



## بررسی اثر تغییر ترشوندگی بر ازدیاد برداشت به روش میکروبی در میکرومدل شیشه‌ای

حمیده خواجه پور، مازیار محمودی، داوود بی‌ریا، شهاب‌الدین آیت‌اللهی

مرکز ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، دانشگاه شیراز، شیراز

*Hamideh.khajepour@gmail.com*

### چکیده

ترشوندگی دیواره‌ی مسیرهای مخزن، یکی از مهمترین عوامل کنترل‌کننده‌ی توزیع سیالات مخزن به شمار می‌رود. استفاده از میکروارگانیزم‌ها در ازدیاد برداشت نفت به عنوان یک روش اقتصادی و دوستدار محیط زیست، بازدهی فرآیند ازدیاد برداشت نفت را از طریق کاهش کشش بین سطحی یا تغییر ترشوندگی بهبود می‌بخشد. تحقیق حاضر با به کارگیری یک گونه انتروباکتر جدا شده از مخازن نفتی جنوب ایران با قابلیت تحمل دما و شوری بالا و تولید بیوسورفکتانت، به مطالعه تغییر ترشوندگی در میکرومدل‌های شیشه‌ای به عنوان نماینده‌ی ای از سنگ مخزن ماسه سنگی و یافتن مکانیزم غالب مؤثر در تغییر ترشوندگی توسط این گونه باکتری پرداخته است. نتایج حاصل از تصاویر میکروسکوپی و همچنین میزان برداشت نفت، تغییر ترشوندگی مدل‌های نفت دوست را به سمت آب دوستی نشان دادند. این نتایج، ازدیاد برداشت را توسط محلول باکتریایی تا  $35/3\%$  و در آزمایش تزریق بیوسورفکتانت تا  $5/1\%$  نشان دادند. با توجه به بیشتر بودن میزان ازدیاد برداشت نفت بر اثر تغییر ترشوندگی در حضور سلول‌های باکتری، چسبیدن باکتری و تشکیل بیوفیلم به عنوان مکانیزم غالب تغییر ترشوندگی سطح شیشه‌ی نفت‌دوست عنوان شد.

واژه‌های کلیدی: ازدیاد برداشت نفت میکروبی، ترشوندگی، میکرومدل، بیوسورفکتانت.



## 1 - مقدمه

نفت خام در سرتاسر جهان درون شبکه پیچیده‌ای از مسیرهای مویینه در مخازن هیدروکربنی وجود دارد. تکنیک های قدیمی بازیابی نفت خام دارای پایه مشترک شیمیایی (CEOR) می باشند. طی مراحل اولیه و ثانویه برداشت نفت، نهایتاً حدود 40 تا 45 درصد از نفت درجا بازیافت می‌شود. در نتیجه تقریباً دو سوم نفت درون مخازن باقی می ماند. نفت در مرحله اولیه برداشت از مخازن با استفاده از فشار طبیعی گاز تولید می شود [1-4]. مرحله ثانویه شامل بهبود شرایط مخزن با تزریق سیالات مختلف می - باشد که سبب حرکت نفت و گاز مخزن به سمت چاه تولیدی می گردد. تکنیک های زیادی طی مرحله دوم یا پس از آن جهت افزایش نیروهای طبیعی مؤثر در تولید نفت به کار می رود. در میان این روش ها، روش میکروبی یکی از روش های نوین پیشنهاد شده می باشد. این روش که از جنبه های نوین کاربرد علوم بیوتکنولوژی در صنعت نفت می باشد، یک روش کم هزینه و سازگار با محیط زیست است، به آسانی در میدان انجام می گیرد و به تصحیح تجهیزات تزریق آب موجود نیازی ندارد [1]. به طور کلی مکانیسم های MEOR شامل کشش بین سطحی<sup>1</sup>، بستن انتخابی مسیرها، تولید گاز، شکستن مولکول های<sup>2</sup> بزرگ نفتی و تغییر ترشوندگی می باشد [5].

اولین پیشنهاد برای استفاده از دیاد برداشت میکروبی نفت در سال 1926، زمانی که بکمن عمل باکتری بر روغن معدنی را گزارش داد مطرح گردید [6]. البته تا زمانی که زوبل در سال 1940 یک سری بررسی های آزمایشگاهی اصولی را آغاز کرد، کارهای کمی انجام گرفت [7]. پس از آن درک و توسعه روش های MEOR بیشتر به دلیل پتانسیل بالای تولید نفت با هزینه پایین مورد توجه قرار گرفت [8].

