

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر تزریق ماده قلیایی بر روی بازدهی تولید از نفت‌های آسفالتینی

حسین دریانی داریونی، سیده الهه بهشتی، مسعود ریاضی* و محمدرضا ملایری

گروه مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، مرکز تحقیقاتی ازدیاد برداشت از مخازن نفتی، دانشگاه شیراز، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲ تاریخ پذیرش: ۹۵/۶/۳

چکیده

در بین روش‌های مختلفی که برای ازدیاد برداشت شیمیایی وجود دارد، تزریق مواد قلیایی (آلکالین) پتانسیل بسیار بالایی برای تولید از مخازن نفتی به ویژه مخازنی که حاوی نفت اسیدی سنگین هستند را داراست. این مواد قلیایی از طریق واکنش با ترکیبات اسیدی موجود در نفت خام، سبب کاهش کشش سطحی فازهای موجود شده و در نهایت سبب بهبود تولید نفت خواهند شد. از طرفی در بسیاری از مخازن نفت سنگین، رسوب آسفالتین به عنوان مشکلی اساسی در تولید و بهره‌برداری به شمار می‌آید. جلوگیری از رسوب آسفالتین و در صورت بروز رسوب، ارائه راهکاری مناسب برای کاهش و رفع آن اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق، با استفاده از دو میکرومدل منظم و غیر منظم، کارایی تزریق مواد قلیایی بر روی تولید نفت‌های خام و سنتز شده آسفالتینی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تزریق مواد قلیایی به صورت بصری در شرایطی که رسوب آسفالتین تحت تاثیر تزریق هپتان به وجود آمد، مطالعه گردید. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در نفت‌های خام و سنتز شده تزریق مواد قلیایی در شرایطی که آسفالتین رسوب نکرده باشد تاثیر مناسبی بر بازدهی تولید نفت دارد اما پس از رسوب آسفالتین در اینگونه نفت‌ها، مواد قلیایی تاثیر چندانی بر تولید نخواهند داشت. نتایج همچنین نشان داد که تزریق مواد قلیایی سبب تغییر ترشوندگی میکرومدل در برخی از نقاط می‌گردد، مکانیزمی که در نهایت می‌تواند منجر به بهبود تولید نفت از مخازن شود. از طرفی همچنین مشاهده شد که با تشکیل امولسیون در میکرومدل، ماده قلیایی امکان افزایش بازدهی جاروبی را در سیستم مهیا نموده است.

کلمات کلیدی: مواد قلیایی، رسوب آسفالتین، تغییر ترشوندگی، میکرومدل شیشه‌ای، ازدیاد برداشت نفت

مقدمه

است. تاثیر محلول قلیایی بر روی بازیافت نفت به علت واکنش‌های شیمیایی بین آلکالین و اسیدهای آلی است که در نفت خام وجود دارند. این واکنش‌ها می‌توانند موجب تشکیل سورفکتانت و امولسیون درجا شوند. در نتیجه نیروهای موینگی بین فازهای آبی و نفتی تحت کاهش کشش سطحی آب و نفت، کاهش می‌یابد. افزودن آلکالین به آب، موجب افزایش pH می‌شود که این ناشی از تجزیه و تفکیک یونی آلکالین در فاز آبی است که مقدار یون‌های هیدروکسید سیستم را افزایش می‌دهد. یون‌های هیدروکسید می‌بایست با اسیدهای نفت خام واکنش دهد تا باعث تشکیل سورفکتانت گردد.

هنگامی که فاز آب و فاز نفت در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، آلکالین موجود در فاز آبی و اسیدهای آلی (HA) موجود در فاز نفت به سمت سطح تماس حرکت می‌کنند، با یکدیگر واکنش داده و مواد فعال سطحی (صابون نفتی) تولید می‌کنند. تاثیر آلکالین بر روی اسیدهای موجود در نفت توسط رابطه ۱ نشان داده شده است [۱]:



در این واکنش، HA نشان‌دهنده اسید نفتی و A- یک ماده فعال سطحی (سورفکتانت) آنیونی است. مکانیزم‌هایی که توسط جنینگز و همکارانش [۲] ارائه شده‌اند، شامل کاهش کشش سطحی^۱، تشکیل امولسیون در جای نفت خام که سبب کاهش تحرک‌پذیری^۲ آب تزریقی و نتیجتاً کاهش پدیده انگشتی شدن می‌گردد و همچنین بهبود راندمان جارویی می‌شود. جانسون [۳] چهار مکانیزم پایه‌ای متفاوت را که در اثر تزریق مواد قلیایی رخ می‌دهد، معرفی کرد. این مکانیزم‌ها شامل موارد زیر می‌شوند:

- ۱- تشکیل امولسیون و چسبندگی به سطح^۴
- ۲- تغییر ترشوندگی از نفت دوست به آب دوست

با تولید از مخازن نفت سبک و همچنین تقاضای روزافزون برای انرژی‌های فسیلی، جستجو برای روش‌های مناسب و موفق بهره‌برداری از مخازن نفت سنگین اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند. تولید از مخازن نفت سنگین با مشکلات فراوانی همراه است، که از آن جمله می‌توان به گراندروی بسیار بالای اینگونه نفت‌ها و همچنین میزان آسفالتین زیاد آنها اشاره کرد. اگرچه میزان آسفالتین موجود در نفت خام به تنهایی سبب بروز مشکلات تولیدی نفت خام نمی‌شود، بلکه حضور اجزای دیگر نفت خام نظیر رزین و میزان آنها در ترکیب نفت خام بر روی پایداری آسفالتین تأثیر گذار هستند. به همین دلیل است که در برخی از مخازن که حاوی نفت خام سنگین و مقدار قابل توجهی آسفالتین می‌باشند، مشکل رسوب آسفالتین وجود ندارد. این در حالی است که در برخی از مخازن نفت سبک، هرچند میزان آسفالتین بسیار کم است، اما همین مقدار کم می‌تواند مشکلات بسیاری را در تولید نفت خام ایجاد نماید.

جابه‌جایی نفت توسط محلول‌های قلیایی به عنوان یک روش ازدیاد برداشت نفت^۱ مورد توجه قرار گرفته است. محلول قلیایی تزریق شده با اسیدهای آلی طبیعی که در نفت وجود دارند واکنش داده که نهایتاً موجب تشکیل سورفکتانت درجا می‌گردد که نتیجه آن ایجاد مکانیزم‌های مختلفی برای جابه‌جایی و تولید نفت است. تا کنون مکانیزم‌های گوناگونی در طی تزریق آلکالین که منجر به افزایش تولید نفت می‌شود، گزارش شده است.

