اویل ایندا‌ستری
Oilindustry.ir
CLICK HERE

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر میزان شوری آب تزریقی بر بازیافت نفت در فرآیند آشام خودبخودی مخازن کربناته

رضا نوری مطلق[۱]، مسعود نصیری زرندی[۲]*، سعید عباسی ، عباس شهرآبادی

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت- مخازن هیدروکربوری، دانشگاه سمنان؛ noorimotlagh.reza@gmail.com

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان؛ mnasiri@semnan.ac.ir

عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشگاه صنعت نفت؛ abbasis@ripi.ir

عضو هیئت علمی پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشگاه صنعت نفت؛ shahrabadia@ripi.ir

چکیده

آشام خودبخودی یکی از مهمترین فرآیندها در بهبود برداشت نفت، مخصوصًادر مخازن کربناته شکافدار با تراوایی پایین بلوک ماتریکس محسوب می‌شود. اگر سنگ آهک نفت دوست باشد، این فرایند دیگر روی نمی‌دهد. مطالعات گذشته نشان داده‌اند که آب دریا توانایی افزایش آب دوستی را دارد. یون سولفات در آب دریا می‌تواند شرایط ترشوندگی سطح آهک را مخصوصًادر دماهای بالا تغیر دهد. پتانسیل تاثیر شوری آب بر روی بازیافت نفت در مورد مخازن کربناته هنوز به طور کامل مورد بررسی و آزمایش قرار نگرفته است.

در این مقاله به صورت آزمایشگاهی اثر کاهش شوری آب تزریقی بر روی بازیافت نفت در فرآیند آشام خودبخودی تحت دمای ۱۱۰°C مطالعه شده است و بازیافت نهایی آن با آب سازندی با شوری بالا به عنوان سیال مبنا مقایسه شده است. مشاهده شده است که کاهش شوری آب تزریقی باعث افزایش نرخ آشام و بازیافت نفت در مقایسه با آب سازند در دمای مذکور می‌گردد. به همین ترتیب در این کار نیز ضریب بازیافت آب دریا رقیق شده (به نصف شوری اولیه) بعنوان آب با شوری پایین در مقایسه با ضریب بازیافت آب سازندی بیشتر بوده و به ترتیب در حدود ۱۸٪ و ۱۲٪ نفت درجای مغزه بدست آمده است.

کلمات کلیدی

ازدیاد برداشت نفت، تزریق آب با شوری پایین، آشام خودبخودی، تغیر ترشوندگی، یون‌های ایجادکننده پتانسیل.

* مسعود نصیری زرندی، ایران، سمنان؛ تلفن ۰۲۳۳۳۶۵۴۱۱۴

Experimental Investigation of Water Injection Salinity Impact on Oil Recovery during Spontaneous Water Imbibition in Carbonate Reservoirs

Reza Noorimotlagh, Masoud Nasiri Zarandi, Saied Abbasi, Abbas Shahrabadi

Master student, Semnan University

Faculty member, semnan University

Faculty Member, Research Institute of Petroleum Industry

Faculty Member, Research Institute of Petroleum Industry

ABSTRACT

Spontaneous imbibition is an important IOR process, especially for fractured carbonate reservoirs with low permeability matrix blocks. If the Limestone is oil-wet, the process will not take place. Previous studies have shown that seawater may increase the water-wetness. The sulphate ions in seawater may alter the wetting conditions of the Limestone surface, especially at high temperatures. The potential for carbonates has not been thoroughly investigated where some of the reported studies have excluded carbonates from this effect.

This paper investigates the effect of reduction in injection water salinity on oil recovery in spontaneous imbibition at 110 ^{o}C. Then the final recovery is compared with a high-salinity formation water as basis. It is observed that the decrease in injection water salinity leads to increase in imbibition rate and final oil recovery at the considered temperature. Overall, final oil recovery of diluted sea water (1/2 diluted) as a low salinity water is larger than the one for high-salinity formation water and are 18% and 12% respectively during coreflooding.

KEYWORDS

Enhanced Oil Recovery-Low Salinity Water Flooding-Spontaneous Imbibition-Wettability Alteration-Potential Determining Ions

۱- مقدمه

تقریباً ۵۰٪ ذخایر نفتی شناخته‌شده در جهان مخازن کربناته هستند [۸]. بازیافت نفت از این مخازن به‌طورکلی بسیار کم، معمولاً زیر ۳۰٪ است. علت آن‌هم این است که سنگ‌های کربناته دارای شکاف ، تراوایی پایین و آب‌دوستی کمی هستند [۴].

چیلینگار و یان (۱۹۸۳) مطالعه‌ی را درباره‌ی ۱۶۱ سنگ کربناته انجام داده‌اند و بدین‌صورت گزارش داده‌اند: ۱۵٪ قویاً نفت دوست، ۶۵٪ نفت دوست، ۱۲٪ دارای ترشوندگی متوسط و ۸٪ آب‌دوست .

