

بررسی فعالیت سطحی بایوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولپید و ارزیابی عملکرد آن در ازدیاد برداشت نفت

فردین سقندلی^۱، فرزین سقندلی^۱، مهسا باغبان صالحی^{۲*}

۱. تحقیق و توسعه شرکت بسپارش یکتا نوآور ایرانیان، تهران، ایران

۲. پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

Email: m.bsalehi@ccerci.ac.ir

چکیده:

در این پژوهش به بررسی عملکرد بایوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولپید در ازدیاد برداشت نفت با استفاده از آزمون‌های کنارزدن نفت، آزمایش کشش سطحی و کشش بین سطحی، تغییر ترشوندگی و سیلاب‌زنی میکرومدل‌های همگن و ناهمگن پرداخته شده است. در ابتدا توانمندی بایوسورفکتانت در کنارزدن نفت خام مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش کشش سطحی و کشش بین سطحی با لحاظ کردن تأثیر شوری در کاهش کشش بین سطحی انجام شد. در این آزمایش مشخص شد که حضور دی استیلات اسید سوفورولپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm کشش سطحی آب خالص را از ۷۴ mN/m به ۳۳/۴۱ mN/m کاهش می‌دهد. همچنین مشخص شد که محلول دی استیلات اسید سوفورولپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm و شوری ۸۰۰۰۰ ppm کشش بین سطحی را از ۳۷/۴۲ mN/m به عدد ۹/۱۴ mN/m کاهش می‌دهند. در آزمون تغییر ترشوندگی، با اندازه‌گیری زاویه تماس مشخص شد که محلول دی استیلات اسید سوفورولپید توانایی تغییر ترشوندگی سنگ کربناته از نفت دوست به آب دوست را دارد. محلول دی استیلات اسید سوفورولپید زاویه تماس قطره‌ی نفت روی سنگ کربناته را از $30/20^\circ$ به $109/42^\circ$ افزایش داد. در نهایت با استفاده از الگوهای مختلف میکرومدل توانایی بایوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولپید در ازدیاد برداشت نفت سنجیده شد. برای این منظور از دو میکرومدل همگن و ناهمگن استفاده شده است. محلول دی استیلات اسید سوفورولپید در غلظت و شوری بهینه به ترتیب در میکرومدل همگن و ناهمگن، موجب ۷۸٪ و ۷۱٪ بازیافت نفت شد.

کلیدواژه: ازدیاد برداشت، بایوسورفکتانت، تغییر ترشوندگی، میکرومدل، دی استیلات اسید سوفورولپید

Investigation of the surface activity of di-acetylated acid sophorolipid biosurfactant and its performance evaluation in enhanced oil recovery

Abstract:

The research examines the effectiveness of di-acetylated acid sophorolipid biosurfactant in improving oil recovery. The investigation includes various experiments such as oil displacement, surface and interfacial tension, wettability alteration, and flooding experiments in both homogeneous and heterogeneous micromodels. Initially, the focus is on assessing the biosurfactant's ability to displace crude oil. Surface and interfacial tension measurements were carried out to study the impact of salinity on IFT reduction. The results showed that a 5000 ppm di-acetylated acid sophorolipid reduced the surface tension of water from 74 mN/m to 33.41 mN/m. Furthermore, a 5000 ppm di-acetylated acid sophorolipid in 80,000 ppm salinity water reduced the IFT from 37.42 mN/m to 9.14 mN/m. A wettability alteration test was also conducted to evaluate the di-acetylated acid sophorolipid solution's ability to change carbonate rock from oil-wet to water-wet. The test measured the contact angle of an oil droplet on the rock surface and indicated a successful alteration in wettability from oil-wet to water-wet. Finally, micromodel flooding experiments were conducted to assess the ability of di-acetylated acid sophorolipid biosurfactant to enhance oil recovery. The optimal concentration and salinity of the di-acetylated acid sophorolipid solution were determined for each micromodel. The biosurfactant solution was then injected into the micromodels, resulting in oil recoveries of 78% and 71% for the homogeneous and heterogeneous patterns, respectively.

Keywords: Enhanced Oil Recovery (EOR), Biosurfactant, Wettability Alteration, Micromodel, Di-acetylated acid sophorolipid

مقدمه:

سوخت‌های فسیلی بیش از ۸۰ درصد از انرژی مورد نیاز دنیا را تأمین می‌کنند. بخش قابل توجهی از این انرژی از طریق نفت خام تأمین می‌گردد. میزان تقاضای نفت خام در سال ۲۰۱۴ روزانه در حدود ۹۲ میلیون بشکه بوده است که در سال ۲۰۲۴ این رقم به ۱۰۵ میلیون بشکه افزایش یافته است. پیشبینی‌ها نشان می‌دهد در دهه‌ی پیش‌رو به‌طور متوسط سالانه ۱ میلیون بشکه به تقاضای جهانی نفت افزوده خواهد شد [۱]. با توجه به این امر که کشف منابع جدید نفتی یک امر تضمین شده نیست و منابع کشف نشده به

احتمال زیاد در مناطق عمیق دریا یا مناطق صعب‌العبور که تولید از آن‌ها دشوار و پرهزینه است قرار دارند، پژوهش و توسعه فناوری در جهت ایجاد راهکار موثر برای حفظ تولید و ازدیاد برداشت از مخازن فعلی ضروری است [۲]. ازدیاد برداشت به‌عنوان سومین و آخرین فاز تولید از مخازن نفتی در نظر گرفته می‌شود؛ از این‌رو، آن را برداشت ثالثیه نیز می‌نامند [۳]. فاز اول تولید یا برداشت اولیه مربوط به زمانی است که نفت با مکانیزم‌های رانش طبیعی خود و با صرفه‌ی اقتصادی بالا تولید می‌شود [۴]. این مکانیزم‌ها شامل انبساط گاز محلول، انبساط کلاهک گازی و رانش لایه آبران است، در این مرحله ممکن است با کمک پمپ‌ها نیز تولید تسهیل شود. زمانی که نیروی رانش طبیعی مخزن به اتمام برسد، برداشت ثانویه با تزریق آب به مخزن به عنوان نیروی رانش کمکی آغاز می‌شود. پس از تولید نزدیک به ۴۰٪ از نفت درجا، مخزن به مقطعی از تولید می‌رسد که با تزریق آب نیز صرفه‌ی اقتصادی تولید وجود ندارد، در این مرحله فاز سوم برداشت پیشنهاد می‌شود. هدف از فاز سوم برداشت، رساندن نفت درجای باقی‌مانده در مخزن به کمترین میزان ممکن است [۵]. ازدیاد برداشت شامل تزریق هر ماده‌ای است که بر اثر حضور آن در مخزن تعاملات موجود بین سنگ، نفت و آب سازند با هدف بیشینه کردن میزان تولید نفت تغییر نماید [۶]. روش‌های ازدیاد برداشت شامل روش‌های حرارتی (احتراق درجا، تزریق هوای پرفشار، تخلیه گرانشی به کمک بخار)، روش‌های امتزاجی (تزریق گازهای هیدروکربنی، دی اکسید کربن، نیتروژن)، روش‌های شیمیایی (تزریق پلیمر، سورفکتانت، قلیا، امولسیون، کف، و ترکیبی از آنها) و روش‌های زیستی-میکروبی می‌شود [۷]. روش‌های امتزاجی یکی از روش‌های رایج ازدیاد برداشت نفت است. موفقیت این روش‌ها در جابجایی نفت به امتزاج‌پذیری گاز تزریقی و نفت مخزن بستگی دارد. از محدودیت‌های روش ازدیاد برداشت امتزاجی می‌توان به احتمال بالای وجود نسبت تحرک نامطلوب، نیازمند بودن به منابع بسیار زیاد گاز و مشکلات جداسازی اشاره کرد [۸]. روش دیگر پرکاربرد ازدیاد برداشت در صنعت، استفاده از روش‌های حرارتی است. روش‌های ازدیاد برداشت حرارتی بر اساس استفاده از انرژی حرارتی برای افزایش دمای مخزن و در نتیجه کاهش گرانروی نفت عمل می‌کنند. از محدودیت‌های روش ازدیاد برداشت حرارتی می‌توان به اتلاف حرارت زیاد در لایه‌های مختلف زمین و نیازمندی به منابع زیاد آب و گاز طبیعی اشاره کرد [۹]. در سال‌های اخیر استفاده از این روش‌ها با توجه به اهمیت و ارزش روز افزون استفاده از گاز طبیعی و جلوگیری از مصرف مقادیر زیاد سوخت با چالش‌هایی روبرو شده است و شرکت‌های بهره‌بردار به دنبال توسعه بیشتر سایر روش‌ها هستند. در روش‌های شیمیایی، ترکیباتی که منشأ زیستی ندارند (پلیمر، الکالین، سورفکتانت و ...) به مخزن تزریق می‌شود تا تحرک بین سیال جابجا کننده و سیال جابجا شونده را تحت تأثیر قرار دهند [۱۰]. پلیمرها، با تغییر نسبت تحرک بین سیال جابجا کننده و سیال جابجا شونده باعث بهبود راندمان جاروبی سیال تزریقی می‌شود [۱۱]. سورفکتانت‌ها برای کاهش کشش بین‌سطحی و در صورت لزوم تغییر ترشوندگی سنگ کاربرد دارد [۱۲]. الکالین‌های تزریق شده به مخزن با اسیدهای چرب موجود در مشتقات نفتی واکنش شیمیایی داده و نمک‌های سدیم اسیدهای چرب در محل تشکیل خواهد شد که منجر به کاهش کشش بین‌سطحی می‌شود [۱۳]. اما در خصوص استفاده از مواد شیمیایی چالش اصلی در خصوص اثرات زیست محیطی آنها است و در مرحله دوم تامین حجم مورد نیاز و بررسی اقتصادی روش ازدیاد برداشت شیمیایی است. این در حالی است که در مخازن با شرایط سخت از نقطه نظر شوری، سختی آب و دمای بالا بایستی عملکرد مواد شیمیایی بررسی گردد [۱۴]. استفاده از مواد زیست تخریب پذیر نگرانی اول را در حوزه ازدیاد برداشت شیمی رفع خواهد کرد. ازدیاد برداشت زیستی عمدتاً بر روش‌های برون‌جا (دگرجا) و درجا برای انتقال متابولیت‌ها به چاه‌های نفت تمرکز دارد. در روش درجا باکتری مستقیماً به چاه تزریق می‌شود تا محصول زیستی مورد نظر را درون مخزن تولید کند بنابراین به دلیل قرار گرفتن باکتری در شرایط دمایی و شوری مخزن، ریسک عملیاتی