سیلابزنی آلکالین فرآیندی است که در آن آبی با pH نزدیک به ۱۰ تا ۱۲ به سیستم تزریق می‌شود تا سبب افزایش تولید گردد. مقدار pH، ۱۰ تا ۱۲ از طریق محلول NaOH با غلظت ۰/۰۱ تا ۰/۱ وزنی به دست می‌آید [۱]. لذا در طراحی فرآیندهای مختلف، از محلول NaOH با غلظت ۰/۰۵ وزنی استفاده شده

1. Enhanced Oil Recovery (EOR)
2. Interfacial tension: IFT
3. Mobility
4. Entrainment

۳- تغییر ترشوندگی از آب دوست به نفت دوست

۴- تشکیل امولسیون و به دام افتادگی

محققین بسیاری، شرایطی که طی آن انواع امولسیون‌ها تشکیل می‌شوند را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴، ۵، ۶]. همه آنها به این نتیجه رسیده‌اند که تولید امولسیون به طور عمده به کشش سطحی آب و نفت بستگی دارد. در واقع هرچه کشش سطحی کمتر باشد، امولسیون راحت‌تر تشکیل می‌شود. علاوه بر این، نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که شرایط بهینه برای تشکیل امولسیون و چسبندگی به سطح مواردی از قبیل pH بالا، عدد اسیدی پایین، شوری کم، غلظت کم آلكالین و امولسیون نفت در آب با اندازه ذرات کوچکتر از قطر حفرات است. همچنین برای تشکیل امولسیون آب در نفت نیاز است تا شوری آب حاوی آلكالین و یا غلظت آلكالین بالا باشد. شنگ [۷] عنوان کرد که در سیلابزنی شیمیایی، نوع امولسیون تشکیل شده به نسبت آب به نفت^۱ بستگی دارد.

امولسیون‌های آب در نفت در نسبت‌های کم آب به نفت تشکیل می‌شوند. با افزایش درصد آب در امولسیون، نوع امولسیون از آب در نفت، به امولسیون نفت در آب تغییر پیدا می‌کند. به بیانی بهتر، اگر حجم یک فاز بیشتر شود، آن فاز به فاز پیوسته تبدیل می‌شود. در نتیجه نسبت آب به نفت می‌تواند نوع امولسیون را تغییر دهد. درصد آبی که در آن امولسیون آب در نفت به امولسیون نفت در آب تغییر می‌یابد، برش بحرانی آب^۲ نامیده می‌شود. او همچنین بیان کرد که به طور کلی در امولسیون‌هایی که با اختلاط آب و نفت خام و یا آلكالین و نفت خام ایجاد می‌شوند، برش بحرانی آب ۵۰٪ خواهد بود.

جانسون [۳] مکانیزم‌های تشکیل امولسیون آب در نفت را تشریح کرده‌اند. برای تشکیل این امولسیون‌ها، ابتدا سنگ آب دوست به نفت دوست تبدیل می‌شود. در این شرایط، فاز نفت که

ناپیوسته و غیر ترکنده بوده است، به فاز پیوسته تبدیل می‌شود که در نتیجه این فرآیند، مسیری برای حرکت نفت که قبل از آن به صورت به دام افتاده بوده است، ایجاد می‌شود. همچنین با کاهش کشش سطحی، امولسیون آب در نفت تشکیل می‌شود. شنگ [۷] تاثیر ترشوندگی سنگ را بر روی نوع امولسیون تشکیل شده در مخزن مورد بررسی قرار داد. در محیط متخلخل نفت دوست، تشکیل امولسیون آب در نفت راحت تر است. همچنین او به این نتیجه رسید که در سیستمی که شامل نفت سنگین است، تشکیل امولسیون آب در نفت بسیار معمول‌تر از تشکیل امولسیون نفت در آب است. شنگ علت این موضوع را چنین عنوان کرد که با توجه به گرانی بسیار بیشتر نفت خام نسبت به آب، قابلیت حرکت و برخورد قطرات آب در محیط نفتی بسیار کم می‌باشد. لذا در چنین شرایطی، نفت یک محیط پیوسته را تشکیل داده و قطرات آب به صورت امولسیون در آن باقی خواهد ماند. همچنین به طور کلی کاهش اندازه قطرات امولسیون با افزایش پایداری همراه است. لذا چنانچه قطرات امولسیون تشکیل شده به اندازه کافی کوچک باشند، پایداری امولسیون افزایش یافته و تولید نفت طی تشکیل امولسیون بهبود پیدا خواهد کرد [۸].

مهرانفر و غضنفری [۹] با استفاده از آزمایش‌های میکرومدل، مکانیزم‌های مختلف تولید نفت را طی فرآیند تزریق آلكالین و در شرایط ترشوندگی متفاوت تشریح کردند. آنها نیز کاهش کشش سطحی، تشکیل امولسیون و تغییر ترشوندگی را به عنوان عوامل اصلی تولید نفت معرفی کردند که هر کدام از این عوامل منجر به ایجاد پدیده‌های مختلفی می‌شود که آنها این پدیده‌ها را در میکرومدل مشاهده نمودند.

تا کنون به صورت پایه‌ای، تأثیر آسفالتین در نفت‌های سنتز شده و خام بر روی عملکرد مواد

1. Water-Oil Ratio: WOR

2. Critical Water Cut

سدیم هیدروکسید با غلظت ۵/۰٪ وزنی در آب مقطر است. سدیم هیدروکسید از ارزانهترین و پرکاربردترین مواد قلیایی است که علی‌رغم احتمال ایجاد آسیب سازندی طی واکنش با اجزای کربناته سنگ مخزن، به دلیل قابلیت بازی بسیار بالایی که در بین مواد قلیایی دارد و همچنین مسائل اقتصادی، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. لذا در این مطالعه از این ماده قلیایی استفاده شده است.

برای استخراج آسفالتین از روش ASTM (D2007-80) استفاده شد. در این فرآیند مشخص شد که درصد آسفالتین نفت خام استفاده شده، معادل ۴/۷۹٪ وزنی می‌باشد، لذا در تهیه نفت سنتز شده، میزان آسفالتین مورد استفاده معادل ۵٪ وزنی در نظر گرفته شد. برای تهیه محلول‌های سنتز شده، ابتدا تولوئن و نرمال هپتان با نسبت حجمی مورد نظر (۶۰٪ حجمی تولوئن + ۴۰٪ حجمی نرمال هپتان) با یکدیگر مخلوط شدند. پس از وزن کردن محلول حاصل، به میزان ۵٪ وزنی آسفالتین به آن افزوده شد و سپس محلول به مدت حداقل ۱ hr تکان داده شد به نحوی که کل آسفالتین موجود کاملاً در فاز نفت حل شد.

