Archive of SID

مجموعه مقالات سومین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی
تهران، ۲۹ خرداد ماه ۱۳۹۳ مجری: هم اندیشان انرژی کیمیا
تلفن: ۸۸۶۷۱۶۷۶ - ۰۲۱ www.Reservoir.ir

کاربرد بیوتکنولوژی در بهبود بازیافت از مخازن نفتی

صابر محمدی[۱]، احسان کمری[۲]، علی‌اصغر قره‌شیخ‌لو[۳]
پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران
mohammadisab@ripi.ir

چکیده

افزایش بی‌رویه مصرف انرژی دردهه‌های اخیر و نیز کاهش شدید تولید از مخازن زیرزمینی نفت و گاز لزوم استفاده از روش‌های کارآمد ازدیاد برداشت را بیش از پیش نشان می‌دهد. در این میان استفاده از میکروارگانیسم‌ها به عنوان عاملی در جهت بهبود بازیافت از مخازن نفتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ازدیاد برداشت میکروبی استفاده از میکروارگانیسم‌ها در جهت کاهش مقدار نفت باقیمانده از مخازن نفتی است که در انتهای دوره تخلیه طبیعی خود به سر می‌برند. استفاده از سایر روش‌های ازدیاد برداشت همواره با مشکلات فنی و علی‌الخصوص اقتصادی همراه بوده است؛ تحقیقات انجام گرفته در سال‌های اخیر نشان می‌دهد که روش ازدیاد برداشت میکروبی قابلیت بازیافت بیش از ۵۰ درصد نفت باقیمانده در مخزن را با صرف هزینه‌ای کم و نیز مشکلات عملیاتی کمتر در مقایسه با سایر روش‌های ازدیاد برداشت داراست. علی‌رغم تحقیقات گسترده انجام شده در این زمینه، هنوز درک صحیحی از مکانیزم عملکرد میکروارگانیسم‌ها در جهت بهبود برداشت نفت و هم‌چنین شرایط عملیاتی استفاده از این روش در مقیاس میدانی نشده است و نیازمندی به مطالعه‌ای جامع و کامل در این زمینه به شدت احساس می‌شود. در این مقاله به بررسی این روش در صنایع بالادستی نفت و به منظور بهبود بازیافت از مخازن نفتی پرداخته شده است. در این راستا ویژگی مخازن کاندید مانند خصوصیات سنگ، خصوصیات سیال مخزن، عمق مخزن، دما، فشار و غیره در این روش بررسی شده و مکانیسم‌های حاکم و مؤثر در فرآیند ازدیاد برداشت به روش میکروبی مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نیز محدودیت‌ها، کاربردهای میدانی و مزایای اقتصادی این روش به تفصیل ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: ازدیاد برداشت، بیوتکنولوژی، میکروبی، میکروارگانیسم، مخازن نفتی.

[۱] کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری
[۲] دکتری مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری
[۳] کارشناسی ارشد مهندسی نفت، مخازن هیدروکربوری

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

یکی از کاربردهای بیوتکنولوژی، استفاده از میکروارگانیسم‌ها در صنایع نفتی می‌باشد. استفاده از میکروب‌ها در ازدیاد برداشت نفت بحث جدیدی نیست. اولین مورد مکتوب، در سال ۱۹۱۳ مربوط به ج.ب.دیویس[1] است. در سال ۱۹۴۶، سی.ای.زوبل[2] فرآیندی را برای بازیافت ثانویه نفت با استفاده از میکروب‌های بی‌هوازی و مکانیزم انحلال مواد معدنی سولفاتی ثبت کرد. در سال ۱۹۵۴ اولین آزمایش ازدیاد برداشت میکروبی در مقیاس میدانی در یکی از میادین نفتی کانزاس انجام گرفت. علی‌رغم موفق بودن این روش، با توجه به دردسترس بودن منابع نفتی ارزان قیمت، استفاده از این روش مورد توجه قرار نگرفت. در دهه ۱۹۷۰ به دلیل ناپایداری قیمت نفت و گرایش به سوی علوم بیوتکنولوژی، این شیوه‌ها مورد توجه قرار گرفتند. از سال 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 ازدیاد برداشت باشند. در این مقاله به بررسی روش ازدیاد برداشت میکروبی در صنایع بالادستی نفت و به منظور بهبود بازیافت از مخازن نفتی پرداخته شده است. در این راستا ویژگی مخازن مطلوب به منظور اعمال این روش مانند خصوصیات سنگ و سیال مخزن، عمق مخزن، میزان شوری مخزن، دما، فشار و غیره در این روش بررسی شده و مکانیسم‌های حاکم و مؤثر در فرآیند ازدیاد برداشت به روش میکروبی مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نیز محدودیت‌ها، کاربردهای میدانی و مزایای اقتصادی و مسائل زیست محیطی این روش تشریح شده است.

۲- ویژگی مخازن مورد توجه در روش ازدیاد برداشت میکروبی

- **جنس مخازن:** بیش از نیمی از مخازن نفتی دنیا کربناته هستند. سنگ‌های کربناته و آهکی جزء سنگ‌های رسوبی می‌باشند. معایب و روش‌های برطرف کردن این معایب در مخازن کربناته به شرح زیر است:
  - پایین بودن تراوایی.
  - امکان تداخل بیولوژیکی بع دلیل قابلیت جذب گل، مواد معدنی و رسوبات در حفرات.
  - جلوگیری از حرکت میکروارگانیسم‌ها در مخزن به دلیل متورم شدن گل در اثر جذب آب و همچنین با قدرت یونی مناسب، گل دارای بار سطحی شده و باعث جذب میکروارگامیزم‌ها می‌شود.
  - وجود گل، باعث افزایش گرانروی فاز آبی شده، که این عامل رسیدن مواد غذایی و گازهای لازم برای مصرف میکروب‌ها را محدود می‌سازد.
  - حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی در آب نمک مخازن باعث پیچیدگی روش‌های ازدیاد برداشت می‌شود.

با وجود مشکلات بیان شده، جهت بهبود در جذب میکروب‌ها و میکروارگانیسم‌ها، می‌توان از نمک‌های کلریدسدیم[3]، کلرید کلسیم[4] و کلرید پتاسیم[5] بهره برد [۱،۲].