این روش‌ها بالا خواهد بود [۱۵]. در روش‌های ازدیاد برداشت برون‌جا محصول زیستی مورد نظر در آزمایشگاه تولید و سپس به چاه تزریق می‌گردد و به تبع ریسک عملیاتی کاهش می‌یابد [۱۶]. به طور کلی، متابولیت‌های مرتبط با ازدیاد برداشت نفت را می‌توان به هفت گروه عمده به عنوان زیست‌توده، بیوپلیمرها، بایوسورفکتانت‌ها، بیوگازها، اسیدهای زیستی، حلال‌های زیستی و امولسیون‌کننده‌ها طبقه‌بندی کرد [۱۷]. بایوسورفکتانت‌ها ترکیبات فعال سطحی دارای یک سر آب‌دوست و یک سر آب‌گریز هستند که توسط میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شوند. این مواد علاوه بر فعالیت سطحی و خواص امولسیون‌کنندگی مشابه با سورفکتانت‌های شیمیایی، دارای خواص برتر نسبت به سورفکتانت‌های شیمیایی مانند غلظت بحرانی تشکیل میسل (CMC) کمتر، زیست‌تخریب‌پذیری، مقاومت در برابر دما، سمیت کمتر، کارایی در محدوده‌ی گسترده‌تری از شوری و مقاوم در برابر تغییرات pH نیز هستند [۱۷]. این ترکیبات می‌توانند در سطوح مشترک سیالات مختلف قرار گیرند تا کشش سطحی و کشش بین سطحی را کاهش دهند که این ویژگی باعث کارایی آن‌ها در صنایع گوناگون می‌شود. در زمینه‌ی ازدیاد برداشت، بایوسورفکتانت‌های گلیکولپیدی و لیپوپپتیدی پتانسیل تجاری و صنعتی زیادی را نشان داده و در نتیجه مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند، بنابراین بایوسورفکتانت‌ها امیدوارکننده‌ترین روش ازدیاد برداشت زیستی هستند. این مواد می‌توانند نفت خام را در محیط متخلخل به سه طریق کاهش کشش بین سطحی نفت و آب، تغییر ترشوندگی، و امولسیون کردن نفت به حرکت درآورند. هنگامی که محلول بایوسورفکتانت با نفت (در منافذ محیط متخلخل به تله افتاده) در تماس قرار گیرد، به وضوح کشش بین سطحی نفت و آب را کاهش و با کاهش نیروی مویبندی، نفت را به حرکت در می‌آورد. تشکیل یک امولسیون نفت در آب معمولاً منجر به بهبود نسبت جریان مؤثر می‌شود این فرایند به سیلاب‌زنی با آب کمک کرده و نفت بیشتری تولید خواهد شد [۱۸]. مطالعات اخیر نشان داده است که نقش بایوسورفکتانت‌ها در بهبود ترشوندگی سنگ‌های مخزن نیز مکانیزم مهمی برای بهبود بازیافت نفت است. در همین راستا سوپه و همکاران [۱۹] به بررسی عملکرد بایوسورفکتانت در غلظت‌های مختلف و همچنین در ترکیب با سورفکتانت‌های شیمیایی در ازدیاد برداشت نفت و کاهش تراوایی سنگ به منظور بررسی آسیب‌سازندی ناشی از جذب سورفکتانت‌ها پرداختند. آن‌ها دریافتند بایوسورفکتانت تأثیر ناچیزی در کاهش تراوایی سنگ دارد و در نتیجه باعث آسیب‌سازندی نمی‌شود. با این وجود بایوسورفکتانت‌ها معمولاً گران‌تر از سورفکتانت‌های شیمیایی هستند لذا با وجود زیست‌تخریب‌پذیری، عدم ایجاد آسیب‌سازندی، سمیت پایین و پایداری بالا بایوسورفکتانت‌ها، هزینه بالای مواد اولیه، تولید و جداسازی بایوسورفکتانت‌ها یک محدودیت عمده برای کاربرد صنعتی آن‌ها محسوب می‌شود، به طوری که این هزینه‌ها بیش از نیمی از هزینه‌ی کل فرایند ازدیاد برداشت را تشکیل می‌دهند [۲۰]. بنابراین مطالعه بایوسورفکتانت‌های زیست‌تخریب‌پذیر به دلیل فعالیت سطحی قابل توجه و در نتیجه کارایی بالا در زمینه ازدیاد برداشت نفت که از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و قابلیت تولید انبوه آن وجود داشته باشد از اهمیت بالایی برخوردار است [۲۱] در سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ پژوهش‌های قابل توجهی در زمینه تولید و بررسی عملکرد بایوسورفکتانت‌ها در ازدیاد برداشت نفت مطرح شده است که در این خصوص می‌توان به محققانی چون ژائو و همکاران [۲۲] و بررسی عملکرد بایوسورفکتانت سورفاکتین، ریبرو و همکاران [۲۳] در خصوص بایوسورفکتانت ترهالوس لیپید، آرژنتین و همکاران [۲۴] معرفی و بررسی توانمندی بایوسورفکتانت فنژیسین، لبتوچرا و همکاران [۲۵] تولید و بررسی اثرگذاری فسفاتیدیل کولین، اشاره کرد. نتایج مطالعات مذکور حاکی از کارایی قابل قبول بایوسورفکتانت‌ها در ازدیاد برداشت نفت است. اگرچه این نتایج امیدوارکننده و نوید بخش موفقیت عملکرد این دسته از مواد در ازدیاد برداشت نفت است، ولی تولید انبوه و پایداری عملکرد بایوسورفکتانت‌ها در مقابل شوری و سختی آب مخزن با چالش‌هایی روبرو است که منجر به کاهش توانمندی آن‌ها در جاروب نفت

در شرایط سخت مخازن (دما، شوری، جنس سنگ و بررسی آسیب سازندی و ...) می‌شود. در این پژوهش با توجه به مزایای اقتصادی و فنی تولید دی‌استیلات اسید سوفورولپید، به مطالعه فرآیندهای ازدیاد برداشت با این بایوسورفکتانت در شرایط عملیاتی میدانی مانند دمای و شوری بالا پرداخته شده است. با استفاده از آزمون‌های کنارزدن نفت توانایی دی‌استیلات اسید سوفورولپید در کاهش کشش بین‌سطحی به صورت کیفی بررسی و اثر شوری به عنوان یک پارامتر مهم در ایجاد اختلال در عملکرد سورفکتانت در فرآیند ازدیاد برداشت نفت از مخازن بررسی شد. با توجه به اهمیت ترشوندگی سازند در بهبود تحرک نفت درون محیط متخلخل، عملکرد بایوسورفکتانت سوفورولپیدی در تغییر زاویه تماس نیز بررسی شد. در انتها برای پیش بینی عملکرد بایوسورفکتانت از آزمون میکرومدل شیشه‌ای به عنوان مدل مخزن استفاده و توانایی بایوسورفکتانت را در افزایش بازده جاروبی و تولید نفت به تله افتاده بررسی شد.