بررسی های دیداری سیالات با استفاده از میکرومدل های شیشه ای یک راه متداول برای درک رفتار میکروسکوپی فرآیندهای ازدیاد برداشت ثالثیه می باشد. میکرومدل های شیشه ای در سال های اخیر به منظور ازدیاد برداشت نفت و مطالعه جریان های چند فازی در مخزن مورد بحث قرار گرفته اند [9]. برای دستیابی به یک درک عمیق تر از مکانیسم های ازدیاد برداشت نفت میکروبی و پیچیدگی های آن، لازم است که شرایط فیزیکی محیط متخلخل همراه با جنبه های بیوتکنولوژی در نظر گرفته شود. اگرچه امکان امتحان کردن تمامی فرآیندهای ازدیاد برداشت میکروبی در مقیاس میکرو که در مخزن واقعی اتفاق می افتد وجود ندارد، ولی با استفاده از آزمایش های میکرومدل یک تقریب بسیار نزدیک از این پدیده ها قابل دستیابی می باشد.

<sup>1</sup> - Interfacial Tension (IFT)

<sup>2</sup> - Biodegradation



## 2- روش تحقیق

پیش از آغاز هر گونه مراحل سیلاب زنی، میکرومدل، آب شور رنگی، نفت خام، محلول های باکتریایی و تمامی رابط های مورد استفاده در سیلاب زنی استریل شدند تا عوامل محیطی نتایج آزمایش را تحت تأثیر قرار ندهند.

مبنای انجام آزمایش ها بر این اساس بود که تغییر در ترشوندگی سطح پدیده ای است که نیاز به زمان دارد. هنگامی که سطح مرزی آب و نفت در معرض تزریق بیوسورفکتانت و سلول های باکتری قرار می گیرد، بیوسورفکتانت بر لایه مرزی عمل می کند و کشش سطحی را کاهش می دهد. اما هنگامی که محیط میکروبی به درون محیط متخلخل تزریق می شود، عملیات پیچیده تری مانند تشکیل بیوفیلم لازم است تا تغییر ترشوندگی قابل ملاحظه ای حاصل گردد [10]. علاوه بر مکانیسم چسبیدن باکتری به سطح، دو مکانیسم دیگر نیز می توانند در تغییر ترشوندگی مؤثر باشند که عبارتند از:

- جذب سطحی بیوسورفکتانت به سطح حفره ها
- پوشش سطح با اگزوپلی ساکاریدها یا سایر بیوپلیمرها (به جای مانده از بیوفیلم تشکیل شده)

بنابراین می توان گفت به طور کلی تغییرات ترشوندگی در اثر دو پدیده تشکیل بیوفیلم و جذب سطحی بیوسورفکتانت یا دیگر محصولات تولیدی توسط باکتری اتفاق می افتد که هر دو نیازمند مدت زمان بیشتر از طول سیلاب زنی می باشند. مدت زمان سیلاب زنی محلول های میکروبی برای بررسی میزان کاهش کشش بین سطحی مناسب می باشند. زیرا چنانچه گفته شد عمل کردن بیوسورفکتانت بر لایه مرزی آب و نفت نیاز به زمان طولانی ندارد.

