

بررسی آزمایشگاهی پدیده ی جذب در فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز نیتروژن

محمدامین صفرزاده*⁺

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده ی مطالعات مخازن و توسعه ی میدین

مهدی محمد صالحی، سید علیرضا طباطبایی نژاد

تبریز، دانشگاه صنعتی سهند، مرکز تحقیقات نفت و گاز سهند

چکیده: با توجه به کاهش جهانی تولید نفت، نبود بازدهی روش های متداول ازدیاد برداشت و میزان بالای نفت باقیمانده در مخازن هیدروکربوری، استفاده از روش های با سوددهی بالاتر با وجود تحمیل هزینه ی بیشتر، منطقی به نظر می رسد. پدیده ی جذب ناخواسته تحت تأثیر عامل های گوناگون باعث کاهش کارایی فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز می شود. این در حالی است که آنالیز جریان جزئی، موفقیت این روش را در فرایند ازدیاد برداشت مخازن هیدروکربوری تأیید نموده است. در این مطالعه، فرایند جذب به دور روش استاتیک و دینامیک بررسی شد و تأثیر نوع فاز گازی، نوع سنگ، غلظت های گوناگون ماده فعال کننده ی سطحی و ماده ی کمکی بر میزان جذب صورت گرفته مطالعه شد. همچنین، آزمایش های تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز به منظور مقایسه با دیگر روش های متداول مانند تزریق متناوب آب و گاز و تزریق پیوسته ی گاز و تأثیر ماده ی کمکی کلسیم لیگنوسولفات بر میزان بازیافت انجام شد. به منظور به دست آوردن غلظت سدیم دودسیل سولفات از روش رنگ سنجشی بر مبنای تشکیل زوج یون بین ماده ی فعال کننده ی سطحی (آنیونی بدون رنگ) و سفرائین (کاتیون رنگی) استفاده شد. نتیجه ها نشان داد که میزان دانسیته ی جذب ماده ی فعال کننده ی سطحی در حضور گاز نیتروژن نسبت به زمانی که گاز متان در معرض سنگ قرار دارد، کمتر است. همچنین میزان جذب سدیم دودسیل سولفات در حضور ماده ی لیگنوسولفات کاهش می یابد. آزمایش های جذب استاتیک انجام شده بر روی دولومیت و شیل نشان داد که میزان جذب ماده ی فعال کننده ی سطحی در آنها بالاتر از سیلیس است. فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز نسبت به فرایند های تزریق متناوب آب و گاز و تزریق پیوسته گاز میزان بازیافت را به ترتیب ۱۰ و ۲۸ درصد افزایش می دهد. کف در نرخ بهینه ی تزریق به صورت مناسب تشکیل و باعث کاهش موثر تحرک پذیری گاز می شود. استفاده از ماده ی لیگنوسولفات نیز ضمن افزایش ۲ درصدی میزان بازیافت باعث کاهش ۲۲ درصدی میزان جذب ماده ی فعال کننده ی سطحی می شود.

واژه های کلیدی: مواد فعال کننده سطحی، پدیده جذب، زوج یون بی بار، ماده ی کمکی، بازیافت نفت.

KEY WORDS: Surfactant, Adsorption phenomenon, Ion pair, Sacrificial agent, Oil recovery.

+E-mail: safarzadehma@ripi.ir ; ma.safarzadeh@tehranenergy.com

*عهده دار مکاتبات

• آدرس دیگر: تهران، مشاوران انرژی تهران

مقدمه

کشور ایران به دلیل داشتن ذخایر عظیم گاز، پتانسیل بالایی در زمینه‌ی تزریق گاز دارد. به لحاظ نظری فرایند تزریق گاز در حالت امتزاج‌پذیر، به تقریب قادر به جابه‌جایی تمام نفت در ناحیه‌ی جاروب شده می‌باشد. به همین دلیل فرایند تزریق گاز دارای جذابیت فراوانی است [۱، ۲]. لیکن، بروز مشکلاتی مانند پدیده‌ی انگشتی‌شدن^(۱)، جدایش ثقیلی^(۲) در مخازن ناهمگون و نبود جابه‌جایی مناسب نفت در مخازن کم فشار، کاهش بازدهی عملیات تزریق گاز را در پی دارد [۳]. به منظور افزایش میزان بازدهی جاروبی و کنترل تحرک گاز روش‌های گوناگونی مانند فرایند تزریق متناوب آب و گاز و تغلیظ‌سازی گاز تزریقی وجود دارد. در حالی که استفاده از تغلیظ‌ساز گاز، با وجود نتیجه‌های امیدوارکننده‌ی سال‌های اخیر به دلیل هزینه بر بودن کاربرد چندانی ندارد. فرایند تزریق متناوب آب و گاز به کنترل تحرک‌پذیری کمک شایانی می‌کند [۴، ۳]. فرایند تزریق متناوب آب و گاز بازدهی خود را به دلیل کاهش یافتن سطح تماس گاز و نفت در حضور آب، از دست می‌دهد. جدایش ثقیلی بین گاز و آب، تاثیر منفی بر بازدهی این روش دارد [۵].

از سوی دیگر، استفاده از روش‌های شیمیایی از جمله تزریق کف می‌تواند از بروز این مشکلات جلوگیری کند. با این وجود چالش‌های موجود پیرامون استفاده از مواد شیمیایی در ازدیاد برداشت نفت، بیشتر از آن‌که با جنبه‌ی عملیاتی مرتبط باشد، متأثر از اقتصاد عملیات است. امروزه طیف وسیعی از مواد فعال‌کننده سطح با ساختارها و کاربردهای گوناگون وجود دارد. یکی از انواع رایج مواد فعال‌کننده سطحی نوع آنیونی آن می‌باشد که دارای ویژگی‌های یگانه‌ای می‌باشد: (۱) میزان جذب کم در مخازن کربناته و ماسه‌سنگی در pH خنثی یا بالاتر (۲) مقاوم بودن در برابر تغییر دما (۳) در دسترس بودن و ارزان بودن در برخی از انواع آن [۶]. مواد فعال‌کننده سطحی کاتیونی کاربرد خیلی کمتری در ازدیاد برداشت دارند. در برخی شرایط می‌توان از آنها به صورت ترکیب با نوع آنیونی استفاده نمود. از کاربردهای مواد فعال‌کننده سطحی در حضور گاز می‌توان به تشکیل کف اشاره نمود.