روش کار:

مواد مصرفی:

دی‌استیلات اسید سوفورولپید با ساختار $(C_{42}H_{78}O_{19})$ ، ساخته شده در پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران با پروتکل تولید ذکر شده [۲۰]، به عنوان گونه‌ای از بایوسورفکتانت‌های گلیکولپیدی که ساختار آن‌ها متشکل از sophorose disaccharide متصل به یک زنجیره‌ی طولانی از اسیدهای چرب با ۱۶ تا ۱۸ اتم کربن است با دانسیته ۰.۸۴ گرم بر سانتی‌مترمکعب و ویسکوزیته ۰.۱۶ سانتی‌پویز، در این پژوهش استفاده شد. نفت مورد استفاده در این پژوهش، نفت میدان پرنج واقع در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان بهبهان در استان خوزستان است. این نفت دارای $API=34/81$ ، چگالی ۰/۸۵ گرم بر سانتیمتر مکعب و ویسکوزیته ۹/۲۱ سانتی‌پویز بود. در تهیه نمونه‌ها از آب مقطر (Resistivity, 18.25 MΩcm) و آب‌سازند با شوری ۲۱۰۰۰۰ mg/L Na^+ و K^+ ۶۲۵۰۰ mg/L، Ca^{2+} ، ۱۱۲۵۰۰ mg/L Cl^- و Mg^{2+} ۲۵۰۰۰ mg/L استفاده شد.

روش‌های آزمایشگاهی:

آزمایش کنارزدن نفت:

این آزمایش توانایی بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید برای کاهش کشش بین‌سطحی را به صورت کیفی می‌سنجد. برای انجام این آزمایش ۲ mL نفت خام در شیشه‌ای به قطر ۵ cm ریخته شده و به آن اجازه داده شد، تا مقداری پخش شود. سپس ۰/۰۴ mL بایوسورفکتانت خالص روی آن ریخته شده و مقدار کنارزدن نفت بررسی می‌گردد.

آزمایش کشش سطحی و کشش بین‌سطحی:

برای بررسی عملکرد بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید و یافتن غلظت بهینه‌ی آن، محلول‌هایی از بایوسورفکتانت در غلظت‌های ۲۵۰ تا ۱۰۰۰۰ mg/L ساخته شد و کشش سطحی و بین‌سطحی این محلول‌ها ابتدا در آب مقطر و سپس در آب با شوری‌های مختلف اندازه‌گیری شد. کشش سطحی با استفاده از دستگاه Sigma 700 ساخت کشور سوئد، با روش حلقه پلاتینی اندازه‌گیری شد. در این روش سطح مایع بالا می‌آید تا در تماس با سطح حلقه قرار گیرد. سپس مایع به سمت پایین حرکت داده

می‌شود تا فیلم مایع زیر حلقه کشیده شود. وقتی فیلم مایع کشیده می‌شود حداکثر نیرو ایجاد شده توسط دستگاه ثبت می‌شود. در حداکثر نیرو، بردار نیرو دقیقاً موازی با جهت حرکت بوده و زاویه تماس برابر با صفر است. برای اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی از روش قطره آویزان استفاده شد. در این روش برای تعیین کشش بین‌سطحی، یک قطره از مایع اول در فاز مایع دوم معلق می‌گردد. قطره مایع از یک لوله باریک یا نوک یک سرنگ (سوزن تزریق) آویخته می‌شود. پس از آن از این قطره تصویربرداری می‌شود و از آن‌جا که پروفایل شکل قطره نشان‌دهنده‌ی تعادل بین نیروهای سطحی و نیروی جاذبه است، با آنالیز شکل قطره مقدار کشش بین‌سطحی تعیین می‌شود. بدین منظور از معادله بشفورث و آدامز استفاده می‌شود.

$$\frac{1}{\frac{R_1}{a}} + \frac{\sin\theta}{\frac{x}{a}} = -B \frac{z}{a} + 2 \quad 1$$

که در آن پارامتر R_1 شعاع انحنا در نقطه مختصات (x, z) ، a شعاع انحنا در نوک قطره، θ زاویه نقطه مختصات (x, z) از محور عمودی است و B از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$B = \frac{a^2 g \Delta\rho}{\gamma} \quad 2$$

که در آن $\Delta\rho$ اختلاف چگالی دو ماده، g ثابت گرانش و γ کشش بین سطح است.

پایداری امولسیون بیوسورفکتانت در دمای مخزن:

پایداری بیوسورفکتانت‌ها با استفاده از آزمون پایداری فاز بررسی شد. به این منظور محلول بیوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید در غلظت ۵۰۰۰ پی‌پی‌ام در آب نمک به شوری بهینه (۸٪ وزنی) تهیه شده و با نسبت حجمی یک به یک با نفت خام مخلوط شد سپس، شیشه‌ها به مدت ۳۰ دقیقه تکانده شده و سپس برای بررسی پایداری و زمان دو فازی شدن در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد به آنها استراحت داده شد.

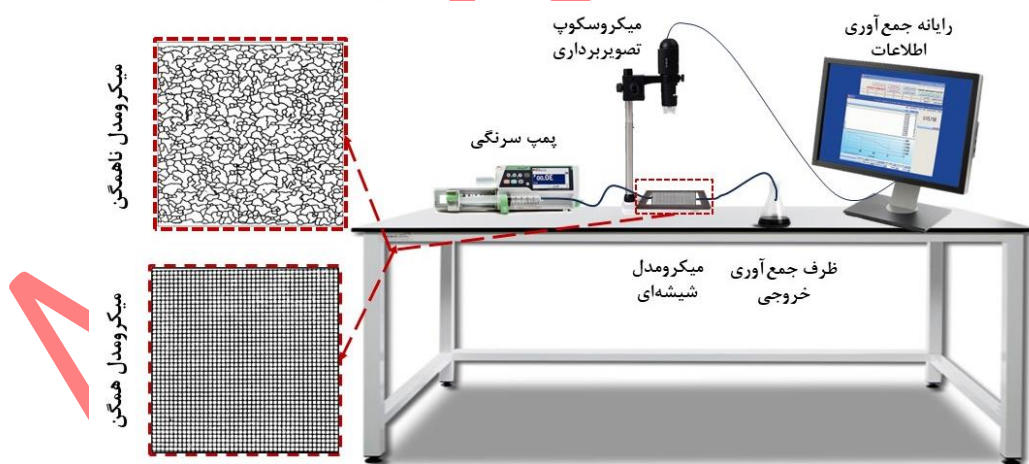
اندازه‌گیری تغییرات ترشوندگی:

در این پژوهش از روش کمی زاویه تماس برای اندازه‌گیری ترشوندگی استفاده شد. سطوح جامد مورد استفاده برای اندازه‌گیری ترشوندگی چندبرش نازک از یک سنگ کربناته هستند که در آن‌ها زاویه تماس نسبت به نفت اندازه‌گیری شد. برای اطمینان از نفت دوست بودن سنگ‌های کربناته این سنگ‌ها به مدت ۲۸ روز در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد در ظرف حاوی نفت غوطه‌ور شده. سپس از نفت خارج و خشک شده و سپس زاویه تماس آن‌ها اندازه‌گیری شد. در مرحله بعد سنگ‌های نفت دوست شده در ظرف‌های حاوی محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید قرار داده شد. زاویه تماس این قطعات سنگ در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شد تا توانایی محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید برای تغییر ترشوندگی نسبت به زمان سنجیده شود.

