

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان  
دانشکده فنی و مهندسی  
بخش مهندسی شیمی

## **آشکار سازی کارایی روش های ازدیاد برداشت میکروبی نفت با بهره گیری از میکرومدل ها**

ارائه شده به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - گرایش مخازن هیدروکربوری

**اساتید راهنما:**

دکتر مهین شفیعی

دکتر محمد حسن فضائلی پور

**نگارش:**

محمد صابر کرم بیگی

شهریور ۸۷

تقدیم به :

محضر مبارک امام عصر (ارواحنا له الفداه)

که همه ی داشته های ما به برکت وجود

این عزیز است.

خدا و امام زمانش را سپاس که مسیر کسب دانش را مقدر ما فرمود و همواره در این مسیر توفیق خودش را نصیب ما نمود. با تشکر از همسر عزیزم که فداکاری های ایشان در مدت انجام این پایان نامه موفقیت را برایم به ارمغان آورد. با قدردانی از پدر و مادرم که همیشه مشوق من در امر تحصیل بوده اند.

همچنین لازم است از زحمات اساتید گرانقدر، دکتر رنجبر، دکتر شفیع و دکتر فضائی پور در راهنمایی اینجانب کمال تشکر را داشته باشم. همچنین تشکر ویژه ای نیز از جناب آقای مهندس سعادت به خاطر همکاری صمیمانه شان در انجام این پژوهش. امیدوارم خداوند کامیابی و موفقیت را نصیب همه این عزیزان گرداند.



این پایان نامه با مشارکت و مساعدت  
مالی مدیریت پژوهش و توسعه شرکت  
ملی نفت ایران انجام شده است.

این پایان نامه با همیاری پژوهشگاه  
انرژی و محیط زیست و همچنین انجمن  
پژوهشگران جوان دانشگاه شهید باهنر  
کرمان انجام شده است.

## چکیده

در این پژوهش، کارایی روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت در الگوهای ناهمگن جریان، با بهره گیری از میکرومدل ها، آشکارسازی گردید و نتایج آن با روش سیلابزنی آب خلیج فارس مقایسه گردید. ناهمگنی محیط متخلخل یکی از مواردی است که برداشت نفت، منجر به تولید آب فراوان از لایه های پرتراوا و کاسته شدن از کارایی روش های ازدیاد برداشت می گردد، چرا که سیال تزریقی تنها وارد لایه پرتراوا گردیده و در عمل با عدم ورود آن به لایه های با نفوذپذیری کمتر، پتانسیل نفتی این لایه ها غیر قابل استفاده می گردند. در بین راهکارهای مختلف حل این مشکل، سیمان کاری و بهره گیری از مسدود سازی شیمیایی و میکروبی از کارآمد ترین روش ها هستند. یک سوال مهم در بهره گیری راهکار مسدودسازی میکروبی این است که بیوکلونیدهای تزریقی در انتخاب مناطق پرتراوا و کم تراوا کدام یک را برمی گزینند؟ در این تحقیق، سعی گردید جهت پاسخ به این سوال، فرآیند مسدود سازی میکروبی با بهره گیری از انواع میکرومدل های Glass bead و ابتکاری آشکار سازی گردد. برای این منظور از دو نمونه میکروبی جدا شده از خاک، یکی از محیط آلوده به مواد نفتی و دیگری از محیط غیر آلوده استفاده شد. نمونه ها قادر به رشد و تولید متابولیت در محیط کشت با منبع کربن نفت خام بودند. جهت اجرای پروژه ازدیاد برداشت میکروبی نفت از هر دو روش برون محل و درون محل استفاده گردید. با بهره گیری از مشاهده میکروسکوپی و مواد رنگی، این نتیجه بدست آمد که بیوکلونید ها به مناطق پرتراوا نفوذ می نمایند و قادرند منجر به مسدود سازی این مناطق گردند؛ برخلاف روش سیلابزنی که در زمینه حل این مشکل کارگشا نیست.

## فهرست مطالب

فصل اول	۱
فصل دوم	۳
۱-۲- روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت	۳
۲-۲- معرفی مهم ترین محصولات مفید میکروارگانیسم ها در عرصه ی ازدیاد برداشت نفت:	۹
۱-۲-۲- بیوسورفاکتانت ها	۹
۲-۲-۲- بیوپلیمرها	۱۲
۳-۲-۲- بیوامولسیفایر ها	۱۴
۴-۲-۲- بیوفیلیم ها	۱۴
۳-۲- انتقال بیوکلوئید ها در محیط متخلخل	۱۷
۱-۳-۲- پدیده های انتقال بیوکلوئیدها در محیط متخلخل	۱۷
۲-۳-۲- محاسبات نفوذ	۲۰
۳-۳-۲- عوامل تاثیر گذار بر نرخ نفوذ	۲۰
۴-۳-۲- جذب	۲۲
۴-۲- قابلیت مسدود سازی میکروارگانیسم ها	۲۳
۵-۲- مدل سازی و شبیه سازی فرآیندهای ازدیاد برداشت میکروبی نفت	۲۹
۶-۲- آشکار سازی پدیده های جریان سیالات در محیط متخلخل	۳۳
فصل سوم	۳۶
فصل چهارم	۴۵
۱-۴- بخش اول	۴۶
۲-۴- بخش دوم	۵۴
فصل پنجم	۶۰
فصل ششم	۶۱
فصل هفتم	۶۲

## فهرست اشکال

- شکل ۱- اشکال گوناگون اگزو پلی ساکاریدها ..... ۱۳
- شکل ۲- ساختار یک میکروارگانسیم ..... ۱۵
- شکل ۳- تاثیر سرعت جریان بر ضخامت بیوفیلم ..... ۱۶
- شکل ۴- نمایش تصویری فرآیندهای انتقال جریان در جریان اشباع ..... ۱۸
- شکل ۵- خطوط کانتور سرعت سیال محاسبه شده توسط روش LB ..... ۱۹
- شکل ۶- میزان جذب و جدایش سلول ها با گذر زمان ..... ۲۳
- شکل ۷- بهره گیری از ذرات PIV جهت تعیین سرعت ذرات ..... ۳۴
- شکل ۸- نقش مثبت و منفی برای نقشه یک مدار الکترونیکی جهت درک بهتر ..... ۳۷
- شکل ۹- مراحل ساخت میکرومدل حک شده ..... ۴۱
- شکل ۱۰- نمای تجهیزات مدار تزریق جهت انجام آزمایشات ..... ۴۱
- شکل ۱۱- تصویر میکرومدل بعد از سیلابزنی با آب خلیج فارس با سرعت ..... ۴۷
- شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپی محیط متخلخل در تزریق با سرعت پایین ..... ۴۷
- شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی محیط متخلخل در تزریق با سرعت بالا ..... ۴۸
- شکل ۱۴- میزان ازدیاد برداشت میکروبی نفت حین اجرای عملیات میکروبی ..... ۴۹
- شکل ۱۵- آشکار سازی ازدیاد برداشت نفت در اسلاگ غیر آلوده به مواد نفتی ..... ۵۰
- شکل ۱۶- آشکار سازی ازدیاد برداشت نفت در اسلاگ خاک آلوده به مواد نفتی ..... ۵۱
- شکل ۱۷- آشکار سازی کارآمدی روش سیلابزنی در میکرومدل حک شده ..... ۵۶
- شکل ۱۸- آشکار سازی ازدیاد برداشت میکروبی نفت در میکرومدل حک شده ..... ۵۷

## فهرست جداول

- جدول ۱- برخی پروژه های MEOR انجام شده در شرایط و محدودیت های مختلف ..... ۷
- جدول ۲- اطلاعات و نتایج کارآیی فنی برخی عملیات های میدانی MEOR ..... ۸
- جدول ۳- ارزیابی اقتصادی برخی عملیات های میدانی MEOR ..... ۸
- جدول ۴- برخی شبیه سازی ها و مدل های ارائه شده در زمینه MEOR ..... ۳۰
- جدول ۵ - شرح مختصر آزمایشات انجام شده ..... ۴۴
- جدول ۶- درصد ازدیاد برداشت روش های سیلابزنی و میکروبی در میکرومدل Glass bead ..... ۵۳
- جدول ۷- نتایج ازدیاد برداشت روش های سیلابزنی و میکروبی در آزمایش ۳ ..... ۵۸
- جدول ۸- نتایج آزمایشات کشش سطحی و شاخص E24 برای دو نمونه میکروبی ..... ۵۹

# فصل اول

## مقدمه

در سراسر جهان، به طور معمول حداکثر ۳۰ درصد نفت موجود در مخازن هیدروکربوری، تحت فشار مخزن از آن استخراج می گردد و برای استخراج نفت باقیمانده، نیاز است از روش های ازدیاد برداشت بهره گرفته شود. طبق تعریف، در روش های ازدیاد برداشت، مکانیسم هایی در مخزن به اجرا در می آیند تا برآیند نیروهای محرک و مقاوم جهت خارج ساختن نفت از مخزن، به نفع نیروهای محرک تغییر یابند [۱].

مطالعه و ارزیابی روش های مختلف ازدیاد برداشت نفت نیازمند اشراف به تخصص های مختلف مهندسی نفت می باشد. یکی از این تخصص ها، جریان سیالات و فرآیندهای مرتبط در محیط متخلخل می باشد. از نمونه های بارز فرآیندهای محیط متخلخل، انتقال کلوئیدها (ذرات شیمیایی) و بیوکلوئیدها (میکروارگانسیم ها)، در چنین محیط هایی می باشند [۲]. از مهم ترین مفاهیم تاثیرگذار، هم در مطالعه جریان سیالات در محیط های متخلخل و هم در ارزیابی کارایی روش های ازدیاد برداشت، مفهوم ناهمگنی می باشد. این مفهوم مهم جهت بیان نحوه ی تغییر خصوصیات مخازن در جهات مختلف، بکار می رود.

ناهمگنی در زمینه تولید منجر به کاهش کارایی استفاده از روش های ازدیاد برداشت و افزایش تولید آب می گردد [۳-۵]. در بین راه حل های مختلف برطرف سازی این مشکل، مسدودسازی انتخابی مناطق پرتراوا مطلوب ترین روش موجود است. جهت مسدودسازی، استفاده از جرم زنده میکروارگانسیم ها یکی از بهترین گزینه هاست، به دلایل زیر:

سادگی اجرای عملیات، صرفه اقتصادی و کارایی بالای این روش.

در مطالعات جریان سیالات در محیط های متخلخل، اغلب آزمایشات بر روی مغزه ها و ستون ها انجام می شوند. بزرگ ترین مشکل مغزه ها و ستون ها عدم امکان مشاهده فرآیندهایی است که در چنین محیط هایی رخ می دهد. همچنین امکان مطالعه الگوهای انتخابی جریان در چنین مدل هایی وجود ندارد. راهکار حل مشکلات مذکور بهره گیری از میکرومدل ها می باشد. چرا که از یک سو آشکارسازی فرآیندها در محیط متخلخل با بهره گیری از میکرومدل ها فراهم است و از سوی دیگر می توان هر الگوی دلخواهی را با استفاده از نرم افزار یا دستی طراحی نمود و با پیاده سازی آن در میکرومدل، آزمایشاتی با اهداف معین با الگوهای جریان دلخواه را به انجام رساند.



در پژوهش حاضر، کارایی روش های ازدیاد برداشت سیلابزنی با تزریق آب خلیج فارس و میکروبی با بهره گیری از دو اسلاگ میکروبی جداسازی شده، آشکارسازی<sup>۱</sup> و مقایسه گردیدند. آزمایشات بر روی میکرومدل شیشه ای با یک روش ساخت ابتکاری و میکرومدل Glass bead، انجام شدند. هدف این تحقیق بررسی قابلیت مسدودسازی میکروب ها و تاثیر محصولات بیولوژیکی آنها بر ازدیاد برداشت نفت از الگوهای ناهمگن بود. نتایج این پژوهش نشان داد، سیلاب زنی آب، تنها در لایه ی پرتراوا موثر است، اما بهره گیری از اسلاگ های میکروبی، با همگن سازی محیط متخلخل، امکان ورود سیال تزریقی به مناطق کم تراوا را نیز فراهم می نماید تا از این طریق به ازدیاد برداشت نفت کمک شود. ضمن اینکه حضور محصولات بیولوژیکی همچون بیوسورفاکتانت ها و بیوامولسیفایرها در اسلاگ تزریقی با تغییر کشش سطحی و بین سطحی، ترشوندگی و قابلیت امولسیون سازی، منجر به برداشت بیشتر نفت می گردند.

## فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

## ۲-۱- روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت

در حالت کلی می توان عملیات برداشت نفت را می توان به سه مرحله تقسیم نمود: برداشت اولیه که نفت تحت فشار خودش از اعماق زمین بیرون می آید. با ادامه ی برداشت، فشار مخزن افت می کند و نیاز است از روش هایی استفاده شود که فشار مخزن حفظ شود. این روش ها شامل روش های ثانویه ی برداشت می باشند. برداشت ثالثیه به عنوان مرحله ی آخر برداشت می باشد. در این مرحله موادی به مخزن تزریق می شوند که با مکانیسم های مختلف، جریان نفت از محیط متخلخل را بهبود بخشند. در حالت کلی، استفاده از روش های ثانویه و ثالثیه ی برداشت نفت به عنوان روش های ازدیاد برداشت نفت شناخته می شوند.

در این میان، یکی از این روش ها، روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت<sup>۱</sup> (MEOR) می باشد که شامل استفاده از میکروارگانیسم ها یا محصولات آنها، جهت این امر می باشد. در این روش از خود میکروارگانیسم ها جهت کاهش نفوذ پذیری و همگن سازی مخزن از طریق مسدود کردن مناطق با نفوذ پذیری بالا و همچنین تجزیه ترکیبات سنگین نفت استفاده می شود. همچنین می توان از محصولات آنها مانند بیو پلیمرها در افزایش ویسکوزیته ی سیالات تزریقی، کنترل جبهه تزریق و تغییر الگوی جریان، بیوسورفاکتانت ها در کاهش کشش بین سطحی نفت و آب و تغییرات ترشوندگی، بیوگازها و محلول ها<sup>۲</sup> در کاهش ویسکوزیته و اسیدهای آلی جهت تغییر pH و افزایش تخلخل از طریق انحلال سنگ های کربناته استفاده نمود [۳ و ۱]. روش MEOR برخلاف روش حرارتی مقادیر بالای انرژی را مصرف نمی کند و نیز برخلاف روش شیمیایی وابسته به قیمت نفت نیست. از طرف دیگر از آنجایی که در این روش، میکروب ها به صورت فراوان تکثیر می یابند، این امکان وجود دارد که در مدت زمانی کم، مقادیر زیادی از متابولیت های با ارزش از منابع تغذیه ی تجدید پذیر و ارزان تولید شوند [۷].

ایده ی این روش برای نخستین بار توسط Beckmann در سال ۱۹۲۶ ارائه گردید. برای نخستین بار، در سال ۱۹۴۶، C.a.Zobell فرآیندی برای بازیافت ثانویه نفت با استفاده از میکروبه های<sup>۳</sup> بی هوازی و مکانیزم انحلال مواد معدنی سولفاتی ثبت کرد. اولین آزمایش میدانی ازدیاد برداشت نفت به روش میکروبی در سال ۱۹۵۴ در یکی از میادین نفتی آرکانزاس انجام گرفت، با وجود موفق بودن این روش، به دلیل در دسترس

1- Microbial Enhanced Oil Recovery

2- Solvent

3-Microbial Enhanced Oil Recovery(MEOR)

بودن منابع نفتی ارزان قیمت، این شیوه کنار گذاشته شد. در دهه ی هفتاد میلادی همزمان با افت قیمت نفت، علاقه به بهره گیری از روش های ازدیاد برداشت میکروبی کاهش یافت و تنها کشورهای اروپای شرقی و برخی در امریکا بر روی این زمینه مشغول فعالیت بودند. از دهه ۸۰ به بعد، به دلیل افزایش قیمت نفت، این روش ها کم و بیش متداول شدند [۸]. در اواخر این دهه به دلیل شناخت ناکافی از این روش، در تحقیقات صورت پذیرفته به این نتیجه رسیدند که توسعه ی روش MEOR منوط به مطالعات آزمایشگاهی بیشتر است [۹].

مکانیسم های مختلفی را که روش MEOR، طی آنها در ازدیاد برداشت نفت، موثر واقع می شود، در سه زمینه می توان خلاصه نمود [۷]:

#### ۱- تمیز نمودن چاه

در این مکانیسم، باکتری های تجزیه گر و از بین برنده ی رسوب و مواد هیدروکربوری داخل لوله های حفاری، تولید و سایر سطوح داخلی چاه را مصرف می نمایند که این فرآیند باعث کاهش هزینه های تولید و افزایش عمر چاه ها می گردد و در ازدیاد برداشت نفت موثر نمی باشد. در این مورد می توان علاوه بر استفاده از میکروارگانیسم ها جهت ازدیاد برداشت نفت، با دید پاکسازی محیط زیست نیز به میکروارگانیسم ها نگریست. به طور مثال حذف سولفات از محیط مخزن [۱۰ و ۱۱] و تجزیه ی مواد سیالات حفاری توسط میکروب ها [۱۲].

#### ۲- تحریک مخزن

در این زمینه محصولات تولید شده توسط میکروب ها مهم ترین نقش را ایفا می کنند. از جمله بیوسورفاکتانت ها در کاهش کشش بین سطحی نفت و آب حتی تا  $0.06 \text{ mN/m}$  و تغییر ترشوندگی، بیوگازهایی همچون  $\text{CO}_2$  و  $\text{N}_2$ ،  $\text{H}_2$ ،  $\text{NH}_4$  به جهت افزایش فشار، کاهش ویسکوزیته و افزایش حجم قطرات نفت، اسیدهای آلی در تغییر pH حتی تا حدود ۳ و افزایش تخلخل از طریق انحلال سنگ های کربناته و همچنین کاهش گرانیوی نفت از طریق تجزیه ی زنجیره های بلند هیدروکربن [۱ و ۶].

۳- مسدود سازی میکروبی با استفاده از جرم زنده<sup>۱</sup> ی میکروارگانیسم ها و بیوپلیمرها.

میکروارگانیسم هایی که برای تزریق به مخازن انتخاب می شوند بایستی دارای شرایط زیر باشند:

کوچک، امکان رشد سریع و تحرک لازم برای انتقال در محیط متخلخل، توانا در تولید متابولیت های مناسب جهت کمک به ازدیاد برداشت نفت، سازگار با شرایط محیطی نامناسب از قبیل دما، فشار و شوری بالا و تغییرات اکسیژن و pH مختلف، عدم نیاز به مواد مغذی پیچیده، غیرقابل دسترس و پرهزینه جهت رشد و متابولیسم، عدم تولید مواد سمی، بیماری و آلودگی برای محیط زیست [۱۳].

جهت کنترل بیشتر نحوه ی عملکرد میکروارگانیسم ها استفاده از مهندسی ژنتیک می تواند مفید باشد [۱۴]، چرا که تغییر ژن نمونه ها می تواند محصولات غالب آن نمونه ها را تغییر دهد. در یک مطالعه از سویه E. Coli که به طور طبیعی قادر به تولید بیوسورفاکتانت رمنولپید نبوده است، با تغییر ژن این محصول را تولید نموده است [۱۵].

به تناسب همین موارد نیز می توان شرایط مخازنی را که برای روش ازدیاد برداشت میکروبی مناسبند، شناخت:

نفوذپذیری مناسب جهت نفوذ باکتری ها به عمق مخزن، شرایط مناسب زیست محیطی جهت رشد و متابولیسم، امکان فراهم سازی مواد مورد نیاز جهت رشد میکروارگانیسم ها در محدوده ی اجرای عملیات [۱۶].

سه روش جهت استفاده از محصولات میکروارگانیسم ها وجود دارد: در روش اول، میکروب ها به همراه مواد مورد نیاز رشدشان به مخزن فرستاده شده و در داخل مخزن به تولید محصول می پردازند (روش درون محل<sup>۱</sup>). در روش دوم، محصولات تولید شده از میکروارگانیسم ها، در بیرون مخزن تهیه شده و تنها این محصولات، به مخزن تزریق می گردند (روش برون محل<sup>۲</sup>) [۱]. در روش سوم با تزریق مواد مغذی، میکروارگانیسم های موجود در مخزن تحریک می شوند و با فراهم سازی شرایط مناسب رشد، آنها می توانند تکثیر گشته و متابولیت تولید نمایند. نتایج تحقیقات در دهه ی ۸۰ نشان می دهند روش درون محل، بهتر از روش برون محل می باشد [۱۷ و ۱۸].

در انجام عملیات میدانی برخی نکات قابل توجه اند:

۱- گزینش مخزن، اسلاگ میکروبی و مواد مغذی مناسب برای اجرای عملیات ازدیاد برداشت میکروبی.

1- Insitu  
2- Exsitu

۲- تعیین الگوی تزریق از طریق انتخاب مناسب چاه های تزریق و تولید، مدت زمان تزریق و بستن چاه و نیز سرعت تزریق. در این راستا توجه به فاصله ی چاه ها از یکدیگر و موقعیت آنها اهمیت دارد.

۳- تعیین تقدم تزریق اسلاگ میکروبی یا مواد مغذی [۱۹-۲۱]

جهت بهینه سازی عملیات میدانی ازدیاد برداشت میکروبی توجه به غلظت باکتری، میزان بهینه ی اسلاگ میکروبی و زمان تطبیق آن با محیط مخزن، زمان انجام فعالیت های بیولوژیکی و توانایی نفوذ به عمق مخزن لازم می باشد [۲۱].

در سال ۱۹۹۵ Portwood به ارزیابی ۳۲۲ پروژه ی انجام شده در زمینه ی MEOR پرداخت. هدف از این تحقیق ارزیابی موفقیت پروژه های مذکور بود. نتایج این تحقیق نشان داد که ۷۸٪ این پروژه ها با موفقیت به انجام رسیده اند [۲۲].

مطالعات مروری صورت گرفته در سال های ۲۰۰۱ با بررسی ۱۵ سال بهره گیری از روش MEOR [۲۴] و ۲۰۰۷ با بررسی گذشته، حال و آینده این روش [۲۵] و کارایی اقتصادی آن [۲۶] حاکی از کارآمدی این روش در ازدیاد برداشت نفت و حل مشکلات خاص تولید و همچنین بهره وری مناسب اقتصادی آن دارد. البته در یک مطالعه در سال ۲۰۰۰ با ارزیابی این روش از نقطه نظر پارامترهای مهندسی مخازن، این نتیجه حاصل شده است که این روش نسبت به سایر روش های شیمیایی، چه در مقیاس صنعتی و چه در مقیاس آزمایشگاهی، نفت بیشتری را تولید نمی نماید. همچنین ریسک بالایی داشته و بستگی به این دارد که میکرو ارگانیسم ها در روش درون محل بتوانند از نفت به عنوان منبع کربن استفاده کنند یا خیر [۲۷]. نظیر چنین نتایجی به ناکارآمدی روش MEOR مربوط نیست؛ چرا که نتایج بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی و عملیات میدانی حاکی از کارایی این روش دارد. از طرف دیگر هیچ گاه روش MEOR به عنوان یک روش اصلی ازدیاد برداشت - حداقل تا زمان حاضر - مطرح نبوده است و به طور معمول به عنوان تنها روش ازدیاد برداشت در یک مخزن مورد استفاده قرار نگرفته است؛ در نتیجه طبیعی است که در مقایسه ی آن با روش های اصلی همچون روش های شیمیایی، نظیر چنان نتایجی حاصل شود. همچنین باید توجه داشت که عامل اصلی افزایش ریسک استفاده از چنین روشی، به پیچیدگی فرآیندهای میکروارگانیسم ها و کنترل دشوار چنین فرآیندهایی در مخازن نفت برمی گردد. روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت نسبت به بسیاری از روش های دیگر بسیار جدید تر بوده و هنوز زمینه های ناشناخته ی زیادی، بخصوص در کنترل این روش وجود دارد.

با وجود محدودیت هایی که استفاده از روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت در شرایط نامناسب، از جمله دما و شوری بالا و نفوذپذیری پایین دارد، در برخی مطالعات، گزارشاتی موجود است که بیانگر کارایی این روش حتی در مواردی مشابه محدودیت های فوق می باشد. توجه به قابلیت های فراوان بیوتکنولوژی، باور این مسئله را راحت می سازد که با وجود چنین محدودیت هایی بر سر راه استفاده از روش MEOR، حتی در موارد خاص نیز، امکان ارائه ی راهکارهایی با عنایت به قابلیت انعطاف پذیری بیوتکنولوژی وجود دارد (جدول ۱).

جدول ۱- برخی پروژه های MEOR انجام شده در شرایط و محدودیت های مختلف

ردیف	سال	محقق	مورد محدودیت	نتیجه	منبع
۱	۲۰۰۶	Nourani	مخازن ترکدار	تاثیر جهت داری شکستگی ها در کارایی عملیات	[۲۸]
۲	۲۰۰۵	Zhao	دما و شوری بالای مخزن	رضایت بخش از نظر اقتصادی و درصد ازدیاد برداشت	[۲۹]
۳	۲۰۰۵	Maudgalya	تزریق بیو سورفاکتانت در نفوذ پذیری پایین مغزه ها	کارایی بیشتر بیوسورفاکتانت نسبت به سورفاکتانت	[۳۰]
۴	۲۰۰۴	Strappa	مخزن آبران قوی	میزان ازدیاد برداشت ۲۰ درصد با هزینه $\frac{\$}{2/87} B_o$	[۳۱]
۵	۲۰۰۲	Zekri	مخازن کربناته ترکدار	کاهش نفوذ پذیری مخازن در اثر مسدود سازی میکروبی	[۳۲]
۶	۲۰۰۱	Feng	مخازن نفت سنگین با دمای بالا	کاهش گرانیروی، تولید آب و کشش بین سطحی نفت- آب، افزایش برداشت نفت و درجه API آن	[۳۳]
۷	۱۹۹۹	Chen	مخازن دارای هیدروکربن های سنگین	افزایش برداشت نفت و درجه API آن	[۳۴]
۸	۱۹۹۲	Sunde	مخازن دور از ساحل	اجرای موفق عملیات	[۳۵]

جهت ارزیابی بهتر کارایی ازدیاد برداشت میکروبی نفت از نقطه نظر فنی و اقتصادی، توجه به نتایج پروژه های انجام گرفته در این زمینه می تواند مفید باشد. بررسی آمار ارائه شده در دو جدول زیر بیانگر کارآمدی روش میکروبی ازدیاد برداشت، در عرصه های فنی و هم زمینه های اقتصادی می باشد.

