

مطالعه آزمایشگاهی تاثیر کربنات سدیم و سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید جهت ازدیاد برداشت از مخزن نفتی آسماری

هدایت چشم‌گرم^۱ و نادیا اسفندیاری^{۲*}

۱- گروه مهندسی نفت، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۷/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۷/۳/۲۸

چکیده

یکی از روش‌های کارآمد جهت ازدیاد برداشت از مخزن نفتی، تزریق سورفکتانت در حضور ماده قلیایی است. زاویه تماس آب و سنگ مخزن در حضور سورفکتانت کاهش می‌یابد. از طرفی این ماده، کشش بین‌سطحی را تغییر می‌دهد. مواد قلیایی در مجاورت سورفکتانت‌ها به کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کمک می‌کنند. در این تحقیق، اثر غلظت (۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵ درصد وزنی) و زمان ماندگاری سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در حضور غلظت‌های متفاوت از ماده قلیایی کربنات سدیم (۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ درصد وزنی) روی کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربنانه مخزن نفتی آسماری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از این آزمایشات نشان داد که سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید باعث کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به وضعیت آب‌دوستی می‌شود. همچنین در حضور ماده کربنات سدیم کشش بین‌سطحی و زاویه تماس به مقدار بیشتری کاهش می‌یابد که از عوامل تاثیرگذار بر میزان برداشت نفت است. با افزایش زمان ماند سنگ مخزن در تماس با محلول حاوی سورفکتانت و کربنات سدیم تا ۷ روز، حداقل زاویه تماس از ۵۹° به ۴۶° کاهش یافت. در غلظت مایسل ۰/۳ درصد وزنی از دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در مجاورت کربنات سدیم با بهینه غلظت ۰/۵ درصد وزنی بیشترین کاهش کشش بین‌سطحی ایجاد شد.

کلمات کلیدی: مخزن آسماری، ازدیاد برداشت، کربنات سدیم، دودسیل تری متیل آمونیوم برمید، سورفکتانت.

مقدمه

هنگامی که نفت با استفاده از فشار داخل خود مخزن استخراج می‌شود، به آن بازیافت اولیه نفت گفته می‌شود. در این مرحله ممکن است از ۳۰ تا ۵۰٪ کل نفت مخزن استخراج شود [۱]. بعد از اتمام مرحله اولیه، مرحله ثانویه برداشت نفت شروع می‌شود. از روش‌های موثر در مرحله دوم، سیلاب‌زنی با آب است. پس از سیلاب‌زنی، نفت مخزن به علت وجود نیروهای موئینه بین سیالات، سنگ کشش سطحی در مخزن باقی می‌ماند. نیروهای ویسکوز و نیروهای موئینگی میزان نفت باقیمانده در حفره‌های سنگ مخزن را کنترل می‌کنند [۲] و [۳]. پس از استخراج به کمک روش‌های مرحله دوم هنوز هم حدود ۳۰ الی ۵۰٪ نفت می‌تواند به صورت استخراج نشده در مخزن باقی بماند. در اینجاست که استخراج نفت به کمک روش مرحله سوم صورت می‌گیرد. یکی از روش‌ها در این مرحله، ازدیاد برداشت با روش سیلاب‌زنی مواد شیمیایی است. استفاده از مواد شیمیایی مانند سورفکتانت‌ها، آلکالین‌ها و پلیمرها یکی از روش‌های متداول و پیشرفته در ازدیاد برداشت نفت است [۴]. این مواد با تغییر در کشش بین‌سطحی سیالات مخزن و همچنین تغییر ترشوندگی سنگ مخزن سبب تولید بیشتر نفت می‌شوند. سیلاب‌زنی آلکالین - سورفکتانت - پلیمر روشی نوین بوده و فقط در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته است. مکانیسم اصلی این روش، کاهش کشش بین‌سطحی و بهبود نسبت تحرک است [۵].

هدف اصلی همه روش‌های ازدیاد برداشت افزایش بازدهی جاروب حجمی است و بهبود بازدهی جابه‌جایی در مقایسه با سیلاب‌زنی آب معمولی است [۶]. نفت باقیمانده در فرآیند سیلاب‌زنی با آب به راحتی جابه‌جا و بازیابی نمی‌شود [۳]. سیلاب‌زنی با مواد شیمیایی بعد از روش‌های متداول باعث جداسازی نفت باقیمانده و به تله

افتاده می‌شود. سیلاب‌زنی با سورفکتانت به عنوان یکی از روش‌های ازدیاد برداشت در حدود ده سال است که در سراسر جهان شناخته شده است [۷]. سورفکتانت‌ها مولکول‌های دو قسمتی هستند. یک سر غیرقطبی آب‌گریز دارند که این سر آب‌گریز یک شاخه هیدروکربنی شامل زنجیره‌ای با ۸ تا ۱۸ کربن است. قسمت آب دوست سورفکتانت‌ها می‌تواند یونی، غیر یونی یا خنثی باشد. زنجیره هیدروکربنی سورفکتانت واکنش ضعیفی با مولکول‌های آب در محیط‌های آبی داشته و گروه دارای سرفقطبی یا یونی، واکنش قوی با مولکول‌های دو قطبی آب یا یون‌های دو قطبی موجود در محلول‌ها دارند. سورفکتانت‌ها به گروه‌های آنیونی، کاتیونی، غیر یونی، آمفوتری (دوقطبی) و پلیمری تقسیم می‌شوند [۸ و ۹]. به علت قرار گرفتن مولکول سورفکتانت بین آب و نفت کاهش کشش سطحی بین این دو فاز اتفاق می‌افتد و باعث ازدیاد برداشت می‌شود [۷]. سورفکتانت‌های کاتیونی از جمله مواد شیمیایی هستند که جهت ازدیاد برداشت استفاده می‌شوند. سورفکتانت‌های کاتیونی به صورت متداول زمانی که گروه آلکیلی با زنجیره بلند دارند در آب حل می‌شوند. سورفکتانت‌های کاتیونی با یک زنجیره بلند آلکیلی انحلال‌پذیری ضعیفی در هیدروکربن‌های نفتی دارند. هنگامی که تعداد زنجیره‌های آلکیلی به دو یا بیش از دو عدد افزایش می‌یابد، قابلیت انحلال آن در هیدروکربن‌های نفتی افزایش می‌یابد [۱۰]. سورفکتانت‌های کاتیونی نوع $R-N(CH_3)_3 Br$ و $R-NH_3 Cl$ می‌توانند ترشوندگی سنگ را از طریق یک فرآیند برگشت‌ناپذیر و اجذبی کربوکسیلات‌های جذب شده در سطح کربناته به وسیله مکانیسم بین سورفکتانت و یون منفی کربوکسیلات، از حالت نفت تر به حالت آب تر تغییر دهند [۱۱]. مواد قلیایی با بازی ساختن بستر و افزایش بار منفی بر روی سطح سنگ، از رسوب مواد سورفکتانت جلوگیری می‌کند. قلیا در مجاورت مواد سورفکتانتی سبب

می‌دهد. افزایش غلظت سورفکتانت در این سیال‌ها با ثابت ماندن غلظت پلیمر باعث افزایش گرانیروی میکرو حباب‌ها می‌شود. در صورتی که مقدار سورفکتانت ثابت باشد و غلظت پلیمر افزایش یابد، اندازه حباب‌ها کاهش می‌یابد [۱۵].

