

بررسی آزمایشگاهی تأثیر مواد فعال سطحی بر روی تغییر ترشوندگی سنگ‌های کربناته

محسن وفايي سفتي*^۱، محسن جمشیدی شفق^۱، خسرو جراحیان^۲، سید سعید قرشی^۲ و علی اصغر داودی^۲

۱- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- پردیس پژوهش توسعه صنایع پایین دستی نفت، پژوهشکده توسعه فن‌آوری‌های شیمیایی، پلیمری و پتروشیمی،

پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۲۹

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۱/۱

چکیده

رخنمون سنگ‌های کربناته در حالت کلی آب‌دوست می‌باشند. اما در بسیاری از مواقع پایداری فیلم آبی بین سنگ و فاز نفتی که بستگی زیادی به بار سطحی فصل مشترک سنگ - آب و آب - نفت دارد، دچار پارگی و ناپایداری می‌شود، به طوری که شرایط ترشوندگی مخازن کربناته را از حالت آب‌دوست در محدوده نفت‌دوست یا ترشوندگی حد واسط قرار می‌دهد. دلیل اصلی این پدیده جذب سطحی اجزای نفت خام بر روی سطح سنگ که عمدتاً اسیدهای چرب داخل فاز نفتی هستند، می‌باشد. در چنین شرایطی به دلیل منفی شدن فشار موئینگی، آشام خود به‌خودی آب به داخل ماتریکس سنگ کربناته انجام نگرفته و در نتیجه مقدار برداشت نفت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. استفاده از سورفکتانت‌ها به عنوان مواد فعال سطحی یکی از روش‌های نوین ازدیاد برداشت نفت از طریق تغییر ترشوندگی سنگ مخزن کربناته از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست می‌باشد. این مواد با توانایی قرارگیری در فصل مشترک آب - نفت و یا نفت - سنگ از طریق مکانیسم‌های مختلف کاهش کشش میان سطحی و تغییر ترشوندگی به جابه‌جایی نفت به تله افتاده و متعاقباً ازدیاد برداشت نفت کمک می‌کند. در پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های آنالیز دستگاهی نظیر اندازه‌گیری پتانسیل زتا، گرماسنجی وزنی و آزمایشات تزریق محلول سورفکتانت به محیط متخلخل توسط دستگاه سیلاب‌زنی مغزه، مکانیسم تغییر ترشوندگی حاکم بر انواع مختلف سورفکتانت‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد که از این میان، سورفکتانت کاتیونی به دلیل برقراری جاذبه الکترواستاتیک قوی‌تر با اجزای جذب شده نفت خام در غلظت بالاتر از غلظت بحرانی میسل دارای بازدهی بیشتری در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن و در نتیجه بازبافت بیشتر نفت می‌باشد. حال آنکه سورفکتانت‌های آنیونی و غیر یونی در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

کلمات کلیدی: مخازن کربناته، تغییر ترشوندگی، مواد فعال سطحی، پتانسیل زتا، گرماسنجی وزنی، سیلاب‌زنی مغزه

مقدمه

اغلب این مخازن دارای شکاف‌هایی با هدایت هیدرولیکی^۱ بالا و ماتریکس‌هایی با تراوایی پایین می‌باشند. با توجه به این مسأله، افزایش بازیافت نفت از مخازن کربناته از اهمیت زیادی برخوردار است [۱].

بیشترین نفت ذخیره شده در دنیا در سنگ‌های کربناته می‌باشد، نزدیک به ۵۰٪ از مخازن شناخته شده دنیا مخازن کربناته با میانگین بازیابی نفت کمتر از ۳۰٪ می‌باشد که

پایداری فیلم آبی بین سنگ و نفت و در نتیجه آب دوستی سطح به وجود می‌آید [۱۶]. ژانگ و همکاران نیز از یک سورفکتانت آنیونی به همراه یک ماده قلیایی جهت تغییر ترشوندگی سنگ کربناته استفاده کردند [۱۷].

در چند سال اخیر به دلیل صرفه اقتصادی بسیار بالای ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، تحقیقات غیرمتمرکز زیادی بر روی مقوله ازدیاد برداشت از طریق تغییر ترشوندگی به کمک مواد فعال سطحی انجام گرفته است. پژوهش حاضر به بررسی و تحلیل مکانیسم این تغییر برای انواع سورفکتانت‌های کاتیونی، غیریونی و آنیونی در کنار هم و سپس مقایسه کارایی آنها با هم پرداخته است. همچنین مطالعه تاثیر غلظت این مواد فعال سطحی در محلول تزریقی و مهم‌تر از همه موارد، تحقیق در میزان بهره‌افزایی مخزن با به‌کارگیری انواع سورفکتانت‌ها با غلظت‌های متفاوت در یک فرآیند مدل‌سازی شده، در دستور کار قرار گرفته است.

مواد

مواد فعال سطحی

مواد فعال سطحی استفاده شده در آزمایشات انجام گرفته برای این پژوهش، سورفکتانت‌های آنیونی، غیریونی و کاتیونی بوده‌اند که همگی از شرکت آلمانی Merck خریداری شده‌اند. سورفکتانت آنیونی با نام تجاری نمک سدیم دودسیل سولفات و با نام اختصاری SDS، سورفکتانت کاتیونی با نام تجاری هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برماید و با نام اختصاری CTAB و سورفکتانت غیریونی با نام تجاری تریتون ایکس ۱۰۰ و با نام اختصاری TX-۱۰۰ شناخته می‌شوند. شماتیک این سه نوع سورفکتانت در شکل‌های ۱ تا ۳ آمده است.

فاز جامد

در این پژوهش از پودر کربنات کلسیم به‌عنوان فاز جامد استفاده شده است که این پودر نماینده سنگ مخزن کربناته می‌باشد. از آنجایی که بیشتر مخازن کربناته ایران از نوع دولومیتی می‌باشند، لازم است عناصر موجود در پودر مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور از آنالیز فلورسانس اشعه ایکس (XRF) بهره گرفته شد. نتایج این آنالیز در جدول ۱ آمده است.

مکانیسم برداشت نفت توسط آب در مورد مخازن کربناته شکاف‌دار بدین‌گونه است که آب وقتی در مجاورت سنگ قرار می‌گیرد، به درون حفرات و خلل و فرج سنگ مخزن آشام خودبه‌خودی شده و با هدایت نفت به بیرون حفرات، موجب تولید نفت می‌شود. در حالت کلی کارایی عملیات سیلاب‌زنی در این نوع مخازن توسط میزان آشام خودبه‌خودی به داخل ماتریکس تعیین می‌شود که بستگی به نیروهای موئینه یا به عبارت بهتر شرایط ترشوندگی محیط متخلخل دارد [۲]. عواملی نظیر pH، ترکیب نفت خام، ترکیب آب نمک موجود در مخزن، فشار و دمای مخزن در تعیین شرایط ترشوندگی نقش دارند [۳]. تماس سنگ مخزن کربناته برای مدت زمان بسیار طولانی با نفت، می‌تواند ترشوندگی آن را از حالت آب‌دوست به ترشوندگی حد واسط یا حتی نفت‌دوست که نفت توانایی چسبیدن به سطح سنگ کربناته را دارد، تغییر دهد. بدیهی است که در چنین شرایطی آشام خودبه‌خودی آب به درون ماتریکس سنگ انجام نگرفته و تولید نفت از مخزن دچار مشکل می‌شود [۴-۷]. اخیراً تحقیقات زیادی در زمینه افزودن مواد فعال سطحی به آب تزریقی در عملیات سیلاب‌زنی انجام شده است، به طوری که این مواد به دلیل فعالیت بالا در فصل مشترک آب و نفت توانایی جداسازی اجزای نفت خام چسبیده به سطح سنگ را دارا می‌باشند [۸-۱۱].