وجود شکاف در سنگ و تراوایی پایین بافت سنگ، یک تراوایی نسبتاً بالایی را برای عبور جریان از تزریق کننده به تولیدکننده ایجاد می‌کند. تراوایی شکاف‌ها حدود ۵۰ برابر بیشتر از تراوایی بافت سنگ است. این بدین معناست که سیلاب‌زنی انجام‌شده در مرحله ثانویه کمتر مؤثر است چراکه آب تزریق‌شده از مسیری عبور می‌کند که کمترین مقاومتی را در برابر جریان آن از خود نشان دهد و تنها حجمی از نفت را جابجا می‌کند که در شکاف‌ها قرار دارد،این حجم جابجا شده نفت درصد کمی از نفت درجای مخزن بشمار می‌آید. در مخازن کربناته با تراوایی پایین و وجود شکاف، جابجایی نفت از بافت سنگ توسط آشام خودبه‌خودی سیال تزریق‌شده انجام می‌شود، که این اصلی‌ترین مکانیسم رانش برای بازیافت بالای مخزن محسوب می‌شود. بااین‌وجود حالت خنثی تا نفت دوست بودن مخازن بازیافت نفت را برای آشام خودبه‌خودی توسط آب را محدود می‌کند. حالت تر شوندگی نامساعد از جابجایی خودبه‌خودی آب به درون بافت به دلیل فشار مویینگی مخالف جلوگیری می‌کند. پس به‌منظور بالا بردن بازیافت نفت در مخازن کربناته، بایستی فشار مویینگی را با تغیر ترشوندگی سطح سنگ به سمت حالت آب‌دوست یا کمتر نفت دوست، به نفع آب زیاد کرد، در این صورت آشام خودبه‌خودی آب می‌تواند نفت بیشتری را بیرون راند. آب دریا توانایی چنین کاری را دارد.

به‌طورکلی قسمت اعظم میادین در جهان دارای ساختار ماسه‌سنگی بوده که در ایران مخازن دارای ساختار کربناته می‌باشند. از سوی دیگر یکی از موارد مهم در تحقیقات ذکرشده انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ماسه‌ای بود که دارای آب سازندی با شوری پایین‌تری نسبت به مخازن ایران هستند. از نکات با اهمیت در آزمایش‌های فوق واکنش بین آب سازندی با آب تزریقی است که موجب آسیب‌دیدگی و کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن می‌گردد.

با توجه به توضیحات گفته‌شده در بالا و اینکه جنبه‌های متفاوت و پارامترهای مختلفی را در این فرآیند می‌توان بررسی کرد، سعی بر آن شده است در این کار تحقیقاتی سیلاب‌زنی نفت را توسط آب با شوری پایین‌تری نسبت به آب همزاد بر روی نمونه مغزه گرفته‌شده از یکی از مخازن در جنوب ایران انجام داده و تغیر ترشوندگی و میزان افزایش بازیافت نفت در آن، با توجه به نمودارهای نفوذپذیری نسبی بررسی نماییم. دراین‌بین میزان آسیب‌دیدگی سازند را نیز در اثر اختلال دو آب با شوری‌های متفاوت نسبت به یکدیگر در نظر گرفته و اثرات متقابل و تأثیر آن بر روی میزان بازیافت و نفت باقیمانده در نمونه سنگ را موردبررسی قرار می‌دهیم.

۲- مروری بر کار های انجام شده در تزریق با شوری پایین آب

در مورد سیلاب‌زنی نفت توسط آب محققین زیادی با آزمایش‌ها مختلف خود چه در مقیاس آزمایشگاهی و چه در مقیاس میدانی افزایش ازدیاد برداشت نفت را اثبات کرده‌اند. یکی از پارامترهای مؤثر در این روش، شوری آب تزریقی می‌باشد. در این راستا کاهش درجه شوری آب جهت تزریق، یکی از روش‌های ازدیاد برداشت است که می‌تواند در مخازن نفتی مورداستفاده قرار گیرد" Low Salinity Water Injection".

در حالت واقعی ترکیب آب همزاد مخزن با ترکیب آب موجود برای تزریق متفاوت می‌باشد. اصطلاح شوری درواقع به نوع و مقدار نمک اشاره دارد که ترکیب یونی آب‌نمک را تشکیل می‌دهد درواقع در این روش با تغییر درجه شوری آب تزریقی سعی می‌شود تا اثرات شیمیایی متقابل آب، نفت و سنگ را تحت تأثیر قرار داده و برداشت از مخازن نفت را افزایش داد.

به‌طورکلی سیلابزنی آب با درجه شوری پایین به‌عنوان یک روش EOR شناخته‌شده، اما در آزمایش‌های سیلاب‌زنی مغزه به‌عنوان بازیافت ثانویه (مستقیماً بعد از بازیافت اولیه انجام شود و یا اشباع اولیه نفت را سیلاب کند) یا بازیافت ثالثیه (بعد از بازیافت ثانویه انجام شود و یا اشباع نفت باقیمانده را سیلاب کند) دسته‌بندی‌شده است.

ژانگ و مارو (۲۰۰۶) یک مقایسه‌ی با تزریق آب با شوری پایین در حالت ثانویه و ثالثیه نسبت به آب سازند را انجام دادند. پنج نوع مغزه ماسه‌سنگی سازند بریا با تراوایی بین ۶۰ تا ۱۱۰۰ میلی دارسی (mD) با نفت‌های A، CS، مینلاسا را برای آزمایش انتخاب کردن‌اند [۱۰]. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش بازیافت ثانویه توسط آب با شوری پایین افزایش ۱۳ تا ۲۷٪ را نشان دادند. در همه‌ی موردهای تزریق آب با شوری پایین میزان بازیافت نسبت به تزریق آب سازند بیشتر دیده شد . همچنین تزریق آن در حالت ثالثیه افزایش بازیافت را تا ۱۲٪ نفت اصلی درجا نشان داد. تنها در مورد مغزه با تراوایی ۴۰۰ میلی دارسی و نفت مینلاسا بازیافت قابل‌ملاحظه‌ی دیده نشد که مقدار آن در حدود ۱,۱٪ بود. ژانگ و مارو نتیجه گرفتند که واکنش بین سنگ / نفت / آب نمک یک فاکتور مهم بر روی میزان بازیافت است.