اسپان ۴۰ به عنوان سورفکتانت به نمونه نفت خام نوروز زده شد. نتایج آزمایشات نشان داد که با افزایش دما، گرانیروی و تنش برشی کاهش می‌یابد. افزایش کسر حجمی و غلظت سورفکتانت، گرانیروی و تنش برشی را کاهش می‌دهد [۱۶]. وفای سفتی و همکارانش [۱۷] تأثیر سه نوع سورفکتانت کاتیونی، آنیونی و غیر یونی بر تغییر ترشوندگی سطوح کربناته را بررسی نمودند. سورفکتانت کاتیونی باعث تغییر بار سطحی کلسیت و در نتیجه تغییر شرایط نفت دوست به آب دوست شدند. سورفکتانت آنیونی و غیر یونی سطح را آب دوست می‌کنند. یکی از روش‌های ازدیاد برداشت، تزریق گاز است. به علت ویسکوزیته کم گاز، بخشی از مخزن جاروب نمی‌شود. تزریق فوم با افزایش ویسکوزیته به حل این مشکل کمک می‌کند. ترکیب فوم همراه با نانو ذرات و سورفکتانت باعث پایداری بسیار بالای فوم می‌شود. با افزایش غلظت نفت، فوم زایی و پایداری فوم کاهش می‌یابد [۱۸].

ارشادی و همکارانش [۱۹] هیبرید نانو ساختار سیلیسیم اکسید و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره را به دو روش سل-ژل و آب گرمایی سنتز کردند و پایداری امولسیون را مورد بررسی قرار دادند. امولسیون تهیه شده حاوی آب، هیبرید سیلیسیم اکسید و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره و سورفکتانت است. سه نوع سورفکتانت خنثی (تری‌تون ۱۰۰-X)، کاتیونی (ستیل تری متیل آمونیوم بروماید) و آنیونی (سدیم دودسیل بنزن سولفونیک اسید) استفاده شد. با بررسی پایداری امولسیون‌های تهیه شده، مشخص شد که بهترین سورفکتانت سدیم دودسیل بنزن سولفونیک اسید است.

افزایش کارایی سورفکتانت و تأثیر بیشتر بر روی کاهش کشش بین‌سطحی و تغییر ترشوندگی سنگ می‌شود [۱۲]. جباری و رضانی یک میکرومدل جهت بررسی سیلاب‌زنی پلیمرهای مختلف و ترکیبی از پلیمر و سورفکتانت ساختند. نتایج آنها نشان داد که اضافه شدن سورفکتانت به محلول پلیمری، میزان جاروب نفت را در مسیرهای بسته به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد [۳]. از سورفکتین که نوعی بیوسورفکتانت است جهت بررسی تغییرات کشش سطحی استفاده شد. نمونه میکرومدل نشان داد که تزریق سورفکتین بعد از سیلاب‌زنی با آب در حدود ۱۰/۱ درصد ازدیاد برداشت نفت را موجب شد. عدد موئینگی نسبت نیروهای ویسکوز به نیروی‌های موئینگی می‌باشد که در معادله ۱ آورده شده است.

$$N_e = \mu v \delta \cos \theta \quad (1)$$

در این معادله μ و v به ترتیب ویسکوزیته و سرعت سیال جا به جا کننده، δ کشش بین سطحی آب و نفت و θ زاویه تماس با سطح است. با کاهش کشش بین‌سطحی و زاویه تماس، عدد موئینگی افزایش می‌یابد. در حقیقت تغییر این عوامل باعث تغییر در ترشوندگی سیال-سنگ و ازدیاد برداشت نفت می‌شود [۲].

امانی [۱۳] بیوسورفکتانت رامنولپید را تولید کرد و پس از آن در فرآیند ازدیاد برداشت نفت از آن استفاده کرد. نتایج آزمایش او نشان داد که رامنولپید باعث افزایش ۶/۷۶٪ ازدیاد برداشت نفت می‌شود. فرآیند سیلاب‌زنی با آب با شوری کم و سورفکتانت جهت ازدیاد برداشت نفت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد زمانی که فقط نمک کلرید سدیم در آب نمک تزریقی وجود دارد ازدیاد برداشت بیشتری صورت می‌گیرد و استفاده از سورفکتانت باعث افزایش ترشوندگی سنگ شد [۱۴]. از میکرو حباب‌های پایدار با پلیمر جهت کنترل هرزروی در چاه‌های کم فشار استفاده می‌شود. استفاده از این روش هزینه‌های فرآیندی تحریک چاه را کاهش

کاهش می‌یابد [۲۶]. چگینی‌زاده و همکارانش [۲۷] به بررسی انواع سورفکتانت و تغییر شرایط دما، میزان نمک، غلظت سورفکتانت، کمک حلال، کمک سورفکتانت و شاخه‌های جانبی بر عملکرد آنها در فرآیند ازدیاد برداشت پرداختند.

مدلی جهت سیلاب‌زنی با سورفکتانت با سه جزء (آب، نفت و سورفکتانت) مورد مطالعه قرار گرفت. یک مخزن همگن، دو بعدی و دما ثابت بدون گاز آزاد جهت مدل‌سازی فرض شد. تغییرات کشش سطحی، ویسکوزیته نفت و غلظت تزریق بررسی شد. در نهایت مقایسه‌ای بین میزان بازیافت با سیلاب‌زنی با آب و سورفکتانت صورت گرفت. بازیافت نفت با سورفکتانت افزایش یافت [۲۸]. از نرم‌افزار STARS جهت مدل‌سازی سیلاب‌زنی سورفکتانت در مخزن هتروژن استفاده شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که استفاده از سیلاب‌زنی با آب ۳۳٪ بازیافت را افزایش داد در صورتی که با استفاده از سیلاب‌زنی با سورفکتانت این میزان به ۷۰٪ رسید [۲۹].

از آنجایی که درآمد اصلی کشور ما از فروش نفت است، افزایش برداشت نفت بسیار اهمیت دارد. بنابراین مطالعه بر روی روش‌هایی که موجب ازدیاد برداشت نفت از مخازن کشور شود، ارزشمند است. به دلیل اینکه بسیاری از مخازن نفتی کشور مرحله برداشت اولیه و ثانویه را پشت سر گذاشته‌اند، بررسی و مطالعه روش‌های ثالثیه ازدیاد برداشت بر روی آنها مورد توجه است.