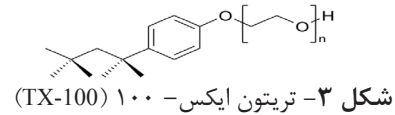
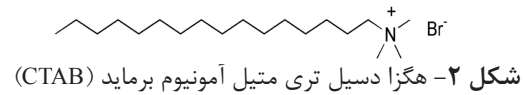
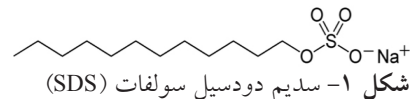
اوستاد و استندنس در سال ۲۰۰۰ سورفکتانت‌های کاتیونی را نسبت به انواع دیگر مواد فعال سطحی در تغییر ترشوندگی سنگ مخزن‌های کربناته نفت دوست به سمت حالت آب دوست موثرتر ارزیابی کردند. [۱۲] و [۱۳] کومار و موهانتی انحلال‌پذیری مایسلار ترکیبات آلی جذب شده توسط سورفکتانت‌های آنیونی را عامل اصلی تغییر ترشوندگی دانستند [۱۴]. تی‌ویو و همکاران در سال ۲۰۰۶ به بررسی اثر یون‌های دوظرفیتی Ca^{+2} ، Mg^{+2} و SO_4^{-2} و همچنین دما بر روی تغییر ترشوندگی پرداختند [۱۵]. هیراساکی و ژانگ در سال ۲۰۰۳ سطح کربناته را در تماس با الکترولیت‌های Na^- CO_3 و $NaHCO_3$ دارای بار منفی قرار داده و نتیجه گرفتند که طی این تماس، سایت‌های جذب موجود بر روی سطح کربناته برای جذب اسیدهای کربوکسیلیک کاهش یافته و

به مدت ۲۴ ساعت درون آن در دمای 40°C قرار می‌دهیم. سپس پودر خیس‌انده شده را در نفت خام مورد نظر (آسماری و فلهلیان) به مدت یک هفته در دمای 91°C قرار می‌دهیم تا حالت ترشوندگی آن تغییر نماید. لازم به ذکر است که دمای 90°C در اکثر منابع به‌عنوان دمای استاندارد ماندگاری^۳ نفت در مخازن کربناته در نظر گرفته شده است [۱۸ و ۱۶]. حال پس از اطمینان از نفت‌دوست شدن پودرهای کربناته آنها را از محیط نفت خارج نموده و برای خشک نمودن دوباره در آن تحت دمای 40°C قرار می‌دهیم. حال پودر نفت‌دوست شده را به مقدار مساوی در محلول سورفکتانت‌های کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت‌های متفاوت 0.05 ، 0.1 و 0.3 wt٪ می‌ریزیم و مدت ۷۲ ساعت پودرها را در محلول سورفکتانتی نگهداری می‌کنیم. سپس توسط کاغذ صافی پودر ماندگار شده در سورفکتانت را از محلول آبی سورفکتانت جداسازی کرده و خشک می‌نماییم. از آنجایی که تست پتانسیل زتا، نیاز به پراکنده نمودن^۴ در محیط آب مقطر دارد، پودرها را در آب مقطر ریخته و جهت یکنواختی پخش در آب از دستگاه فراصوتی بهره می‌گیریم. در این حالت پودرها با محلول 1 wt٪ در آب مقطر پخش شده و آماده انجام تست زتا می‌شود. باید با توجه به pH آب نمک مخزن که در محدوده ۷-۸ می‌باشد، pH محلول ساخته شده را توسط محلول‌های 0.1 مولار از اسید هیدروکلریک (HCl) یا سود سوزآور (NaOH) در این محدوده تنظیم نمود.

آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری پتانسیل زتا توسط دستگاه Nano Zeta Meter ساخت شرکت Malvern انگلستان و متعلق به پژوهشگاه صنعت نفت انجام گرفت.

آنالیز گرماسنجی وزنی

آنالیز گرماسنجی وزنی یک روش مناسب برای تعیین ترکیبات جذب شده بر روی سطوح جامد است. در این روش تغییرات جرم نمونه جامد با افزایش دما اندازه‌گیری می‌شود.



جدول ۱- آنالیز XRF پودر کربنات کلسیم

Al_2O_3	٪ ۰/۲۹۷
CaO	٪ ۳۰/۶۵۱
LiO	٪ ۴۶/۹
MgO	٪ ۲۱/۶۸۹
SiO_2	٪ ۰/۴۶۳

همچنین در این تحقیق، از دو نوع نفت خام لایه آسماری میدان اهواز و لایه فلهلیان میدان دارخوین استفاده شده است.

آماده‌سازی نمونه‌ها و روش کار آزمایشگاهی

پتانسیل زتا

پتانسیل زتا، پتانسیل الکتریکی است که در صفحه برش^۱ ذراتی که اثر زیادی بر روی خواص سطحی می‌گذارند، به وجود می‌آید. ذرات کلوئیدی (ذرات پخش شده در محلول) به دلیل مشخصات یونی و ویژگی‌های دوقطبی‌شان دارای بار الکتریکی هستند. بار خالص در صفحه ذرات، یون‌های مجاور در ناحیه فصل مشترک را توزیع می‌نماید که منجر به افزایش غلظت یون‌های با بار مخالف^۲ در نزدیکی سطح می‌شود.

پتانسیل زتای ذرات به وسیله معادله هنری به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$u_e = \frac{2\varepsilon \zeta}{3\eta} f(ka) \quad (1)$$

در این رابطه u_e تحرک الکتروفورسیس، ε عبورده، ζ پتانسیل زتا، η لزجت سیال و $f(ka)$ تابع هنری می‌باشد. براساس معادلات هوکل و اسمولوچفسکی $f(ka)$ یا تابع هنری به صورت تقریبی به ترتیب ۱ و $1/5$ تخمین زده شده است [۱۸].

روش کار

ابتدا ۲۰ gr کربنات کلسیم را ۲۴ ساعت با آب مقطر در تماس قرار داده، سپس آن رابه منظور خشک نمودن لایه آب سطحی،

1. Shear Plane
2. Counter Ions
3. Aging
4. Dispersion

مختلف فعال سطحی به درون بستر شنی فشرده به دست آمده و سپس مقایسه می‌گردند. لازم به ذکر است که این دستگاه ساخت شرکت داخلی گذار مبتکر جنوب و متعلق به دانشگاه تربیت مدرس می‌باشد.

دستگاه سیلاب‌زنی مغزه از دو قسمت تشکیل شده که عبارتند از: بخش تزریق کننده و محفظه‌ای که مغزه داخل آن قرار دارد. قسمت تزریق کننده شامل دو پمپ رفت و برگشت، مخزن روغن و سیلندر توخالی است که سیال تزریق شونده در آن ریخته می‌شود. بخش دوم مغزه و اتاقک اطراف آن است که با آب بندی انجام شده دمای محفظه و در نتیجه مغزه در 90°C ثابت می‌ماند تا نمونه مغزه به شرایط دمایی سنگ مخزن در چاه نفت نزدیک باشد. در خروجی دستگاه یک فشار معکوس^۲ تعبیه شده تا فقط در فشارهای بالای ۲۰ bar سیال تزریق شونده اجازه خروج از مغزه را داشته باشد. دستگاه سیلاب‌زنی مغزه در شکل ۴ نشان داده شده است.

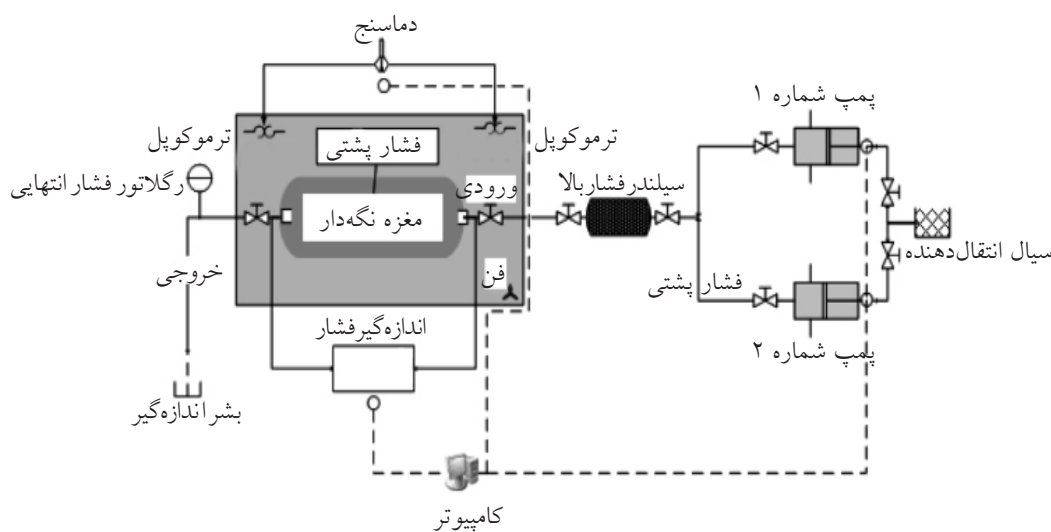
به دلیل در اختیار نداشتن نمونه واقعی مغزه درون چاهی در این آزمایش تصمیم بر این شد که از بستر شنی فشرده به عنوان نماینده‌ای برای مخزن استفاده گردد. این بستر شنی از فشرده نمودن نمونه پودر کربنات کلسیم با اندازه ذرات متوسط $5-9\ \mu\text{m}$ و سطح ویژه $3/85\ \text{m}^2/\text{gr}$ تهیه گردید.