سیلاب‌زنی میکرومدل:

برای بررسی توانایی بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید در ازدیاد برداشت نفت مطابق شکل ۱، از آزمایش سیلاب‌زنی میکرومدل با استفاده از میکرومدل‌های همگن و غیرهمگن استفاده شد. اولین قدم برای ساخت یک میکرومدل طراحی الگوی آن است. برای طراحی الگوی میکرومدل از نرم‌افزار برداری CorelDRAW Graphics استفاده شد. در این پژوهش دو الگوی متفاوت میکرومدل همگن و ناهمگن طراحی و ساخته شد. از میکرومدل همگن برای بررسی پدیده اختلاط و بررسی نحوه عملکرد نمونه در جاروب نفت استفاده شد. از آنجایی که مخازن نفتی ناهمگن هستند از میکرومدل ناهمگن به منظور بررسی کارایی ماده در شرایط واقعی و نزدیک‌تر به مخزن استفاده شد. الگوهای مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. پس از طراحی الگو، با استفاده از دستگاه حکاکی لیزری طرح مورد نظر بر روی شیشه حک و سپس شیشه دیگری مشابه آن بر روی آن قرار داده شد. به منظور اتصال دو شیشه از کوره در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد لازم به ذکر است که ضخامت در نظر گرفته شده یا به بیان دیگر فاصله‌ی بین دو شیشه طوری طراحی شده است که سیال صرفاً اجازه حرکت در مسیرهای حکاکی شده را داشته باشد. خصوصیات فیزیکی میکرومدل همگن و ناهمگن طراحی شده به ترتیب شامل درصد تخلخل ۳۸ و ۲۵٪، حجم منافذ ۰/۳۵۲ و ۰/۲۰۳۶ mL است.

برای شروع آزمون سیلاب‌زنی، ابتدا میکرومدل اشباع از نفت شده و سپس توسط آب سازند تا زمانی که بازیابی نفت متوقف گردد (۲) سیلاب‌زنی انجام شد، سپس محلول حاوی مقادیر بهینه بایوسورفکتانت به مقدار ۲ PV سیلاب‌زنی شد. سیلاب‌زنی‌ها با نرخ ۰/۲۵ mL/h انجام شد. مشخصات نفت خام و آب سازند مورد استفاده در این آزمایش مطابق مشخصات ذکر شده در بخش معرفی مواد مصرفی است. در حین فرآیند سیلاب‌زنی تصاویری از نحوه‌ی جریان سیال در میکرومدل ضبط شد تا با بررسی این تصاویر میزان برداشت نفت محاسبه شود.



شکل ۱: سامانه سیلاب‌زنی بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید به میکرومدل‌های همگن و ناهمگن

نتایج و بحث:

آزمایش کنارزدن نفت:

همان طور که در شکل ۲ مشخص است، پس از اضافه شدن بیوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولیپید، نفت خام بلافاصله شروع به کنار رفتن از روی آب می کند و ناحیه شفاف ظاهر می شود. به دلیل دارا بودن یک سر آب دوست و یک سر آب گریز در بیوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولیپید، مولکول های نفت پیوندی با سر آب گریز و مولکول های آب پیوندی با سر آب دوست بیوسورفکتانت ایجاد می کنند که این امر باعث کنارزدن نفت و قرارگیری آب و نفت در کنار یکدیگر می شود؛ بنابراین می توان گفت که بیوسورفکتانت های مورد آزمایش توانایی خوبی برای کنارزدن نفت خام از روی آب را نشان می دهند و موجب پس زدگی نفت به شعاع ۷ سانتی متر شده است.



ب

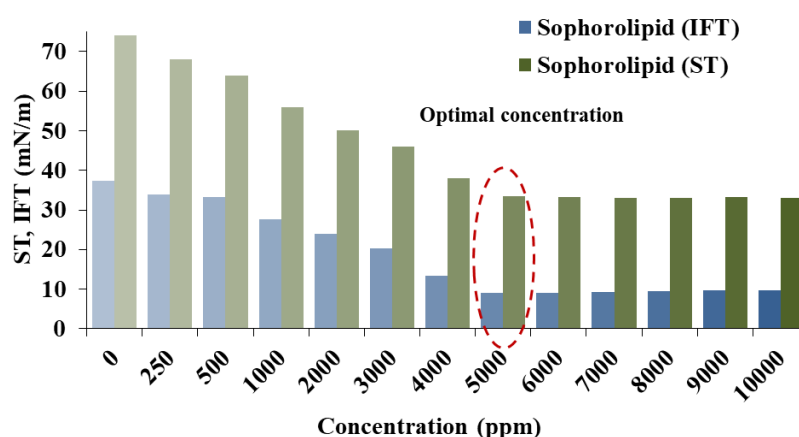
الف

شکل ۲: تأثیر دی استیلات اسید سوفورولیپید بر کنارزدن نفت (الف) عدم حضور دی استیلات اسید سوفورولیپید (ب) در حضور دی استیلات اسید سوفورولیپید

آزمایش کشش سطحی و کشش بین سطحی:

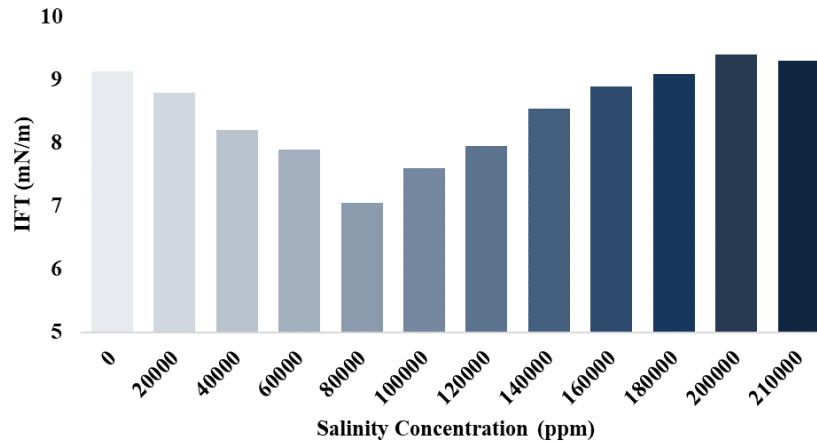
کشش سطحی و بین سطحی از پارامترهای مهم هنگام تحلیل یک سیستم حاوی چند فاز امتزاج ناپذیر است و کاهش آن ها یکی از مکانیزم های اصلی در از دیاد برداشت به کمک بایوسورفکتانت ها است. به همین منظور کشش سطحی و کشش بین سطحی دی استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت های مختلف اندازه گیری شد. به منظور بررسی توانایی بایوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولیپید در کاهش کشش سطحی و بین سطحی، محلول های دی استیلات اسید سوفورولیپید در بازه غلظت های بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰۰ ppm در آب مقطر ساخته شد و کشش سطحی و بین سطحی آن ها با آب مقطر اندازه گیری شد. با توجه به شکل ۱، با افزایش غلظت دی استیلات اسید سوفورولیپید به ۵۰۰۰ ppm مقدار کشش سطحی از ۷۴ mN/m برای آب مقطر به ۳۳/۴۱ mN/m در محلول دی استیلات اسید سوفورولیپید کاهش داده شده است. اما در غلظت های بالاتر از ۵۰۰۰ ppm با افزایش میزان دی استیلات اسید سوفورولیپید مقدار کشش سطحی تقریباً ثابت بوده و تغییر محسوسی مشاهده نشد؛ بنابراین مقدار بهینه ی دی استیلات اسید سوفورولیپید برای کاهش کشش سطحی، غلظت ۵۰۰۰ ppm آن در نظر گرفته شد. علت کاهش کشش سطحی توسط دی استیلات اسید سوفورولیپید آن است که بایوسورفکتانت ها در سطوح مشترک جذب شده و به دلیل داشتن دوسر آب دوست و آب گریز، بین دوفاز واسطه شده و

می‌توانند برهمکنش‌های قوی با هر دوفاز ایجاد کرده، در نتیجه کشش سطحی کاهش می‌یابد؛ بنابراین افزودن سورفکتانت‌ها اختلاط فازهای غیرقطبی و قطبی را تسهیل می‌کند [۲۶]. کاهش کشش سطحی در اثر افزودن سورفکتانت‌ها تا جایی ادامه دارد که سطح مشترک از مولکول‌های سورفکتانت اشباع شود. هنگامی که سطح مشترک از مولکول‌های سورفکتانت اشباع شود، افزودن سورفکتانت بیشتر باعث کاهش بیشتر کشش سطحی نمی‌شود. با توجه به نتایج آزمون کشش بین‌سطحی که در شکل ۳ نشان داده شده است، دی‌استیلات اسید سوفورولپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm کشش بین‌سطحی آب و نفت را از مقدار ۳۷/۴۲ به مقدار ۹/۱۴ mN/m می‌رساند. از آنجا که در غلظت‌های بیش‌تر از ۵۰۰۰ ppm افزایش مقدار دی‌استیلات اسید سوفورولپید تأثیر بسیار کمی بر کاهش کشش بین‌سطحی دارد، این غلظت به عنوان غلظت بهینه‌ی دی‌استیلات اسید سوفورولپید برای کاهش کشش بین‌سطحی محلول بایوسورفکتانت و نفت در نظر گرفته می‌شود. این نتیجه در تطابق با نتیجه‌ی به دست آمده از آزمایش کشش سطحی است.



