

# بررسی ازدیاد برداشت نفت به روش سیلاب‌زنی سورفکتین درون میکرومدل و مغزه

حسین امانی

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، مازندران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۵

## چکیده

سورفکتانت‌های تولید شده به‌وسیله باکتری‌ها به عنوان بیوسورفکتانت شناخته می‌شوند. از مهم‌ترین ویژگی مواد فعال سطحی می‌توان به تجزیه‌پذیری بالا و سمیت کم آنها اشاره کرد. این ویژگی‌ها، بیوسورفکتانت‌ها را جایگزین سورفکتانت‌های شیمیایی در انواع کاربردها از جمله ازدیاد برداشت میکروبی نفت می‌کند. سورفکتین یک لیپو پپتید سیکلیک به‌عنوان یکی از بهترین بیوسورفکتانت‌ها شناخته می‌شود که توسط سویه‌های مختلف *Bacillus subtilis* تولید می‌شود. در این تحقیق از باکتری ۰۱۱۰ *Bacillus subtilis* جدا شده از خاک‌های سطحی یک منطقه کشاورزی ایران به منظور تولید سورفکتین استفاده شد. سورفکتین تولید شده فعالیت سطحی خوبی از خود نشان داد به طوری که توانست در غلظت ۵۰ mg/l کشش سطحی آب را از ۶۹ به ۲۶ mN/m و کشش بین سطحی را از ۳۸ به ۲ mN/m کاهش دهد. نتایج روش کنار زنی نفت خام از روی آب نشان داد وقتی بیوسورفکتانت تولید شده در غلظت ۵۰ mg/l که غلظت بحرانی مایسل (CMC) می‌باشد به آن اضافه شود، بلافاصله ناحیه شفاف روی سطح نفت ظاهر می‌شود. همچنین در آزمایش‌های مشاهده‌ای، با استفاده از میکرومدل شیشه‌ای، اثر بیوسورفکتانت تولیدی روی ازدیاد برداشت نفت مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های جابه‌جایی نفت خام درون میکرومدل نشان داد بعد از سیلاب‌زنی با آب در حدود ۱۰/۱٪ دیگر ازدیاد برداشت نفت با تزریق محلول بیوسورفکتانت به‌دست می‌آید. (همچنین محلول بیوسورفکتانت توانست ۴/۹٪ نفت درجا را از درون یک مغزه اشباع شده با نفت که تحت سیلاب‌زنی با آب قرار گرفته بود را استحصال نماید). این نتایج پیشنهاد می‌کند بیوسورفکتانت تولیدی گزینه خوبی برای استفاده در فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی نفت است.

**کلمات کلیدی:** بیوسورفکتانت، سورفکتین، میکرومدل، مغزه، ازدیاد برداشت میکروبی نفت

## مقدمه

مویینه بین سیالات، سنگ و کشش سطحی در مخزن به جا می‌ماند؛ بنابراین باید به طریقی بازده بازیافت نفت را افزایش داد. به تله افتادن نفت در حفره‌های سنگ مخزن با استفاده از نیروهای ویسکوز و نیروهای موئینگی کنترل می‌شود.

پس از عملیات سیلاب‌زنی مخازن نفتی با آب، مقدار زیادی از نفت مخزن به خاطر وجود نیروهای

\*مسئول مکاتبات

hosn1\_amani@yahoo.com

آدرس الکترونیکی

سورفکتین با کاهش کشش بین سطحی و همچنین دارا بودن قدرت امولسیون کنندگی به جدا شدن نفت از سطح سنگ‌ها کمک می‌کند [۱-۳ و ۷ و ۸]. ازدیاد برداشت میکروبی نفت معمولاً به دو روش صورت می‌پذیرد. در روش اول که به روش دگر جا معروف است ابتدا بیوسورفکتانت در بیوراکتور تولید شده سپس آن را به مخزن تزریق می‌کنند. در روش دوم یا روش درجا، ابتدا باکتری‌هایی که توانایی تولید بیوسورفکتانت دارند به داخل مخزن تزریق می‌شود و سپس تزریق مواد غذایی لازم به مخزن که باعث تحریک رشد میکرو ارگانیسم‌های تولید کننده بیوسورفکتانت ساکن در مخزن می‌شود انجام می‌گیرد. در تحقیق حاضر، ابتدا به تولید بیوسورفکتانت به روش دگر جا پرداخته می‌شود و سپس تاثیر ماده تولیدی در بازیافت نفت در یک میکرومدل و مغزه بررسی می‌گردد. (یک مدل شیشه‌ای که حفرات سنگ مخزن بر روی آن شبیه‌سازی و حک شده است میکرو مدل نامیده می‌شود) [۱۲-۱۸]. محققین معمولاً از میکرومدل‌ها برای مشاهده جریان در محیط متخلخل و شناخت فرآیندهای فیزیکی که در هنگام حرکت سیال ممکن است اتفاق بیافتند استفاده می‌کنند. مشاهده جریان سیالات به محققین اجازه می‌دهد درک بهتری از مکانیسم‌های موجود در محیط متخلخل داشته باشند [۱۲-۱۸].

از آنجایی که اثر بیوسورفکتانت‌ها روی نفت خام در محیط‌های متخلخل به خوبی گسترش نیافته است، بنابراین تحقیق حاضر می‌تواند به عنوان افزوده‌ای بر این پژوهش‌ها باشد. انجام آزمایش‌های گسترده برای پیش‌بینی بهتر مقدار تولید نفت از مخازن به روش سیلابزنی با بیوسورفکتانت‌ها، شبیه‌سازی با دید بازتر و نیز مطالعات رفتار سیالات بسیار ضروری است. در همین راستا، تمرکز اصلی این پژوهش روی تولید سورفکتین توسط باکتری بومی *Bacillus subtilis* NLIM 0110 و در نهایت بررسی و مشاهده نحوه عملکرد سورفکتین تولیدی درون یک میکرومدل و مغزه می‌باشد.