جدول ۲- اطلاعات و نتایج کارآیی فنی برخی عملیات های میدانی MEOR

ردیف	سال	محقق	مخزن / کشور	توضیحات	درصد ازدیاد برداشت	منبع
۱	۲۰۰۶	Wankui	چین/ میدان Daqing	مخازن کم تراوا با دو نمونه میکروبی	۳۴/۷	[۳۶]
۲	۲۰۰۶	Feng	چین/ میدان Daqing	دمای بهینه مخازن C ۶۰ و گونه های باکتری از نوع همزاد مخزن	۶-۸	[۳۷]
۳	۲۰۰۵	Maure	پرو	دور از ساحل	۴۱/۵	[۳۸]
۴	۲۰۰۴	Strappa	آرژانتین	تولید بیوسورفاکتانت و جرم زنده در مخزن	۲۰	[۳۱]
۵	۲۰۰۳	Mei	چین/ میدان Daqing	ترکیب با روش ASP	۵-۱۳	[۳۹]
۶	۲۰۰۱	Ghazali	مالزی	--	تاثیر مثبت	[۴۰]
۷	۱۹۹۹	Maure	آرژانتین	تحقیقات نیمه صنعتی MEOR	۴۴	[۴۱]
۸	۱۹۹۹	Ohno	چین/ میدان Daqing	تحقیقات نیمه صنعتی ۳ ساله با شش ماه فرآیند تزریق میکروبی	کاهش تولید آب و افزایش برداشت نفت	[۴۲]
۹	۱۹۹۷	Yonebayashi	چین/ میدان Fuyu	تزریق چهارگونه باکتری	۱۵	[۴۳]
۱۰	۱۹۶۵ تا ۱۹۷۲	--	مجارستان	تزریق ۶ ماهه در ۳ مخزن	افزایش تولید، کاهش گرانیوی و تولید گاز	[۲۰]
۱۱	دهه ۵۰	Spurny	چک	تزریق در ۴ مخزن در دوره ۶ ماهه	۶/۵ - ۱۲	[۲۰]

جدول ۳- ارزیابی اقتصادی برخی عملیات های میدانی MEOR

ردیف	سال	محقق	مخزن / کشور	توضیحات	هزینه منبع
۱	۲۰۰۴	Strappa	آرژانتین	تولید بیوسورفاکتانت و جرم زنده در مخزن	۲/۸۷
۲	۲۰۰۱	Maure	آرژانتین/سازند La Ventana	عملیات میدانی جهت بهبود تزریق آب	۲-۵/۱
۳	۱۹۹۹	Maure	آرژانتین/سازند La Ventana	طرح آزمایشی تزریق	۲-۵/۱
۴	۱۹۹۲	Sunde	دریای شمال	دور از ساحل	۰/۸۶-۴/۶
۵	۱۹۹۵	Portwood	آمریکا	ارزیابی ۳۲۲ پروژه روش میکروبی	۰/۲۵-۵

\* واحد هزینه: به ازای هر بشکه اضافی نفت (دلار)



روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت می تواند با روش ازدیاد برداشت ASP<sup>1</sup> ترکیب شود. با بهره گیری از روش میکروبی امکان استفاده از روش ASP در مورد نفت هایی که به تنهایی با روش ASP سازگار نیستند فراهم می شود، زیرا میکروب ها قادر به اصلاح ترکیب و خواص سطحی نفت مخزن می باشند [۴۶]. همچنین به نظر می رسد محصولات میکروارگانسیم ها می توانند به جای مواد شیمیایی موجود در ترکیب روش ASP به کار روند که ممکن است باعث صرفه جویی در هزینه و کمک به حفظ محیط زیست شوند [۳۹].

## ۲-۲- معرفی مهم ترین محصولات مفید میکروارگانسیم ها در عرصه ی ازدیاد برداشت نفت:

همان گونه که ذکر شد میکروب ها محصولات متنوعی را تولید می نمایند که هر یک کارایی متفاوتی دارند. در این بین ۴ محصول بیوسورفاکتانت، بیوپلیمر، بیومولسیفایر و بیوفیلیم از اهمیت بسزایی برخوردارند که در بخش به معرفی آنها پرداخته می شود:

### ۲-۲-۱- بیوسورفاکتانت ها

کشش سطحی یک مایع که همان انرژی سطح آن مایع است به عنوان نیرویی است که با هر گونه افزایش سطح آن مایع مقابله می نماید. در کنار دلایلی چون جاذبه و غلظت مایع، کشش سطحی هم عامل دیگری است که باعث ایجاد سطوح منحنی در سطح مایعات می گردد [۴۷]. مواد فعال کننده سطحی یا بیوسورفاکتانت ها، یکی از مهم ترین محصولات میکروارگانسیم ها هستند که با کاهش کشش بین سطحی آب و نفت، سهم عمده ای در ازدیاد برداشت روش های میکروبی بر عهده دارند.

در حالت کلی از نظر ترکیب، سورفاکتانت ها به انواع آنیونی، کاتیونی، آمفوتری و غیر یونی تقسیم می شوند [۴۸]. بیشتر بیوسورفاکتانت ها خنثی یا آنیونی اند [۱۵].

بیوسورفاکتانت ها از نظر وزن مولکولی نیز قابل دسته بندی اند:

بیوسورفاکتانت های با وزن مولکولی کم، کشش سطحی و بین سطحی را کم می نمایند. بیوسورفاکتانت های با وزن مولکولی بالا که به طور معمول به نام بیومولسیفایرها شناخته می شوند، به پایداری امولسیون ها کمک می نمایند، اما تاثیر فراوانی بر کاهش کشش سطحی ندارند. لازم به ذکر است که اکثر بیوسورفاکتانت ها به صورت هوازی رشد می یابند [۴۹].

شرایط محیط، شوری و یون های دو ظرفیتی تاثیر مهمی بر میزان تولید و کیفیت بیوسورفاکتانت ها دارد. طول زنجیره ی آبگریز و ساختار کربوهیدرات ها متاثر از شرایط رشد می باشند. در یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی مغزه ها، Healy و Read نشان دادند که بیوسورفاکتانت ها در  $\frac{1}{3}$  اول طول مغزه تولید می گردند، در  $\frac{1}{3}$  دوم طول مغزه انتقال یافته و در  $\frac{1}{3}$  پایانی غلظت آنها بسیار کم می گردد [۵۰].

یکی از روش های تشخیص کارایی میکروارگانیسم ها در تغییر کشش بین سطحی، اندازه گیری پارامتر کشش سطحی یا بین سطحی با استفاده از روش های رایج است. کشش سطحی را می توان هم از طریق نیرویی که باعث گسترش سطح یک مایع از طریق انتقال مولکول ها از توده مایع به سطح آن می شود، محاسبه نمود و هم اختلاف فشار بین دو سطح (مثلا درون و بیرون یک حباب) را مبنای اندازه گیری کشش سطحی قرار داد. روش اخیر به معادله لاپلاس مشهور است [۵۱]. جهت تعیین غلظت بیوسورفاکتانت تولیدی، از تست پخش شدن قطره<sup>۱</sup> استفاده می شود. در این تست مقدار مشخصی از هیدروکربن بر سطح محلولی دارای سورفاکتانت با غلظت مشخص ریخته می شود و پس از گذشت زمانی مشخص، پخش شدگی قطرات هیدروکربن سنجیده می شود. سپس همین مراحل برای محلول دارای بیوسورفاکتانتی که غلظت آن معلوم نیست تکرار شده و از مقایسه نتایج این دو محلول در میزان پراکنده سازی قطرات هیدروکربن، غلظت بیوسورفاکتانت نامعلوم تعیین می گردد [۱۵].

مزیت این ترکیبات بیولوژیکی، نسبت به انواع شیمیایی آنها در فعالیت سطحی و قدرت تجزیه بیشتر، کارایی بهتر در شرایط مختلف دما، pH و شوری، هزینه تولید کمتر و نیز سازگاری بیشتر با محیط زیست می باشد [۵۲، ۵۳]. در کنار مزایای فراوان، بیوسورفاکتانت ها معایبی نیز دارند، از جمله: پیچیدگی متابولیسم های میکروارگانیسم ها و به دنبال آن دشوار گردیدن کنترل تولید و عملکرد بیوسورفاکتانت ها و نیز مسدود سازی نامطلوب و غیر انتخابی محیط متخلخل که ممکن است کاهش نفوذ پذیری را به طور ناخواسته دربرداشته باشد [۵۲ و ۵۳].

از عوامل تاثیر گذار بر تولید بیوسورفاکتانت می توان به این موارد اشاره نمود: میزان شوری و دمای مخزن، pH، محیط کشت و زمان.

یکی از مهم ترین عوامل تاثیرگذار بر کارایی سورفاکتانت ها میزان جذب آنها به ماتریکس محیط متخلخل می باشد. جذب سورفاکتانت ها، با افزایش وزن مولکولی در مورد سورفاکتانت های غیر یونی کاهش یافته و روند این امر برای سورفاکتانت های آنیونی، معکوس است. نرخ جذب در مخازن نفت تر ۳ تا ۵ برابر بیشتر از مخازن آب تر است. همچنین بهره گیری از سورفاکتانت ها در مخازن کربناته به دلایل شکستگی ها و ناهمگنی، نفوذ پذیری کم ماتریکس، حجم حفرات بسته، شوری بالا و نرخ جذب فراوان، با محدودیت مواجه می گردد [۴۸]. نتایج تحقیقات نشان می دهند غلظت بیوسورفاکتانت در میزان جذب آن بر کانی های مختلف تاثیر گذار است [۵۴].

مواد فعال کننده ی سطحی می توانند باعث افزایش انرژی گیبس جذب گردند. تغییرات انرژی گیبس جذب بر میزان چسبندگی بیولوئیدها تاثیر گذار است [۵۵].

از عوامل موثر دیگر بر کارایی بیوسورفاکتانت ها در عملیات ازدیاد برداشت، تاثیر تزریق برخی افزودنی ها به همراه بیوسورفاکتانت ها می باشد. تزریق جبهه ی ویسکوز پیشاپیش اسلاگ سورفاکتانت و بافر کنترل کننده قابلیت حرکت<sup>۱</sup> در پس اسلاگ بیوسورفاکتانت، ازدیاد برداشت را بهبود می بخشد [۵۶].

بیوسورفاکتانت ها کارکردهای دیگری نیز دارند، همچون افزایش پایداری امولسیون ها و تغییر ترشوندگی. در حالت کلی جهت تغییر ترشوندگی توسط سورفاکتانت ها عوامل زیر موثرند:

- ساختار سورفاکتانت و نحوه قرار گیری آن در سطح.
  - غلظت سورفاکتانت.
  - سرعت انتقال سورفاکتانت در محیط متخلخل، زمان ماند و تاثیر گذاری سورفاکتانت بر سطوح.
- از آنجایی که یکی از محورهای این پایان نامه، تولید بیوسورفاکتانت و بررسی کارایی آن بر ازدیاد برداشت نفت با استفاده از روش های آشکار سازی است، در اینجا به مروری بر زمینه های تحقیقاتی انجام شده پیرامون آشکار سازی عملکرد سورفاکتانت ها در محیط متخلخل پرداخته می شود.
- ارزیابی تحقیقات منتشر شده، نشان می دهد پژوهش های به انجام رسیده در این زمینه، در سه حوزه ی اصلی زیر می باشد:

۱- مطالعه ی پدیده های سطحی: در این حوزه تحقیقاتی با موضوعات تغییر ترشوندگی در اثر تزریق سورفاکتانت های یونی [۵۷]، آشکارسازی بر هم کنش های سطحی و باقی ماندن کلوئید ها در جریان پایدار در کانال های مویینه [۵۸] و کاهش هدایت جریان در اثر امولسیون سازی سورفاکتانت ها [۵۹] صورت پذیرفته است.

۲- عملکرد فوم تولید شده توسط سورفاکتانت ها: در این زمینه، آشکارسازی تاثیر عوامل هندسه ی حفرات، غلظت سورفاکتانت و گرانیوی سیال ترکننده در تولید فوم [۶۰]، برهم کنش سورفاکتانت و فوم با نفت در میکرومدل سیلیکونی [۶۱] و مشاهده ی تاثیر فشار بر جابجایی محلول سورفاکتانت و گاز CO<sub>2</sub> در تولید فوم [۶۲]، از تحقیقات انجام شده است.

۳- حذف آلودگی ها: از برخی تحقیقات این زمینه می توان این موارد را نام برد: جابجایی و انحلال مواد NAPL<sup>۱</sup> [۶۳] و نیز حذف آنها از محیط های متخلخل [۶۴ و ۶۵]، تاثیر سورفاکتانت های یونی بر سرعت انحلال آلودگی های تتراکلرواتیلن<sup>۲</sup> [۶۶]، تاثیر آلودگی های تتراکلرواتیلن بر خواص فیزیکی و سطحی محلول های حذف کننده ی دارای سورفاکتانت [۶۷] و حذف آلودگی تری کلرواتیلن<sup>۳</sup> توسط فوم سورفاکتانتی [۶۸].

## ۲-۲-۲- بیوپلیمرها

پلیمرهایی که در صنعت نفت کاربرد دارند، به دو دسته ی پلی آکریل آمیدها و پلی ساکاریدها (بیوپلیمرها) تقسیم می شوند. پلی آکریل آمیدها که مقاومت برشی کمی دارند و دارای زنجیره های بسیار بلندی از مولکول های مونومر اکریل آمیدها هستند. از طرف دیگر پلی ساکاریدها یا بیوپلیمرها که یکی از معروف ترین آنها صمغ زانتان<sup>۴</sup> می باشد، مقاومت برشی بیشتری نسبت به پلی اکریل آمیدها دارند.

معمولاً ترکیبات پلیمرها نسبت به ترکیبات سورفاکتانت ها ساده تر و ارزان تر می باشند.

باکتری ها، کربو هیدرات موجود در مواد مغذی را به بیوپلیمرهای پلی ساکاریدی برون سلولی پلیمریزاسیون می کنند. معمولاً بیوپلیمر به صورت رسوب سفید رنگی می باشد که آن را از محیط رشد سلول ها توسط سانتریفیوژ جداسازی می کنند.

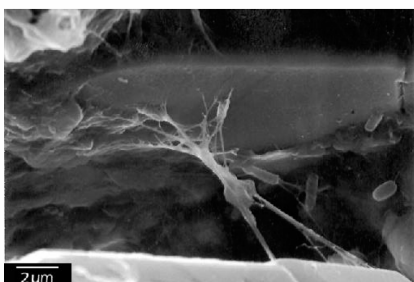
- 
- 1-Non-Aqueous Phase Liquid
  - 2-Tetrachloroethylene
  - 3-Trichloroethylene
  - 4- Xanthan gum

بیوپلیمرها به دو شکل مختلف یافت می شوند :

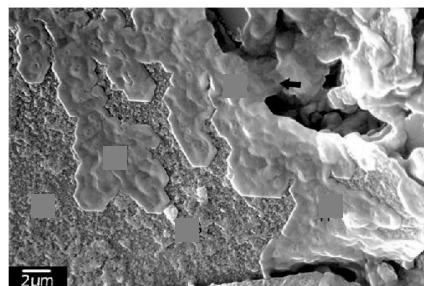
۱- کپسول مانند<sup>۱</sup> : به صورت غلافی بر سطح باکتری قرار می گیرند و گاهی تا ۲۰ برابر ابعاد باکتری، فضا اشغال می نمایند.

۲- اسلایم مانند<sup>۲</sup> : این گونه به صورت بسیار ضعیف به سطح باکتری می چسبند.

اگزو پلی ساکاریدها در محیط متخلخل، در اشکال گوناگون ظاهر می شوند. در ورودی ها به صورت یک ورقه بی شکل و پیوسته (شکل ۱ الف) در می آیند و در فضای خالی محیط متخلخل ساختاری تار مانند (شکل ۱ ب) به خود می گیرند و به نام Bioweb شناخته می شوند. ادعا شده است چنین ساختاری منجر به مسدود سازی سریع تر در گلوگاه ها می گردد[۶۹].



(ب) مورفولوژی تار مانند



(الف) مورفولوژی ورقه مانند

شکل ۱- اشکال گوناگون اگزو پلی ساکاریدها [۶۹]

بیوپلیمرها با افزایش ویسکوزیته و کاهش نفوذ پذیری می توانند قابلیت انتقال<sup>۳</sup> سیال جابجا کننده<sup>۴</sup> را کاهش دهند. ذکر این نکته ضروری است که تنها بیوپلیمرهایی که محلول باشند، می توانند باعث افزایش گرانروی گردند. جهت بررسی این امر، از آزمایش رسوب متانول استفاده می کنند [۵۱]. از کارکرد های دیگر بیوپلیمرها، اصلاح پروفایل تولید سیالات از مخازن و کنترل جریان آنها می باشند [۷۰ و ۷۱]. در بهره گیری از پلیمرها دو مسئله ی پایداری و نرخ جذب آنها در محیط متخلخل اهمیت دارند [۷۲-۷۵]. همچنین یکی از ملاحظات بیوپلیمرها، نرخ تولید آنها می باشد که با توجه به نوع مواد مصرفی میکروارگانیسم ها، می تواند زمان تولید بیوپلیمر تغییر نماید [۷۶].

- 
- 1- Capsule
  - 2- Slime
  - 3 -mobility
  - 4 -displacing

### ۲-۲-۳- بیوامولسیفایر ها

بیوامولسیفایر ماده ایست که جهت معلق سازی کربن غیر قابل حل در آب، توسط میکروارگانیزم ها تولید می گردد. این ماده یک متابولیسم میکروب ها برای جذب مواد مغذی آبگریز می باشد. این ترکیبات، همان بیوسورفاکتانت های با وزن مولکولی بالا می باشند. معمولاً ترکیبات مختلف، توانایی امولسیون سازی متفاوتی دارند. شرایط مختلفی بر تولید بیوامولسیفایرها موثرند، از جمله :

میزان آبگریزی سلول، نحوه رشد میکروب ها، pH، محتوای نمک محیط [۷۷].

یکی از شاخص های مهم جهت بررسی قابلیت امولسیون سازی سویه ها، شاخص E24 می باشد. در این آزمایش کروژن یا هگزا دکان به محلول حاوی بیوامولسیفایر افزوده می شود و به مدت ۱ دقیقه هم زده می شود. سپس محلول ۲۴ ساعت در یک لوله ساکن باقی می ماند و بعد از گذشت این زمان، ارتفاع امولسیون تولید شده به کل ارتفاع محلول در لوله سنجیده شده و به عنوان شاخص E24 در نظر گرفته می شود.

در مواردی که آزمایش E24 کارآمد نباشد، بخصوص در بهینه سازی شرایط از آزمایش توانایی امولسیون سازی استفاده می شود. در این آزمایش ابتدا ۲ ml از محیط کشت مایع در یک لوله ی شیشه ای ۱۵ ml ریخته می شود. سپس ۰/۲ ml از هیدروکربن n-hexadecane به نمونه افزوده می شود و ترکیب به مدت ۱۰ ثانیه به خوبی هم زده می شود. بعد از ۲ دقیقه لایه امولسیون تشکیل شده، مشاهده می شود. در این صورت آزمایش با افزودن مقادیر بیشتر هیدروکربن تکرار می گردد. توانایی امولسیون سازی به بیشترین مقدار هیدروکربنی گفته می شود که بتواند در ۱ ml از محیط کشت آبیکی تشکیل امولسیون دهد [۴۹].

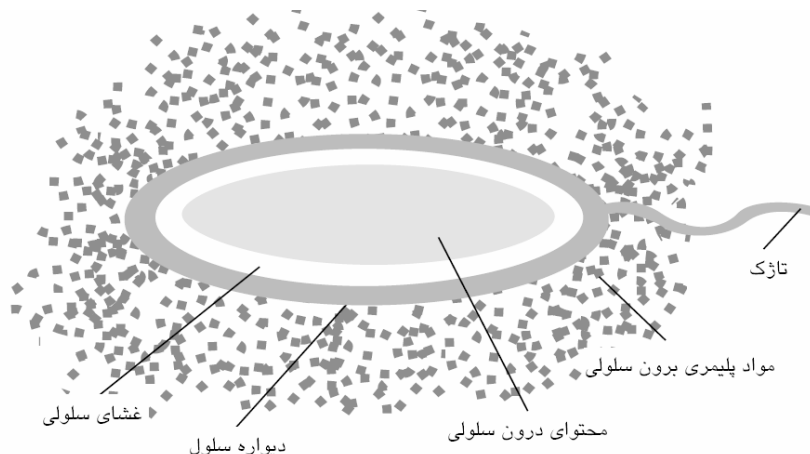
### ۲-۲-۴- بیوفیلیم ها

بیوفیلیم ها مجموعه ای از میکروارگانیزم ها هستند که توسط مواد پلیمری برون سلولی (شکل ۲) احاطه شده اند و به سطوح می چسبند. مهم ترین کاربرد بیوفیلیم ها کاهش نفوذپذیری می باشد.

مراحل توسعه ی بیوفیلیم ها به صورت زیر است :

۱- آماده سازی سطح: بلافاصله بعد از تماس سیال با سطح، مولکول های آلی به سطح می چسبند. این مواد بار سطح را خنثی می نمایند؛ چرا که بار سطح می تواند دافع باکتری ها شود.

۲- چسبیدن باکتری ها: باکتری های معلق در سیال توسط جذب الکترو استاتیک و نیروهای فیزیکی به سطح می چسبند. برخی از این جذب ها، در اثر مواد پلیمری تولیدی سلول ها به جذب دائم تبدیل می شوند.



شکل ۲ - ساختار یک میکروارگانیسم [۷۸]

۳- تولید مواد پلیمری برون سلولی: این مواد از نوع پلیمرهای پلی ساکاریدی هستند و علاوه بر کمک در پایداری جذب، نقش مهمی در جذب مواد مغذی نایاب از سیال حاوی اسلاگ میکروبی دارند. با تجمع مواد مغذی، رشد سلول ها و تکثیر آنها آغاز می شوند.

۴- ایجاد توده ی ثانویه: در کنار به دام افتادن مولکول های مواد مغذی، شبکه ی مواد بیوپلیمری با بهره گیری از برهم کنش های فیزیکی و الکترواستاتیکی سایر سلول های مواد مغذی را به دام می اندازند.

۵- تشکیل بیوفیلم نهایی: در پایان بیوفیلم با ساختاری پیچیده تشکیل می شود [۷۸].

می توان با استفاده از مدل سازی، میزان رشد بیوفیلم را با گذشت زمان بدست آورد [۷۹].

توسعه ی بیوفیلم علاوه بر اصلاح پروفایل نفوذ پذیری، مزیت دیگری نیز دارد. این مزیت در مسائل محیط زیستی کاربرد دارد. بیوفیلم می تواند به عنوان سد بیولوژیکی و به صورت بیوتجزیه گر در غربال و تغییر ترکیب شیمیایی آلودگی ها در سیالات مخازن، بخصوص مخازن آب زیرزمینی موثر شود [۸۰].

مهم ترین عوامل تاثیر گذار بر تشکیل بیوفیلم به صورت زیر اند:

۱- تاثیر جریان : سرعت جریان بر ضخامت بیوفیلم تشکیل شده تاثیر می گذارد. به عنوان مثال، با سرعت  $2 \frac{ft}{sec}$

در یک لوله، ضخامت بیوفیلم ۱۲۵ میکرون و با افزایش سرعت به  $5 \frac{ft}{sec}$ ، ضخامت بیوفیلم ۵۰ میکرون می

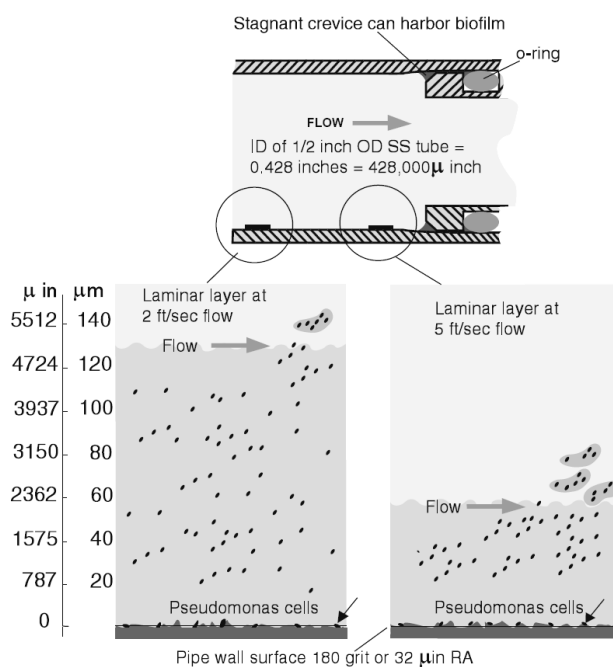
گردد (شکل ۳).

۲- دسترسی به مواد مغذی: برخی نمونه ها قابلیتی به نام قابلیت حرکت دارند که قادرند در اثر وجود گرادیان هایی همچون گرادیان مواد مغذی به سمت مواد مغذی با غنای بیشتر نمایند.

۳- زبری سطح در دسترس جهت تشکیل بیوفیلم: این عامل تاثیر اندکی بر تشکیل بیوفیلم دارد، چرا که ساختار زبری سطوح (عمق زبری) در مقایسه با ضخامت بیوفیلم بسیار ناچیز می باشد.

میزان دسترسی لایه های بیوفیلم به اکسیژن به مقدار ۳۰ تا ۴۰ میکرون از سطح تماس بیوفیلم با اسلاگ تزریقی تا عمق آن می باشد [۷۸].

۴- محتوای مواد مغذی محیط. در صورت فقدان منبع کربن و نیتروژن، جرم زنده به صورت یک بیوفیلم در شکل میکروکلونی ها در می آید. در صورت غنای مواد مغذی، ساختار الیافی<sup>۱</sup> برای بیوفیلم ایجاد می شود. همچنین نتایج تحقیقات نشان می دهند تغییر میزان مواد مغذی می تواند این دو ساختار را به یکدیگر تبدیل نماید [۸۱].



شکل ۳- تاثیر سرعت جریان بر ضخامت بیوفیلم [۷۸]



### ۳-۲- انتقال بیوکلوئیدها در محیط متخلخل

مهم ترین عامل موثر بر کارآمدی عملیات ازدیاد برداشت میکروبی نفت، امکان نفوذ میکروارگانیزم ها به عمق بسترهایی است که تزریق در آنها انجام می شود. این ادعا، نتیجه ی بسیاری از مطالعات انجام شده در این زمینه است.