- **عمق مخازن:** فشار و دمای مخازن تحت تأثیر مستقیم عمق مخزن می‌باشند. از این‌رو، عمق مخازن در رشد و متابولیسم میکروارگانیسم‌ها مؤثر است. به‌طور کلی در روش ازدیاد برداشت میکروبی، مخازنی با عمق کمتر از ۸۰۰۰ فوت مناسب هستند؛ با این‌وجود، مخازنی با عمق بیشتر نیز وجود داشته‌اند که عملیات ازدیاد برداشت میکروبی در آنها موفقیت‌آمیز بوده است. به‌عنوان مثال، در مجارستان در مخزنی با عمق ۸۲۰۰ فوت و فشار ۳۳۵۰psia و دمای ۲۰۷ درجه فارنهایت این روش استفاده شده است [۵-۳].

---

[1] J.B. Davis
[2] C.a. Zobell
[3] NaCl
[4] $CaCl_2$
[5] KCl

www.SID.ir

Archive of SID

- **API نفت:** API به عنوان معیاری از چگالی نفت است. با افزایش درجه API میزان سنگینی نفت کاهش می‌یابد. در شرایطی که API نفت کمتر از ۱۰ باشد نفت به صورت شبه جامد درآمده و برای استخراج و تولید آن باید تحت تأثیر هوا احتراق یا بخار قرار گیرد. هرگاه نفت خام تحت تأثیر هوا قرار گیرد در اثر تبخیر و تجزیه میکروبی (استفاده میکروب‌ها از مولکول‌های کوچک به عنوان مواد قندی) سنگین‌تر می‌شود؛ به‌طوری که آلکان‌های با عد کربنی زیر ۱۰ بهترین و مناسب‌ترین گزینه برای میکروب‌ها هستند. هرقدر نفت در اعماق پایین‌تری باشد دارای درجه API بالاتری خواهد بود. در حین فرآیند سیلاب‌زنی با آب[1] اکسیژن محلول در آب در قسمت‌های عمیق مخزن نفوذ کرده و سبب رشد هوازی میکروبی می‌گردد. این عمل باعث تولید میکروب‌های بی‌هوازی از قبیل میکروب‌های بی‌هوازی تولیدکننده متان می‌شود. این فرآیند باعث تولید گاز، سبک‌تر شدن نفت و در نتیجه افزایش بازیافت نفت می‌شود. بریانت و دوگلاس به بررسی تأثیر میکروارگانیسم‌های مختلف در بازیافت نفت پرداختند. نتایج مطالعات و آزمایشات آن‌ها برروی مغزه‌های ماسه‌ای و شنی افزایش ۷۲٪ بازیافت نفت نسبت به روش سیلاب‌زنی با آب را نشان داد. قابل ذکر است که نفت‌های مورد استفاده در این آزمایشات دارای API در محدوده ۱۷-۱۴ بودند [۵-۳].
- **نمک حل‌شده:** میکروارگانیسم‌ها و میکروب‌هایی برای فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی مناسب هستند که بتوانند غلظت‌های بالای مخازن نفتی را تحمل کنند. در حالت کلی معیار شوری در مخازن میزان کلریدسدیم حل شده در آب مخزن است. میکروب‌های نمک‌دوست[2] از لحاظ تغذیه تا حدودی پیچیده هستند و نیازهای متنوعی دارند و مقدار نمک لازم برای رشد چنین میکروب‌هایی بین حداقل ۱۲-۱۰٪ و حداکثر ۳۲٪ حجم وزنی است. اکثر این نوع میکروب‌ها هوازی هستند و تعداد خیلی کمی از آنها بی‌هوازی می‌باشند که به دلیل شرایط بی‌هوازی مخزن برای عملیات ازدیاد برداشت میکروبی مناسب هستند. مناسب‌ترین نوع میکروب‌های نمک‌دوست برای فرآیندهای ازدیاد برداشت میکروبی، میکروب‌های نمک‌دوست معتدل[3] هستند که در محدوده وسیعی از درجه شوری قابلیت رشد دارند. در بعضی از مخازن میزان کلرید کلسیم و کلرید سدیم زیاد بوده و در بعضی دیگر میزان سولفات و منیزیم‌بی‌کربنات[4] غالب است و در برخی موارد سایر یون‌ها مانند برمید و یدید به تعداد قابل ملاحظه‌ای (۱۶۰۰-۱۴۰۰ mg/L) یافت شده است. گروه گونه‌ای از کلاستریدیوم‌ها را که گاز، اسید، الکل‌ها و مواد فعال-سطحی (سورفکتانت) را تولید می‌کند جداسازی نمود. با این وجود توانایی چنین باکتری‌هایی در غلظت‌های نمک بالای ۷٪ به عنوان یکی از معضلات و مشکلات مطرح بود. بالا بودن درجه شوری در مخازن توانایی میکروارگانیسم‌ها را در تولید پارامترهای ذکر شده مختل می‌سازد. در مخازنی که درجه شوری در آنها بالاست را می‌توان با سیلاب‌زنی با آب تنظیم و تعدیل نمود. تعدادی دیگر از باکتری‌ها ماند کلاستریدیوم و باسیل قادرن درجه شوری تا میزان ۵۰ mg/L را تحمل کنند. تعدادی از گونه-های باسیل که در شرایط مورد نظر قادر به رشد و و تولید پلی‌ساکاریدها هستند با افزایش فشار تا حدود ۵۸۰۰psia پلی-ساکاریدها را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند، ولی با افزایش غلظت نمک تولید این مواد شدیداً کاهش می‌یابد. اخیراً کاربرد گونه‌ای سودموناس با نام Pseudomonos Stutaeri که توانایی تحمل نمک تا ۸۰ gr/L را دارد مورد استفاده قرار گرفته است و بهترین شرایط رشد آن در نمک ۲۸-۲۰ gr/L می‌باشد. شوری برای مخازن با عمق زیاد مشکل حادی است ولی برای مخازن با عمق کم به دلیل ارتباط با آب‌های سطحی مشکل زیادی ایجاد نمی‌کند [۷،۶،۱].
- **تخلخل و تراوایی:** تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترها در انتقال میکروارگانیسم‌ها در مخازن است. میزان تخلخل مخزن باید در حدی باشد که میکروب و باکتری‌ها بتوانند به راحتی در آن انتقال پیدا کنند. در مخزنی با تخلخل بالا سلول‌ها دارای رشد زیادتری بوده و تعداد سلول‌ها افزایش می‌یابد. در حالت کلی قطر حفرات باید حداقل ۲ برابر قطر باکتری‌های مورد استفاده باشد تا عمل انتقال به آسانی صورت پذیرد [۱].