عدد موئینگی به صورت نسبت نیروهای ویسکوز به نیروهای موئینگی به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود.

$$N_e = \mu v / \delta \cos \theta \quad (1)$$

در این رابطه  $v$  و  $\mu$  به ترتیب سرعت و ویسکوزیته سیال جابه جا کننده،  $\delta$  کشش بین سطحی آب و نفت و  $\theta$  زاویه تماس با سطح می‌باشد [۱ و ۲]. این معادله نشان می‌دهد که عدد موئینگی با کاهش کشش بین سطحی و نیز تغییر زاویه تماس ( $\theta$ ) افزایش می‌یابد که در واقع باعث تغییر ترشوندگی سیستم سیالات-سنگ و در نهایت ازدیاد برداشت نفت را منجر خواهد شد. بررسی و مطالعه پارامترهای مؤثر نشان می‌دهد تغییر و اصلاح کشش بین سطحی ساده‌تر از اصلاح سرعت و ویسکوزیته می‌باشد [۱-۴]. وجود برخی سورفکتانت‌ها یا مواد فعال سطحی به مقدار قابل ملاحظه‌ای موجب کاهش کشش بین سطحی آب و نفت می‌شود [۱-۴]. هر چند که ترکیبات بسیاری به عنوان سورفکتانت شیمیایی معرفی شده‌اند، اما امروزه استفاده از بیوسورفکتانت‌ها (سورفکتانت‌های زیستی) که توسط برخی باکتری‌ها تولید می‌شوند به دلیل تجزیه‌پذیری بالای آنها و عدم آلودگی محیط زیست بر سورفکتانت‌های شیمیایی ترجیح داده می‌شوند [۱-۳ و ۵-۸]. باکتری‌ها بیوسورفکتانت‌ها را در مراحل از رشد خود در محیط کشت رها می‌کنند و با جداسازی آنها می‌توان این مواد را به دست آورد و در صورت نیاز خالص نیز نمود [۱-۳ و ۵-۱۱]. سورفکتین به‌عنوان یکی از موثرترین بیوسورفکتانت‌ها شناخته می‌شود. این ماده که توسط سویه‌های مختلف *Bacillus subtilis* تولید می‌شود می‌تواند باعث کاهش کشش سطحی آب از ۷۰ به ۲۵ mN/m شود [۱-۳ و ۷ و ۸]. ساختار سورفکتین یک لیپو پپتید سیکلیک متشکل از ۷ اسید آمینه متصل به گروه‌های کربوکسیل و هیدروکسیل یک اسید چرب ۱۴ کربنی می‌باشد [۱-۳ و ۸]. یک زمینه مهم برای استفاده از این بیو سورفکتانت‌ها، ازدیاد برداشت میکروبی نفت است.

## مواد و روش‌ها

## باکتری

باکتری Bacillus subtilis NLIM 0110 از آزمایشگاه بیوتکنولوژی دانشگاه الزهراء که توسط نصر و همکارانش جدا شده بود تهیه گردید [۱۹].

## ترکیب محیط کشت تولید سورفکتین

رشد باکتری به صورت هوازی در محیط E<sup>۱</sup> انجام شد [۲۰]. برای تهیه محیط کشت، ابتدا محلولی که شامل موارد زیر با غلظت ذکر شده باشد تهیه می‌شود محلول A:

$\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 2.7 g/l,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 13.9 g/l; sucrose, 10 g/l; NaCl, 50 g/l; yeast extract, 0.5 g/l;  $\text{NaNO}_3$ , 1 g/l

و محلول B ( $\text{MgSO}_4$ , 25 g/l)

و محلول C ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 100g/l) به صورت جداگانه به مدت ۲۰ min در دمای  $121^\circ\text{C}$  اتوکلاو می‌شوند و سپس محلول D:

D EDTA, 0.5 g/l;  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , 3 g/l; NaCl, 1 g/l ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 g/l;  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 g/l;  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.1 g/l;  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.01 g/l;  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2$ , 0.01 g/l;  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.01 g/l; boric acid, 0.01 g/l;  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ , 0.005 g/l; ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), 0.003 g/l;

به خاطر حساسیت به حرارت با فیلترهای ۰/۲۲ m استریل می‌شود. در شرایط استریل ۱۰ ml از محلول‌های B، C و D به یک لیتر از محلول A افزوده می‌شود. برای تهیه پیش کشت، ابتدا یک لوپ از باکتری رشد کرده در محیط نوترینت آگار<sup>۲</sup> را به یک ارلن cc ۵۰۰ که حاوی نوترینت برات<sup>۳</sup> به مقدار ۱۰۰ ml می‌باشد و از قبل اتوکلاو شده است منتقل نموده و سپس آن را به مدت ۲۴ ساعت در ۱۵۰ rpm و دمای  $37^\circ\text{C}$  در یک شیکرانکوباتور (Climo-shaker ISF1-X Kuhner) قرار می‌دهیم. پس از این مدت، ۵ ml از کشت باکتری رشد کرده در محیط نوترینت برات به ۱۰۰ ml محیط کشت E که درون ارلن ۵۰۰ ml قرار داشت اضافه گردید و پس از قرار دادن آن درون شیکرانکوباتور در  $37^\circ\text{C}$  و ۲۵۰ rpm، نمونه‌گیری‌ها بعد از ۶۰ ساعت از شروع آزمایش آغاز شد. سنجش کشت سطحی و بین سطحی نمونه‌ها توسط دستگاه تنسیومتر (kruss k10T, Germany) اندازه‌گیری شد.