### ۳-۲-۱- پدیده های انتقال بیوکلوئیدها در محیط متخلخل

برای شناخت بهتر این مسئله مهم بایستی با دیدی عمیق و ریشه ای به آن نگریست. نخست باید پدیده های انتقال بیوکلوئیدها مورد بررسی قرار گیرد:

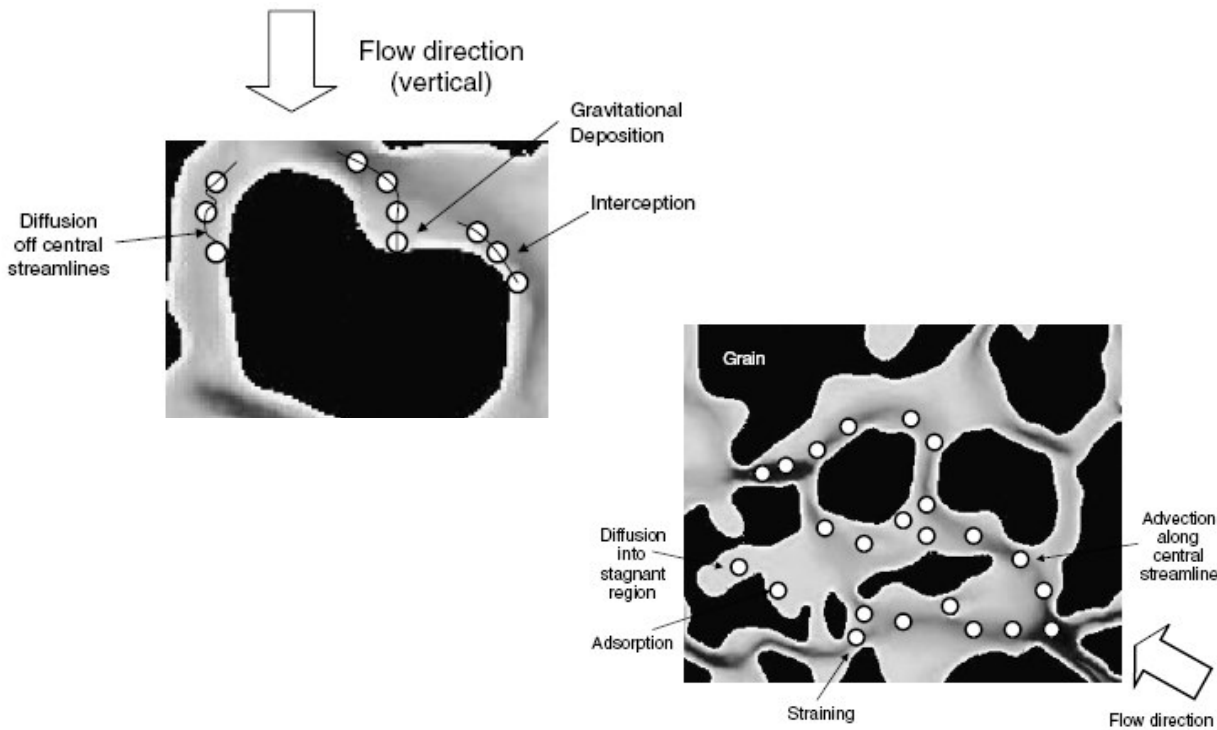
۱-نفوذ<sup>۱</sup>: برهم کنش های تصادفی بین مولکول ها و ذرات، منجر به پیدایش حرکت های بروانی می شود که این پدیده باعث دیفیوژن ذرات می شود. پدیده ی دیفیوژن ناشی از حرکت بروانی، با عکس جرم ذرات متناسب است، در نتیجه احتمال انتقال مواد محلول<sup>۲</sup> از مواد کلوئیدی در مسیر جریان بیشتر است.

۲-Exclusion: به پدیده ی باقی ماندن کلوئیدها در دهانه ی گلوگاه ها، در اثر بزرگی قطرشان نسبت به قطر گلوگاه ها اطلاق می گردد.

آستانه ی عبور کلوئیدها از گلوگاه ها به اختلاف قطر گلوگاه ها و کلوئیدها بستگی دارد. Keller ادعا کرده است اندازه ی گلوگاه ها برای عبور سلول ها حداقل باید دو برابر اندازه سلول ها باشد [۸۲]. Wren و Updegraff این نسبت را ۱/۵ پیشنهاد نموده اند [۸۳].

۳-Interception: به پدیده ی باقی ماندن ذرات در اثر تغییر راستای خطوط جریان ناشی از پیچاپیچی مسیر عبور اطلاق می شود. با افزایش سرعت اثر این پدیده کم می گردد؛ همچنین با کاهش تخلخل زیر ۱۰ درصد اثر این پدیده بیشتر می گردد.

۴-Advection: به حرکت بیوکلوئیدها در راستای خطوط جریان گفته می شود. این مکانیزم می تواند پراکندگی مواد محلول و کلوئیدها را به وجود می آورد که ناشی از ناهمگنی محیط و پیچاپیچی مسیرها می باشد. پراکندگی برای کلوئیدها نسبت به مواد محلول اهمیت بیشتری دارد.

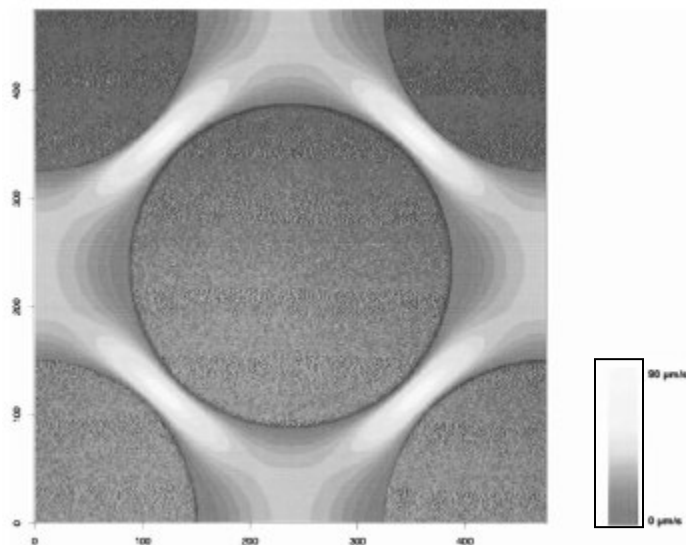


شکل ۴ - نمایش تصویری فرآیندهای انتقال جریان در جریان اشباع [۸۲]

۵- اثر افزایش سرعت<sup>۱</sup>: تفاوت بین ابعاد کلئیدها جهت عبور در محیط هایی با نفوذپذیری های مختلف، مهم تر می گردد. در چنین محیط هایی، کلئیدهای کوچکتر از بسیاری از گلوگاه ها عبور می کنند، درحالی که ابعاد بزرگتر کلئیدها از برخی کانال ها و آن هم تنها از مرکز کانال عبور خواهد نمود، عبور کلئیدهای بزرگتر از مرکز کانال ها منجر به افزایش سرعت آنها به میزان ۳-۱/۵ برابر کلئیدهای کوچکتر می شود. چنین اثری به اثر افزایش سرعت مشهور است. زمان اقامت کلئیدها<sup>۲</sup> در کانال های با ابعاد مختلف و هندسه ی متفاوت، متغیر است. در کانال های نازک تر، زمان اقامت کمتر و توزیع آن فشرده تر است، درحالی که در کانال های بزرگتر زمان اقامت و پراکندگی آن بیشتر است. همچنین با پیچیده شدن هندسه ی کانال ها پراکندگی بیوکلئیدها بیشتر می گردد [۸۲].

1 - Velocity Enhancement  
2- Residence time

همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود، خطوط موجود در ناحیه کانال، نمادی از خطوط جریان کلوئیدها هستند. در وسط کانال، این خطوط طول بیشتری دارند که نمایانگر سرعت بیشتر کلوئیدها در این قسمت ها نسبت به نواحی نزدیک دیواره ماتریکس می باشد.



شکل ۵- خطوط کانتور سرعت سیال محاسبه شده توسط روش LB در میکرومدل همگن [۸۲]

۶-Collision: مجموعه سه پدیده ی interception، دیفیوژن و رسوب در اثر جاذبه، احتمال تجمع ذرات به صورت یک تجمع کلوئیدی را بر سطح فراهم می سازند. پدیده رسوب جاذبه ای، مستقل از سرعت است. همچنین با افزایش اندازه ی ذرات حساسیت دیفیوژن کاهش می یابد و برای ذرات کوچکتر از ۱ میکرون، پدیده interception و رسوب جاذبه ای نادیده انگاشته می شود [۸۳].

۷-Motility: این توانایی باکتری ها به قابلیت تحرک آنها در محیط گفته می شود. جهت بررسی تاثیر این عامل بر قابلیت نفوذ باکتری ها در محیط متخلخل Camper و همکارانش در سال ۱۹۹۳ مطالعه را به انجام رساندند. در این مطالعه چند نمونه ی با قابلیت حرکت<sup>۱</sup> و بدون تحرک<sup>۲</sup> در یک مغزه تزریق شدند، تا این عامل بررسی گردد. سرعت حرکت نمونه ها با استفاده از تحلیل حرکت آهسته<sup>۳</sup> نمونه ها بود که در فازهای متحرک، جهت شناسایی علامت گذاری شده بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که سلول های خوب رشد

1 -motile  
2- nonmotile  
3 -slow-motion

نیافته<sup>۱</sup> باز یافت کمتری دارند. همچنین باکتری های بدون قابلیت تحرک کمترین ضریب جذب را دارا بودند. در ضمن با افزایش سرعت، نسبت سلول های باز یافت شده (c) به سلول های ورودی (C)، افزایش می یابد. همچنین مهم ترین نتیجه این بود که با وجود سرعت تزریق، تحرک خود سلول ها یا motility و اندازه ی آنها اهمیتی ندارند [۸۲].

### ۲-۳-۲- محاسبات نفوذ

یک پارامتر کمی جهت ارزیابی میزان نفوذ به محیط متخلخل، زمان نفوذ می باشد که زمانی است که باکتری طول محیط را می پیماید. همچنین نرخ نفوذ حاصل تقسیم طول مغزه به زمان نفوذ باکتری می باشد. نرخ نفوذ برای محیط های پرتراوا (نفوذپذیری بالاتر از ۱۰۰۰ میلی داریسی) مستقل از طول مغزه و نفوذپذیری است [۸۵].

نتایج تحقیقات نشان می دهند می توان بین غلظت اولیه ی سلول ها در هنگام تزریق و غلظت آنها در عمق مغزه، با استفاده از احتمال باقی ماندن سلول ها، رابطه ای برقرار نمود [۸۶].

### ۲-۳-۳- عوامل تاثیر گذار بر نرخ نفوذ

۱- نوع، شکل، اندازه و غلظت باکتری ها: عموماً باکتری های با قابلیت تحرک<sup>۲</sup>، در مقایسه با انواع بدون تحرک، نرخ نفوذ سریع تری دارند [۸۵]. همچنین اندازه باکتری ها و ویژگی های سطحی باکتری ها، در عبور آنها مهم است [۸۴]. یافته ها نشان می دهند استفاده از غلظت متوسط باکتری ها برای تزریق مناسب تر می باشد [۸۶]. غلظت بالای اسلاگ تزریقی از نظر تعداد میکروب ها منجر به فلوکوله شدن جرم زنده ی میکروارگانیسم ها به یکدیگر و بسته شدن مجاری می گردد. همچنین شکل کروی باکتری ها نسبت به انواع میله ای آنها، مناسب ترین شکل برای نفوذ می باشد [۷۵ و ۸۷].

۲- شرایط مختلف رشد باکتری ها، بر نفوذ آنها تاثیر گذار است، مثلاً اسپور میکروب ها<sup>۳</sup> سریع تر از خود میکروب ها حرکت می کنند.

1 -starve  
2- motile  
3- Spore

۳- با افزایش تخلخل و حجم فضاهای خالی<sup>۱</sup> محیط متخلخل، امکان رشد بیشتری برای نمونه‌ها فراهم می‌شود و لذا زمان عبور از محیط به علت افزایش تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد.

۴- نفوذ پذیری محیط عبور.

۵- پیچاپیچی مسیر عبور.

۶- گرادیان‌های غذایی موجود در محیط.

۷- با افزایش طول محیط متخلخل، به علت کاهش غلظت باکتری‌ها و نه به علت کاهش سرعت آنها، زمان حضور باکتری‌ها در خروجی، افزایش می‌یابد [۸۵].

۸- ویژگی‌های سطحی محیط متخلخل، عبور باکتری‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهند. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از: زبری، انرژی سطح، پتانسیل زتا و بار سطحی [۸۴].

۹- نتایج تحقیقات نشان می‌دهند باکتری‌ها کندتر از محصولات شان حرکت می‌کنند. حال ممکن است این ایده به ذهن‌ها خطور نماید که محصولات بیولوژیکی بیرون تولید گردند و به محیط تزریق شوند، اما حضور سلول می‌تواند در محل محیط متخلخل، تولید محصول نماید که سازگاری بیشتری با محیط داشته باشد، ضمن اینکه محصولات آنها به تنهایی قادر به جابجایی نفت نیست [۸۸]. همچنین جرم زنده باکتری‌ها باعث افزایش گرانی اسلاگ تزریقی و جلوگیری از پدیده Fingering می‌گردد و می‌تواند به عنوان عامل مسدود سازی استفاده شود.

۱۰- Sharma و همکاران در سال ۱۹۸۵ در تحقیقی پیرامون تغییر دائمی و موقت بار سطحی، بیان داشتند مواد شیمیایی از جمله پیروفسفات سدیم می‌توانند می‌توانند بار سطحی را با تغییر پتانسیل زتا به صورت دائمی و موقت تغییر دهند و از این رو با حضور مواد شیمیایی، انتقال باکتری‌ها تسهیل می‌گردد. در این راستا برهم کنش الکترواستاتیک مهم‌ترین عامل در باقی ماندن بیوکلونیدها در محیط متخلخل است [۸۹].

جهت سهولت نفوذ باکتری‌ها به عمق مخزن، برخی پیشنهادات ارائه شده است:

۱- استفاده از باکتری‌های رشد نیافته<sup>۲</sup> که مواد مغذی دریافت نکرده‌اند، اسپور میکروب‌ها و سویه‌های بسیار کوچک<sup>۳</sup> یا UMB که ابعاد این نمونه‌ها ۰/۲ تا ۰/۴  $\mu m$  می‌باشند [۷ و ۹۰]. Macleod و همکاران در سال

---

1- Pore volume  
2- Starved  
3- Ultra Micro Bacteria

۱۹۸۸ در مطالعه ای به بررسی تاثیر باکتری های به شکل اسپور و طبیعی<sup>۱</sup> در نفوذ به مغزه ها جهت مسدود سازی محیط متخلخل پرداختند. نتایج پژوهش آنان نشان داد که باکتری های بالغ تا کمتر از ۱٪ نفوذ پذیری را نسبت به نفوذپذیری پیش از تزریق کاهش می دهند. چنین باکتری هایی در ابتدای مغزه تجمع بیشتر می یابند و به مناطق عمیق تر مغزه کمتر نفوذ می کنند. در حالی که باکتری های رشد نیافته می توانند به عمق مخزن نیز نفوذ نمایند. البته آنها میزان بیوفیلم کمتری نیز تولید می نمایند. چنین باکتری هایی در صورت وجود مواد مغذی می توانند در محیط مخزن رشد نمایند و متابولیت هایی از جمله بیوپلیمر را تولید کنند. امکان رشد این نمونه ها در عمق مخزن مهم است، چرا که نتایج تحقیقات نشان می دهند میکروب های بزرگ تر تاثیر مطلوب تری بر عملکرد مسدودسازی دارند [۹۱ و ۹۲].

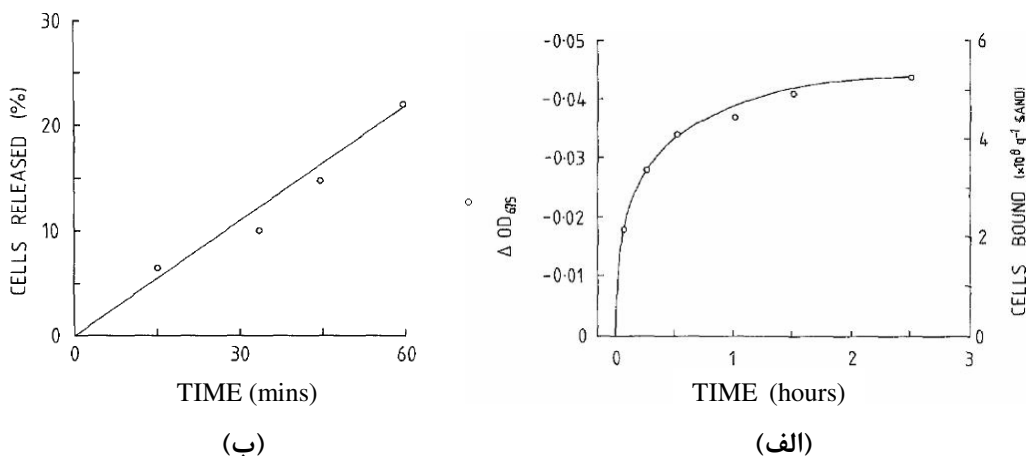
این تحقیق ایده ای را در ذهن تداعی می کند که برای افزایش کارایی مسدود سازی انتخابی میکروبی در اعماق مخزن، باکتری های رشد نیافته همراه با مواد مغذی به مخزن تزریق شوند. در این صورت اسلاگ تزریقی بیشتر به عمق مخزن نفوذ می کند و با شروع رشد در آنجا، کارایی مسدود سازی را با افزایش ابعاد میکروب ها و تولید بیوپلیمر افزایش می دهد.

۲- روش دیگر تحریک میکروب های بومی مخزن می باشد. با تحریک میکروب ها، تعداد آنها، افزایش می یابد که در یک گزارش ۱۰ تا ۳۸ درصد افزایش تعداد بیان شده است [۷ و ۹۰]. تحریک باکتریهای موجود در مخزن بر منحنی های نفوذپذیری مخزن تاثیر می نهد. Abu El Ela در بیان نتایج یک پژوهش بیان داشت که رشد میکروب های همزاد بعد از قرارگیری آنها در محیط رشد بهتر می گردد، همچنین نفوذپذیری نسبی نفت افزایش یافته و نفوذپذیری نسبی آب کاهش می یابد و نقاط تقاطع نمودارهای نفوذ پذیری تغییر نموده و ترشوندگی مخزن نیز تغییر می نماید [۹۳].

#### ۲-۳-۴- جذب

جهت بررسی انتقال بیوکلئید ها، به همراه مطالعه ی نفوذ، بایستی مسئله جذب آنان نیز بررسی شود؛ چرا که فرآیندهایی همچون تشکیل بیوفیلم ها و تجمع اجرام زنده باکتری ها بر سطح دانه های ماتریکس از نتایج جذب می باشند. Shale و Kumarasingham در سال ۱۹۸۷ جذب باکتری ها به دانه های ماسه را

بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که مرحله جذب به صورت تابع فروندلیش (شکل ۶ الف) و مرحله برگشت پذیری جذب به صورت تابع لانگ میور است (شکل ۶ ب).



شکل ۶- (الف) میزان جذب سلول ها با گذر زمان، (ب) میزان جدایش سلول ها با گذر زمان [۹۴]

همچنین در حالت کلی جذب باکتری ها برگشت پذیر و وابسته به زمان است. تولید برخی مواد چسبنده توسط باکتری ها ممکن است در پایداری جذب باکتری ها موثر باشد. مثلاً تولید پلیمر آگزو پلی ساکارید، باعث برگشت ناپذیر شدن جذب می گردد. چسبیدن سلول ها به سطح دو مرحله دارد:

- ۱- تماس اولیه سطح سلول با سطح ماتریکس محیط متخلخل که بستگی به نیروهای اینرسی، هیدرودینامیکی و کلوئیدی دارد. جذب در این مرحله برگشت پذیر است.
- ۲- جذب برگشت ناپذیر سلول ها به سطح که با تولید پلی ساکارید های برون مولکولی فراهم می شود [۷۴].

#### ۴-۲- قابلیت مسدود سازی میکروارگانیزم ها

میزان تغییرات خواص پتروفیزیکی و شدت تغییرات در یک جهت، مفهوم ناهمگنی در آن جهت را در بر دارد. این مفهوم در ابعاد مختلف قابل بررسی می باشد؛ در ابعاد دانه های محیط متخلخل، مغزه های نمونه گیری شده از مخزن، لایه های مختلف یک مخزن و مناطق مختلف یک منطقه یا میدان نفتی. در تعریف این مفهوم می توان از نحوه ی توزیع تخلخل و نفوذپذیری در محیط متخلخل استفاده می شود.

مهم ترین نوع ناهمگنی، ناهمگنی از نظر نفوذپذیری می باشد. غیر از مسائلی که ناهمگنی مخازن در زمینه های اکتشاف (نظیر پیچیده شدن تعیین مشخصات پتروفیزیکی مخازن) و حفاری (همچون تغییر متناوب گل و ابزارات حفاری با تغییر ویژگی لایه ها در اثر ناهمگنی) ایجاد می نماید، می تواند در زمینه ی تولید نیز مشکل ساز شود. یکی از این مشکلات، افزایش تولید آب می باشد. امروزه به طور متوسط به ازای تولید هر بشکه نفت، ۳ بشکه آب تولید می شود و گاهی تولید آب از مناطق پرتراوا تا مرز ۹۰ درصد تولید نیز می رسد [۳ و ۴]. از طرف دیگر ناهمگنی، کارایی عملیات جارو کردن<sup>۱</sup> را در جابجایی نفت توسط سیال تزریقی به شدت کاهش می دهد، زیرا در کارآمدی مطلوب عملیات جابجایی<sup>۲</sup>، کارایی جابجایی میکروسکوپی و ماکروسکوپی، هر دو اهمیت دارند که مورد دوم تحت تاثیر ناهمگنی مخازن قرار دارد [۴]. در مخازن با ناهمگنی بالا، سیال تزریقی تنها از مناطق پرتراوا عبور نموده و در عمل، نفت موجود در مخازن کم تراوا در مخزن باقی می ماند.

تاکنون راه حل های مختلفی جهت فائق آمدن بر مسئله ی ناهمگنی و افزایش کارایی روش های ازدیاد برداشت و کاهش تولید آب ارائه گردیده اند. روش اول شناسایی و سیمانکاری به منظور بستن لایه های پرتراوا<sup>۳</sup> در عملیات Work over است که موفقیت این روش در گرو میزان پیوستگی همگنی نفوذپذیری در طول لایه ها (عدم ناهمگنی در راستای افقی) و نفوذپذیری عمودی کم لایه ها می باشد. اما در ابعاد میدانی<sup>۴</sup>، این شرایط محقق نمی شود و جریان Cross flow از تاثیر این روش می کاهد. راه حل دیگر، مسدود سازی انتخابی<sup>۵</sup> مناطق با نفوذپذیری بالا با بهره گیری از مواد شیمیایی و بیوشیمیایی مختلف هستند [۴]. جهت مسدود سازی مناطق پرتراوا، روش های مختلفی وجود دارد:

۱- بهره گیری از ذرات: کارایی این روش به قطر ذرات و مکان آنها در محیط متخلخل بستگی دارد. این ذرات بایستی بر اساس هندسه و قطر حفرات خالی قادر باشند تا به عمق محیط متخلخل نفوذ نمایند، به طوری که نسبت قطر ذرات به قطر ابعاد محیط متخلخل عاملی تاثیر گذار است.

۲- فوم ها: در گذشته استفاده از این مواد قابل ملاحظه بود، اما در حال حاضر برای کنترل جابجایی در تزریق گاز کاربرد دارند. در این زمینه تحقیقات آزمایشگاهی مهمی صورت پذیرفته است.

- 
- 1- Sweep
  - 2- Displacement
  - 3- Cement off
  - 4- Field
  - 5- Selective plugging



۳- امولسیون ها: این مواد قادرند توانایی عبور سیال را کاهش دهند. انتقال این مواد به مناطق پرتراوا، در گرو نوع امولسیون است. مواد شیمیایی سازنده ی این ترکیبات که گرانیوی بالاتری دارند، در این امر مطلوب ترند. یکی از معایب بزرگ این مواد گران بودن قیمت آنها می باشد [۹۵]

۴- مواد شیمیایی و محصولات بیولوژیکی میکروارگانسیم ها: در این راستا می توان به پلیمرها، بیوپلیمرها و ژل های کلوئیدی یا CDG<sup>۱</sup> اشاره نمود. استفاده از پلیمرها رایج ترین روش جهت مسدود سازی می باشد.

۵- رسوب بیولوژیکی: از معایب مسدود سازی با استفاده از بیوپلیمرها، ناپایداری آنها در مقابل تجزیه ی بیولوژیکی، حساسیت به حرارت و مقاومت مکانیکی پایین در مقابل افت فشار می باشند؛ در این صورت نوعی مسدود سازی بیولوژیکی قابل اجرا است که در اثر رسوب مواد غیر آلی در محیط متخلخل رخ می دهد. در این روش، فرایندها و محصولات بیولوژیکی باعث رسوب مواد غیر آلی از جمله کربنات کلسیم می گردند و رسوب این مواد منجر به کاهش تخلخل و تراوایی محیط متخلخل می گردد. به عنوان مثال، گونه ی *Bacillus Pasteurii* در محیطی شامل اوره و کلرید کلسیم رشد می یابد و تولید آنزیمی می نماید که باعث افزایش pH می گردد و همین امر، منجر به رسوب کربنات کلسیم می گردد.

۶- جرم زنده میکروارگانسیم ها: در این روش اجرام زنده باکتری ها با تشکیل بیوفیلم، منجر به مسدود سازی انتخابی مناطق پرتراوا می گردند. در دهه ی ۴۰، قابلیت میکروارگانسیم ها در مسدودسازی انتخابی مناطق پرتراوا کشف گردید. کارایی این روش به عوامل مختلفی بستگی دارد؛ از جمله:

- انتقال باکتری ها به محل های هدف، که قرار است مسدود گردند. در این زمینه به عوامل موثر بر نفوذ باکتری ها رجوع شود. نتیجه ی عدم نفوذ باکتری ها به عمق مخزن مسدود سازی ناخواسته قسمت های ورودی مخزن و به بن بست رسیدن اجرای عملیات می باشد. در شعاع های کمتر نفوذ، تولید بیوفیلم بر سطح دانه های محیط متخلخل، بر نفوذ پذیری محل عبور اسلاگ تزریقی، تاثیر سوء می نهد [۷۶].
- غلظت اسلاگ میکروبی: غلظت بالای اسلاگ میکروبی منجر به فلوکوله شدن اجرام زنده میکروارگانسیم ها به یکدیگر و بسته شدن مجاری می گردد.
- قابلیت رشد باکتری ها به صورت درون محل [۹۵].
- پایداری بیوفیلم تشکیل شده مقابل افزایش فشار و گذر زمان.
- محیط کشت: تغییر محیط کشت بر توزیع کاهش نفوذپذیری و میزان آن تاثیرگذار است [۹۶].