بدین صورت که ابتدا ۴ mg از پودر مورد نظر را در یک ظرف آلومینیومی تحت جریان گاز آرگون قرار می‌دهیم و با نرخ گرمایی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا دمای 600°C که همان دمای تجزیه حرارتی پودر کربنات است، حرارت می‌دهیم. هرزروی جرمی نمونه‌ها در این حالت در دماهای مختلف ثبت می‌گردد [۱۸ و ۱۶].

آزمایش‌های مربوط به آنالیز گرماسنجی وزنی برای ارزیابی جذب سطحی آن دسته از اجزاء و ترکیباتی که استعداد جذب روی سطح را دارند، توسط دستگاه Thermo Gravimetric Analysis مدل PL-SRA متعلق به دانشگاه تربیت مدرس اندازه‌گیری شده است.

دستگاه سیلاب‌زنی مغزه

برای بررسی رفتار و عکس‌العمل سنگ مخزن در مقابل تزریق سیالات مختلف به درون چاه نفت به منظور ازدیاد برداشت، استفاده از دستگاه سیلاب‌زنی مغزه بهترین گزینه است. در این دستگاه سیلاب‌زنی سیالات مختلف درون بستر شنی فشرده^۱ به‌عنوان نماینده سنگ مخزن در ابعاد آزمایشگاهی انجام می‌گیرد، به‌گونه‌ای که نتایج به‌دست آمده از این آزمایش را می‌توان به شرایط واقعی مخزن نفتی تعمیم داد و بهترین سیال را از لحاظ غلظت، روش تزریق و ... انتخاب نمود. در واقع در این پژوهش به کمک دستگاه سیلاب‌زنی مغزه، میزان بازیافت نفت در ازای تزریق مواد



شکل ۴- دستگاه سیلاب‌زنی

1. Sand Packed Bed
2. Back Pressure

$$q = \frac{kA\Delta p}{\mu L}$$

(۲)

علائم به کار رفته در این رابطه عبارتند از:

k : نفوذپذیری

A : سطح مقطع نگهدارنده بستر شنی (cm^2)

q : دبی تزریق سیال (cc/min)

μ : لزجت سیال تزریقی (cP)

L : طول نگهدارنده شنی (cm)

Δp : اختلاف فشار، (atm)

در جداول ۲ و ۳ میزان تراوایی محاسبه شده برای هر کدام از تست‌ها ارائه شده است.

نتایج و بحث

اندازه‌گیری پتانسیل زتا

نتایج حاصل از انجام تست پتانسیل زتا در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده است. طبق نتایج حاصل از شکل‌های مربوطه، سورفکتانت کاتیونی نسبت به سایر سورفکتانت‌ها در تغییر بار سطحی پودر کلسیت موثرتر واقع شده است. علت این امر را می‌توان بدین صورت توجیه نمود که سورفکتانت کاتیونی به دلیل برقراری جاذبه الکترواستاتیکی بین سر قطبی ماده فعال سطحی با اسید چرب از قبل جذب شده، بار سطحی را از مقدار منفی به مقدار مثبت تغییر می‌دهد. با افزایش غلظت سورفکتانت به ۱٪ وزنی مقدار سورفکتانت بیشتری به سیستم وارد شده و باز هم پتانسیل زتا افزایش می‌یابد.

روش آماده‌سازی بستر شنی فشرده در تمامی آزمایش‌ها در این تحقیق به صورت زیر است:

ابتدا نگهدارنده مغزه را به صورت عمودی نگه‌داشته و ذرات پودر کربنات کلسیم را اندک اندک درون آن می‌ریزیم. حین افزودن پودر کربنات کلسیم، ضربات متوالی به اطراف نگهدارنده می‌زنیم که ذرات به بهترین حالت ممکن در کنار یکدیگر بنشینند و کمترین فضای خالی بین آنها بر جای ماند. همچنین ضربات عمودی نیز برای بهتر فشرده شدن پودر کربنات کلسیم به کار می‌رود. پس از اتمام عملیات فشرده‌سازی با استفاده از پمپ خلأ، هوای محبوس شده در بین دانه‌های ریز را از درون نگهدارنده خارج کرده و نمونه آب مخزن را از پایین به درون بستر هدایت می‌نماییم. برای اشباع بهتر بستر شنی از آب، نگهدارنده به حالت عمود قرار می‌گیرد و هنگامی که دبی آب خروجی در بالای نگهدارنده با دبی تزریقی همان آب از پایین برابر شد، از اشباع کامل نگهدارنده اطمینان پیدا می‌کنیم.

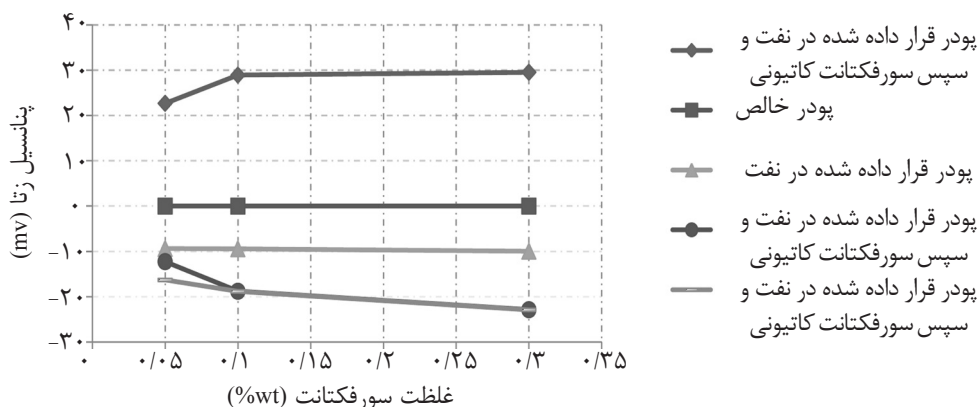
نگهدارنده بستر شنی را درون آن به صورت افقی قرار داده و تراوایی مطلق محیط متخلخل ساخته شده را اندازه‌گیری می‌نماییم. برای اندازه‌گیری تراوایی مطلق از دبی‌های ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ cc/min استفاده شد و تزریق با هر کدام از این دبی‌ها تا ثابت ماندن اختلاف فشار دو طرف نگهدارنده مغزه، ادامه یافت. سپس با کاربرد رابطه داری و استفاده از شیب نموداری که محور عمودی آن دبی تزریق (q) و محور افقی آن اختلاف فشار (Δp) است، میزان نفوذپذیری بستر محاسبه گردید.