میکرومدل‌های شیشه‌ای

دو نوع میکرومدل برای بررسی فرآیندهای مختلف استفاده شده است. میکرومدل نوع اول، میکرومدل با طرح منظم است که با هدف بررسی مکانیزم‌های مختلف تزریق آکالین طراحی شده است و سعی بر این بوده است که این میکرومدل به اندازه کافی ساده باشد تا از عواملی همچون پیچیدگی‌های جریان و نسبت‌های متفاوت قطر حفره به گلوگاه صرف‌نظر شود.

جدول ۱ خواص نفت خام و سنتز شده مورد استفاده در آزمایش‌ها.

نوع نفت	درصد حجمی هپتان (%)	درصد حجمی تولوئن (%)	درصد وزنی آسفالتین (%)	چگالی (g/ml)
نفت خام	----	----	۴/۷۹	۰/۹۱۲
نفت سنتز شده	۴۰	۶۰	۵	۰/۷۸۹

1. Deposition
2. Precipitation
3. Parts Per Million

قلیایی در میکرومدل مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای و سدیم هیدروکسید به عنوان ماده قلیایی سعی شده است تا ضمن بررسی مکانیزم‌های تولید نفت تحت تزریق مواد قلیایی، عملکرد و تاثیر این مواد قبل و بعد از رسوب^۱ و ترسیب^۲ آسفالتین ارائه گردد.

روش و مراحل تحقیق

مواد مورد استفاده و آماده‌سازی آنها

در این مطالعه، و در تمامی آزمایش‌ها از آب نمک با نمک کلسیم کلراید و با غلظت ۲۰۰۰۰ ppm^۳ به عنوان آب همزاد در میکرومدل استفاده شده است. با توجه به دو ظرفیتی بودن یون کلسیم، احتمال آن که این یون بتواند بر روی عملکرد سدیم هیدروکسید تأثیرگذار باشد وجود دارد. همچنین یون کلسیم می‌تواند منجر به ترسیب بیشتر آسفالتین در محیط گردد. لذا برای بررسی فرآیندها، تنها از این نوع نمک استفاده شده است. چرا که با وجود کاهش عملکرد مثبت ماده قلیایی تزریقی، بررسی فرآیندها در حضور یک نوع نمک بهتر صورت می‌پذیرد. نفت خام مورد استفاده در آزمایش‌ها، نفت خام یکی از میداین مناطق نفت خیز جنوب است و برای ساخت محلول‌های سنتز شده از تولوئن (شرکت مرک) و نرمال هپتان (شرکت دایجونگ) با خلوص بیش تر از ۹۹٪ استفاده شده است. نفت سنتز شده حاوی تولوئن، هپتان و آسفالتین است. جدول ۱، خواص نفت خام و سنتز شده مورد استفاده در این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. محلول قلیایی تهیه شده برای انجام آزمایش‌ها، حاوی

اندازه کافی پایین است تا بتواند جریان آرام را در میکرومدل فراهم نماید. عدد موینگی^۱ در این نرخ تزریق معادل ۶-۱۰ است. با استفاده از دوربین (HLOT) با زوم تا ۵۰۰ برابر تصاویر مربوط به حرکت سیالات در میکرومدل ضبط و در کامپیوتر ذخیره گردید. جهت بهبود کیفیت تصاویر از نور پس زمینه (Tecl، ۱۸ وات) استفاده شد. همچنین در آزمایش‌هایی که نیاز به اندازه‌گیری افت فشار در طول فرآیند بود. برای اندازه‌گیری میزان افت فشار از فشارسنج دیفرانسیلی روزمونت (Rosemount) استفاده شده است. شکل ۲، شمایی از تجهیزات مورد استفاده را نشان می‌دهد.

میکرومدل نوع دوم، یک میکرومدل نامنظم با پیچیدگی بیشتر بوده که با هدف تحلیل داده‌های فشار و میزان تولید نفت ساخته شده است. خواص فیزیکی این میکرومدل‌ها، در جدول ۲ آورده شده است.

در شکل ۱، نمایی از طرح میکرومدل‌های ساخته شده نشان داده شده است.

فرآیند آزمایش‌ها

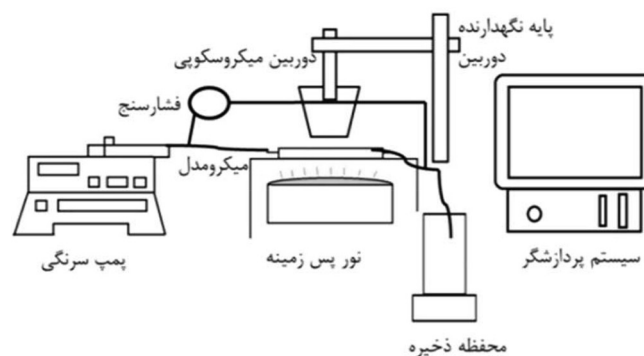
در آزمایش‌ها برای تزریق از پمپ سرنگی با دبی پایین (LA-100: Landgraf HLL) استفاده شده است. دبی مورد استفاده برای تزریق مواد قلیایی در این آزمایش‌ها ۰/۰۱ mL/hr در نظر گرفته شد که به

جدول ۲ مشخصات هندسی میکرومدل‌های ساخته شده

نوع میکرومدل	تخلخل (%)	متوسط قطر حفره‌ها (m μ)	عرض (cm)	طول (cm)	متوسط عمق حفره‌ها (m μ)
منظم	۳۵/۴	۱۶۲/۴	۲/۵	۵/۵	۸۰
نامنظم	۴۶	۲۹۰	۵	۱۰	۸۰



شکل ۱ نمایی از طرح میکرومدل‌های ساخته شده (الف) میکرومدل منظم، (ب) میکرومدل نامنظم.



شکل ۲ شماتیک تجهیزات آزمایش میکرومدل.