---

[1] Water Flooding
[2] Halophiles
[3] Moderate Halophiles
[4] $Mg(HCO_3)_2$

www.SID.ir

Archive of SID

تراوایی نیز از عوامل مهم تأثیرگذار بر فرآیندهای ازدیاد برداشت مانند روش میکروبی می‌باشد. میزان تراوایی سنگ مخزن در نحوه انتقال میکروارگانیسم‌ها مؤثر است. حداقل میزان تراوایی برای روش ازدیاد برداشت میکروبی در محدوده ۱۰۰-۷۵ md است. قابل ذکر است که در تراوایی‌های پایین‌تر نیز این روش استفاده شده است.

- **نسبت PH/PH:** از جمله عوامل رشد و افزایش تعداد سلولی به‌شمار می‌رود و تولید متابولیت‌های سلولی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تعدادی از باکتری‌ها قادرند PHهای بالا (حالت بازی) و تعدادی در PHهای پایین (حالت اسیدی) فعالیت داشته باشند. ولی آنچه در EOR مهم است پیدا کردن میکروارگانیسم‌هایی است که بتوانند در محدوده ۱۰۰-۲ فعالیت کنند. PH در مخازن نفتی عامل محدود کننده‌ای نیست. تخمین زده می‌شود که ۷۰-۵۰٪ چاه‌های نفتی در کشور آمریکا که می‌توانند تحت پروژه EOR قرار گیرند در محدوده PH بین ۸-۴ قرار دارند که پیدا کردن میکروارگانیسم‌هایی که بتوانند در چنین PHای فعالیت کنند کار مشکلی نیست [۶،۱].
- **دما و فشار:** علی‌رغم اقتصادی و آسان بودن روش ازدیاد برداشت میکروبی این روش هنوز کاربرد زیادی پیدا نکرده است. علت آن مشکل بودن در پیاده‌کردن، جداسازی و مهندسی میکروارگانیسم‌هایی است که بتوانند در شرایط سخت محیطی مخزن باقی بمانند و فعالیت کنند. این شرایط سخت عبارت است از محدوده دمایی بین ۹۰-۴۵ ^{o}C و فشارهای بالا تا حدود ۲۰۰۰ psi. دمای متابولیکی بهینه و سرعت رشد باکتری‌های لوله‌ای با افزایش فشار، افزایش می‌یابد. در فشار نه چندان زیاد حدود ۲۰۰۰ psi فعالیت بیولوژیکی و حتی دمای رشد بهینه چند درجه افزایش می‌یابد. ولی بالا رفتن از یک حد بهینه فشار باعث اختلال در تولید متابولیت‌های لازم جهت انجام پروژه‌های ازدیاد برداشت میکروبی می‌شود[۶،۱].

در نهایت شرایط مناسب برای یک مخزن به منظور اجرای موفقیت‌آمیز این روش ازدیاد برداشت عبارت است از: دمای کمتر از ۷۵ ^{o}C، میزان شوری تا ۱۰۰۰۰۰ppm، PH بین ۹-۴، تراوایی بیش از ۷۵ md، سنگینی نفت بر اساس API بیشتر از ۱۸، فشار تا ۱۸۰۰ psi و عمق کمتر از ۱۱۴۸۰ ft. در این میان بیشترین تأثیر را دما و تراوایی دارند[۵،۴].

۳- فرآیندهای انجام گرفته توسط میکروارگانیسم‌ها در جهت افزایش برداشت نفت

- تولید اسید آلی که منجر به انحلال سنگ‌های کربناته و توسعه کانال‌ها می‌شود.
- احیای گوگرد در ترکیبات گچی و انیدریدی و مواد معدنی سولفاتی که نفت به دام افتاده در آن‌ها را آزاد می‌کند.
- تولید گازهایی از قبیل متان، دی‌اکسیدکربن، هیدروژن و نیتروژن که باعث رانده‌شدن نفت از فضاهای مرده به خارج می‌شوند.
- تولید حلال‌های مختلف از قبیل اتانول، استون و الکل که با انحلال یا تورم رسوبات آلی به تحرک فاز نفت کمک می‌کنند.
- تولید مواد فعال‌سطحی (سورفکتانت) که کشش‌سطحی و کشش فصل مشترک نفت و آب را کم می‌کنند و باعث جدا شدن نفت از سنگ می‌شوند.
- تولید بیوپلیمر که به طور انتخابی، مناطق با تراوایی بالا را مسدود نموده، در نتیجه باعث هدایت شدن جریان سیال به نقاطی با تراوایی کمتر می‌شود.
- تجزیه مولکول‌های هیدروکربنی بزرگ و کاهش گرانروی نفت [۸،۵،۴].

۴- ویژگی باکتری‌های مناسب در فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی

باکتری‌های مناسب برای فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی باید:

- کوچک باشد.
- رشد سریعی داشته و از تحرک لازم برای انتقال در داخل چاه برخوردار باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

- ترکیبات متابولیکی مناسب از قبیل گاز و اسید و حلال تولید کنند.
- در شرایط محیطی نامناسب از قبیل دما، فشار و شوری بالا پایدار باشند.
- برای رشد و متابولیسم به مواد مغذی پیچیده نیاز نداشته باشند.
- در برابر مواد ضدخوردگی و ضدمیکروب تحمل لازم را داشته باشند.

۵- شیوه‌های رایج استفاده از میکروارگانیسم‌ها در ازدیاد برداشت نفت

۱. **روش برون محل**[1]: در این روش ابتدا میکروارگانیسم‌هایی از قبیل مواد فعال‌سطحی و پلی‌ساکاریدها ساخته شده و پس از جداسازی و خالص‌سازی به مخزن اضافه می‌شوند.

۲. **روش درجا (در محل)**[2]: این روش در حالت کلی به دو دسته طبقه‌بندی می‌شود:

۲. الف: تحریک میکروب‌های مخزن توسط تزریق مواد مغذی برای افزایش فعالیت میکروبی.

۲. ب: تزریق میکروب‌های خاص همراه با مواد مغذی به داخل مخزن.

این میکروب‌ها می‌توانند فعالیت مناسبی در مخزن داشته و محصولاتی را تولید کنند که باعث تحرک نفت شوند. قابل ذکر است که این میکروب‌ها را می‌توان از مخزن جدا کرد و پس از تغییرات ژنتیکی به مخزن تزریق نمود.