در این پژوهش افزودن ماده قلیایی به محلول سورفکتانت و تاثیر آن بر مکانیسم‌های موثر بر ازدیاد برداشت نفت از مخزن آسماری مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا پارامترهای مختلفی از قبیل تاثیر حضور سورفکتانت بر میزان تغییرات ترشوندگی سنگ مخزن و تاثیر حضور ماده قلیایی در کنار سورفکتانت بر افزایش آب دوستی سنگ مخزن بررسی شد. آنالیزهای کشش سطحی و زاویه تماس در این پژوهش انجام شد.

آنالیزهای کشش سطحی و زاویه تماس بر روی تغییر ترشوندگی سنگ صورت گرفت. نتایج آزمایشات نشان داد که از این ماده می‌توان در جهت ازدیاد برداشت مخازن نفتی کمک گرفت. آزمایشاتی توسط حیدری [۲۰] در جهت بررسی تاثیر دما و زمان بر روی تغییر ترشوندگی نمونه سنگ بنگستان صورت گرفت. آنالیز کشش سطحی و زاویه تماس انجام شد. از سورفکتانت $C_{19}TAB$ استفاده شد. بهینه غلظت سورفکتانت مقدار ۰/۰۵ درصد وزنی به دست آمد.

ترکیب الکل پروکسی سوافیت و اولفین سولفون در محدوده C_{15} تا C_{28} به عنوان سورفکتانت جهت ازدیاد برداشت استفاده شد. نسبت ۳ به ۱ این دو ترکیب بهترین بازده را نشان داد [۲۱]. تغییر ترشوندگی (نفت دوست به آب‌دوست) با ۱۴ نوع مختلف از سورفکتانت مورد بررسی قرار گرفت. سورفکتانت کاتیونی از نوع $R-N^+(CH_3)_3$ بهترین بازده ازدیاد برداشت را نشان دادند [۲۲]. مروری بر روش‌های ازدیاد برداشت با سیلاب‌زنی آلکالین، سورفکتانت و پلیمر صورت گرفته است. تقسیم‌بندی سورفکتانت‌ها و مکانیزم عمل آنها بررسی شده است [۲۳]. سورفکتانت آنیونی آلفا-سولفونید اتیل استر از روغن پالم تولید شد. تاثیر آن بر ازدیاد برداشت بررسی شد. آزمایشات سیلاب‌زنی با غلظت‌های متفاوت از سورفکتانت، ازدیاد برداشت بین ۲۵ تا ۲۷٪ را در برداشت [۲۴].

اکثر سورفکتانت‌های متداول مورد استفاده در صنعت نفت گران قیمت هستند. پال و همکارانش [۲۵] یک سورفکتانت آنیونی از روغن نارگیل تولید کردند. با افزودن ۰/۸ درصد وزنی از این ماده، میزان ازدیاد برداشت ۲۰٪ افزایش یافت. سورفکتانت‌های $C_{12}DmCB$ و $C_{18}DmCB$ ، $C_{16}DmCB$ ، $C_{14}DmCB$ شدند و جهت فرآیند ازدیاد برداشت نفت مورد استفاده قرار گرفتند. کشش سطحی بین نفت خام و محلول سورفکتانت با افزایش طول شاخه کربنی

روش کار مواد

ماده قلیایی کربنات سدیم (Na_2CO_3) و سورفکتانت کاتیونی با نام دو دسیل تری متیل آمونیوم برومید (DTAB) با خلوص بالای ۹۹٪ از شرکت مرک خریداری شد. تولوئن جهت آماده‌سازی و شستشوی سطوح سنگ‌های کربناته تهیه شد. از آب مقطر نیز به عنوان سیال پایه برای تهیه محلول‌های سورفکتانت و کربنات سدیم در درصدهای وزنی مختلف استفاده شده است. در این پژوهش از نمونه نفت یکی از میدین نفتی جنوب غربی ایران با درجه API برابر ۲۹، که نفت نسبتاً سبکی می‌باشد استفاده شده است. دانسیته نفت فوق در دمای محیط 25°C معادل 0.8816 g/cc است که نتایج فوق با استفاده از دستگاه SVM3000 در آزمایشگاه نفت شرکت نفت مربوطه به‌دست آمده‌اند. میزان آسفالتین ناچیز و برابر ۰/۰۹٪ است.

سنگ مخزن مورد استفاده در این تحقیق نیز سنگ مخزن کربناته و از نوع دولومیتی از مخزن آسماری می‌باشد. نمونه‌های سنگ به صورت مغزه‌های استوانه‌ای به‌طول حدود ۱۰ cm از انبار مغزه تحویل گرفته شد و سپس به وسیله دستگاه برش آزمایشگاه به صورت مقاطع به قطر حدود ۲ cm و ضخامت حدود ۵ تا ۱۰ mm برش زده شد. مغزه دارای تراوایی $11/4 \text{ mD}$ ، تخلخل $15/7\%$ و حجم خلل و فرج $8/9 \text{ cc}$ است. نمایی از سنگ‌های برش داده شده و آماده برای انجام آزمایشات ترشوندگی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمایی از مغزه‌های برش زده شده برای انجام آزمایشات ترشوندگی

تجهیزات

برای اندازه‌گیری میزان سورفکتانت و کربنات سدیم مورد نیاز برای ساخت محلول‌های از ترازوی دیجیتالی با دقت 0.1 mg استفاده شد. برای اندازه‌گیری دانسیته و گرانیروی نفت و محلول‌های آلکالاین- سورفکتانت در فشار و دمای اتمسفر از دستگاه SVM3000 متعلق به آزمایشگاه شرکت نفت استفاده شد.

آماده‌سازی سنگها جهت انجام آزمایش

برای این مرحله ابتدا مغزه‌های کربناته مخزن آسماری تهیه شد و به قطعات کوچک به شکل دایره و به قطر ۲ cm و ضخامت ۵ تا ۱۰ mm به وسیله دستگاه برش، بریده شد. پس از آن برای صیقل دادن سطح نمونه‌های سنگ از سمباده بسیار نرم استفاده شد. برای عاری شدن سنگ‌ها از کلیه آلودگی‌ها و پاک شدن سطح آنها با آب مقطر شسته شده سپس درون تولوئن قرار گرفتند و مجدداً با آب مقطر شستشو داده شد تا سطوح سنگ‌ها کاملاً تمیز شوند. بعد از این مرحله سنگ‌ها به مدت چهار روز در آن با دمای 65°C گذاشته شدند تا کاملاً خشک شوند. جهت نفت دوست شدن برای مدت ۲۰ روز درون بشر غوطه ور در نفت خام مخزن آسماری در آن در دمای 65°C قرار گرفت. قبل از قرار گرفتن مقطع‌ها در محلول‌های سورفکتانت و قلیا، مقطع در محفظه نگهدارنده مربوطه روبروی دوربین قرار گرفته و با یک سوزن (سرنگ) بسیار ریز یک قطره نفت در حضور آب مقطر زیر مقطع رها کرده که به دلیل چگالی کمتر بالا رفته و روی مقطع می‌چسبد با گرفتن عکس از حالت قطره، زاویه تماس آب و سنگ و در نتیجه ترشوندگی سنگ در شرایط اولیه قبل از تاثیر قلیا- سورفکتانت اندازه‌گیری شد.