طراحی آزمایش نیازی به ایجاد رسوب و ترسیب آسفالتین نبود، هپتان تزریق نمی‌شد. پس از این فرآیند، محلول قلیایی حاوی سدیم هیدروکسید به میکرومدل تزریق می‌شد تا تأثیر آن بر روی نفت موجود در میکرومدل بررسی گردد. همچنین تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط انجام گرفت. دلیل انتخاب این دبی‌ها، به ویژه دبی تزریق قلیا، قرار گرفتن جریان سیال در محدوده موینه غالب است. در فرآیندهای آزمایشگاهی می‌بایست عدد موینگی در بازه 10^{-5} و 10^{-6} باشد. عدد موینگی متناظر با دبی $0/01 \text{ mL/hr}$ معادل 10^{-6} و عدد موینگی متناظر با دبی $0/1$ معادل 10^{-5} بوده است. دبی پایین‌تر برای جریان قلیا از آن جهت کمتر انتخاب شده است تا از غالب بودن نیروی موینه در این جریان اطمینان کامل وجود داشته باشد. در این مطالعه، روند انجام آزمایش‌ها مطابق جدول ۳ بوده است:

جدول ۳ آزمایش‌های طراحی شده و انجام گرفته.

شماره تست	ساختار هندسی میکرومدل	ترشوندگی میکرومدل	توضیحات
۱	منظم	آب‌دوست	تزریق آلکالین به نفت خام
۲	منظم	نفت‌دوست	تزریق آلکالین به نفت خام
۳	منظم	آب‌دوست	ایجاد ترسیب آسفالتین و سپس تزریق آلکالین به نفت خام
۴	منظم	نفت‌دوست	تزریق آلکالین به نفت سنتز شده
۵	نامنظم	آب‌دوست	تزریق آلکالین به نفت سنتز شده
۶	منظم	نفت‌دوست	ایجاد ترسیب آسفالتین و تزریق آلکالین به نفت سنتز شده
۷	نامنظم	آب‌دوست	تزریق آلکالین به نفت خام
۸	نامنظم	آب‌دوست	ایجاد ترسیب آسفالتین و سپس تزریق آب مقطر و پس از آن تزریق آلکالین به نفت خام

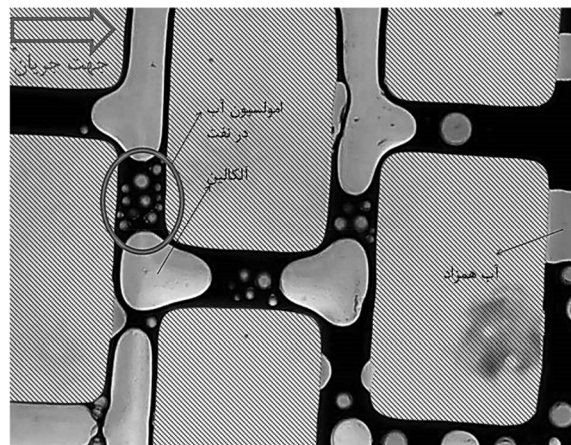
است، حاصل این فرآیند، تشکیل امولسیون‌های درجای آب در نفت است. عاملی که سبب تولید امولسیون گردیده است، نفوذ مولکول‌های سدیم هیدروکسید و به طور ویژه یون هیدروکسید به فاز نفتی است که این فرآیند در شرایطی که خاصیت اسیدی نفت به حد کافی بالا باشد، می‌تواند سبب تولید سورفکتانت درجا شود.

برای آزمایش‌های مختلف، پس از آماده‌سازی محلول‌ها، ابتدا آب نمک به عنوان آب همزاد به میکرومدل تزریق می‌گردید تا میکرومدل کاملاً از آب اشباع شود. پس از آن نفت (سنتز شده و یا خام) با دبی $0/1 \text{ mL/hr}$ به میکرومدل تزریق می‌شد و تا جایی تزریق نفت ادامه پیدا می‌کرد که درجه اشباع نفت در میکرومدل تغییری نکند. شرایط به دست آمده به عنوان شرایط اولیه برای همه آزمایش‌ها در نظر گرفته شد. پس از آن برای دستیابی به شرایط ترسیب و رسوب آسفالتین میکرومدل، هپتان به عنوان رسوب دهنده آسفالتین و با دبی $0/01 \text{ mL/hr}$ به میکرومدل تزریق می‌شد. مدت زمان تزریق نرمال هپتان به مدت یک ساعت در نظر گرفته شد. طی این مدت نرمال هپتان تقریباً به اندازه دو برابر حجم خالی میکرومدل، به آن تزریق شده است و می‌تواند سبب بروز مقدار قابل توجهی ترسیب آسفالتین در بسیاری از نقاط میکرومدل به آنها نفوذ کرده است شود. اگر در

ارائه و تحلیل نتایج

تأثیر مواد قلیایی بر روی نفت خام

با توجه به واکنش بین اسیدهای آلی و مواد قلیایی، در صورتی که سدیم هیدروکسید محلول در آب با نفت در تماس قرار گیرد، با اسیدهای آلی موجود در نفت واکنش می‌دهد و تشکیل سورفکتانت درجا می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده

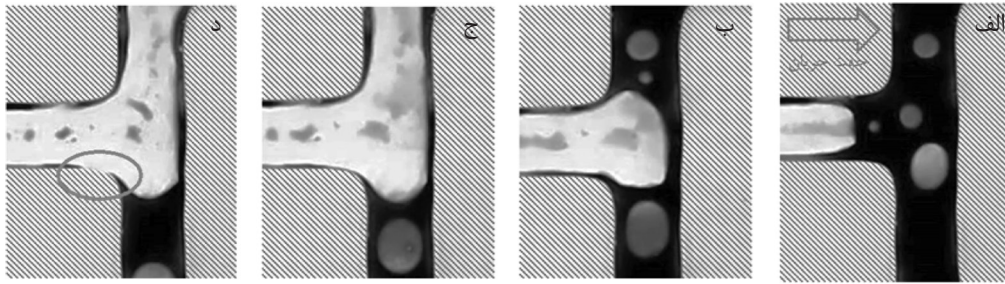


شکل ۳ تشکیل امولسیون آب در نفت در مرز آلکالین و نفت خام در میکرومدل آب دوست با طرح منظم (تست شماره ۱).

هستند که این نیز نشان دهنده واکنش پذیری بالای ماده قلیایی با نفت خام و بیانگر خاصیت بالای اسیدی نفت است. همچنین امولسیون تشکیل شده پایدارتر خواهد بود.