جدول ۲- مقدار پارامترهای متغیر در تست‌های مربوط به نفت خام آسماری

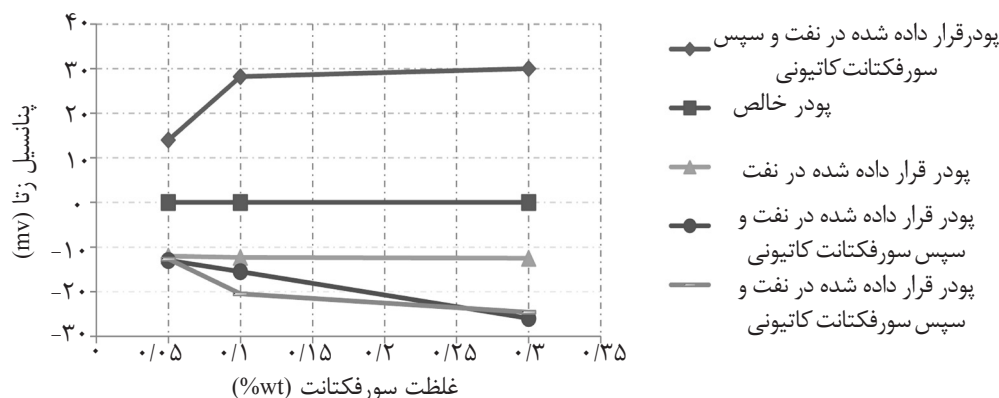
نوع سورفکتانت	غلظت سورفکتانت (برحسب % وزنی)	V_{pv} (cc)	(%)	k (md)	K_{ro} in S_{wc}	K_{rw} in S_{or}
سورفکتانت کاتیونی	۰/۰۵	۳۰۵	۳۲/۱	۱۴۳۹	۰/۷۴	۰/۶۹
	۰/۱	۳۰۸	۳۲/۴	۱۴۵۳	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۳	۲۹۷	۳۱/۳	۱۴۰۱	۰/۷۳	۰/۶۹
سورفکتانت غیر یونی	۰/۰۵	۳۱۱	۳۲/۷	۱۴۶۶	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۱	۳۰۰	۳۱/۶	۱۴۱۵	۰/۷۴	۰/۷
	۰/۳	۳۰۶	۳۲/۲	۱۴۴۳	۰/۷۴	۰/۶۹
سورفکتانت آنیونی	۰/۰۵	۳۰۰	۳۱/۶	۱۴۱۶	۰/۷۴	۰/۶۹
	۰/۱	۲۹۲	۳۰/۷	۱۳۷۷	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۳	۳۰۳	۳۱/۹	۱۴۲۹	۰/۷۴	۰/۶۹

جدول ۳- مقدار پارامترهای متغیر در تست‌های مربوط به نفت خام فهلیان

نوع سورفکتانت	غلظت سورفکتانت (برحسب % وزنی)	V_{pv} (cc)	(%)	k (md)	K_{ro} in S_{wc}	K_{rw} in S_{or}
سورفکتانت کاتیونی	۰/۰۵	۳۰۹	۳۲/۵	۱۴۵۸	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۱	۳۱۲	۳۲/۸	۱۴۶۸	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۳	۳۰۶	۳۱/۲	۱۳۹۷	۰/۷۵	۰/۷
سورفکتانت غیر یونی	۰/۰۵	۳۰۵	۳۲/۱	۱۴۴۰	۰/۷۴	۰/۶۹
	۰/۱	۳۰۸	۳۲/۴	۱۴۵۴	۰/۷۴	۰/۷
	۰/۳	۲۹۸	۳۱/۴	۱۴۰۷	۰/۷۴	۰/۶۹
سورفکتانت آنیونی	۰/۰۵	۲۹۶	۳۱/۲	۱۴۱۶	۰/۷۴	۰/۶۹
	۰/۱	۳۰۰	۳۱/۶	۱۳۹۶	۰/۷۵	۰/۷
	۰/۳	۳۱۰	۳۲/۶	۱۴۶۳	۰/۷۵	۰/۶۹



شکل ۵- تغییرات پتانسیل زتا برای پودر کربنات کلسیم مانده در نفت خام آسماری و سپس محلول‌های سورفکتانت کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت‌های ۰/۰۵ wt %، ۰/۱ wt % و ۰/۳ wt %



شکل ۶- تغییرات پتانسیل زتا برای پودر کربنات کلسیم مانده در نفت خام فهلیان و سپس محلول‌های سورفکتانت کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت‌های ۰/۰۵ wt %، ۰/۱ wt % و ۰/۳ wt %

ماده فعال سطحی کاتیونی تشکیل هسته‌های میسلی داده و اسیدهای چرب در آن حل می‌شوند. در این حالت سورفکتانت کاتیونی که از حالت مونومر به حالت میسل درآمده، دیگر جذب سطح نمی‌شود.

اما کم‌کم با افزایش بیشتر غلظت سورفکتانت کاتیونی اتفاق خاصی می‌افتد بدین صورت که بار منفی اسیدهای چرب که با افزایش سورفکتانت کاتیونی بیشتر از سطح جدا می‌شود، باعث کاهش غلظت CMC سورفکتانت کاتیونی می‌شود.

پتانسیل زتا برای نفت خام‌های آسماری و فهلیان، به خصوص در مورد پتانسیل زتای پودرهایی که فقط در نفت مانده‌اند، نشان می‌دهد به دلیل جذب بیشتر آنیون کربوکسیلیک با بار منفی روی سطح کلسیتی در نفت خام فهلیان، مقادیر پتانسیل زتا منفی‌تر است. بنابراین می‌توان گفت که اسیدیته نفت خام فهلیان از اسیدیته نفت خام آسماری بیشتر است. در نتیجه توانایی نفت خام فهلیان در تغییر ترشوندگی به حالت نفت دوست نسبت به نفت خام آسماری بیشتر است.

باید توجه نمود که گاهی افزایش غلظت تأثیر چندانی در تغییر بیشتر ترشوندگی به سمت آب‌دوستی ندارد، لذا بسیار حیاتی است که غلظت سورفکتانت تزریقی به مخازن بالاتر از غلظت بحرانی میسل^۱ (CMC) همان سورفکتانت باشد. چون کربوکسیلات‌های دفع شده باید در میسل‌ها انباشته شوند تا یک فرآیند تغییر ترشوندگی پویا^۲ برقرار باشد، چه بسا فرآیند دفع سطحی کربوکسیلات از سنگ در غلظت‌های سورفکتانت پایین‌تر از غلظت بحرانی میسل تقریباً متوقف شود. در تحلیل نتایج زتا ممکن است افزایش غلظت از ۰/۱ به ۰/۳ درصد وزنی تأثیر چندانی در میزان تغییر ترشوندگی نداشته باشد، اما این افزایش باعث تشکیل میسل و در نتیجه فراهم شدن بستری برای کربوکسیلات‌های دفعی از سطح می‌شود و این به معنای ادامه روند دفع سطحی توسط مواد فعال سطحی است.

آنالیز گرماسنجی وزنی

نتایج این آنالیز در شکل‌های ۷ تا ۹ آمده است. با توجه به منحنی‌های به دست آمده از آنالیز گرماسنجی وزنی، با روند صعودی دما می‌توان سه مرحله هرزروی مفروض شد. در مرحله اول از دمای ۲۰ تا ۲۲۰ °C، آب موجود در شبکه کریستالی یا اسیدهایی که جذب فیزیکی شده‌اند، از روی سطح حذف می‌شوند. مرحله بعد که تمرکز ما بر روی آن است، یعنی دمای ۲۲۰ تا ۴۰۰ °C، مربوط به حذف گونه‌هایی است که جذب شیمیایی شده یعنی همان اسیدهایی چربی که از نفت خام بر روی سطح پودر کربناته جذب شده و پس از تماس با سورفکتانت‌ها هنوز بر روی سطح باقی مانده‌اند.

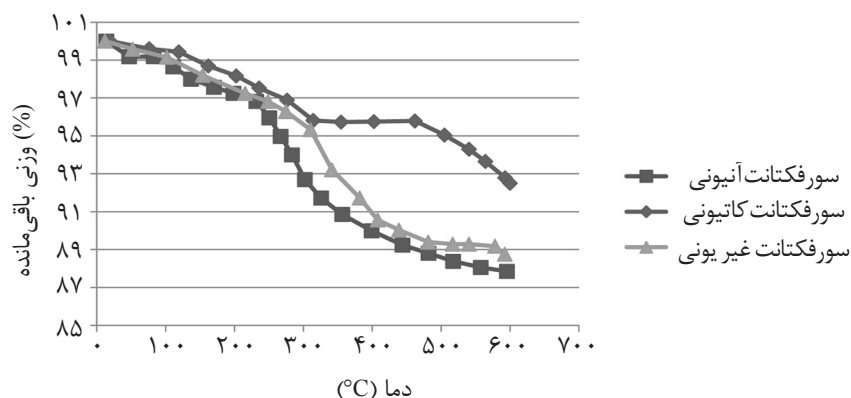
لذا همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود، در غلظت‌های بالاتر سورفکتانت کاتیونی، دیگر روند رو به رشد قابل توجهی در تغییر بار سطحی دیده نمی‌شود (کاهش شیب قسمت دوم نسبت به شیب قسمت اول).