روش کار به این صورت است که در مرحله نخست میکرومدل با آب شور رنگی اشباع شده، سپس نفت خام به میکرومدل تزریق شد تا اشباعیت آب به میزان باقیمانده برسد. این مقدار با استفاده از آنالیز تصویر محاسبه و ثبت گردید. سپس آب شور با شدت  $3 \mu\text{l}/\text{min}$  به مدل تزریق شد تا محیط متخلخل به اشباعیت نفت باقیمانده برسد. پس از ثبت این مقدار اشباعیت، محیط میکروبی یا سوپرناتانت (محلول حاوی بیوسورفکتانت و فاقد سلول باکتری) با شدت جریان  $3 \mu\text{l}/\text{min}$  به سیستم تزریق شده و اشباعیت جدید محاسبه شد. همان طور که گفته شد، این میزان برداشت نفت (که میزان برداشت اولیه نامگذاری می شود) ناشی از کاهش کشش بین سطحی نفت و محیط آبی در اثر حضور محلول باکتریایی یا محصولات آن می باشد. سپس ورودی و خروجی سیستم بسته شد و میکرومدل به مدت 7 روز در انکوباتور با دمای  $37^\circ\text{C}$  نگه داشته شد. در طول این 7 روز به باکتری یا بیوسورفکتانت زمان کافی داده شده تا تأثیرات خود را بر دیواره مسیره ها گذاشته و ترشوندگی دیواره را تا حد امکان تغییر دهند. پس از پایان زمان ماند، میکرومدل دوباره با آب شور سیلاب زنی شد و میزان برداشت ثانویه در این مرحله محاسبه گردید. مکانیسم مؤثر در بازیافت نفت در این مرحله تغییر ترشوندگی سیستم در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است در هر مرحله سیلاب زنی تا جایی انجام شد که اشباعیت سیستم به حالت پایا برسد.



## 2-1- میکرومدل های شیشه‌ای

برای ساخت میکرومدل های شیشه ای به ابعاد  $10 \times 14$ ، از شیشه‌های فلوت<sup>۱</sup> استفاده شد. این نوع شیشه هاضخامت یکنواخت تر و سطح صاف تری نسبت به شیشه‌های معمولی دارند. ابتدا سطح یک شیشه با لمینت نازک ضد اسید و مقاوم در برابر حرارت پوشانده شده و الگوی مسیره‌های جریان با نرم افزار گرافیکی CorelDraw طراحی گردید و سپس با استفاده از دستگاه لیزر Speedy 100 روی لمینت پیاده سازی شد. در مرحله اسیدخوری<sup>۲</sup>، صفحه به مدت 40 دقیقه در محلول اسید هیدروفلوئوریک قرار داده شد تا عمق دلخواه مسیره‌ها (به طور متوسط  $33 \mu\text{m}$ ) به دست آید. پس از جدا کردن پوشش از سطح شیشه صفحه مسیردار بر روی یک صفحه شیشه‌ای صاف قرار داده شده و درون کوره گذاشته شد تا صفحات شیشه‌ای به یکدیگر متصل گردند. جدول 2-1 مشخصات میکرومدل ساخته شده را نشان می دهد.

جدول 2-1 مشخصات میکرومدل شیشه ای

اشباعیت نفت باقیمانده	اشباعیت آب باقیمانده	تراوایی مطلق نفت	تراوایی مطلق آب	ترشوندگی اولیه	حجم حفرها	تخلخل	عرض مسیره‌ها
40%	29%	2/2 D	1/7 D	نفت دوست	180 $\mu\text{l}$	34/3	130 $\mu\text{m}$

## 2-2- آنالیز تصاویر

تصویرهای تهیه شده، با استفاده از کد نویسی درون نرم افزار گرافیکی LabView 2010 می‌باشد. طی آنالیز تصویر مساحت کل ذرات رنگی، مساحت کل تصویر و نسبت آنها و از این طریق میزان اشباعیت نفت و آب در هر لحظه محاسبه و ثبت گردید.

## 2-3- سیالات تزریقی

نفت خام مورد استفاده در آزمایش‌های سیال زنی میکرومدل، از مخزن مسجد سلیمان تهیه شده و در تمام مراحل سیلاب زنی، از آب شور ساخته شده مطابق آب سازند آسماری مسجد سلیمان نیز استفاده شد. از آنجا که در آزمایش های میکرومدل بررسی حالات مختلف سیال از طریق آنالیز تصویرهای مربوطه صورت می‌گیرد، پیش از تزریق آب شور به میکرومدل مقدار بسیار کمی رنگ آبی خوراکی Wilton در آن حل شد تا مشاهده آن ممکن گردد. طبق آزمایش های انجام شده، این رنگ بر رشد و زنده ماندن میکروارگانیسم ها هیچ گونه اثری ندارد.