از بین این روش‌ها بهترین شیوه، روش بیان شده در قسمت ۲.ب می‌باشد زیرا در روش ۱ به دلیل قابل تجزیه بودن محصولات و ترکیبات، مواد ورودی به سرعت توسط میکروارگانیسم‌های موجود در مخزن تجزیه می‌شوند. روش ۲.الف هم به دلیل این‌که تعداد، نوع و نحوه فعالیت میکروب‌های مخزن مشخص نیست روش چندان جالب و مناسبی نیست. به دلیل تنوع مکانیزم‌های ازدیاد برداشت میکروبی، از این روش می‌توان در مواردی که به سازند، در اثر اعمال روش‌های دیگر ازدیاد برداشت آسیب رسیده یا کاهش تراوایی نفت اتفاق افتاده یا به دلیل نیروهای مویینگی نفت به دام افتاده باشد یا در شرایطی که در مخزن رسوبات 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 ارائه شده‌اند و به همین دلیل انواع گوناگونی از پسودوموناس، باسیلوس، میکروکوکوس، کلاستریدیوم، مایکوباکتریوم و برخی دیگر از انواع انتروباکتریاسه در روش ازدیاد برداشت میکروبی به‌کار می‌روند. علی‌رغم وجود میکروارگانیسم‌ها در مخزن، فعالیت آنها به دلایل زیر اندک است:

- شرایط بی‌هوازی مخزن که در این شرایط امکان تجزیه ترکیبات نفتی وجود ندارد.
- پایین بودن غلظت فسفر در اکثر مخازن نفتی.
- کم بودن غلظت نیتروژن می‌تواند دلیلی بر کم بودن تعداد میکروب‌ها باشد.

از آنجا که فعالیت میکروب‌های بومی در مخزن اندک است، تغییر قابل ملاحظه‌ای در ترکیب نفت مشاهده نمی‌شود. امِا در صورتی که منبع غذایی و فاکتورهای مکمل مناسب فراهم شوند ترکیب نفت تغییر خواهد کرد. نفت فقط شامل مواد هیدروکربنی 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.

۵-۱- انتقال میکروارگانیسم‌ها در محیط متخلخل

مهم‌ترین مسأله در کاربرد روش ازدیاد برداشت میکروبی، توانایی حرکت میکروارگانیسم‌ها در داخل مخزن و تولید مواد شیمیایی برای حرکت دادن نفت است. سرعت نسبی نفوذ مواد مغذی و میکروب‌های تزریقی داخل مخزن تأثیر زیادی در انتخاب روش تزریق مواد برای تولید بهینه نفت دارد. به عنوان مثال در شرایطی که جمعیت میکروبی نیازمند طی کردن

[1] Ex-Situ
[2] In-Situ

www.SID.ir

Archive of SID

مسافت زیادی در مخزن است، باید اطمینان حاصل کرد که موا مغذی به موقع و در مکان درست در اختیار میکروب‌ها و به منظور فعالیت‌های متابولیکی قرار گیرد. استراتژی دیگری که می‌توان اختیار کرد به این ترتیب است که میکروب‌ها در دهانه چاه از مواد مغذی استفاده کنند و در نتیجه فعالیت متابولیکی، مواد بیولوژیکی مورد نیاز را تولید و سپس این مواد به داخل مخزن نفوذ کنند. مطالعات آزمایشگاهی و تست‌های میدانی نشان داده است که گونه‌های خاصی از میکروب‌ها در شرایطی خاص در مخزن نفوذ می‌کنند. در واقع مشخص شده است که میکروب‌ها در محیط شن و ماسه با نفوذپذیری بالای ۱۰۰md می‌توانند نفوذ و حرکت کنند. برای عملیات به ایجاد گرفتگی در لایه‌های مخزن با نفوذپذیری بالا نیاز است. میکروب‌های تولید کننده پلیمر، توده سلولی[1] و مواد چسبنده تا حد زیادی باعث کاهش نفوذپذیری می‌شوند. همچنین گرفتگی چاه در برخی از تست‌های میدانی مشاهده شده است. محققان دانشگاه اوکلاهما یک مدل ریاضی ساده و یک بعدی برای توضیح فرآیند ایجاد گرفتگی توسط میکروب‌ها ارائه کرده‌اند. آنها این مدل را در فشار ثابت برای بررسی رشد میکروبی و باقی ماندن میکروب‌ها به منظور کاهش نفوذپذیری یک محیط متخلخل مورد استفاده قرار داده‌اند. همچنین ژانگ و همکاران[2]، مدلی یک بعدی را برای شمارش و تخمین انتقال میکروب‌ها در یک محیط متخلخل شبیه‌سازی شده به‌کار برده‌اند. به‌طور کلی آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی بیشتری برای بررسی هرچه دقیق‌تر حرکت میکروارگانیسم‌ها در مخزن لازم است. یک سیستم عملی ازدیاد برداشت میکروبی شامل میکروب و مواد غذایی است. مشکلات و راه حل‌های متداول در این سیستم‌ها به شرح زیر است:

- آیا کاهش و یا قطع تزریق به دلیل انسداد حفره چاه ناشی از تجمع میکروبی صورت می‌گیرد؟

قبل از تزریق می‌توان از مواد پرکننده که فضاهای خالی سنگ‌ها را پر می‌کنند یا ترکیباتی که مانع از جذب میکروب به سطح می‌شوند استفاده کرد تا میکروب‌ها در یک نقطه تجمع نیابند. همچنین می‌توان از اسپورها یا اولترامیکروباکتری‌ها استفاده کرد.

- آیا انتشار موفق و انتقال تمام ترکیبات لازم و ضروری به نقاط هدف صورت می‌گیرد؟

عامل مختلفی از قبیل خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ، خواص سلول میکروبی و نحوه تزریق از قبیل دبی تزریقی، محتوای نمک و چگالی سوسپانسیون سلولی مهم هستند. استفاده از تزریق ضربانی از به دام‌افتادن سلول‌ها جلوگیری می‌کند.

- افزایش فعالیت متابولیکی در محل چگونه صورت می‌گیرد؟

با مطالعه دقیق شرایط میکروب و مخزن و سازگار نمودن میکروب با شرایط مخزن این مشکل برطرف خواهد شد.