ایجاد کف با استفاده از مواد فعال‌کننده سطحی با کاهش کشش سطحی و تشکیل غشای^(۳) پایدار همراه است. جذب مواد فعال‌کننده سطحی در سطح تماس گاز - مایع باعث تشکیل

لایه‌ی نازک پایدار بین حباب‌های گاز شده و مقاومت کف ایجاد شده را افزایش می‌دهد. با تشکیل کف در محیط متخلخل، حباب‌های گاز به اندازه‌ی حجم حفره‌ها بزرگ می‌شوند و غشای ایجاد شده با پوشاندن حفره‌ها، باعث کاهش تحرک‌پذیری می‌شوند [۷]. استفاده از کف به عنوان عامل کنترل‌کننده‌ی تحرک‌پذیری، برای اولین بار توسط باند و هلبروک^(۴) در سال ۱۹۵۸ ارایه شد [۸، ۴]. در حضور کف، تراوایی نسبی گاز کاهش می‌یابد و این میزان کاهش در محیط‌های با تراوایی بالاتر، بیشتر خواهد بود. در مقایسه با فرایند تزریق آب یا گاز، تزریق کف می‌تواند ضمن جلوگیری از بروز پدیده‌ی انگشتی‌شدن [۸]، بازدهی جاروبی عمودی و سطحی را افزایش و هزینه‌های مربوط به انتقال گاز را کاهش دهد. تشکیل کف در محیط متخلخل به روش‌های مختلف انجام می‌شود: تزریق کف پیش ساخته، تزریق همزمان و تزریق متناوب محلول فعال‌کننده سطحی و گاز. شای و روسن^(۵) با انجام آزمایش‌هایی، به این نتیجه رسیدند که تزریق متناوب دارای برتری‌های بیشتری نسبت به تزریق همزمان است و با کاهش سطح تماس گاز و محلول نسبت به تزریق همزمان باعث کاهش خوردگی وسایل سطح الارضی و ابزارهای درون‌چاهی می‌شود [۹، ۱۰]. در برخی شرایط، فرایندهای تزریق کف پیش‌ساخته و تزریق همزمان می‌توانند باعث بسته شدن کامل محیط متخلخل شوند. امکان رخ دادن این پدیده در فرایند تزریق متناوب محلول فعال‌کننده سطحی و گاز وجود ندارد. [۱۱]. به‌طور معمول در زمان تزریق گاز، کف ایجاد شده در ناحیه‌ی نزدیک چاه از بین می‌رود و میزان تحرک‌پذیری گاز در اطراف چاه تزریقی و به دنبال آن میزان تزریق پذیری افزایش می‌یابد در حالی است که در ناحیه‌های دورتر از چاه، کف قوی‌تری تشکیل می‌شود که منجر به کاهش تحرک‌پذیری گاز خواهد شد [۱۲]. احتمال کاهش بازدهی مواد فعال‌کننده سطحی در اثر واکنش با سیالات مخزن، تجزیه میکروبی و پدیده‌ی جذب وجود دارد [۱۳].

در این میان، پدیده‌ی جذب در سطح تماس مایع - جامد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پدیده‌ی جذب مواد فعال‌کننده سطحی، فرایندی است که در آن مولکول‌های فعال‌کننده سطحی، از حجم^(۶) محلول به سطح تماس منتقل می‌شوند. استفاده از مواد فعال‌کننده سطحی با وجود برتری‌های منحصر به فرد،

(۱) Viscous Fingering

(۲) Gravity Override

(۳) Lamella

(۴) Bond and Holbrook

(۵) Shi and Rossen

(۶) Bulk

جدول ۱- ویژگی های مواد شیمیایی مورد استفاده.

ماده	نوع	جرم مولکولی	pH
ماده فعال کننده سطحی	سدیم دودسیل سولفات	۲۸۶۳۷	۶-۹ (۱۰ g/L, H ₂ O, ۱۰°C)
لیگنوسولفونات	لیگنوسیت	۱۸۰۰۰	-
کاتیون رنگی	سفرانین	۳۵۰/۸۵	۱۰ (۱۰ g/L, H ₂ O, ۱۰°C)
حلال آلی	اتیل استات	۸۸/۱۰۵	-
فاز آبی	کلسیم کلرید	۵۸/۴۴	۵-۹

در این مطالعه، آزمایش های استاتیک و دینامیک جذب به منظور بررسی تأثیر میزان غلظت ماده ی فعال کننده ی سطحی، حضور ماده ی لیگنوسولفونات، تأثیر نوع فاز گازی و نوع سنگ بر میزان جذب انجام شد و سرانجام فرآیند تزریق متناوب گاز و محلول فعال - کننده ی سطحی طراحی شد. در ادامه آزمایش هایی به منظور مقایسه با دیگر روش های متداول و بررسی تأثیر ماده ی لیگنوسولفونات بر میزان بازیافت و میزان جذب انجام شد.

بخش تجربی

پیش از انجام آزمایش های سیلاب زنی می بایست میزان جذب ماده ی فعال کننده ی سطحی و روش مورد استفاده برای تعیین غلظت ماده ی فعال کننده ی سطحی بررسی شود.

مواد شیمیایی، ویژگی های سنگ و سیال

نوع ماده فعال کننده ی سطحی، لیگنوسولفونات، حلال آلی، کاتیون مورد استفاده به همراه ویژگی های آن ها در جدول ۱ آورده شده است. از نفت بنگستان با درجه ی API ۲۸ و گازهای نیتروژن و متان با خلوص ۹۹ درصد استفاده شد.

روش تحلیلی تعیین میزان غلظت SDS

از انحلال سدیم دودسیل سولفات در آب، محلولی چندجزئی و بی رنگ به دست می آید. به دلیل امکان ایجاد تداخل در تعیین غلظت سدیم دودسیل سولفات در حضور لیگنوسولفونات، استفاده از روش های رنگ سنج شی^(۱) تو صیه می شود. با توجه به بی رنگ بودن محلول فعال کننده ی سطحی، از یک ماده ی رنگی و حلال آلی به منظور محاسبه ی میزان جذب رخ داده استفاده شد. بهترین روش

در برخی موارد به دلیل جذب ناخواسته در سنگ، رسوب و تغییر دادن ناخواسته ترشوندگی سنگ، فرآیندی کاملاً غیراقتصادی می شود [۶]. جذب ناخواسته ی مواد فعال کننده در سطح سنگ سبب تشکیل غشای ناپایدار می شود و کیفیت کف تشکیل شده کاهش می یابد [۷]. در بعضی شرایط، امکان جذب ۹۰ درصد مواد فعال کننده ی سطحی در سنگ وجود دارد. پس، شناسایی مکانیزم های مؤثر در حین فرآیند جذب به منظور محاسبه ی حجم تزریقی و کاهش میزان جذب لازم به نظر می رسد [۱۴]. میزان مواد فعال کننده سطحی مورد نیاز برای تزریق برابر مجموع میزانی آن است که جذب سنگ می شوند و میزانی که در محیط متخلخل به دام می افتند [۱۵، ۱۶]. کانی های انحلال پذیر بر میزان ترشوندگی و برهمکنش مواد فعال کننده سطحی و سنگ تأثیر گذارند [۱۷]. در حالت کلی امکان رخ دادن سه نوع جذب وجود دارد: (۱) تبادل یونی (۲) فیزیکی (۳) شیمیایی. جذب تبادل یونی در نتیجه ی جاذبه ی الکتروستاتیکی اتفاق می افتد. جذب فیزیکی در اثر نیروهای واندروالس اتفاق می افتد و فرآیندی برگشت پذیر است. در جذب شیمیایی، یک واکنش شیمیایی بین ماده فعال کننده سطحی و سطح کانی رخ می دهد. تشکیل پیوند باعث تغییر ساختار شیمیایی مواد جذب شده برگشت ناپذیر شدن فرآیند جذب می شود [۱۴]. بنابراین جلوگیری از جذب مواد فعال کننده ی سطحی لازمه مطالعه ی فرایندهای شیمیایی می باشد.

سه راه حل برای کاهش میزان جذب مواد فعال کننده سطحی وجود دارد: (۱) طراحی مواد فعال کننده سطحی منطبق با شرایط مخزن (۲) استفاده از ترکیب چند ماده ی فعال کننده سطحی (۳) استفاده از مواد کمکی ارزان قیمت [۱۴]. از آنجا که تزریق حجم بیشتری از مواد فعال کننده سطحی به منظور جبران مواد جذب شده، در اغلب موارد از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و استفاده از مواد جایگزین ارزان قیمت ضروری به نظر می رسد [۷].

