ب) تزریق مواد مغذی به‌تنهایی برای تحریک و رشد میکروارگانیسم‌های بومی^۲ مخزن؛ (ج) تولید محصولات میکروبی به صورت برون‌جا و تزریق متعاقب آنها در مخزن (تزریق برون‌جا) که در شکل-۱ این روش‌ها نشان داده شده‌اند. پیاده کردن هر کدام از روش‌های ازدیاد برداشت میکروبی براساس حضور کربن در مواد مغذی تزریقی متفاوت می‌باشد. از بین روش‌های فوق، کارآمدترین شیوه، رویکرد (ب) است. زیرا در روش برون‌جا به‌دلیل قابل تجزیه‌بودن محصولات، مواد ورودی به‌سرعت توسط میکروارگانیسم‌های موجود در مخزن تجزیه می‌شوند. رویکرد (آ) نیز به‌دلیل اینکه نوع و نحوه‌ی فعالیت، همچنین تعداد میکروارگانیسم‌های بومی مخزن مشخص نیست، روش چندان جالبی به‌شمار نمی‌رود. هر دو نوع میکروارگانیسم‌های درجا و تزریق شده بر اساس توانایی آنها برای سازگاری با شرایط مخزن برای ازدیاد برداشت نفت استفاده می‌شوند. در ازدیاد برداشت میکروبی نفت معمولاً از باکتری‌هایی استفاده می‌شود که به دلیل دارابودن چندین قابلیت کاربردی اثر مفیدی در افزایش ضریب بازیافت داشته‌اند [۵].

۱-۱- محصولات حاصل از فعالیت‌های مفید میکروبی

باکتری‌ها یک گروه متنوع و خیلی بزرگ از تک سلولی‌ها هستند و محدوده‌ی وسیعی از شاخص‌های تغذیه‌ای، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را دارا بوده و می‌توانند در بهبود برداشت نفت مورد استفاده قرار گیرند. در مخازن نفت نیز بعضی گروه‌های باکتریایی به صورت طبیعی (درجا) وجود دارند که با مصرف مواد غذایی موجود محصولاتی تولید می‌کنند که ممکن است باعث افزایش تولید نفت شوند. در طی رشد این باکتری‌ها در داخل مخزن، محصولاتی از قبیل اسیدها، مواد فعال سطحی، حلال‌ها، بیوپلیمرها و گازها تولید می‌شوند که همه‌ی آنها به‌طور معمول به‌عنوان مواد شیمیایی با سنتز زیستی برای ازدیاد برداشت نفت به داخل مخازن تزریق می‌شوند. در جدول-۱ هر کدام از این مواد تولید شده به‌صورت اجمالی بررسی و سازوکارهایی که هر کدام منجر به افزایش تولید می‌شوند، ارائه شده است. این محصولات می‌توانند در نفت‌خام موجب تغییرات مطلوب شیمیایی و فیزیکی شده و در نهایت، منجر به ازدیاد برداشت نفت از مخزن گردند. البته توجه به این نکته که همه محصولات زیستی تولید شده، در مقادیر بالا تولید نمی‌شوند و ممکن است برخی از مواد در مقدار تولید شده توانایی افزایش تولید نفت را نداشته باشند، لازم و ضروری می‌باشد. کاهش در نیروهای بین سطحی میان نفت و آب شور به‌وسیله‌ی یک ماده‌ی فعال سطحی، نفت به تله افتاده شده را آزاد خواهد نمود و می‌تواند مهم‌ترین سازوکار در ازدیاد برداشت میکروبی نفت باشد.

۱-۲- سازوکارهای موجود در ازدیاد برداشت میکروبی نفت

در ازدیاد برداشت میکروبی نفت، میکروارگانیسم‌ها با سیستم در تعامل اند و سعی در تغییر نیروهای موثر در حرکت نفت را دارند. میکروارگانیسم‌ها و محصولات زیستی‌شان با سازوکارهای مختلفی باعث تولید نفت باقی‌مانده و افزایش بازدهی جاروب سطحی می‌شوند. در واقع در تحقیقات آزمایشگاهی چون سازوکارهای مختلف به‌طور



هم‌زمان رخ می‌دهند، جداکردن این مکانیسم‌ها از هم‌دیگر کار

سختی است و یکی از معضلات موجود در ازدیاد برداشت میکروبی عدم تفکیک همین مکانیسم‌هاست. مطالعات زیادی برای بررسی هر کدام از مکانیسم‌ها، صورت گرفته است اما هنوز نمی‌توان افزایش تولید نفت را به یک مکانیسم خاص نسبت داد. از مکانیسم‌های موجود در ازدیاد برداشت میکروبی نفت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۵]:

- کاهش کشش سطحی و کشش بین سطحی و اصلاح ترشوندگی
 - انسداد انتخابی توسط میکروارگانیسم‌ها و محصولات زیستی شان
 - افزایش گرانیوی فاز آبی به‌واسطه تولید پلیمرهای زیستی
 - کاهش گرانیوی نفت به‌وسیله حل شدن گاز تولیدی توسط باکتری‌ها
 - حل کردن سنگ مخزن به‌واسطه تولید اسید
- سازوکارهای ذکر شده از طریق محصولات تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها، که در جدول ۱- ارائه شد، موجب تولید بیش‌تر نفت از بستر متخلخل می‌شوند. در ادامه، به بررسی کامل‌تر این

۱-۲-۱- افزایش تولید نفت با سازوکار تولید بیوسورفکتانت

یکی از مشکلات موجود در مخازن بالغ، نفت‌دوست شدن سطوح می‌باشد. برای مقابله با این مشکل مواد فعال سطحی می‌توانند، مفید باشند؛ زیرا این مواد قابلیت تغییر ترشوندگی را دارا می‌باشند. سورفکتانت‌ها شامل فرایندهای سلولی مختلفی از جمله انتقال مواد نامحلول در آب به داخل سلول، تشکیل بیوفیلم و جذب سلول‌ها روی سطح‌های مختلف، هستند. سورفکتانت مولکول‌های دوگانه‌دوست هستند که دارای یک بخش آبدوست (آنیونی، کاتیونی یا آمفوتری) و یک بخش آبگریز می‌باشند و تمایل دارند در فصل مشترک بین فازهای سیالات با درجه‌های مختلف قطبیت و پارامتر حلالیت (مانند فصل مشترک نفت-آب یا آب-هوا) تفکیک شوند. مزیتی که بیوسورفکتانت‌های تولید شده توسط میکروارگانیسم‌ها، نسبت به بیشتر سورفکتانت‌های شیمیایی دارند این است که آنها