- از رقابت یا فعالیت‌های نامطلوب میکروب‌های بومی چگونه می‌توان پیشگیری کرد؟

آزمایشات میدانی نشان می‌دهند که در ازدیاد برداشت میکروبی که با تزریق مواد مغذی از قبیل ملاس همراه باشد رقابت با میکروب‌های بومی عامل مهمی نیست [۹].

۶- نمونه‌هایی از کاربردهای میدانی روش ازدیادبرداشت میکروبی

- میدان نفتی Loyid Minister کانادا: میکروب لکونوستوک (هوازی) با غلظت ml/ ۱۰۳-۱۰۲، ml/ ۱۰۴ میکروب بی-هوازی و ۱۱,۶ متر مکعب ملاس در ۱۲۰ متر مکعب آب تزریق شده است. پاسخ مخزن تولید اسید و الکل و کاهش PH و کشش سطحی بوده است.
- میدان‌های نفتی رومانی با شوری g/L ۵-۱۸۰: میکروب‌های باسیلوس، کلاستریدیوم، اشرشیاکلی و ... با مخلوط میکروبی ml/۱۰^{۹}×۹-۱۰^{۸}×۴ تزریق شد. پاسخ مخزن تولید گاز و اسید، افزایش تولید نفت، افزایش گرانروی و چگالی نفت و افزایش کسر سبک نفت بوده است.
- میدان نفتی لیسبون آرکانزاس با شوری ppm ۴۲۰۰۰: میکروب کلاستریدیوم و ملاس (gal ۴۰۰۰ محلول ۲٪ وزنی)

[1] Biomass
[2] Jang et al.

www.SID.ir

Archive of SID

تزریق شد. پاسخ مخزن به صورت تولید گاز (عمدتاً H_2 و CO_2) و اسید بوده و حداکثر نرخ افزایش تولید ۲۵٪ بوده است.

- یکی از میادین نفتی هلند: میکروب کلاستریدیوم و ملاس تزریق شد و پاسخ مخزن به صورت افزایش CO_2 و افزایش بازیافت در حدود ۲۰۰-۲۰٪ بوده است [۹].

۷- مزایای اقتصادی روش ازدیادبرداشت میکروبی

طبق مطالعات صورت گرفته و گزارش شده، ازدیاد برداشت میکروبی روش مناسبی برای افزایش تولید است. از دیدگاه اقتصادی، هزینه کاربرد روش میکروبی باتوجه به نوع میکروب، نفت خام و شرایط مخزن از ۱ تا ۸ دلار به ازای هر بشکه نفت در نوسان است. این رقم برای استفاده از روش افزایش بازده شیمیایی و پلیمری از ۵ تا ۱۰ دلار به‌ازای هر بشکه در نوسان است و کاربرد پلیمرهای گران‌تر تا ۱۲ دلار به ازای هر بشکه هزینه درپی دارد. شایان ذکر است هزینه‌های مربوط به تزریق بخار آب حدود ۳ تا ۶ دلار با توجه به شرایط در نوسان است. مقایسه‌های هزینه‌ای نشان می‌دهد که در آینده نزدیک، روش میکروبی با سایر روش‌های ازدیادبرداشت، قابل رقابت خواهد بود. روش میکروبی در حال حاضر در برخی از مخازن آمریکا، مکزیک و ونزوئلا کاربرد یافته است. تحقیق و پژوهش در مورد روش ازدیادبرداشت میکروبی در سال‌های اخیر پیشرفت سریعی داشته و این روند در آینده نیز حفظ خواهد شد و با رفع اشکالات و اقتصادی‌تر شدن آن، کاربردهای عمومی‌تری خواهد یافت. مزایای دیگر روش ازدیادبرداشت میکزوبی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- میکروب‌ها و مواد مغذی تزریق شده ارزان هستند، به راحتی در دسترس بوده و به سهولت به میادین نفتی حمل می‌شوند.
- روش ازدیادبرداشت میکروبی از نظر اقتصادی برای تولید میادین فرعی مناسب است.
- هزینه مواد تزریقی به قیمت نفت وابسته نیست.
- اجرای این روش نسبت به سایر فرآیندهای ازدیادبرداشت آسان‌تر و ارزان‌تر است.
- محصولات روش ازدیادبرداشت میکروبی همگی قابلیت تخریب‌زیستی دارند و در محیط زیست تجمع نمی‌یابند.
- جمعیت میکروبی را می‌توان با مقدار ماده مغذی موجود تنظیم کرد. به عبارت دیگر اگر مواد مغذی تزریق نشود میکروب‌ها از بین می‌روند و در نتیجه حضور جعیت میکروبی قابل کنترل است [۱۳-۱۰].

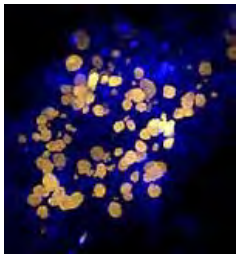
۸- گسترش و پیشرفت تحقیقات و کاهش هزینه‌ها

امروزه تحقیقات و پژوهش در زمینه حل مشکلات فنی و اقتصادی‌تر نمودن روش ازدیادبرداشت میکروبی به سرعت پیش می‌رود. تحقیقات آزمایشگاه ملی مهندسی و محیط زیست ایداهوی آمریکا[1] اخیراً روش میکروبی را توسعه زیادی بخشیده و آن را با هزینه پایین‌تری ارایه کرده است. این تحقیق شامل تولید و کاربرد پلیمرهای میکروبی و بیوسورفکتانت‌ها از ضایعات کشاورزی به منظور تزریق به میادین نفتی می‌باشد. شرکت سینوکال[2] نیز در آزمایشگاه میکروب‌شناسی خود در سال ۲۰۰۲ موفق به تولید میکروبی تحت عنوان سینوکال شده است که در بازیافت مخازنی با نفت سنگین و گرانروی بالا کاربرد دارد. این میکروب که شماتیک آن در شکل ۱ آورده شده است به صورت یک محلول تیره رنگ با بوی بسیلر قوی، به منظور تزریق کاربرد دارد. میکروب حاصله در ۱۲ گروه G1 تا G12 بر اساس نوع نفت خام و سایر مشخصه‌های مخزن طبقه‌بندی می‌شود و اساس کار آن واکنش شیمیایی با واکس، آسفالت و عناصر حلقوی نفت خام می‌باشد، به عبارتی گرانروی نفت را کاهش می‌دهد؛ در نتیجه باعث بهبود بازیافت نفت می‌شود.