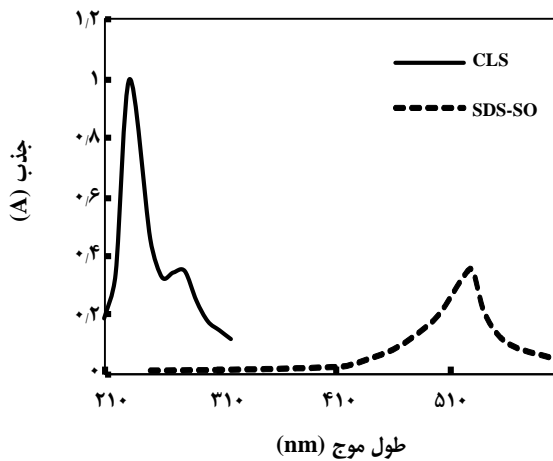
(۱) Spectrophotometric



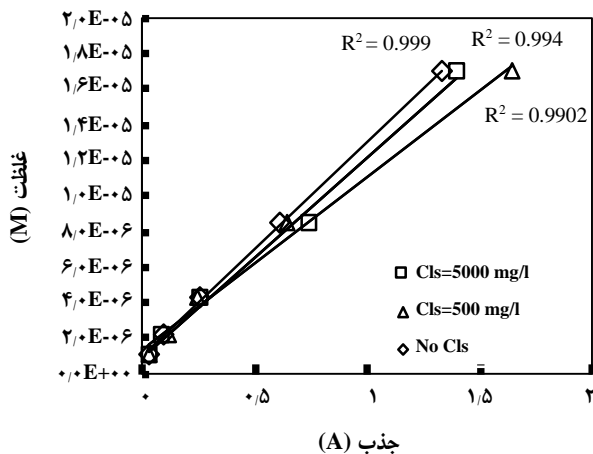
محاسبه‌ی غلظت مواد فعال‌کننده‌ی سطحی آنیونی بر مبنای تشکیل زوج یون^(۱) بین ماده‌ی فعال‌کننده‌ی سطحی آنیونی بدون رنگ و کاتیون رنگی می‌باشد. در این مطالعه از سفرائین^(۲) به عنوان ماده‌ی کاتیونی استفاده شد. از جمله مواد کاتیونی که در این زمینه استفاده شده اند می‌توان به متیلن آبی و ستیل پیریدین کلرید اشاره نمود. حلال‌های آلی مختلفی مانند کلروفرم و دی‌کلرومتان به منظور استخراج مایع - مایع وجود دارد که متأسفانه این مواد سمی هستند. در این پروژه از حلال آلی اتیل استات استفاده شد.

آنیون و کاتیون موردنظر با غلظت و حجم معین با هم ترکیب شده و محلول به دست آمده در حدود ۳۰ ثانیه تکان داده می‌شود تا تشکیل دو فاز دهد. سرانجام فاز آلی تشکیل شده در قسمت بالای محلول، به منظور تعیین غلظت سدیم دودسیل سولفات در دستگاه طیف سنج نوری قرار داده می‌شود. دستگاه اسپکترومتر شدت نور را به صورت تابعی از طول موج اندازه‌گیری می‌کند. این کار با شکست پرتو نور و آشکارسازی شدت آن با دستگاه باردار و نمایش نتیجه‌ها به صورت نمودار انجام می‌شود. در صورت نیاز به رقیق کردن محلول موردنظر از اتیل استات استفاده می‌شود [۱۸]. تمامی نمونه‌ها در دمای ۱۰ درجه‌ی سلسیوس آماده شده است. پروفیل میزان جذب سدیم دودسیل سولفات و کلسیم لیگنوسولفات در طول موج‌های گوناگون در شکل ۱ نشان داده شده است.

با توجه به شکل، میزان جذب بیشینه‌ی سدیم دودسیل سولفات در طول موج ۵۲۹nm به دست می‌آید و میزان جذب بیشینه‌ی کلسیم لیگنوسولفات در حدود ۲۳۲nm و ۲۶۰nm اتفاق می‌افتد که در فاصله‌ای مناسب از بیشینه‌ی جذب سدیم دودسیل سولفات قرار گرفته است و امکان به‌وجود آمدن هرگونه تداخل در میزان جذب سدیم دودسیل سولفات به دست آمده از دستگاه طیف سنج نوری را به کمترین میزان می‌رساند. نمودار برازش در طول موج ۵۲۹nm مربوط به سدیم دودسیل سولفات در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور تعیین غلظت سورفکتانت ابتدا می‌بایست نمودار برازش مناسب را تهیه نمود. در ابتدا برای چند غلظت مشخص از سورفکتانت میزان جذب در دستگاه اسپکترومتر اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که میزان ضریب همبستگی نزدیک به یک باشد از آن در تعیین غلظت‌های مجهول بعدی استفاده می‌شود. نمودار کالیبراسیون به دست آمده (در غیاب ماده‌ی کمکی) به تقریب خطی می‌باشد



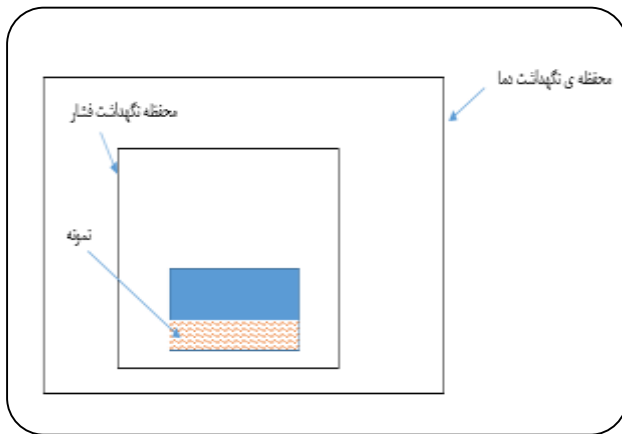
شکل ۱- پروفیل میزان جذب سدیم دودسیل سولفات و کلسیم لیگنوسولفات استفاده شده در طول موج‌های مختلف.



شکل ۲- تأثیر غلظت‌های گوناگون کلسیم لیگنوسولفات بر منحنی برازش SDS.

(۱) Ion-Pair

(۲) Safranin o



شکل ۳- شمای آزمایش های استاتیک جذب.

در حالتی که تأثیر نوع گاز بررسی می شود امکان استفاده از لرزاننده مکانیکی وجود ندارد و در این حالت مدتی که نمونه بدون حرکت نگه داشته می شود به ۱۲۰ ساعت افزایش می یابد. تزریق گاز پس از ایجاد خلا به آرامی صورت می پذیرد تا سرانجام فشار مورد نظر به دست آید.

آزمایش های دینامیک جذب

تعیین میزان غلظت بهینه ی سدیم دودسیل سولفات مورد استفاده در فرآیند تزریق متناوب محلول فعال کننده سطحی و گاز از پارامترهایی است که به لحاظ اقتصادی اهمیت فراوانی دارد. به این منظور با توجه به شبیه بودن ماهیت آزمایش های سیلاب زنی به روش جریانی از این روش استفاده شد. مراحل اصلی انجام آزمایش های دینامیک جذب شامل تزریق محلول فعال کننده ی سطحی با غلظت مشخص به اندازه ی حجم فضای خالی مدل، تزریق آب نمک در حدود ۵ برابر حجم فضای خالی مدل و نمونه گیری از خروجی مدل بستر شن فشرده می باشد. شمای آزمایش جریانی در شکل ۴ نشان داده شده است. آزمایش در غلظت های مختلف به منظور به دست آوردن میزان بهینه ی غلظت انجام شد. میزان غلظت آب نمک ppm ۱۰۰۰۰۰ می باشد.