## استخراج بیوسورفکتانت

محیط کشت به مدت ۱۵ دقیقه در ۱۰۰۰ rpm سانتریفیوژ و مایع رویی با فیلتر ۰/۲۲ μm (واتمن) فیلتر گردید. pH مایع فیلتر شده توسط اسید ۳ M HCL به ۲ رسانده شد تا سورفکتین رسوب کند. مواد رسوبی با فیلتر ۲/۵ μm ساخته شده از استرهای سلولز نیترو سلولز (واتمن) جمع‌آوری شدند تا سورفکتین خام به‌دست آید. برای خالص‌سازی بیشتر، سورفکتین خام در آب دیونیزه حل شد و سپس ۳ بار توسط حجم یکسانی از دی کلرو متان استخراج گردید. بعد از خشک کردن، بیوسورفکتانت تصفیه شده به‌دست آمد [۱۹ و ۲۰].

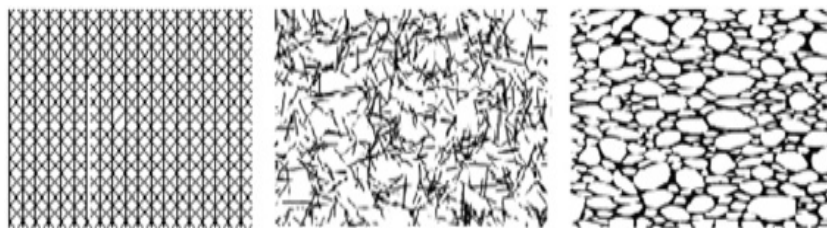
آزمایش کارایی بیوسورفکتانت به روش کنار زنی نفت خام<sup>۴</sup>

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ترکیبات فعال سطحی که در کاربردهای صنعتی مورد توجه قرار می‌گیرد، قابلیت کنارزنی نفت خام از روی آب است. برای بررسی این روش، ۱۰۰ میکرولیتر نفت خام بر روی ۵۰ میلی لیتر آب مقطر که درون یک پتری دیش<sup>۵</sup> به قطر ۱۰ cm قرار دارد پراکنده می‌شود و سپس ۱۰ میکرولیتر از محلول بیوسورفکتانت تولید شده به مرکز آن افزوده می‌شود و قطر ناحیه شفاف ایجاد شده در سطح لکه نفتی در مقایسه با آب مقطر به عنوان کنترل منفی مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۹ و ۲۰].

## آماده‌سازی و آزمایش‌های مشاهده‌ای در میکرومدل

برای انجام آزمایش‌های مشاهده‌ای جریان فازهای آبی و آلی، از میکرومدل‌های شیشه‌ای استفاده می‌شود. این میکرومدل‌ها به عنوان شبیه‌ساز دو بعدی سنگ مخزن نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در شکل ۱ چند نمونه الگوی رایج برای ساخت میکرومدل نشان داده شده است.

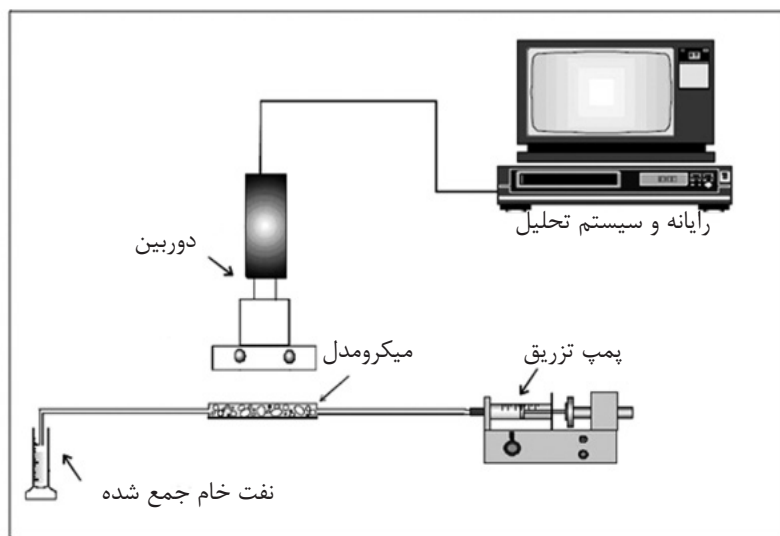
1. E-medium
2. Nutrient agar
3. Nutrient broth medium
4. Oil Spreading
5. Petri dish



شکل ۱- چند نمونه رایج برای طراحی شبکه‌های متخلخل در میکرومدل

این تحقیق شامل خطوط دارای طول بین ۱/۵ تا ۴ mm و عرض ۰/۱ تا ۰/۲ mm می‌باشد. با تاباندن نور، این الگو بر روی فیلم خشک مقاوم در برابر نور یا لمینیت، که روی یک قطعه آینه کاملاً چسبانده شده است، ظاهر می‌شود. با استفاده از محلول قلیایی مناسب قسمت‌های سیاه رنگ حل شده و آماده حکاکی با اسید فلوریدریک می‌شود [۱۳] و [۱۴]. ورودی و خروجی میکرومدل با مته سوراخ می‌شود. شیشه صاف دیگری روی صفحه حکاکی شده قرار می‌گیرد و در کوره در دمای بالا فیوز می‌شود. پس از خنک شدن سر سرنگ‌ها برای ورودی و خروجی نصب می‌شود. پارامترهای فیزیکی مدل استفاده شده در این تحقیق مانند تخلخل و تراوایی به ترتیب ۴۱/۵ % و ۱۰۱ داری می‌باشد. تمامی آزمایش‌های سیلاب‌زنی میکرومدل در فشار اتمسفری انجام می‌گیرد. از پمپ مخصوص تزریق سرنگ مدل SP-500, JMS برای تزریق سیالات در مدل استفاده شده است. شکل ۲، کل سیستم تزریق و تحلیل را نشان می‌دهد. یک دوربین فیلم‌برداری یا عکاسی با وضوح خیلی بالا در زمان‌های مورد نظر از مدل عکس‌برداری یا فیلم‌برداری می‌کند. عکس‌ها و فیلم‌ها تحلیل شده و نتایج استخراج می‌شوند. آزمایش‌های مشاهده‌ای شامل اثر بیوسورفکتانت بر روی ازدیاد برداشت نفت می‌باشد که در دو حالت الف) سیلاب‌زنی با آب و سپس با محلول بیوسورفکتانت و ب) سیلاب‌زنی با محلول بیوسورفکتانت به تنهایی می‌باشد. بازیافت نهایی سیلاب‌زنی با آب و بازیافت نهایی سیلاب‌زنی با محلول‌های بیوسورفکتانت در این آزمایش‌ها بررسی، اندازه‌گیری و تحلیل می‌شوند.

