

# ازدیاد برداشت از مخازن نفتی به روش میکروبی

# MEOR

مهدی نجف‌پور - دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی  
محمد خشنودی - عضو هیات علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان  
علی وطنی - عضو هیات علمی دانشگاه تهران  
نادر نیک‌نام - کارشناس مهندسی شیمی

## چکیده

در این مقاله ضمن معرفی تکنولوژی میکروبی برای ازدیاد برداشت از مخازن نفت به بررسی علل افت برداشت نفت، ویژگی‌های مخازن قابل اجرا توسط MEOR (از قبیل جنس مخازن، عمق مخازن، API نفت، نمک حل شده، تخلخل و تراوایی، PH، دما و فشار، ...) مخازن مناسب برای MEOR، سازوکار مختلف میکروب‌ها در افزایش برداشت نفت، ویژگی باکتری مناسب برای MEOR، شیوه‌های متداول استفاده از میکروب‌ها در ازدیاد برداشت، انتقال میکروبی در محیط متخلخل، طراحی یک پروژه میدانی MEOR، مزایای اقتصادی MEOR، برخی از کاربردهای

میدانی MEOR، پیشرفت تحقیقات و کاهش هزینه‌ها، اهمیت MEOR برای کشور، مشکلات اجرایی طرح و مسایل زیست محیطی پرداخته شده است.  
**کلید واژه‌ها:** ازدیاد برداشت میکروبی، مخازن نفت، بیوتکنولوژی

## مقدمه

یکی از کاربردهای بیوتکنولوژی، استفاده از میکروارگانیسم‌ها در صنایع نفتی می‌باشد. این کاربرد، با توجه به گستردگی صنعت نفت در کشور ما بایستی مورد توجه خاص قرار گیرد. استفاده از میکروب‌ها در ازدیاد برداشت نفت بحث جدیدی نیست. اولین مورد مکتوب، در سال ۱۹۱۳ مربوط به

ج.ب. دیویس (J.B.Davis) است. در سال ۱۹۴۶، سی.ای. زوبل (C.a.zobell) فرایندی را برای بازیافت ثانویه نفت با استفاده از میکروب‌های بی‌هوازی و مکانیزم انحلال مواد معدنی سولفاتی ثبت کرد. اولین آزمایش میدانی ازدیاد برداشت نفت به روش میکروبی (MEOR) در سال ۱۹۵۴ در یکی از میادین نفتی آرکانزاس انجام گرفت. اما با وجود موفق بودن، به دلیل در دسترس بودن منابع نفتی ارزان قیمت، این شیوه‌ها کنار گذاشته شدند. در دهه ۱۹۷۰ مجدداً به دلیل ناپایداری قیمت نفت و گرایش به بیوتکنولوژی، این شیوه‌ها مورد توجه قرار گرفتند. از ۱۹۸۰ به بعد به دلیل افزایش قیمت نفت در کشورهای گوناگون، این روش‌ها کم و

بیش متداول شدند و به نظر می‌رسد که در آینده تنها شیوه افزایش برداشت باشند.

### علل افت برداشت نفت

نرخ تولید نفت طی بازیافت اولیه توسط فشار موینگی چاه تعیین می‌شود. اشباع آب و نفت در این نواحی تابعی از فشار موینگی بین دو سیال هستند. فاکتور مهمی که رفتار فشار موینگی را کنترل می‌کند، توزیع اندازه ورودی حفرات است. اگر توزیع اندازه ورودی حفره کاهش یابد، تغییری در فشار موینگی ملاحظه می‌شود که تولید نفت در اشباع‌های نفت باقی مانده بزرگتر، متوقف می‌شود و در نتیجه بخش قابل ملاحظه‌ای از نفت متحرک که ممکن است در فاصله کوتاهی از چاه قرار داشته باشد بازیافت نشود. مهاجرت ذرات ریزگل، مواد معدنی، رسوب پارافین‌ها و آسفالتین‌ها و فشردگی سنگ‌ها می‌توانند توزیع اندازه ورودی حفره را کم کنند و بنابراین بازیافت نفت کاهش یابد. از پارامترهای دیگری که باعث کاهش در برداشت نفت می‌گردد بالا بودن ویسکوزیته نفت به علت دارا بودن انواع هیدروکربن‌های بلندشاخه و بعضی از آروماتیک‌ها، همچنین پارافین‌ها و رسوب آسفالتین‌ها اشاره کرد. بالا بودن کشش سطحی بین نفت و آب از عوامل متعدد دیگری است که باعث عدم استخراج نفت می‌گردد. ناهمگن بودن شبکه مخزن نیز (تراوایی بالا و پایین) به طرز شدیدی منجر به تأثیر در بازیافت نهایی نفت می‌گردد. [1,3,6]