<sup>1</sup> - Float glass

<sup>2</sup> - Etching



از میان میکروارگانیسم های موجود در بانک میکروبی دانشگاه شیراز که همگی از نمونه های آب، خاک و نفت مخازن ایران گردآوری شده اند گونه انتروباکتر<sup>۱</sup> انتخاب گردید. این گونه در سال 2002 توسط درویشی از خاک آلوده به نفت خام سنگین از مخازن جنوب ایران جدا شد [11]. مزیت باکتری های جدا شده از مخازن نفتی، انطباق بیشتر آنها با شرایط محیطی مخازن نفتی می باشد که برای انجام فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی در محل حائز اهمیت است. دلیل انتخاب گونه انتروباکتر، توانایی بسیار خوب آن در تولید بیوسورفکتانت و کاهش کشش بین سطحی و همچنین قدرت رشد بسیار بالای آن است.

برای تهیه محلول باکتریایی گونه مورد نظر ابتدا بر روی محیط کشت BHI به مدت 24 ساعت در انکوباتور متحرک در دمای 37 درجه با سرعت چرخش 150 rpm سانتیگراد کشت داده شد. سپس از این محیط به عنوان مایه تلقیح برای کشت بر روی محیط MSSO استفاده گردید. به همین منظور 1% (v/v) از محیط میکروبی BHI به محیط کشت MSSO اضافه می گردد. سپس باکتری در این محیط به مدت 24 ساعت با دور 150 rpm رشد داده شده و به عنوان محلول باکتریایی در آزمایش ها مورد استفاده قرار می گیرد.

گونه انتروباکتر محصولات برون سلولی<sup>۲</sup> تولید می کند. لذا برای تهیه محلول حاوی محصولات زیستی، محلول باکتریایی تهیه شده با دور 4000-7000 rpm به مدت 20 دقیقه سانتریفیوژ می شود. با این کار سلول های باکتری در ظرف ته نشین شده و محلول باقی مانده که حاوی محصولات زیستی می باشد (برای این گونه خاص، محصول تولیدی بیوسورفکتانت است) برای انجام آزمایش ها به کار برده می شود.

### 3- نتیجه گیری

#### 3-1- تزریق محلول باکتریایی به میکرومدل نفت دوست

در شکل 3-1 میان برداشت اولیه نفت و برداشت در مرحله سیلاب زنی پس از زمان ماند تفاوت قابل توجهی دیده می شود. در مرحله سیلاب زنی آب شور حدود 27/9% از کل نفت درجا برداشت شد و طی مرحله سیلاب زنی میکروبی این میزان به 32/4% رسید. میزان ازدیاد برداشت نهایی پس از مدت زمان ماند به 63/4% درصد از کل نفت درجا افزایش یافت.

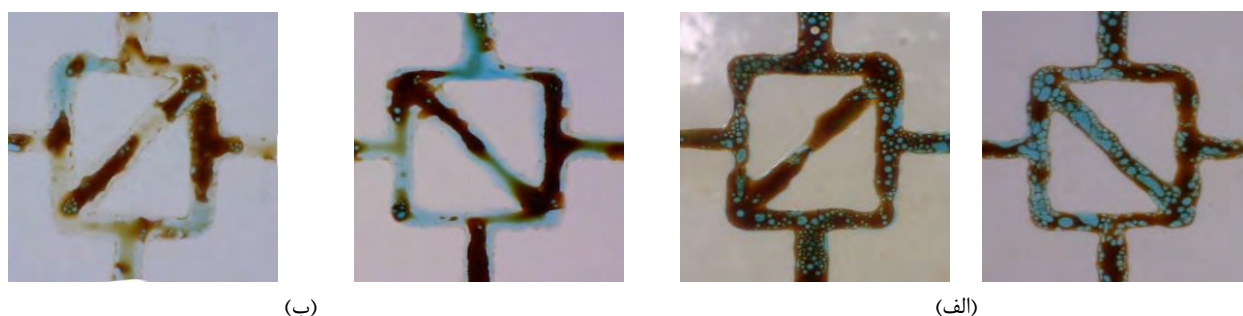
<sup>1</sup> - *Enterobacter cloacae*

<sup>2</sup> - Extracellular



شکل 3-1- میزان برداشت در آزمایش های تزریق محلول باکتریایی

به منظور بررسی کیفی تغییر ترشوندگی، از نقاط مختلف میکرومدل قبل و بعد از زمان ماند تصویری تهیه شد (شکل 3-2).