از نظر ترشوندگی میکرومدل‌های شیشه‌ای معمولاً بسیار آب-ترا تلقی می‌شوند زیرا خصوصیات شیمی سطح شیشه شبیه به ماسه سنگ می‌باشد. همچنین چون سورفکتانت یک بیوسورفکتانت غیر یونی است شیشه‌ها قادر به جذب میزان کمی از آن روی سطح خود است [۲۱]. به همین دلیل در تحقیق حاضر از تغییرات زاویه تماس با سطح صرف‌نظر می‌گردد یا به عبارت دیگر فرض شده است این سورفکتانت تاثیری روی ترشوندگی سطح ندارد. یک میکرومدل رایج با توجه به هدف این تحقیق مبنی بر مشاهده جریان سیال در محیط متخلخل و با توجه به اینکه معمولاً در سنگ مخزن حفرات به صورت نامنظم پخش شده‌اند طراحی و ساخته شد [۱۳ و ۱۴]. نمونه‌ای که در این آزمایش ساخته شد براساس طرح مقطع نازک تهیه شده است که از سنگ مخزن ماسه سنگی استخراج شده است. با استفاده از نرم‌افزار Corel Draw، یکی از الگوهای رایج که شامل مجموعه‌ای از خطوط که به طور کاملاً تصادفی در صفحه پخش شده‌اند، طراحی شد. الگوی استفاده شده در این تحقیق به گونه‌ای طراحی شده است که بتوان در آن به خوبی تفاوت عملکرد محلول‌های بیوسورفکتانت با آب را مشاهده کرد. این نرم‌افزار ساخت مدل‌ها را بر اساس یک معادله ریاضی خاص با خطوط دارای زوایا وضخامت‌های متفاوت، با شکل‌ها و الگوهای مختلف، ممکن می‌سازد [۱۳ و ۱۴]. از آنجایی که لمینیت مورد استفاده از نوع نکاتیو می‌باشد، نمونه تهیه شده باید به گونه‌ای باشد که منطقه‌ای که خورده می‌شود به رنگ مشکی و سایر مناطق بی‌رنگ باشند. شبکه ماتریکس استفاده شده در



شکل ۲- سیستم تزریق در میکرومدل، همراه با سیستم تحلیل

تراوایی بالا برای انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه انتخاب شد. این سنگ نیز از آزمایشگاه نفت دانشگاه تهران تهیه گردید. این انتخاب بدین جهت صورت گرفت که سنگ‌های ماسه‌ای اکثراً از نظر تر شوندگی شبیه به میکرومدل‌های شیشه‌ای و آب-تر می‌باشند و از طرفی این مغزه نیز مانند میکرومدل تراوایی بالایی دارد. مشخصات مغزه مورد استفاده شامل تخلخل، حجم حفرات و تراوایی به ترتیب ۱۷/۳۷٪، ۱۴/۴۵ ml و ۶۵ mD می‌باشد. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی عملکرد بیوسورفکتانت ساخته شده در ابعاد مغزه که مقیاس واقعی تری نسبت به میکرومدل شیشه‌ای است، می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی، مغزه شسته و خشک شده ابتدا کاملاً تحت خلا قرار گرفت و سپس با آب اشباع گردید. در مرحله بعد، تخلیه با نفت خام (API=۱۹) تا رسیدن به اشباع آب کاهش ناپذیر ادامه یافت. سپس آزمایش سیلاب‌زنی با آب یا محلول بیوسورفکتانت تا بازیافت نهایی نفت انجام شد. در این قسمت، ابتدا سیلاب‌زنی مغزه اشباع از نفت خام با آب نمک ۱٪ و سپس سیلاب‌زنی با بیوسورفکتانت با دبی ۱۰ ml/h انجام شد.

در این آزمایش‌ها، غلظت محلول بیوسورفکتانت و دبی به ترتیب برابر با ۵۰ mg/l و ۰/۴ ml/h انتخاب شد. برای به دست آوردن بازیافت در هر مرحله از تزریق، از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$\text{Recovery} = \frac{1 - S_{wc} - S_{or}}{1 - S_{wc}} \quad (2)$$

که در این رابطه  $S_{wc}$  و  $S_{or}$  به ترتیب: اشباع آب کاهش نیافتنی یا همزاد و اشباع نفت باقی‌مانده می‌باشند. نیروی موینگی تابع کشش سطحی میان دو فاز می‌باشد و هدف از این تحقیق بررسی ازدیاد برداشت نفت با مکانیسم کاهش کشش بین سطحی توسط بیوسورفکتانت‌ها است و از دبی کم (۰/۴ ml/h) در آزمایش‌ها استفاده می‌شود.

### آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه<sup>۱</sup>

تزریق آب و بیوسورفکتانت به درون مغزه در انسیتیتو نفت دانشگاه تهران با استفاده از دستگاه تزریق (DB Robinson) طبق دستور کار آن انجام شد. مغزه ماسه سنگی با ابعاد مشخص استوانه‌ای شکل در این دستگاه تحت عملیات سیلاب‌زنی قرار می‌گیرد. سیالات خروجی از مغزه پس از جداسازی در استوانه‌های مدرج جمع‌آوری می‌شوند. میزان سیالات تولیدی اندازه‌گیری راندمان تزریق را امکان‌پذیر می‌نماید. یک مغزه ماسه سنگی با

## بحث و نتایج

## بررسی تولید بیوسورفکتان و خواص سطحی آن

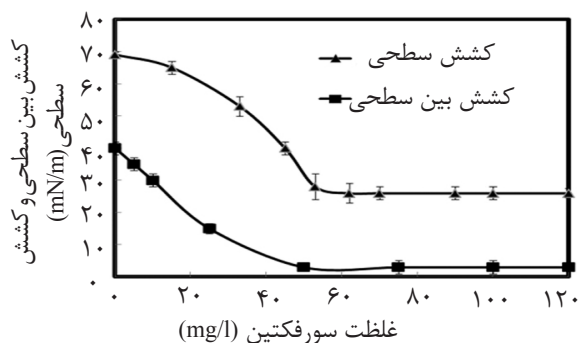
نتایج تولید بیوسورفکتانت نشان داد مقدار نهایی غلظت سورفکتین بعد از ۶۰ ساعت از شروع کشت میکروبی به  $1/8 \text{ g/l}$  رسید. از آنجایی که مقادیر کشش سطحی و بین سطحی نقش موثری در فرایند ازدیاد برداشت نفت دارد بنابراین این مقادیر بر حسب غلظت سورفکتین اندازه گیری شد که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ روند کاهش کشش سطحی و بین سطحی سورفکتین تولید شده بر حسب غلظت را نشان می‌دهد. بررسی نتایج کشش سطحی نشان داد برای بیوسورفکتانت به دست آمده در این تحقیق، مقدار حداقل غلظت بیوسورفکتانت که بعد از آن دیگر کشش سطحی و بین سطحی تغییر نمی‌کند، برابر  $50 \text{ mg/l}$  می‌باشد یا به عبارت دیگر کشش سطحی آب از  $69 \text{ mN/m}$  به  $26 \text{ mN/m}$  و بین سطحی از  $38$  به  $2 \text{ mN/m}$  در غلظت CMC<sup>۱</sup> می‌رسد. از آنجایی که دو مقدار کشش سطحی و بین سطحی هر دو در مقدار  $50 \text{ mg/l}$  به کمترین مقدار خود رسیده‌اند نشان‌دهنده صحیح بودن نتایج آزمایش‌های این قسمت می‌باشد.

سویه‌های<sup>۲</sup> مولد سورفکتین که توسط محققین دیگر جداسازی شده‌اند توانسته بودند کشش سطحی محیط رشد را از  $69$  تا  $25-30 \text{ mN/m}$  کاهش دهند [۲، ۷، ۸]. بنابراین نتایج به دست آمده از این تحقیق قابل مقایسه با نتایج تحقیقات محققین قبلی می‌باشد. این ویژگی‌ها تایید

می‌کند سورفکتین تولید شده توسط باکتری *Bacillus subtilis* NLIM 0110 دارای پتانسیل خوبی برای کاربرد در ازدیاد برداشت نفت به خصوص در ازدیاد برداشت میکروبی است. بنابراین این مواد با کاهش نیروهای جاذبه بین نفت و سنگ بستر، می‌توانند باعث کاهش نیروی موینگی (که مانعی برای خروج نفت از خلال منافذ سنگ بستر است) و در نهایت ازدیاد برداشت نفت شوند.

## بررسی کارایی بیوسورفکتانت تولید شده برای کنارزنی نفت خام از روی آب

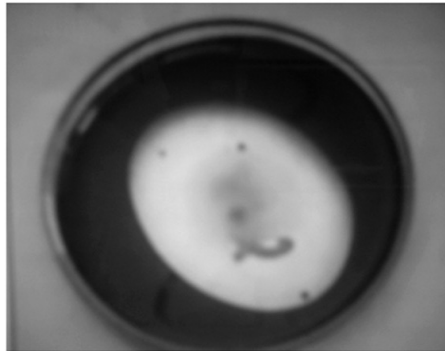
در روش Oil Spreading همان‌طور گفته شد  $100 \mu\text{l}$  نفت خام بر روی  $50 \text{ ml}$  آب مقطر پراکنده می‌شود و سپس  $10 \mu\text{l}$  از محلول سورفکتین تولید شده در غلظت CMC به آن افزوده می‌شود و قطر ناحیه شفاف ایجاد شده در سطح لکه نفتی در مقایسه با آب مقطر به عنوان کنترل منفی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است پس از اضافه شدن بیوسورفکتانت تولید شده در این تحقیق نفت خام بلافاصله شروع به کنار رفتن از روی آب می‌کند و ناحیه شفافی ظاهر می‌شود. بنابراین میتوان گفت سورفکتین تولید شده دارای توانایی خوبی برای کنار زدن نفت خام از روی آب می‌باشد و می‌تواند در کاربردهای صنعتی به کار گرفته شود. علت این پدیده را می‌توان به خواص بیوسورفکتانت‌ها ربط داد. این خاصیت ناشی از تمایل بیوسورفکتانت‌ها به قرار گرفتن بین دو فاز آب و نفت است.



شکل ۳- نمودار تغییرات کشش بین سطحی بر حسب غلظت بیوسورفکتانت تولید شده

1. Critical Micelle Concentration

2. Strain



شکل ۴- ایجاد لایه نفتی بر روی سطح آب و تشکیل ناحیه شفاف در سطح لایه نفتی پس از افزودن سورفکتین تولید شده با غلظت ۵۰ mg/l

با محلول بیوسورفکتانت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، عملکرد بهتر محلول سورفکتین نسبت به آب قابل رویت است. وجود سورفکتین و در نتیجه کاهش کشش بین سطحی می‌تواند دلیل ۱۰/۱٪ ازدیاد بازیافت نفت باشد.