- تاثیر مواد افزودنی همراه تزریق باکتری ها: بهره گیری همزمان از پلیمرها به همراه اسلاگ میکروبی در تزریق، کارایی مسدودسازی میکروبی را افزایش می دهد [۹۷].
  - برهم کنش سایر گونه ها بر عملکرد مسدودسازی نمونه های مورد نظر قابل توجه است. حضور گونه های ریزتاژک داران آغازی (nanoflagellate) یا آمیب هایی که از باکتری های چسبیده به سطح تغذیه می نمایند، مسدودسازی نمونه های تک یاخته ای را به تاخیر می اندازند. این تغذیه پیوندهای باکتری ها را سست می نماید و در نتیجه باعث جدا شدن باکتری ها از سطح می گردد. این مسئله به ظاهر باعث افزایش نفوذپذیری می گردد، اما چنانچه باکتری های جدا شده به نقاط حساس تری همچون قسمت های باریک تر گلوگاه ها بروند، ممکن است بیشتر از گذشته نفوذپذیری را کاهش دهند [۹۸].
- در بین روش های بالا مسدود سازی با استفاده از پلیمرها، بیوپلیمرها و جرم زنده باکتری ها رایج ترین روش ها هستند. درباره مقایسه آنها با یکدیگر باید گفت که در مقیاس میدانی، هزینه های تزریق مواد شیمیایی و بیوشیمیایی بالاست و امکانات درون چاهی نیاز است تا این مواد فقط به مناطق پرتراوا هدایت گردند. از سوی دیگر، زمان ژلاسیون مواد CDG و نیز تغییر خواص رئولوژیکی پلیمرها و بیوپلیمرها، باید طوری تنظیم گردند تا مواد شیمیایی در مخزن، در مکان مناسب قرار گیرند. از مزایای جرم زنده باکتری ها می توان به موارد زیر اشاره نمود:
- ۱- انتقال آسان اسلاگ تزریقی به لایه ی پرتراوا نسبت به اسلاگ مواد شیمیایی که گرانروی های بالاتری دارند.
  - ۲- سادگی اجرای عملیات: عدم وجود مسائلی مانند زمان ژلاسیون، تغییر خواص رئولوژیکی با تغییرات سرعت.
  - ۳- مقرون به صرفه بودن اجرای عملیات از نظر اقتصادی در زمینه های رشد میکروب ها و اجرای عملیات [۴].
- اما از سوی دیگر، تاثیرگذاری استفاده از پلیمرها و بیوپلیمرها در مسدود سازی بسیار بیشتر از جرم زنده باکتری هاست؛ به طوری که در مطالعه ای مشخص شده است که قابلیت مسدود سازی در اثر تولید پلی ساکارید، ۱۰ برابر بیشتر از استفاده از سلول های بدون تولید پلی ساکارید است [۷۴]. همچنین یکی از دلایلی که محققین را به جای بهره گیری از جرم زنده ی میکروارگانیسم ها در مسدود سازی میکروبی به سمت تولید بیوپلیمرها جهت این امر، هدایت می نماید این است که جهت کارآمدی جرم زنده در مسدود سازی میکروبی لازم است شعاع متوسط حفرات، حداقل ۱/۵ تا ۲ برابر بزرگتر از قطر باکتری ها باشند، حال از آنجایی که در

برخی از محیط های متخلخل قطر باکتری ها بزرگتر از شعاع متوسط حفرات اند، دیگر استفاده از جرم زنده کارآمد نیست و بیوپلیمرها به کار گرفته می شوند [۶۹].

مسدود سازی میکروبی منجر به تغییر وضعیت شرایط اکسیژن در دسترس از هوای بی هوای می گردد. در شرایط جدید، فعالیت اکسیداسیون بی هوای باکتری های کاهش دهنده ی سولفات در pH حدود ۸، منجر به رسوب کربنات می گردد. همچنین اکسیداسیون هوای منجر به انحلال کربنات ها می گردد. چنین فرآیندهایی، نفوذپذیری محیط متخلخل را کاهش می دهند [۹۸].

در تاثیر رشد میکروب ها بر تراوایی محیط متخلخل و مسدود سازی مناطق پرتراوا، ۲ راهبرد کلی مطرح است:

در راهبرد اول، مسدود سازی از طریق تشکیل توده های<sup>۱</sup> مجزا و ناپیوسته در مناطق مختلف محیط متخلخل انجام می پذیرد. در این راهبرد، ابتدا حفرات کوچکتر مسدود می گردند و نیز رشد میکروارگانیسم ها به شعاع حفرات و نه غلظت مواد مغذی در حفرات بستگی دارد. در این راهبرد میزان جرم زنده ی مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر کاهش تراوایی، به شدت وابسته به ناهمگنی محیط متخلخل است (با افزایش ناهمگنی، جرم زنده ی مورد نیاز کاهش می یابد).

در راهبرد دوم، رشد جرم زنده به صورت بیوفیلیم بر دیواره های محیط متخلخل منجر به مسدود سازی آن می گردد. این شبیه سازی، در محیط متخلخل با حفرات بزرگتر کاربرد دارد، زیرا مسدود سازی در این راهبرد از حفرات بزرگتر آغاز می شود.

راهبرد توده ای نسبت به راهبرد بیوفیلیم، به جرم زنده ی کمتری نیاز دارد تا حداکثر مسدود سازی انجام شود، زیرا در راهبرد توده ای، مسدود سازی از حفرات کوچکتر آغاز می شود. همچنین در هر دو راهبرد، ناهمگنی بیشتر منجر به صرف جرم زنده ی کمتر جهت مسدود سازی می گردد [۹۹].

نتایج مدل سازی رشد میکروب ها و مسدود سازی آنها در محیط متخلخل، توسط Thullner و همکاران در سال ۲۰۰۴ نشان داد که راهبرد رشد بر اساس تشکیل کلونی نسبت به راهبرد تشکیل بیوفیلیم جهت مسدود سازی، تطابق بیشتری با نتایج آزمایشگاهی دارد [۱۰۰].

کارکرد های میکروارگانیسم ها جهت مسدود سازی به ۳ دسته قابل تقسیم اند:

۱- کاهش نفوذپذیری: جرم زنده باکتری ها با توجه به راهبرد هایی که ذکر شد، می تواند نفوذپذیری مناطق پرتراوا را کاهش دهد و با همگن سازی محیط متخلخل سیال به مناطق کم تراوا نیز نفوذ می نماید و نفت آن مناطق هم برداشت می شود. در این بین مهم است که باکتری ها فقط به مناطق پرتراوا بروند. قابل ذکر است که بیشترین کاهش نفوذ پذیری در زمان های اولیه، در اوایل محوطه ی ورودی رخ می دهد [۱۰۱] و نیز با افزایش عمق از اثر مسدود سازی میکروبی کاسته می شود [۱۰۲]. بازیافت نفت از محیط متخلخل تا زمانی که نرخ کاهش نفوذ پذیری<sup>۱</sup> (PRF) به مقدار مشخصی نرسد رخ نمی دهد و هنگامی بیشتر می گردد که عملیات تزریق به منظور مسدود سازی، در چندین چرخه تکرار شود [۱۰۳].

عوامل موثر بر کارایی کاهش نفوذپذیری توسط باکتری ها عبارتند از: نوع محیط کشت باکتری ها، غلظت اسلاگ میکروبی و مواد مغذی، شوری، تغییر نرخ تزریق و به تبع آن تغییر مقاومت برشی، شوری، pH، منبع کربن و میزان نفت باقیمانده [۱۰۴].

۲- تغییر الگوی جریان Cross flow: در سال ۱۹۸۶، Raiders و همکاران، اثر مسدود سازی میکروبی را در تغییر الگوی این جریان بررسی کردند. نتایج پژوهش آنان نشان می دهد، مسدود سازی میکروبی، پس از تغییر الگوی جریان Cross flow، منجر به برداشت نفت لایه ی کم تراوا می گردد، به طوری که در آزمایشات این پژوهش، ۶۰ درصد تولید، از لایه ی کم تراوا گزارش شد. در این لایه میزان قابلیت تزریق<sup>۲</sup>، ۳ برابر گردید. همچنین در مقایسه با مدل های بدون جریان Cross flow، این نتیجه حاصل شد که این جریان نقش مهمی در مسدود سازی ایفا می نماید [۱۰۵].

۳- کنترل جریان آب: همان گونه که ذکر شد، یکی از این مشکلاتی که در اثر ناهمگنی مخازن ایجاد می شود، چنانچه این آب به مخزن تزریق مجدد گردد، باعث افزایش Water cut و کاهش تولید نفت می گردد. دفع<sup>۳</sup> آب تولیدی هم سالانه ۴۰ بلیون دلار هزینه زاست، از سوی دیگر حضور برخی عناصر همچون H<sub>2</sub>S در آب تولیدی، خطرات زیست محیطی به دنبال دارد [۴].

از آنجایی که محور دیگر این پایان نامه، علاوه بر تولید بیوسورفاکتانت و بررسی کارایی آن بر ازدیاد برداشت، آشکار سازی مسدود سازی میکروبی جهت رفع مشکل ناهمگنی است، در اینجا به مروری بر زمینه های تحقیقاتی انجام شده پیرامون مسدود سازی میکروبی پرداخته می شود:

1- Permeability Reduction Factor

2- Injectivity

3- Removal

- ۱- بررسی عملکرد مسدودسازی از نقطه نظر مکانیکی [۴].
  - ۲- تاثیر رشد میکروب ها بر میزان کاهش فضای محیط متخلخل [۱۰۶ و ۱۰۷].
  - ۳- تجزیه و تحلیل تغییرات فشار در اثر عملکرد بیوپلیمرها و جرم زنده تولیدی [۱۰۸].
  - ۴- مقایسه مکانیسم های مسدود سازی در اثر عملکرد جرم زنده و سایر روش ها [۱۰۹].
  - ۵- پیش بینی مقدار کاهش نفوذپذیری در اثر رشد جرم زنده در محیط متخلخل [۹۹] و نیز در اثر عملکرد مکانیسم مسدود سازی میکروبی [۱۰۶] و شبیه سازی این مکانیسم [۱۱۰].
- از پروژه های موفق مسدودسازی میکروبی در ابعاد میدانی، در مخازن مختلف، گزارشاتی ارائه شده اند، از جمله: مخازن Burbank Unit (۱۹۹۶) و Southern Vasser Vertz (۱۹۹۹) در Oklahoma، میدان Eunice Monument در New Mexico (۲۰۰۰) و مخزن North Blowhorn Creek (۲۰۰۱)، به عنوان موفق ترین پروژه ی مسدودسازی میکروبی [۴ و ۶].
- کارایی مسدود سازی میکروبی تا اندازه ایست که نتایج تحقیقات نشان می دهند در مسدود سازی شکستگی ها نیز می توان از این روش بهره جست [۱۱۱]

## ۲-۵- مدل سازی و شبیه سازی فرآیندهای ازدیاد برداشت میکروبی نفت

از آنجایی که روش MEOR در مقایسه با سایر روش ها جدیدتر بوده و کمتر مورد استفاده وسیع قرار گرفته است، لذا در زمینه مدل سازی و شبیه سازی فرآیندها نیز نسبت به سایر روش ها به طور گسترده مطالعاتی انجام نشده است و هنوز مشابه زمینه های تئوری و اجرایی این روش، در زمینه شبیه سازی و مدل سازی چنین فرآیندهایی نیز ابعاد ناشناخته زیادی وجود دارند، به طوری که با توجه به پیچیدگی فرآیندهای مذکور جهت ساده گشتن امکان شبیه سازی، برخی پارامترها نادیده انگاشته شده است و هنوز در مقالات متعددی اصلاحات مختلف جهت افزودن پارامترهایی که پیشتر مورد توجه نبوده اند یا حذف گردیده اند، ارائه می شود.

برخی شبیه سازی ها و مدل سازی های انجام شده در زمینه ازدیاد برداشت میکروبی نفت در جدول ارائه شده است.

جدول ۴- برخی شبیه سازی ها و مدل های ارائه شده در زمینه MEOR

ردیف	سال	محقق	مدل ارائه شده	منبع
۱	۱۹۹۰	Islam	پیش بینی جابجایی باکتری ها و واکنش های آنها در محیط مخزن	[۱۱۲]
۲	۱۹۹۱	Chang	پیش بینی تجمع میکروب ها و مواد مغذی	[۱۱۳]
۳	۱۹۹۳	Koch	مدل سازی منحنی خروج کلوئیدها از محیط متخلخل	[۱۱۴]
۴	۱۹۹۷	Chen	مدل سازی فرآیند مسدود سازی به صورت دو بعدی و دو فازی	[۱۱۵]
۵	۱۹۹۹	Chen	Upscale مدل سازی میکروسکوپی رشد بیوفیلم به مدل های ماکروسکوپی	[۱۱۶]
۶	۲۰۰۴	Zahari	شبیه سازی سازند نفتی Bokor در مالزی در عملیات MEOR	[۱۱۷]
۷	۲۰۰۶	Ghadimi	شبیه سازی روش ازدیاد برداشت میکروبی برای مخازن نفتی خلیج فارس	[۱۱۸]
۸	۲۰۰۶	Gang	مدل سازی انتقال بیوکلوئیدها در حفرات استوانه ای	[۱۱۹]
۹	۲۰۰۶	Iliuta	تکمیل مدل مسدود سازی بیولوژیکی در راکتورهای بیولوژیکی trickle-bed	[۱۲۰]
۱۰	۲۰۰۷	Kapellos	شبیه سازی پویایی و رشد بیوفیلم در محیط متخلخل	[۱۲۱]

نسبت به شبیه سازی های اولیه، پیشرفت هایی در این زمینه حاصل شده است، از جمله انجام شبیه سازی در محیط های متخلخل چند بعدی یا Pore Network نسبت به یک بعدی یا مجموعه ای از Parallel Pores و افزودن برخی پارامترها که در مدل های اولیه نادیده انگاشته شده بودند.

در سال ۲۰۰۶ Tufenkji، در تحقیقی به بررسی تقریباً ۱۵۰ مطالعه انجام شده در زمینه مدل سازی حرکت میکروب ها در محیط متخلخل پرداخت و در این مسیر به ارائه ی برخی مشکلات و نارسایی های این مطالعات پرداخت، از جمله: عدم وجود تئوری های پیش بینی کننده ی نرخ حرکت میکروب ها، عدم توجه به مسائلی مانند جذب تعادلی، فیلتراسیون، حذف جذب فیزیکی و جدایش میکروب های جذب شده به سطح. همچنین وی در زمینه اصلاح برخی مدل ها پیشنهاداتی را عرضه نمود [۱۲۲].

همچنین وی معتقد است برخی مدل های ارزیابی انتقال بیوکلوئیدها در محیط متخلخل از نظر ذاتی ضعیف و دارای محدودیت اند؛ مانند مدل فیلتراسیون کلوئیدی که فقط برای محیط های ایده آل جواب می دهد. همواره تلاش برخی محققین به منظور بهبود مدل های کلاسیک بوده است، از جمله ملاحظه ی توزیع

نرخ توقف و رسوب بیوکلوئیدها در محیط متخلخل یا توابعی که عملکرد بیوکلوئیدها را در عمق محیط متخلخل تعیین می نمایند. در ضمن جهت فهم بهتر این فرآیندها برخی مسائل لازم است که مورد بررسی بیشتر واقع شوند؛ از جمله: نحوه و میزان رشد بیوکلوئیدهایی که به سطح چسبیده اند، تاثیر بیومولکول های موجود در سطح بر جذب و باقیماندن بیوکلوئیدهایی که قرار است به سطح بچسبند و میزان پایداری جذب بیوکلوئیدها بر سطح [۱۲۳].

در زمینه شبیه سازی و مدل سازی مکانیسم های عبور کلئید ها و بیوکلوئید ها چندین پژوهش بنیادی به انجام رسیده است که در اینجا به اختصار به آنها پرداخته می شود.

### ۱- تئوری فیلتراسیون

تئوری فیلتراسیون در سال ۱۹۵۸ توسط Rajagopalan و Tien ارائه شده است. این تئوری فرآیندهای هیدرودینامیکی را که منجر به تماس بین ذرات و سطوح فیلتراسیون می شوند، مدل سازی می نماید و در تعریف خود از چندین پارامتر بهره می برد که مهم ترین آنها، ضریب کارایی فیلتراسیون ( $\eta$ ) می باشد. طبق تعریف،  $\eta$  عبارت است از احتمال اینکه یک کلئید در اثر فرآیندهای جاذبه، interception و یا دیفیوژن در تماس با یک دانه از محیط متخلخل قرار گیرد. پارامتر دیگر نرخ فیلتراسیون است که حاصل ضرب ضریب کارایی فیلتراسیون در تعداد کلئیدهایی است که به یک دانه نزدیک می شوند. تعداد این کلئیدها براساس غلظت و سرعت آنان بدست می آیند. یک پارامتر مهم در این مدل، ضریب جذب است، که این گونه تعریف می گردد: احتمال چسبندگی بین یک ذره و دانه های فیلتر به صورت یک جذب دائمی. این پارامتر می تواند مبین بر هم کنش های فیزیکی-شیمیایی در ابعاد دانه های مخزن<sup>۱</sup> باشد [۱۲۴].

ساختار محیط متخلخل بر نرخ فیلتراسیون و به تبع آن بر درصد بیوکلوئید خروجی از محیط متخلخل و افت فشار تاثیر قابل توجهی دارد. در این راستا عدد coordination یا پارامتر Z که همانا بیانگر میزان انحنای گلوگاه های پیوند دهنده ی حفرات می باشد بر ساختار محیط متخلخل تاثیر می نهد. مقادیر کم این پارامتر ( $Z=4$ ) برای گلوگاه های دایروی و مقدار بینهایت این پارامتر برای گلوگاه های Capillary tube تعریف

می گردند. هر چه میزان  $Z$  افزایش یابد، نرخ فیلتراسیون و در نتیجه مسدود سازی بیولوئیدها نیز بیشتر می شود [۱۲۵].

## ۲- تئوری DLVO

این تئوری مجموع پژوهش های Overbeek و verwey در سال ۱۹۴۸ در ادامه ی تلاش های Landau و Derjaguin در سال ۱۹۴۱ می باشد. با استفاده از تئوری DLVO، انرژی برهم کنش سطح- کلونید بدست می آید. انرژی نهایی حاصل جمع انرژی برهم کنش الکترواستاتیکی و واندروالسی است [۱۲۴].

مطابق تئوری DLVO، برهم کنش بین باکتری ها و سطوح abiotic شامل برهم کنش های Lifshitz - Van der waals، اسید و باز لوییس و الکترواستاتیک می باشند. میزان تاثیر این برهم کنش ها، به مشخصات فیزیکی و شیمیایی باکتری ها، سطح و محیط بستگی دارند. با افزودن مواد فعال کننده ی سطحی به علت تغییر خواص شیمیایی محلول، برهم کنش و در نتیجه جذب بین باکتری ها و سطح کاهش می یابد. از سوی دیگر با افزایش غلظت بیوسورفاکتانت، پتانسیل زتای نمونه های باکتری ها و سطح کاهش می یابد و در نتیجه احتمال ایجاد برهم کنش دفعی باکتری ها و سطح افزایش می یابد [۱۲۶].

## ۳- شبیه سازی جریان سیال در محیط متخلخل توسط روش Lattice-Boltzmann

جریان سیال به صورت دو بعدی در کانال های میکرومدل توسط Knutson در سال ۲۰۰۱ شبیه سازی گردید. روش این شبیه سازی، Lattice-Boltzmann یا LB بود، که روش محاسباتی کارآمدی است که جریان سیال را با شرایط مرزی پیچیده از قبیل عبور آن در محیط متخلخل شبیه سازی می نماید. این روش المان جمعی از یک سیال را با مجموعه ای از کلونیدها در نظر می گیرد که موقعیت شان توسط تابع توزیع سرعت آنها در هر نقطه از شبکه ی المان تعیین شده است. گام های زمانی مستقل بوده و ذرات کلونیدهای موجود در سیال هنگام حرکت سیال، با هم به صورت کلونیدی حرکت می نمایند، حتی در برخی موارد تحت نیروهای مشخص.



قوانین چسبندگی به گونه ای تعریف می شوند که حرکت ذرات در میانگین های زمانی از معادله ی ناویر-استوک تبعیت کند. شرط مرزی Bounce-back برای اعمال شرایط عدم چسبندگی به دیواره یا شرایط No-slip در حاشیه ی دانه ها اعمال می گردند [۱۲۴].

یک فناوری جدید، در تعیین پروفایل سرعت ذرات در محیط متخلخل، استفاده از ذرات PIV<sup>۱</sup> می باشد. این فناوری برای ابعاد ماکروسکوپی کارایی دارد، ولی می توان از این ذرات در ابعاد میکروسکوپی در مقیاس حفره ای<sup>۲</sup> نیز بهره جست. در این صورت می توان سرعت را در هر جای کانال های محیط متخلخل محاسبه نمود. این ذرات نسبت به پالس لیزر حساس می باشند و متناسب با سرعتی که دارند، وضعیت بازتاب متفاوتی را دارند. در عمل ابتدا پالس لیزر به سطح میکرومدل تابیده می شود. سپس همزمان با حرکت اسلاگ تزریقی حاوی ذرات  $\mu$ -PIV در محیط متخلخل، با استفاده از دوربین های CCD<sup>۳</sup> به طور همزمان ۲ تصویر از میکرومدل تهیه می شود. بعد از اجرای عملیات با بهره گیری از نرم افزار های آنالیز تصویر، میزان بازتاب نور از این ذرات تحلیل شده و سرعت آنها محاسبه می گردند [۱۲۷].

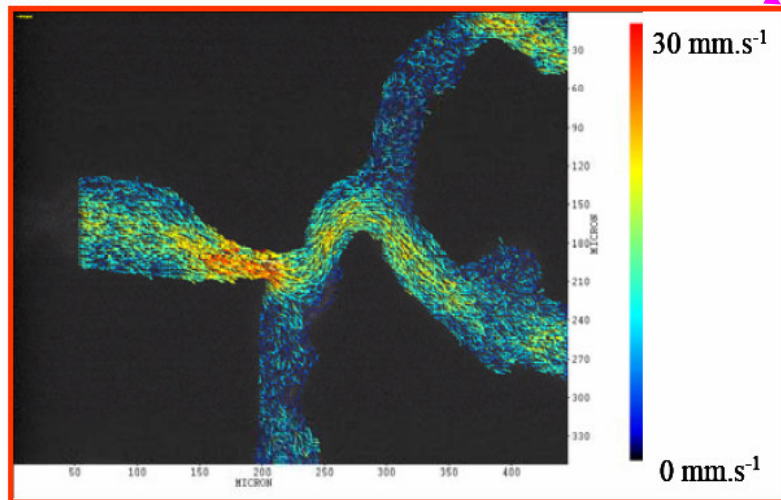
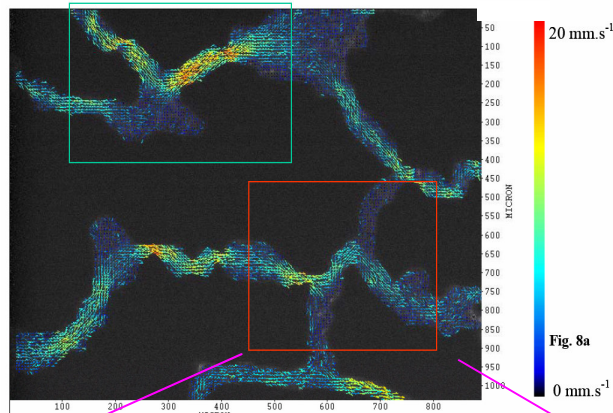
## ۲-۶- آشکار سازی پدیده های جریان سیالات در محیط متخلخل

از مهم ترین مباحث بین رشته ای، مطالعه ی جریان سیالات و فرآیندهای آنها، در محیط های متخلخل می باشد. از نمونه های بارز فرآیندهای محیط متخلخل، انتقال کلوئیدها (ذرات شیمیایی) و بیوکلوئیدها (میکروارگانیسم ها)، در چنین محیط هایی می باشند. آشکار سازی نحوه ی رخداد، کیفیت و کمیت سازی این فرآیندها با استفاده از ابزار مشاهده و پردازش تصاویر تهیه شده در حین آشکار سازی، تاثیر ویژه ای در افزایش کنترل چنین فرآیندهایی دارد. مغزه ها و ستون ها پر کاربرد ترین ابزار انجام مطالعات آزمایشگاهی در این زمینه می باشند. بزرگ ترین ویژگی مغزه ها، معرف بودن آنها به عنوان نمونه ای از محیط متخلخل واقعی می باشد. ستون ها نیز ممکن است به صورت مصنوعی، از طریق فشرده سازی و یا حرارت دادن خرده ذرات مواد مختلف (رسوبات با ابعاد مختلف از رس تا ماسه، ذرات محیط متخلخل مخازن آب، نفت و یا گاز، سیلیس، گلوله های کوچک و...) تهیه گردند. به منظور دارا بودن قابلیت آشکار سازی فرآیندها و مشاهده ی آنها،

---

1- Particle Imaging Velocimetry  
2- Pore scale  
3- Coupled-Charged Device

استفاده از مواد شفاف در ساخت ستون ها، چه در ذرات و چه در قالب، مطلوب تر است؛ اما در عمل فقط محیط متخلخل در تماس با جداره ی قالب قابل مشاهده است و سایر قسمت ها، غیر قابل رویت اند.



شکل ۷ - بهره گیری از ذرات PIV جهت تعیین سرعت ذرات [۱۲۷]

این مشکل در مورد مغزه ها حادثتر است. در این گونه موارد جهت مطالعه ی فرایندها و موقعیت قرار گیری جبهه ی سیال از روش های واسطه ای بهره می برند؛ همچون: روش های فوتونیکي مانند پرتونگاری اشعه های گاما، ایکس، پزیترون و MRI، شناساگرهای بیو شیمیایی، کلونیدهای دارای خاصیت فلورسنس و همچنین تغییر خاصیت و آنالیز سیال خروجی. اما حتی در صورت استفاده از روش های فوق، در حالت کلی

امکان آشکارسازی مستقیم فرآیندهای جریان سیالات در مغزه ها و ستون ها وجود ندارد و در نتیجه این دو ابزار، برای آشکارسازی فرآیندها مناسب نیستند [۳].

باید گفت وجود ذرات تیره در مقابل نور<sup>۱</sup> در سیال تزریقی، از کارایی نور مرئی (آشکارسازی توسط میکرومدل ها) می کاهد. البته در عمل سیالات تزریقی در مطالعات محیط متخلخل کمتر با چنین مشکلی مواجه اند. همچنین وجود ذرات پارامگنتیت بر کیفیت روش MRI تأثیر بد می نهد. در ضمن لازم به ذکر است که زمان آشکارسازی تصاویر در روش نورمرئی در حد کمتر از ثانیه است، در حالی که روش های MRI و اشعه x زمانی در ابعاد ثانیه تا دقیقه دارند و از این رو این روش ها تنها برای تهیه تصاویر محدود مناسب اند [۱۲۸]. مشکل دیگر مغزه ها و ستون ها، عدم امکان ایجاد الگوهای انتخابی جریان در محیط متخلخل می باشد. به عبارت بهتر چیدمان ویژگی های محیط متخلخل در مغزه ها و ستون ها از جمله نفوذپذیری، تخلخل، پیچاپیچی و... انتخابی نیست و محیط متخلخل مغزه ها و ستون ها، محیط تحمیلی از پیش طراحی شده و غیر قابل تغییر است. در ابعاد آزمایشگاهی، در مواردی نیاز می شود که الگوی جریان خاصی را مورد بررسی قرار داد که با بهره گیری از مغزه ها و ستون ها، چنین مسئله ای امکان ندارد، به طور مثال مطالعه ناهمگنی در پژوهش حاضر.