شکل 3-2 - توزیع سیال در چند نقطه از میکرومدل: الف- پیش از زمان ماند، ب- پس از زمان ماند

در شکل حالت اولیه نفت دوستی سطح مسیره‌ها به آسانی قابل تشخیص است. زیرا نفت علاوه بر دیواره‌ها، به عنوان سیال پیوسته در عرض مسیر نیز حضور دارد، در حالی که آب اغلب در بخش میانی مسیره‌ها و به صورت قطرات ناپیوسته دیده می‌شود. پس از تأثیر محلول باکتریایی بر سطح، چنانچه در شکل دیده می‌شود، لایه نفتی موجود بر روی دیواره بسیار نازک و ضعیف و در برخی قسمت‌ها از میان رفته است. همچنین در مسیره‌های میکرومدل، نفت اغلب در میان مسیر جریان یافته است که این نشان دهنده تغییر ترشوندگی سطح شیشه از نفت-دوست به آب-دوست می‌باشد.

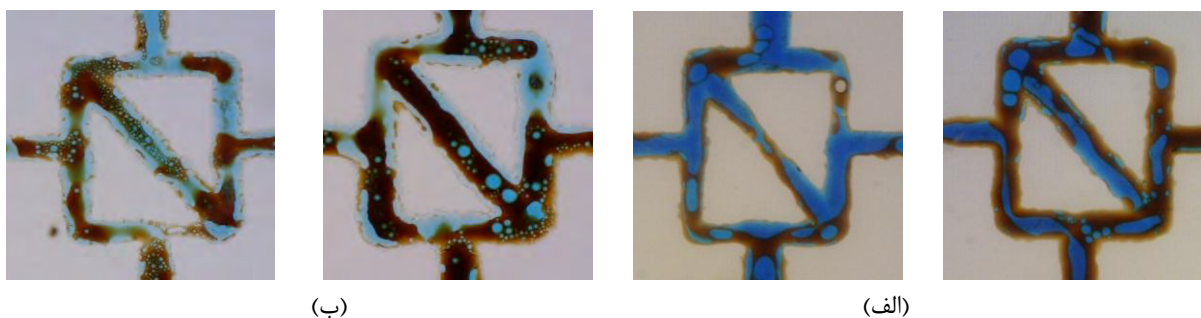
### 3-2- تزریق محلول سوپرناتانت به میکرومدل نفت دوست

در این مرحله، محلولی که پس از سانتریفیوژ از محیط باکتریایی جدا شده است، به میکرومدل تزریق می‌گردد. این محلول فاقد سلول و حاوی بیوسورفکتانت می‌باشد. انجام این آزمایش امکان بررسی جداگانه تأثیر محصولات تولیدی توسط آنها را بر تغییر ترشوندگی سطح فراهم می‌آورد. شکل 3-3 نتایج مراحل مختلف سیلاب زنی را نشان می‌دهد.



شکل 3-3- میزان برداشت نفت در آزمایش های سیلاب زنی محلول سوپرناتانت

چنانچه در نمودار دیده می شود  $8/58\%$  از کل میزان  $10\%$  افزایش برداشت نسبت به مرحله سیلاب زنی اولیه، پس از تزریق سوپرناتانت برداشت شده که نشان دهنده توانایی زیاد محلول بیوسورفکتانت در کاهش کشش بین سطحی و نقش مؤثر آن در برداشت نفت می باشد. سیلاب زنی ثانویه آب شور، تأثیر کمی بر برداشت نفت داشت. این موضوع می تواند به این دلیل باشد که مجاورت با بیوسورفکتانت تغییر چشمگیری در ترشوندگی سطح حاصل نکرده است. میزان تأثیر تغییر ترشوندگی سطح مسیره ها و کاهش کشش سطحی با مشاهده تصاویر شکل 3-4 قابل مقایسه می باشد.



شکل 3-4- تأثیر بیوسورفکتانت بر توزیع سیالات: الف- پیش از آغاز زمان ماند، ب- پس از سیلاب زنی نهایی

تغییرات توزیع سیالات در شکل توانایی محلول بیوسورفکتانت را بر ترشوندگی سطح آشکار می سازد. چنانچه مشاهده می شود، لایه نفتی روی دیواره به اندازه مرحله قبل (تزریق محلول باکتریایی) تحت تأثیر محلول قرار نگرفته و از بین نرفته است، با این وجود در برخی نقاط، فاز آبی در کنار دیواره قرار گرفته و در بسیاری نقاط فاز نفتی از میان مسیر جاری شده که این نشانه تمایل بیشتر سطح به آب و تمایل کمتر نسبت به نفت می باشد.