### ویژگی‌های مخازن قابل اجرا توسط MEOR

**جنس مخازن:** بیش از نیمی از مخازن نفتی دنیا کربناتی هستند. سنگ‌های کربناتی و آهنی جزو سنگ‌های رسوبی هستند. درصد کمی از نفت در مخازن ماسه‌ای یافت می‌شود. معایب و - بهبود معایب مخازن کربناتی به شرح زیر است:

- پایین بودن تراوایی
- امکان تداخل بیولوژیک به علت قابلیت جذب گل و مواد معدنی دیگر موجود داخل حفرات
- جلوگیری از حرکت میکروب‌ها در مخزن به دلایل: ۱- در PH و قدرت یونی مناسب گل دارای بار سطحی شده و میکروب‌ها را جذب می‌نماید
- ۲- متورم شدن گل در اثر جذب آب
- گل، گرانشی فاز آبی را افزایش داده که به نوبه خود باعث محدودیت در نفوذ گازها و مواد غذایی لازم برای مصرف میکروب‌ها می‌شود
- به دلیل حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی در آب نمک مخازن کاربرد اکثر روش‌های EOR پیچیده است.

برای بهبود در جذب میکروب‌ها می‌توان با به‌کارگیری نمک‌های  $CaCl_2, KCl, NaCl$  این محدودیت را کاهش داد. [4,5]

**عمق مخازن:** عمق مخزن با تأثیری که بر فشار و دمای مخزن ایجاد می‌کند در رشد و متابولیسم میکروبی موثر است. معمولاً مخازن با عمق کمتر از ۸۰۰۰ فوت مناسب هستند. ولی مخازنی نیز یافت شده است که در عمق بیشتر از ۸۲۰۰ فوت تحت

عمل MEOR قرار گرفته‌اند. در مجارستان در عمیق‌ترین چاه حدود ۱۱۸۰۰ که فشار مخزن حدود ۲۲۸ اتمسفر و دمای حدود  $97^{\circ}C$  از دیاد برداشت رخ داده است [1,2,6].

API نفت: به عنوان معیاری از دانسیته نفت است که به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$API^{\circ} = \frac{141.5}{SG \frac{60^{\circ}F}{60^{\circ}F}} - 131.5$$

هرچقدر API از عدد ۱۸ بالاتر رود نفت سبک‌تر و در صورتی که از ۱۸ کمتر شود نفت سنگین‌تر می‌شود. به عبارتی ترکیبات سنگین در نفت زیاد می‌گردد. در شرایطی که API از ۱۰ کمتر باشد نفت به صورت شبه جامد در می‌آید که برای استخراج آن لازم است نفت ابتدا تحت تزریق بخار یا احتراق درجه قرار گیرد. هرگاه نفت خام تحت تأثیر هوا قرار گیرد در اثر تبخیر و تجزیه میکروبی (استفاده میکروب‌ها از مولکول‌های کوچک به عنوان ماده قندی) سنگین‌تر می‌شود. آلکان‌های با عدد کربنی زیر ۱۰ (C10) بهترین نوع انتخاب برای میکروب‌ها هستند. هر قدر نفت در اعماق پایین‌تر قرار گیرد، دارای درجه API بالاتری خواهد بود. طی عمل آبرویی (Water Flooding) آکسیژن محلول در آب وارد قسمت‌های عمیق مخزن می‌شود و سبب رشد هوازی میکروبی می‌گردد. این کار باعث تولید هیدروکربن‌ها مناسب برای استفاده میکروب‌های بی‌هوازی از قبیل میکروب‌های بی‌هوازی تولیدکننده متان می‌شود که این کار می‌تواند باعث تولید گاز از طرفی دیگر باعث افزایش برداشت و همچنین سبک‌تر شدن نفت