۱ کاربرد نانوفناوری در کل محدوده صنعت بالادستی

میکروارگانیسم	محصولات	سازوکارهای به کار گرفته شده	مراجع
<i>Acinetobacter baylyi</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Bacillus Sp.</i> , <i>Clostridium Sp.</i> , <i>Pseudomonas Sp.</i> , <i>Brevibacterium Sp.</i> , <i>Candida lipolytica</i>	بیوسورفکتانت	<ul style="list-style-type: none"> ■ کاهش کشش سطحی بین نفت و سطح آب و سنگ که باعث امولسیون‌سازی می‌شود. ■ بهبود اندازه حفرات ■ اصلاح میزان رطوبت 	[۸-۶]
<i>Clostridium Sp.</i> , <i>Enterobacter Aerogenes</i> , <i>Methanobacterium Sp.</i> , <i>Bacillus Sp.</i>	بیوگاز (گازهای متان، هیدروژن و نیتروژن کربن دی‌اکسید)	<ul style="list-style-type: none"> ■ اصلاح نفوذپذیری میکروبی ■ کنترل تحرک ■ بهبود ویسکوزیته ■ کنترل تحرک آب 	[۱۵-۱۲]
<i>Bacillus Polymyxa</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Arthrobacter Viscosus</i> , <i>Leuconostoc Mesenteroides</i> , <i>Xanthomonas Campestris</i> , <i>Enterobacter Sp.</i> , <i>Bacillus sonorensis</i> , <i>Halomonas Sp.</i> , <i>Paenibacillus bovis Sp.</i>	بیوپلیمر	<ul style="list-style-type: none"> ■ اصلاح نفوذپذیری میکروبی ■ کنترل تحرک ■ بهبود ویسکوزیته ■ کنترل تحرک آب 	[۱۵-۱۲]
<i>Clostridium Sp.</i> , <i>Enterobacter Aerogenes</i>	بیو اسید	<ul style="list-style-type: none"> ■ افزایش نفوذپذیری به وسیله ی حل کردن رسوبات کربنات از دهانه حفرات ■ قابلیت امولسیون شدن ■ کاهش ویسکوزیته توسط CO₂ تولید شده ■ از واکنش شیمیایی بین اسید و کربنات ■ کاهش کشش سطحی 	[۱۱]
<i>Bacillus Subtilis</i> , <i>Leuconostoc Mesenteroides</i> , <i>Xanthomonas Campestris</i> , <i>Bacillus Licheniformis</i>	بیومس (زیست توده)	<ul style="list-style-type: none"> ■ جایگزینی فیزیکی نفت بوسیله رشد و نمو بین نفت و سنگ یا سطح آب ■ دگرگونی رطوبت پذیری به‌وسیله رشد میکروبی ■ توانایی دوشاخه کردن مناطق نفوذپذیر ■ انسداد انتخابی 	[۱۶]
<i>Clostridium Sp.</i> , <i>Zymomonas Mobilis</i>	بیوخلال (الکل‌ها و کتون‌ها)	<ul style="list-style-type: none"> ■ کاهش ویسکوزیته با حل شدن در نفت ■ قابلیت امولسینی شدن ■ حل شدن در نفت و حذف هیدروکربن-های سنگین و با زنجیره بلند از دهانه حفرات ■ کاهش کشش سطحی 	[۱۷]

به نمک‌های حل شده در آب‌های میادین نفت، حساس نیستند. کارایی یک بیوسورفکتانت به وسیله‌ی توانایی آن برای کاهش دادن کشش سطحی، تعیین می‌شود. بیشتر میکروارگانیزم‌هایی که قابلیت تولید بیوسورفکتانت‌ها را دارا هستند، در شرایط هوازی رشد می‌کنند. از طرفی میکروارگانیزم‌های هوازی تولیدکننده‌ی بیوسورفکتانت، به خاطر نبود اکسیژن در مخزن برای ازدیاد برداشت میکروبی درجا مفید نیستند. در طول سیلاب‌زنی با سورفکتانت، مشکل اصلی، جذب سورفکتانت در سطح سنگ است. بنابراین غلظت موثر کمتر از غلظت تولید شده می‌باشد. این مشکل در فرایندهای درجا نیز وجود دارد ولی وقتی سورفکتانت به صورت درجا تولید می‌شود، به‌خاطر غلظت بالا این جذب ناچیز در نظر گرفته می‌شود؛ زیرا غلظت سورفکتانتی که در طول مسیر از طریق جذب سطحی از بین می‌رود، نادیده گرفته می‌شود و فقط سورفکتانت در محل تولید شده، جذب می‌گردد. در جدول ۲- به‌صورت مفصل‌تر به مطالعات صورت گرفته در این زمینه

۲ | مطالعات صورت گرفته در زمینه ازدیاد برداشت میکروبی با سازوکار تولید بیوسورفکتانت