در ادامه تحلیل نتایج زتا، نوبت به سورفکتانت غیریونی می‌رسد که از طریق گروه اتوکسی خود که دارای جفت الکترون ناپیوندی است، به سطح کلسیت نزدیک شده و به جای آن اسید چرب جذب شده، از سطح خارج می‌شود. با افزایش غلظت سورفکتانت غیریونی اسیدهایی چرب آزاد شده بیشتری در محلول قرار می‌گیرند. با ادامه روند افزایش غلظت سورفکتانت غیریونی و به دنبال آن آزادسازی اسیدهایی چرب، این اسیدها به دلیل برقراری جاذبه هیدروفوبیک با دم غیرقطبی سورفکتانت جذب شده، دوباره به سطح نزدیک می‌شوند. ولی این بار برعکس حالت قبل و از سمت گروه هیدروکربنی یا غیر قطبی به سطح متصل شده و سر آنیونی آنها رو به بیرون و داخل محلول قرار می‌گیرد و چون گروه قطبی رو به بیرون است، سطح آب دوست می‌شود. همان‌طور که در شکل‌های ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد با افزایش غلظت سورفکتانت غیریونی، بار سطحی منفی‌تر می‌شود.

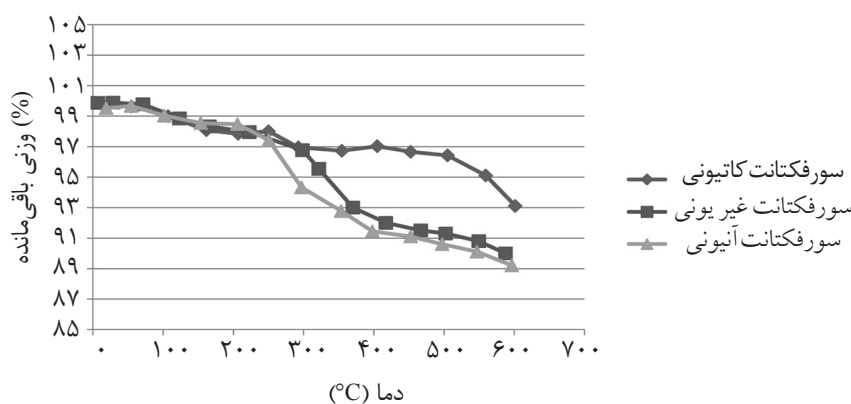
حال نوبت به سورفکتانت آنیونی می‌رسد، این ماده فعال سطحی از طریق برقراری جاذبه هیدروفوبیک ضعیف با دم غیر قطبی اسید جذب شده، به تغییر ترشوندگی سطح کمک می‌کند. در این شرایط سر قطبی سورفکتانت آنیونی رو به سمت بیرون سطح کلسیت قرار می‌گیرد. با افزایش غلظت سورفکتانت، بار منفی بیشتری به سیستم اعمال می‌شود. البته در این حالت به دلیل وجود دافعه فضایی بین گروه‌های آنیونی، ماده فعال سطحی در جابه‌جایی اسید چرب جذب شده چندان موثر عمل نمی‌کند. این کاهش تأثیر در جابه‌جایی اسید چرب را در اشکال‌های ۵ و ۶ می‌توان دید، با افزایش بیشتر غلظت سورفکتانت آنیونی شیب قسمت دوم کمتر از قسمت اول است، که این مسأله به دلیل ممانعت فضایی به وجود آمده در غلظت‌های بالاتر است.

فارغ از ارزیابی تأثیر مواد فعال سطحی به کمک نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا، مقایسه دو شکل با هم و مقادیر

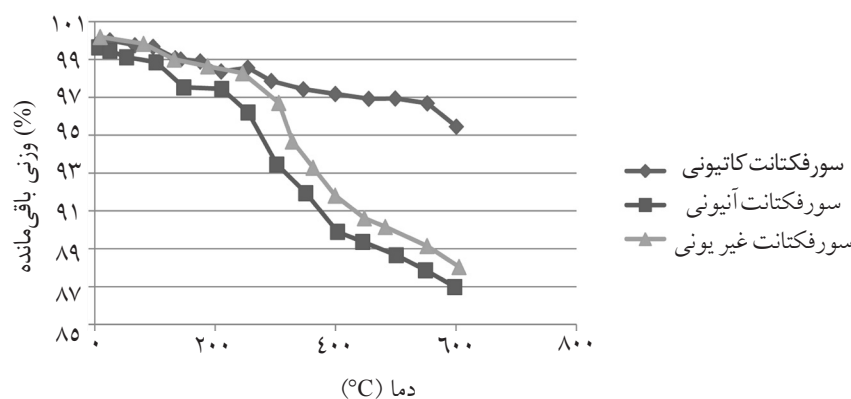
1. Critical Micelle Concentration
2. Dynamic



شکل ۷- آنالیز گرماسنجی وزنی برای پودر کربنات کلسیم مانده در نفت خام آسماری و سپس محلول‌های سورفکتانت کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت ۰/۰۵ wt %



شکل ۸- آنالیز گرماسنجی وزنی برای پودر کربنات کلسیم مانده در نفت خام آسماری و سپس محلول‌های سورفکتانت کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت ۰/۱ wt %



شکل ۹- آنالیز گرماسنجی وزنی برای پودر کربنات کلسیم مانده در نفت خام آسماری و سپس محلول‌های سورفکتانت کاتیونی، غیر یونی و آنیونی با غلظت ۰/۳ wt %

کلسیم تجزیه حرارتی می‌شود. در هر سه غلظت، منحنی مربوط به سورفکتانت کاتیونی دارای کمترین اتلاف وزنی است. به عبارت دیگر کمترین مقدار اسید چرب باقی مانده روی سطح مربوط به پودر جدا شده از محلول سورفکتانت کاتیونی است و این یعنی ماده فعال سطحی کاتیونی دارای

پس هر چه اتلاف وزنی در این مرحله بیشتر باشد، به این معناست که اسیدهای چرب بیشتری بر روی سطح باقی مانده و این یعنی سورفکتانت مربوطه، کارایی کمتری در دفع سطحی کربوکسیلات‌ها داشته است. در مرحله آخر یعنی از دمای ۴۰۰ تا ۶۰۰ °C خود پودر کربنات

دید میکروسکوپی می‌شوند. اکنون با سیلاب‌زنی این مواد به بستر شنی فشرده، کارآیی واقعی آنها و صحت نتایج قبلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در تهیه بستر شنی فشرده برای عملیات سیلاب‌زنی، توجه به دو پارامتر تخلخل و تراوایی که وابستگی شدیدی به اندازه ذرات شن و میزان فشرده‌گی آنها دارد، بسیار اساسی است. در تمامی آزمون‌های سیلاب‌زنی باید این دو فاکتور برای تمامی بسترهای شنی فشرده تهیه شده تا حد ممکن نزدیک به هم و دارای کمترین اختلاف باشند تا تأثیر منفی در نتایج نداشته باشند.

برای عملیات سیلاب‌زنی، نفت خام را به درون بستر شنی فشرده با دبی 0.2 cc/min تزریق نموده و پس از یک هفته ماندگاری در دمای 90°C و اطمینان از رسیدن به شرایط مشابه مخزنی حدود یک حجم فضای خالی^۱، آب نمک مخازن مربوطه را با دبی 0.2 cc/min تزریق می‌نماییم. در این مرحله، هدف از تزریق آب نمک مخزنی، ازدیاد برداشت نفت در مرحله ثانویه^۲ می‌باشد. پس از اتمام تزریق حجم ذکر شده میدان، نفت خروجی از درون نگهدارنده بستر شنی را اندازه می‌گیریم. درصد نفت خروجی در این مرحله به عنوان ضریب بازیافت به ازای تزریق یک حجم فضای خالی آب سازندی، مثبت خواهد شد. سپس به اندازه یک حجم فضای خالی دیگر آب نمک مخزنی را با شرایط مشابه تزریق می‌کنیم. این بار هم درصدی از نفت خام (کمتر از مرحله قبل) حاصل می‌شود. مجموع درصد نفت تولیدی در این دو مرحله را به عنوان ضریب بازیافت به ازای تزریق دو حجم فضای خالی آب سازند در نظر می‌گیریم. به تدریج پس از سه مرحله تزریق آب سازند، نفت خروجی مقدار ناچیزی خواهد بود. این نشان‌دهنده اتمام مرحله ثانویه برداشت نفت می‌باشد. حال به سراغ ازدیاد برداشت ثالثیه^۳ نفت می‌رویم. مرحله سوم برداشت همراه با تزریق سورفکتانت‌های گوناگون با غلظت‌های متفاوت است.