یک بار دیگر آزمایش را وقتی محلول بیو سورفکتانت به تنهایی از همان ابتدا استفاده شود (مرحله تزریق آب حذف شد)، انجام گردید که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. در این آزمایش ۱۳/۳٪ ازدیاد برداشت نفت به دست آمد.

با مقایسه نتایج در جدول‌های ۱ و ۲ متوجه می‌شویم که ازدیاد برداشت نفت در حالتی که وقتی محلول بیو سورفکتانت به تنهایی از همان ابتدا استفاده شود بیشتر از حالت اول است. دلیل قابل ذکر در این مورد می‌تواند رقیق شدن محلول بیوسورفکتانت مورد استفاده در حالت اول با آب باقی‌مانده ناشی از تزریق آب که در میکرومدل وجود دارد و تاثیر آن در کم شدن کشش بین سطحی باشد.

#### نتایج آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه

در آزمایش‌های مربوط به سیلاب‌زنی مغزه، پس از مرحله تخلیه اشباع آب همزاد ۲۸٪ و در نتیجه اشباع نفت اولیه ۷۲٪ به دست آمد. بعد از مرحله اشباع‌سازی با نفت خام، مغزه با دبی ۱۰ ml/h، تا بازیافت نهایی، با آب سیلاب‌زنی شد.

بیوسورفکتانت‌ها به علت اینکه دارای یک سر قطبی و سر دیگر غیر قطبی هستند مانند پلی بین دو فاز عمل می‌کنند.

#### تاثیر بیوسورفکتانت بر ازدیاد برداشت نفت در آزمایش‌های مشاهده‌ای میکرومدل

در این قسمت ابتدا میکرومدل اشباع از نفت خام با آب سیلاب‌زنی شده تا جایی که که هیچ نفت خامی دیگر از میکرومدل بیرون نیامد و سپس سیلاب‌زنی با محلول بیوسورفکتانت با غلظت ۵۰ mg/l صورت پذیرفت. در این آزمایش چون هدف اصلی بررسی نیروهای موئینه است، آزمایش در یک دبی پایین انجام شد. جدول ۱، میزان بازیافت نهایی با آب و بازیافت نهایی پس از تزریق محلول سورفکتین را در دبی ثابت ۰/۴ ml/h نشان می‌دهد.

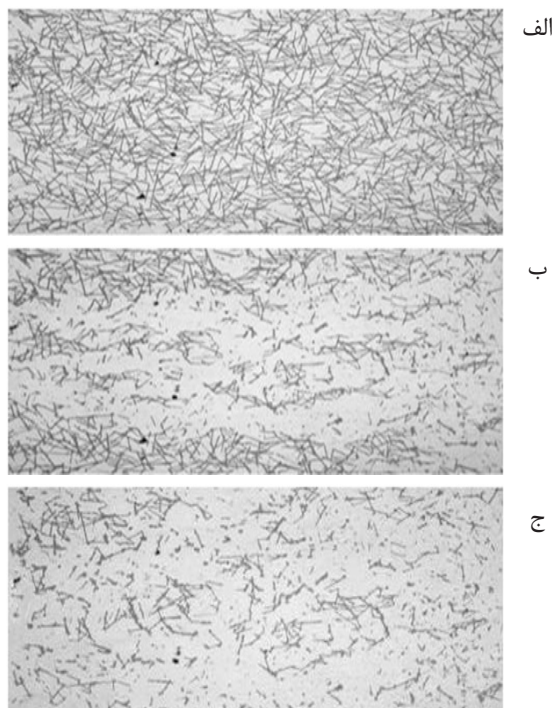
جدول ۱- بازیافت نهایی با آب و بازیافت نهایی پس از تزریق محلول بیو سورفکتانت

بازیافت نهایی پس از تزریق آب (٪)	بازیافت نهایی پس از تزریق محلول بیوسورفکتانت (٪)	ازدیاد برداشت نفت (٪)
۵۱/۸	۶۱/۹	۱۰/۱

برای درک بهتر، عکس‌های مربوط به میکرومدل زمانی که سیلاب‌زنی با دبی ۰/۴ ml/h و غلظت ۵۰ mg/l انجام شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ میکرومدل را برای سه حالت وقتی (الف) کاملاً اشباع از نفت است، (ب) مرحله نهایی سیلاب‌زنی با آب و (ج) مرحله نهایی سیلاب‌زنی

جدول ۲- بازیافت نهایی با آب و بازیافت نهایی پس از تزریق محلول بیوسورفکتانت به تنهایی

ازدیاد برداشت (%)	بازیافت نهایی محلول بیوسورفکتانت به تنهایی (%)	بازیافت نهایی پس از تزریق آب (به دست آمده از آزمایش قبلی) (%)
۱۳/۳	۶۵/۱	۵۱/۸

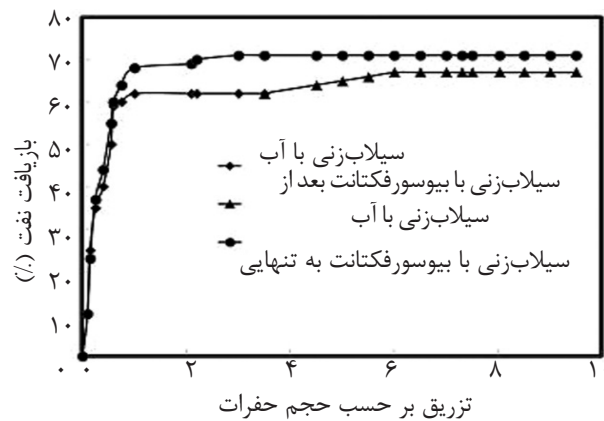


شکل ۵- (الف): میکرومدل کاملاً اشباع از نفت، (ب) میکرومدل بعد از سیلابزنی با آب و (ج) میکرومدل بعد از سیلابزنی با محلول سورفکتین، دبی ۰/۴ ml/h و غلظت ۵۰ mg/l