[1] INEEL
[2] Sinocal

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱: میکروب سینوکال

مشخصه‌های محلول میکروبی سینوکال به صورت زیر است:

- تمرکز و غلظت میکروب بیشتر از ۱×۱۰^{۱۲} برای هر لیتر.
- ضخامت از ۰٫۱ تا ۱ میکرومتر.
- این میکروب می‌تواند در محیطی با فشار و دمای زیاد رشد کند و طول عمر آن ۷ تا ۹ ماه است.

کاربرد این میکروب در یک مخزن باعث افزایش بازیافت نفت آن به میزان ۳۶۸ تن در مدت ۶۰ روز شد. نتیجه این روش، بازیافتی در حدود ۳۰٪ بود که در مقایسه با بازدهی بسیار مطلوب ۵۰ تا ۶۰ درصد قابل قبول است [۱۳،۱۲].

شرکت گلوری‌اویل[1] اخیراً یک فناوری میکروبی را که در هند گسترش یافته‌است، جهت افزایش‌بازیافت در مخازن و کاهش هزینه‌های عملیاتی در میادین به اصطلاح بالغ[2]درتگزاس پنهندلو تگزاس غربی به کار گرفته است. این شیوه که روش ازدیادبرداشت با هم‌نشینی میکروب‌ها[3] نام دارد، یک واکنشگاه‌زیستی[4] درون‌چاهی را در سازند نفتی ایجاد می‌کند. هدف از این شیوه کاهش میزان آب تولیدی[5] بوده و همچنین می‌تواند کیفیت و کمیت نفت تولیدی را نیز بهبود بخشد. همان‌طور که می‌دانیم ازدیادبرداشت به روش‌میکروبی شیوه‌ی جدیدی نیست، امّا این شرکت بر آن بوده است تا روش‌های بیوفناوری میکروبی قوی‌تری را به منظور استفاده در دماها و فشارهای بالاتر مخازن نفتی ارائه نماید. حاصل تلاش‌های ده ساله این شرکت که با همکاری موسسه تی‌اِی‌آرآی[6] صورت گرفته است، کشت یک دسته از میکروب‌ها است که می‌توانند تا دمای بیش از $۹۰\ ^{o}C$ و فشار ۲۰۰۰ psi زنده بمانند (شکل ۲). این محدوده دمایی بیشتر از دماهای دست یافته در کارهای قبلی است که فقط تا حدود $۶۵\ ^{o}C$ گزارش شده بود. میکروب‌هایی که در شیوه EORMC استفاده می‌شوند، می‌توانند در مخازنی با میزان شوری حدود ۴ تا ۸ ٪ به فعالیت خویش ادامه دهند.

شکل ۲: شمایی از کار انجام گرفته توسط تی‌اِی‌آرآی.

تا زمانی که این میکروب‌ها و مواد غذایی آن‌ها تازه و قابل استفاده باشند، به همان شیوه میکروب‌های قدیمی عمل کرده و به کار می‌روند. در شیوه استخراج نفت به روش هاف-پاف[7] از تزریق مخلوط میکروب‌ها و مواد غذایی آن‌ها به درون مخزن

[1] GloriOil
[2] Mature Field
[3] Enhanced Oil Recovery by Microbial Consortia (EORMC)
[4] Bioreactor
[5] Water Cut
[6] TERI
[7] Huff-Puff

www.SID.ir

Archive of SID

بهره گرفته‌می‌شود. این میکروب‌ها در طول یک دوره ۲ هفته‌ای در مخزن گسترش یافته، گازهای دی‌اکسیدکربن و متان تولید می‌کنند. این گازها وارد فضاهای موجود در محیط متخلخل شده و نفت باقیمانده در فضاهای‌کوچک را فشرده ساخته و به بیرون می‌رانند[1]. از طرف دیگر میکروب‌ها، سورفکتانت‌های‌زیستی[2]خاصی نیز تولید می‌کنند که کشش سطحی بین سیال و فضای سنگ را کاهش داده و لذا به خروج نفت از درون سازند کمک می‌کنند. اولین کاربرد میدانی این روش در کشور هند و برای شرکت ملی نفت این کشور[3] در میدان گوجارت[4] انجام شده است. در فعالیت صورت گرفته توسط موسسه تی‌ای‌آر‌آی برای ۲۵ چاه نفتی، حدود ۲۸۳۰۰ بشکه نفت استخراج گشته‌است. به علاوه طبق گفته‌های این موسسه، با استفاده از فناوری فوق، هزینه‌های تولید نیز به ازای هر بشکه حدود ۳۵ تا ۴۰ ٪ کاهش یافته است. موفقیت حاصل شده در این شیوه در هند و همچنین سایر نمونه‌های آزمایشی، کاربرد این فناوری را برای میادین تگزاس نیز پر اهمیت ساخته است [۱۴،۱۵].

۹- مشکلات اجرایی روش ازدیادبرداشت میکروبی

با توجه به اقتصادی بودن روش ازدیادبرداشت میکروبی، این روش آن‌چنان توسعه نیافته است. علت آن را باید در پیدا کردن، جدا نمودن و مهندسی میکروب‌هایی دانست که بتوانند در شرایط سخت مخزن (شوری، دما و فشار بالا) فعالیت داشته باشند. از مشکلات دیگر این طرح می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- رساندن ترکیبات لازم و ضروری به محل هدف.
- کاهش یا قطع تزریق در اثر انسداد حفر چاه (در اثر وجود ذرات در محلول‌های غذایی، وجود بار در میکروب‌ها که باعث جذب این میکروب‌ها در حفرات می‌شود، تولید پلیمر در طی تزریق و ...).
- رقابت نامطلوب میکروب‌های نامربوط بومی که باعث مصرف مواد مغذی میکروب‌های هدف می‌گردند [۱۱،۱۶].