شکل ۳: کشش سطحی (ST) و بین‌سطحی (IFT) غلظت‌های مختلف دی‌استیلات اسید سوفورولپید در آب مقطر

پس از به‌دست‌آوردن غلظت بهینه‌ی دی‌استیلات اسید سوفورولپید در آب مقطر، برای اطمینان از عملکرد مناسب بایوسورفکتانت در محیط مخزن، لازم است تأثیر شوری بر کاهش کشش بین‌سطحی محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید بررسی شود. بدین منظور محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید در غلظت بهینه ۵۰۰۰ ppm در محیط‌هایی با شوری در بازه ۰ تا ۲۱۰۰۰۰ ppm آماده و کشش بین‌سطحی آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، با افزایش غلظت نمک تا ۸۰۰۰۰ ppm، مقدار کشش بین‌سطحی از ۹/۱۴ mN/m به ۷/۰۵ mN/m کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش بیشتر غلظت نمک، کشش بین‌سطحی افزایش می‌یابد. علت تفاوت رفتار IFT در غلظت‌های مختلف نمک این است که در غلظت‌های پایین نمک، میکروامولسیون نفت در آب به همراه نفت اضافی وجود دارد و کشش بین‌سطحی با افزایش غلظت نمک کاهش پیدا می‌کند. در غلظت‌های بالای نمک، میکروامولسیون آب در نفت به همراه آب اضافی وجود دارد و کشش بین‌سطحی با افزایش غلظت نمک افزایش می‌یابد. کاهش قابل توجه IFT مشاهده شده برای محلول‌های تهیه شده با آب سازند را می‌توان به تغییر خواص بایوسورفکتانت، بهبود حلالیت و پایداری، و تأثیر قدرت یونی بر برهمکنش‌های الکترواستاتیک نسبت داد [۲۷]. این عوامل در مجموع به بهبود عملکرد محلول بایوسورفکتانت در کاهش کشش سطحی در محلول بایوسورفکتانت و نفت خام سنگین کمک می‌کنند.



شکل ۴: مقادیر کشش بین سطحی (IFT) محلول دی استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت بهینه در شوری‌های مختلف

پایداری امولسیون بیوسورفکتانت در دمای مخزن:

رفتار پایداری امولسیونی مخلوط‌های تهیه شده از محلول آب شور حاوی غلظت CMC از بیوسورفکتانت، و حجم مساوی نفت در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد (دمای مخزن) بررسی شده است. از آنجایی که امولسیون ناخواسته حرکت سیال را مختل کرده و تأثیر منفی بر ویسکوزیته دارد، بیوسورفکتانتی که امولسیون را در دمای مخزن بشکند، عملکرد مطلوبی دارد. به منظور بررسی توانمندی بایوسورفکتانت در جداسازی دوفاز آزمون پایداری امولسیون در دمای مخزن انجام پذیرفت، با توجه به یافته‌های نشان داده شده در شکل ۵، بیوسورفکتانت دی استیلات اسید سوفورولیپید عملکرد قابل قبولی داشت و دو فاز آب و نفت تولید کرد که کاملاً از یکدیگر متمایز بودند.

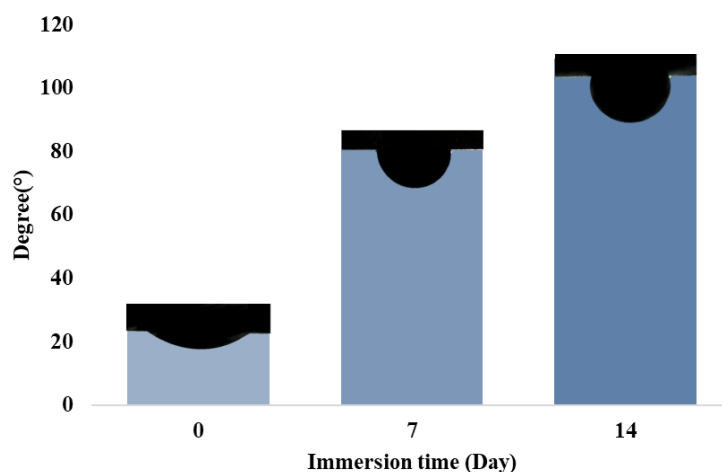


الف ب

شکل ۵: پایداری امولسیون و میکروامولسیون ها در دمای ۹۰ درجه سانتیگراد الف) آب شور و نفت ب) نفت و آب شور حاوی غلظت CMC از بایوسورفکتانت

اندازه‌گیری ترشوندگی:

در مخازن نفتی به دلیل همجواری نفت و سازند برای سالیان دراز، سنگ حالت نفت دوستی پیدا می‌کند. در محیط‌های نفت دوست یا محیط‌های با ترشوندگی متوسط مقدار زیادی از نفت موجود، به سنگ سازند چسبیده و غیرقابل حرکت می‌گردند. در صورتی که ترشوندگی چنین محیط‌هایی به سمت آب‌دوست بودن تغییر کند، آب در تماس با دیواره‌ی سنگ قرار گرفته و نفت در وسط حفرات قرار خواهد گرفت و مقدار نفت باقیمانده و غیرقابل تولید کاهش خواهد یافت؛ بنابراین تغییر ترشوندگی یکی از مکانیزم‌های اصلی در ازدیاد برداشت نفت به وسیله‌ی بایوسورفکتانت‌ها است [۲۸]. طبق آزمایش اندازه‌گیری ترشوندگی قطعات سنگ در قبل از تیمار توسط بایوسورفکتانت، زاویه تماس قطره‌ی نفت روی قطعات سنگ $30/20^\circ$ اندازه‌گیری شد که نشان دهنده‌ی نفت دوست بودن نمونه سنگ‌هاست. پس از آن برای سنجش عملکرد دی‌استیلات اسید سوفورولپید در تغییر ترشوندگی، سنگ‌های به شدت نفت دوست در محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید غوطه‌ور شده و در زمان‌های ۷ و ۱۴ روز پس از غوطه‌ور شدن زاویه تماس آن‌ها اندازه‌گیری شد. طبق نتایج نشان داده شده در شکل ۵ با غوطه‌ور شدن سنگ در محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید و با گذشت زمان زاویه تماس قطره‌ی نفت روی سنگ افزایش می‌یابد که به معنی کاهش تمایل سنگ به نفت است. پس از ۷ روز غوطه‌وری سنگ کربناته در دی‌استیلات اسید سوفورولپید، زاویه تماس نفت بر روی سنگ به مقدار $80/38^\circ$ می‌رسد که بیانگر ترشوندگی مخلوط است. همچنین پس از گذشت ۱۴ روز زاویه تماس به $109/42^\circ$ رسید که بیانگر ترشوندگی آب دوست است. دلیل تغییر ترشوندگی سنگ کربناته توسط دی‌استیلات اسید سوفورولپید به عنوان یک بایوسورفکتانت غیر یونی آن است که در ابتدا مولکول‌های دی‌استیلات اسید سوفورولپید روی سطح سنگ (که دارای بار مثبت است) جذب می‌شوند و باعث کاهش پتانسیل زتا در سطح می‌شوند. در نتیجه اجزای اسیدی نفت آزاد می‌شوند و پیوندهایی را با مولکول‌های سورفکتانت ایجاد می‌کنند که منجر به تغییر ترشوندگی به سمت آب‌دوست بودن می‌شود [۲۹].