به صورت خلاصه می توان نتایج حاصله را چنین بیان کرد:



- 1- مکانیسم کاهش کشش بین سطحی بیشترین تأثیر خود را در آزادسازی نفت طی ازدیاد برداشت اولیه (طی سیلاب زنی با محلول باکتریایی یا محصولات آن) نشان می‌دهد. این در حالی است که مکانیسم تغییر ترشوندگی چه بر اثر جذب بیوسورفکتانت و چه به دلیل تشکیل بیوفیلم، نیاز به مدت زمان دارد.
- 2- تغییر ترشوندگی می‌تواند بر اثر حضور بیوسورفکتانت و یا سلول‌های باکتریایی باشد. پس از تزریق جداگانه محلول سوپرناتانت به میکرومدل تغییر ترشوندگی بدون حضور سلول‌ها بررسی گردید. که نتایج به دست آمده نشان داد مکانیسم قالب در تزریق محصولات، تغییر کشش بین سطحی می‌باشد.
- 3- نتایج در مورد تزریق محلول باکتریایی تأثیر بیشتر مکانیسم تغییر ترشوندگی پس از زمان ماند را نشان می‌دهد. می‌توان گفت که هم سلول‌های باکتریایی و هم بیوسورفکتانت تولیدی توانسته‌اند ترشوندگی سطح را از به نفت دوستی به سمت آب دوستی سوق دهند اما با توجه به تصاویر میکروسکوپی این تغییر در مورد محلول باکتریایی که حاوی سلول‌ها علاوه بر بیوسورفکتانت می‌باشد شدیدتر می‌باشد که این امر دلیلی بر تأثیر تشکیل بیوفیلم در میزان بیشتر تغییر ترشوندگی می‌باشد.

## مراجع

- [1] Lazar I, Petrisor IG, Yen TF., Microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Petroleum Sci Technol*;25 (11):1353–66, 2007.
- [2] Ollivier B, Magot M., *Petroleum microbiology*. Herndon, VA, USA: ASM Press, 2005.
- [3] McInerney MJ, Nagle DP, Knapp RM., Microbially enhanced oil recovery: past, present, and future. In: Bernard O, Michel M, editors. *Petroleum Microbiology*. Washington, DC: American Society for Microbiology; p. 215–37, 2005.
- [4] Belyaev SS, Borzenkov IA, Nazina TN, Rozanova EP, Glumov IF, Ibatullin RR, et al., Use of microorganisms in the biotechnology for the enhancement of oil recovery. *Microbiol (Maik Nauka Interperiodica)*;73:590–8, 2004.
- [5] Gao, C. H., Zekri A., El-Tarabily Kh., Microbial enhanced oil recovery through various mechanisms *Oil & gas journal* , 107, 39-42, 2009.
- [6] Beckmann, J. W., The action of bacteria on mineral oil, *Ind. Eng. Chem. News*, 4, 1926.
- [7] Zobell, C. E., Bacterial release of oil from oil-bearing materials, Part I and II, *world oil*, 126(13): 36-47 (I); 127(1):35-41 (II), 1947.
- [8] Bryant S. L. and Lockhart T. P., Reservoir engineering analysis of microbial enhanced oil recovery, *SPE reservoir evaluation and engineering*, Vol. 5, 365-374, 2002.
- [9] Bora R., Maini B.B., and Chakma A., Flow visualization studies of solution gas drive process in heavy oil reservoirs with a glass micromodel, *reservoir evaluation and engineering*, Vol. 3, No. 3, 2000.
- [10] Sarafzadeh, P., Investigation of wettability alteration and IFT reduction mechanisms during MEOR processes, MS Thesis, Shiraz University, Iran, 2011.
- [11] Darvishi, P., Ayatollahi, S., Mowla, D., Niazi, A., Biosurfactant production under extreme environmental conditions by an efficient microbial consortium, ERCPPI-2, *Colloids and Surfaces B: Biointerface*, 2011.