یوسف و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقی را تحت نظر شرکت آرامکو عربستان بر روی اثر شوری آب بر بازیافت نفت انجام داده‌اند و نام این روش را که بر روی مخازن کربناته انجام‌شده است را "سیلاب‌زنی آب هوشمند" نامیده‌اند که آن را در مخازن ماسه‌سنگی و چالک سیلاب‌زنی آب با شوری پایین می‌نامند. در این تحقیق هدف مطالعه آزمایشگاهی نقش اثر یون‌های آب تزریقی بر روی شیمی سطح که مرتبط به بار سطحی می‌شود و بررسی میزان بازیافت و ارائه مکانیسم

مربوطه است. برای این کار مجدداً آزمایش در دو، به‌نحوی‌که حالت آب دریا برای حالت ثانویه و نسبت‌های رقیق‌شده‌ی آب دریا برای حالت ثالثیه انجام شد. نتیجه بازیافت برای آب دریا که در حالت ثانویه تزریق‌شده بین ۲۲٪-۲۰ و رقیق‌شده‌های آن که در حالت ثالثیه تزریق‌شده‌اند به ترتیب ۱/۲SW بین ۸٫۵٪-۷ ، ۱/۱۰SW بین ۱۰٪-۹ و ۱/۲۰SW بین ۱٫۶٪-۱ نفت اصلی درجای مغزه به‌دست‌آمده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های مطالعه شیمی سطح و همچنین نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های NMR و زاویه تماس مکانیسم افزایش بازیافت در تزریق آب با شوری‌های متفاوت را در تغیر قابل‌ملاحظه‌ی بار سطحی سنگ براثر واکنش بین یون‌های موجود در آب تغیر یافته و سطح سنگ ارائه دادند [۹].

به‌طورکلی قسمت اعظم میادین در جهان دارای ساختار ماسه‌سنگی بوده که در ایران مخازن دارای ساختار کربناته می‌باشند. از سوی دیگر یکی از موارد مهم در تحقیقات ذکرشده انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های ماسه‌ای بود که دارای آب سازندی با شوری پایین‌تری نسبت به مخازن ایران هستند. از نکات با اهمیت در آزمایش‌های فوق واکنش بین آب سازندی با آب تزریقی است که موجب آسیب‌دیدگی و کاهش نفوذپذیری سنگ مخزن می‌گردد.

با توجه به توضیحات گفته‌شده در بالا و اینکه جنبه‌های متفاوت و پارامترهای مختلفی را در این فرآیند می‌توان بررسی کرد، سعی بر آن شده است در این کار تحقیقاتی سیلاب‌زنی نفت را توسط آب با شوری پایین‌تری نسبت به آب همزاد بر روی نمونه مغزه گرفته‌شده از یکی از مخازن در جنوب ایران انجام داده و تغیر ترشوندگی و میزان افزایش بازیافت نفت در آن، با توجه به نمودارهای نفوذپذیری نسبی بررسی نماییم. دراین‌بین میزان آسیب‌دیدگی سازند را نیز در اثر اختلال دو آب با شوری‌های متفاوت نسبت به یکدیگر در نظر گرفته و اثرات متقابل و تأثیر آن بر روی میزان بازیافت و نفت باقیمانده در نمونه سنگ را موردبررسی قرار می‌دهیم.

۲-۱- مکانیسم‌های پیشنهادی برای تزریق آب با درجه شوری پایین

از آن جایی که انرژی پیوندی بین اجزای قطبی نفت و سطح سنگ های کربناته، خیلی بیشتر از آن چیزی است که در سنگ های ماسه سنگی مشاهده می شود و برخی مواد معدنی و رس، در کربناته ها کمتر موجود است. بیشتر، کربناته ها از حوزه ی مطالعاتی سیلابزنی هوشمند توسط بسیاری از محققان خارج شده بودند. اما اخیرا با مشاهده ی افزایش میزان بازیافت نفت از مخازن شکافدار چالک، در میدان آکوفیسک واقع دریای شمال با استفاده از تزریق آب دریا، توجه به سیلابزنی هوشمند در مخازن کربناته بیشتر شده است. این در حالی است که مقادیر مختلفی از بهبود بازیافت نفت در مخازن کربناته با استفاده از آب هوشمند گزارش شده است البته در برخی موارد نیز، عدم موفقیت این روش، گزارش شده است.

تعداد زیادی از کارهای آزمایشگاهی و آزمایش‌های میدانی اثر مثبت تزریق آب با شوری پایین را نشان داده‌اند.در سال های اخیر، عموماً تغیر ترشوندگی به همراه یکی از مکانیسم‌های فیزیک و شیمی را دلیلی برای بهبود بازیافت نفت می‌دانند. چندین مکانیسم به منظور توضیح واکنش‌های بین COBR با هدف افزایش برداشت نفت در طول تزریق آب با شوری پایین ، در میان نتایج بعضاً ضدونقیض ارائه شده است. شناخته‌ترین این مکانیسم‌ها برای تزریق آب با شوری پایین هستند.

در مکانیسم‌های ارائه‌شده در زیر بعضی ها در مخازن ماسه سنگی فعال‌تر و بعضی‌ها در مخازن کربناته فعال‌تر هستند :

- مهاجرت ذرات ریز توسط تانگ و مارو [۷]؛
- افزایش PH توسط مک گویر و همکاران [۶]؛
- تبادل چندگانه یونی (MIE) توسط لاگر و همکاران [۵]؛
- اثر لایه دوگانه؛
- مکانسیم شیمیایی توسط استاد و همکاران [۲].

هیچ یک از این مکانیسم‌ها به طور کامل پذیرفته نشده‌است بلکه تحقیقات درباره‌ی آنها هنوز ادامه دارد. ممکن است که ترکیب چندتا از مکانیسم‌های فوق با هم به‌عنوان روش بهبود بازیافت نفت عمل کنند.

در کار پیش رو سعی بر آن شده است که آزمایش‌ها به صورتی طراحی شده باشند تا به بررسی اثر مکانیسم تبادل چندگانه یونه پرداخته شود پس در ادامه این مکانیسم را به طور کامل توضیح داده می‌شود.