آزمایش های سیلاب زنی

با توجه به نتیجه های به دست آمده از آزمایش های جذب در زمینه ی غلظت محلول فعال کننده ی سطحی، نوع گاز و تأثیر وجود کلسیم لیگنوسولفات فرآیند تزریق متناوب گاز و محلول فعال کننده ی سطحی طراحی شد.

($R^2=0.999$). پس استفاده از ماده ی کاتیونی سفرانین به همراه حلال آلی اتیل استات دارای دقت مناسب به منظور محاسبه ی غلظت سدیم دودسیل سولفات می باشد. همچنین آزمایش هایی به منظور بررسی تأثیر ماده ی لیگنوسولفات بر روش تحلیلی مورد استفاده در تعیین غلظت سدیم دودسیل سولفات و نمودار کالیبراسیون آن انجام شد. از دو غلظت ۵۰۰ و ۵۰۰۰ PPM کلسیم لیگنوسولفات استفاده شد. میزان ضریب همبستگی برای غلظت های مختلف کلسیم لیگنوسولفات در حدود یک می باشد (بیشتر از ۰.۹۹۰۲) که نشان از دقت مناسب روش تحلیلی مورد استفاده در محاسبه ی غلظت سدیم دودسیل سولفات مجهول در غلظت های گوناگون کلسیم لیگنوسولفات دارد.

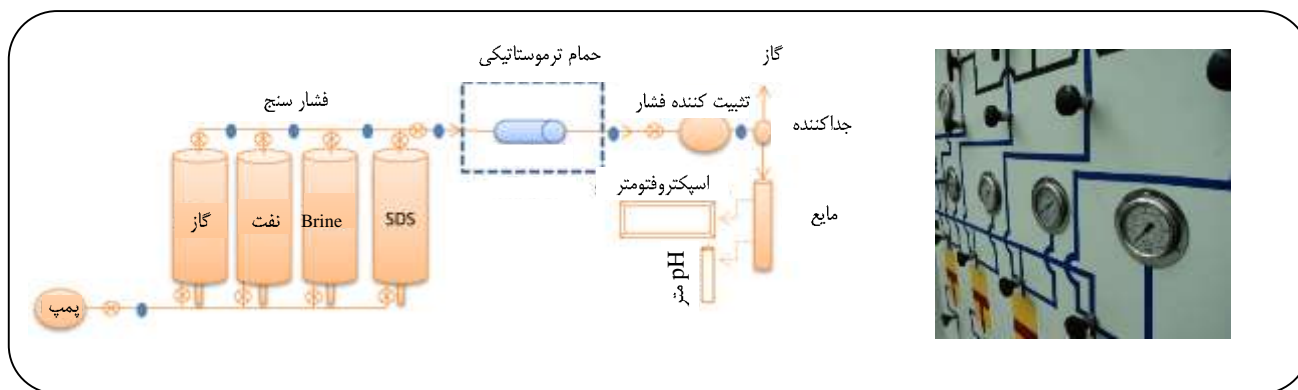
این مرحله به منظور محاسبه ی غلظت ماده ی فعال کننده ی سطحی در تمام آزمایش های بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه آزمایش های استاتیک و دینامیک به منظور بررسی برخی پارامترهای مهم آرایه خواهد شد. در مطالعه های جذب انجام شده استاتیک و دینامیک با توجه به ماهیت جریان تعریف می شوند. به این صورت که در حالت استاتیک جریانی وجود ندارد. اما در حالت دینامیک میزان جذب در حالت حرکت سیال بررسی می شود.

آزمایش های استاتیک جذب

در این آزمایش ها حجم مشخصی از محلول با غلظت معلوم به همراه مغزه خردشده در حمام ترموستاتیکی قرار می گیرد تا به تعادل گرمایی برسند. سپس میزان جرم مشخص از مغزه خرد شده در محلول ریخته می شود و برای چند دقیقه با دست به شدت تکان داده می شود و برای مدت زمان ۲۴ ساعت درون لرزاننده مکانیکی قرار داده می شوند (شکل ۳). پس از آن محلول فعال کننده ی سطحی و سنگ قرار گرفته در آن برای مدت ۴۸ ساعت بدون حرکت نگه داشته می شود. در مرحله ی بعد، محلول موجود برای مدت زمان ۲۰ دقیقه، در دستگاه سانتریفیوژ با میزان دور ۲۰۰۰ RPM قرار داده می شود و سرانجام، پس از رسوب ذرات ریز جامد، از محلول نمونه گرفته می شود و بعد از انجام روش تحلیلی تعیین میزان غلظت ماده فعال کننده سطحی، در دستگاه طیف سنج نوری قرار داده می شود و میزان ماده ی فعال کننده سطحی جذب شده در سنگ محاسبه می شود. در هر آزمایش میزان ۱۵ گرم از محلول فعال کننده سطحی و ۵ گرم از سنگ خرد شده (مش بین ۱۲۰ تا ۱۶۵) استفاده شد. آزمایش در دمای ۷۰ درجه ی سانتیگراد و فشارهای گوناگون انجام شد.

جدول ۲- شرایط و ویژگی‌های آزمایش‌های سیلاب‌زنی انجام شده.

شماره آزمایش	نوع تزریق	نرخ تزریق (mL/min)	ماده اضافه شده	تراوایی (md)	تخلخل (%)
۱	GAS	۰/۲۰	-	۲۹۴	۳۰/۹۶
۲	WAG	۰/۲۰	-	۲۶۳	۳۰/۳۶
۳	SAG	۰/۲۰	SDS	۳۰۲	۲۹/۸۹
۴	SAG	۰/۲۰	SDS+CLS	۳۰۳	۲۹/۳۳

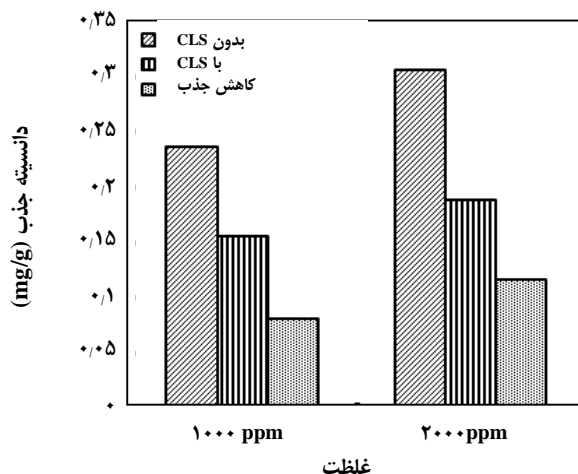


شکل ۴- دستگاه مورد استفاده در آزمایش دینامیک جذب و سیلاب‌زنی.