بیشترین اثر در حذف اسید چرب از سطح می‌باشد. همان‌طور که گفته شد سورفکتانت غیر یونی از طریق گروه اتوکسی خود که دارای جفت الکترون ناپیوندی است، به سطح کلسیت نزدیک شده و به جای آن اسید چرب از نفت خام جذب شده از سطح خارج می‌شود. منحنی مربوط به سورفکتانت غیر یونی اتلاف وزنی بیشتری نسبت به نوع کاتیونی نشان می‌دهد. بدین معنا که اسید چرب بیشتری پس از تماس با سورفکتانت روی سطح مانده است. بنابراین مطابق با نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا، سورفکتانت غیر یونی تأثیر کمتری از نوع کاتیونی و بیشتر از نوع آنیونی دارد. ماده فعال سطحی آنیونی یعنی پایین‌ترین منحنی که بیشترین اتلاف وزنی را نشان می‌دهد، دارای کمترین اثر در حذف اسید چرب می‌باشد. دلیل این تفاوت فاحش در اثرگذاری کاتیونی و آنیونی، برقراری جاذبه الکترواستاتیک ماده فعال سطحی کاتیونی با اسید چرب دارای بار منفی از قبل جذب شده است، حال آنکه ماده فعال سطحی آنیونی به دلیل دافعه فضایی با آنیون اسید چرب جذب شده، تنها از طریق اثر متقابل هیدروفوبیکی که بین قسمت آب‌گریز ماده فعال سطحی و قسمت هیدروکربنی آنیون اسید چرب به وجود می‌آید، به سطح نزدیک می‌شود. از آنجا که اندرکنش هیدروفوبیک به مراتب ضعیف‌تر از جاذبه الکترواستاتیک است، سورفکتانت آنیونی نسبت به نوع کاتیونی اثر کمتری روی تغییر ترشوندگی دارد. همچنین مقایسه سه شکل که هر کدام مربوط به یک غلظت است، تأیید می‌کند که غلظت بالاتر ماده فعال سطحی خصوصاً با گذر از غلظت بحرانی میسل، عموماً سبب آزادسازی اسید چرب بیشتر از سطح کربناته خواهد شد.

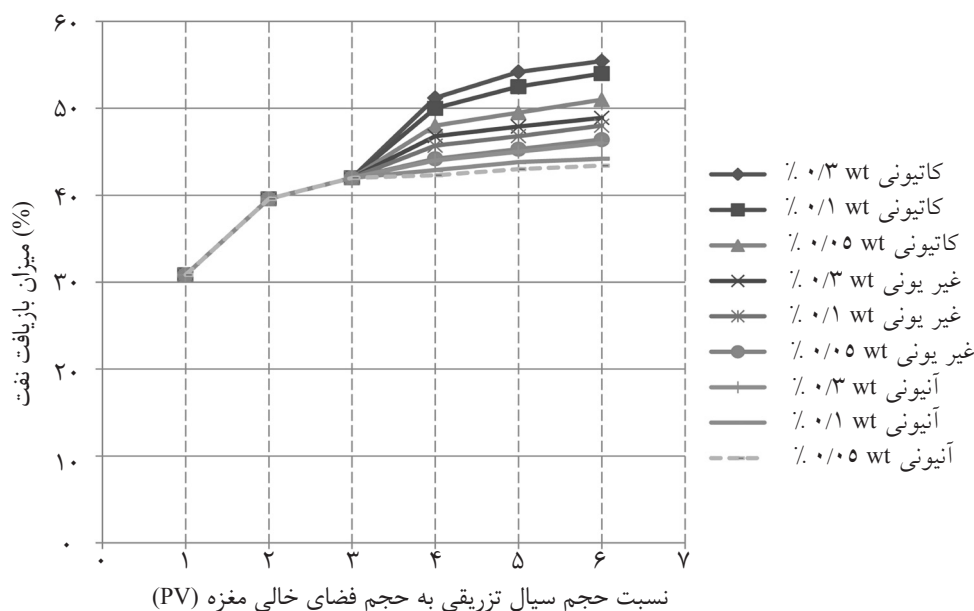
ارزیابی مواد فعال سطحی در محیط متخلخل

در آخرین و مهم‌ترین قسمت آزمایش‌ها نتایج اندازه‌گیری پتانسیل زتا و گرماسنجی وزنی به صورت عملی ارزیابی می‌شود. برای این منظور با سیلاب‌زنی در بستر شنی فشرده توسط دستگاه سیلاب‌زنی در مغزه، میزان کارآیی مواد فعال سطحی در ازدیاد برداشت مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مجموع دو آزمایش قبلی یعنی اندازه‌گیری پتانسیل زتا و آنالیز گرماسنجی وزنی، مشخص شد که سورفکتانت‌ها، به‌میزان متفاوتی، باعث تغییر ترشوندگی از

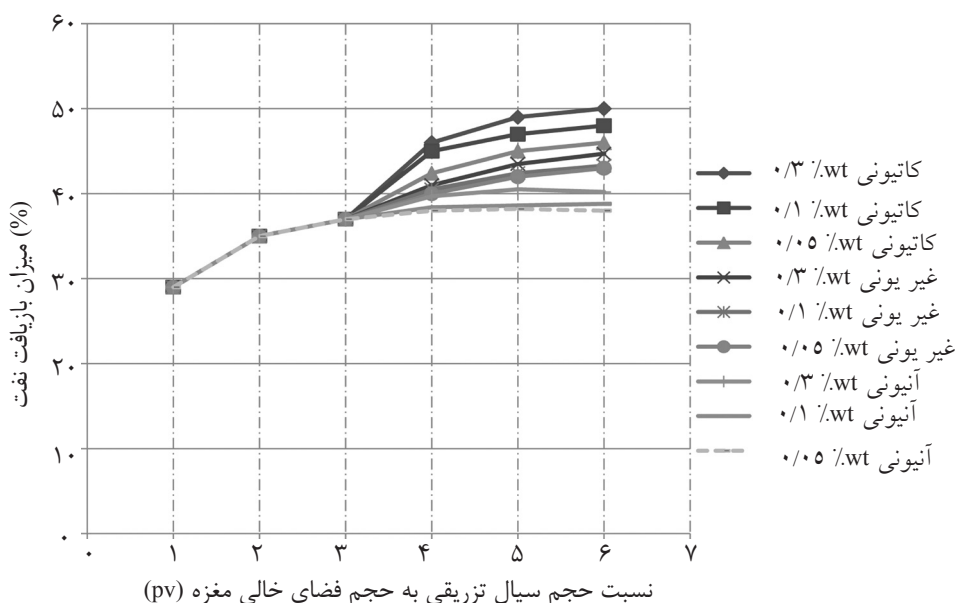
1. Pore Volume
2. Secondary Recovery
3. Tertiary Recovery

درصد نفت خروجی در هر مرحله انجام دادیم. غلظت محلول‌های سورفکتانتی تزریقی برای هر کدام از بسترهای شنی فشرده ماندگار شده با نفت‌های آسماری و فهلیان برابر ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۳ wt٪. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جداول ۲ تا ۵ آمده است.