تغییر ترشوندگی سطح میکرومدل که روند آن در شکل ۴ نشان داده شده است، ناشی از کاهش کشش سطحی نفت و آب و همچنین تشکیل سورفکتانت درجا باشد. همان طور که در این شکل نشان داده شده است، در تماس آلکالین با نفت خام، پس از مدتی لایه نفتی چسبیده به سطح شیشه به مرور زمان نازک تر می شود. نازک تر شدن این لایه نشان از کاهش کشش سطحی بین فازهای آبی و نفتی دارد. با گذشت زمان، مقدار بیشتری از یون سدیم هیدروکسید در فاز نفت نفوذ می کند. نفوذ بیشتر یون هیدروکسید، به معنای واکنش بیشتر این یون با اسیدهای آلی موجود در نفت است. با افزودن شدن غلظت یون هیدروکسید در فاز نفت، شدت واکنشی که در رابطه ۱ نشان داده شد، افزایش پیدا می کند. حاصل این پدیده، تشکیل بیشتر سورفکتانت درجا است. با توجه به آن که یکی از نتایج تشکیل سورفکتانت، می تواند تغییر ترشوندگی باشد، لذا انتظار می رود که پس از مدتی که آلکالین با نفت در تماس است، در برخی از نقاط ترشوندگی سیستم از نفت دوست به آب دوست تغییر پیدا کند.

نوع امولسیون تشکیل شده، امولسیون آب در نفت خام است. تشکیل امولسیون آب در نفت در این سیستم با توجه به آن که محلول آبی که در آن ماده قلیایی حل شده است، بدون شوری بوده است، می تواند ناشی از غلظت نسبتا بالای سدیم هیدروکسید و واکنش پذیری بالای آن با نفت و همچنین نسبت کم آب به نفت سیستم نشان داده شده، باشد. همچنین با توجه به این شکل، تشکیل امولسیون بیشتر در نواحی با ترشوندگی نفت دوست بوده است. در واقع با توجه به پیوستگی فاز نفت و درصد کم آب در سیستم، امولسیون آب در نفت، امولسیون غالب بوده است. تشکیل امولسیون که نتیجه کاهش کشش سطحی می باشد، در شرایطی که آسفالتین در سیستم رسوب نکرده باشد می تواند بازده جابه جایی میکروسکوپی و ماکروسکوپی را به نحو قابل ملاحظه ای افزایش دهد. تشکیل امولسیون طی تزریق ماده قلیایی ناشی از به وجود آمدن مواد فعال سطحی و یا صابون های درجا می باشد. این نوع از سورفکتانت هایی که به صورت درجا تولید می شوند، کشش سطحی آب تزریقی و نفت موجود را به شکل قابل ملاحظه ای کاهش می دهند. با افزایش واکنش پذیری ماده قلیایی و نفت خام، میزان تشکیل امولسیون و پایداری آن افزایش خواهد یافت. به طور کلی، هرچه اندازه قطرات امولسیون تشکیل شده کوچک تر باشد، امولسیون پایدارتر خواهد بود [۹]. مطابق شکل ۳، ذرات امولسیون تشکیل شده کوچک

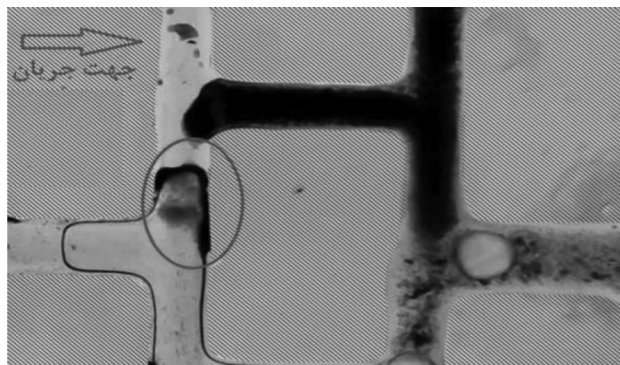


شکل ۴ فرآیند مرحله به مرحله تغییر ترشوندگی تحت تاثیر تزریق آلکالین به نفت خام در میکرومدل نفت دوست با طرح منظم (تست شماره ۲) (الف) لحظه تماس آلکالین با نفت موجود در حفره، (ب) ۳۰ s پس از ورود آلکالین، (ج) ۶۰ s پس از ورود آلکالین، (د) ۹۰ s پس از ورود آلکالین.

جدا شدن آسفالتین از نفت خام و تشکیل فاز جدید توسط آن را ترسیب می‌نامند. از طرفی اگر شرایطی از قبیل بزرگ شدن لخته‌های آسفالتینی و یا چسبندگی این ذرات در حفره‌ها فراهم شود تا ذرات ترسیب شده آسفالتین، امکان جا به جا شدن را نداشته باشند و به سطح سنگ بچسبند، رسوب رخ خواهد داد. در شرایطی که آسفالتین از قبل در میکرومدل ترسیب و رسوب کرده باشد، شرایط کاملاً متفاوت خواهد بود. شکل ۵، تزریق آلکالین به سیستم حاوی نفت با آسفالتین ترسیب کرده را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، ترسیب آسفالتین در ناحیه‌ای که با بیضی نشان داده شده است، موجب شده تا تولید نفت با محدودیت روبرو شود. اگر نفت خام آسفالتین ترسیب کرده داشته باشد، عملکرد مواد قلیایی محدود می‌شود. در این شرایط، شدت نفوذ یون هیدروکسید به فاز نفتی به شدت کاهش می‌یابد و به همین ترتیب تشکیل امولسیون و در نتیجه راندمان جاروبی کم خواهد شد.

افزایش تولید و بازیابی نفت، تحت تاثیر تغییر ترشوندگی از نفت دوست به آب دوست ناشی از دو مکانیزم است: مکانیزم اول تاثیر تراوایی نسبی است که سبب می‌شود تا نسبت تحرک پذیری سیستم سیالات کاهش پیدا کند و مکانیزم دیگر تغییر شرایط (شیفت پیدا کردن) نمودار توزیع موینگی است. امولسیون‌های آب در نفت در پیشانی جبهه جابه‌جا شونده تشکیل می‌شوند و قطرات آب در مرکز حفرات قرار دارند و در این نواحی، میکرومدل نفت دوست است. با گذشت زمان و با افزایش درصد آب موجود در سیستم، امولسیون نفت در آب تشکیل خواهد شد و تماس محلول قلیایی با دیواره نفت دوست، سبب تغییر ترشوندگی سطح دیواره از نفت دوست به آب دوست خواهد شد.

در طی فرآیندهای مختلفی از جمله تغییر دما، تغییر فشار و یا تغییر در ترکیبات موجود در سیال مخزن، آسفالتینی که به صورت معلق و یا محلول در نفت وجود دارد، از فاز نفت جدا می‌گردد. فرآیند



شکل ۵ تاثیر وجود آسفالتین ترسیب کرده از نفت خام در میکرومدل آب دوست با طرح منظم بر روی عملکرد آلکالین (تست شماره ۳).