محاسبه‌ی تخلخل و تراوایی مدل

در این پژوهش از دو روش جرمی و حجمی برای محاسبه‌ی تخلخل استفاده شد. از آب خالص به دلیل مشخص بودن خواص آن در فرایند اشباع مدل بستر شن فشرده استفاده شد. میزان حجم فضای مرده نیز در محاسبه‌ها لحاظ شد. محاسبه‌های مربوط به تراوایی مطلق بر پایه‌ی قانون دارسی می‌باشد. آب خالص با نرخ ثابت به مدل بستر شن فشرده که به صورت افقی قرار گرفته و اشباع از آب است، تزریق می‌شود. پس از گذشت مدت زمان ۲۰ دقیقه جریان داخل مدل شن فشرده به حالت پایدار می‌رسد و می‌توان افت فشاری را که به واسطه عبور جریان با نرخ مشخص به وجود آمده را با استفاده از فشارسنج دیفرانسیلی (سر مثبت به ورودی و سر منفی آن به خروجی مدل شن فشرده) اندازه‌گیری نمود. این فرایند برای چندین نرخ جریان انجام و اختلاف فشار دو سر مدل در هر نرخ ثبت می‌شود. با رسم منحنی نرخ تزریق بر حسب افت فشار و با جایگذاری مقادیر مربوط به خواص سیال و ویژگی‌های مدل، میزان تراوایی مطلق با استفاده از شیب نمودار به دست خواهد آمد.

بر اساس نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های پژوهشگران *Khatib et al (۱۹۸۸)*، *Alvarez et al (۲۰۰۱)*، *Rossen (۲۰۰۵)*، *Gauglitz et al (۲۰۰۲)* مبنی بر یکسان بودن رفتار کف در مدل بستر شن فشرده و مغزه، به منظور انجام آزمایش‌های سیلاب‌زنی از مدل بستر شن فشرده استفاده شد [۳]. از نگهدارنده بستر شن فشرده با طول مفید ۱۵ cm و قطر داخلی ۵ cm به منظور انجام آزمایش‌های سیلاب زنی در دمای ۷۰ درجه‌ی سلسیوس و فشار ۲۲۰۰ psi استفاده شد. در شرایط و مشخصات آزمایش‌های سیلاب زنی انجام شده در جدول ۲ نشان داده شده است. به منظور ثابت نگهداشتن تقریبی تخلخل و تراوایی در تمام آزمایش‌ها از روابط تجربی و نیمه‌تجربی موجود بهره گرفته شد. برای انجام آزمایش‌ها از سیستم چندکاره‌ی سیلاب‌زنی، شامل چهار انباشتگر به منظور تزریق سیالات مختلف با بیشینه‌ی فشار ۱۵۰۰۰ psi، پمپ HPLC، دستگاه تثبیت فشار تولیدی، ترنس‌دیوسرهای فشاری، نگهدارنده‌ی مدل بستر شن فشرده، جداساز سیال، حجم سنج گاز، دستگاه نور سنجی با بیشینه‌ی جذب ۳/۳ و دستگاه اندازه‌گیری pH استفاده شد. مرحله‌های انجام آزمایش‌های متناوب محلول فعال‌کننده‌ی سطحی و گاز به صورت زیر است:



شکل ۵ - تأثیر ماده ی لیگنوسولفونات بر میزان جذب SDS.

از میزان جذب سدیم دودسیل سولفات کاسته می شود. به دلیل وجود کانی های گوناگون، سطح سنگ در محیط متخلخل دارای بارهای مثبت و منفی می باشد. مهمترین عامل جذب مواد فعال کننده ی سطحی در سطح سنگ، ایجاد برهمکنش الکتریکی بین بار یونی سطح سنگ و یون های محلول فعال کننده ی سطحی می باشد. بار سطح سنگ صفر برای هر کانی در یک pH مشخص اتفاق می افتد که در این حالت، سطح کانی بدون بار است. این خاصیت برای سیلیس در pH برابر ۲ رخ می دهد. در این حالت ذرات سیلیس در pH کمتر از ۲ دارای بار مثبت و در مقادیر بالاتر دارای بار منفی است. میزان pH برای آزمایش موردنظر در حدود ۵٫۵ می باشد و در نتیجه، حضور بار منفی در ذرات سیلیس باعث دفع مولکول های سدیم دودسیل سولفات شده (به دلیل دافعه ی الکتروستاتیکی) و منجر به کاهش میزان جذب آن بر روی سطح سیلیس می شود. در حالی که سیلیس به طور معمول در pH خنثی دارای بار منفی است، کانی هایی مثل کلاسیت، دولومیت و رس در سطح دارای بار مثبت می باشند. وقتی کلاسیم لیگنوسولفونات در آب شور حل می شود در نتیجه ی تجزیه شدن کاتیون های کلاسیم از لیگنین سولفات دارای بار منفی می شود و این بارهای منفی جذب بارهای مثبت سطح سنگ شده و مانع از بین رفتن سدیم دودسیل سولفات می شوند.

آزمایش استاتیک - تأثیر نوع فاز گازی بر میزان جذب

آزمایش ها در دمای ۷۰ درجه ی سلسیوس و فشار ۲۲۰۰ psi انجام شدند. نتیجه های آزمایش های استاتیک که در غیاب CLS

اشباع مدل بستر شن فشرده با آب نمک

به منظور شبیه سازی شرایط مخزن و محاسبه ی آب همزاد، قبل از اشباع بستر شن فشرده با نفت، بایستی آن را با آب نمک اشباع نمود. باید توجه داشت که فرآیند اشباع، فرآیندی زمان بر است. مدل در حالت عمودی قرار می گیرد و خروجی انباشتگر حاوی آب نمک به قسمت پایین بستر شن فشرده و ورودی آن به پمپ متصل می شود. پمپ با نرخ ۰٫۰۵ سی سی بر دقیقه تزریق و تا حدود دو برابر حجم فضای خالی ادامه دارد. باید توجه داشت که هوا وارد مدل نشود.

تزریق متناوب محلول (آب نمک یا محلول فعال کننده سطحی با توجه به نوع فرآیند) و گاز

در این آزمایش ها محلول فعال کننده ی سطحی (یا آب نمک) و گاز به صورت متناوب و به اندازه ی ۱/۲ حجم فضای خالی، در شرایط دمایی و فشاری مشخص به مدل بستر شن فشرده تزریق می شود. تعداد دوره در این آزمایش ها برابر ۴ در نظر گرفته شد. در هر دوره ۰٫۳ برابر حجم فضای خالی تزریق صورت گرفت.

ثابت میزان / غلظت سیالات تولیدی بر حسب زمان

به منظور به دست آوردن غلظت سدیم دودسیل سولفات و محاسبه ی میزان جذب رخ داده، از روش شیمیایی استفاده شد. حجم نفت و آب پس از خروج از محیط متخلخل اندازه گیری می شد.

ثابت فشار تزریق و حجم مواد خروجی

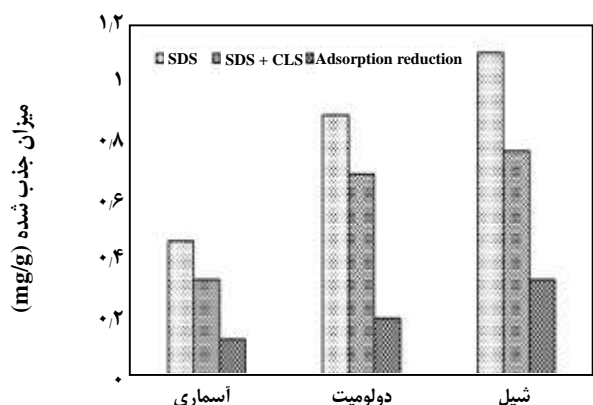
برای ارزیابی فرآیندهای سیلاب زنی باید تغییرات فشار تزریقی، میزان گاز و آب خروجی را مورد بررسی قرار داد.