تهیه محلول‌های سورفکتانت و آلکالاین

برای تهیه محلول‌های سورفکتانت و قلیا با غلظت وزنی معین، ابتدا مقدار ماده شیمیایی لازم توسط ترازوی دقیق با دقت 0.1 mg وزن شده، به درون

۰/۰۰۰۱، مجهز به نرم‌افزار برای محاسبه اطلاعات به صورت آنلاین و دوربین با قدرت تفکیک بالا می‌باشد. همچنین محفظه دستگاه قابلیت چرخش تا ۱۶۰۰۰ rpm را دارا می‌باشد.

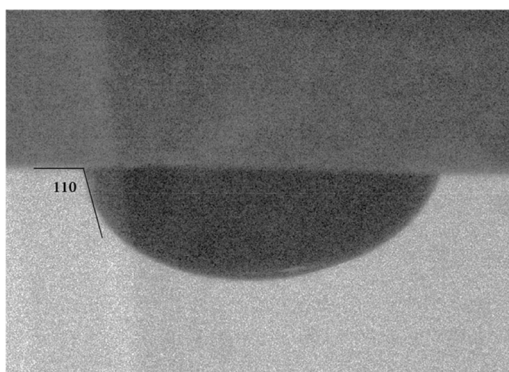
نتایج و بحث

به منظور اندازه‌گیری زاویه تماس و تعیین میزان ترشوندگی سنگ مخزن مورد استفاده، سطوح مختلفی برای غلظت ماده آلکالینی و سورفکتانت‌های مورد استفاده در نظر گرفته شده است. هم‌چنین زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت در حضور ماده آلکالینی در غلظت بهینه نیز به عنوان یک متغیر موثر مورد بررسی قرار گرفته است.

اثر غلظت سورفکتانت و ماده قلیایی بر زاویه

تماس سنگ

به منظور آماده‌سازی سنگ و اطمینان از نفت دوست بودن آن پس از شستشو و تمیز کردن آن، مقطع سنگ مخزن را به مدت ۲۰ روز در نفت خام مخزن آسماری قرار داده تا سنگ نفت دوست شود. پس از ۲۰ روز زاویه تماس سنگ مخزن اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود زاویه تماس آب با سنگ مخزن در مجاورت قطره نفت ۱۱۰° می‌باشد که می‌توان گفت سنگ نفت دوست شده است.



شکل ۲ زاویه تماس سنگ و آب در شرایط اولیه

سپس نمونه‌های سنگ ۱ روز در محلول‌های سورفکتانت با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی قرار داده شد. آنالیز زاویه تماس برای

یک بالون ژوژه منتقل شده و با افزودن آب مقطر به حجم رسیده است. جهت همگن نمودن محلول، به ویژه برای سورفکتانت کاتیونی دو دسیل تری متیل آمونیوم برومید، از همزن مغناطیسی و همزدن دستی با حرارت دادن ملایم استفاده شده است.

خیساندن مقطع‌ها

مقطع‌های نفت دوست شده را درون محلول‌های تهیه شده قرار داده و با توجه به زمان ماند آنها در محلول پس از ۱، ۳، ۵ و ۷ روز مقطع‌ها از محلول خارج شده و جهت اندازه‌گیری زاویه تماس با دوربین مربوطه استفاده شدند.

آنالیزها

اندازه‌گیری زاویه تماس

از دوربین عکاسی ساخت شرکت Sanyo برای تهیه تصاویر از قطره آب بر روی برش‌های از پیش آماده شده از مغزه استفاده شده است. تصاویر ذخیره شده بر روی دوربین به رایانه منتقل شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار اتوکلد مورد بررسی و آنالیز قرار گرفته‌اند تا با استفاده از ابزارهای این نرم‌افزار زاویه تماس بین قطرات آب و سنگ را اندازه‌گیری کند. دستگاه زاویه تماس در دمای محیط و فشار اتمسفر، زاویه ایجاد شده بین سطح مشترک نفت و محلول مورد مطالعه و سطح سنگ را به روش تصویربرداری اندازه‌گیری می‌کند.

اندازه‌گیری کشش بین سطحی

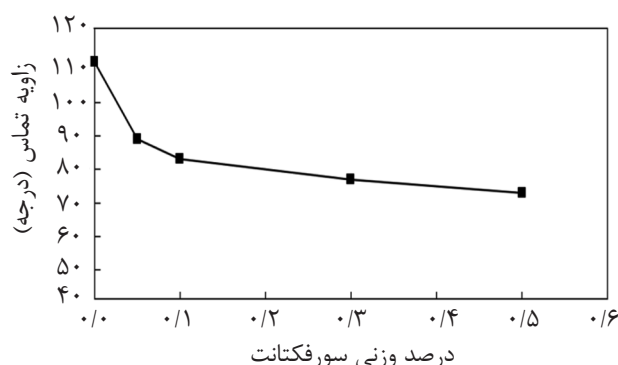
برای اندازه‌گیری کشش بین سطحی سیالات و نفت مورد آزمایش در این پژوهش از دستگاه کشش‌سنج قطره چرخان استفاده شده است. این دستگاه متصل به دوربین با قابلیت زوم بالاست که تصاویر ثبت شده را به رایانه‌ای که به آن متصل است منتقل می‌کند، سپس توسط نرم‌افزار مربوطه محاسبات صورت گرفته و مقدار کشش بین سطحی را مشخص می‌کند. این دستگاه دارای ویژگی‌های از قبیل قابلیت اندازه‌گیری کشش بین سطحی تا

به ترتیب برابر با ۲، ۲، ۱ و ۱ درصد وزنی از کربنات سدیم به دست آمد. که در این مقادیر کمترین مقدار زاویه تماس مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که در غلظت‌های بالاتر از سورفکتانت میزان کمتری از کربنات سدیم مورد نیاز است. مقدار زاویه تماس پس از ۱ روز قرار دادن سنگ در محلول سورفکتانت با غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی بدون کربنات سدیم به ترتیب برابر با ۸۷، ۸۱، ۷۵ و ۷۱ به دست آمد. در صورتی که با افزودن کربنات سدیم به محلول سورفکتانت این مقادیر کاهش چشم‌گیری داشت. کمترین زوایای تماس که در مقادیر بهینه کربنات سدیم همراه با سورفکتانت در درصدهای وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ به دست آمده است به ترتیب برابر با ۷۶°، ۶۹°، ۶۲° و ۵۹° می‌باشد. بیشترین مقدار کاهش در حضور کربنات سدیم برای سورفکتانت کاتیونی دودسیل تری متیل آمونیوم برمید برابر با ۱۳° بوده است. کمترین میزان زاویه تماس پس از ۱ روز ماندن سنگ در محلول ۰/۵ درصد وزنی سورفکتانت در حضور کربنات سدیم با بهینه غلظتی ۱ درصد وزنی، اندازه‌گیری و مقدار ۵۹° به دست آمده است (شکل ۵).