بیشتری نسبت به نفت خام دارد [۱۰].

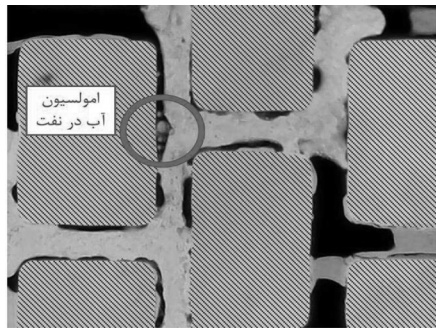
افزایش خاصیت آروماتیکی نفت موجود منجر به واکنش پذیری بیشتر آسفالتین خواهد شد [۱۱]. اما از آن جا که در ترکیب نفت خام علاوه بر آسفالتین، سایر اجزا نیز دارای ترکیبات اسیدی است، میزان واکنش پذیری ماده قلیایی با نفت سنتز شده از نفت خام کمتر است. این موضوع سبب می شود تا کاهش کشش سطحی سیستم محلول قلیایی - نفت سنتز شده از کاهش کشش سطحی محلول قلیایی - نفت خام کمتر باشد. این نکته را باید در نظر داشت که آسفالتین موجود در نفت سنتز شده دارای ساختار پایدار متفاوتی نسبت به آسفالتین موجود در نفت خام دارد. وجود آسفالتین محلول در نفت سنتز شده، اساساً واکنش پذیری مولکول های آن به ویژه اجزای اسیدی آن را با ترکیبات قلیایی افزایش می دهد [۱۲].

اما مطابق نتایج و شکل های به دست آمده، حتی افزایش واکنش پذیری آسفالتین محلول در نفت سنتز شده نسبت به آسفالتین موجود در نفت خام نیز، سبب واکنش پذیری بیشتر ماده قلیایی با نفت سنتز شده نگردیده است. این موضوع می تواند ناشی از وجود سایر ترکیبات اسیدی موجود در نفت خام باشد که می توانند به ویژه در شرایطی که آسفالتین دچار ترسیب نشده باشد، با ماده قلیایی واکنش دهند. در شکل ۶، بیضی نفت سنتز شده تولید نشده را نشان می دهد. همچنین در این شکل، مقدار بسیار کم امولسیون تشکیل شده در تماس آلکالین و نفت سنتز شده توسط دایره نشان داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، در این حالت، حتی با وجود درصد بالای فاز آب، امولسیون تشکیل شده، از نوع آب در نفت است که نشان می دهد، تاثیر ترشوندگی میکرومدل در ناحیه تشکیل امولسیون نفت دوست است، عامل تاثیرگذار در تعیین نوع امولسیون بوده است.

یکی از عواملی که می تواند سبب بروز مشکل در حین تزریق آلکالین به سیستم حاوی آسفالتین ترسیب کرده شود، وجود آسفالتین به عنوان مانعی برای نفوذ یون هیدروکسید به فاز نفت است. آسفالتین ها که تمایل زیادی به نزدیک شدن به سطح تماس دارند، در سطح تماس دو فاز موجود در سیستم قرار می گیرند. قرارگیری آسفالتین ترسیب کرده جدا شده از فاز نفت، که با وجود داشتن ترکیبات اسیدی واکنش پذیری کمی با مواد قلیایی در حالت جامد دارد، بر سر راه این مواد و به ویژه یون هیدروکسید، سبب می شود تا واکنش پذیری ماده قلیایی با فاز نفت کاهش یابد. از طرفی جدا شدن آسفالتین از فاز نفت، به معنای کم شدن مقدار ترکیبات اسیدی در فاز نفت نیز می باشد. با کاهش خاصیت اسیدی فاز نفت، واکنش پذیری آلکالین نیز با این فاز کاهش می یابد و در نهایت سبب بروز مشکل در عملکرد بهینه این مواد می گردد.

تاثیر مواد قلیایی بر روی نفت سنتز شده

جهت بررسی دقیق تر تاثیر آسفالتین بر روی عملکرد مواد قلیایی، نفت سنتز شده حاوی ۶۰٪ حجمی تولوئن، ۴۰٪ حجمی هپتان و ۵٪ وزنی آسفالتین به میکرومدل تزریق شد. نفت سنتز شده علی رغم آن که خاصیت اسیدی زیادی ندارد، اما به واسطه وجود آسفالتین محلول در ساختار خود، دارای ترکیبات اسیدی محدودی است. نتایج آزمایشگاهی نشان دادند که در شرایطی که تنها جزء نفتی موجود در سیستم آسفالتین باشد، تشکیل امولسیون به شدت محدود می شود. این موضوع می تواند ناشی از مقدار بسیار کم اسیدهای آلی موجود در نفت سنتز شده نسبت به نفت خام باشد. کمتر بودن اسیدهای آلی در فاز نفت سنتز شده، واکنش پذیری این فاز را با آلکالین محدود می کند. این در حالی است که به طور کلی نفت سنتز شده به دلیل داشتن مقدار قابل توجهی تولوئن (۶۰٪ حجمی) در خود، ماهیت آروماتیکی

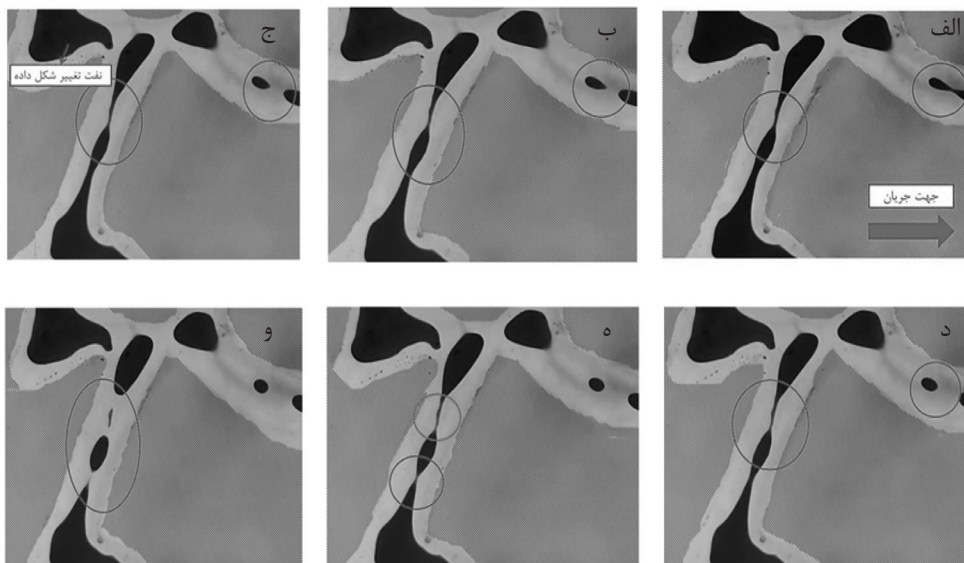


شکل ۶ تشکیل بسیار کم امولسیون در تماس آلكالین با نفت سنتز شده در میکرومدل نفت‌دوست با طرح منظم (تست شماره ۴).