نتیجه ها و بحث

آزمایش استاتیک - تأثیر ماده لیگنوسولفونات بر میزان جذب

به منظور بررسی تأثیر کلاسیم لیگنوسولفونات بر میزان جذب سدیم دودسیل سولفات، از دو غلظت ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ ppm سدیم دودسیل سولفات استفاده شد.

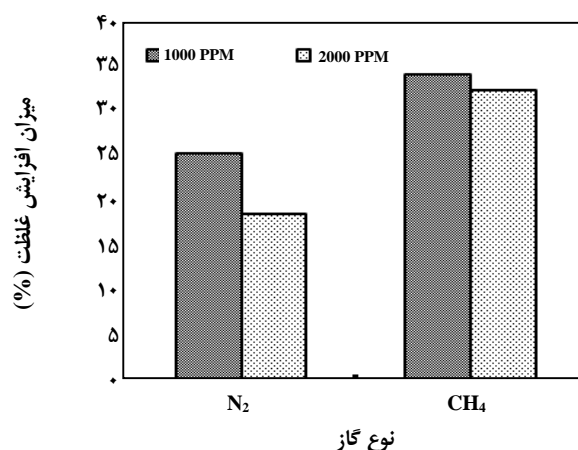
آزمایش های در دمای ۷۰ درجه ی سلسیوس و فشار جو انجام شد. میزان غلظت نهایی در غیاب کلاسیم لیگنوسولفونات به ترتیب برابر ۹۲۱ و ۱۸۹۸ ppm و در حضور آن برابر ۹۴۸ و ۱۹۲۱ ppm می باشد. شکل ۵ نتیجه های آزمایش های استاتیک انجام شده را نشان می دهد. در حضور کلاسیم لیگنوسولفونات



شکل ۷ - نتیجه‌های آزمایش‌های جذب استاتیک انجام شده بر روی سه نوع سنگ و تأثیر CLS بر میزان جذب.

۵ گرم از سنگ خرد شده (مش بین ۱۲۰ تا ۱۶۵) استفاده شد. ساختار مغزه‌ی آسماری مورد استفاده از نوع ماسه سنگی و دارای ساختار شیمیایی از جنس سیلیس می‌باشد. بار سطح صفر برای سیلیس در pH برابر ۲ رخ می‌دهد. در این حالت ذرات سیلیس در pH کمتر دارای بار مثبت و در مقادیر بالاتر دارای بار منفی است. میزان pH برای آزمایش مورد نظر در حدود ۵/۵ می‌باشد و در نتیجه حضور بار منفی در ذرات سیلیس باعث دفع مولکول‌های سدیم دودسیل سولفات شده (به دلیل دافعه‌ی الکتروستاتیکی) و منجر به کاهش میزان جذب آن بر روی سطح سیلیس می‌شود. درحالی‌که سیلیس به طور معمول در pH خنثی دارای بار منفی است، کانی‌هایی مثل کلسیت، دولومیت و رس در سطح دارای بار مثبت می‌باشند. آزمایش‌های جذب استاتیک انجام شده بر روی دولومیت و شیل نشان می‌دهد که میزان جذب ماده‌ی فعال‌کننده‌ی سطحی در آنها بالاتر از سیلیس است. یکی از مهمترین کانی‌های موجود در مخزن، کائولینیت^(۱) می‌باشد که در شیل مورد استفاده در آزمایش نیز وجود دارد. کانی کائولینیت دارای دو سایت مثبت و منفی می‌باشد این کانی در pH، خنثی دارای هر دو نوع بار مثبت و منفی می‌باشد. مولکول‌های سدیم دودسیل سولفات جذب ناحیه‌ای از سطح سنگ می‌شود که دارای بار مثبت باشد. شکل ۷ نشان می‌دهد استفاده از سدیم دودسیل سولفات در سنگ‌هایی که دارای سیلیس هستند به دلیل میزان جذب کمتر مناسب می‌باشد.

آزمایش دینامیک جذب - تأثیر غلظت‌های گوناگون SDS بر میزان جذب
آزمایش برای غلظت‌های گوناگون ۱۰۰ ppm



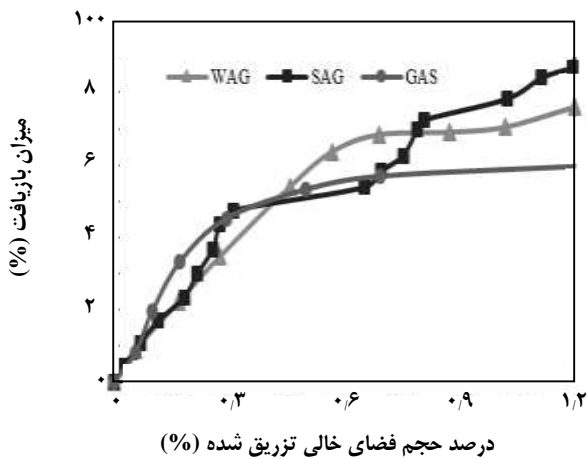
شکل ۶ - تأثیر فاز گاز بر میزان جذب SDS در غلظت‌های مختلف.

صورت گرفت به عنوان مینا استفاده شد. شکل ۶ نشان می‌دهد حضور گاز متان باعث افزایش بیشتر میزان جذب سدیم دودسیل سولفات نسبت به نیتروژن می‌شود. در صدی از ماده‌ی فعال‌کننده‌ی سطحی به داخل گاز نفوذ می‌کند و بقیه جذب سنگ می‌شود. احتمال نفوذ گاز به داخل سدیم دودسیل سولفات نیز وجود دارد. با توجه به زمان بر بودن عملیات سیلاب‌زنی مخازن هیدروکربوری، احتمال در کنار هم قرار گرفتن فاز گاز و محلول فعال‌کننده‌ی سطحی افزایش می‌یابد و جذب ماده‌ی فعال‌کننده‌ی سطحی (در سنگ و در فاز گازی) را افزایش می‌دهد. نتیجه‌های به دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد استفاده از گاز نیتروژن باعث کاهش هدر رفتن سدیم دودسیل سولفات می‌شود.

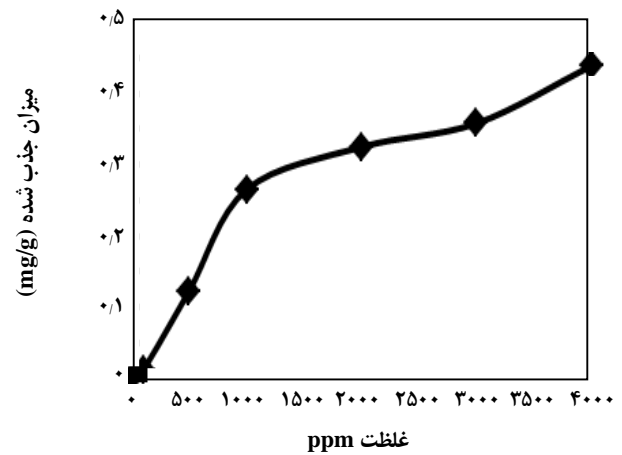
انتخاب نوع گاز مورد استفاده در فرایند ازدیاد برداشت به عامل‌های گوناگونی همچون اقتصاد و در دسترس بودن گاز تزریقی بستگی دارد. با توجه به وجود چند مخزن بزرگ گاز نیتروژن با درصد بالا همچون مخزن گازی کبیرکوه (سازند دهرم با حجم گاز درجای ۲۱ تریلیون فوت مکعب)، مخزن میلانتون (سازند سورمه با حجم گاز درجای بیش از ۲۴ تریلیون فوت مکعب) و مخزن سمند (سازند دالان بالایی با حجم گاز درجای بیش از ۷۵ تریلیون فوت مکعب) استفاده از این گاز به عنوان جانشین مناسب برای گاز طبیعی بعد از انجام آزمایش‌های لازم، منطقی به نظر می‌رسد [۵].