بدین صورت که در هر مرحله تزریق سورفکتانت، زمان یکسانی (۲۴ ساعت) جهت برهم کنش نفت/سنگ/سورفکتانت به سیستم اعمال می‌شود. در این تحقیق فرآیند ازدیاد برداشت ثالثیه را به صورت تزریق ۳ حجم فضای خالی سورفکتانت و اندازه‌گیری میزان



شکل ۱۰- نمودار مقدار بازیابی نفت برای تزریق سیالات مختلف در مورد نفت خام آسماری در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (هر یک PV معادل یک حجم خالی از مغزه در حال آزمایش)



شکل ۱۱- نمودار مقدار بازیابی نفت برای تزریق سیالات مختلف در مورد نفت خام فهلیان در دستگاه سیلاب‌زنی مغزه (هر یک PV معادل یک حجم خالی از مغزه در حال آزمایش)

جدول ۴- مقادیر کلی ازدیاد برداشت نفت خام آسماری به کمک سیلابزنی مواد فعال سطحی در دستگاه سیلابزنی مغزه

نوع ماده فعال سطحی	غلظت سورفکتانت (برحسب درصد وزنی)	کل حجم نفت تولید شده به وسیله تزریق سورفکتانت (cc)	درصد ازدیاد برداشت نفت نسبت به کل نفت اولیه	درصد ازدیاد برداشت نسبت به نفت باقی مانده پس از تزریق آب
سورفکتانت کاتیونی	۰/۰۵	۲۸	۹/۳	۱۶/۴
	۰/۱	۳۶	۱۲	۲۱/۱
	۰/۳	۴۰	۱۳/۳	۲۳/۵
سورفکتانت غیریونی	۰/۰۵	۱۲	۴	۷
	۰/۱	۱۷	۵/۶	۱۰
	۰/۳	۲۰	۶/۶	۱۱/۷
سورفکتانت آنیونی	۰/۰۵	۴	۱/۳	۲/۳
	۰/۱	۶	۲	۳/۵
	۰/۳	۱۱	۳/۶	۶/۴

جدول ۵- مقادیر کلی ازدیاد برداشت نفت خام فلهیان به کمک سیلابزنی مواد فعال سطحی در دستگاه سیلابزنی مغزه

نوع ماده فعال سطحی	غلظت سورفکتانت (برحسب درصد وزنی)	کل حجم نفت تولید شده به وسیله تزریق سورفکتانت (cc)	درصد ازدیاد برداشت نفت نسبت به کل نفت اولیه	درصد ازدیاد برداشت نسبت به نفت باقی مانده پس از تزریق آب
سورفکتانت کاتیونی	۰/۰۵	۱۷	۵/۶	۱۰
	۰/۱	۳۱	۱۰/۳	۱۸/۲
	۰/۳	۳۸	۱۲/۶	۲۲/۳
سورفکتانت غیریونی	۰/۰۵	۱۴	۴/۶	۸/۲
	۰/۱	۱۷	۵/۶	۱۰
	۰/۳	۲۲	۷/۳	۱۲/۹
سورفکتانت آنیونی	۰/۰۵	۳	۱	۱/۷
	۰/۱	۵	۱/۶	۲/۹
	۰/۳	۹	۳	۵/۲

$$L = 31 \text{ cm}$$

$$\mu_w (90^\circ\text{C}) = 0.317 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$\mu_o (90^\circ\text{C}) = 1.75 \text{ mPa}\cdot\text{s}$$

$$\mu_o (90^\circ\text{C}) = 1.3 \text{ mPa}\cdot\text{s} \text{ (فلهیان)}$$

در جداول ۴ و ۵ نیز به ترتیب مقادیر کلی ازدیاد برداشت نفت های خام آسماری و فلهیان به کمک تزریق سورفکتانت های مختلف با غلظت های متفاوت ارائه شده است. در واقع در این جداول بر خلاف شکل های ۱۰ و ۱۱ فقط نتیجه نهایی یعنی مجموع حجم نفت تولید شده پس از سه مرحله تزریق مواد فعال سطحی آمده است.

در شکل های ۱۰ و ۱۱ پارامتر ضریب بازیافت^۱، یعنی حجم نفت تولیدی به حجم نفت اولیه به ازای تزریق حجم های گسسته^۲ از سیالات آب سازند و محلول سورفکتانتی به ترتیب برای نفت های خام های آسماری و فلهیان رسم شده است.

در جداول ۲ و ۳ به ترتیب مقادیر پارامترهای متغیر برای آزمایش های مربوط به نفت های خام های آسماری و فلهیان آمده است. لازم به ذکر است که پارامترهای دمای محفظه، فشار ورودی، حجم کل، سطح مقطع و طول نگهدارنده بستر سنی و ویسکوزیته آب و نفت در تمام تست ها مقدار ثابتی دارند که عبارتند از:

$$T = 89 \sim 91 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_i = 950 \text{ cc}$$

$$A = 30/6 \text{ cm}^2$$

1. Recovery Factor

2. Discrete

سطوح کربناته توسط آنالیزهای پتانسیل زتا و گرماسنجی وزنی بررسی گردید. همچنین میزان کارایی این مواد فعال سطحی در ازدیاد برداشت نفت از مخازن، توسط مدل‌سازی با دستگاه نگهدارنده بستر شنی فشرده انجام گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

- از آنجا که pH محیط مخازن کربناته در محدوده بازی قرار دارد، غلظت Ca^{+2} بیش از CO_3^{2-} است که باعث می‌شود فصل مشترک آب-سنگ دارای بار مثبت باشد. همچنین در این pH گروه‌های کربوکسیلیک موجود در نفت خام در تماس با آب نمک باردار منفی شده و شدیداً روی سطح جذب می‌شوند. لذا در pH های بالاتر از نقطه ایزوالکتریک سطح، سطح کلسیتی دارای بار منفی شده و با گروه کربوکسیلیک دافعه ایجاد می‌شود. همچنین تفکیک اسید و تولید آنیون کربوکسیلات نیز کاهش می‌یابد که این تغییرات به نفع شرایط آب‌دوستی است.

- سورفکتانت کاتیونی به دلیل برقراری جاذبه الکترواستاتیکی بین سر قطبی‌اش با اسید چرب از قبل جذب شده و تشکیل جفت یون پایدار و سپس مهاجرت از سطح، باعث تغییر بار سطحی کلسیت و در نتیجه تغییر شرایط نفت‌دوست به آب‌دوست می‌شود.

- سورفکتانت غیریونی از طریق گروه اتوکسی خود به سطح کلسیتی نزدیک شده و به جای آن اسید چرب جذب شده، از سطح خارج می‌شود. سپس این اسیدهای چرب از طریق جاذبه هیدروفوبیک با دم غیر قطبی سورفکتانت وارد واکنش شده و سر آنیونی آنها رو به بیرون سطح قرار می‌گیرد و چون گروه غیر قطبی رو به بیرون است، سطح آب‌دوست می‌شود.

- سورفکتانت آنیونی با برقراری جاذبه هیدروفوبیک با دم غیر قطبی اسید چرب جذب شده، سر قطبی‌اش رو به بیرون سطح قرار گرفته و سطح آب‌دوست می‌شود.

- جاذبه الکترواستاتیک مربوط به پیوند سورفکتانت کاتیونی با اسید چرب، قوی‌تر و پایدارتر از پیوندهای مربوط به دو نوع سورفکتانت دیگر با اسید چرب است. پس از آن اندرکنش گروه اتوکسی سورفکتانت غیر یونی با اسید چرب قرار دارد که ضعیف‌تر از جاذبه الکترواستاتیک است. در آخر نیز جاذبه ضعیف و کاملاً برگشت‌پذیر هیدروفوبیک

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، میزان تولید نفت در نتیجه تزریق محلول‌های سورفکتانت آنیونی در مقایسه با نفت حاصل از تزریق محلول‌های دو نوع سورفکتانت دیگر قابل چشم‌پوشی است. لذا عملاً استفاده از سورفکتانت آنیونی در تزریق به مخازن کربناته جهت ازدیاد برداشت توصیه نمی‌شود. همچنین همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد افزایش غلظت سورفکتانت می‌تواند باعث افزایش ازدیاد برداشت شود. اما باید توجه کرد که این دو پارامتر رابطه خطی ندارند. یعنی افزایش غلظت ماده فعال سطحی در محلول سورفکتانت تزریقی، لزوماً افزایش چشمگیری در تغییر ترشوندگی و در نتیجه ازدیاد برداشت در پی نخواهد داشت. ضروری است که غلظت ماده فعال سطحی در محلول سورفکتانت تزریقی بالاتر از مقدار بحرانی آن (CMC) باشد تا حداکثر تاثیر آن ماده فعال سطحی حاصل شود.