**تخلخل و تراوایی:** تخلخل پارامتر مهمی در انتقال میکروب‌ها در طول مخازن است. تخلخل مخزن باید به حدی باشد که باکتری بتواند به آسانی در آن انتقال یابد. اگر تخلخل مخزن کم باشد انتقال میکروبی مشکل می‌شود. از طرفی در بستری با تخلخل بالا سلول‌ها دارای رشد زیادتری بوده و تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد. از طرفی فاز تاخیر در حفرات وسیع‌تر کوتاه‌تر است. قطر حفرات باید حداقل دو برابر قطر باکتری‌های مورد استفاده باشند تا عمل انتقال به آسانی صورت پذیرد. تراوایی یک محیط متخلخل توانایی مواد برای عبور سلول است. حد پایین تراوایی برای MEOR در محدوده ۷۵-۱۰۰ md است ولی در تراوایی پایین نیز مشاهده شده است [4]

PH:PH: از جمله عوامل رشد و افزایش تعداد سلولی به شمار می‌رود و تولید متابولیت‌های سلولی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تعدادی از باکتری‌ها قادرند PH های بالا (بازی) و تعدادی در PH های پایین (اسیدی) فعالیت داشته باشند. ولی آنچه در MEOR مهم است پیداکردن میکروارگانیسم‌هایی است که بتوانند در محدوده ۱۰-۲ فعالیت کنند. PH در مخازن نفتی زیاد عامل محدودکننده‌ای نیست. تخمین زده می‌شود که ۷۰-۵۰٪ چاه‌های نفتی آمریکا که می‌توانند تحت پروژه MEOR قرار گیرند در محدوده PH بین ۴-۸ قرار دارند که پیداکردن میکروارگانیسم‌هایی که بتوانند در چنین PH ای فعالیت کنند

کلاستریدیوم‌ها را که گاز و اسید و الکل و سورفکتانت‌ها را تولید می‌کند جداسازی کرد. اما توانایی چنین باکتری‌هایی در غلظت‌های نمک بالای ۷٪ به عنوان یک مشکل اساسی باقی ماند. بالا بودن غلظت نمک در مخازن توانایی میکروب‌ها را در تولید پارامترهای یادشده مختل می‌سازد. در صورتی که مخازن از نظر درجه شوری بالا باشند می‌توان در اثر عمل آبرویی غلظت نمک را تعدیل کرد. چون MEOR برای مخازنی کاربرد دارد که قبلاً آبرویی شده‌اند پس آبرویی قادر خواهد بود تا غلظت نمک را تنظیم نماید. گونه‌ای از باکتری‌های کلاستریدیوم و باسیل قادرند تا 50mg/l را تحمل کنند. تعدادی از گونه‌های باسیل که در شرایط مورد نظر قادر به رشد و تولید پلی ساکاریدها هستند، افزایش فشار تا 40Mpa تولید پلی ساکاریدها را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند، ولی با افزایش غلظت نمک تولید این مواد شدیداً کاهش می‌یابد. اخیراً کاربرد گونه‌ای از سودموناتاس به نام *Pseudomonas Stutaeri* با مشخصات لوله‌ای به طول ۲/۸-۱/۲ μm و قطر 0.75-0.85 میکرومتر که توانایی تحمل نمک تا ۸ گرم بر لیتر را دارد مورد استفاده قرار گرفته است و بهترین شرایط رشد آن در نمک 20-80gr/L می‌باشد. شوری برای مخازن با عمق بالا مشکل حادی است ولی برای مخازن با عمق کم به دلیل ارتباط با آب‌های سطحی ایجاد اشکال نمی‌کند (کاهش غلظت نمک در اثر ارتباط با آب‌های سطحی) [4,7,8]