مرجع	نتایج	محصول	میکروارگانیزم
جنم و همکاران [۱۸]	کاهش کشش سطحی محیط کشت را به کمتر از 30 mN/m	بیوسورفکتانت	باسیلوس لیکنیفورمیس JF-2 به دست آمده از آب شور بازیافت شده از یک چاه نفت
یحیی الوهیبی [۱۹]	بیوسورفکتانت تولیدی بیش‌ترین کاهندگی را در حضور منابع کربن گلوکز و ملاس روی کشش سطحی و بین سطحی از خود نشان داده‌اند. ضریب بازیافت برای نفت سبک و سنگین در مغزه‌ی ماسه‌سنگی به‌ترتیب ۱۷ - ۲۶ درصد و ۳۱ درصد برآورد شد. زاویه‌ی تماس بعد از تزریق بیوسورفکتانت در محیط‌های کشت حاوی منابع کربن گلوکز و ملاس از $58/7$ به ترتیب تا $28/4$ و $27/2$ کاهش پیدا کرد.	بیوسورفکتانت	باکتری باسیلوس سابتیلیس (30B)
ون‌جی و همکاران [۷]	سودوموناس آروگینوسا بیش‌ترین مقدار بیوسورفکتانت را تولید می‌کند. کشش سطحی نفت خام را تا میزان $22/56 \text{ mN/m}$ کاهش داد.	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس، سودوموناس آروگینوسا و باسیلوس سربوس
دهانارجان [۲۰]	بررسی کشش‌بین سطحی و تحرک‌پذیری، انسداد انتخابی و تولید سیمان زیستی افزایش بازیافت نفت خام ۱۶ درصد با سیلاب‌زنی بیوپلیمر	بیوسورفکتانت و بیوپلیمر	باسیلوس مگاتریوم و باسیلوس لیکنیفورمیس
چانگ هانگ [۲۱]	تولید بیوسورفکتانت و بیوسم توسط باسیلیوس سابتیلیس و تولید بیوسم توسط باکتری باسیلوس لیکنیفورمیس بررسی هرکدام از باکتری‌ها روی گرانروی نفت خام در دماهای مختلف	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس و باسیلوس لیکنیفورمیس
جوشی و دسی [۲۲]	کاهش کشش سطحی و کشش بین سطحی به ترتیب تا مقادیر 28 mN/m و $0/5 - 5/8 \text{ mN/m}$ در کمتر از ۱۰ ساعت ضریب بازیافت نفت در ستون ماسه‌سنگ $30/22 - 34/19$ برآورد شد.	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس
چنگی‌جون ژو ^۵ و همکاران [۸]	کاهش کشش سطحی آب تا میزان 35 mN/m و کشش بین سطحی میان آب و نفت تا 15 mN/m به 45 mN/m بازیافت ۲۸ درصدی نفت خام شرایط بهینه شوری و pH به ترتیب ۴ درصد و ۶ - ۷ می‌باشد. دارا بودن قابلیت تجزیه هیدروکربن‌های سنگین	بیوسورفکتانت	آسیتوباکتری بیلی ^۴ (2ZJ)
حسین امانی و همکاران [۲۳]	بیوسورفکتانت تولیدی از باسیلوس سابتیلیس مقاومت بیش‌تری در مقابل سختی‌های محیط متحمل می‌شود و خاصیت امولسیون‌کنندگی بیش‌تری نسبت به دو سویه‌ی دیگر دارد؛ همچنین نسبت به دو سویه‌ی دیگر بیوسورفکتانت بیش‌تری تولید می‌کند.	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس، سودوموناس آروگینوسا و باسیلوس سروس
آوارز پلا [۲۴]	سویه‌ی سودوموناس بیوسورفکتانت هم‌تولیدی ^۶ و باکتری ای‌کولی بیوسورفکتانت پروتئینی تولید می‌کند.	بیوسورفکتانت	سودوموناس و اسکریکیا کوری
فرناندز و همکاران [۴]	تولید بیوپلیمر و حلال همراه با بیوسورفکتانت در شرایط بهینه از نظر غلظت آمونیم نیترات و مخمر اگر پلیمر به عنوان عامل سیلاب‌زنی و هم‌زمان با سورفکتانت تزریق شود، ۱۹ درصد نفت بیشتری از ستون ماسه‌ای بازیافت می‌شود. بررسی مکانیزم‌های کاهش کشش بین سطحی و افزایش گرانروی	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس (R14914)
ابطحی و همکاران [۲۵]	تزریق این باکتری‌ها باعث کاهش میزان قابل‌توجهی در اندازه کشش سطحی شد. باکتری‌های باسیلوس و بومی کشش سطحی محیط را تا میزان $46/3$ و $48/5$ کاهش داد. میزان کشش سطحی در هنگام کشت هم‌زمان هردو سویه، تا مقدار $50/4$ کاهش پیدا کرد. میزان کشش سطحی در منابع مختلف کربن اندازه‌گیری شد.	بیوسورفکتانت	باسیلوس سابتیلیس و باکتری بومی یکی از میادین نفتی ایران

پرداخته شده است.