تبادل چندگانه یونی (MIE)

Error! Reference source not found. ایده ساده مکانیزم تبادل چندگانه یونی را نشان می دهد. در حین تزریق آب با درجه شوری بالا مانند تزریق آب سازند یا آب دریا ذرات باردار نفت در سطح باقی می مانند در حالت تزریق آب با درجه شوری پایین در مخزن یون کلسیم افزایش می یابد در نتیجه ذرات باردار نفت و ترکیبات آلی فلزی از سطح جدا خواهد شد. در هر دو مورد آزمایشگاهی و میدانی کاهش یون کلسیم در آب خروجی اندازه گیری شده است [۵]. این تبادل دیگر یون ها با یون کلسیم را نشان می دهد. این فرایند نفت داخل ماتریکس سنگ را کاهش می دهد که نشان از تغییر ترشوندگی سیستم از حالت خنثی یا نفت دوست به سمت آب دوست است.

در واقع این همان مکانیسمی است که برای ماسه سنگ ها هم پیشنهاد شده است. تفاوتی که این مکانیسم در کربناته ها و ماسه سنگ ها دارد این است که در ماسه سنگ ها تبادل کاتیون اتفاق می

افتد، در حالی که در کربناته ها تبادل آنیونی رخ می دهد.

۲-۲- ترشوندگی در مخازن کربناته و چالش‌های آن

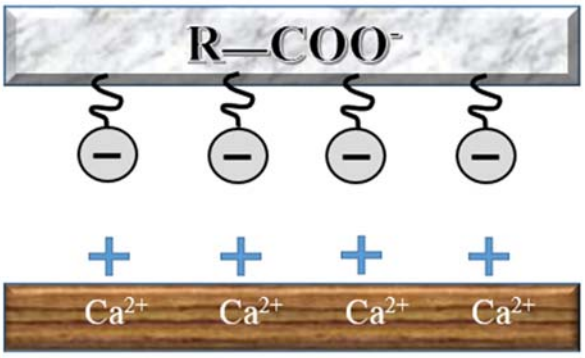
ترشوندگی را می‌توان یکی از مهمترین پارامترهای موجود در فرآیند بازیافت نفت شمرد، بدلیل تاثیر فوقالعاده قوی که بر روی توزیع، قرارگیری و جریان آب و نفت در مخزن در طول تولید دارد [۱]. توزیع سیال در محیط متخلخل تنها تحت تاثیر نیروهای مویینگی، گرانرو و ثقلی نیست بلکه نیروهای موجود در فصل مشترک جامد/مایع نیز بر روی آن تاثیرگزار هستند.

ترشوندگی عبارتی است که در توصیف تمایل نسبی یک سطح نسبت به یک سیال در حضور سیالات امتزاج ناپذیر دیگر به کار می‌رود. این پارامتر عامل اصلی در توزیع میکروسکوپی سیال در محیط متخلخل بوده و به مقدار بسیار زیادی بر اشباع نفت باقی مانده و نیز توانایی یک فاز در جریان یافتن، تاثیر می‌گذارد. غالباً ای تمایل نسبی دیواره حفره‌ها به یک هیدروکربن در حضور آب در صنعت نفت توسط واژه‌های آب‌دوست و نفت‌دوست توصیف می‌شود. از سازندهای آبدوست قوی، نفت‌دوست قوی و ترشوندگی متوسط می‌توان به ترتیب Spraberry در غرب تگزاس، Black Bradford پنسیلونیا و Fair bank sand در جنوب تگزاس اشاره داشت.

باور بر این است که عمده ی مخازن کربناته ترشوندگی مخلوط و به سمت نفت دوست دارند .همچنین نشان داده شده است که بازیافت نفت برای مخازن ماسه سنگی بیشتر از کربناته ها است . اصلی ترین چالش در مخازن کربناته تغیر ترشوندگی است .

تغیر ترشوندگی ، اصلی ترین چالش برای افزایش بازیافت نفت از مخازن کربناته است . برای رخ دادن هر تغیر ترشوندگی ، انررژی فعال ساری لازم برای واکنش های شیمیایی ضروری است . در کل ، انرژی پیوندی بین اجزای قطبی نفت و کربنات ها بالاتر از میزانی است که در ماسه سنگ ها مشاهده می شود . سنگ کربناته ، بدلیل جذب اجزای کربوکسیلیک موجود در نفت خام روی سطح کربناته ف خنثی تانفت دوست است . یون سولفات به تنهایی و بدون حضور افزودنی های دیگر نظیر سورفکتانت ، میتواند بعنوان تغیردهنده ی ترشوندگی عمل کند

.



شکل (۱): جذب اسیدهای کربوکسیلیک روی سطح کلسیتی دارای بار مثبت

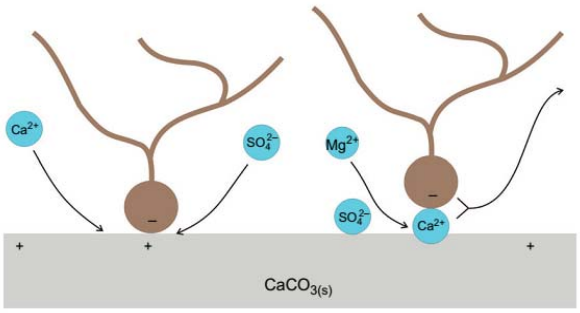
سطح کلسیتی، در ابتدا اجزای قطبی مخالف (اسیدی) را با یک واکنش اسید – بازی که در شکل (۱) نشان داده شده است، بهتر جذب می کند.

اجزای اسیدی که روی سطح کربناته جذب می شوند، شامل اسید نفتالیگ و تعدادی اسیدهای کربوکسیلیک (RCOOH) شامل کارپیلیک(اوکتانوپیک، پالمبنیک، هگزاد، کانوییک)، اسنریک (اوکتادکناوییک) و اسیدهای اولیک است. این برهمکنش اسید- بازی بین نفت و جامد، یک برهمکنش قطبی قوی است.