مقادیر ازدیاد برداشت توسط تزریق مواد فعال سطحی در دستگاه نگهدارنده بستر شنی تطابق نسبی و قابل قبول نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری پتانسیل زتا و گرماسنجی وزنی با داده‌های سیلاب‌زنی مغزه را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که انتظار می‌رفت پس از تزریق محلول سورفکتانت کاتیونی به داخل بستر شنی فشرده و جاگیری در خلل و فرج سنگ مغزه، این ماده فعال سطحی در آزادسازی اجزای نفت خام که قبلاً جذب سطحی شده‌اند بهتر و قوی‌تر عمل کرده و این امر موجب خروج بیشتر نفت خام از حفرات و در مجموع از بستر شنی فشرده نسبت به دو نوع سورفکتانت دیگر می‌شود.

همان‌طور که در جداول ۲ و ۳ مشخص است، مقادیر k ، k_{TO} و k_{TW} در ۱۸ آزمایش انجام گرفته دارای همگرایی نسبتاً خوبی هستند. بنابراین با تقریب خوبی می‌توان اطمینان داشت در همه تست‌ها تنها، نوع و غلظت سورفکتانت‌ها متغیر بوده و نتایج مستقل از خصوصیات و پارامترهای مربوط به مغزه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر سه نوع سورفکتانت کاتیونی، آنیونی و غیریونی در سه غلظت مختلف بر تغییر ترشوندگی

با عوامل نفت دوستی نیستند.
- ایجاد دافعه فضایی بین مونومرهای موجود در محلول سورفکتانت استفاده شده در غلظت‌های بالا.

علائم و نشانه‌ها

AN : میزان اسیدیته نفت خام (mgKOH/g)

CMC : غلظت بحرانی میسل

$CTAB$: سورفکتانت کاتیونی

k : ثابت نفوذپذیری مطلق (mD)

k_w : ثابت نفوذپذیری موثر آب (mD)

k_o : ثابت نفوذپذیری موثر نفت (mD)

k_{rw} : ثابت نفوذپذیری نسبی آب (mD)

k_{ro} : ثابت نفوذپذیری نسبی نفت (mD)

SDS : سورفکتانت آنیونی

S_{or} : درصد اشباع باقی مانده نفت

S_w : درصد اشباع آب

S_{wc} : درجه اشباع بحرانی آب (%)

$TX-100$: سورفکتانت غیریونی

ζ : پتانسیل زتا (mV)

ϕ : درجه تخلخل

قرار دارد که مربوط به نوع آنیونی است. بنابراین، توانایی تغییر ترشوندگی سطح سنگ مخازن کربناته از حالت نفت دوست به حالت آب دوست و در نهایت میزان ازدیاد برداشت نفت از مخزن، با سورفکتانت کاتیونی بیشترین و با سورفکتانت آنیونی کمترین است.

- غلظت ماده فعال سطحی مورد استفاده باید بیشتر از غلظت بحرانی میسل (CMC) باشد تا کربوکسیلات‌های دفع شده به داخل میسل‌های تشکیل شده در غلظت‌های بالاتر از CMC نقل مکان کنند. اگر چه استفاده از محلول‌های سورفکتانت با غلظت‌های پایین‌تر از CMC توصیه نمی‌شود، لیکن پس از گذر از این غلظت بحرانی و در غلظت‌های بالاتر، جهش چشمگیری در تغییر شرایط نفت دوستی حاصل نمی‌شود. دلایل این پدیده را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- کاهش غلظت CMC با افزایش بار منفی اسیدهای چرب دفع شده از سطح.

- کاهش نیروی پیشران در تغییر ترشوندگی که همان وجود آنیون‌های کربوکسیلات روی سطح کربناته و بار منفی سطح است.

- آن دسته از مونومرهایی که در بالاتر از CMC تشکیل میسل می‌دهند، دیگر قادر به مهاجرت به سطح و اندرکنش

مراجع

- [1]. Roehl P. O. Choquette P. W., *Carbonate petroleum reservoirs*, Spring- Verlag, New York 1985.
- [2]. Zhang P. and Austad T., "Wettability and Oil recovery from carbonates: effects of temperature and potential determining ions", *J. Colloid and Surfaces*. pp. 179-187. 2006.
- [3]. Karousi O. and Hamouda A. A., Macroscopic and Nanoscale Study of Wettability Alteration of Oil-Wet Calcite Surface in Presence of Mg^{+2} and SO_4^{-2} . *J. Colloid and interfaces science*, pp. 26-34, 2008.
- [4]. Chilinger G. V. and Yen T. F., "Some notes on wettability and relative permeability of carbonate rocks", *Energy Sources* 7. pp. 67- 75. 1983.
- [5]. Thomas M. M., Clouse J. A. and Lango J. M. *Chem. Geol.*, pp. 109-201, 1993.
- [6]. Rezaei Gomari K. A., Denoyel R. and A. A. Hamouda, Wettability of Calcite and Mica Modified by Different Long-Chain Fatty Acids (C18 Acids), *Journal Colloid and Interface Science*, 297, pp. 470-479., 2006.

- [7]. Peimao Zhang, Medad T. Teweheyo, Tor Austad, Wettability Alteration and Improved Oil Recovery by Spontaneous Imbibition of Seawater into Chalk, Impact of the Potential Determining Ions Ca^{+2} and SO_4^{-2} . J. Colloid and Surfaces, pp. 199-208. 2006.
- [8]. T.Austad, S.Strand, E.J.Hognesen, P.Zhang, Seawater as IOR Fluid in Fractured Chalk in SPE 93000, Presented at the 2005 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, TX, USA, 2-4. 2005.
- [9]. R.Gupta, K.K.Mohanty, Wettability Alteration of Fractured Carbonate Reservoirs, in SPE 113407, Presented at the 2008 SPE/ DOE Improved Oil recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 19-23. 2008.
- [10]. B. Adibhatla, K. K. Mohanty, Oil Recovery from Fractured Carbonates by Surfactant – Aided Gravity Drainage: Laboratory Experiments and Mechanistic Simulations, SPE 99773, Proceedings of Symposium on IOR, Tulsa, 22- 26. 2006.
- [11]. T. Austad, J. Miller, Spontaneous Imbibition of Water into Low Permeable Chalk at Different Wettabilities Using Surfactants, Paper 37236 SPE, Proceeding of SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, 18-21. 1997.
- [12]. D.C. Standnes, T. Austad, Wettability Alteration in Chalk 1: Preparation of Core Material and Oil Properties, J. SPE, 28, 111. 2001.
- [13]. Standnes D. C., T. Austad, Wettability Alteration in Chalk 2: Mechanistic for Wettability Alteration from Oil-Wet to Water-Wet Using Surfactants. J. SPE, 28, 123. 2000.
- [14]. K. Kumar, E.K. Dao, K.K. Mohanty, AFM study of Wettability Alteration of Surfactants, SPE 93009, Proceedings of SPE International Symposium of Oilfield Chemistry, Houston, 2-5. 2005.
- [15]. M.T. Teweheyo, Pand. Zhang, T.Austad, The Effect of Temperature and Potential Determining Ions Present in Seawater on Oil Recovery from Fractured Carbonates, SPE 99438, Proceedings of the Symposium on IOR, Tulsa, 22-26. 2006.
- [16]. George Hirasaki, Danhua Leslie Zhang, Surface Chemistry of Oil Recovery from Fractured, Oil-Wet, Carbonate Formation, paper SPE 80988 presented at the 2003-SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, Houston, Texas, pp. 5-8, 2003.
- [17]. D. Leslie Zhang, Shu. Liu, Maura Puerto, Clarence A. Miller, George J. Hirasaki, Wettability alteration and spontaneous imbibition in oil-wet carbonate formations, Journal of Petroleum Science and Engineering, 52, pp. 213-226., 2006
- [18]. Kh.Jarrahan, O.Seiedi, M.Sheykhan, M.Vafaie Sefti, Sh.Ayatollahi, Wettability Alteration of Carbonate rocks by Surfactants: A mechanistic Study, 410, pp. 1-10, 2012.