آزمایش استاتیک - تأثیر نوع سنگ بر میزان جذب
در هر آزمایش میزان ۱۵ گرم از محلول فعال‌کننده سطحی و

(۱) Kaolinite



شکل ۹ - روند تغییر میزان بازیافت.



شکل ۸ - میزان جذب همدمای برای سیلیس در دمای ۷۰ درجه سلسیوس و ۲۲۰۰ psi.

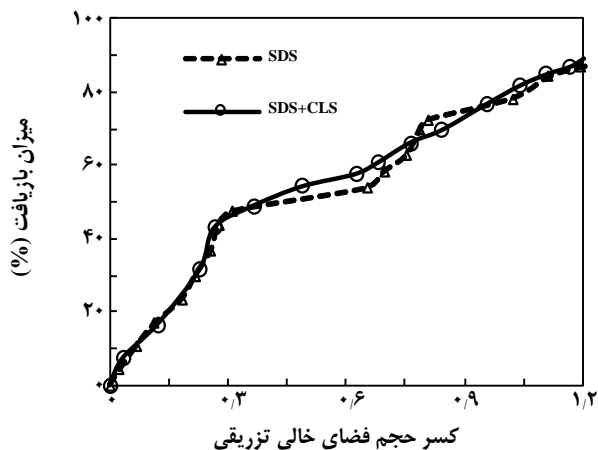
آزمایش‌های سیلاب زنی

در آزمایش‌های پیشین، پدیده‌ی جذب سدیم دودسیل سولفات تحت عامل‌های گوناگون بررسی شد. در ادامه، آزمایش‌های سیلاب زنی گوناگون به منظور بررسی پارامترهای گوناگون انجام پذیرفت. تزریق گاز در تمام آزمایش‌ها به صورت امتزاج ناپذیر صورت گرفته است.

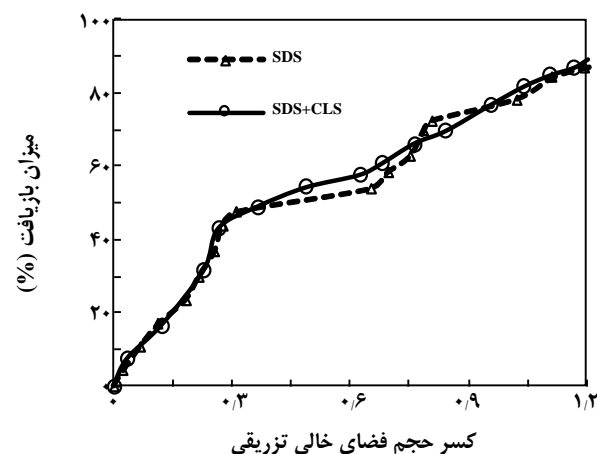
در تزریق پیوسته‌ی گاز در حالت امتزاج ناپذیر، افزایش عدد موئینگی به دلیل کاهش کشش سطحی نفت و گاز می‌تواند باعث افزایش میزان بازیافت نفت شود. میزان بازیافت نهایی برابر ۵۹ درصد می‌باشد (شکل ۹). هرچند نسبت تحرک پذیری بالا در فرآیند تزریق پیوسته‌ی گاز به دلیل گرانی کمی آن باعث شده است تا کمترین میزان بازیافت را در میان آزمایش‌های انجام شده داشته باشد. به منظور مقایسه با فرآیند تزریق متناوب محلول فعال‌کننده‌ی سطحی و گاز تعداد دوره در این آزمایش برابر چهار و نسبت حجمی یک به یک انتخاب شد. افزایش بازدهی جابجایی میکروسکوپی در حین تزریق گاز به همراه افزایش بازدهی ماکروسکوپی در تزریق آب میزان تولید نفت را نسبت به آزمایش تزریق پیوسته‌ی گاز افزایش داده است.

میزان بازیافت نهایی در فرآیند WAG، حدود ۷۶ درصد می‌باشد که در حدود ۱۰ درصد از میزان بازیافت فرآیند SAG کمتر است. با وجود افزایش فشار در هنگام تزریق گاز و کاهش آن در زمان تزریق آب، فشار تزریقی در طی فرآیند WAG روند افزایشی ندارد. تغییر فشار دوره‌ی اول تزریق در فرآیند تزریق متناوب آب و گاز با فرآیند تزریق محلول فعال‌کننده سطحی و گاز یکسان است. تنها تفاوت موجود در میزان گرانی محلول است که

۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۵۰۰۰ به منظور به دست آوردن غلظت بهینه انجام شد. نمودار جذب تعادلی برای SDS در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش غلظت سدیم دودسیل سولفات، میزان جذب رخ داده در بستر شن فشرده افزایش می‌یابد که با نتیجه‌های به دست آمده از آزمایش‌های استاتیک همخوانی دارد. اما در حدود غلظت ۱۰۰۰ PPM از شدت جذب کاسته می‌شود و نشان دهنده‌ی جذب بیشینه سدیم دودسیل سولفات در این غلظت دارد. متوسط میزان pH آزمایش‌های دینامیک در حدود ۵ می‌باشد که نشان می‌دهد سطح سیلیس دارای بار منفی می‌باشد. بنابر توضیحات داده شده در بررسی آزمایش‌های استاتیک، میزان جذب کمی در سطح سیلیس رخ می‌دهد پس نیازی به تعدیل pH نمی‌باشد. میزان مواد فعال‌کننده سطحی مورد نیاز برای انجام عملیات ازدیاد برداشت، برابر میزانی است که در حفرات به دام می‌افتند و میزانی که در اثر پدیده‌ی جذب از بین می‌روند. با توجه به شکل ۸، میزان غلظت سدیم دودسیل سولفات مورد استفاده در آزمایش‌های سیلاب زنی تزریق متناوب محلول فعال‌کننده‌ی سطحی و گاز برابر ۱۵۰۰ ppm در نظر گرفته شد. همان‌گونه که از تفاوت میزان جذب در شکل‌های ۵ و ۸ دیده می‌شود میزان جذب در شرایط دینامیک بیشتر می‌باشد. بررسی تاثیر جریان بر میزان جذب با پیچیدگی‌هایی مانند پدیده‌ی ویسکوالاستیسیته همراه است. در روش دینامیک، به دلیل در معرض سطوح جدید قرار گرفتن ماده‌ی فعال‌کننده‌ی سطحی نسبت به حالت استاتیک باعث شده میزان اتلاف آن افزایش یابد.



شکل ۱۱ - روند تغییر غلظت SDS خروجی در فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز - نرخ تزریق ۰/۲ میلی لیتر در ثانیه.



شکل ۱۰ - میزان بازیافت نفت در حضور و غیاب CLS.