۲-۳- تأثیر یون های ایجاد کننده ی پتانسیل و دما روی ترشوندگی کربناته ها

مطالعات پیشین نشان داده است که آب دریا می تواند به عنوان سیال تغییر دهنده‌ی ترشوندگی در مخازن کربناته ی با آب دوستی کم عمل کرده و بازیافت نفت را به ویژه در دماهای بالا بهبود بخشد.

Ca^{2+} ، SO_4^{2-} وMg^{2+} در سطح کربناته، یون های ایجاد کننده ی پتانسیل هستند که روی بار سطحی (پتانسیل زتا) تاثیر دارند. در بین یون های دو ظرفیتی موجود در آب دریا، Mg^{2+} بیشترین غلظت را داشته و غلظت نسبی SO_4^{2-} دو برابر Ca^{2+} است. در حالی که در آب سازندی، غلظت Ca^{2+} خیلی بیشتر از غلظت SO_4^{2-} است. در یک تعادل پویا جذب دو یون ایجاد کننده ی پتانسیل با بارهای مخالف Ca^{2+} و SO_4^{2-} روی سطح کربناته، بستگی به غلظت نسبی آن ها دارد. بنابراین جذب SO_4^{2-} روی سطح کربناته که بار مثبت دارد، دانسیته ی بار مثبت سطح را کاهش داده و باعث جذب بیشتر Ca^{2+} ، به دلیل کاهش دافعه ی الکترواستاتیکی می شود. پس از آن، Ca^{2+} می تواند با گروه های کربوکسیلیک جذب شده روی سطح کربناته واکنش داده و بخشی از کربوکسیلیک آلی را رها سازد. در دماهای بالاتر، Mg^{2+} موجود در آب دریا، می تواند جایگزین Ca^{2+} سطح کربناته شود. شماتیک واکنش یون های ایجاد کننده ی پتانسیل و سطح کلسیت در شکل (۲) آمده است.



شکل (۲): نمایی ساده از تبادل چندگانه یونی و یون‌های پتانسیل‌زا در سنگ‌های کربناته (ژانگ و همکاران، 2007a)

بر اساس این مدل، اجزای کربوکسیلیک (اسیدی) موجود در نفت خام، روی سطح با بار مثبت چالک می چسبند وقتی آب دریا به آن تزریق می شود، یون های سولفات روی سطح سنگ، جذب شده و باعث تغییر بار سطحی می شوند. به گونه ای که مقادیری از نفت جذب شده روی سنگ، آزاد می شود. به دلیل دافعه ی الکترواستاتیکی کمتر، یون کلسیم نیز روی سطح چالک جذب شده و باعث آزاد شدن مقدار بیشتری نفت خام چسبیده شده با پیوند یونی، از روی سطح سنگ می شود.

در دماهای بالاتر (بیش از ۹۰°C)، یون منیزیم نیز در فرایند تغییر ترشوندگی شرکت می کند. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که به هنگام تزریق آهسته‌ای آب دریا به چالک، یون منیزیم جایگزین کلسیم می شود. لذا ممکن است منیزیم، پیچیده‌ای کلسیم- کربوکسیلات را جا به جا کند [۱۰].

برهمکنش یونی بین Mg^{2+} و SO_4^{2-} در محلول، می تواند غلظت Mg^{2+} را نیز در نزدیکی سطح آهک، به دلیل SO_4^{2-} اضافی جذب شده، افزایش دهد. برهمکنش یونی بین Mg^{2+} و SO_4^{2-} فقط در دماهای بالا اتفاق می افتد بنابراین اعتقاد به اینکه یونهای Mg^{2+} وCa^{2+} و SO_4^{2-} در مکانیزم شیمیایی تغییر شوندگی درگیر هستند، منطقی است.

در آب دریا برهمکنش نسبی بین یون های Ca^{2+} و Mg^{2+} در نزدیکی آهک، با حضور SO_4^{2-} تعیین می شود. به نظر می رسد که Ca^{2+} به دلیل تشکیل جفت یونی بین Mg^{2+} و SO_4^{2-} و جذب SO_4^{2-} روی سنگ، شدیدتر از Mg^{2+} جذب می شود. در دماهای بالا، کاهش غلظت Mg^{2+} در خروجی نشان می دهد که این یون می تواند در دماهای بالا جایگزین Ca^{2+} روی آهک شود [۱۰].

۳- مواد آزمایشگاهی

۳-۱- سیالات

آب نمک

در این کار تحقیقاتی برای میزان شوری‌های متفاوت آب نمک از آب سازند یکی از مخازن کربناته و آب دریا یک بار رقیق شده با آب مقطر(1/2 SW) استفاده شده است که می‌توان مشخصات این دو آب را در جدول (۱) مشاهده کرد.

جدول (۱): مشخصات یون‌های موجود در آب‌های مورد آزمایش

یون‌ها	آب سازند (ppm)	آب دریا رقیق شده (ppm)
Na	۶۶۶۰۰	۵۸۶۰
Ca	۱۸۰۰۰	۲۴۰
Mg	۲۶۰۹	۷۲۸
SO_4	۲۸۶	۱۰۲۴
Cl	۱۴۱۸۰۰	۱۱۱۰۰
TDS	۲۲۹۲۹۵	۱۸۹۶۸

نفت خام

در این آزمایش از نفت مرده استفاده شده است. برای حذف ذرات و ناخالصیهای موجود در نفت و همچنین جلوگیری از نشست ذرات آسفالتین معلق در آن بر روی مغزه، نفت را از یک فیلتر ۰,۴۵ میکرومتر عبور داده وتمامی این ذرات را حذف می‌نماییم جدول (۲) .