۹-۱- مسایل زیست محیطی

در جامعه مهندسی وقتی صحبت از میکروب به میان می‌آید فکر و ذهن افراد به انواع بیماری‌ها معطوف می‌گردد. ولی لازم به ذکر است که تعداد و تعدد میکروب‌های غیر بیماری‌زا بیشتر است. اخیراً استفاده از میکروب‌های بیماری‌زا در صنعت ممنوع شده و یافته‌های علمی و صنعتی از جمله روش ازدیادبرداشت میکروبی بر پایه این میکروب‌ها فاقد اعتبار است. از انواع باکتری‌هایی که در چاه‌های نفتی یافت می‌شوند و می‌توانند در ازدیادبرداشت میکروبی کاربرد داشته باشند، می‌توان از گونه-های دسولفوبیبرو، متائوژنز، انواع باسیل‌ها، انواع کلاستریدیوم‌ها و انواع انتروباکتریاسه اشاره کرد. باسیل‌های هوازی که در محدوده دمایی ۳۷ ^{o}C فعالیت دارند بیماری‌زا هستند و مدارکی که از بیماری‌زا بودن انواع بی‌هوازی و اختیاری این گروه که در ازدیادبرداشت میکروبی کاربرد دارند در دسترس نیست. از کلاستریدیوم‌ها نیز گونه‌هایی یافت شده است که تولید بیماری کنند ولی این گونه‌ها انگل نیستند بلکه به صورت دیگری تولید بیماری می‌کنند. بعضی از انواع کلاستریدیوم‌ها به صورت بی‌هوازی در ملاس رشد کرده و مواد مفیدی (مقادیر زیادی گاز دی‌اکسیدکربن، اسید، حلال، امولسیفایر) که در ازدیادبرداشت میکروبی مدنظر هستند را تولید می‌کنند [۵،۴،۳].

۱۰- اهمیت روش ازدیادبرداشت میکروبی در مخازن ایران

با توجه به قدمت چاه‌های نفتی ایران (نخستین چاه نفتی در ایران در سال ۱۲۸۷ در منطقه نفتون حفر شده است) و از آنجایی که روش ازدیادبرداشت میکروبی معمولاً پس از اجرای روش‌های دیگر بکار می‌رود، به نظر می‌رسد اهداف متعددی در

[1] Squeeze out
[2] Bio-surfactants
[3] ONGC
[4] Gujarat

www.SID.ir

Archive of SID

ایران برای این شیوه وجود داشته باشد. به ویژه اینکه ازدیادبرداشت میکروبی برای چاه‌هایی که به‌دلیل تزریق آب، دیگر قادر به تولید نفت نیستند و در اصطلاح غرقاب شده‌اند و همچنین چاه‌هایی که به‌دلیل رسوب ترکیبات آلی و معدنی مسدود شده‌اند روش مناسبی است. از آنجایی‌که حتی پس از تزریق آب و گاز حداکثر ۴۰ – ۳۸ ٪ از مخزن برداشت می‌شود، اگر با بکاربردن روش ازدیادبرداشت میکروبی بتوان ۱٪ هم نفت آزاد نمود مقدار قابل ملاحظه‌ای خواهد بود. تأثیر اضافه‌کردن دو باکتری اشرشیاکلی و باسیلوس‌لیکنی‌فرمیس را بر ازدیادبرداشت نفت در یک مدل متخلخل حاوی نمونه‌هایی از سنگ مخزن و نفت گرفته‌شده از یکی از مخازن نفتی ایران، مورد بررسی قرار گرفته و افزایش بازده نفت، در اثر فعالیت میکروبی مشاهده شده است و مکانیزم‌هایی را که در ازدیادبرداشت نفت در اثر فعالیت باکتری در یک مدل آزمایشگاهی نقش داشتند، مطالعه کرده و به نتایج خوبی در این زمینه رسیده‌اند. به‌هرحال باتوجه به جدید بودن این روش انجام آزمایشات تکمیلی در این راستا ضروری به نظر می‌رسد [۱۷].

۱۱- بحث و نتیجه‌گیری

فناوری ازدیاد برداشت میکروبی یک مخزن همانند کلیه فرآیندهای ازدیاد برداشت نیاز به استفاده از قابلیت‌های مهندسی مخزن به عنوان یک رشته پراهمیت در طراحی فرآیندهای ازدیاد برداشت است. بر اساس مطالعات انجام گرفته، طراحی یک پروژه ازدیاد برداشت میکروبی نیازمند یک برنامه‌ریزی و روند مشخص است. طراحی فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی می‌تواند با اهداف گوناگونی صورت گیرد. به عنوان مثال این روش ازدیاد برداشت می‌تواند برای برطرف‌سازی مشکل آسیب سازند و تغییرات تراوایی و نفوذپذیری در یک منطقه خاص از مخزن طراحی شود. از کارهای مهم در طراحی فناوری ازدیاد برداشت میکروبی، تعیین مشخصات مخزن است. در این راستا مطالعاتی همچون تست‌های چاه‌پیمایی[1]، چاه‌آزمایی[2]، مطالعات ردیاب‌ها[3] مفید هستند. بررسی ساختارهای تشکیل دهنده مخزن هم می‌تواند کاربردی باشد. به عنوان مثال، وجود مواد رسی در ساختار مخزن می‌تواند باعث توقف میکروب‌ها به خاطر جذب و یا فیلتراسیون شود. همچنیین پخش مواد رسی در داخل خلل و فرج مخزن باعث جذب مواد فعال‌سطحی و حلال‌های تولیدشده توسط میکروارگانیسم‌ها و در نتیجه کاهش بازدهی فرآیند می‌شود. تزریق میکروارگانیسم‌های تولید کننده اسید در مخازن کربناتی و یا مخازن حاوی مواد کربناتی باعث افزایش نفوذپذیری این مخازن می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت اثر این نوع ماده تشکیل‌دهنده ساختار مخزن برروی انتقال میکروب‌ها هنوز مشخص نشده است. برای اعمال روش ازدیا برداشت میکروبی، هر مخزن باید دارای شرایطی باشد. هر مخزن نفتی شامل برخی جمعیت‌های میکروبی بومی هستند و به‌همین دلیل ضروری است که آب و نفت تولید شده از مخزن از نظر میکروارگانیسم‌های بومی مورد بررسی قرار گیرد. این میکروارگانیسم‌ها می‌توانند اثرات مثبت و یا منفی برروی فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی داشته باشند. وجود میکروارگانیسم‌ها در محیط متخلخل و یا مواد مغذی تزریقی می‌توانند بر سیستم میکروب تزریقی در فرآیند ازدیاد برداشت میکروبی مؤثر باشند. برخی از میکروارگانیسم‌های مخزن می‌توانند باعث توقف رشد میکروارگانیسم‌های تزریقی شوند. عمده میکروارگانیسم‌های مورد استفاده برای تست‌های میدانی، میکروارگانیسم‌های جداشده از مخازن آزمایش شده هستند و در نتیجه قابلیت انطباق خوبی را با شرایط مخزن، به ویژه دما، فشار، غلظت نمک و غیره دارند. نکته‌ای که درباره تزریق مواد مغذی حاوی ترکیبات سولفاته و یا آب حاوی این مواد باید در نظر گرفته شود، این است که این مواد نباید باعث ایجاد رشد مضاعف در باکتری‌های احیاکننده سولفات شوند. باکتری‌های احیاکننده سولفات باعث تولید H_2S می‌شوند. اثر وجود سولفات در یک مخزن از ترش شدن مخزن در نتیجه فعالیت‌های میکروبی مشخص می‌شود. همچنین این دسته از باکتری‌ها منجر به گرفتگی در مخزن و در نتیجه تولید سولفیدآهن رسوبی و نیز بر خوردگی تجهیزات سرچاهی