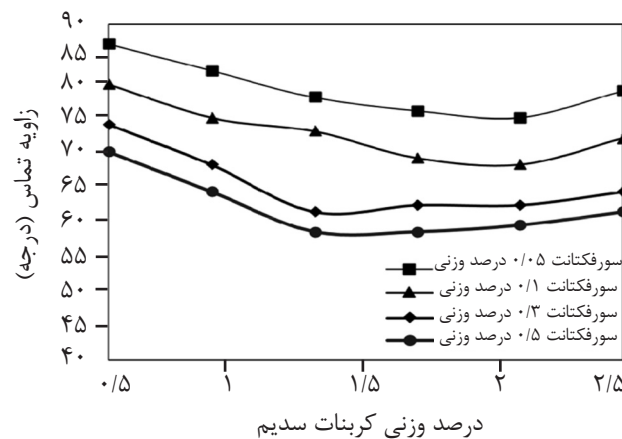
تمام نمونه‌ها انجام شد. نتایج در شکل ۳ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود در حضور سورفکتانت و با افزایش درصد وزنی آن زاویه تماس سنگ با آب کاهش یافته است. این نشان دهنده تغییر ترشوندگی سنگ به سمت آب دوستی است.

سپس با افزودن درصدهای مختلف وزنی از ماده قلیایی کربنات سدیم، تأثیر افزودن آن به سورفکتانت در کاهش زاویه تماس سنگ مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور کربنات سدیم با درصدهای وزنی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵٪ به سورفکتانت‌های کاتیونی اضافه شد و سپس سنگ به مدت ۱ روز درون محلول‌های تهیه شده قرار داده شد. با توجه به نتایج آزمایش در شکل ۴ دیده می‌شود که حضور کربنات سدیم در محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید باعث کاهش زاویه تماس و در نتیجه باعث افزایش آب دوستی سنگ مخزن شده است. با افزایش آب دوستی سنگ مخزن، میزان ازدیاد برداشت افزایش خواهد یافت.

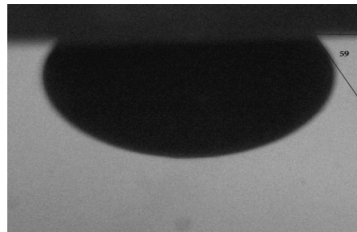
در محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید مقادیر بهینه کربنات سدیم در غلظت‌های ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد وزنی از محلول سورفکتانت



شکل ۳ تأثیر غلظت سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید بدون حضور ماده قلیایی بر کاهش زاویه تماس



شکل ۴ تاثیر افزودن کربنات سدیم به محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید



شکل ۵ کمترین زاویه تماس بین آب و سنگ مخزن پس از ۱ روز در حضور کربنات سدیم و سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید

بیشترین کاهش هم با افزایش غلظت سورفکتانت و زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با بیشترین غلظت یعنی غلظت ۰/۵ درصد وزنی بود که از 110° (با غلظت صفر سورفکتانت) به 71° در روز اول رسیده و سپس در روز هفتم به زاویه 63° کاهش پیدا کرد. برای غلظت‌های ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی سورفکتانت هم زوایای تماس به ترتیب از 75° ، 81° و 87° در روز اول به 70° ، 78° و 82° در روز هفتم رسید. بنابراین در عدم حضور کربنات سدیم پس از روز اول کاهش زاویه تماس خیلی کم و با شیب کاهشی بسیار ملایم است.

تاثیر زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت و کربنات سدیم بر زاویه تماس

ابتدا تاثیر محلول‌های سورفکتانت در درصدهای وزنی از پیش مشخص شده بر روی زاویه تماس بدون حضور کربنات سدیم در گذر زمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در جدول ۱ گزارش شده است. نکته مشترک در تاثیر زمان ماند، افزایش میزان کاهش زاویه تماس با ماندن بیشتر سنگ در محلول سورفکتانت در حضور و عدم حضور کربنات سدیم است. اما بیشترین میزان کاهش در زاویه تماس در روز اول اتفاق افتاده است و پس از آن محلول سورفکتانت به تنهایی کارایی زیادی در کاهش زاویه تماس سنگ مخزن ندارد و زاویه به مقدار کمی کاهش پیدا می‌کند. همچنین

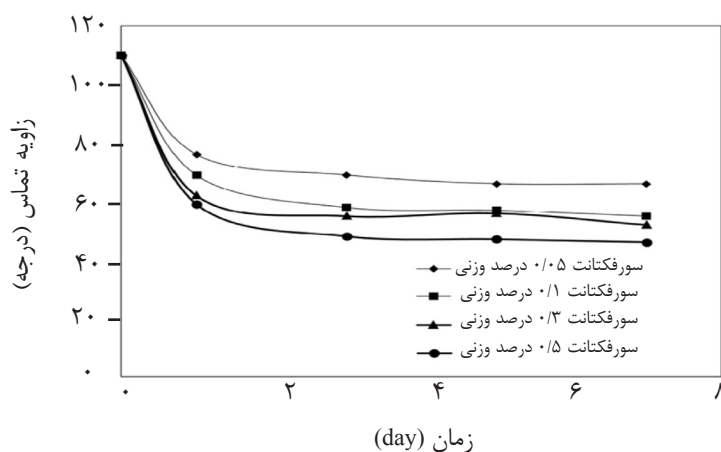
جدول ۱ تاثیر زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت کاتیونی دودسیل تری متیل آمونیوم برمید بر روی زاویه تماس بدون کربنات سدیم

زمان (روز)	سورفکتانت (۰/۵٪)	سورفکتانت (۰/۱٪)	سورفکتانت (۰/۳٪)	سورفکتانت (۰/۵٪)
۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
۱	۸۷	۸۱	۷۵	۷۱
۳	۸۵	۸۰	۷۴	۶۶
۵	۸۳	۷۷	۶۹	۶۴
۷	۸۲	۷۸	۷۰	۶۳

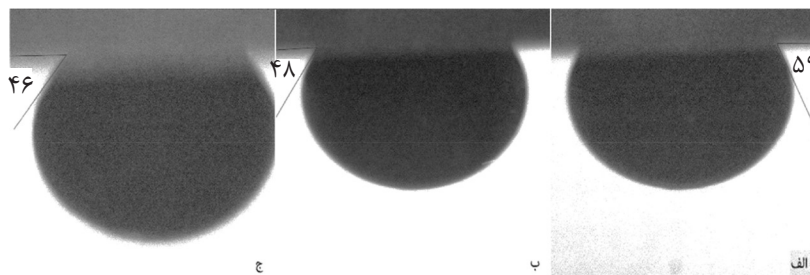
می کند که این امر می تواند نشان دهنده پایداری بیشتر سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در حضور ماده آلكالینی کربنات سدیم باشد. با توجه به شکل ۶، دیده می شود که با افزایش غلظت سورفکتانت در غلظت بهینه کربنات سدیم زاویه تماس کاهش می یابد.