جدول (۲):مشخصات نفت مرده

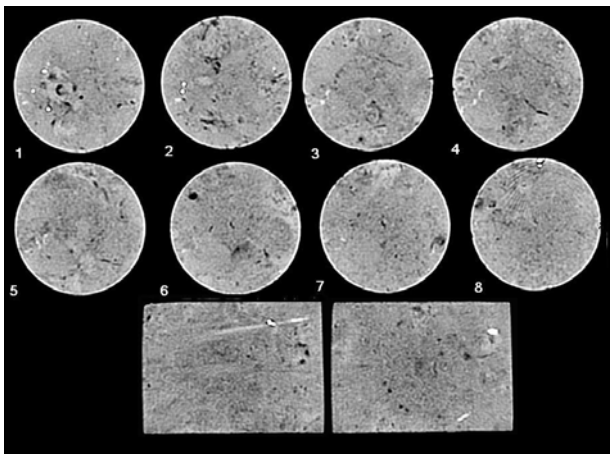
نمونه	°API	وزن مولکولی (g/mol)	حجم آسفالتین (٪)	عدد اسیدی (mgKOH/g)
A1	۴۰,۷	۲۱۰	۰,۲	۰,۱۷

۳-۲- انتخاب مغزه و آماده سازی آن

مغزه انتخاب شده از مخزن کربناته و جنس آهکی می‌باشد. تمامی پلاگ‌ها در پایین چاه و از لایه تولیدی نفت گرفته شده است. آزمایش‌های مختلف برای بدست آوردن خصوصیات پتروفیزیکی بر روی مغزه‌ها از جمله: ابعاد، تراوایی هوا، تخلخل و حجم فضاهای خالی انجام شده است جدول (۳) جدول (۳. همچنین برای اطمینان کافی از اینکه مغزه‌ها دارای هیچ گونه شکاف و یا مانعی برای تراوایی نباشند از آها سی تی اسکن گرفته شده است شکل (۳) .

جدول (۳):خصوصیات پتروفیزیکی نمونه مغزه‌ها

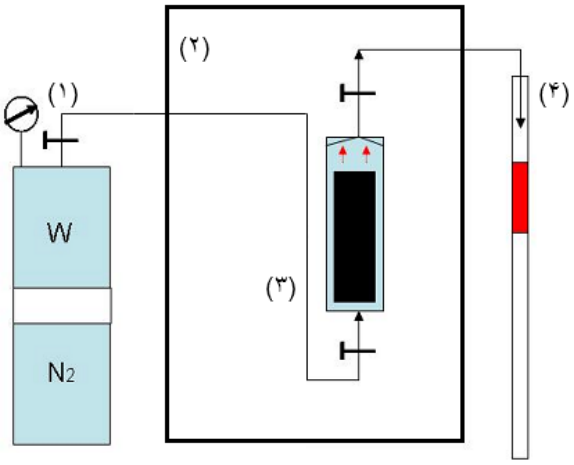
نمونه	طول (cm)	قطر (cm)	تراوایی هوا (md)	تراوایی مطلق (md)	تخلخل (٪)	چگالی سنگ (g/cm^3)
A	۵,۱۳۶	۳,۸۵	۳,۷۳	۱,۷۹	۱۶,۱	۲,۷
B	۴,۹۲	۳,۸۵	۲,۲۶	۱,۵۸	۱۳,۱	۲,۷



شکل (۳): سی تی اسکن گرفته شده از مغزه B

۳-۳- دستگاه‌های آزمایش

در آزمایش آشام خودبخودی در دمای ۱۱۰°C بالا و پایین مغزه بازاست و سیال جابجاکننده می‌تواند از هر دو سر مغزه و تمامی جهات وارد شود شکل (۴). در طول آزمایش به منظور ممانعت از بخار شدن آب در این دما و نگه داشتن آن در زیر نقطه‌ی حباب از سیلندر استیل هسلر استفاده می‌شود چرا که می‌توان با تنظیم کردن فشار از طریق اعمال فشار به اندازه‌ی ۱۵۰psi توسط گاز نیتروژن موجود پایین پیستون سلول سیال جابجاکننده از آن جلوگیری کرد. مغزه را درون سلول آشام استیلی که در آون قرار دارد جا میزنیم. حال می توان با انتخاب زمانهای مناسب میزان نفت تولیدی را به آرامی از طریق سیال خروجی آن در بورت بخوانیم و نسبت به زمان آن را رسم کنیم.



شکل (۴): شمای دستگاه آزمایش آشام خود به خودی در دماهای بالا

که در تصویر بالا اجزای زیر بکار رفته‌اند:

(۱) سیلندر دارای پیستون (سیال جابجا کننده در بالای پیستون و گاز نیتروژن در پایین پیستون قرار دارد)