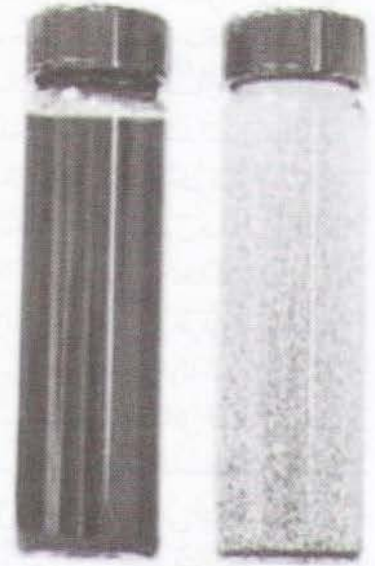
گردد. Douglas و Bryant تاثیر بعضی از میکروب‌های مختلف را در راندمان برداشت نفت بررسی کردند. آنها با مطالعه‌ای که در مغزه‌های (Core) شن و ماسه‌ای انجام دادند به افزایش ۷۲٪ از برداشت نفت (API حدود ۱۷ و ۱۴) نسبت به حالت آبرویی دست یافتند [1,2,6]

**نمک حل شده:** میکروب‌هایی برای MEOR مناسب هستند که بتوانند غلظت‌های بالای نمک مخازن نفتی را تحمل کنند. معمولاً آنچه به عنوان شوری در مخازن مطرح است میزان NaCl حل شده در آب مخزن است. میکروب‌های نمک دوست (Halophiles) نیازهای تغذیه‌ای پیچیده‌ای دارند و میزان نمک لازم برای رشد چنین میکروب‌هایی بین حداقل ۱۲-۱۰٪ تا حداکثر ۳۲٪ حجمی - وزنی است. اکثر آنها هوازی و تعداد خیلی کمی از آنها بی هوازی است (مناسب برای MEOR به دلیل شرایط بی هوازی مخزن). مناسب‌ترین نوع میکروب‌های نمک دوست برای MEOR، نمک دوست‌های معتدل یا (Moderate Halophiles) هستند که در محدوده وسیعی از نمک قابل رشد می‌باشند. جامدات زیادی در مخازن به صورت محلول هستند که حتی در اعماق زیاد به حد فوق اشباع می‌رسند که به عنوان کل جامدات حل شده (TDS) معرفی می‌شوند. در بعضی از مخازن میزان  $CaCl_2$  و NaCl زیاد است و در بعضی منیزیم بی کربنات و سولفات غالب است و یون‌های دیگری در بعضی موارد به تعداد قابل ملاحظه‌ای (1400-6000mg/L) از جمله برمید و یدید مشاهده می‌شود. Grula، گونه‌ای از



۲۷  
شماره ۲۶ - مهر ۱۳۸۴

کار زیاد مشکلی نیست (شکل ۱). [4,6]



شکل ۱

**دما و فشار:** با توجه به اقتصادی و آسان بودن MEOR هنوز این پروژه کاربرد زیادی پیدا نکرده است. علت آن مشکل بودن در پیدا کردن، جداسازی و مهندسی میکروارگانیسم هایی است که بتوانند در شرایط سخت محیطی مخزن باقی بمانند و فعالیت کنند. این شرایط سخت عبارت از محدوده دمایی بین ۹۰-۴۵ °C و فشارهای بالا (تا 2000Psi) است. گرادیان دمای طبیعی با افزایش فشار مرتبط است. معمولاً گرادیان دمایی ۱°F/۱۰۰ft یا ۱۸/۲ °C/Km می باشد (شکل ۲). بنابراین اگر دمای سطحی زمین را حدود ۴۰ °C در جنوب کشور در نظر بگیریم در عمق حدود 2000m (656ft) باشد در این صورت محدوده دمایی حدود ۷۶/۴ °C (۱۷۰ °F) و فشاری حدود 20Mpa (294Psi) مورد انتظار است. دمای متابولیکی بهینه و سرعت رشد باکتری های لوله ای با افزایش فشار، افزایش می یابد. چنانچه در فشار