ازدیاد برداشت نفت به دست آمد. شکل ۶، بازیافت بر حسب حجم حفرات تزریقی برای (الف) سیلابزنی مغزه با آب و سپس سیلابزنی با محلول سورفکتین و همچنین (ب) سیلابزنی مغزه با محلول سورفکتین را نشان می‌دهد. از این آزمایش‌ها می‌توان نتیجه گرفت استفاده از محلول سورفکتین، باعث افزایش بازیافت نفت شده است. به عبارت دیگر باکتری بومی ایرانی استفاده شده در این تحقیق و ماده تولیدی آن را می‌توان برای کاربردهای صنعتی پیشنهاد داد. با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه، به نظر می‌رسد باید بستری برای استفاده از یکی از کاربردهای بیوتکنولوژی یعنی استفاده از میکرو ارگانیسم‌ها و بیوسورفکتانت‌ها در ازدیاد برداشت نفت از مخازن ایجاد شود.

در این آزمایش بازیافت نهایی سیلابزنی با آب، ۶۲/۵٪ آمد. با سیلابزنی با محلول سورفکتین در غلظت CMC، بعد از بازیافت نهایی با آب، ۰/۵ ml دیگر در نهایت نفت خام تولید شد. بنابراین بازیافت نهایی سیلابزنی با محلول سورفکتین، پس از سیلابزنی با آب، ۶۷/۳٪ خواهد بود. در این آزمایش ۴/۸٪ ازدیاد برداشت به دست آمد. آزمایش بعدی همانند آزمایش قبل است، فقط این بار سیلابزنی با آب حذف گردید یا به عبارت دیگر از همان ابتدا سیلابزنی با محلول سورفکتین تا بازیافت نهایی انجام می‌شود. بعد از مرحله اشباع‌سازی مغزه با نفت خام، مغزه با دبی ۱۰ ml/h، تا بازیافت نهایی، با محلول سورفکتین سیلابزنی شد. در این آزمایش نهایتاً ۷/۳ ml نفت خام تولید شد در نتیجه بازیافت نهایی سیلابزنی با محلول سورفکتین، ۷۰/۲٪ به دست آمد. در این آزمایش، در نهایت ۷/۷٪





شکل ۶- بازیافت بر حسب حجم حفرات تزریقی برای دو حالت الف) سیلاب‌زنی مغزه با آب و سپس سیلاب‌زنی با محلول سورفکتین و ب) سیلاب‌زنی مغزه تنها با سورفکتین از همان ابتدا، دبی تزریق آب و سورفکتین برابر با ۱۰ ml/h و غلظت ۵۰ mg/l برای سورفکتین

است. در آزمایش‌های مشاهده‌ای در میکرومدل و مغزه، اثر بیوسورفکتانت تولیدی روی ازدیاد برداشت نفت مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجایی‌که میکرومدل‌ها فقط برای مشاهده نحوه عملکرد بیوسورفکتانت‌ها می‌باشند، برای اطمینان بیشتر از عملکرد بیوسورفکتانت تولید شده، آزمایش‌هایی نیز در مغزه انجام شد. نتایج سیلاب‌زنی با محلول بیوسورفکتانت در میکرومدل و مغزه نشان داد وقتی که سیلاب‌زنی محلول بیوسورفکتانت پس از سیلاب‌زنی با آب باشد در حدود ۱/۱۰٪ و ۴/۸٪ ازدیاد برداشت نفت به ترتیب برای آنها به دست می‌آیند. با توجه به نتایج مثبت به دست آمده از این تحقیق، میتوان باکتری بومی ایرانی *Bacillus subtilis* NLIM 0110 و ماده تولیدی آن را برای کاربردهای صنعتی از جمله ازدیاد برداشت نفتی پیشنهاد داد. اگر با به کار بردن این روش بتوان ۱٪ هم نفت بیشتری برداشت نمود با توجه به مسائل اقتصادی، اهمیت این پژوهش‌ها بیشتر مشخص می‌گردد. بنابراین با توجه به پتانسیل بالای باکتری استفاده شده و ماده تولیدی آن می‌توان امیدوار بود که انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه بتواند نقش مهمی در صنعت نفت ایفا نماید.

اگر با به کار بردن این روش بتوان ۱٪ هم نفت بیشتری برداشت نمود با توجه به مسائل اقتصادی، اهمیت این پژوهش‌ها بیشتر مشخص می‌گردد. لازم به ذکر است در کاربردهای مربوط به ازدیاد برداشت نفت نیازی به خالص‌سازی بیوسورفکتانت نمی‌باشد یا به عبارت دیگر می‌توان بیوسورفکتانت ناخالص (محیط کشتی که زیست توده ی آن بعد از سانتریفوژ شدن جدا شده است) را مستقیماً به مخزن تزریق کرد که این موضوع از لحاظ اقتصادی نیز کمک زیادی به صنعت می‌کند. بنابراین، این کاربرد بیوتکنولوژی، با توجه به گستردگی صنعت نفت در کشور ما بایستی مورد توجه خاص قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که بیوسورفکتانت تولید شده از باکتری *Bacillus subtilis* NLIM 0110 که از خاک‌های سطحی یک منطقه فعال کشاورزی به دست آمده بود دارای پتانسیل خوبی در کاهش کشش سطحی و بین سطحی می‌باشد. بیوسورفکتانت تولید شده توسط باکتری مورد بررسی در این تحقیق توانست کشش سطحی آب را از ۶۹ به حدود ۲۶ mN/m برساند. همچنین نتایج آزمایش‌های کنار زدن نفت خام از روی آب نشان داد که سورفکتین به دست آمده از باکتری بومی ایرانی از کارایی نسبتاً خوبی برخوردار

## تشکر و قدردانی

این پروژه، تشکر و قدردانی می‌نماید. همچنین از دانشگاه الزهرا به خاطر در اختیار گذاشتن باکتری مذکور تشکر می‌گردد.