[1] Well Log
[2] Well Test
[3] Tracers

www.SID.ir

Archive of SID

مؤثرند. همانند کلیه فرآیندهای ازدیاد برداشت، تاریخچه تولید مخزن و خصوصیات آن قبل از فناوری میکروبی باید مورد مطالعه قرار گیرد و نمونه‌هایی از سیالات مخزنی برای اندازه‌گیری میزان نیتروژن و جامدات حل شده جمع‌آوری شود. همچنین انجام تست‌های امکان‌سنجی برای سیالات مخزنی در شرایط شبیه‌سازی شده مخزن از نظر دما، فشار و میزان غلظت نمک ضروری است. این آزمایشات امکان تخمین بازدهی فرآیند ازدیاد برداشت را فراهم می‌آورد. همچنین بررسی مخزن از نظر وجود شکاف[1]ها و شکست‌ها در طراحی فرآیند ازدیاد راندمان جاروبی[2] از طریق فناوری میکروبی لازم است. مطالعات اندکی در مورد تزریق مجدد میکروارگانیسم‌ها و مواد مغذی به داخل مخزن در شرایطی که میکروارگانیسم‌ها داخل مخزن وجود دارند، صورت گرفته است. بعضی از محققان گزارش داده‌اند که تزریق اضافی مواد مغذی بعد از تزریقات اولیه باعث بهبود ازدیاد برداشت می‌شود. حوزه دیگری مورد توجه مقدار مواد مغذی تزریقی است. با توجه به اثرات زیادی که ترکیب ملاس مورد استفاده می‌تواند در رشد و فعالیت میکروبی داشته باشد. استفاده از ملاس‌هایی که مقدار مواد فیبری در آنها زیاد است، می‌تواند منجر به گرفتگی چاه‌های تزریقی شود. آنالیز کامل ملاس برای اندازه‌گیری غلظت موادی که ممکن است اثر مسمومیت‌کننده برروی میکروب‌ها داشته باشد و همچنین کنترل کیفیت ملاس در منطقه عملیاتی لازم و ضروری است. از دیگر معیارهای موفقیت تست‌های میدانی ازدیادبرداشت میکروبی، پیگیری و نمونه‌برداری، همراه آنالیز بعد از آغاز فرآیند است. به عنوان مثال، وضعیت حرکت میکروبی در چاه‌های مخزن باید کاملاً تحت کنترل باشد تا مبادا حرکت میکروبی به سمت چاه‌های غیراصلی منحرف شود.

۱۲- منابع

1. Donaldson, E.C., Chilingarian, G.V., and Yen, T.F.: Microbial Enhanced Oil Recovery. Developments in Petroleum Science, vol 17(2), pp. 423-450, 1989.
2. Tanner, R.S., Udegbunam, E.O., Adkins, J.P., Mclnerney, M.J., Knapp, R.M.: The Potential for MEOR from Carbonate Reservoirs: Literature Review and Recent Research. Developments in Petroleum Science, vol 39, pp. 391-396, 1993.
3. Hughes, D., Brealy. N.: Revival of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Initiativeson UK Continental Shelf D. Collaborative Project on Enhanced Oil Recovery International Energy Agency Canada, London, 2003.
4. Zhang, Y., Xu, Z., Ping, Ji and Hou, W.: Microbial EOR Laboratory Studies and Application Results in Daqing Oilfield, Paper SPE 54332, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 20–22 April, 1999.
5. U. S Patent 5492828.: Process for Producing Modified Microorganisms for Oil Treatment at High Temperatures, Pressures and Salinity. February 20, 1996.
6. Yakimov, M.M., Amro, M.M., Bock, M., Boseker, Fredrickson, H.L., Kesel, D.G., Timmis, K.N.: The Potential of Bacillus Licheniformis Strains for in Situ Enhanced Oil Recovery. J. Pet. Sci. Eng. vol 18 (1-2), pp. 147-160, 1997.
7. Kleinitz, W., Littmann, W.: Reservoir Engineering Review of an Microbial Enhanced Oil Reocvery Proccess in a North German Petroleum Reservoir. Presented at the 7th European IOR Symposium, Moscow' Rrussia, 27-29 Octobcr, 1993.
8. Bryant, R.S.: Potential Uses of Microorganisms in Petroleum Recovery Technology. Proc.Okla.Acad.Sci. vol 67, pp.97-104, 1987.
9. نجف‌پور، م.، خشنودی، م.، وطنی، ع.، نیک‌کام، ن.، "ازدیادبرداشت از مخازن به روش میکروبی"، مجله اکتشاف و تولید، ۱۳۸۴.
10. Bryant R.S.: Microbial Enhanced Hydrocarbon Recovery and its Potential for Application to North Sea Reservoirs. Trans IChem E 72, Part A, pp. 144-151, 1994.
11. McInerney, M.J., Knapp, R.M., Chisholm, J.L, Bhupathiraju, V.K., Coates, J.D.: 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.
12. http://www.obio.com/MEOR.htm
13. http://www.sinocal.com/english-version/prodctcts/meort.html

[1] Fracture
[2] Sweep Efficiency

www.SID.ir

Archive of SID

14. GloriOil Promises Better Recovery through Biotechnology. J. Pet. Technol. Online Magazine, 3 August 2007.
15. http://www.glorioil.com/index.htm
16. Jack, T.R., "M.O.R.E. to M.E.O.R.: An Overview of Microbially Enhanced Oil Recovery. Developments in Petroleum Science, vol 39, pp. 7-16, 1993.
۱۷. لقمانی، ا.، "کاربرد روش میکروبی در ازدیاد برداشت مخازن نفتی" ، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

www.Reservoir.ir

www.SID.ir