آنچه در آزمایشات دیده می شود، کاهش زاویه تماس با افزایش زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در حضور و عدم حضور کربنات سدیم است. اما همان طور که مشاهده می شود بیشترین میزان کاهش در زاویه تماس در روز اول اتفاق افتاده است و پس از آن سورفکتانت کارایی زیادی در کاهش زاویه تماس سنگ مخزن ندارد. شایان ذکر است که حضور کربنات سدیم در محلول سورفکتانت تأثیر مثبتی در بهبود کارایی سورفکتانت پس از ۱ روز داشته است و تغییرات ترشوندگی در حضور کربنات سدیم پس از ۱ روز تا حدودی ادامه داشته و زاویه تماس به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. زوایای تماس بعد از یک روز، سه روز و هفت روز ماند در محلول با غلظت سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با غلظت ۰/۵ درصد وزنی در حضور کربنات سدیم با غلظت بهینه ۱ درصد وزنی در شکل ۷ نشان داده شده است.

پس از تعیین مقادیر بهینه کربنات سدیم در هر درصد وزنی از سورفکتانت تأثیر زمان ماند سنگ در محلول بر میزان کاهش زاویه تماس، تغییر ترشوندگی سنگ مخزن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور سنگ به مدت ۷ روز درون محلول های با مقادیر بهینه سورفکتانت و کربنات سدیم قرار گرفت و در بازه های زمانی دو روزه پس از روز اول زاویه تماس اندازه گیری شد. حضور کربنات سدیم تأثیر مثبتی در بهبود کارایی سورفکتانت پس از ۱ روز داشت و زاویه تماس به مقدار قابل توجهی کاهش یافت. البته بیشترین کاهش در زمان ماند یک روزه برای همه غلظت ها اتفاق افتاد. بیشترین کاهش زاویه تماس در حضور غلظت بهینه کربنات سدیم (۱ درصد وزنی) برای محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با بیشترین غلظت ۰/۵ درصد وزنی بود که زاویه از 110° (با غلظت صفر سورفکتانت) به 59° در روز اول رسید و سپس در روز هفتم به زاویه 46° کاهش پیدا کرد. همچنین برای غلظت های ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۳ درصد وزنی سورفکتانت هم در حضور غلظت بهینه کربنات سدیم متناسب با آنها (۲، ۲ و ۱ درصد وزنی بهینه کربنات سدیم)، زوایای تماس به ترتیب از 76° ، 69° و 62° در روز اول به 66° ، 55° و 52° در روز هفتم رسید. بنابراین در حضور کربنات سدیم پس از روز اول زاویه تماس همچنان با شیب کاهشی قابل توجهی کاهش پیدا



شکل ۶ تأثیر زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت کاتیونی دودسیل تری متیل آمونیوم برمید روی زاویه تماس در حضور کربنات سدیم بهینه



شکل ۷ زاویه تماس آب و سنگ مخزن الف) بعد از ۱ روز (ب) بعد از ۳ روز (ج) بعد از ۱ هفته در محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با غلظت ۰/۵ درصد وزنی در حضور کربنات سدیم با غلظت بهینه ۱ درصد وزنی

تاثیر سورفکتانت و ماده قلیایی بر کشش بین سطحی

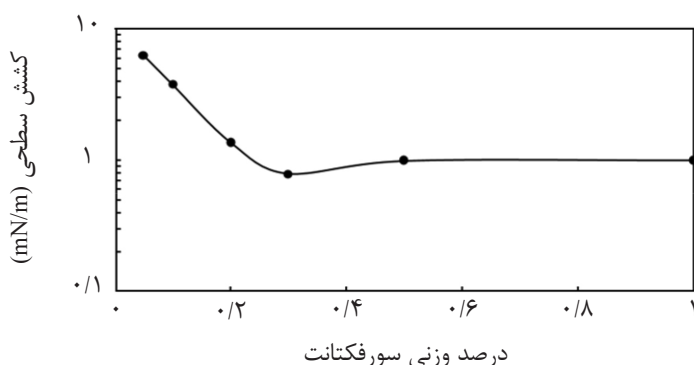
پس از تعیین تغییرات ترشوندگی با استفاده از سورفکتانت و ماده قلیایی لازم است تا مکانیسم موثر دیگر در افزایش میزان برداشت نفت یعنی کشش بین سطحی محلول‌های متشکل از سورفکتانت و ماده قلیایی و نفت مخزن آسماری مورد بررسی قرار گیرد. ابتدا غلظت بحرانی مایسل برای سورفکتانت مورد نظر محاسبه می‌شود. غلظت بحرانی مایسل^۱ برای سورفکتانت در واقع غلظتی است که در آن با افزودن بیشتر سورفکتانت هیچگونه تاثیری بر کاهش کشش بین سطحی صورت نخواهد گرفت و افزودن بیش از حد از لحاظ اقتصادی عملی بیهوده و نادرست می‌باشد. لذا در درصدهای وزنی مختلف از سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با استفاده از روش قطره چرخان، کشش بین سطحی نفت مخزن آسماری و محلول سورفکتانت محاسبه شد تا غلظت بحرانی مایسل به دست آید.

بدین منظور در درصدهای وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۵ و ۱ از سورفکتانت میزان کشش بین سطحی اندازه‌گیری شد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود با افزودن درصد وزنی بیشتر از ۰/۳٪ از سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید کشش بین سطحی محلول سورفکتانت و نفت مخزن آسماری کاهش محسوسی نداشته و کمتر نمی‌شود. لذا برای انجام آزمایشات در حضور کربنات سدیم به عنوان متغیر و جهت بهینه‌سازی درصد وزنی این ماده الکالینی غلظت سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید ۰/۳ درصد وزنی در نظر گرفته می‌شود. یک غلظت مایسل برای سورفکتانت

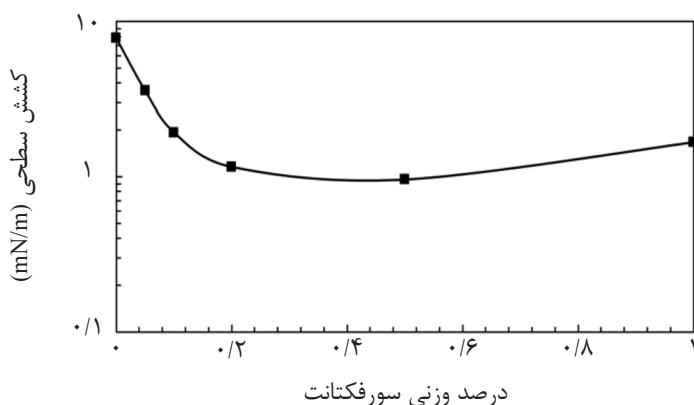
وجود دارد که با افزایش غلظت بالاتر از آن میزان کشش سطحی تغییر نمی‌کند. زیرا زمانیکه غلظت سورفکتانت به غلظت مایسل بحرانی می‌رسد، سطح نفت-آب با مولکول‌های سورفکتانت اشباع می‌شود. اگر باز هم سورفکتانت اضافه شود، مولکول‌های سورفکتانت توده‌های کروی به نام مایسل ایجاد می‌کنند و کشش سطحی تغییر نخواهد کرد. این روند در مطالعه سایر پژوهشگران نیز مشاهده شد [۲۴، ۲۵، ۳۰ و ۳۱].