نه چندان زیاد حدود (2000Psi) فعالیت بیولوژیکی و حتی دمای رشد بهینه را چند درجه افزایش می دهد. ولی بالا رفتن از یک حد بهینه فشار باعث اختلال در تولید متابولیت های لازم جهت انجام پروژه MEOR می شود. میکروب ها، نزدیک به دمای رشد بهینه تحمل فشار بسیاری دارند. رابطه بین دما و عمق به صورت زیر است:

$$T_F = T_0 + g_e \times D_F / 100$$

$T_F$ : دمای سازند

$g_e$ : گرادیان دمایی معمولاً

$$۱-۲ \text{ } ^\circ\text{F}/۱۰۰ \text{ft}$$

$T_0$ : دمای متوسط روی سطح و

$D_F$ : عمق سازند بر حسب [4,6]ft

## مخازن مناسب برای MEOR باید واجد شرایط زیر باشند:

دما کمتر از 75 °C، شوری تا PH 100000ppm، بین ۴ تا ۹، تراوایی بیش از 75mD، سنگینی نفت بر اساس API بیش از ۱۸، فشار تا 12000atm و عمق کمتر از 3500m در این میان بیشترین تاثیر مربوط به دما و تراوایی است [2,6]

## میکروب های سازوکار های مختلفی به شرح زیر به افزایش برداشت نفت کمک می کنند:

- تولید اسید آلی که منجر به انحلال سنگ های کربناتی و توسعه کانال های می شود.

- احیای گوگرد در ترکیبات گچی و انیدریدی و مواد معدنی سولفاتی که نفت به دام افتاده در آنها را آزاد می کند.

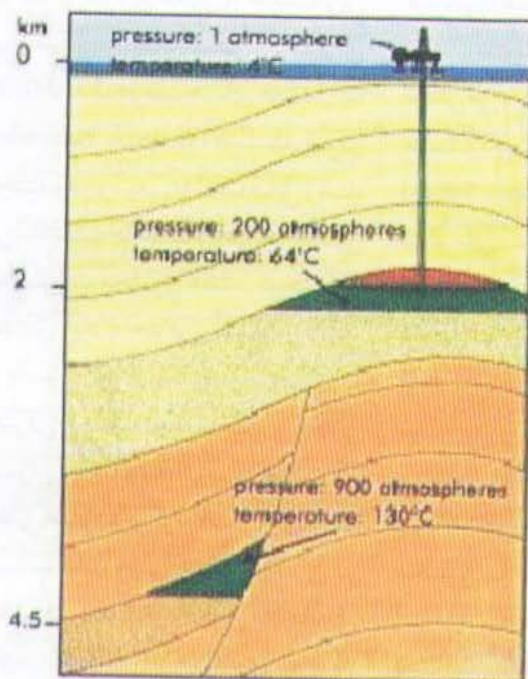
- تولید گازهایی از قبیل متان، دی اکسید کربن، هیدروژن و نیتروژن که نفت را از فضا های مرده به خارج می رانند.

- تولید حلال های مختلف از قبیل اتانول، استون و الکل که با انحلال یا تورم رسوبات آلی به تحرک فاز نفت کمک می کنند.

- تولید مواد فعال سطحی و شوینده که کشتش سطحی و کشتش فصل مشترک نفت و آب را کم می کنند و نفت را از سنگ جدا می کنند.

- تولید بیوپلیمر که به طور انتخابی، مناطقی با تراوایی بالاتر را مسدود نموده، در نتیجه جریان سیال به طرف نقاطی با تراوایی کمتر هدایت می شود.

- تجزیه مولکول های هیدروکربنی بزرگ و کاهش گرانیوی نفت. [2,6,9]



شکل ۲- تغییرات دما و فشار در اعماق مختلف

۲۸  
کتاب تولید  
۱۳۸۴

## باکتری مناسب برای MEOR باید:

- کوچک باشد.
- رشد سریعی داشته و از تحرک لازم برای انتقال در داخل چاه برخوردار باشد.
- ترکیبات متابولیکی مناسب از قبیل گاز و اسید و حلال تولید کند.
- قادر به تحمل شرایط محیطی خشن از قبیل دما و فشار و شوری بالا باشد.
- برای رشد و متابولیسم به مواد مغذی پیچیده نیاز نداشته باشد.
- بتواند مواد ضد خوردگی و میکروب کشی را به خوبی تحمل کند.
- بتواند شرایط بدون اکسیژن یا غلظت اندک آن را تحمل کند (شکل ۳).