شکل ۶: زاویه تماس نفت بر روی سنگ کربناته پس از (۰، ۷ و ۱۴ روز) غوطه‌ور شدن در محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید در غلظت بهینه

جدول شماره ۱ به مقایسه عملکرد سورفکتانت‌های مختلف با بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در کاهش کشش بین‌سطحی است. غلظت بهینه مورد استفاده از سورفکتانت، کشش بین‌سطحی اولیه و کشش بین‌سطحی نهایی در این جدول ذکر شده است.

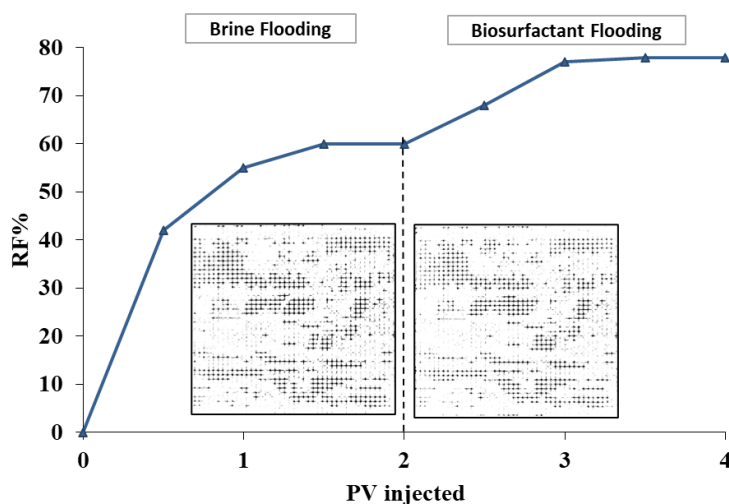
جدول ۱: مقایسه عملکرد سورفکتانت‌های مختلف در تغییر ترشوندگی

| سورفکتانت | غلظت سورفکتانت wt% | IFT اولیه (mN/m) | IFT نهایی (mN/m) | رفرنس |
|--|-----------------------|---------------------|---------------------|------------|
| Matricaria chamomilla | ۰-۱۲ | ۳۰.۶۳ | ۱۲.۵۷ | [۳۰] |
| Olive leaves extract | ۰-۳.۸۵ | ۳۶.۵۰ | ۱۴ | [۳۱] |
| Zizyphus Spina-Christy extract | ۰-۸ | ۳۳ | ۱۱.۶۰ | [۳۲] |
| Mulberry leaf extract | ۰-۱.۶ | ۴۲ | ۲۰ | [۱۰] |
| Prosopis leaves extract | ۰-۳.۸۵ | ۳۶.۵ | ۱۵.۱۱ | [۳۱] |
| N-lauroyl-L-lysine | ۰-۵ | ۳۳.۳۶ | ۱۴.۷ | [۳۳] |
| Di-acetylated acid di- acetylated acid sophorolipid | ۰-۰.۸ | ۳۷.۴۲ | ۹.۱۴ | پژوهش حاضر |

آزمایش‌های سیلاب‌زنی میکرومدل:

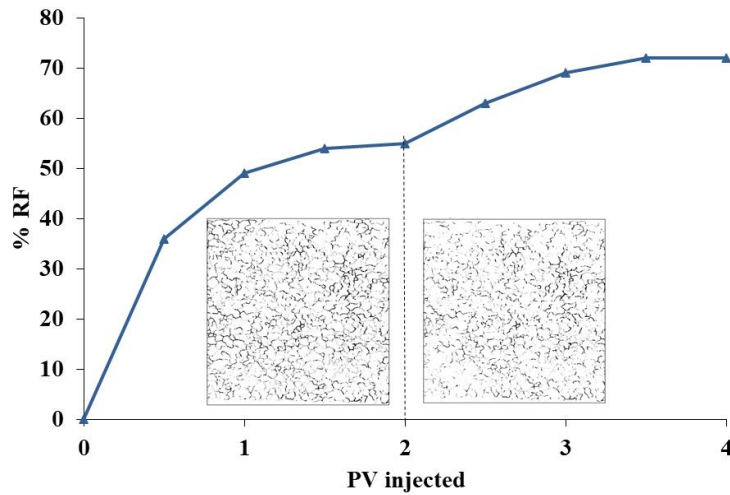
پس از بررسی کارایی بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی که هر دو از مکانیزم‌های اصلی ازدیاد برداشت نفت با روش تزریق بایوسورفکتانت‌ها هستند، فرآیند سیلاب‌زنی در میکرومدل‌های همگن و ناهمگن انجام شد تا به بررسی عملی امکان ازدیاد برداشت نفت توسط دی‌استیلات اسید سوفورولیپید پرداخته شود. سیلاب‌زنی توسط دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm و شوری ۸۰۰۰۰ ppm انجام شد. در فرآیندهای صنعتی ازدیاد برداشت پس از فرآیند سیلاب‌زنی با آب شور (برداشت ثانویه)، عملیات ازدیاد برداشت برای بازیابی مقادیر باقی مانده نفت انجام می‌پذیرد. برای شبیه‌سازی این فرآیند، در میکرومدل همگن به عنوان ساده‌ترین نوع میکرومدل و حالت ایده‌آل، ابتدا دو برابر حجم منافذ آب سازند با شوری ۲۱٪ تزریق کرده و سپس دو برابر حجم منافذ محلول بایوسورفکتانت تزریق شد. با توجه به شکل ۷ در ابتدای فرآیند تزریق آب مقدار نفت زیادی تولید می‌شود که با ادامه‌ی تزریق شیب خط تولید نفت کاهش می‌یابد تا جایی که پس از مدتی از تزریق آب (PV ۲)، نفت بیشتری تولید نمی‌شود. علت توقف تولید نفت در این شرایط آن است که میان‌شکنی اتفاق افتاده است و بیشتر بودن فشار موینگی در حفراتی که نفت درون آن‌ها قرار دارد، اجازه‌ی ورود آب تزریقی به این حفرات را نمی‌دهد. در چنین زمانی با تزریق بایوسورفکتانت، کشش بین‌سطحی نفت و آب (سیال تزریقی) در محل تماس این دو سیال و در نتیجه فشار موینگی کاهش می‌یابد و تولید نفت ادامه می‌یابد. در این آزمایش تزریق ۲ PV محلول دی‌استیلات اسید

سوفورولیپید میزان بازیابی نفت را از ۶۰٪ به ۷۸٪ رسانده لذا استفاده از بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید ۱۸٪ ازدیاد برداشت مازاد (برداشت ثالثیه) نفت را به همراه داشته است.



شکل ۷: سیلاب‌زنی میکرومدل همگن توسط آب سازند و محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید

در ادامه، میکرومدل ناهمگن به منظور بررسی عملکرد بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در شرایط غیر ایده‌آل و واقعی‌تر استفاده شد. در میکرومدل ناهمگن به دلیل عدم تشابه مسیرهای حرکت جریان امکان به تله افتادن نفت بیشتر است. در این میکرومدل به دلیل تفاوت سایز حفرات و گلوگاه، سیال تزریقی ابتدا در مسیرهای با تراوایی بالاتر حرکت می‌کند و نفت از حفرات بزرگ‌تر تخلیه می‌شود. در چنین شرایطی در حفرات کوچک‌تر به دلیل بالابودن فشار موینگی (هرچه شعاع حفره کمتر باشد فشار موینگی بیشتر است)، سیال تزریقی نمی‌تواند نفت را جابه‌جا کند. مطابق شکل ۸، در شرایطی که تزریق بیشتر آب سازند، تولید نفت بیشتری را به همراه نداشته، استفاده از محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید، بازیابی نفت را از ۵۵٪ به ۷۱٪ رسانده و تزریق دی‌استیلات اسید سوفورولیپید به میزان ۱۶٪ باعث افزایش بازیافت نفت شده است. علت این ازدیاد برداشت کاهش کشش بین‌سطحی به واسطه‌ی دارا بودن ترکیبات آب‌دوست و آب‌گریز در ساختار دی‌استیلات اسید سوفورولیپید است.