پس از تعیین غلظت بحرانی مایسل برای سورفکتانت، کربنات سدیم در درصدهای وزنی ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۵ و ۱٪ به ترتیب به محلول آب مقطر حاوی ۰/۳٪ سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید افزوده می‌شود تا آزمایشات کشش بین سطحی اینبار جهت بررسی تاثیر کربنات سدیم انجام شود. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود کشش بین سطحی نفت مخزن آسماری و محلول متشکل از سورفکتانت در غلظت بحرانی مایسل با افزایش درصد وزنی ماده قلیایی کربنات سدیم تا یک غلظت بهینه کاهش یافته و سپس افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نتایج آزمایش‌ها دیده می‌شود کربنات سدیم در هر دو مکانیسم مربوط به افزایش برداشت نفت یعنی تغییر ترشوندگی و کاهش کشش بین سطحی در حضور سورفکتانت رفتار مشابهی از خود نشان داده است. در واقع کربنات سدیم با واکنش دادن با اسید موجود در نفت باعث ایجاد سورفکتانت درجا شده و در کنار سورفکتانت موجود در محلول به کاهش کشش بین سطحی و افزایش میزان آب دوستی سنگ کمک می‌کند.

1. CMC (Critical Micelle Concentration)



شکل ۸ تغییرات کشش بین سطحی نفت مخزن آسماری بر حسب درصدهای وزنی سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید



شکل ۹ تغییرات کشش بین سطحی نفت مخزن آسماری بر حسب درصد وزنی سدیم کربنات برای محلول‌های بهینه مایسل سورفکتانت

نتیجه‌گیری

سورفکتانت یکی از مواد موثر در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن به سوی آب دوستی است. با افزایش غلظت محلول سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در محدوده مورد آزمایش تا ۰/۵ درصد وزنی و خیساندن سنگ مخزن به مدت یک روز در آن، زاویه تماس سنگ مخزن و آب از ۱۱۰ به ۷۱° رسید. افزودن ماده قلیایی کربنات سدیم به محلول سورفکتانت و آب منجر به کاهش بیشتر زاویه تماس گردید. همچنین در هر درصد وزنی از سورفکتانت یک غلظت بهینه برای کربنات سدیم به دست آمد که در آن بیشترین میزان کاهش زاویه تماس حاصل می‌شود به‌طوری‌که با افزایش غلظت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید به ۰/۵ درصد وزنی در غلظت بهینه کربنات سدیم، زاویه تماس از ۷۱° به مقدار حداقل ۵۹° رسید. در واقع

اما نکته حائز اهمیت همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود غلظت بهینه کربنات سدیم است. همان‌طور که برای سورفکتانت یک غلظت بحرانی مایسل وجود دارد که بیشترین میزان کاهش کشش بین سطحی در آن اتفاق می‌افتد به نظر می‌رسد که ماده آلکالینی نیز دارای یک غلظت بحرانی است که در آن غلظت می‌تواند مناسب‌ترین میزان OH- را در مخزن آزاد سازد تا با واکنش با اسید نفت میزان مناسب از غلظت سورفکتانت درجا را تولید کند که بیشترین میزان کاهش کشش بین سطحی نفت و آب حاصل شود. کمترین مقدار کشش بین سطحی در غلظت بهینه ۰/۵ درصد وزنی کربنات سدیم برای سورفکتانت دودسیل تری متیل آمونیوم برمید با غلظت بهینه مایسل ۰/۳ درصد وزنی برابر با ۰/۰۹۶ mN/m است.

آب به میزان چشمگیری کشتش بین سطحی کاهش می‌یابد. در واقع برای کشتش بین سطحی نیز یک غلظت بهینه از کربنات سدیم وجود دارد که در آن بیشترین میزان کاهش کشتش بین سطحی اتفاق می‌افتد که در این تحقیق در غلظت مایسل ۰/۳ درصد وزنی از دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در مجاورت کربنات سدیم با بهینه غلظت ۰/۵ درصد وزنی بیشترین کاهش کشتش بین سطحی ایجاد شد. نکته حائز اهمیت در این تحقیق این است که سورفکتانت کاتیونی دودسیل تری متیل آمونیوم برمید در هر دو مکانیسم تغییر ترشوندگی و کاهش کشتش بین سطحی در حضور کربنات سدیم موثر عمل می‌کند که این امر تاثیر به سزایی در افزایش بازیافت نفت خواهد داشت. میزان بازیافت نفت برای تزریق آب مقطر ۵۳٪ است. سپس با تزریق محلول آلکالین-سورفکتانت در ادامه میزان بازیافت نفت ۱۸٪ افزایش یافته و بازیافت نهایی به ۷۱٪ رسید.

با افزایش درصد وزنی سورفکتانت در مجاورت کربنات سدیم هم زاویه تماس کاهش یافته و سنگ آب دوست تر شده و هم مقدار کمتری از کربنات سدیم جهت کاهش بهینه میزان زاویه تماس مورد نیاز می‌باشد. با افزایش زمان ماند سنگ مخزن در تماس با محلول حاوی سورفکتانت و کربنات سدیم تا ۷ روز، حداقل زاویه تماس از ۵۹ به ۴۶° کاهش یافت. با افزایش زمان ماند سنگ در محلول، تغییر ترشوندگی سنگ به سمت آب دوستی مشاهده می‌شود. در حالی که می‌توان گفت زمان ماند سنگ در محلول سورفکتانت به تنهایی، بیشتر از ۱ روز کارایی چندانی در کاهش زاویه تماس ندارد. که این امر نشان دهنده بالا رفتن کارایی سورفکتانت و افزایش نسبی پایداری آن در حضور غلظت‌های بهینه کربنات سدیم است. حضور سورفکتانت در آب باعث کاهش کشتش بین سطحی آب و نفت می‌شود که در غلظت بحرانی مایسل سورفکتانت، کمترین مقدار کشتش بین سطحی ایجاد می‌شود. با افزایش درصد وزنی کربنات سدیم به محلول سورفکتانت و