حال جهت رفع این مشکلات بهترین گزینه استفاده از میکرومدل ها می باشد. میکرومدل ها در زمینه های مختلف مهندسی نفت از جمله روش های ازدیاد برداشت نفت، مخازن شکسته، رفتار فازی سیالات مخزن و مطالعه جریان سیالات در محیط متخلخل کاربرد دارند [۳].

اولین میکرومدل در سال ۱۹۶۱ توسط KYTE و Mattex ساخته شد. سپس Davis و Jones در سال ۱۹۶۸ و نیز Lenormand و Bonnet در سال ۱۹۷۷ به ترتیب با بهره گیری از تکنیک های حکاکی به کمک نور و رزین روش های ساخت میکرومدل را بهبود بخشیدند. از آن پس این دو تکنیک اساس ساخت میکرومدل ها قرار گرفتند. در سال ۱۹۹۲، Buckley مزایا و محدودیت های میکرومدل ها را در مکانیسم های جریان چند فازی مورد بررسی قرار داد. Miller و Lowry در سال ۱۹۹۵ یک میکرومدل سه بعدی با الگوی جریان اتفاقی مشابه خلل و فرج مخزن جهت بررسی جابجایی غیر امتزاجی ساختند [۱۲۹].

# فصل سوم

## مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از ۲ اسلاگ میکروبی که یکی برگرفته از خاک آلوده به مواد نفتی (اسلاگ میکروبی ۱) و دیگری از خاک غیر آلوده به این مواد (اسلاگ میکروبی ۲) در سطح دانشکده فنی بودند، جهت آشکار سازی ازدیاد برداشت میکروبی نفت در الگوهای ناهمگن جریان با بهره گیری از میکرومدل ها در دو بخش، آزمایشات مختلفی انجام و نتایج بهره گیری از این دو اسلاگ با روش سیلابزنی مقایسه گردیدند.

گام نخست در اجرای این پایان نامه ساخت میکرومدل ها بود. روش ساخت میکرومدل Glass Bead براساس روش Corapcioglu بود [۱۲۹]. این میکرومدل Glass bead با ابعاد  $5 \times 3/5$  cm دارای ۲ لایه با نفوذپذیری های متفاوت بود که امتداد آنها در راستای تزریق جریان (ناهمگنی عمود بر جریان تزریق) قرار داشتند. جهت تهیه ی ذرات با ابعاد مطلوب، حدود ۱ کیلوگرم شیشه توسط آسیای گلوله ای با ابعاد گلوله های مختلف به مدت ۱۰ دقیقه خرد گردید. سپس با استفاده از دستگاه Shaker، خروجی آسیا به مدت ۱۰ دقیقه، توسط سرند های مختلف با شماره مش های متفاوت دانه بندی گردید. در ادامه، دو گروه از مجموعه ی دانه بندی شده به نحوی انتخاب گردیدند که نمایانگر دو لایه با نفوذ پذیری های متفاوت گردند تا ناهمگنی به خوبی مدل شود. سپس ذرات این دو گروه، به صورت دولایه ی مجاور یکدیگر، بر روی صفحه ی شیشه ای<sup>۱</sup> با ابعاد نهایی میکرومدل، قرار داده شدند و در نهایت میکرومدل، با چسباندن صفحه ی شیشه ای دیگری، بر مجموعه ی تهیه شده، آماده گردید. مشخصات دو لایه ی میکرومدل در جدول ۳ ارائه شده است. اندازه گیری تراوایی دو لایه با استفاده از آزمایش هد افتان و بر اساس روش Florida انجام شد [۱۳۰]، با این تفاوت که مرحله اشباع نمونه بدون استفاده از پمپ خلا انجام شد.

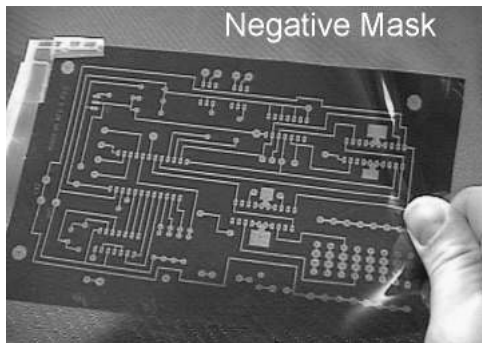
جدول ۳- مشخصات لایه های میکرومدل Glass bead

عمق لایه ( $\mu\text{m}$ )	ابعاد لایه (mm)	تراوایی در $20^\circ\text{C}$ (cm/s)	ابعاد تقریبی ذرات ( $\mu\text{m}$ )	گروه دانه بندی	ویژگی	لایه
۱۵۰	۱۲×۴۳	۵/۷۷	۲۵۰	باقیمانده بر سرند ۶۰ مش	تراوایی بالا	۱
۱۲۰	۱۸×۴۳	۱/۱۳	۱۰۰	باقیمانده بر سرند ۱۴۰ مش	تراوایی کم	۲

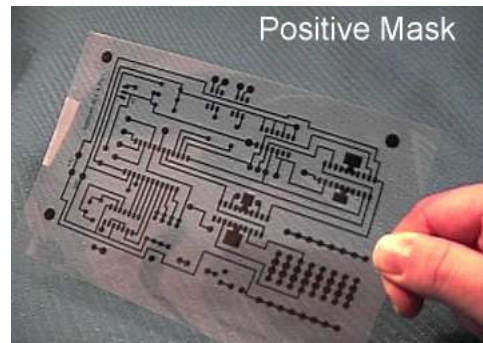
روش عمده ساخت میکرومدل های شیشه ای نیز به این صورت است که ابتدا الگوی مورد نظر، به صورت دستی یا با استفاده از رایانه، طراحی می شود. این الگو، مدلی از محیط متخلخل است که در آن، محل قرار

1- Glass plate

گیری کانال ها و حفرات و نیز ماتریکس مشخص اند. سپس الگوی آماده را بر روی یک نقش<sup>۱</sup> پیاده می نمایند تا با بهره گیری از این نقش، بتوانند الگوی طراحی شده را بر سطح صفحه ی مورد نظر پیاده نمایند. نقش می تواند یک فیلم عکاسی و یا یک نقش لیتوگرافی باشد. در مورد دوم می توان از دستگاه جهت پیاده سازی الگو بر نقش بهره برد؛ مثلاً ماشین لیتوگرافی پرتو الکترونی. نقش ها می توانند مثبت یا منفی باشند (شکل ۸).



(ب)



(الف)

شکل ۸- (الف) نقش مثبت، (ب) نقش منفی برای نقشه یک مدار الکترونیکی جهت درک بهتر [۳]

با ایجاد شدن نقش، در مرحله ی دوم، ماده ی مقاوم نسبت به نور<sup>۲</sup> که به نور ماوراء بنفش حساس است، بر سطح صفحه ی میکرومدل ریخته می شود. متناسب با نوع این ماده، مدتی زمانی نیاز است تا سطح ماده ی مقاوم، آماده ی نور دهی شود.

مکانیسم اجرای عملیات این گونه است که نقش با فاصله ای معین از سطح صفحه ی میکرومدل که با لایه ای از ماده ی مقاوم پوشیده شده است، نگه داشته می شود. سپس، نور ماوراء بنفش، تنها از الگوی پیاده شده بر نقش عبور کرده و از آن محل ها بر سطح ماده ی مقاوم تابانده می شود. مدت زمان نوردهی، فاصله ی سطح صفحه ی میکرومدل از لامپ و مقدار انرژی آن، بهتر است با آزمایش و خطا، تعیین گردند. باید توجه داشت که نوردهی بیش از حد نیز مناسب نمی باشد. مناطقی که از سطح ماده ی مقاوم، در معرض نور قرار داشته اند، نسبت به نقاطی که نور به آنها نرسیده است پلیمریزاسیون می گردند. سپس، از مایعی تحت عنوان

1-Mask

2-Photoresist

توسعه گر<sup>۱</sup> استفاده شود. وظیفه ی این مایع، حذف ماده ی مقاوم از سطح صفحه ی میکرومدل، در مناطقی است که نور به آنها نرسیده است و فرآیند پلیمراسیون در آنها رخ نداده است. به عبارت دیگر، سطوحی از ماده ی مقاوم، که نور عبوری از نقش بر آنها تابیده است و پلیمراسیون شده اند، بر صفحه ی میکرومدل باقی می ماندند. در این رویه از نقش منفی استفاده می شود. زیرا چنانچه قرار باشد بر سطح صفحه ی میکرومدل، محل کانال ها حکاکی شوند و محل ماتریکس باقی بماند، باید در مرحله ی نخست به گونه ای از نقش استفاده شود که نور فرابنفش از محل قرارگیری ماتریکس در نقش الگوی محیط متخلخل عبور نماید و در معرض سطح ماده ی مقاوم قرار گیرد تا موقعیت های قرارگیری ماتریکس در ماده ی مقاوم پلیمره شده و پس از استفاده از ماده ی توسعه گر و شستشوی سطح صفحه میکرومدل، محل کانال های جریان در ماده ی مقاوم که پلیمره نشده اند، از بین بروند و محل ماتریکس باقی بماند تا اسید در محل این کانال ها در تماس مستقیم با سطح صفحه ی میکرومدل قرار گیرد و آن را حک نماید. مرحله ی نهایی پیاده سازی الگو در این رویه، اسیدکاری است. ماده ی اصلی اسید کاری، اسید هیدروفلوریک می باشد. متناسب با ابعاد کانال های جریان و زمان تماس اسید و سطح صفحه ی میکرومدل، عمقی از سطح توسط اسید حک می شود و از این طریق کانال های جریان ایجاد می گردند. با تکمیل مراحل بالا و اتمام مدت زمان اسیدکاری، باید ماده ی مقاوم از سطح صفحه میکرومدل جدا شود (شکل ۹). بعد از پیاده سازی الگو، برای ساخت میکرومدل ها، هنوز یک مرحله ی دیگر باقی مانده است و آن چسباندن<sup>۲</sup> یک صفحه ی حک نشده بر سطح صفحه ی حک شده ی میکرومدل، جهت تکمیل شدن ساختار نهایی کانال عبوری سیال می باشد. البته گاهی ممکن است بر سطح صفحه ی دوم نیز الگوی جریان، مشابه الگوی پیاده شده بر صفحه ی اول پیاده شود. در این صورت موقعیت یابی قرارگیری دو صفحه بر همدیگر به طوری که الگوهای پیاده شده بر هم منطبق گردند، کمی مشکل می گردد. متناسب با جنس به کار رفته در ساخت میکرومدل ها، روش های مختلفی جهت چسباندن این دو صفحه وجود دارد. بهترین گزینه ها جوش آندی، حرارت یا چسب می باشند. مهمترین ملاحظه ی چسباندن صفحات این است که کانال های جریان پس از این مرحله باز باقی بمانند [۳].

مشخصات میکرومدل شیشه ای جهت انجام بخش دوم آزمایشات در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات میکرومدل شیشه ای حک شده ابتکاری

قطر متوسط گلوله نسبت به لایه کم تراوا	عمق متوسط لایه ( $\mu\text{m}$ )	ابعاد لایه (mm)	ویژگی	لایه
۲ برابر	۱۵۰	۱۲×۴۳	تراوایی بالا	۱
۱ برابر	۱۲۰	۱۸×۴۳	تراوایی کم	۲

سیالات استفاده شده جهت تزریق در این پژوهش عبارت بودند از:

۱- نفت خام منطقه نفتی مارون برای بخش اول آزمایشات و همین نفت خام به همراه تولوئن با نسبت حجمی ۱:۱ برای بخش دوم آزمایشات. دلیل ترقیق نفت خام در بخش دوم، مشکلاتی بود که در اثر ویسکوزیته بالای نفت خام در بخش اول هنگام آماده سازی میکرومدل در مرحله اشباع گردیدن از نفت خام، بوجود آمد.

۲- آب خلیج فارس.

۳- اسلاگ های میکروبی. جهت تولید جمعیت میکروبی، ابتدا یک سوسپانسیون از نمونه اولیه تهیه شد و سپس از کاغذ صافی معمولی عبور داده شد. در ادامه سیال عبوری از صافی، به صورت Mixed culture، در محیط کشت آبی با مواد زیر، رشد داده شد [۱۳۱]:

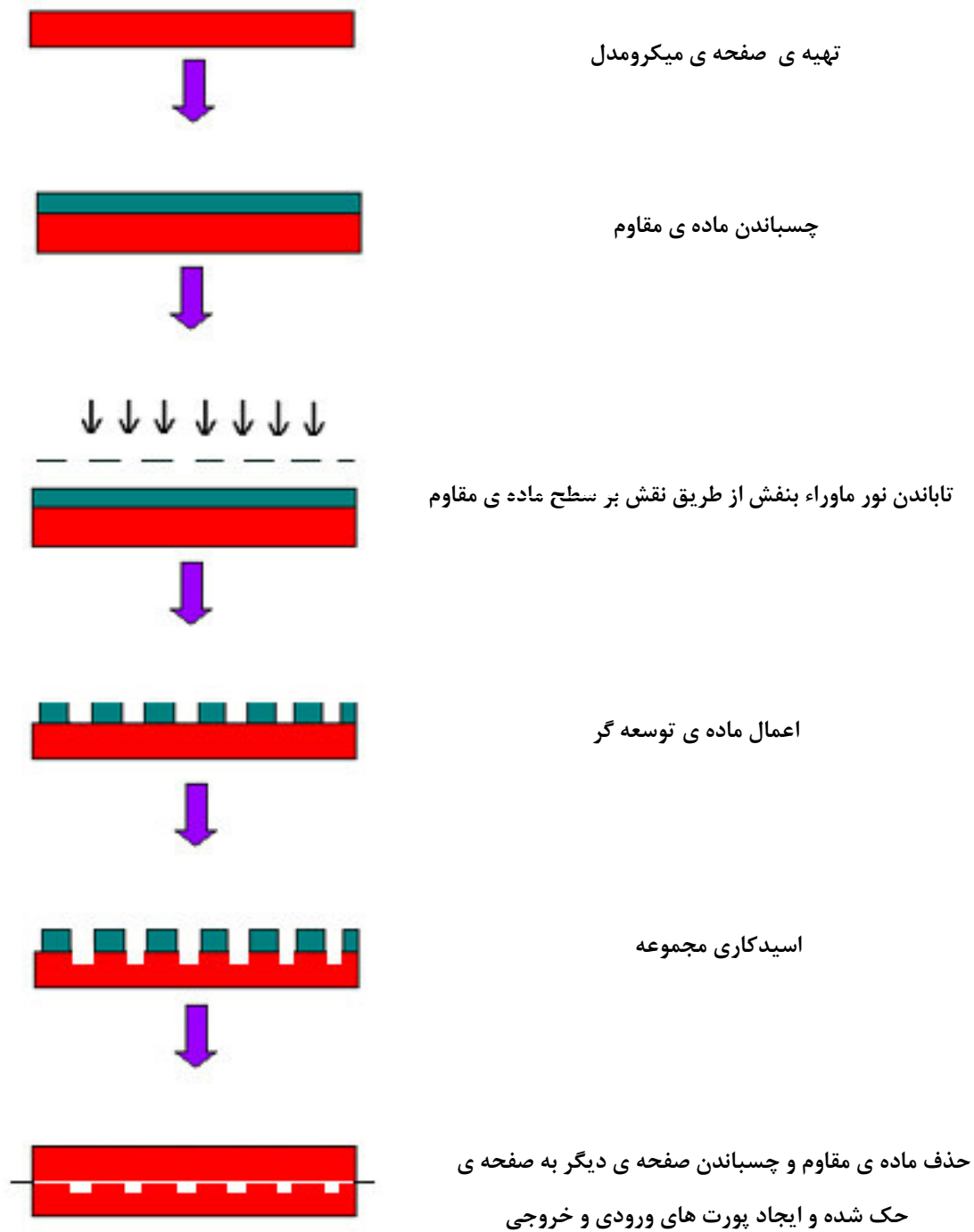
$\text{KH}_2\text{PO}_4$  (3.4g / L),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (4.3g / L),  $\text{NaNO}_3$  (4g/L),  $\text{MgCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (0.2g/L),  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (0.04g/L),  $\text{FeSO}_4$  (0.03g/L),  $\text{MnCl}_2$  (0.04g/L),  $\text{NaMoO}_4$  (0.08g/L),  $\text{CuSO}_4$  (0.006g/L),  $\text{H}_3\text{BO}_3$  (0.013g/L),  $\text{ZnSO}_4$  (0.06g/L).

منبع کربن مورد استفاده جهت رشد باکتری ها، همان نفت خام مذکور بود. از دستگاه محیط کشت، با مدل Behdad استفاده شد.

جهت آشکار سازی بهتر سیال سیلابزنی و اسلاگ میکروبی از مواد رنگی Gentianviolet جهت ایجاد رنگ بنفش و Methylene blue سازنده رنگ آبی استفاده شد تا آشکار سازی فرایندها، مطلوب تر صورت پذیرد. همچنین جهت تولید رنگ سبز از جوهر مایع پلیکان استفاده شد.

جهت مقایسه میزان تولید بیوسورفاکتانت و همچنین کاهش کشش بین سطحی دو نمونه میکروبی، کشش سطحی نمونه های رشد یافته، توسط دستگاه Kruss Processor Tensiometer K12 V6.02 اندازه گیری شد و نیز به منظور مقایسه قابلیت امولسیون سازی آنها، آزمایش تعیین شاخص E24 که شرح آن در قسمت گذشته بیان شد، اجرا شد.





شکل ۹- مراحل ساخت میکرومدل [۳]

به منظور انجام آزمایشات، میکرومدل در مدار تزریق قرار گرفت که با امکانات زیر تجهیز گردیده بود: پمپ پیستونی با مدل های ( LDP-2 و LDP-3 ) Labotron، میکروسکوپ مدل ( Nikon (YS100، دوربین دیجیتال Benque مدل DC C500 و اتصالات. تصویر این امکانات در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. از نرم افزار Photoshop، جهت آنالیز تصاویر و محاسبه میزان ازدیاد برداشت در تصاویر میکروسکوپی تهیه شده، بهره گرفته شد.



شکل ۱۰- نمای تجهیزات مدار تزریق جهت انجام آزمایشات

محور اصلی این پایان نامه بررسی قابلیت مسدودسازی جرم زنده میکروارگانیسم ها در الگوهای ناهمگن و تاثیر محصول مهم آنها یعنی بیوسورفاکتانت ها در افزایش برداشت نفت از چنین الگوهایی می باشد. Maudgaly و همکاران در سال ۲۰۰۴، در پژوهشی پیرامون افزایش کارایی بیوسورفاکتانت ها جهت ازدیاد برداشت میکروبی نفت، به این نتیجه رسیدند که بهره گیری از پلیمرها در کنار بیوسورفاکتانت ها، کارایی آنها را افزایش می دهد [۱۳۲]. از این رو در این تحقیق از جرم زنده ی میکروارگانیسم ها<sup>۱</sup> به عنوان عامل مسدودساز و افزایش دهنده گر انرژی اسلاگ تزریقی در کنار بیوسورفاکتانت در اسلاگ تزریقی بهره گرفته شد. از دیگر سو، یکی از مهم ترین عواملی که بر کارایی روش های ازدیاد برداشت تاثیر می نهد، رسیدن اسلاگ تزریقی به منطقه ی هدف اجرای عملیات می باشد. در این زمینه، ناهمگنی محیط متخلخل (میزان تغییرات خواص پتروفیزیکی و شدت تغییرات در یک جهت)، بخصوص از نظر نفوذپذیری می تواند مشکل ساز شود. حال یک سوال مهم مطرح است: در تزریق اسلاگ میکروبی به یک الگوی ناهمگن جریان از نظر نفوذ ناپذیری،

به صورت برون محل، که شامل جرم زنده ی میکروارگانیسم ها و متابولیت های آنها بخصوص بیوسورفاکتانت ها می باشد، کدام مسیر توسط اسلاگ تزریقی انتخاب می شود؟ مناطق پرتراوا یا مناطق با نفوذپذیری پایین؟ روش تحقیق در این پایان نامه، به دو بخش تقسیم می گردد:

### (الف) بخش اول

در این بخش با بهره گیری از میکرومدل Glass Bead با الگوی ناهمگن جریان، این موارد بررسی گردیدند:

- ۱- نخست این سوال بررسی شد که باکتری های رشد یافته در انتخاب مسیر، لایه پرتراوا را بر می گزینند یا به لایه کم تراوا وارد می گردند؟ به همین دلیل روش برون محل برای تزریق انتخاب شد.
- ۲- عملکرد تزریق اسلاگ های میکروبی و سیلابزنی در حل مشکل ناهمگنی و انجام مسدود سازی آشکار سازی و مقایسه گردیدند.
- ۳- مطالعه اهمیت جریان Cross flow.

جهت مطالعه این موارد ۳ مرحله متفاوت تزریق انجام شد:

۱- سیلابزنی با آب خلیج فارس.

۲- تزریق اسلاگ میکروبی ۱، به صورت برون محل.

۳- تزریق اسلاگ میکروبی ۲، به صورت برون محل.

برای هر مرحله، میکرومدل از نفت اشباع گردید و چند روز باقی ماند. سپس، تزریق با سرعت ۲ ml/h و با حجم ۱۵ ml انجام شد. فقط در مرحله سیلابزنی با آب خلیج فارس در انتهای عملیات سرعت تزریق ۱۰ برابر شد تا اهمیت تغییر سرعت و نقش جریان Cross flow در انتقال سیال از لایه پرتراوا به لایه کم تراوا بررسی گردد. سپس مراحل آماده سازی مدل برای اجرای مراحل بعد تکرار شدند. در حین اجرای عملیات نیز تصاویر میکروسکوپی و ماکروسکوپی برای هر مرحله تهیه شد تا بتوان با آنالیز این تصاویر، نتایج بدست آمده را بهتر تجزیه و تحلیل نمود.

### (ب) بخش دوم

برای بررسی تکرار پذیری نتایج بدست آمده در بخش اول، میکرومدل شیشه ای ابتکاری با الگوی ناهمگن جریان که دارای کانال های دایره ای بود، تهیه گردید. جهت بررسی هدف این بخش مراحل زیر اجرا شدند:

- ۱- سیلابزنی با آب خلیج فارس.
  - ۲- رشد جمعیت اولیه میکروبی ۱ به صورت درون محل در سه دوره در میکرومدل و سیلابزنی با آب خلیج فارس.
- مدت سیلابزنی برای هر مرحله، ۱۰ ساعت با سرعت ۰/۳۳ ml/h بود.
- در این بخش برای انجام هر مرحله تزریق، ابتدا میکرومدل از آب خلیج فارس اشباع گردید. سپس سیال هیدروکربن، به درون میکرومدل تزریق گردید تا مدل به اشباع آب باقیمانده برسد. در ادامه به صورت مجدد آب خلیج فارس تزریق گردید تا نمونه به اشباع نفت باقیمانده برسد. با انجام عملیات آماده سازی، مدل آماده تزریق گردید.
- سپس مراحل آماده سازی برای اجرای عملیات مرحله دوم تکرار شد. جمعیت اولیه میکروبی، شامل ۲۰ درصد حجمی محتوای میکروب از میکروب هایی که پیشتر به صورت برون محل رشد داده شده بودند و ۸۰ درصد باقیمانده محیط کشت آبی و منبع کربن بود. به عبارت بهتر گویا اسلاگ درون محل اولیه از ترفیق اسلاگ برون محل به میزان ۵ برابر تشکیل شد.
- برای اجرای دوره های رشد میکروبی در مرحله دوم، یعنی روش ازدیاد برداشت میکروبی به صورت درون محل، رویه زیر پیش گرفته شد:
- در این رویه با توجه به نتایج تحقیقات که انجام تزریق تناوبی کارایی بهتری را به دنبال داشته است، جهت تازه شدن محیط کشت و دفع سموم تولیدی در اثر رشد میکروارگانیسم ها، ۳ دوره تزریق و به دنبال آن توقف عملیات جهت رشد باکتری ها به انجام رسید. سرعت تزریق در هر دوره ۰/۳۳ ml/h بود.
- ۱- در دوره اول، ابتدا ۴ ساعت تزریق انجام شد تا جمعیت اولیه باکتری ها همراه با مواد مغذی و منبع کربن در محیط متخلخل قرار گیرند. سپس میکرومدل ۲ روز در محیط کشت قرار داده شد تا باکتری ها با شرایط محیط سازگار شوند.
  - ۲- در دوره دوم به مدت ۲ ساعت، در مدل تزریق انجام گردید. سپس مدل به مدت ۵ روز در محیط کشت قرار داده شد.
  - ۳- با خروج مدل از محیط کشت و اتمام عملیات دوره دوم، میکرومدل به مدت ۲ ساعت دیگر مورد تزریق قرار گرفت و در نهایت به مدت ۱۴ روز در محیط کشت قرار داده شد.

با اتمام دوره های رشد درون محل باکتری ها در میکرومدل، جهت بررسی کارایی روش مسدود سازی میکروبی درون محل، میکرومدل مورد تزریق با آب خلیج فارس قرار گرفت.

در هر دو بخش انجام آزمایشات تاثیر تولیدات میکروارگانیسم ها از جمله بیوسورفاکتانت ها و بیوامولسیفایر ها نیز بر ازدیاد برداشت نفت مورد توجه قرار گرفتند.

بعد از انجام دو بخش، آنالیز تصاویر تهیه شده در حین اجرای هر مرحله از عملیات انجام شد تا امکان مقایسه کمی و ارائه نتایج دقیق تر مهیا شود. تصاویر انتخابی برای مرحله میکرومدل Glass bead از وسط دو لایه پرتراوا و کم تراوا جهت آنالیز تصویر تهیه گردیدند. برای میکرومدل حک شده نیز چندین شاخص بر میکرومدل در قسمت های وسط دو لایه قرار داده شد و تصاویر تهیه شده از این نقاط آنالیز گردیدند. در یک جمع بندی در جدول زیر همه آزمایشات انجام شده، ارائه شده است.