آن که میزان تشکیل امولسیون در تماس آلكالین با نفت سنتز شده کم است، اما در شرایطی که نفت سنتز شده کماکان حاوی آسفالتین باشد، می‌توان انتظار تشکیل امولسیون را به صورت محدود داشت. شکل ۷، نحوه تشکیل امولسیون نفت در آب را در میکرومدل نامنظم آب‌دوست نشان می‌دهد. همانطور که در شکل توسط دایره‌های قرمز رنگ نشان داده شده است، با گذشت زمان ضخامت لایه نفتی پیوسته در برخی نقاط کاهش یافته که سبب می‌شود تا در نهایت نفت به صورت قطراتی معلق در آب در آید. این فرآیند که ناشی از کاهش کشش سطحی بین آلكالین و نفت است، سبب تشکیل امولسیون نفت در آب می‌گردد.

مطابق آن چه در شکل ۶ مشاهده می‌شود، با وجود آن که میزان تشکیل امولسیون بسیار محدود بوده است، نفت سنتز شده به خوبی توسط آلكالین جا به جا شده است. ضخامت نفت چسبیده شده به دیواره در بسیاری از نقاط بسیار کم است. با وجود آن که آلكالین نتوانسته است در بسیاری از نقاط تغییر ترشوندگی ایجاد کند، اما کاهش کشش سطحی به اندازه‌ای بوده است که در بسیاری از نقاط باعث جا به جایی میکروسکوپی مناسبی شده است.

از طرفی تشکیل امولسیون نفت در آب، در میکرومدل‌های آب‌دوست نشان می‌دهد که ترشوندگی سنگ و میکرومدل می‌تواند از مهمترین عوامل تعیین کننده نوع امولسیون باشد. با وجود



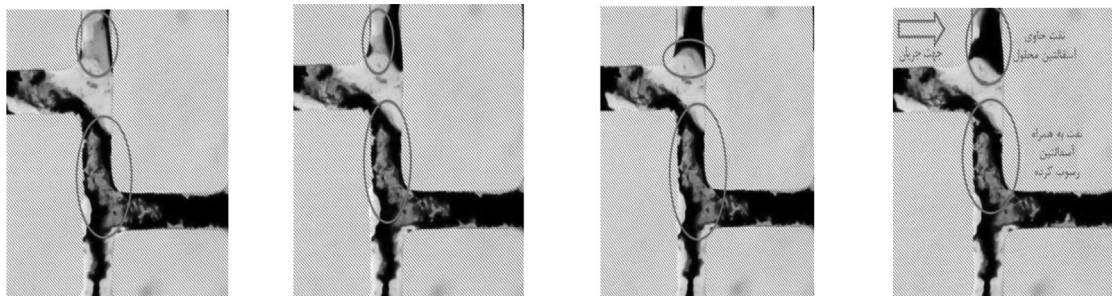
شکل ۷ فرآیند تشکیل امولسیون نفت در آب حین تزریق آلكالین به نفت سنتز شده در میکرومدل نامنظم آب‌دوست (تست شماره ۵) (الف) لحظه اولیه، (ب) ۳۰ s پس از شروع، (ج) ۶۰ s پس از شروع، (د) ۹۰ s پس از شروع، (ه) ۱۲۰ s پس از شروع، (و) ۱۵۰ s پس از شروع.

اسیدی است، آسفالتین می‌باشد. آسفالتین هم همانگونه که پیشتر گفته شد، در شرایطی می‌تواند واکنش‌پذیری خوبی با آلکالین داشته باشد که به صورت محلول در نفت باشد. در غیر این صورت اگر ترسیب آسفالتین اتفاق افتد، نه تنها وجود آسفالتین نمی‌تواند باعث بهبود عملکرد آلکالین گردد، که حتی به عنوان مانعی عمل خواهد کرد. که تولید را با مشکلات بیشتری مواجه خواهد کرد. عدم تغییر در میزان نفت جابه‌جا شده در این ناحیه نشان از عدم کارایی مناسب آلکالین داشته است. در واقع در نفت سنتز شده که آسفالتین آن دچار ترسیب شده است، جدا شدن آسفالتین محلول به صورت یک فاز مجزا سبب شده است که میزان واکنش‌پذیری ماده قلیایی با نفت سنتز شده آروماتیکی به حداقل مقدار خود برسد، چرا که آسفالتین که تنها جزء اسیدی نفت سنتز شده بوده است، به صورت جدا و ترسیب شده در سیستم وجود دارد و این سبب می‌شود تا واکنش‌پذیری آن با ماده قلیایی کاهش یابد. از آن جا که ماده قلیایی قابلیت انحلال مجدد آسفالتین در خود را ندارد، لذا ترسیب آسفالتین مانع عملکرد مناسب ماده قلیایی خواهد شد.

در شکل ۸، علاوه بر وجود ناحیه‌ای که آسفالتین ترسیب کرده است، ناحیه نیز وجود دارد که آسفالتین کماکان در آن به صورت محلول باقیمانده است. این ناحیه نیز توسط دایره‌هایی قرمز رنگ مشخص شده است.

در میکرومدل‌های نامنظم به دلیل وجود پیچیدگی‌های بیشتر نسبت به میکرومدل‌های منظم، امکان تشخیص برخی دیگر از مکانیزم‌های تولید نفت بهتر فراهم می‌شود. علاوه بر تشکیل امولسیون، یکی دیگر از مکانیزم‌هایی که موجب بهبود تولید نفت تحت تزریق آلکالین می‌شود، تغییر شکل نفت به تله افتاده است. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است، در صورتی که کشش سطحی نفت و فاز آبی به اندازه کافی کم باشد، نفت می‌تواند به راحتی تغییر شکل داده و در حفرات مختلف جای گیرد. این تغییر شکل باعث می‌شود تا میزان به دام افتادن نفت در فرآیند تزریق آلکالین به شدت کم شود. در چنین شرایطی، اگر نفت تحت نیروی ویسکوز بسیار اندکی قرار گیرد، از حفرات مختلف عبور می‌کند و این باعث جابه‌جایی و انتقال بهتر نفت و در نهایت افزایش تولید خواهد شد.