به انرژی مورد نیاز تولید می‌شوند. باکتری‌ها در حضور اکسیژن می‌توانند مواد آلی را به CO_2 و در غیاب اکسیژن علاوه بر CO_2 به گازهای دیگری مانند CH_4 تبدیل نمایند. باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی این قابلیت را دارند که در صورت کاهش اکسیژن به میزان کمتر از حد مطلوب از روش تخمیر برای تولید و متابولیسم خود بهره‌گیرند. باکتری‌ها از ۳ فرایند اساسی برای تولید انرژی استفاده می‌کنند: تنفس هوازی، تنفس بی‌هوازی، تخمیر. برودولی و کانوار^۹ فهمیدند که گازهای تولید شده می‌توانند سنگ‌های کربناته را حل کنند و از این طریق باعث افزایش تخلخل و تراوایی شوند. همچنین میکروارگانیسم‌ها می‌توانند، حلال‌های مایع تولید کنند که این حلال‌ها عبارتند از: استون، بوتانول، اتانول و ایزوپروپانول. هم‌گازها و هم این محصولات مایع این قابلیت را دارند که در نفت مخزن حل شده و باعث کاهش گرانروی نفت شوند. اگرچه این سازوکار به بازیافت نفت کمک می‌کند ولی متاسفانه این حلال‌ها در مقادیر تولید شده نمی‌توانند زیاد تاثیرگذار باشند [۳۰]. درخشان و همکاران تولید گاز توسط باکتری‌های جداسازی شده از خاک‌های آلوده به مواد نفتی را جهت ازدیاد برداشت میکروبی بررسی کردند. در این پژوهش، ۵۰ نوع باکتری جدا گردید. بررسی تولید گاز از این باکتری‌ها در محیط حاوی ملاسس چغندر انجام گرفت؛ پس از جدا کردن ۵ نوع باکتری که قابلیت تولید گاز را داشته‌اند، بررسی‌های تکمیلی جهت ارزیابی مقاومت آنها در برابر شوری، دما و همچنین تأثیر غلظت ملاسس و مکمل‌های غذایی مختلف انجام گرفت. بیشترین مقدار تولید گاز در ترکیب ملاسس با غلظت ۶٪ و پیتون واتر با غلظت ۱٪ از سویه‌های انتروباکتر، کلوستری‌دیم آئروژن مشاهده گردید که به همین علت استفاده از آنها در فرایند ازدیاد برداشت میکروبی توصیه می‌گردد. اکسیژن در مخازن زیرزمینی و مخازن نفتی تقریباً وجود ندارد؛ در نتیجه باکتری‌های مورد استفاده باید توانایی زندگی در شرایط بی‌هوازی را دارا باشند. از آنجاکه باکتری‌های انتخاب شده هوازی-بی‌هوازی اختیاری می‌باشند؛ در صورت نبود اکسیژن نیز می‌توانند انرژی مورد نیاز خود را از فرایند تخمیر به‌دست آورند و فعالیت متابولیکی خود را در مخازن حفظ نمایند. با بررسی نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده بر روی غلظت نمک و دمای محیط، مشخص گردید که کلیه‌ی ۵ نوع باکتری انتخاب شده حتی در غلظت نمک ۵٪ توانایی رشد و بقا را دارند. بنابراین باکتری‌های انتخاب شده از نظر تحمل شوری مخازن در وضعیت ایده‌آلی قرار دارند. همچنین این باکتری‌ها تا دمای 44°C می‌توانند رشد نمایند. با بالا رفتن دما، تولید گاز توسط این باکتری‌ها کاهش پیدا می‌کند، اما

۱-۲-۲- افزایش تولید نفت با سازوکار تولید بیوپلیمر و بیومس

اصلی‌ترین دلیل برای بازیافت کم نفت، ویسکوزیته بالای نفت می‌باشد. بیوپلیمرها باعث تاثیرات مفیدی همانند تشکیل امولسیون، ویسکوزفایری، مقاومت برشی، سختی و متورم شدن سیال می‌شوند. به همین خاطر بیوپلیمرها بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴]. بعضی از میکروارگانیسم‌ها این توانایی را دارند تا در شرایطی خاص بیوپلیمر تولید کنند. بیوپلیمرها از مولکول‌هایی با وزن مولکولی زیاد تشکیل شده‌اند که در زنجیره‌های متوالی تکرار می‌شوند. این بیوپلیمرها توسط سلول‌های باکتریایی تولید می‌شوند و شامل چندین بخش هستند که در صورت محیا شدن شرایط، امکان به وجود آمدن واکنش شیمیایی را ممکن می‌سازند. برخی از این بیوپلیمرها دارای خصوصیات منحصربه‌فردی از جمله مقاومت در مقابل انواع تنش‌ها، خاصیت الاستیسیته‌ی زیاد و پایداری در دما و pH بالا هستند. بیوپلیمرها از طریق بهبود مسیر سیال تزریقی موجب تصحیح پروفایل تزریق می‌شوند. در فرایند سیلاب‌زنی، سیال تزریقی تمایل دارد تا از نواحی که مقاومت کمتری دارد حرکت کند. همین امر سبب باقی‌ماندن نفت در حفرات کوچک‌تر و در نتیجه کاهش بازیافت نفت می‌شود. سازوکار انسداد انتخابی با انحراف مسیر سیال از مناطق با تراوایی بالا به مناطق با تراوایی پایین باعث افزایش بازده جاروب و در نتیجه تولید بیش‌تر نفت می‌شود. همچنین پلیمر تولیدی با افزایش گرانروی سیال تزریقی باعث بهبود بازده جاروب در تزریق می‌شود. علاوه بر تولید پلیمر، میکروارگانیسم‌ها با تولید بیومس (زیست توده) بین سنگ و نفت موجود، جابه‌جایی نفت‌های به دام افتاده را تسهیل می‌کنند. همچنین بیومس می‌تواند جریان آب نامطلوب را مسدود کند که مسدود شدن این جریان باعث جابه‌جا شدن آب و منحرف شدن مسیر آن به سمت منافذ کوچک‌تر می‌شود. به این ترتیب تولید بیومس نیز سبب افزایش بازیافت نفت می‌گردد [۱۵]. در جدول ۳- مطالعات صورت گرفته در این زمینه ارائه شده‌اند.

۱-۲-۳- افزایش تولید نفت با سازوکار تولید بیوگاز

باکتری‌ها می‌توانند گازهایی مانند متان، هیدروژن، نیتروژن و کربن‌دی‌اکسید تولید نمایند که این گازها از طریق سازوکار افزایش فشار و حل شدن در نفت (سبب کاهش ویسکوزیته نفت می‌شوند) به بازیافت بهتر نفت کمک می‌کنند. این تولیدات بیولوژیکی در اثر استفاده‌ی باکتری‌ها از مواد مغذی موجود در محیط و تبدیل آنها

باکتری شماره ی ۵۰ به علت دارا بودن اسپور حتی تا دمای 120°C نیز زنده می ماند. این ویژگی در فرایند ازدیاد برداشت میکروبی یک نوع امتیاز به حساب می آید، زیرا دمای مخزن نفتی به ندرت 100°C است. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص گردید که در صورت دادن فرصت کافی به میکروارگانیسم ها، آنها قادر هستند خود را با شرایط دمایی مخزن تطبیق دهند. محققان به نتایج جالبی در این زمینه دست پیدا کرده اند که به صورت اجمالی در جدول ۴-۴ ارائه شده اند.