شکل ۳- نمونه‌ای از باکتری‌های مورد استفاده در میدان

## شیوه‌های متداول استفاده از میکروب‌ها در ازدیاد برداشت:

- ۱- روش برون محل (Ex-Situ): در این روش محصولات میکروبی از قبیل پلی ساکاریدها و سورفکتانت‌ها (فعال کننده‌های سطحی) در فرمانتورهای تولید شده و پس از جداسازی و خالص سازی به مخزن اضافه می شود.
- ۲- روش در محل (In-Situ):

الف) تحریک جمعیت میکروبی مخزن به وسیله تزریق مواد مغذی برای افزایش فعالیت میکروبی  
ب) تزریق میکروب‌های خاص همراه با مواد مغذی به داخل مخزن. این میکروب‌ها می‌توانند فعالیت مناسبی در مخزن داشته و محصولاتی را تولید نمایند که باعث تحرک نفت می‌شوند. (این میکروب‌ها را می‌توان از مخزن جدا کرد و پس از تغییرات ژنتیکی به مخزن تزریق نمود).

از بین این روش‌ها بهترین شیوه، ۲-ب است زیرا در شیوه ۱ به دلیل قابل تجزیه بودن محصولات، مواد ورودی به سرعت توسط میکروب‌های موجود در مخزن تجزیه می‌شوند. روش ۲-الف هم به دلیل این که تعداد، نوع و نحوه فعالیت میکروب‌های مخزن مشخص نیست، روش چندان جالبی به شمار نمی‌رود. به دلیل تنوع مکانیزم‌های MEOR، از آن می‌توان در مواردی که به سازند، در اثر اعمال شیوه‌های دیگر MEOR آسیب رسیده یا کاهش تراوی نفت اتفاق افتاده یا به

دلیل نیروهای موینگی نفت به دام افتاده باشد یا در شرایطی که در مخزن رسوب پارافینی یا نمک‌های حاصل از رسوب در حین تزریق آب باشد، استفاده نمود. علی‌رغم محدودیت‌هایی که ممکن است فعالیت میکروبی مخزن را تحت تاثیر قرار دهد، گزارش‌های متعددی از حضور میکروب‌ها ارایه شده‌اند و به همین علت انواع گوناگونی از

باسیلوس، پseudomonas، میکروکوکوس، مایکوباکتریوم، کلاستریدیوم، اشرشیاکلی و برخی دیگر از انواع اتروباکتریاسه در MEOR به کار می‌روند. با وجود حضور میکروب‌ها در مخازن، فعالیت آنها به دلایل زیر اندک است:

- ۱- شرایط بی‌هوای مخزن که در این شرایط امکان تجزیه ترکیبات نفتی وجود ندارد و در نتیجه منبع کربن وجود ندارد.
- ۲- در اکثر مخازن نفتی غلظت فسفر پایین است.
- ۳- غلظت اندک نیتروژن می‌تواند دلیل کم بودن تعداد میکروب‌ها باشد. از آنجایی که فعالیت میکروب‌های بومی در مخزن بسیار اندک است، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ترکیب نفت مشاهده نمی‌شود. اما در صورتی که منبع غذایی و فاکتورهای مکمل مناسب فراهم شوند ترکیب نفت تغییر خواهد کرد. نفت فقط شامل مواد هیدروکربوری نیست و هرگونه تغییر در محتوای آن می‌تواند منجر به تغییر قابل ملاحظه‌ای در مشخصه‌های نفت خام شود که از آن جمله تولید گاز است که منجر به سبک شدن نفت می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴- کشت میکروب‌ها در محیط‌های مغذی مختلف

“ادامه دارد”

شماره ۲۶ - مهر ۱۳۸۴