محلول فعال کننده ی سطحی و گاز به منظور مقایسه با دیگر روش های متداول همچون تزریق متناوب آب و گاز و تزریق پیوسته ی گاز و همچنین تأثیر ماده ی کمکی کلسیم لیگنوسولفات بر میزان بازیافت انجام شد. به منظور به دست آوردن غلظت سدیم دودسیل سولفات از روش رنگ سنجشی بر مبنای تشکیل زوج یون بین سدیم دودسیل سولفات (آنیونی بدون رنگ) و سفرانین (کاتیون رنگی) استفاده شد. نتیجه ها نشان داد که استفاده از کلسیم لیگنوسولفات باعث کاهش میزان جذب سدیم دودسیل سولفات خواهد شد و میزان دانسیته ی جذب در حضور گاز نیتروژن نسبت به گاز متان کاهش می یابد. مغزه ی آسماری مورد استفاده از نوع ماسه سنگی دارای میزان جذب کمتری نسبت به نوع دولومیتی و شیل می باشد. فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز به دلیل کاهش تحرک پذیری بیشتر نسبت به فرایند تزریق متناوب آب و گاز دارای بازدهی بیشتری می باشد و به دلیل حضور کف دارای فشار تزریقی بالاتری می باشد. استفاده از کلسیم لیگنوسولفات در فرایند تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز ضمن افزایش میزان بازیافت باعث کاهش میزان جذب سدیم دودسیل سولفات خواهد شد و در کاهش هزینه های عملیاتی مؤثر می باشد.

فهرست نمادها

SDS

سدیم دودسیل سولفات

از گر انرژی آب بیشتر است. در غیاب کف میزان فشار تزریقی در حین تزریق گاز افزایش و در حین تزریق آب کاهش می یابد. حال آنکه در فرایند تزریق محلول فعال کننده ی سطحی و گاز، در برخی مواقع به دلیل حضور کف این قضیه دیده نمی شود.

آزمایش تزریق متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز در نرخ بهینه ی تزریق با استفاده از کلسیم لیگنوسولفات با غلظت ۴۰۰۰ ppm انجام شد میزان بازیافت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میزان بازیافت در حضور لیگنوسولفات افزایش یافته است (۸۹ درصد). این در حالی است که میزان غلظت SDS خروجی نیز افزایش یافته که نشان دهنده کاهش ۲۲ درصدی جذب ماده ی فعال کننده سطحی است. حضور لیگنوسولفات باعث شده روند تغییر های میزان بازیابی پس از تزریق ۰/۳ حجم فضای خالی با نوسان کمتری همراه باشد.

شکل ۱۱ روند کلی تغییر غلظت ماده فعال کننده ی سطحی را نشان می دهد. همان گونه که دیده می شود میزان جذب در زمان های آغازین بیشتر از زمان های پایانی است. بنابراین می توان پیشنهاد نمود تزریق ماده ی کمکی همانند لیگنوسولفات در ابتدای فرایند انجام شود.

نتیجه گیری

در این مطالعه، پارامترهای مؤثر بر میزان جذب سدیم دودسیل سولفات از جمله تأثیر کلسیم لیگنوسولفات، فاز گازی، نوع سنگ و غلظت های مختلف بررسی شد. همچنین آزمایش های تزریق متناوب

SAG	توزیع متناوب محلول فعال کننده ی سطحی و گاز	RPM	دور بر دقیقه
		CLS	لیگنوسولفانات کلسیم
	تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۶/۳	WAG	تزریق متناوب آب و گاز

مراجع

- [۱] عباسی، سعید؛ جاهدی، مهدی؛ اثر فشار و مقدار گاز CO₂ تزریقی روی میزان بازیافت نفت در فرآیند تزریق گاز، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۲): ۲۶ تا ۷۳ تا ۸۴ (۱۳۸۶).
- [2] Renkema W.J., Rossen W.R., Success of Sag Foam Processes in Heterogeneous Reservoirs, Society of Petroleum Engineering, *SPE 110408* (2007).
- [3] Reid B. Grigg, Spe, Baoj Un Bai, Yi L Iu, Competitive Adsorption of a Hybrid Surfactant System Onto Five Minerals, Berea Sandstone, And Limestone, Society of Petroleum Engineering, *Spe 90612* (2004).
- [4] Andy Eka Syahputra, Jyun-Syung Tsau, Reid B.Grigg, Laboratory Evaluation of Using Lignosulfonate and Surfactant Mixture in CO₂ Flooding , Society of Petroleum Engineering, *Spe 59368* (2000).
- [5] Viet Q. Le, Quoc P. Nguyen, A Novel Foam Concept with Co₂ Dissolved Surfactants, Society of Petroleum Engineering, *SPE 113370* (2008).
- [6] Subrata Borgohain Gogoi, Adsorption of Non-Petroleum Base Surfactant on Reservoir Rock. *Current Science*, **97**(7): 1059-1063 (2009).
- [7] Jyun-Syung Tsau, Andy Eka Syahputra, Economic Evaluation of Surfactant Adsorption in CO₂ Foam Application, *Society of Petroleum Engineering*, *Spe 59365* (2000).
- [8] I Liu Reid B. Grigg and Baojun Bai, "Salinity, Ph, And Surfactant Concentration Effects on Co₂-Foam Society of Petroleum Engineering, *SPE 93095* (2005).
- [9] Shi J-X., Rossen W.R., Improved Surfactant-Alternating-Gas Foam Process to Control Gravity Override, Society of Petroleum Engineering, *SPE 39653* (1998).
- [10] Kloet M.B., Renkema W.J., Rossen W.R., Optimal Design Criteria for Sag Foam Processes in Heterogeneous Reservoirs, *Society of Petroleum Engineering*, *SPE 121581*, (2009).
- [11] Alex T. Turta, Ashok K. Singhal, Field Foam Applications in Enhanced Oil Recovery Projects: Screening and Design Aspects, Society of Petroleum Engineering, *SPE 48895* (1998).
- [12] Xu Q., Rossen W.R., "Experimental Study of Gas Injection in a Surfactant-Alternating-Gas Foam Process", Society of Petroleum Engineers (2004).
- [13] Blaker, H.K. Celius, T. Lie, Foam for Gas Mobility Control in the Snorre Field: The Fawag Project, Society of Petroleum Engineering, *SPE 56478* (1999).
- [14] Fu Yin Song, Islam M.R., A New Mathematical Model and Experimental Validation of Multicomponent Adsorption, Society of Petroleum Engineering, *SPE / Doe 27838* (1994).

- [15] George J. Hirasaki, Clarence A. Miller, "Surfactant Based Enhanced Oil Recovery and Foam Mobility Control", 3rd Semi-Annual Technical Report (2005).
- [16] Moradi-Araghi A., Johnston E.L., Laboratory Evaluation of Surfactants for CO₂-Foam Applications at the South Cowden Unit, Society of Petroleum Engineering, *SPE 37218* (1997).
- [17] Somasundaran P., Zhang L., Adsorption of Surfactants on Minerals for Wettability Control in Improved Oil Recovery Processes, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **52**: 198-212 (2006) .
- [18] Daneshfar A., Arvin Pili F., Kaviyan H., Spectrophotometric Determination Of Sodium Dodecyl Sulfate in Wastewater Based on Ion-Pair Extraction with Safranin-O, *Semnan Journal of Applied Chemistry*, **10**: 63-74 (2009).