مراجع

- [۱]. خسروانی س.، علائی م.، رضانی ع.، رشیدی ع. و ارشادی م.، "بررسی پایداری امولسیون های تهیه شده از هیبرید آلومینا-نانو لوله های کربنی چند دیواره در دماهای متفاوت جهت ازدیاد برداشت مخازن نفتی"، نشریه پژوهش های کاربردی در شیمی، شماره ۳، صفحات ۱۴-۷، ۱۳۹۱.
- [۲]. امانی ح.، "بررسی ازدیاد برداشت نفت به روش سیلاب زنی سورفکتین درون میکرو مدل و مغزه"، پژوهش نفت، شماره ۸۱، صفحات ۶۴-۵۵، ۱۳۹۴.
- [۳]. جباری ه. و رضانی سعادت آبادی ا.، "بررسی آزمایشگاهی اثر پلیمر در حضور سورفکتانت بر بازده جاروب نفت از مسیره های بسته"، پژوهش نفت، شماره ۷۴، صفحات ۹۸-۸۷، ۱۳۹۲.
- [4]. Gupta R. and Mohanty K. K., "Wettability alteration mechanism for oil recovery from fractured carbonates rocks," *Transport in Porous Media*, Vol. 87, pp. 635-652, 2011.
- [5]. Thomas S., "Enhanced oil recovery - an overview," *Oil & Gas Science and Technology*, Vol. 63, No. 1. pp. 9-19, 2008.
- [6]. Zolotukhin A. B. and Ursin J. R., "Introduction to petroleum reservoir engineering," 2000.
- [7]. Demirbas A., Alsulami H. E. and Hassanein W. S., "Utilization of surfactant flooding processes for enhanced oil recovery (EOR)," *Petroleum Science and Technology*, Vol. 33, pp. 1331-1339, 2015.
- [8]. Tadors T. F., "Applied surfactants: principles and applications," 2005.

- [9]. Holmberg K., Jonsson B., Kronberg B. and Lindman B., "Surfactants and polymers in aqueous solution," 2nd, John Wiley & Sons. Chichester, 2003.
- [10]. Rubingh D. N. and Holland P. M., "Cationic surfactants. physical chemistry," Marcel Dekker, 1991.
- [۱۱]. قجاوند ح. و نورمحمد ع., "ازدیاد برداشت نفت از سنگ‌های کربناته به وسیله آشام خود به خودی محلول‌های سورفکتانت," نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دوره ۳۲، شماره ۳، صفحات ۶۹-۷۸، ۱۳۹۲.
- [12]. Schuler P. J., Lerner R. M. and Kuehne D. L., "Improving chemical flood efficiency with micellar/ alkaline/ polymer processes," Presented at the Fifth Symposium on Enhanced Oil Recovery, 1985.
- [۱۳]. امانی ح., "تولید بیوسورفکتانت‌های رامنولیپید به منظور کاربرد در فرآیند ازدیاد برداشت نفت," نشریه شیمی و مهندسی شیمی، دوره ۳۲، شماره ۱، صفحات ۷۳-۸۳، ۱۳۹۲.
- [14]. Hosseinzade Khanamiri H., Baltzersen Enge I., Nourani M., Stensen J. A., Torsaeter O. and Haida N., "EOR by low salinity water and surfactant at low concentration: impact of injection and in-situ brine composition," Energy Fuels, Vol. 30, pp. 2705-2713, 2016.
- [۱۵]. کاظم زاده ع., سلیمانی م. و جمالی ج., "امکان‌سنجی استفاده از ذرات میکرو حباب‌های پایدار با خلوص رئولوژی کنترل شده در حفای مخازن کم فشار," پژوهش نفت، شماره ۸۴، صفحات ۷۸-۸۳، ۱۳۹۴.
- [۱۶]. صادقی م.ب., رضانی سعادت آبادی ا., تقی خانی و. و قطبی س., "رفتار رئولوژی امولسیون‌های نفت خام یکی از میادین نفتی ایران," پژوهش نفت، شماره ۷۵، صفحات ۳-۹، ۱۳۹۲.
- [۱۷]. وفایی سفتی م., جمشیدی مشفق م., جراحیان خ., قرشی س.س. و داودی ع., "بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد فعال سطحی بر روی تغییر تر شونده‌گی سنگ‌های کربناته," پژوهش نفت، شماره ۸۰، صفحات ۳۶-۲۳، ۱۳۹۴.
- [۱۸]. بابا محمودی، س., جباران، م. ه. و ریاحی س., "بررسی آزمایشگاهی پایداری فوم حاصل از نانو ذره و سورفکتانت در حضور نفت خام," پژوهش نفت، شماره ۹۲، صفحات ۱۶۳-۱۵۲، ۱۳۹۶.
- [۱۹]. ارشادی م., علائی م., رضانی ع., رشیدی ع. و خسروانی س., "بررسی تأثیر ریخت نانو هیبرید سیلیسیم اکسید و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره در پایداری امولسیون برای ازدیاد برداشت نفت," نشریه پژوهش‌های کاربردی در شیمی، شماره ۱، صفحات ۱۵-۵، ۱۳۹۲.
- [20]. Heidari M. A., "A novel method with dilute surfactant flooding by considering the effect of time and temperature on crude oil aging, experimental study on heavy oil of bangestan," Journal of Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 51, pp. 155-163, 2017.
- [21]. Johannessen A. M. and Spildo K., "Enhanced oil recovery (eor) by combining surfactant with low salinity injection," Energy & Fuels, Vol. 27, pp. 5738-5749, 2013.
- [22]. Standes D. C. and Austad T., "Wettability alteration in chalk 2. Mechanism for wettability alteration from oil-wet to water-wet using surfactants," Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 28, pp. 123-143, 2000.
- [23]. Olajire A. A., "Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in petroleum industry: prospects and challenges," Energy, Vol. 77, pp. 963-982, 2014.
- [24]. Saxena N., Pal N., Dey S. and Mandal A., "Characterizations of surfactant synthesized from palm oil and its application in enhanced oil recovery," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Vol. 81, pp. 343-355, 2017.

- [25]. Pal N., Saxena N., Laxmi D. and Mandal A., "Interfacial behavior, wettability alternation and emulsification characteristics of a novel surfactant: Implications for enhanced oil recovery," *Chemical Engineering Science*, Vol. 187, pp. 200-212, 2018.
- [26]. Kumar A. and Mandal A., "Characterization of rock-fluid and fluid-fluid interactions in presence of a family of synthesized zwitterionic surfactants for application in enhanced oil recovery," *Colloids and Surfaces A*, Vol. 549, pp.1-12, 2018.
- [27]. Chegenizadeh N., Ali S. and Xie Q., "Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery," *Petroleum*, Vol. 3, pp. 197-211, 2017.
- [28]. Keshtkar S., Sabeti M. شادی Mohammadi A. H., "Numerical approach for enhanced oil recovery with surfactant flooding," *Petroleum*, Vol. 2, pp. 98-107, 2016.
- [29]. Abbas A. H., Sulaiman W. R. W., Jaffar M. Z., Olayink A. A., Shafiei Ebrahimi S. and Elrufai A., "Numerical study for continuous surfactant flooding considering adsorption in heterogeneous reservoir," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2018.
- [30]. Kumar S., Saxena N. and Mandal A., "Synthesis and evaluation of physicochemical properties of anionic polymeric surfactant derived from *Jatropha* oil for application in enhanced oil recovery," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 43, pp. 106-116, 2016.
- [31]. Yuan C. D., Pu W. F., Wang X. C., Sun L., Zhang Y. C. and Cheng S., "Effects of interfacial tension, emulsification, and surfactant concentration on oil recovery in surfactant flooding process for high temperature and high salinity reservoirs," *Energy Fuels*, Vol. 29, pp. 6165-6175, 2016.