(۲) آون جهت اعمال دمای مورد نیاز

(۳) سلول آشام استیلی جهت پایداری در فشار مورد نیاز

(۴) بورت جهت جمع‌آوری سیالات خروجی

قبل از شروع به انجام آزمایش‌های آشام خودبخودی بایستی مغزهها را به شرایط اولیه‌ی که در مخزن دارن و بین نفت و آب آنها تعادل وجود دارد، رساند. در ابتدا مغزههای شسته شده توسط تولون و متانول را در دمای ۱۲۰°C خشک کرده و ابعاد و وزن خشک آن را برای بدست آوردن حجم فضاهای خالی اندازه‌گیری می‌کنیم. سپس توسط آب سازند انتخاب شده با مشخصات مندرج در جدول (۱) در فشار ۲۰۰۰psi به مدت ۲۴ ساعت اشباع می‌کنیم. نمونه مغزه را که کاملاً با آب سازند اشباع شده است را وزن کرده و از تفاوت وزن بین حالت خشک و حالت خیس آن و داشتن دانسیته آب سازند که برابر با ۱,۱۰۲۲g/cm3 می‌باشد، می‌توان حجم فضاهای خالی مغزه را محاسبه کرد شکل (۵)(A). حال در دما و فشار اتمسفریک تحت تزریق نفت مرده قرار می‌گیرد. نفت با نرخ تزریق پایین به درون مغزه تزریق می شود. تزریق با این دبی تا زمانی که از خروجی، نفت تولید شود، ادامه می‌یابد. آب خروجی از مغزه در این حالت جمع آوری شده و بطور دقیق اندازه‌گیری می‌گردد. تقریباً بعد از تزریق به مقدار ۲ برابر حجم فضای خالی مغزه، تغییر محسوسی در حجم آب خروجی پدید نمی‌آید. با داشتن حجم اولیه آب موجود در مغزه و کم کردن مقدار خروجی آب از آن می توان مقدار اشباع آب همزاد در مغزه را محاسبه نمود مقدار آب خروجی از مغزه برابر با مقدار نفت موجود در مغزه می‌باشد. در نهایت زمانی که آب خروجی از سیستم پایان یابد و فقط نفت خارج گردد آزمایش به اتمام می‌رسد. تا به اینجای کار داده های بدست آمده از مغزه‌ها در جدول (۴) نشان داده شده است. مغزه‌های به تعادل رسیده و اصطلاحاً به اشباع آب همزاد بواسطه‌ی تزریق نفت رسیده را به منظور پیر کردن نفت و تغیر ترشوندگی آن از آب دوست به نفت دوست شدن که به دلیل شستن مغزه با تولون ایجاد شده است، به مدت ۴ هفته تحت دمای ۸۵°C و فشار ۸۰۰psi در سیلندر نفت مورد آزمایش نگه می‌داریم. در این مرحله مغزه‌های که تغیر ترشوندگی داده‌اند را از سیلندر نفت خارج کرده شکل (۵)(B) و طبق مراحل بعدی آزمایش آن را در سیستم آزمایشگاهی آشام خودبخودی قرار می‌دهیم.

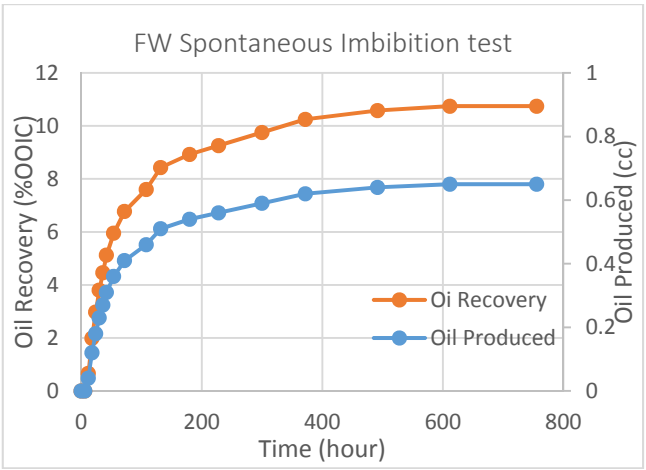
جدول (۴): پارامترهای بدست آمده از مغزه‌ها بعد از رسیدن به اشباع آب همزاد

نمونه	PV (cc)	Swi (%)	Wp=OOIC (cc)
A	۹,۷	۴۵,۱۸	۶,۰۵
B	۷,۴۸	۳۷,۶۲	۴,۱

شکل (۵): شماتیک مغزه مورد آزمایش A) قبل از پیر شدگی B) بعد از پیرشدگی

آشام خودبخودی در دمای ۱۱۰°C برای آب سازند

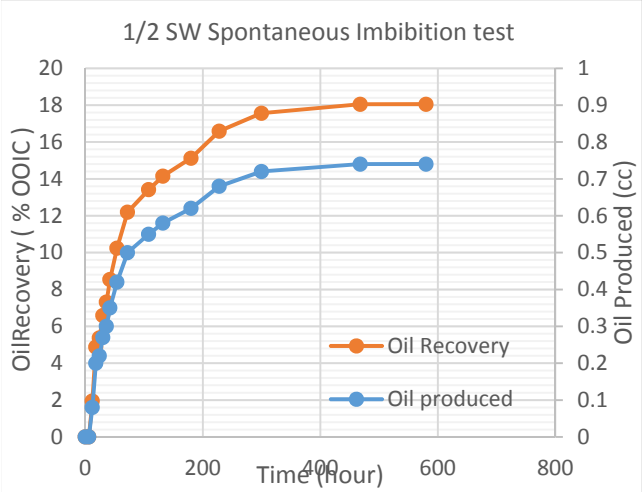
نمونه مغزه A را با ۴۵,۱۸٪ آب کاهش نیافتنی که دوره‌ی پیرشدگی خود را تمام کرده را درون سیلندر آشام قرار می‌دهیم و سیلندر آشام و همچنین سیلندر تغذیه را از آب سازند پر کرده و سیستم را می‌بندیم دمای آزمایش را از طریق آون در ۱۱۰°C تنظیم کرده و از طریق گاز نیتروژن فشار ۱۵۰psi را اعمال می‌نماییم. سپس در زمان‌های مشخص و با یک فاصله زمانی به آرامی از سیلندر آشام خروجی گرفته و سیال جمع شده در بورت را بر حسب زمان طی شده در یک نمودار رسم می‌کنیم بدین طریق میزان بازیافت نفت را در این دما و تحت سیلاب آب سازند بدست می‌آید، این عدد در حدود ۱۰,۷۴٪ نفت درجای مغزه بدست آمده است که میزان نفت خروجی آن برابر با ۰,۶۵ سی سی می‌باشد **Error! Reference source not found.**.