جدول ۵ - شرح مختصر آزمایشات انجام شده

شاخص آزمایش	هدف آزمایش	مراحل آزمایش	سیال سیلابزنی	نوع میکرومدل	سرعت تزریق (ml/h)	متغیر آزمایش
بخش اول	آزمایش ۱ قابلیت مسدودسازی برون محل درالگوهای ناهمگن، بررسی تغییر خواص سطحی	۱- سیلابزنی آب	آب خلیج فارس	Glass bead	۲	سیال سیلابزنی
		۲- سیلابزنی میکروبی	اسلاگ میکروبی ۱	Glass bead	۲	
		۳- سیلابزنی میکروبی	اسلاگ میکروبی ۲	Glass bead	۲	
آزمایش ۲	اهمیت جریان Cross flow	۱- سیلابزنی آب	آب خلیج فارس	Glass bead	۲	سرعت تزریق
		۲- سیلابزنی آب	آب خلیج فارس	Glass bead	۲۰	
بخش دوم	آزمایش ۳ قابلیت سدودسازی درون محل در الگوهای ناهمگن، تکرارپذیری آزمایش ۱	۱- سیلابزنی آب	آب خلیج فارس	ابتکاری	۰/۳۳	رشد درون محل
		۲- انجام ۳ دوره رشد درون محل، سپس سیلابزنی آب	آب خلیج فارس	ابتکاری	۰/۳۳	میکروب ها در میکرومدل

## فصل چهارم

ارائه نتایج و تحلیل یافته ها

در این پژوهش کارایی روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت در الگوهای ناهمگن جریان، با بهره گیری از میکرو مدل ها آشکار سازی گردیدند و نتایج آن با روش سیلابزنی با آب خلیج فارس مقایسه گردید. در این مطالعه تاکید بر تغییر کشش سطحی و بین سطحی و نیز قابلیت امولسیون سازی توسط محصولات باکتری ها و همچنین رفع مشکل ناهمگنی از طریق مسدود سازی انتخابی توسط جرم زنده میکروارگانیسم ها بود. گام نخست در اجرای این پایان نامه ساخت میکرومدل های مختلف با الگوهای ناهمگن جریان و کارایی بالا بود. آنالیز تصاویر و ارزیابی نتایجی که بعد از اجرای ساعت ها عملیات تزریق با میکرومدل های ساخته شده، بدست آمده اند، همگی موید این مطلب اند که آزمایشات انجام شده با این میکرومدل ها، قادر به پاسخگویی به سوالاتی اند که به عنوان هدف اجرای این مطالعه مطرح بوده اند. دستیابی به دانش فنی ساخت میکرومدل ها، با توجه به اهمیت ویژه ای که آنان در مطالعات مهندسی مخازن دارند، از ارزنده ترین نتایج این پژوهش می باشد.

آشکار سازی و مشاهده ی پدیده ها توسط میکرومدل ها، در مهندسی مخازن از اهمیت بسزایی برخوردار است، چرا که امکان مطالعه ی دقیق بسیاری از پدیده ها را در محیط متخلخل فراهم می سازد، به طوری که بهره گیری از مغزه های طبیعی و مصنوعی و نیز ستون های شیشه ای، از این لحاظ با محدودیت مواجه اند. نتایجی که از آشکار سازی جریان سیالات در محیط های متخلخل به دست آمد به صورت زیر اند:

۱- کارایی بهره گیری از میکرومدل ها نسبت به سایر ابزار های مطالعه در محیط متخلخل:

به توضیح این مطلب در بخش آشکار سازی پدیده های جریان در فصل مروری بر تحقیقات پرداخته شد، فقط آنچه در این مجال حائز اهمیت است اثبات این مطالب است که آزمایشات انجام شده به خوبی برتری میکرومدل ها را نسبت به انواع مغزه ها و ستون های طبیعی و مصنوعی در مطالعه پدیده های جریان در محیط های متخلخل نشان می دهند.

۲- اهمیت آشکار سازی فرآیندها در محیط متخلخل:

از جمله مهم ترین مباحث جریان سیالات در محیط متخلخل، انتقال کلوئیدها (ذرات شیمیایی) و بیوکلوئیدها (میکروارگانیسم ها) در چنین محیط هایی می باشند. دلایل مختلفی وجود داد که منجر به حضور کلوئیدها و بیوکلوئیدها در سیالات مختلف می گردند؛ از جمله استفاده از مواد شیمیایی و میکروارگانیسمها در ازدیاد برداشت نفت؛ حذف آلودگی ها، انتقال مواد مورد نیاز جهت رشد گیاهان، انتقال آلودگی ها در سفره های آب زیرزمینی و ... در این راستا فرآیندهایی چون جذب، باقی ماندن ذرات، رسوب، دیفیوژن، همرفت

ذرات همراه جریان، رشد و مرگ میکروارگانیسم ها و ...، تاثیر ویژه ای بر کارآمدی این انتقال و افزایش تاثیر ذرات در زمینه های مذکور دارند. مطالعه ی مستقیم نحوه و میزان تاثیرگذاری این فرآیندها، تنها از طریق آشکارسازی آنها امکان پذیر است، وگرنه مطالعه بر مغزه ها و ستون ها در این زمینه، کمک شایانی به فهم درست این فرآیندها نمی کنند، مگر غیر مستقیم، ناقص و با استفاده از روش های واسطه ای که پیشتر به آنها اشاره شد.

۳- کمک به مدل سازی دقیق تر جریان سیالات در محیط متخلخل:

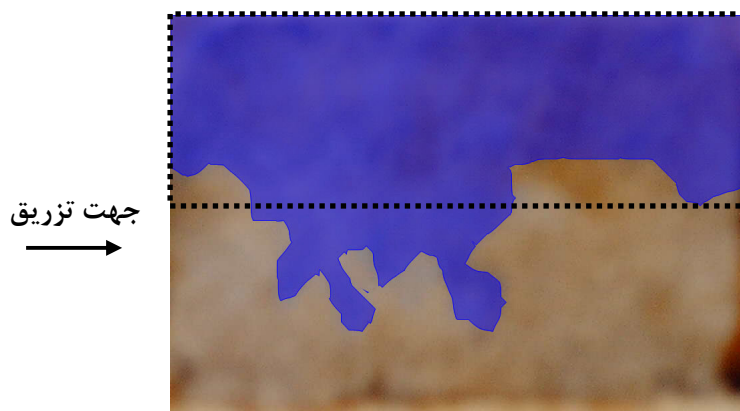
مدل ها هنگامی با واقعیت همخوانی بیشتری پیدا می کنند که بتوانند تا آنجا که امکان دارد تمام جنبه های تاثیرگذار بر یک فرآیند یا عملیات را در مدل وارد نمایند، که در این زمینه میکرومدل ها می توانند در شناسایی و درک بهتر این عوامل مفید واقع شوند. همچنین تهیه ی اطلاعات تجربی از نحوه ی تاثیرگذاری این عوامل، جهت مقایسه عملکرد مدل ها با حالت واقعی، تنها از طریق آزمایش بر میکرومدل ها فراهم می گردد.

بعد از فراهم شدن امکان آشکارسازی پدیده ها با ساخت میکرومدل ها، امکان مطالعه کارایی روش ازدیاد برداشت میکروبی در مقایسه با روش سیلابزنی در الگوهای ناهمگن جریان ایجاد گردید. یافته ها بر اساس روش تحقیق در دو بخش ارائه می گردد:

#### ۴-۱- بخش اول

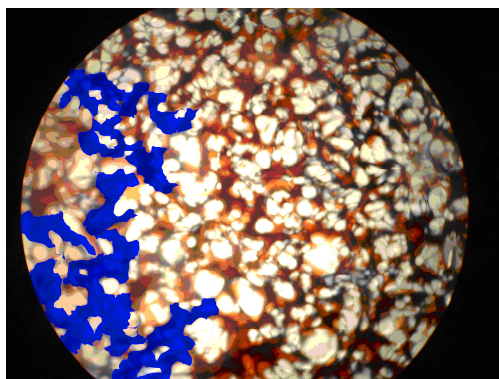
در مرحله ی اول انجام آزمایش ۱، تزریق آب خلیج فارس با سرعت ۲ ml/h، تنها منجر به برداشت نفت موجود در لایه ی پرتراوا گردید و تقریباً تمام نفت موجود در لایه ی کم تراوا باقی ماند. به احتمال قوی علت اصلی این امر، ناهمگنی محیط متخلخل می باشد که باعث عبور سیال تزریقی از لایه ی پرتراوا می گردد. همچنین به علت اختلاف قابل توجه گرانیوی سیال تزریقی و نفت موجود در محیط متخلخل، پدیده ی Fingering نیز در لایه ی پرتراوا مشاهده گردید که با وجود این مسئله از کارایی روش سیلابزنی در عملیات جارو کردن لایه ی پرتراوا کاسته شد. در شکل ۱۱ تصویر میکرومدل بعد از سیلابزنی قابل مشاهده است. لازم به توضیح است که در تمامی اشکال تهیه شده از میکرومدل، منطقه ی پرتراوا در بالا قرار دارد و توسط خط چین محصور گردیده است.





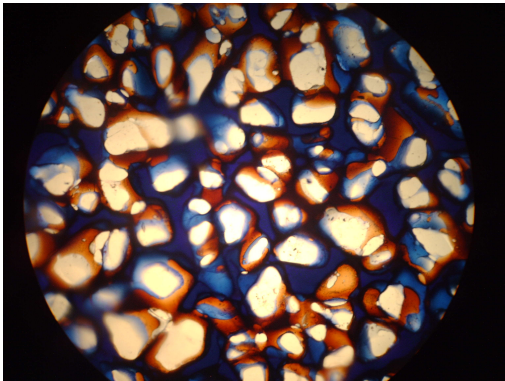
شکل ۱۱- تصویر میکرومدل بعد از سیلابزنی با آب خلیج فارس با سرعت ۲ ml/h  
(قهوه ای: نفت - آبی: سیال تزریقی)

ناکارآمدی روش سیلابزنی در حل مشکل ناهمگنی و برداشت از لایه ی کم تراوا در شکل ۱۲ قابل نتیجه گیری است؛ چرا که در تصویر، سیال تزریقی تنها بخش ناچیزی از نفت را در محدوده ی به تصویر کشیده شده، استخراج کرده است.

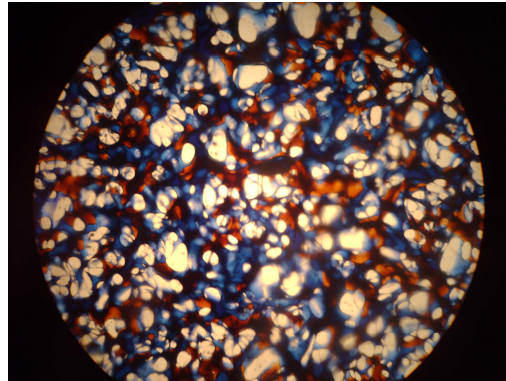


شکل ۱۲- تصویر میکروسکوپی محیط متخلخل در لایه ی کم تراوا  
هنگام سیلابزنی آب خلیج فارس با سرعت ۲ ml/h  
(بزرگنمایی ۴۰ برابر - سفید: ذرات محیط متخلخل - قهوه ای: نفت - آبی: سیال تزریقی)

با ۱۰ برابر نمودن سرعت تزریق (آزمایش ۲) جریان Cross flow تاثیر خودش را در انتقال سیال تزریقی از لایه پرتراوا به لایه کم تراوا نهاد و باعث گشت ازدیاد برداشت از لایه کم تراوا افزایش یابد. شکل ۱۳ تصاویر تهیه شده از این آزمایش با سرعت ۲۰ ml/h در دو لایه پرتراوا و کم تراوا را نشان می دهد.



(ب) لایه پر تراوا

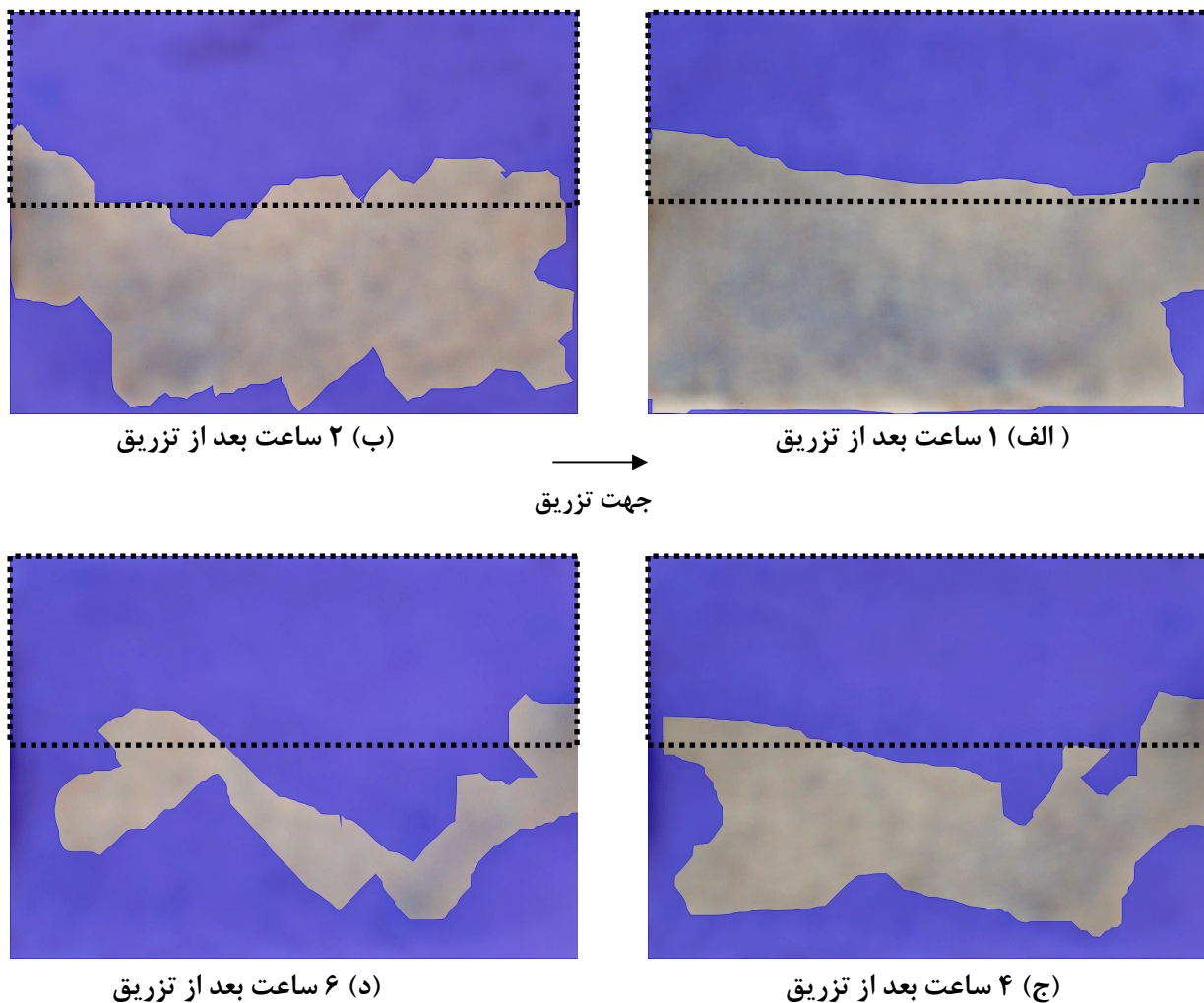


(الف) لایه کم تراوا

شکل ۱۳- تصویر میکروسکوپی محیط متخلخل در لایه ی (الف) کم تراوا و (ب) پر تراوا هنگام سیلابزنی آب خلیج فارس با سرعت ۲۰ ml/h (بزرگنمایی ۴۰ برابر - سفید: ذرات محیط متخلخل - قهوه ای: نفت - آبی: سیال تزریقی)

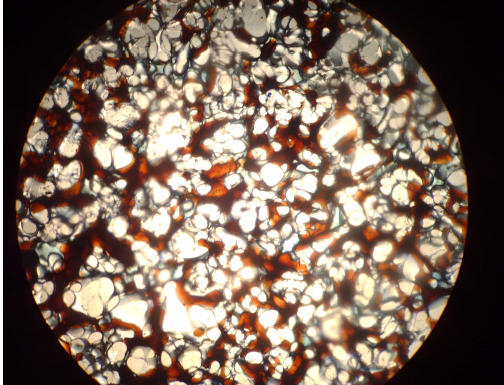
در مرحله ی دوم و سوم آزمایش ۱، روش ازدیاد برداشت میکروبی به اجرا درآمد. شکل ۱۴، نتایج اجرای این عملیات را در زمان های مختلف نشان می دهد. در ابتدای عملیات، اسلاگ های میکروبی تنها به لایه ی پرتراوا نفوذ کردند و مناطق کم تراوا، همچنان دست نخورده باقی ماندند. در ادامه ی تزریق با نرخ ثابت، سیال تزریقی کم کم به لایه ی با نفوذپذیری کمتر نیز انتقال یافت و به مقدار قابل توجهی نفت موجود در این نواحی را نیز برداشت نمود. به نظر می رسد، علت این امر در مکانیسم مسدودسازی انتخابی لایه ی پرتراوا توسط جرم زنده ی میکروارگانیسم های سیال تزریقی می باشد که منجر به همگن سازی محیط متخلخل گردیده است. ضمن اینکه با حضور جرم زنده ی میکروارگانیسم ها، اختلاف گرانیوی سیال تزریقی و نفت محیط متخلخل، کمتر گردید و اثری از پدیده ی Fingering سیال تزریقی مشاهده نشد. ازسوی دیگر، حضور محصولات بیولوژیکی تولید شده توسط میکروارگانیسم ها همچون بیوسورفاکتانت و بیومولسیفایر در سیال تزریقی نیز، می تواند عامل دیگری جهت ازدیاد برداشت بیشتر نفت در این روش نسبت به روش سیلابزنی

باشد. حضور چنین محصولاتی در اسلاگ های میکروبی، در مرحله ی رشد میکروارگانیسم ها با تغییر رنگ محیط کشت مایع به کدر و پراکنده شدن نفت خام موجود بر سطح محیط کشت، به اثبات رسیده بودند.

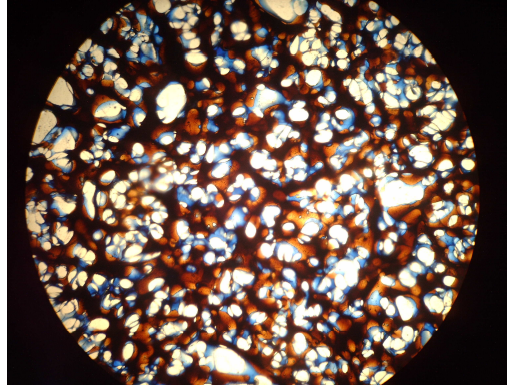


شکل ۱۴- میزان ازدیاد برداشت میکروبی نفت در زمان های مختلف حین اجرای عملیات ازدیاد برداشت میکروبی با سرعت ۲ ml/h ( قهوه ای: نفت- بنفش: سیال تزریقی)

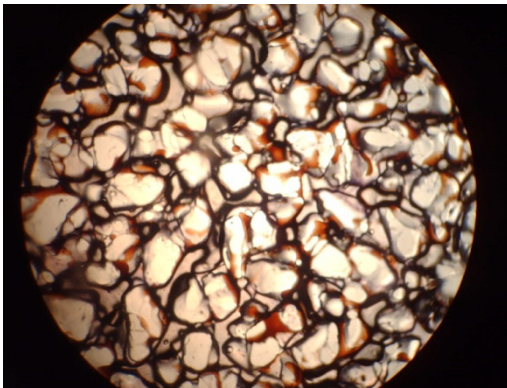
در تصاویر میکروسکوپی زیر آشکارسازی تاثیر اسلاگ های میکروبی بر ازدیاد برداشت نفت از لایه های پرتراوا و کم تراوا انجام شده است (اشکال ۱۵ و ۱۶).



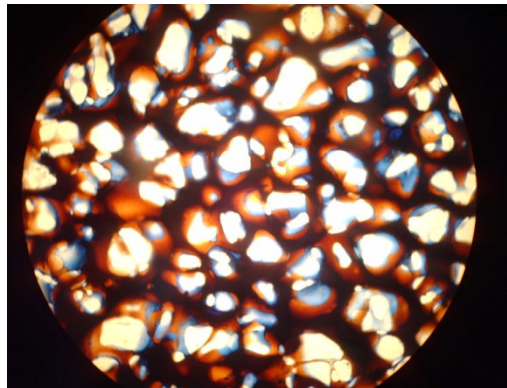
(الف-۲) پس از تزریق در لایه کم تراوا



(الف-۱) پیش از تزریق در لایه کم تراوا



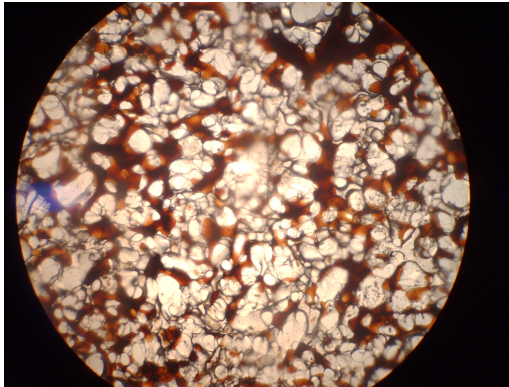
(ب-۲) پس از تزریق در لایه پرتراوا



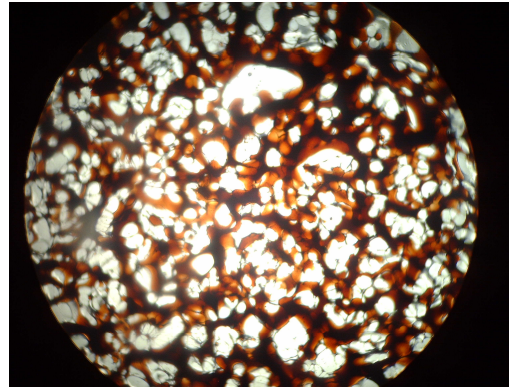
(ب-۱) پیش از تزریق در لایه پرتراوا

شکل ۱۵ - آشکار سازی ازدیاد برداشت نفت در اسلاگ غیر آلوده به مواد نفتی با سرعت ۲ ml/h (قهوه ای: نفت - بنفش: سیال باقیمانده از مرحله اول یا اشباع آب باقیمانده - سفید: ذرات محیط متخلخل - بی رنگ: اسلاگ میکروبی)

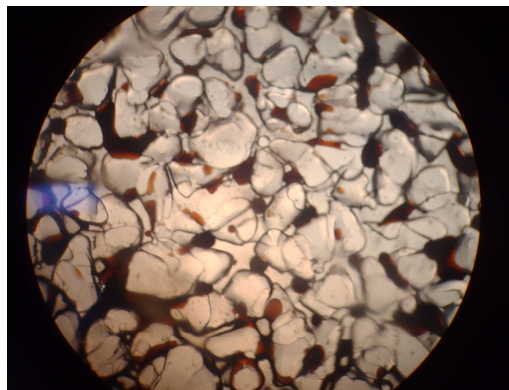




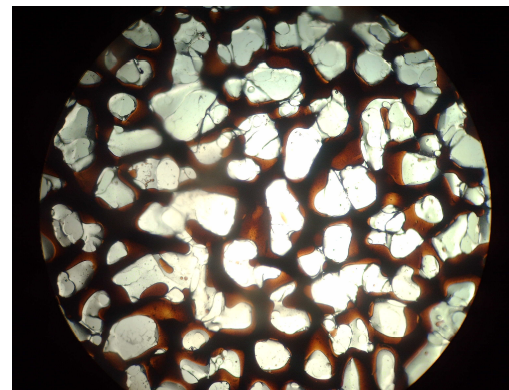
(الف-۲) پس از تزریق در لایه کم تراوا



(الف-۱) پیش از تزریق در لایه کم تراوا



(ب-۲) پس از تزریق در لایه پرتراوا



(ب-۱) پیش از تزریق در لایه پرتراوا

شکل ۱۶ - آشکار سازی ازدیاد برداشت نفت در اسلاگ خاک آلوده به مواد نفتی با سرعت ۲ ml/h  
( قهوه ای: نفت - سفید: ذرات محیط متخلخل - بی رنگ: اسلاگ میکروبی)

آنالیز تصاویر میکروسکوپی تهیه شده به منظور ارزیابی و مقایسه کمی روش های ازدیاد برداشت با اسلاگ های آلوده و غیر آلوده به مواد نفتی انجام شد. در این آنالیز درصد سطحی نفت، سیال تزریقی و دانه های محیط متخلخل در تصویر دایره ای بدست آمد. سپس مبنای ارزیابی کارآیی روش های ازدیاد برداشت، تغییر درصد سطحی نفت قبل و بعد از انجام تزریق بود.

۱- از آنجایی که تصاویر مرحله پیش تزریق روش سیلابزنی، که شامل اشباع کامل مدل از نفت خام بود، تهیه نشده بود؛ با توجه به اینکه برای آماده سازی تزریق در این مرحله که نخستین مرحله تزریق بود مدل به مدت حدود ۴۵ روز در نفت خام غوطه ور بود، اشباع نفت در این مرحله ۱۰۰ درصد فضای محیط متخلخل در نظر گرفته شد.

۲- همان گونه که در اشکال ۱۵ و ۱۶ رویت شد، رنگ سیالات تزریقی میکروبی در مراحل دوم و سوم آزمایش ۱ به اندازه ای پر رنگ نبوده است که از ذرات محیط متخلخل تمایز یابد. این مسئله تفکیک سطح روشن تصویر را برای دانه ها و اسلاگ تزریقی دشوار می نماید. حال برای اینکه مشکل تفکیک درصد دانه ها از درصد سیال تزریقی حل شود، درصد دانه های محیط متخلخل در مرحله اول که در آن سیال سیلابزنی با رنگ آبی کاملاً متمایز از دانه ها، قابل تشخیص بود به عنوان مقداری ثابت برای درصد سطحی دانه های محیط متخلخل در مراحل دوم و سوم این آزمایش در نظر گرفته شد تا با تفاضل این مقدار از کل درصد سطوح مشترک حاوی ذرات محیط متخلخل و اسلاگ تزریقی که هر دو دارای رنگ سفید و روشن بوده اند، درصد سطحی اسلاگ میکروبی تزریقی در هر مرحله بدست آید.

جدول ۵ نتایج آنالیز تصاویر تهیه شده و درصد برداشت نفت را در روش های مختلف ازدیاد برداشت ارائه نموده است.

همچنین علت دیگر امکان مقایسه کارایی بهره گیری از افزایش سرعت (۱۰ برابر نمودن آن) بدون تغییر سیال تزریقی (آزمایش ۲) و بهره گیری از اسلاگ های میکروبی به جای آب خلیج فارس بدون تغییر سرعت (مراحل ۲ و ۳ آزمایش ۱) در ازدیاد برداشت از دو لایه بود. به عبارت بهتر مقایسه اهمیت جریان Cross flow و مسدودسازی میکروبی جهت ازدیاد برداشت در دو لایه مورد توجه بود.