۱-۲-۴- افزایش تولید نفت با سازوکار تولید بیواسید و بیوحلال

متابولیت های میکروبی می توانند حلال هایی مانند اتانول، بوتانول و استون تولید کنند که این حلال ها با انحلال در نفت و کاهش نسبت هیدروکربن های سنگین، ویسکوزیته ی نفت را کاهش می دهند. از طرفی می توانند در کاهش کشش بین سطحی میان نفت و آب با

۳ بررسی افزایش تولید نفت با سازوکار تولید بیو پلیمر و بیومس

مرجع	نتایج	محصول	میکروارگانیسم
عمادی و همکاران [۲۶]	<ul style="list-style-type: none"> بیشترین میزان کاهش تراوایی در یک دمای ثابت (40°C) در شوری ۵٪ رخ داد؛ با افزایش شوری تا ۱۰٪ در همان دما، تراوایی ۱۴/۶٪ کاهش یافت. سویه ی لنوکونوستوک مزترئویدیس در دماها و شوری های پایین، قابلیت خوبی جهت کاهش تراوایی محیط متخلخل نشان داد. 	تزریق به صورت درجا بوده است	لنوکونوستوک مزترئویدیس ^۷ و باسیلوس لیکنیفورمیس
الحتالی و همکاران [۲۷]	<ul style="list-style-type: none"> بررسی بازیافت نفت در مغزه شکافدار 	بیومس	باسیلوس لیکنیفورمیس
کرم بیگی و همکاران [۲۸]	<ul style="list-style-type: none"> بررسی انسداد انتخابی مناطق با تراوایی بالا در میکرو مدل شیشه ای استفاده از روش سیلابزنی جهت ازدیاد برداشت نفت از محیط های متخلخل ناهمگن، ناکارآمد است 	تزریق به صورت درجا بوده است	-
بی و همکاران [۲۹]	<ul style="list-style-type: none"> بررسی انسداد انتخابی در میکرومدل شیشه ای بازیافت ۱۰/۵۴ درصدی نفت خام 	بیوپلیمر	۰۷-FY
آمالیا یونیتا هالین ^۸ و همکاران [۱۳]	<ul style="list-style-type: none"> بررسی توانایی زنده ماندن و تغییر در خصوصیات نفت در فشارهای ۲۵۰ psi و ۵۰۰ psi کاهش گرانیروی و کشش بین سطحی در شرایط هوازی کاهش گرانیروی نفت پس از ۳ روز در فشارهای ۲۵۰ psi و ۵۰۰ psi تا میزان ۱۱/۲۷٪ و ۱۱/۸٪؛ همچنین بعد از ۷ روز در فشارهای ۲۵۰ psi و ۵۰۰ psi به ترتیب مقدار گرانیروی به مقادیر ۲۲/۴۸٪ و ۲۰/۷٪ کاهش یافت. 	تزریق به صورت درجا بوده است	باسیلوس و باسیلوس پلیمیکسا
ایجادی و همکاران [۱۲]	<ul style="list-style-type: none"> در شرایط بهینه، تولید این بیوپلیمر ۵/۳ برابر بیشتر است. بازیافت نفت در میکرومدل شیشه ای، هنگام سیلابزنی با پلیمر تولیدشده ۳۶ درصد بیشتر از سیلابزنی با آب اندازه گیری شد. 	بیوپلیمر	باسیلوس سونورنسیس
کوتو و همکاران [۱۵]	<ul style="list-style-type: none"> با تزریق بیوپلیمر های تولید شده، بازیافتی معادل ۲۵/۷٪ در ستون ماسه سنگی برآورد شد. 	بیوپلیمر	Arthrobacter Viscosus CECT 908
دانشگاه کلگری کانادا	<ul style="list-style-type: none"> با تولید در جای بیوپلیمر، بازیافت نفت تا میزان ۲۰ درصد در مقیاس آزمایشگاهی افزایش پیدا کرد. 	بیوپلیمر	باکتریوم ^(۳B)
الشافی و همکاران [۱۴]	<ul style="list-style-type: none"> بازیافت ۹/۴ درصدی نفت خام در مغزه 	بیوپلیمر	Aureobasidium Pullulans

مسدود شده مخزن که از طریق آنها نفت به چاه سرریز می‌شود را بازگشایی کنند. این مجاری ممکن است در اثر رسوبات نمکی یا مواد نفتی با ویسکوزیته بالا مثل آسفالتین مسدود شده باشند که با باز شدن مجدد آنها جریان نفت دوباره برقرار و برداشت آن تسهیل می‌شود. گرولا^{۱۳} یک سویه از کلاستر دیا که در دمای ۴۵ °C قابلیت رشد دارد را مورد مطالعه قرار داد؛ وی دریافت که توانایی این سویه در تولید حلال‌ها و گازها در غلظت‌های بالا (۵ درصد جرمی) از سدیم کلرید کاهش می‌یابد. لازار^{۱۴} و همکاران اثر اعمال بخار آب و باکتری به صورت هم‌زمان بر مجاری سنگ‌های کربناته که به وسیله‌ی آسفالتین مسدود شده بوده‌اند، را بررسی کردند. بر اساس نتایج حاصل، انسداد حفره‌ها با آسفالتین نفوذپذیری نفت را از ۸ تا ۹۳ درصد کاهش می‌دهد. همچنین نتایج آزمایش‌های ایشان در یک مخزن شبیه‌سازی شده نشان داد که بخار آب بین ۱۸ تا ۴۰ درصد و باکتری تقریباً ۴۱ درصد نفوذپذیری نفت را بهبود می‌بخشد [۳۱]. هویی و همکاران طی آزمایشی باکتری‌هایی که از نفت به عنوان منبع کربن استفاده کرده بودند را در مغزه تزریق کردند. در این آزمایش رشد به واسطه‌ی مصرف ترکیبات نفت انجام گرفت. گرانروی نفت خام در این آزمایش از ۲۸cp به ۱۸cp رسید. همچنین مقدار کشش بین سطحی نیز کاهش یافت. یک آنالیز کروماتوگرافی نشان داد که در اثر تجزیه میکروبی ترکیبات سنگین تر، نسبت ترکیبات سبک نفت به ترکیبات سنگین ۵۴ درصد افزایش پیدا کرد. این آزمایش، ۱۰ درصد باز یافت بیشتر نسبت به سیلاب زنی با آب را نشان داد.