شکل ۸: سیلاب‌زنی میکرومدل ناهمگن توسط آب سازند و محلول دی‌استیلات اسید سوفورولپید

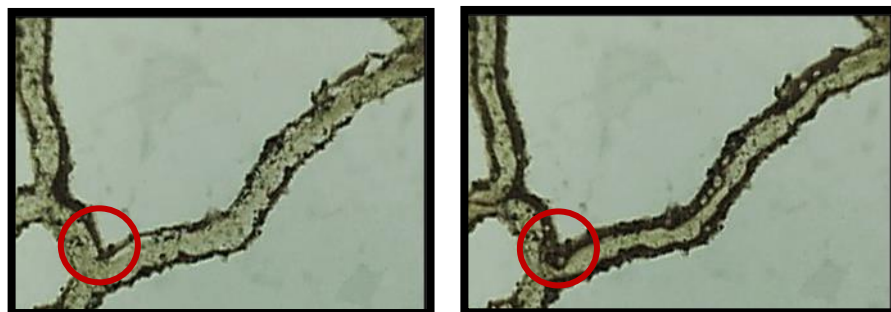
جدول ۲ اطلاعات مربوط به مقایسه عملکرد سورفکتانت‌های مختلف پس از تزریق در میکرومدل را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت بیوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید عملکرد خوبی در ازدیاد برداشت نفت دارند.

جدول ۲: مقایسه عملکرد سورفکتانت‌های مختلف برای ازدیاد برداشت نفت

| مرجع | نوع (بیو)سورفکتانت | نوع میکرومدل | تولید نفت |
|--------------------|---|--------------|-----------|
| شعبانی ۲۰۱۷ [۳۴] | نوعی بیوسورفکتانت پلیمری | ناهمگن | ٪۶۷ |
| مهاجری ۲۰۱۹ [۳۵] | سورفکتانت شیمیایی SDS | ناهمگن | ٪۶۶ |
| نوروزی ۲۰۲۰ [۳۶] | سورفکتانت آنیونی | ناهمگن | ٪۷۲ |
| امانی ۲۰۱۵ [۲۷] | بیوسورفکتانت رامنولپید | ناهمگن | ٪۷۶ |
| ونگ ۲۰۲۱ [۳۷] | ترکیب بایوسورفکتانت و نانوسیلیس | ناهمگن | ٪۷۰ |
| پروواسنا ۲۰۲۴ [۳۸] | بایوسورفکتانت گلایکولپیدی | ناهمگن | ٪۶۳ |
| کار حاضر | بیوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولپید | ناهمگن | ٪۷۱ |

بررسی مکانیزم‌های ازدیاد برداشت در مقیاس حفره باعث می‌شود تا مکانیزم‌هایی که باعث تولید بیشتر نفت در این فرایندها می‌شوند بهتر بشناخته شود به این منظور تصاویری میکروسکوپی از میکرومدل ضبط شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شکل ۸ تأثیر

سیلاب‌زنی با محلول بیوسورفکتانت بر ترشوندگی و ضخامت لایه‌ی نفتی روی دیواره را نشان می‌دهد. در تصویر الف که مربوط به سیلاب‌زنی با آب است واضح است که میکرومدل نفت دوست است. قسمت ب که تصویر میکرومدل پس از سیلاب‌زنی با بیوسورفکتانت است میکرومدل همچنان نفت دوست است اما ضخامت لایه‌ی نفتی روی دیواره به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این امر باعث کاهش اشباع نفت باقیمانده می‌شود.



ب

الف

شکل ۷: تصویر در مقیاس حفره نشان‌دهنده‌ی تأثیر آب و بیوسورفکتانت بر ترشوندگی میکرومدل و جابجایی میکروسکوپی (الف) پس از سیلاب‌زنی با آب (ب) پس از سیلاب‌زنی با بیوسورفکتانت

همچنین این تصویر نشان‌دهنده‌ی توانایی آب و بیوسورفکتانت بر رانندگی جابجایی میکروسکوپی درون میکرومدل است. در قسمت مشخص شده از شکل واضح است که در گلوگاه‌هایی که آب موفق به جابجایی نفت شده است باز هم مقداری کمی از نفت جاروب نشده است اما پس از تزریق بیوسورفکتانت مقدار نفت جاروب نشده کمتر است.

نتیجه‌گیری:

در این پژوهش عملکرد دی‌استیلات اسید سوفورولیپید به‌منظور ازدیاد برداشت نفت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور آزمایش‌های مختلف از قبیل کشش سطحی و کشش بین‌سطحی، تغییر ترشوندگی و سیلاب‌زنی میکرومدل انجام شد. با بررسی و تحلیل نتایج این آزمایش‌ها نتایج زیر حاصل شد:

◀ محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm در آب مقطر، مقدار کشش سطحی آب مقطر را از ۷۴ mN/m به مقدار ۳۳/۴۱ mN/m کاهش داد.

◀ محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت ۵۰۰۰ ppm در آب مقطر، کشش بین‌سطحی آب و نفت را از ۳۷.۴۲ mN/m به ۹/۱۴ mN/m کاهش داد. میزان شوری بهینه برای این محلول غلظت ۸۰۰۰۰ ppm نمک NaCl است که در این غلظت کشش بین‌سطحی به عدد ۷/۰۵ mN/m؛ کاهش یافت. شایان ذکر است با افزایش غلظت نمک بیش از این مقدار کشش بین‌سطحی افزایش می‌یابد.

◀ محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در غلظت و شوری بهینه زاویه تماس قطره‌ی نفت روی سنگ کربناته را در مدت ۱۴ روز از $30/20^\circ$ به $109/42^\circ$ افزایش داد که بیانگر توانایی این بایوسورفکتانت در تغییر ترشوندگی سنگ از نفت دوست به آب‌دوست است.

◀ در میکرومدل همگن پس از تزریق PV۲ آب با شوری ۲۱٪ و محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید میزان ازدیاد برداشت نفت ۱۸٪ بیشتر و به ۷۸٪ افزایش یافت.

◀ در میکرومدل با الگوی ناهمگن با تزریق ابتدا PV۲ آب با شوری ۲۱٪ تزریق و پس از آن محلول دی‌استیلات اسید سوفورولیپید بازیابی نفت به ۷۱٪ افزایش و ازدیاد برداشت نفت ۱۶٪ ارتقا یافت.

باتوجه به قیمت پایین و قابلیت تولید در حجم بالا، همچنین نتایج امیدوارکننده بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید در کاهش کشش سطحی و بین‌سطحی و ازدیاد برداشت نفت، بایوسورفکتانت دی‌استیلات اسید سوفورولیپید به‌عنوان گزینه مناسبی برای ازدیاد برداشت زیستی نفت معرفی شد.

مراجع:

1. Sheng, J.J.: Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice. Gulf Professional Publishing (2010)
2. Saghandali, F., Salehi, M.B., Taghikhani, V.: Hydrogel nanocomposite network elasticity parameters as a function of swelling ratio: from micro to macro flooding. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. (2023)
3. Babadagli, T.: Philosophy of EOR Description of EOR and updated list of EOR methods. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. 29–31 (2019)
4. Seo, S., Mastiani, M., Mosavati, B., Peters, D.M., Mandin, P., Kim, M.: Performance evaluation of environmentally benign nonionic biosurfactant for enhanced oil recovery. Fuel. 234, 48–55 (2018)
5. de Araujo, L.L.G.C., Sodré, L.G.P., Brasil, L.R., Domingos, D.F., de Oliveira, V.M., da Cruz, G.F.: Microbial enhanced oil recovery using a biosurfactant produced by *Bacillus safensis* isolated from mangrove microbiota- Part I biosurfactant characterization and oil displacement test. J Pet Sci Eng. 180, 950–957 (2019)
6. Liu, Z. xia, Liang, Y., Wang, Q., Guo, Y. jun, Gao, M., Wang, Z. bo, Liu, W. lu: Status and progress of worldwide EOR field applications. (2020)
7. Semnani, R.H., Salehi, M.B., Mokhtarani, B., Sharifi, A., Mirzaei, M., Taghikhani, V.: Evaluation of the interfacial activity of imidazolium-based ionic liquids and their application in enhanced oil recovery process. J Mol Liq. 362, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119735>
8. Nwideo, L.N., Theophilus, S., Barifcani, A., Sarmadivaleh, M., Iglauer, S.: EOR processes, opportunities and technological advancements. Chemical Enhanced Oil Recovery (cEOR)-a Practical Overview. 2–52 (2016)
9. Sarafzadeh, P., Hezave, A.Z., Mohammadi, S., Niazi, A., Ayatollahi, S.: Modification of rock/fluid and fluid/fluid interfaces during MEOR processes, using two biosurfactant producing strains of *Bacillus stearothermophilus* SUCPM# 14 and *Enterobacter cloacae*: A mechanistic study. Colloids Surf B Biointerfaces. 117, 457–465 (2014)