درصد ازدیاد برداشت حاصل تقسیم نفت برداشت شده به نفت اولیه پیش از تزریق می باشد.

نتایج این آنالیز برای سیلابزنی لایه پرتراوا با سرعت بالا (۲۰ ml/h) در آزمایش ۲، در مقایسه با روش میکروبی با دو اسلاگ میکروبی ۱ و ۲ با سرعت پایین (۲ ml/h) در آزمایش ۱ بسیار قابل توجه است. با وجود

اینکه سرعت تزریق در مرحله سیلابزنی آزمایش ۲، ۱۰ برابر سرعت تزریق در مراحل اسلاگ های میکروبی آزمایش ۱ است، اما ازدیاد برداشت روش های میکروبی برای اسلاگ میکروبی ۱ تنها ۱ درصد کمتر از روش سیلابزنی با سرعت بالا بوده و ازدیاد برداشت میکروبی با اسلاگ نمونه ۲ نیز ۱۵ درصد بیشتر از سیلابزنی با سرعت بالا گردیده است. این مسئله نشان می دهد افزایش سرعت تزریق بدون تغییر سیال تزریقی آن چنان کارآمد نبوده، ضمن اینکه ۱۰ برابر نمودن سرعت تزریق نیز مستلزم صرف هزینه های بسیار سنگین می باشد. اما راه حل بهره گیری از اسلاگ های میکروبی در مقایسه با افزایش سرعت تزریق بسیار کارآمدتر و دارای هزینه کمتر است.

جدول ۶- درصد ازدیاد برداشت روش های سیلابزنی و میکروبی در لایه های پرتراوا و کم تراوا در

میکرومدل Glass bead

مرحله	روش	سیال تزریقی	سرعت تزریق (ml/h)	لایه	درصد نفت قبل از تزریق	درصد نفت باقیمانده بعد تزریق	درصد ازدیاد برداشت
۱	سیلابزنی	آب خلیج فارس	۲۰	پرتراوا	۱۰۰	۲۶	۷۴
			۲۰	کم تراوا	۱۰۰	۱۶	۸۴
			۲	کم تراوا	۱۰۰	۸۶	۱۴
۲	میکروبی	اسلاگ میکروبی ۲	۲	پرتراوا	۸۸	۹	۸۹
			۲	کم تراوا	۸۴	۴۵	۴۶
۳	میکروبی	اسلاگ میکروبی ۱	۲	پرتراوا	۹۷	۲۶	۷۳
			۲	کم تراوا	۸۳	۴۰	۵۱

اما برای لایه کم تراوا در آزمایش ۱، در سرعت ۲ ml/h، روش سیلابزنی میزان ازدیاد برداشت بسیار کمی (۱۴٪) داشته است. حال اینکه روش میکروبی با اسلاگ های میکروبی ۱ و ۲ به ترتیب در این لایه ۵۱ و ۴۶ درصد از نفت را برداشت نموده است. علت این افزایش در قابلیت مسدود سازی اسلاگ های میکروبی و امکان ورود نفت به لایه کم تراوا با بهره گیری از این سیالات بوده است که پیشتر به علت وجود ناهمگنی در مرحله سیلابزنی و عدم رفع آن، سیال مرحله سیلابزنی تنها وارد لایه پرتراوا گشته است و در عمل با عدم نفوذ سیال به لایه کم تراوا میزان برداشت نفت نیز بسیار کم بوده است.

حال آنکه مقایسه میزان ازدیاد برداشت نفت در آزمایش ۲، به میزان ۸۴ درصد، با مراحل دوم و سوم آزمایش ۱، ۴۶ و ۵۱ درصد، نشان می دهند اثر افزایش سرعت در ازدیاد برداشت لایه کم تراوا نسبت به تغییر سیال تزریقی از آب خلیج فارس به اسلاگ های میکروبی بسیار تاثیرگذارتر بوده است. علت این افزایش ازدیاد برداشت ۱۴ به ۸۴ درصد، با تغییر سرعت تزریق آن از ۲ ml/h به ۲۰ ml/h، اهمیت یافتن جریان Cross flow با افزایش سرعت تزریق بوده که منجر به انتقال بیشتر سیال تزریقی از لایه پرتراوا به کم تراوا می گردد. اما در عمل چنین افزایش سرعتی امکان پذیر نیست و نباید نتیجه گرفت که افزایش سرعت نسبت به همگن سازی محیط متخلخل با استفاده از روش مسدودسازی میکروبی در الگوهای ناهمگن جریان موثرتر است. همان گونه که بیان شد ۱۰ برابر نمودن سرعت تزریق هم بسیار هزینه بر است و هم عواقب خسارت به سازند از جمله شکستگی های شدید را بدنبال دارد و در دراز مدت همین مسائل تاثیر منفی بر اجرای عملیات سیلابزنی می نهد و با کاهش کارایی آن، ازدیاد برداشت را نیز کم می نماید. میزان پایداری روش های ازدیاد برداشت نیز در تصمیم گیری انتخاب آنان موثرند و با توجه به این نکته باید گفت که درصد های پایدار ۴۶ و ۵۱ برای روش میکروبی در لایه کم تراوا بسیار بهتر و مطلوب تر از درصد ناپایدار و پرهزینه ۸۴ اثر افزایش سرعت در بخش دوم مرحله سیلابزنی است.

#### ۴-۲- بخش دوم

در این بخش، ارزیابی کارایی جرم زنده میکروارگانیسم ها جهت مسدود سازی انتخابی با بهره گیری از میکرومدل شیشه ای حک شده با یک الگوی ناهمگن جریان انجام شد که در آن نمونه خاک آلوده به مواد نفتی به صورت درون محل و هوازی کشت داده شده بود (آزمایش ۳). بعد از انجام مراحل سه گانه کشت - که در بخش مواد و روش ها به آن اشاره شد - تزریق مدل با استفاده از آب خلیج فارس انجام و نتایج آن با روش ازدیاد برداشت سیلابزنی با همان آب خلیج فارس مقایسه گردید. مزیت انجام عملیات تزریق در هر دو مرحله روش های ازدیاد برداشت میکروبی و سیلابزنی با سیال تزریقی یکسان این امکان را فراهم می نمود که قابلیت مسدود سازی جرم زنده میکروارگانیسم ها بررسی شود، چرا که اگر در تزریق نهایی مرحله ازدیاد برداشت میکروبی از سیالی متفاوت با سیال مرحله ازدیاد برداشت سیلابزنی استفاده می شد که دارای مواد افزودنی دیگر بود، دیگر معلوم نمی گشت که تغییرات ازدیاد برداشت مرحله میکروبی نسبت به مرحله سیلابزنی ناشی

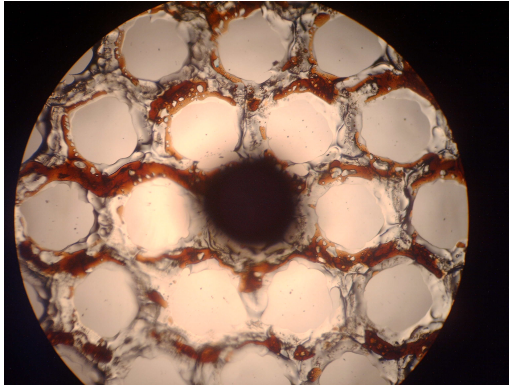


از تحولات انجام شده در دوره کشت است یا ناشی از مواد افزودنی است که در تزریق نهایی مرحله میکروبی استفاده شده است.

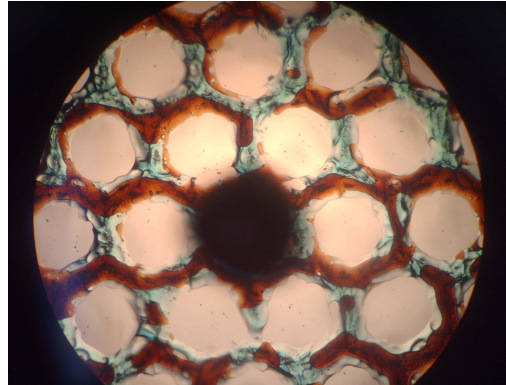
از دیگر سو این بخش، آزمایش تکرار پذیری نتایجی بود که در بخش اول توسط میکرومدل Glass bead به دست آمد.

همان گونه که انتظار می رفت، در مرحله نخست آزمایش ۳ که اجرای روش سیلابزنی بود، سیال تزریقی در اثر وجود ناهمگنی لایه ها بیشتر وارد لایه پرتراوا گردید، بدین معنی که آب خلیج فارس نتوانست رفع کننده مشکل ناهمگنی باشد و در نتیجه برداشت از لایه کم تراوا رضایت بخش نبود. آشکارسازی میزان تولید نفت در این مرحله در شکل ۱۷ ارائه شده است.

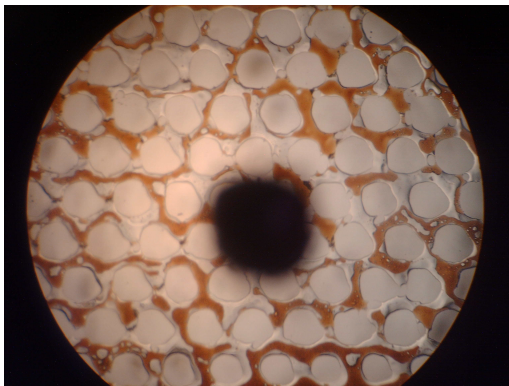
در مرحله دوم آزمایش ۳ روش ازدیاد برداشت درون محل میکروبی انجام شد. بعد از اجرای دوره های سه گانه تناوبی رشد درون محل نمونه اسلاگ میکروبی، تزریق نهایی جهت بررسی میزان ازدیاد برداشت با آب خلیج فارس و به مدت مشابه مرحله سیلابزنی انجام شد. هنگام اجرای عملیات تزریق نهایی، ورود سیال تزریقی به مناطق کم تراوا، با فاصله کمی از شروع عملیات تزریق مشاهده و آشکار سازی گردید. این مسئله بدین معنی است که رشد میکروارگانیزم ها در مراحل سه گانه رشد و تولید جرم زنده میکروارگانیزم ها و بیوفیلم بر دیواره ماتریکس محیط متخلخل در لایه پرتراوا به طور رضایت بخش انجام شد و منجر به مسدودسازی انتخابی مناطق پرتراوا گردید و با همگن سازی محیط متخلخل، سیال تزریقی به مناطق کم تراوا نیز وارد گشت. نساویر آشکار سازی این مرحله در شکل ۱۸ ارائه شده است.



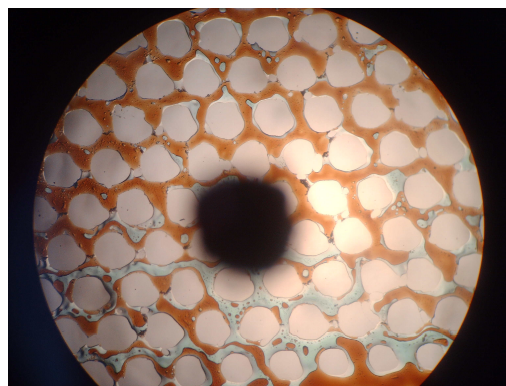
(الف-۲) پس از تزریق در لایه پر تراوا



(الف-۱) پیش از تزریق در لایه پر تراوا

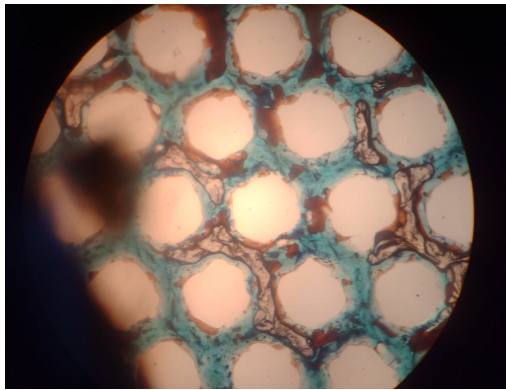


(ب-۲) پس از تزریق در لایه کم تراوا

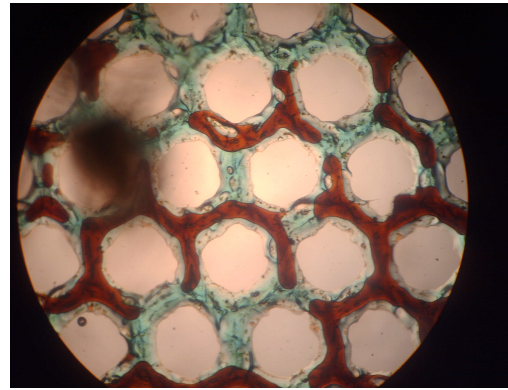


(ب-۱) پیش از تزریق در لایه کم تراوا

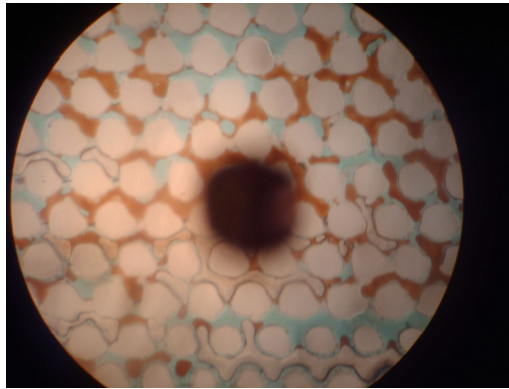
شکل ۱۷- آشکار سازی کارآمدی روش سیلابزنی در میکرومدل شیشه ای حک شده  
(قهوه ای: نفت- سفید: دانه های ماتریکس- سبز: اشباع آب باقیمانده- بی رنگ: آب خلیج فارس)



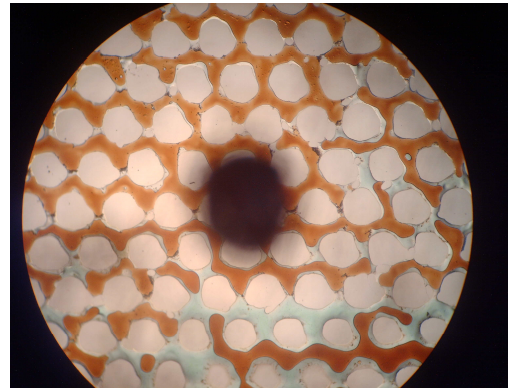
(الف-۲) پس از تزریق در لایه پرتراوا



(الف-۱) پیش از تزریق در لایه پرتراوا



(ب-۲) پس از تزریق در لایه کم تراوا



(ب-۱) پیش از تزریق در لایه کم تراوا

شکل ۱۸ - آشکار سازی ازدیاد برداشت میکروبی نفت در میکرومدل شیشه ای حک شده  
( قهوه ای: نفت - سفید: ذرات محیط متخلخل - سبز: آب خلیج فارس )

جدول ۷- نتایج ازدیاد برداشت روش های سیلابزنی و میکروبی در آزمایش ۳

مرحله	روش	سیال تزریقی	سرعت تزریق (ml/h)	لایه	درصد ازدیاد برداشت
۱	سیلابزنی	آب خلیج فارس	۰/۳۳	پرتراوا	۳۳/۷
			۰/۳۳	کم تراوا	۳۲
۳	میکروبی	آب خلیج فارس	۰/۳۳	پرتراوا	۳۴/۰
			۰/۳۳	کم تراوا	۴۸

همانگونه که مشاهده می شود درصد ازدیاد برداشت در لایه پرتراوا به صورت تقریبی برای دو روش یکسان است، این مسئله خیلی دور از تصور نمی باشد، چرا که در تزریق نهایی از سیال یکسان جهت تزریق در دو روش استفاده شده است و این طبیعی است که نتایج آنها در دو روش یکسان گردد. زیرا در مرحله رشد میکروبی درون محل از میکروارگانیسم ها انتظار می رفت که در راستای مسدود سازی این لایه عمل نمایند که با مقایسه نتایج ازدیاد برداشت لایه کم تراوا در دو روش مشخص گردید که این انتظار به صورت رضایت بخش برآورده شده است. چرا که درصد ازدیاد برداشت از ۳۲ برای لایه کم تراوای روش سیلابزنی به ۴۸ برای لایه کم تراوای روش میکروبی رسید.

حال بحث دیگری نیز در بیان علت مشابه گردیدن عملکرد دو روش در لایه پرتراوا مطرح است که ممکن است نپرداختن به آن باعث ایجاد شبهه گردد. همان گونه که بیان شد علاوه بر تکیه بر قابلیت مسدود سازی میکروارگانیسم ها انتظار تولید متابولیت هایی نظیر بیوسورفاکتانت و بیومولسیفایر نیز از آنان می رفت، حال که در لایه پرتراوا عملکرد های این دو روش مشابه یکدیگر گردیده است نباید این شبهه ایجاد شود که در دوران رشد درون محل، باکتری ها متابولیسمی نداشته اند. دلیل این ادعا توجه به اشکال الف- ۱۷ و الف- ۱۸ می باشد که مربوط به ازدیاد برداشت از لایه پرتراوا هستند. چنانچه تصاویر بعد از تزریق در دو روش مقایسه کردند، مشخص می گردد که نفت های باقیمانده در محیط متخلخل بعد از اجرای روش سیلابزنی به صورت پیوسته به یکدیگر و متمرکز قرار دارند، در حالی که نفت های باقیمانده در محیط متخلخل بعد از اجرای روش میکروبی از یکدیگر مجزا شده و در قسمت های مختلف پراکنده شده اند. این مسئله آشکار سازی تاثیر عملکرد بیوسورفاکتانت ها و بیومولسیفایر هایی است که توسط میکروارگانیسم ها در مرحله رشد تولید شده اند و باعث کاهش کشش بین سطحی آب و نفت و نیز افزایش خاصیت امولسیون سازی گردیده اند و نفت را

در محیط متخلخل پراکنده ساخته اند. دلیل دوم توجه به دوره رشد باکتری هاست. هنگامی که دو نمونه میکروبی در محیط کشت مایع قرار داده شدند، با گذشت ۷ روز مشاهده گردید که در اثر رشد باکتری ها، رنگ مایع کدر شد و نفت موجود بر سطح مایع پراکنده گردید که بیانگر انجام رشد و تولید متابولیت هایی همچون بیوسورفاکتانت می باشد. حال همان گونه که ذکر شد در مرحله سوم رشد درون محل، باکتری ها به مدت ۱۴ روز در دستگاه محیط کشت قرار داشتند. در نتیجه آنان به طور حتم به میزان مناسب رشد یافته اند و به صورت طبیعی بعد از انجام مراحل رشد در هفته اول، فرصت مناسب یک هفته ای را برای متابولیسم را داشته اند. دلیل دیگر اندازه گیری کشش و شاخص E24 برای دو نمونه میکروبی رشد یافته به مدت ۱ هفته، است. در جدول ۷ نتایج این اندازه گیری ارائه شده است. همان گونه که مشخص است به نظر می رسد که خاک غیر آلوده به مواد نفتی تولید بیوسورفاکتانت بهتری داشته است، اما نمونه دیگر خاصیت امولسیون سازی بهتری از خود نشان داده است.

جدول ۸- نتایج آزمایشات کشش سطحی و شاخص E24 برای دو نمونه میکروبی

ردیف	آزمایش	نمونه	نتیجه
۱	کشش سطحی (mN/m)	آب خلیج فارس	۵۸/۹۱
		نمونه میکروبی خاک آلوده به مواد نفتی	۴۴/۰۷
		نمونه میکروبی خاک غیر آلوده به مواد نفتی	۳۴/۳۴
۲	شاخص E24	نمونه میکروبی خاک آلوده به مواد نفتی	۰/۴۴
		نمونه میکروبی خاک غیر آلوده به مواد نفتی	۰/۵۸

# فصل پنجم

## نتیجه گیری

- ۱- جهت مطالعه دقیق جریان سیالات در محیط متخلخل بهره گیری از آشکار سازی فرآیند ها مسئله ای ضروری است. جهت این امر، استفاده از مغزه ها و ستون های طبیعی و مصنوعی کارآمد نیستند و موفقیت این گونه تحقیقات نیاز به بهره گیری از میکرومدل های با کیفیت مناسب دارد. در این پژوهش که هدف اصلی آن بررسی پدیده ی انتقال بیوکلوئید ها در محیط متخلخل بود، ابزار اصلی انجام آزمایشات میکرومدل ها بودند که مقایسه نتایج بدست آمده از این پژوهش و سایر پژوهش ها نشانگر کیفیت مطلوب میکرومدل های ساخته شده بود. با توجه به کاربرد وسیع میکرومدل ها در مطالعات مهندسی نفت، دستیابی به دانش فنی ساخت میکرومدل ها می تواند تاثیر بسزایی در افزایش کارآمدی تحقیقات و دقیق تر گردیدن نتایج آنها داشته باشد.
- ۲- انجام موفق مکانیسم مسدود سازی میکروبی با بهره گیری از جرم زنده میکروارگانیسم ها، بیانگر کارآمدی این مکانیسم در حل مشکل مهم ناهمگنی محیط متخلخل در شرایط مختلف درون محل و برون محل می باشد. این در حالی است که استفاده از روش سیلابزنی در الگوهای ناهمگن کارآمد نیست، چرا که این روش نمی تواند مشکل ناهمگنی را رفع نماید و بیشتر سیال تزریقی وارد لایه پرتراوا گشته و پتانسیل نفتی لایه کم تراوا وارد تولید نفت نمی گردد. اما مسدود سازی میکروبی با همگن سازی محیط متخلخل امکان ورود نفت به لایه کم تراوا را فراهم نموده و از این طریق نفت موجود در این لایه ها نیز برداشت می گردد.
- ۳- جهت نمونه گیری برای تهیه جمعیت اولیه میکروب ها، شرایط مکان حائظ اهمیت است. در این مطالعه هر دو نمونه تهیه شده از خاک سطح دانشکده فنی بودند، اما یک نمونه از محل خاک آلوده به مواد نفتی و دیگری از محل خاک های غیر آلوده به مواد نفتی بود. ارزیابی نتایج بدست آمده نشان می دهد که این نمونه ها، هم در مرحله رشد جهت انجام مکانیسم مسدود سازی میکروبی و هم در مرحله تولید متابولیت هایی نظیر بیوسورفاکتانت و بیوامولسیفایر جهت تسهیل حرکت نفت، به طور متفاوت عمل کرده اند.
- ۴- تغییر کشش بین سطحی آب و نفت و همچنین قابلیت امولسیون سازی نمونه های میکروبی نشان داد که بهره گیری از روش میکروبی در الگوهای ناهمگن، علاوه بر قابلیت مسدودسازی جرم زنده میکروارگانیسم ها، آنها می توانند از طریق تولید متابولیت های مختلف نیز برداشت نفت را افزایش دهند.

فصل ششم

پیشنهادات



۱- پیشنهاد می شود که جهت ادامه این پژوهش، پدیده های مختلف انتقال بیوکلوئید ها به صورت مجزا مورد بررسی قرار گیرند.

۲- در زمینه مدل سازی پدیده های انتقال بیوکلوئید ها در محیط متخلخل، فضا برای انجام مطالعات مختلف فراهم است و هنوز موارد ناشناخته زیادی در این زمینه وجود دارد. در نتیجه پیشنهاد می شود که بهد از مطالعات آشکار سازی، تحقیقات ادامه یافته و به سمتی سوق داده شوند که مدل سازی نیز بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات انجام گردد.

۳- یکی از زمینه های مناسب جهت ادامه تحقیقات، بررسی تفاوت های پدیده های انتقال کلوئید ها و بیوکلوئید ها در محیط متخلخل می باشد.

۴- چنانچه تحقیقات بخواهند بیشتر جنبه بیوتکنولوژیکی داشته باشند تا مهندسی مخازن، پیشنهاد می شود که سویه های موجود در نمونه های میکروبی تهیه شده مورد آنالیز و شناسایی قرار گیرند و از سویه های خاص جهت تولید متابولیت های مشخص استفاده شود تا تحقیقات در این زمینه تخصصی تر گردند.