۲- چالش‌های پیش رو

با وجود تمامی برتری‌ها و مزایایی که در مورد ازدیاد برداشت میکروبی ذکر شد، این روش در صنعت نفت آنچنان که باید مورد استقبال واقع نشده است که این امر را نیز می‌توان به دو دلیل عمده ارتباط داد: اولی کمبود آزمایش‌های میدانی و داده‌هایی که سودآوری حاصل از ازدیاد برداشت میکروبی را نشان دهند، می‌باشد؛ و دلیل دوم اینکه به خاطر پیچیدگی‌های موجود در سازوکارهای ازدیاد برداشت میکروبی، به سختی درک و توضیح داده می‌شوند. در واقع صنعت روی پروژه‌هایی سرمایه‌گذاری می‌کند که هم احتمال موفقیت بالاتری داشته باشد و هم از لحاظ اقتصادی سودمند باشد. از جمله چالش‌های پیش رو در استفاده از روش‌های میکروبی در افزایش برداشت نفت می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

■ آیا این روش می‌تواند موجب آسیب سازند و کاهش تراوایی و

سورفکتانت‌ها مشارکت داشته باشند. بعضی از باکتری‌ها با دریافت مواد مغذی خاص می‌توانند اسیدهایی مانند لاکتیک اسید و بوتیریک اسید تولید نمایند. این اسیدها منجر به انحلال سنگ‌های کربناتی و بهبود تخلخل و نفوذپذیری در نتیجه توسعه‌ی کانال‌ها می‌شوند. تولید اسیدهای آلی توسط باکتری‌ها یک روند طبیعی است که توسط فرایند تخمیر بی‌هوازی انجام می‌گیرد. سویه‌ی کلاستریدیوم با دریافت ملاسس می‌تواند $0.034 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$ اسید تولید نماید. ماتریکس مخازن کربناته معمولاً متراکم بوده و نفت در این نوع سنگ‌ها با توجه به پایین بودن میزان نفوذپذیری به کندی حرکت می‌کند. با توجه به اینکه نیمی از ذخایر نفت دنیا در این نوع مخازن یافت می‌شوند، افزایش بازده جابه‌جایی میکروسکوپی در بخش متراکم سازند از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. یکی از راه‌حل‌های این مشکل تزریق اسیدهای معدنی به داخل مخزن و ایجاد کانال و شکاف‌های مصنوعی می‌باشد. این روش با مشکلاتی از جمله مشکلات زیست‌محیطی و خوردگی تجهیزات همراه است. روش دیگر آن است که از میکروارگانیزم‌هایی که در اثر رشد خود مواد اسیدی ترشح می‌کنند، استفاده شود. تولید بیولوژیکی اسیدهای آلی در درون مخزن به وسیله‌ی میکروارگانیزم‌ها بدون ایجاد مشکل زیست‌محیطی و یا خوردگی می‌تواند راه‌حلی مناسب برای بالا بردن بازده تولید در این نوع مخازن باشد. اسیدهای تولیدی، سنگ‌های کربناته را در خود حل و بدین ترتیب با تخریب و فرسایش سنگ‌هایی که نفت در آنها به دام افتاده است، موجبات خروج آن را فراهم می‌کنند. این روش حتی در برخی چاه‌ها (که به نظر می‌رسد ذخیره‌ی نفتی آنها رو به اتمام است) نیز می‌تواند تأثیرات مثبتی داشته باشد. چنین میکروارگانیزمی باید بتواند در یک محیط غیرهوازی موادی را در مجاورت یک گیرنده الکترون (غیر از اکسیژن) به اسید اکسید کند. برای این منظور سویه‌ی تیوباسیلی^{۱۲} پیشنهاد شده است که با استفاده از فرایند احیا، نیترات و اسید سولفوریک تولید می‌کند. منبع گوگردی و نیترات باید به همراه محلول غذایی و عامل گیرنده‌ی الکترون غیر از اکسیژن به چاه تزریق شوند. انحلال سنگ‌های کربناته در اسید منجر به تولید یک محلول بافر می‌شود که از تغییرات شدید pH جلوگیری خواهد کرد. محصول دیگر خنثی‌شدن اسید، گاز کربن دی‌اکسید بوده که علاوه بر کاهش ویسکوزیته نفت با افزایش فشار چاه نیز به استخراج آن کمک می‌کند. میکروارگانیزم از همین کربن دی‌اکسید تولیدی به عنوان منبع کربن استفاده خواهد کرد؛ بنابراین با مصرف محلول آن برای حفظ تعادل ترمودینامیکی، کربنات بیشتری در محلول وارد می‌شود. مواد اسیدی ذکر شده همچنین می‌توانند مجراهای

و اصلاح ترشوندگی؛ انسداد انتخابی توسط میکروارگانیسم‌ها و محصولات زیستی‌شان؛ افزایش گرانیروی فاز آبی به واسطه تولید پلیمرهای زیستی؛ کاهش گرانیروی نفت به وسیله حل شدن گاز تولیدی توسط باکتری‌ها و حل کردن سنگ مخزن به واسطه تولید اسید سبب بازیافت بهتر نفت شوند. عواملی همچون دما، شوری، فشار و pH نیز بر روی عملکرد سوبیه‌ها و محصولات آنها تأثیرگذار هستند. همچنین امروزه صنعت نفت و گاز در بخش‌های بالادستی و پایین‌دستی با مشکلاتی مواجه است که با توجه به مزایای روش بازیافت میکروبی از جمله زیست تخریب‌پذیر بودن محصولات، عدم وابستگی به قیمت جهانی نفت و مصرف انرژی بسیار کم، این روش می‌تواند تا حدودی بر ضعف‌ها و مشکلات صنعت نفت غلبه کند. همچنین پیاده‌سازی این روش، بسیار ارزان قیمت‌تر از روش‌های دیگر بوده است؛ زیرا این روش را می‌توان همراه با تزریق آب انجام داد و علاوه بر سازوکارهایی که آب به تنهایی باعث افزایش تولید می‌شود، از مواد متابولیکی که در حین رشد میکروارگانیسم‌ها ترشح می‌شوند، نیز بهره برد. واضح است که روش ازدیاد برداشت میکروبی نیز همانند روش‌های دیگر ازدیاد برداشت نفت برای تمام مخازن قابل اجرا نمی‌باشد و در استفاده از این روش باید پارامترهای مهمی همانند دما، فشار، شوری، عمق مخزن، تراوایی و درجه اشباع نفت در نظر گرفته شود. ■