10. Ravi, S.G., Shadizadeh, S.R., Moghaddasi, J.: Core flooding tests to investigate the effects of IFT reduction and wettability alteration on oil recovery: Using mulberry leaf extract. *Pet Sci Technol.* 33, 257–264 (2015)
11. Sharma, M., Bryant, S., Huh, C.: PH sensitive polymers for improving reservoir sweep and conformance control in chemical flooding. Univ. of Texas, Austin, TX (United States) (2008)
12. Ahmadi, M.A., Arabsahebi, Y., Shadizadeh, S.R., Behbahani, S.S.: Preliminary evaluation of mulberry leaf-derived surfactant on interfacial tension in an oil-aqueous system: EOR application. *Fuel.* 117, 749–755 (2014)
13. Pashapouryeganeh, F., Zargar, G., Kadkhodaie, A., Rabiee, A., Misaghi, A., Zakariaei, S.J.S.: Experimental evaluation of designed and synthesized Alkaline-Surfactant-polymer (ASP) for chemical flooding in carbonate reservoirs. *Fuel.* 321, 124090 (2022)
14. Tavakkoli, O., Kamyab, H., Shariati, M., Mohamed, A.M., Junin, R.: Effect of nanoparticles on the performance of polymer/surfactant flooding for enhanced oil recovery: A review. *Fuel.* 312, 122867 (2022)
15. Patel, J., Borgohain, S., Kumar, M., Rangarajan, V., Somasundaran, P., Sen, R.: Recent developments in microbial enhanced oil recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 52, 1539–1558 (2015)
16. Zheng, C., Yu, L., Huang, L., Xiu, J., Huang, Z.: Investigation of a hydrocarbon-degrading strain, *Rhodococcus ruber* Z25, for the potential of microbial enhanced oil recovery. *J Pet Sci Eng.* 81, 49–56 (2012)
17. Niu, J., Liu, Q., Lv, J., Peng, B.: Review on microbial enhanced oil recovery: Mechanisms, modeling and field trials. *J Pet Sci Eng.* 192, 107350 (2020)
18. Aghaei, S., Saghandali, F., Salehi, M.B., Mokhtarani, B., Taghikhani, V., Saviz, S.: A micromodel investigation on the flooding of glycolipid biosurfactants for enhanced oil recovery. *Geoenergy Science and Engineering.* 230, 212219 (2023)
19. Souayeh, M., Al-Wahaibi, Y., Al-Bahry, S., Elshafie, A., Al-Bemani, A., Joshi, S., Al-Hashmi, A., Al-Mandhari, M.: Optimization of a low-concentration *Bacillus subtilis* strain biosurfactant toward microbial enhanced oil recovery. *Energy & fuels.* 28, 5606–5611 (2014)
20. Bazsefidpar, S., Mokhtarani, B., Panahi, R., Hajfarajollah, H.: Overproduction of rhamnolipid by fed-batch cultivation of *Pseudomonas aeruginosa* in a lab-scale fermenter under tight DO control. *Biodegradation.* 30, 59–69 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10532-018-09866-3>
21. Hajfarajollah, H., Mokhtarani, B., Tohidi, A., Bazsefidpar, S., Akbari Noghabi, K.: Overproduction of lipopeptide biosurfactant by *Aneurinibacillus thermoaerophilus* HAK01 in various fed-batch modes under thermophilic conditions. *RSC Adv.* 9, 30419–30427 (2019). <https://doi.org/10.1039/c9ra02645b>
22. Zhao, F., Zhu, H., Cui, Q., Wang, B., Su, H., Zhang, Y.: Anaerobic production of surfactin by a new *Bacillus subtilis* isolate and the in situ emulsification and viscosity reduction effect towards enhanced oil recovery applications. *J Pet Sci Eng.* 201, 108508 (2021)
23. Ribeiro, M.H., Fahr, E., Lopes, S.: Glycolipids: From Biosynthesis to Biological Activity toward Therapeutic Application. *Biomolecules from natural sources: advances and applications.* 1–30 (2022)
24. Argentin, M.N., Martins, L.F., Sousa, M.P., Bossolan, N.R.S.: Biosurfactant from a thermo-halophilic strain of *Bacillus alveayuensis* isolated from a Brazilian oil reservoir: Production, chemical characterization, antimicrobial activity, and efficiency in wettability reversal and oil removal from oil-soaked sand. *Geoenergy Science and Engineering.* 231, 212324 (2023)
25. Lebouachera, S.E.I., Balamane-Zizi, O., Boublia, A., Ghriga, M.A., Hasanzadeh, M., Hadri, H. El, Tassalit, D., Khodja, M., Grassl, B., Drouiche, N.: Understanding the factors affecting the adsorption of surface-active agents onto reservoir rock in chemical enhanced oil recovery applications: a comprehensive review. *Chemistry Africa.* 1–24 (2024)

26. Yalaoui-Guellal, D., Fella-Temzi, S., Djafri-Dib, S., Sahu, S.K., Irorere, V.U., Banat, I.M., Madani, K.: The petroleum-degrading bacteria *Alcaligenes aquatilis* strain YGD 2906 as a potential source of lipopeptide biosurfactant. *Fuel*. 285, 119112 (2021)
27. Amani, H.: Study of enhanced oil recovery by rhamnolipids in a homogeneous 2D micromodel. *J Pet Sci Eng*. 128, 212–219 (2015)
28. Moghadam, A.M., Salehi, M.B., Mousavi Moghadam, A., Baghban Salehi, M.: Enhancing hydrocarbon productivity via wettability alteration: a review on the application of nanoparticles. *Reviews in Chemical Engineering*. 35, 531–563 (2019). <https://doi.org/10.1515/revce-2017-0105>
29. Yao, Y., Wei, M., Kang, W.: A review of wettability alteration using surfactants in carbonate reservoirs. *Adv Colloid Interface Sci*. 294, 102477 (2021)
30. Shadizadeh, S.S., Kharrat, R.: Experimental investigation of *Matricaria chamomilla* extract effect on oil-water interfacial tension: Usable for chemical enhanced oil recovery. *Pet Sci Technol*. 33, 901–907 (2015)
31. Khorram Ghahfarokhi, A., Dadashi, A., Daryasafar, A., Moghadasi, J.: Feasibility study of new natural leaf-derived surfactants on the IFT in an oil–aqueous system: experimental investigation. *J Pet Explor Prod Technol*. 5, 375–382 (2015)
32. Tadros, T.F., Vandamme, A., Leveck, B., Booten, K., Stevens, C. V.: Stabilization of emulsions using polymeric surfactants based on inulin. *Adv Colloid Interface Sci*. 108, 207–226 (2004)
33. Takassi, M.A., Hashemi, A., Rostami, A., Zadehnazari, A.: A lysine amino acid-based surfactant: Application in enhanced oil recovery. *Pet Sci Technol*. 34, 1521–1526 (2016)
34. Shabani, M.H., Jafari, A., Mousavi, S.M.: A pore scale evaluation of produced biosurfactants for ex-situ enhanced oil recovery. *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology*. 6, 75–89 (2017)
35. Mohajeri, M., Rasaei, M.R., Hekmatzadeh, M.: Experimental study on using SiO₂ nanoparticles along with surfactant in an EOR process in micromodel. *Petroleum Research*. 4, 59–70 (2019)
36. Dashtaki, S.R.M., Ali, J.A., Manshad, A.K., Nowrouzi, I., Mohammadi, A.H., Keshavarz, A.: Experimental investigation of the effect of *Vitagnus* plant extract on enhanced oil recovery process using interfacial tension (IFT) reduction and wettability alteration mechanisms. *J Pet Explor Prod Technol*. 10, 2895–2905 (2020)
37. Wang, D., Luo, Y., Lai, R., Cui, K., Li, H., Zhang, Z., Zhang, Y., Shi, R.: New technique for enhancing oil recovery from low-permeability reservoirs: The synergy of silica nanoparticles and biosurfactant. *Energy & Fuels*. 35, 318–328 (2021)
38. Purwasena, I.A., Amaniyah, M., Astuti, D.I., Firmansyah, Y., Sugai, Y.: Production, characterization, and application of *Pseudoxanthomonas taiwanensis* biosurfactant: a green chemical for microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Sci Rep*. 14, 10270 (2024)