نویسنده این مقاله از شرکت مهندسی و توسعه نفت به خاطر تامین هزینه‌ها و حمایت‌های مادی

## مراجع

- [1]. Sen R., "Biotechnology in petroleum recovery," The microbial EOR, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, pp.714-724, 2008.
- [۲]. امانی ح., بررسی فرایند ازدیاد برداشت میکروبی نفت با بیوسورفکتانت‌ها، پایان‌نامه دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تیر ۱۳۸۹.
- [3]. Amani H., Mehrnia M. R., Haghghi M., Sarrafzadeh M. H., Soudi M. R., "Scale up and application of biosurfactant from bacillus subtilis in enhanced oil recovery", Applied Biochemistry and Biotechnology, Vol. 162, pp. 510-523, 2010a.
- [۴]. بهین ر., اصفهانی م. ر., مطالعه و بررسی اثرات متقابل اجزای مختلف سیستم (نفت-آب-سنگ) در فرایند تزریق آب در سنگ مخزن بنگستان و آسماری، پژوهش نفت، سال بیست و یکم شماره ۶۸، صفحات ۱۰۹-۹۸، ۱۳۹۰.
- [۵]. میبدی س. ر., جزه م. ق., سپه‌ی ع. ا., فرقانی ف., کوچکی م. ر., جداسازی باکتری‌های مولد بیوسورفکتانت از نمونه خاک‌های آلوده به نفت جزیره سیری، پژوهش نفت، سال بیست و دوم شماره ۷۲، صفحات ۱۱۹-۱۱۰، ۱۳۹۱.
- [6]. Cheng F., Tang C., Yang H., Yu H., Chen Y., and Shen Z., "Characterization of a blend biosurfactant of glycolipid and lipopeptide produced by Bacillus subtilis TU2 isolated from underground oil extraction wastewater", J. Microbiol. Biotechnol., Vol. 23, No.3, pp.390-396, 2013.
- [7]. Davis D. A., Lyncha H. C., and Varley J., "The application of foaming recovery of Surfactin from B. subtilis ATCC 21332 cultures", Enzyme Microbiol. Technol., Vol. 28, pp. 346-354, 2001.
- [8]. Chen C. Y., Baker S. C., and Darton R. C., "Batch production of biosurfactant with foam fractionation", Chem. Technol. Biotechnol., Vol. 81, pp. 1923-1931, 2006.
- [9]. Rashedi H. R., Mazaheri Assadi M., Jamshidi E. and Bonakdarpour B., "Optimization of the Production of Biosurfactant by Pseudomonas aeruginosa HR Isolated from an Iranian Southern Oil well", I. Journal of Chem. Eng., Vol. 25, No.1, pp. 25-29, 2006.
- [۱۰]. رضانی ر., مظاهری اسدی م., آذین م., تولید رامنولیپید توسط باکتری سودوموناس آئروجینوزا از ملاس چغندر قند تیمار شده، نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، جلد نهم، شماره ۳، صفحات ۵۲۴-۵۱۱، ۱۳۹۰.
- [۱۱]. ربیعی ف., مظاهری اسدی م., آذین م., تولید رامنولیپید با سودوموناس آئروجینوزا در محیط کشت حاوی آب پنیر تیمار شده، نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، جلد هشتم، شماره ۴، صفحات ۳۱۸-۳۰۳، ۱۳۸۷.
- [12]. Sayegh S. G. and Fisher D. B., "Enhanced Oil Recovery by CO<sub>2</sub> Flooding in Homogeneous and Heterogeneous 2D Micromodels", Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 48, pp. 30-36, 2009.
- [۱۳]. حشمتی م., آزمایشات مشاهده‌ای سیلاب‌زنی با پلیمر در سیستم‌های ناهمگن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵.
- [14]. Soudmand-asali A., Ayatollahi S., Mohabatkar H., Zareie M., and Shariatpanahi F., "The in situ microbial enhanced oil recovery in fractured porous media", J. Petrol. Sci. Eng., Vol. 58, pp.161-172, 2007.

- [15]. Mattax C. C., Kyte J. R., Imbibition Oil Recovery from Fractured Water Drive Reservoirs, Soc. Pet. Eng. J., Vol. 2, pp.177-184, 1962.
- [16]. Davis J.A., Jones S.C., Displacement mechanisms of residual solutions, Journal of Petroleum Technology, Vol. 20, pp.1415-1428, 1968.
- [17]. Wardlaw N. C., McKellar M., Oil blob population and mobilization of trapped oil in unconsolidated packs, Can. J. Chem. Eng., Vol.63, pp.525-532, 1985.
- [18]. Wan J., Tokunaga T.K., Tsang C., Bodvarsson G.S., Improved glass micromodel methods for studies of low and transport in fractured porous media, Water Resour. Res. Vol. 32, No.7, pp.,1955- 64, 1996.
- [19]. Nasr S., Soudi M. R., Mehrnia M.R., Sarrafzadeh M.H., Characterization of novel biosurfactant producing strains of Bacillus spp. isolated from petroleum contaminated soil, Iranian Journal of Microbiology, Vol. 1, No. 2, pp.54-61, 2009.
- [20]. Youssef N.H., Duncan K.E., Nagle D.P., Savage K.N., Knapp R.M., McLnerney M.J., Comparison of methods to detect biosurfactant production by diverse microorganisms, J.of Microbiol. Meth., Vol.56, pp.339-347, 2004.
- [21]. Isa M.H.M., Frazier R.A, Jauregi P., Cleaning Potential of Surfactin on Fouled Ultrafiltration (UF) Membranes, Sains Malaysiana, Vol.41, No.9, pp.1117-1124, 2012.