شکل (۶) میزان بازیافت نفت (٪) مرده بر حسب زمان (ساعت) در آزمایش آشام خودبخودی توسط آب سازند تحت دمای ۱۱۰°C با اشباع آب همزاد ۴۵,۱۸٪

آشام خودبخودی در دمای ۱۱۰°C برای آب دریا یک بار رقیق شده

نمونه مغزه B را با ۳۷,۶۲٪ آب کاهش نیافتنی که دوره‌ی پیرشدگی خود را تمام کرده را درون سیلندر آشام قرار می‌دهیم و سیلندر آشام و همچنین سیلندر تغذیه را از آب دریا یک بار رقیق شده پر کرده و سیستم را می‌بندیم دمای آزمایش را از طریق آون در ۱۱۰°C تنظیم کرده و از طریق گاز نیتروژن فشار ۱۵۰psi را اعمال می‌نماییم. سپس در زمان‌های مشخص و با یک فاصله زمانی به آرامی از سیلندر آشام خروجی گرفته و سیال جمع شده در بورت را بر حسب زمان طی شده در یک نمودار رسم می‌کنیم بدین طریق میزان بازیافت نفت را در این دما و تحت سیلاب آب دریا یک بار رقیق شده بدست می‌آید، این عدد در حدود ۱۸,۰۴٪ نفت درجای مغزه بدست آمده است که میزان نفت خروجی آن برابر با ۰,۷۴ سی سی می‌باشد **Error! Reference source not found.**.



شکل ۷: میزان بازیافت نفت (٪) مرده بر حسب زمان (ساعت) در آزمایش آشام خودبخودی توسط آب دریا یک بار رقیق شده تحت دمای ۱۱۰°C با اشباع آب همزاد ۳۷,۶۲٪

۴- نتیجه‌گیری

آب دریا و همچنین رقیق شده‌های آن می‌توانند با توجه به میزان شوری خود بعنوان بهبود دهنده بازیافت نفت در مخازن کربناته عمل کنند. بر اساس میزان بازیافت از آب دریا یک بار رقیق شده با شوری ۱۸۹۶۸ppm جهت حرکت داده نفت درون مغزه نسبت به آب سازند با شوری ۲۲۹۲۹۵ppm بعنوان مبنا تحت آزمایش آشام خودبخودی در دمای ۱۱۰°C که به ترتیب ۱۸,۰۴٪ و ۱۰,۷۴٪ می‌باشد می‌توان نتیجه گرفت که میزان شوری آب تزریقی بر اساس مکانیسم‌های ارائه شده بر روی میزان بازیافت نفت تاثیر گذار است. همچنین با توجه به نرخ تولید نفت از شکل های (۶) برای آب سازند بیشترین تولید خود

را در ۱۸ ساعت اول معادل ۰,۴۱ سی سی نفت تولید کرده در صورتی که آب دریا رقیق شده بیشترین تولید خود را در ۱۲ ساعت اول معادل ۰,۴۲ سی سی نفت و لید کرده است در نتیجه می‌توان گفت که میزان شوری بر روی نرخ تولید نفت نیز اثر گذار است.

تقدیر و تشکر

این کار آزمایشگاهی با حمایت واحد ازدیاد برداشت پژوهشگاه صنعت نفت انجام گرفته است که بدینوسیله از مساعدت بعمل آمده سپاسگزاری می‌شود.

فهرست علائم

آب دریا یک بار رقیق شده	$1/2SW$
واکنش بین نفت-سنگ-آب نمک	COBR
آب سازند	FW
میزان نفت درجای مغزه	OOIC
حجم فضاهای خالی	PV
آب کاهش نیافتنی	Swi
آب تولید شده	Wp

۵- مراجع

[۱] Anderson, W. G. (1986). "Wettability Literature Survey- Part 1: Rock/Oil/Brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability." SPE Journal of Petroleum Technology (10): 1125-1144.

[۲] Austad, T., Strand, S., Madland, M.V., Puntervold, T. and Korsnes, R.I ۲۰۰۷ „Seawater in chalk: an EOR and compaction fluid. Paper IPTC ۱۱۳۷۰ presented at the International Petroleum Technology Conference, Dubai U.A.E., 4-6 December 2007.

[۳] Chilingar, G.V. and Yen, T.F., 1983.Some notes on wettability and relative permeabilities of carbonate rocks, II. Energy Sources, 7(1): 67-75.

[۴] Cuiec, L., 1984. Rock/crude-oil interactions and wettability: An attempt to understand their interrelation. Paper SPE 13211 presented at the 59th Annual Conference and Exhibition, Houston, Texas.

[۵] Lager, A., K. J. Webb, et al. (2008). LoSal„ Enhanced Oil Recovery: Evidence of Enhanced Oil Recovery at the Reservoir Scale. SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery. Tulsa, Oklahoma, USA, Society of Petroleum Engineers.

[۶] McGuire, P. L., J. R. Chatham, et al. (2005). Low Salinity Oil Recovery: An Exciting New EOR Opportunity for Alaskaâ€™s North Slope. SPE Western Regional Meeting. Irvine, California, Society of Petroleum Engineers.

[۷] Tang, G.Q. and Morrow, N.R., 1997. Salinity, Temperature, oil composition, and oil recovery by waterflooding. SPE Reservoir Engineering, November: 269-276.

[۸] Treiber, L.E., Archer, D.L. and Owens, W.W., 1972. A laboratory evaluation of the wettability of fifty oil-producing reservoirs SPE03526. SPE Journal, December: 531-540

[۹] Yousef, A.A., Al-Saleh, S.H., and Al-Jawfi, M.S.: ―Smart WaterFlooding for Carbonate Reservoirs: Salinity and Role of Ions‖ Paper SPE 141082, presented at the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference held in Manama, Bahrain, 6–9 March 2011.

[۱۰] Zhang, P., 2006. Water-based EOR in fractured chalk - Wettability and chemical additives. PhD Thesis, University of Stavanger, Norway.