در نتیجه کاهش تولید نفت شود؟

■ تاثیر میکروارگانیسم‌ها در تولید نفت سنگین چگونه است و آیا تجزیه نفت سنگین توسط میکروارگانیسم‌ها، به بهبود کیفیت نفت کمک می‌کند؟

■ آیا میکروارگانیسم‌ها و محصولات حاصل از آنها می‌توانند در دما و شوری مخزن به فعالیت متابولیکی بپردازند؟

■ آیا میکروارگانیسم‌هایی که بیشترین تأثیر را در بازیافت نفت دارند، شناسایی شده‌اند؟

■ آیا خوردگی ناشی از فعالیت‌های باکتری‌های هوازی قابل کنترل است؟

■ هرچند با توجه به صرفه اقتصادی و عدم تأثیر سوء در محیط زیست، در سال‌های اخیر، در این زمینه مطالعات بیشتری صورت گرفته است و انتظار می‌رود که هرچه سریع‌تر این موانع و چالش‌ها رفع شده و شاهد استفاده وسیع‌تر این روش در پروژه‌های میدانی بود.

نتیجه‌گیری

یکی از کاربردهای بیوتکنولوژی استفاده از میکروارگانیسم‌ها در صنایع نفت می‌باشد. در این روش، میکروارگانیسم‌ها می‌توانند با تولید محصولاتی از جمله بیوسورفکتانت، بیوپلیمر، گازها و حلال‌ها با مکانیسم‌هایی از جمله کاهش کشش سطحی و کشش بین‌سطحی

ازدیاد برداشت میکروبی نفت با در نظر گرفتن سازوکار تولید بیوگاز

مرجع	نتایج	محصول	میکروارگانیسم
کیشولم ^{۱۰} و همکاران [۳۰]	<ul style="list-style-type: none"> کاهش اشباع نفت در صورت وجود فاز گازی ۶ - ۱۰ درصد حجم فضای متخلخل سویبه‌ی لنوکونوستوک مزترئویدیس در دماها و شوری‌های پایین، قابلیت خوبی جهت کاهش تراوایی محیط متخلخل نشان داد. 	بیوگاز	-
ونجی ژیا ^{۱۱} و همکاران [۹]	<ul style="list-style-type: none"> تجزیه نفت سنگین و تولید گاز متان از طریق غنی‌سازی محیط در طول ۲۰۰ روز کشت بی‌هوازی ۲/۳۴ g نفت سنگین تجزیه شد که منجر به تولید ۱۵۱۴ μmol گاز متان شد. کاهش گرانیروی نفت خام بعد از تجزیه‌ی نفت سنگین در فشار ۲۰ MPa و پس از انحلال متان تولید شده تا ۷۲/۴۵ درصد. بازیافت ۱۴/۷ درصدی نفت خام درصد وزنی اجزای سنگین نفت پس از تجزیه، کاهش پیدا کرد. 	بیوگاز	کنسرسیوم

پانویس‌ها

1. Exogenous
2. Indigenous
3. Yahya Al-Wahaibi
4. Acinetobacter baylyi
5. Changjun Zou
6. Rhamnolipids
7. Leuconostoc Mesenteroides
8. Amalia yunita hali
9. Bordoloi and Konwar
10. Chisholm
11. Wenjie Xia
12. Thiobacillus
13. Gula
14. Lazer