# فصل هفتم

## مراجع

- [۱] کرم بیگی.محمد صابر، شفیعی.مهین، فضائلی پور.محمد حسن، سعادت.محمد، " آشکارسازی تأثیر بیو مواد فعال کننده سطحی بر جریان دو فاز ( نفت و آب) در محیط های متخلخل"، شانزدهمین کنفرانس سالانه(بین المللی) مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [۲] کرم بیگی.محمد صابر، سعادت.محمد، شفیعی.مهین، رنجبر.محمد، "ساخت میکرومدل ها و میکرومدارها با بهره گیری از یک روش جدید"، شماره ثبت ۴۸۵۲۸، سازمان ثبت اختراعات و مالکیت صنعتی کشور، خرداد ۱۳۸۷.
- [۳] سعادت.محمد، شفیعی.مهین، کرم بیگی.محمد صابر، "آشکار سازی سیستم های پلیمری بر کنترل جریان آب در محیط های متخلخل"، شانزدهمین کنفرانس سالانه(بین المللی) مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، اردیبهشت ۱۳۸۷.
- [4] G. L. Gandler, "Mechanistic Understanding of Microbial Plugging for Improved Sweep Efficiency", Master of Science in engineering thesis, University of Texas at Austin, 2006.
- [5] D. W. Green, G. P. Willhite, "Enhanced Oil Recovery", Society of Petroleum Engineers, Second edition, page 142.
- [6] C. Crescente, O. Torsaeter, L. Hultmann, A. Stoem, K. Rasmussen, E Kowalewski, "An Experimental Study of Driving mechanisms in MIOR Processes by Using Rhodococcus sp. 094" SPE 100033-MS, 2006.
- [7] M. J. McInerney, R. M. Knapp, J. L. Chisholm, V. K. Bhupathiraju, J.D. Coates, "Use of Indigenous or Injected Microorganisms for Enhanced Oil Recovery", Proceedings of the 8th International Symposium on Microbial Ecology, Atlantic Canada Society for Microbial Ecology, Halifax, Canada, 1999.
- [۸] حکمت. زهرا، "روش ازدیاد برداشت میکروبی نفت"، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، بهمن ۸۶.
- [9] Bryant, R.S, Burchfield, T.E., Chase, K.L., Bertus, K.M., Stepp, A.K., "Optimization of Microbial Formulations for Oil Recovery: Mechanisms of Oil Mobilization, Transport of Microbes and Metabolites, and Effects of Additives", SPE 19686-MS, 1989.
- [10] Hitzman, D.O., Sperl, G.T., "A New Microbial Technology for Enhanced Oil Recovery and Sulfide Prevention and Reduction", SPE 27752-MS, 1994.
- [11] S. Maxwell, I. Spark, "Souring of Reservoirs by Bacterial Activity During Seawater Waterflooding", SPE 93231-MS, 2005.
- [12] V.O. Imevbore, J.N. Nwankwo, C.N. Ifeadi, M.D Ladan, "Laboratory Assessment of Biodegradation of Non Soluble Drilling Mud Base Fluids Under Nigerian Environmental Conditions", SPE 61043-MS, 2000.
- [13] <http://www.kimiagar85.blogfa.com/post-14.aspx>
- [14] T. L. Skovhus, B. Højris, A. M. Saunders, T. R. Thomsen, M. Agerbæk, J. Larsen, "Practical Use of New Microbiology Tools in Oil Production", SPE 109104-MS, 2007.
- [15] X. Fang, Q. Wang, B. Bai, X. C. Liu, Y. Tang, P. J. Shuler, W. A. Goddard, "Engineering Rhamnolipid Biosurfactants as Agents for Microbial Enhanced Oil Recovery", SPE 106048-MS, 2007.
- [16] E. C. Donaldson, G.V. Chilingarian, T. F. Yen, "Microbial Enhanced Oil Recovery", Developments in petroleum science: 22, Elsevier science publisher, 1989.
- [17] L. K. Jang, M.M. Sharma, T. F. Yen, "The Transport of Bacteria in Porous Media and Its

- Significance in Microbial Enhanced Oil Recovery", SPE 12770-MS, 1984.
- [18] Bryant, Rebecca S., Burchfield, Thomas E., "Review of Microbial Technology for Improving Oil Recovery", SPE 16646-MS, 1989.
- [19] Bryant, Rebecca S., Burchfield, Thomas E., "Microbial-Enhanced Waterflooding: Mink Unit Project", SPE 17341-PA, 1990.
- [20] Teh Fu Yen, "Microbial Enhanced Oil Recovery: Principle and Practice", CRC Press, 1990.
- [21] M.R. Islam, "Mathematical Modeling of Microbial Enhanced Oil Recovery", SPE 20480-MS, 1990.
- [22] R. Almehaideb, A. Y. Zekri, "Optimization of Microbial Flooding in Carbonate Reservoirs", SPE 77796-MS, 2002.
- [23] J. T. Portwood, "A commercial microbial enhanced oil recovery technology: evaluation of 322 Projects", SPE 29518-MS, 1995.
- [24] S.A. Bailey, T.M. Kenney, D.R. Schneider, "Microbial Enhanced Oil Recovery: Diverse Successful Applications of Biotechnology in the Oil Field", SPE 72129-MS, 2001.
- [25] S. Maudgalya, R. M. Knapp, M. J. McInerney, "Microbially Enhanced Oil Recovery Technologies. A Review of the Past, Present and Future", SPE 106978-MS, 2007.
- [26] S. Zahid, H.A. Khan, M.K. Zahoor, "A Review on Microbial Enhanced Oil Recovery With Special Reference to Marginal/Uneconomical Reserves", SPE 107052-MS, 2007.
- [27] Steven L. Bryant, Thomas P. Lockhart, "Reservoir Engineering Analysis of Microbial Enhanced Oil Recovery", SPE 63229-MS, 2000.
- [28] H. Zhao, Zhongyuan, Z. Li, P. Zhao, Y. Wu, Zhongyuan, "Field Pilots of Microbial Flooding in High-Temperature and High-Salt Reservoirs", SPE 95360-MS, 2005.
- [29] S. Maudgalya, M.J. McInerney, R.M. Knapp, D.P. Nagle, M.J. Folmsbee, "Tertiary Oil Recovery With Microbial Biosurfactant Treatment of Low-Permeability Berea Sandstone Cores", SPE 94213-MS 2005.
- [30] L.A. Strappa, J.P. De Lucia, M.A. Maure, M.L. Llopiz, "A Novel and Successful MEOR Pilot Project in a Strong Water-Drive Reservoir Vizcacheras Field, Argentina", SPE 89456-MS, 2004.
- [31] A.Y. Zekri, A.El.Mehaideb, "Microbial And Waterflooding Of Fractured Carbonate Rock: An Experimental Approach", SPE 75217-MS, 2002.
- [32] M. Nourani, H. Panahi, D. Biria, R. Roosta Azad, M. Haghighi, A. Mohebbi, "Laboratory Studies of MEOR in the Micromodel as a Fractured System", SPE 110988-MS, 2007.
- [33] Qingxian Feng, Jiayi Zhou, Fangtian Ni, and Zhiyu Chen, Rulin Liu, "Application of Thermophilic Microbes In Waxy Oil Reservoirs at Elevated Temperature", SPE 71493-MS, 2001.
- [34] W. Chen, M. Miao, L. Chen, D. Wan, "Enhance Oil Production in High Waxy Oil Reservoir by Single Well Cyclic Microbial Injection-Production", SPE 57303-MS, 1999.
- [35] Sunde, Beeder, J. Nilsen, R. K. Torsvik, Terje, "Aerobic Microbial Enhanced Oil Recovery for Offshore Use", SPE 24204-MS, 1992.

- [36] G. Wankui, Sh. Chengfang, Y. Zhenyu, H. Zhaowei, J. Rui, W. Ying, Zh. Jiyuan, Sh. Guanghao, "Microbe-Enhanced Oil Recovery Technology Obtains Huge Success in Low Permeability Reservoirs in Daqing Oilfield", SPE 104281-MS, 2006.
- [37] Q. Feng, F. Ni, B. Qin, X. Ma, C. Ji, X. Wang, "Review of MEOR Technology Application in Dagang Oilfield for the Last Decade", SPE 100791-MS, 2006.
- [38] A. Maure, A. A. Saldana, A. R. Juarez, "Biotechnology Application to EOR in Talara Off-shore Oil Fields, Northwest Peru", SPE 94934-MS, 2005.
- [39] Sh. Mei, L. Wei, L. Guangzhi, H. Peihui, H. Zhaowei, Ch. Xinghong, W. Ying, "Laboratory Study on MEOR After Polymer Flooding", SPE 84865-MS, 2003.
- [40] M. Ghazali Abd. Karim, Mat Ali Hj Salim, Sdn. Bhd, Zahidah Md. Zain, Noor Nazri Talib, "Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Technology in Bokor Field, Sarawak", SPE 72125-MS, 2001.
- [41] A. Maure, F. L. Dietrich, V. A. Diaz, H. Arganaraz, "Microbial Enhanced Oil Recovery Pilot Test in Peidras Coloradas Field, Argentina", SPE 53715-MS, 1999.
- [42] K. Ohno, S. Maezumi, H.K. Sarma, H. Enomoto, C. Hong, S.C. Zhou, K. Fujiwara, "Implementation and Performance of a Microbial Enhanced Oil Recovery Field Fuyu Oilfield, China", SPE 54328-MS, 1999.
- [43] H. Yonebayashi, K. Ono, Enomoto, T. Chida, China Jilin, "Microbial Enhanced Oil Recovery Field Pilot in a Waterflooded Reservoir", SPE 38070, 1997.
- [44] A. Maure, F. Dietrich, U. Gomez, J. Vallesi, M. Irusta, "Waterflooding optimization using biotechnology: 2-year field test, La Ventana Field", SPE 69652-MS, 2001.
- [45] J. T. Portwood, "A commercial microbial enhanced oil recovery technology: evaluation of 322 Projects", SPE 29518-MS, 1995.
- [46] D. B. Evans, A. K. Stem, T. French, "Improved Crude Oil Recovery by Alkaline Flooding Enhanced with Microbial Hydrocarbon Oxidation", SPE 39661-MS, 1998.
- [47] ایمان طلب.حجت، "بررسی راهکارهای کنترل رسوب آسفالتین با استفاده از خاصیت کشش سطحی در نفت مارون"، پایان نامه کارشناسی مهندسی معدن (اکتشاف)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۴.
- [48] S.C. Ayirala, "Surfactant-Induced Relative Permeability Modifications for Oil Recovery Enhancement", Master of Science in petroleum engineering thesis, Louisiana State University, 2002.
- [49] S. M. M. Dastgheib, M. A. Amoozgar, E. Elahi, S. Asad, I. M. Banat, "Bioemulsifier production by a halothermophilic Bacillus strain with potential applications in microbially enhanced oil recovery", Biotechnology Letters, vol. 30, num.2, Springer Netherlands 2008.
- [50] J. Gabitto, M. Barrufet, "Combined Combined Microbial Surfactant-Polymer System For Improved Oil Recovery Mobility And Conformance Control", 3<sup>rd</sup> annual progress report to DOE, contract number: DE-FG26-01NT41357.
- [51] کرم بیگی، محمد صابر، پویان مهر، محمد، رنجبر، محمد، "بررسی تاثیر متقابل آب و نفت بر ویژگی های سطحی در سیستم های دو فاز و مدل سازی آن به کمک منطق فازی"، یازدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.
- [52] M. J. McInerney, S. K. Maudgalya, R. Knapp, M. Folmsbee, "Development of Biosurfactant-mediated oil recovery in Model Porous Systems and Computer Simulations of

Biosurfactant-Mediated Oil Recovery”, Department of Petroleum Engineering and Department of Botany and Microbiology, University of Oklahoma, 2004.

[53] L. Jinfeng , M. Lijun, M. Bozhong , L. Rulin , N. Fangtian , Z. Jiayi, “The field pilot of microbial enhanced oil recovery in a high temperature petroleum reservoir”, Journal of Petroleum Science and Engineering 48, pp265– 271, 2005.

[54] F.J. Ochoa-Loza, W.H. Noordman, D.B. Janssen, M.L. Brusseau, R.M. Maier, “Effect of clays, metal oxides, and organic matter on rhamnolipid biosurfactant sorption by soil”, Chemosphere 66, pp1634–1642, 2007.

[55] G. Chen, H. Zhu, “Bacterial adhesion to silica sand as related to Gibbs energy variations”, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 44, pp41–48, 2005.

[56] S. Maudgalya, M.J. Mcinerney, R.M. Knapp, D. P. Nagle, M.J. Folmsbee, “Development of Bio-surfactant Based Microbial Enhanced Oil Recovery Procedure”, SPE 89473, 2004.

[57] Q. Liu, M. Dong, K. Asghari, Y. Tu, “Wettability alteration by magnesium ion binding in heavy oil/brine/chemical/sand systems - Analysis of electrostatic force”, Journal of Petroleum Science and Engineering 59(1), pp147-156, 2007.

[58] V. Lazouskaya, Y. Jin, D. Or, “Interfacial interactions and colloid retention under steady flows in a capillary channel”, Journal of Colloid And Interface Science303(1), pp171-184, 2006.

[59] V. Jain, A. H. Demond, “Conductivity reduction due to emulsification during surfactant enhanced-aquifer remediation. 1. Emulsion transport”, Environmental science & technology36 (24), pp5426-5433, 2002.

[60] P. Armitage, R.A. Dawe, “What Is the Rheology of Foam in Porous Media? A Micromodel Study”, SPE 18495-MS, 1989.

[61] Hornbrook J.W., Castanier L.M., Pettit P.A, “Observation of Foam/Oil Interactions in a New, High-Resolution Micromodel”, SPE 22631-MS, 1991.

[62] Chang, Shih-Hsien, Martin F.D., Grigg R.B., “Effect of Pressure on CO2 Foam Displacements: A Micromodel Visualization Study”, SPE 27784-MS, 1994.

[63] L. Zhong, A. Mayer, R. J. Glass, “Visualization of surfactant-enhanced nonaqueous phase liquid mobilization and solubilization in a two-dimensional micromodel”, Water Resource Research, VOL37, NO3, pp523–538, 2001.

[64] S.W. Jeong, Y.M. Corapcioglu, “A micromodel analysis of factors influencing NAPL removal by surfactant foam flooding”, Journal of Contaminant Hydrology, Volume 60, Number 1, pp77-96, 2003.

[65] S.W. Jeong, M.Y. Corapcioglu, “Force analysis and visualization of NAPL removal during surfactant-related floods in a porous medium, Journal of Hazardous Materials126(1), pp8-13 ,2005.

[66] R. Sharmin ,I.A. Marios, Legge, Raymond L., “Effect of nonionic surfactant partitioning on the dissolution kinetics of residual perchloroethylene in a model porous medium”, Journal of contaminant hydrology82(1-2), pp145-164, 2006.

[67] S.W. Jeong, A. L. Wood, T. R. Lee, “Effects of pure and dyed PCE on physical and interfacial properties of remedial solutions”, Journal of Hazardous Materials, Volume 95, Issues 1-2, pp125-135, 2002.

- [68] S.W. Jeong, M. Y. Corapcioglu, Sh. E. Roosevelt, “Micromodel Study of Surfactant Foam Remediation of Residual Trichloroethylene”, *Environmental Science Technology* 34(16), pp3456 - 3461, 2000.
- [69] S.E. Fratesi, “Distribution and morphology of bacteria and their byproducts in microbial enhanced oil recovery operations”, Thesis of Master of Science in Geosciences, Mississippi State University, 2002.
- [70] J.H. Bae, K.T. Chambers, H.O. Lee, “Microbial Profile Modification Using Spores”, SPE 28617-PA, 1994.
- [71] G.E. Jenneman, R.E. Lappan, R.H. Webb, “Bacterial Profile Modification With Bulk Dextran Gels Produced by the In-Situ Growth and Metabolism of *Leuconostoc* Species”, SPE 59307-MS, 2000.
- [72] T.L. Stewar, D.-Sh. Kim, “Modeling of biomass-plug development and propagation in porous media”, *Biochemical Engineering Journal*, vol. 17, issue 2, pp107-119, February 2004.
- [73] S. Kasapis, Sh.S. Sablani, “The effect of pressure on the structural properties of biopolymer/co-solute. Part II: The example of gelling polysaccharides”, *Carbohydrate Polymers* 72, pp537–544, 2008.
- [74] Lappan, R.E, Fogler, H.S, "Effect of Bacterial Polysaccharide Production on Formation Damage", SPE 19418-PA, 1992.
- [75] Parli J.A., Stepp, A.K., Evans, D.B., Bryant, R.S., Jenneman, G.E., "Transport and Stability of Polymer-Producing Bacteria in Porous Media", SPE 39670-MS, 1998.
- [76] V. Ivanov, J. Chu, “Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ”, *Review Environmental Science Biotechnology*, DOI 10.1007/s11157-007-9126-3, Springer Science, Business Media B.V., 2008.
- [77] J.R. Patil, B.A. Chopade, “Study on bioemulsifier production by *Acinetobacter* strains isolated from healthy human skin”, *Journal of applied microbiology* 91, 2001.
- [78] Edstrom Industries, “Biofilm”, 819 Bakke Ave., Waterfurd, WI53185 USA, e-mail: lab@edstrom.com.
- [79] G.E. Kapellos, T.S. Alexiou, A.C. Payatakes, “Hierarchical simulator of biofilm growth and dynamics in granular porous materials”, *Advances in water resources* 30, page 1661, 2007.
- [80] J. Komlos, A.B. Cunningham, B. Warwood, G. James, “Biofilm Barrier Formation and Persistence in Variable Saturated Zones”, *proceedings of the 1998 Conference on Hazardous Waste Research*, pp202-208, 1998.
- [81] S.A. Rice, K.S. Koh, S.Y. Queck, M. Labbate, K. W. Lam, S. Kjelleberg, “Biofilm Formation and Sloughing in *Serratia marcescens* Are Controlled by Quorum Sensing and Nutrient Cues”, *Journal of bacteriology*, pp3477–3485, May 2005.
- [82] Th. Baumann, Ch. J. Werth, “Visualization and Modeling of Polystyrol Colloid Transport in a Silicon Micromodel”, *vadose zone journal* 3, pp438, 2004.
- [83] Arturo A. Keller, Maria Auset, “A review of visualization techniques of biocolloid transport processes at the pore scale under saturated and unsaturated conditions”, *Advances in Water Resources* 30, pp1392–1407, 2007.

- [84] A.K. Camper, “Effect of motility and adsorption rate coefficient on transport of bacteria through saturated porous media”, Applied and environmental microbiology, Oct. 1993.
- [85] G.E. Jenneman, et al, “Microbial penetration through nutrient saturated berea sandstones”, Applied and environmental microbiology, Aug. 1985.
- [86] Long-Kuan Jng, et al, “Selection of bacteria with favorite transport properties through porous rock for the application of microbial enhanced oil recovery”, Applied and environmental microbiology, Nov. 1983.
- [87] G.L. Gandler, “Mechanistic Understanding of Microbial Plugging for Improved Sweep Efficiency”, thesis of master of science in engineering, University of Texas at Austin, page7, May 2006.
- [88] Bryant, Rebecca S., Burchfield, Thomas E., “Review of Microbial Technology for Improving Oil Recovery”, SPE 16646-PA, May 1989.
- [89] M.M. Sharma, Y.I. Chang, T.F. Yen, “Reversible and irreversible surface charge modification of bacteria for facilitating transport through porous media”, colloids and surfaces, vol.16, issue 2, pp 193-206, November 1985.
- [90] Y. Sugai, H. Chengxie, T. Chida, H. Enomoto, ”Simulation Studies on the Mechanisms and Performances of MEOR Using Polymer Producing Microorganism Clostridium sp. TU-15A”, SPE 110173-MS, 2007.
- [91] R. S. Bryant, “Potential Uses of Microorganisms in Petroleum Recovery Technology”, Oklahoma Academy of Science, Volume 67, Page 97, 1987.
- [92] F. A. Macleod, H. M. Lappin-Scott, AND J. W. Costerton, Plugging of a model rock system by using starved bacteria”, applied and environmental microbiology, pp. 1365-1372, June 1988.
- [93] M. Abu El Ela, S. El-Tayeb, M.H. Sayyouh, M. Abdel Dayem, S. Desouky, “Effects of Stimulating Indigenous Bacteria in Oil Reservoirs on Relative Permeability Curves” , SPE 75240-MS, 2002.
- [94] S.W. Shales, S. Kumara-asingham, ”Bacteria transport through porous solids: interaction between micrococcus luteus and sand particles”, journal of industrial microbiology 2, 1987.
- [95] G.L. Gandler, “Mechanistic Understanding of Microbial Plugging for Improved Sweep Efficiency”, thesis of master of science in engineering, University of Texas at Austin, May 2006.
- [96] R.A. Raiders, M.J. McInerney, D.E. Revus, H. M. Torbati, R.M. Knapp, G.E. Jenneman, “Selectivity and Depth of Microbial Plugging in Berea Sandstone Cores”, Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, volume 1, number 3, pp195-203, July 1986.
- [97] L. R. Brown, A. A. Vadie, C. U. Pittman, F. L. Lynch, “Augmenting a Microbial Selective Plugging Technique with Polymer Flooding to Increase the Efficiency of Oil Recovery”, third semi-annual progress report, DOE/BC/15210-2, OSTI ID: 807624, December 2000.



- [98] L. Mauclaire, A. Schürmann, F. Mermillod-Blondin, "Influence of hydraulic conductivity on communities of microorganisms and invertebrates in porous media: a case study in drinking water slow sand filters", *Aquat. Sci.* 68, pp100–108, 2006.
- [99] M. Thullner, J. Zeyer, W. Kinzelbach, "Influence of Microbial Growth on Hydraulic Properties of Pore Networks", *Transport in Porous Media* 49, pp99–122, 2002.
- [100] M. Thullner, M. H. Schroth, J. Zeyer, W. Kinzelbach, "Modeling of a microbial growth experiment with bioclogging in a two-dimensional saturated porous media flow field", *Journal of Contaminant Hydrology* 70, pp 37– 62, 2004.
- [101] G. Kim, S. Lee, Y. Kim, "Subsurface Biobarrier Formation by Microorganism Injection for Contaminant Plume Control", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol.101, no.2, pp142–148, 2006.
- [102] G.E. Jenneman, P.D. Moffitt, G.R. Young, Phillips, "Application of a Microbial Selective-Plugging Process at the North Burbank Unit: Pre-pilot Tests", *SPE 27827-PA*, 1996.
- [103] R.A. Raiders, et al, "Microbial selective plugging and enhanced oil recovery", *Journal of Industrial Microbiology* 4, 1989.
- [104] O. Lee, Hae, Bae, Jae H., "Effects of Variables on Microbial Profile Modification with Spores", *SPE 39671-MS*, 1998.
- [105] R.A. Raiders, T.F. Maher, R.M. Knapp, M.J. McInerney, "Selective Plugging and Oil Displacement in Crossflow Core Systems by Microorganisms", *SPE 15600-MS*, 1986.
- [106] H. M. Torbati, R. A. Raiders, E. C. Donaldson, M. J. McInerney, G. E. Jenneman, M. Knapp, "Effect of Microbial Growth on Pore Entrance Size Distribution in Sandstone Cores", *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, volume 1, number 4, pp227-234, December 1986.
- [107] M. Thullner, J. Zeyer, W. Kinzelbach, "Influence of Microbial Growth on Hydraulic Properties of Pore Networks", *Transport in Porous Media* 49, page 100, 2002.
- [108] S.L. Terri, F.H. Scott, "Biomass plug development and propagation in porous media", *Biotechnology and Bioengineering* 72(3), pp353-363, February 2001.
- [109] M. Nemati, E. A. Greene, G. Voordouw, "Permeability Profile Modification Using Bacterially Formed Calcium Carbonate: Comparison with Enzymic Option", *Process Biochemistry*, volume 40, issue 2, pp925-933, February 2005.
- [110] Y. Sugai, H. Chengxie, T. Chida, H. Enomoto, "Simulation Studies on the Mechanisms and Performances of MEOR Using Polymer Producing Microorganism *Clostridium* sp. TU-15A", *SPE 110173-MS*, 2007.
- [111] L. Zhong, M.R. Islam, "A new microbial plugging process and its impact on fracture remediation", *SPE 30519-MS*, 1995.
- [112] M.R. Islam, "Mathematical Modeling of Microbial Enhanced Oil Recovery", *SPE 20480-MS*, 1990.

- [113] M-M. Chang, F.T-H. Chung, R.S. Bryant, H.W. Gao, T.E. Burchfield, "Modeling and Laboratory Investigation of Microbial Transport Phenomena in Porous Media", SPE 22845-MS, 1991.
- [114] V.O. Imevbore, J.N. Nwankwo, C.N. Ifeadi, M.D Ladan, "Laboratory Assessment of Biodegradation of Non Soluble Drilling Mud Base Fluids Under Nigerian Environmental Conditions", SPE 61043-MS, 2000.
- [115] I. Iliuta, F. Larachi, "Modeling simultaneous biological clogging and physical plugging in trickle-bed bioreactors for wastewater treatment", chemical engineering science 60, pp1477 – 1489, 2005.
- [116] B. Chen-Charpentier, "Numerical simulation of biofilm growth in porous media", journal of computational and applied mathematics 103, pp55-66, 1999.
- [117] Z. Ibrahim, M. Ismail O., Kh.S. Foo, E. J. Elias, M. Othman, "Simulation Analysis of Microbial Well Treatment of Bokor Field, Malaysia", SPE 88453-MS, 2004.
- [118] M.R. Ghadimi, M. Ardjmand, "Simulation of Microbial Enhanced Oil Recovery", SPE 101734-MS 2006.
- [119] H. Gang, M. Liu, B. Mu, "Characterization of Microbial Transport in Cylindrical Pores", Chinese Journal of Chemical Engineering, vol. 14, issue 6, pp 819-824, December 2006.
- [120] I. Iliuta, F. Larachi, "Dynamics of cells attachment, aggregation, growth and detachment in trickle-bed bioreactors", chemical engineering science 61, pp4893 – 4908, 2006.
- [121] G.E. Kapellos, T.S. Alexiou, A.C. Payatakes, "Hierarchical simulator of biofilm growth and dynamics in granular porous materials", advances in water resources 30, pp1648–1667, 2007.
- [122] Nathalie Tufenkji, "Modeling microbial transport in porous media", advanced in water resources, 2006.
- [123] N. Tufenkji, "Colloid and Microbe Migration in Granular Environments: A Discussion of Modelling Methods", department of chemical engineering, McGill university, Montreal, e-mail: nathalie.tufenkji@mcgill.ca
- [124] Th. Baumann, Ch. J. Werth, "Visualization and Modeling of Polystyrol Colloid Transport in a Silicon Micromodel", vadose zone journal 3, pp434–443, 2004.
- [125] Sh.-Ch. Chen, E.K.C. Lee, Y.-I. Chang, "Effect of the coordination number of the pore-network on the transport and deposition of particles in porous media", separation and purification technology 30, pp11–26, 2003.
- [126] G. Chen, M. Qiao, H. Zhang, H. Zhu, "Bacterial desorption in water-saturated porous media in the presence of rhamnolipid biosurfactant", Research in Microbiology 155, pp655–661, 2004.
- [127] C.L. Perrin, K.S. Sorbie, P.M.J. Tardy, J.P. Crawshaw, "Micro-PIV: A New Technology for Pore Scale Flow Characterization in Micromodels", SPE 94078-MS, 2005.
- [128] Naoyuki Ochiai, Erika L. Kraft, John S. Selker, "Methods for colloid transport visualization in pore networks", water resources research, vol. 42, W12S06, 2006.

- [129] M.Y. Corapcioglu, P. Fedirchuk, "Glass bead micromodel study of solute transport", journal of contaminant hydrology 36, pp209-230, 1999.
- [130] Florida Sampling and Testing Methods, "Florida Method of Test for Coefficient of Permeability-Falling Head Method", FM 5-513, September 2000.
- [131] M.H. Fazelipour, S.A. Shojaosadati, E. Vasheghani Farahani, "Two Liquid Phase Biofiltration for Removal of n-Hexane from the Polluted Air", environmental engineering science, vol. 23, num. 6, 2006.

## **Abstract**

In this study, the efficiency of microbial enhanced oil recovery (MEOR) method was visualized in heterogeneous patterns by means of micromodels and the results were compared with waterflooding. Heterogeneity of porous media is one of the most important factors that greatly influence oil recovery. In a heterogeneous medium, the injected slug is canalized through high permeable zones and the oil in low permeable zones remains in the reservoir. Several methods have been suggested to solve this problem. Cementing and chemical or microbial plugging of high permeable zones are among the potential methods to solve the problem. An important question related to MEOR is that how biocolloid distribute in a medium with with heterogenous pores? To answer this question, we attempted to visualize the microbial plugging of high permeable zones in a glass bead and etched micro-model. For this purpose two bacterial consortia were isolated from soil. One consortium was enriched from an oil contaminated soil and the another was isolated from an uncontaminated soil. The consortia were able to grow on crude oil as the sole source of carbon and energy. Both in-situ and Ex-situ methods of MEOR were performed. The former for an etched micro model and the latter for a glass bead micro model. Using colored indicators and microscopic observations, we were able to demonstrate that the bacteria could penetrate in high permeable zones and plug them biologically and in the regard MEOR method was superior to water flooding method.



Shadid Bahonar University of Kerman  
Faculty of engineering  
Chemical engineering department

# **Visualization of Microbial Enhanced Oil Recovery by Usage of Micromodels**

Presented as Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of  
Master of Science in Chemical Engineering

## **Supervisors:**

Dr. M. Schaffie

Dr. M.H. Fazaelpoor

## **By:**

M. S. Karambeigi

September 2008