- [1] Omoniyi, O. and F. Abdulmalik, A review of Microbial Enhanced Oil Recovery: Currunt Development and Future Prospective. IJSER, 2015. 6: p. 13781389-.
- [2] Safdel, M., Anbaz, M.-A., Daryasafar, A. and Jamialahmadi, M., Microbial enhanced oil recovery, a critical review on worldwide implemented field trials in different countries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. 74: p. 159172-.
- [3] Ke, C.-Y., Lu, G.-M., Li, Y.-B., Sun, W.-J., Zhang, Q.-Z. and Zhang, X.-L., A pilot study on large-scale microbial enhanced oil recovery (MEOR) in Baolige Oilfield. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018.
- [4] Fernandes, P., Fernandes, P.-L., Rodrigues, E.-M., Paiva, F.-R., Ayupe, B.-A.-L., McInerney, M.-J. and Tótolá, M.-R., Biosurfactant, solvents and polymer production by *Bacillus subtilis* RI4914 and their application for enhanced oil recovery. Fuel, 2016. 180: p. 551557-.
- [5] Nielsen, S.M., Shapiro, A.-A., Michelsen, M.-L. and Stenby, E.-H., 1D simulations for microbial enhanced oil recovery with metabolite partitioning. Transport in porous media, 2010. 85(3): p. 785802-.
- [6] Dhanarajan, G., Rangarajan, V., Bandi, C., Dixit, A., Das, S., Ale, K. and Sen, R., Biosurfactant-biopolymer driven microbial enhanced oil recovery (MEOR) and its optimization by an ANN-GA hybrid technique. Journal of biotechnology, 2017. 256: p. 4656-.
- [7] Xia, W.-J., Dong, H.-P., Yu, L. and Yu, D.-F., Comparative study of biosurfactant produced by microorganisms isolated from formation water of petroleum reservoir. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2011. 392(1): p. 124130-.
- [8] Zou, C., Wang, M., Xing, Y., Lan, G., Ge, T., Yan, X. and Gu, T., Characterization and optimization of biosurfactants produced by *Acinetobacter baylyi* ZJ2 isolated from crude oil-contaminated soil sample toward microbial enhanced oil recovery applications. Biochemical engineering journal, 2014. p. 4958-.
- [9] Xia, W., Shen, W., Yu, L., Zheng, C., Yu, W. and Tang, Y., Conversion of petroleum to methane by the indigenous methanogenic consortia for oil recovery in heavy oil reservoir. Applied Energy, 2016. 171: p. 646655-.
- [10] Sun, S. Luo, Y., Zhou, Y., Xiao, M., Zhang, Z., Hou, J., Wei, X., Xu, Q., Sha, T. and Dong, H., Application of *Bacillus* spp. in Pilot Test of Microbial Huff and Puff to Improve Heavy Oil Recovery. Energy & Fuels, 2017. 31(12): p. 1372413732-.
- [11] Gammer-Eldeen, A.E., Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). 2013, University Of Khartoum.
- [12] Bajestani, M.I., Mousavi, S.-M., Jafari, A., Shojaosadati, S.-A., Biosynthesis and physicochemical characterization of a bacterial polysaccharide/polyamide blend, applied for microfluidics study in porous media. International journal of biological macromolecules, 2017. 96: p. 100110-.
- [13] Halim, A.Y., Fauzi, U.-D., Siregar, S., Soewono, E., Gunawan, A.-Y., Astuti, D.-I. and Juli, N., Microbial enhanced oil recovery: an investigation of bacteria ability to live and alter crude oil physical characteristics in high pressure condition. in Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition. 2009. Society of Petroleum Engineers.
- [14] Elshafie, A., Joshi, S.-J., Al-Wahaibi, Y.-M., Al-Bahry, S.-N., Al-Bemani, A.-S., Al-Hashmi, A. and Al-Mandhari, M.-S., Isolation and characterization of biopolymer producing Omani *Aureobasidium pullulans* strains and its potential applications in microbial enhanced oil recovery. in SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition. 2017. Society of Petroleum Engineers.
- [15] Couto, M., Gudiña, E.-J., Ferreira, D., Teixeira, J.-A., Rodrigues, L.-R., Soares, L.-P. and Ribeiro, M.-T., Characterization of a Biopolymer Produced by *Arthrobacter Viscosus* CECT 908 for Application in Microbial Enhanced Oil Recovery. in SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. 2018. Society of Petroleum Engineers.
- [16] Gudiña, E.J., Pereira, J.-F.-B., Rodrigues, L.-R., Coutinho, J.-A.-. and Teixeira, J.-A., Isolation and study of microorganisms from oil samples for application in microbial enhanced oil recovery. International biodeterioration & biodegradation, 2012. 68: p. 5664-.
- [17] Lazer, I., Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). Petroleum Science and Technology, 2011: p. 1353-1366.
- [18] Maudgalya, S., Experimental and numerical simulation study of microbial enhanced oil recovery using bio-surfactants. 2005.
- [19] Al-Wahaibi, Y., Joshi, S., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A. and Shibulal, B., Biosurfactant production by *Bacillus subtilis* B30 and its application in enhancing oil recovery. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014. 114: p. 324333-.
- [20] Dhanarajan, G Rangarajan, V., Bandi, C., Dixit, A., Das, S., Ale, K. and Sen, R., Biosurfactant-biopolymer driven microbial enhanced oil recovery (MEOR) and its optimization by an ANN-GA hybrid technique. Journal of Biotechnology, 2017.
- [21] Gao, C. Microbial enhanced oil recovery in carbonate reservoir: an experimental study. in SPE Enhanced Oil Recovery Conference. 2011. Society of Petroleum Engineers.
- [22] Joshi, S.J. and A.J. Desai, Bench-scale production of biosurfactants and their potential in ex-situ MEOR application. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2013. 22(6): p. 701-715.
- [23] Amani, H., Sarrafzadeh, M.-H., Haghghi, M. and Mehrnia, M.-R., Comparative study of biosurfactant producing bacteria in MEOR applications. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2010. 75(1): p. 209214-.
- [24] Yela, A.-C.-A., Martínez, M.-A.-T., Piñeros, G.-A.-R., López, V.-C., Villamizar, S.-H., Vélez, V.-L.-N., Abraham, W.-R., Flórez, M.-J.-V. and Barrios, A.-F.-G., A comparison between conventional *Pseudomonas aeruginosa* rhamnolipids and *Escherichia coli* transmembrane proteins for oil recovery enhancing. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016. 112: p. 5965-.
- [25] Abtahi, N., Roostaazad, R., and Ghadiri, F., Biosurfactant Production in MEOR for Improvement of Iran's Oil Reservoirs' Production Experimental Approach. in SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific. 2003. Society of Petroleum Engineers.
- [۲۶] عمادی، س.، نژادغفاربرهانی، ت. و روزبهانی، ب.، کاهش انتخابی تراوایی محیط متخلخل به کمک باکتری‌ها به منظور ازدیاد برداشت درجا از مخازن نفتی، سومین کنگره ملی مهندسی نفت، ۱۳۹۰، انستیتو مهندسی صنعت نفت.
- [27] Al-Hattali, R.-R., Al-sulaimani, H.-S., Al-wahaibi, Y.-M. and Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A. S., & Joshi, S. Improving sweep efficiency in fractured carbonate reservoirs by microbial biomass. in SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. 2012. Society of Petroleum Engineers.
- [۲۸] کرم بیگی، م.ص.، شفیعی، م. و فضائی پور، م.ح.، مقایسه کارایی روش‌های سیلابزنی و ازدیاد برداشت میکروبی نفت در محیط‌های متخلخل ناهمگن با بهره‌گیری از میکرومدل، دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران، ۱۳۸۷، دانشگاه تهران.
- [29] Bi, Y., Yu, L., Huang, L.-X., Ma, T., Xiu, J.-L. and Yi, L.-N., Microscopic profile control mechanism and potential application of the biopolymer-producing strain FY-07 for microbial enhanced oil recovery. Petroleum Science and Technology, 2016. 34(24): p. 19521957-.
- [30] Bryant, S.-L. and Lockhart, T.-P., Reservoir engineering analysis of microbial enhanced oil recovery. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2002. 5(05): p. 365374-.
- [31] Lazer, I., Voicu, A., Nicolescu, C., Mucenica, D., Dobrota, S., Petrisor, I.-G., Stefanescu, M. and Sandulescu, L., The use of naturally occurring selectively isolated bacteria for inhibiting paraffin deposition. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999. 22(1): p. 161169-.