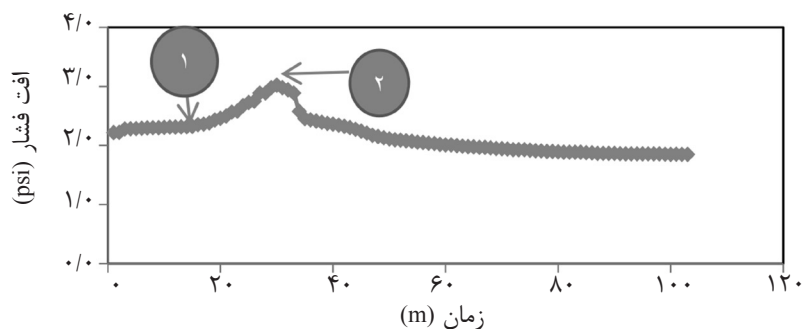
برای بررسی کامل‌تر تاثیر آسفالتین ترسیب شده، در سیستم حاوی نفت سنتز شده آسفالتین ترسیب داده شد. همان‌طور که در شکل ۸ توسط دایره‌های قرمز رنگ نشان داده شده است، در شرایطی که آسفالتین دچار ترسیب شده است، آلکالین نتوانسته است تاثیر خاصی بر روی تولید نفت سنتز شده داشته باشد. در شرایطی که نفت موجود در سیستم سنتز شده باشد، امکان آنکه رسوب آسفالتین تاثیر منفی بیشتری بر کارایی آلکالین بگذارد، در مقایسه با نفت خام بیشتر است. چرا که در نفت‌های سنتز شده تنها جزئی که دارای مقداری ترکیب



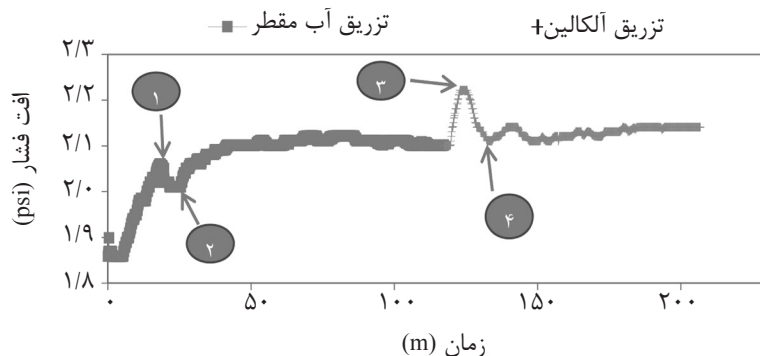
شکل ۸ تاثیر آلکالین بر نفت سنتز شده به همراه آسفالتین محلول و ترسیب کرده در میکرومدل منظم نفت‌دوست (تست شماره ۶) (الف): لحظه شروع تماس آلکالین با نفت سنتز شده، (ب): ۲۰ پس از تماس، (ج): ۴۰ پس از تماس، (د): ۶۰ پس از تماس.

چرا که گراندروی امولسیون تشکیل شده به مراتب از گراندروی نفت خام به تنهایی بیشتر است. همین موضوع است که سبب راندمان جاروبی مناسب برای فرآیند تزریق آلكالین می‌باشد. ناحیه دوم که مشخص شده است (شروع از شماره ۲)، مربوط به زمان میانشکنی^۱ می‌شود. با رسیدن سیال تزریقی به انتهای مسیر، افت فشار سیستم به صورت ناگهانی افت پیدا می‌کند. در واقع پس از میانشکنی، سیال مسیر مشخصی برای عبور یافته است که همین باعث می‌شود تا افت فشار در طول سیستم کاهش پیدا کند.

در شرایطی که آسفالتین در سیستم حاوی نفت خام رسوب کند، رفتار فشاری سیستم نیز طی تزریق آب مقطر و یا آلكالین کاملاً متفاوت خواهد بود. شکل ۱۰، رفتار فشاری سیستمی حاوی نفت خام به همراه آسفالتین رسوب کرده در میکرومدل نامنظم را نشان می‌دهد که تحت تزریق آب مقطر و پس از آن تحت تزریق آلكالین قرار گرفته است.



شکل ۹ نمودار فشار بر حسب زمان تزریق آلكالین به نفت خام در میکرومدل نامنظم آب-دوست. ۱- تاثیر واکنش آلكالین و نفت، ۲- لحظه میانشکنی (تست شماره ۷)



شکل ۱۰ نمودار فشار بر حسب زمان برای تزریق آب مقطر و آلكالین به سیستم حاوی نفت خام و آسفالتین رسوب کرده در میکرومدل نامنظم آب دوست (تست شماره ۸).

فشار) و جابه‌جایی این ذرات چسبیده شده به سطح تحت نیروی ویسکوز و باز شدن مجدد مسیر (عامل کاهش فشار) است. تکرار این فرآیند سبب به وجود آمدن چنین نوساناتی در رفتار فشاری سیستم می‌شود. از طرفی مقدار و اندازه این نوسانات در تزریق آلكالین بیشتر از تزریق آب مقطر می‌باشد. علت اصلی این موضوع نیز تشکیل جزئی امولسیون می‌باشد. امولسیون طی دو فرآیند چسبندگی به سطح و به دام افتادگی سبب افت فشار سیستم می‌شوند. همین دو مکانیزم سبب افت فشار در سیستم‌های حاوی ذرات ترسیب شده آسفالتین نیز می‌شود. البته باید این نکته را در نظر داشت که رسوب آسفالتین، با محدود کردن مسیر حرکت سیال، امکان به دام افتادن امولسیون را افزایش خواهد داد. لذا فرآیند افزایش فشار ناشی از رسوب آسفالتین و تشکیل امولسیون در یک سو عمل می‌کنند و شدت افت فشار در صورتی که هر دو پدیده رخ دهد، زیاد می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، با استفاده از میکرومدل‌های شیشه‌ای با طرح منظم و نامنظم، طی انجام آزمایش‌های مختلف تأثیر ترسیب آسفالتین نیز بر روی کارایی این مواد مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفت. در انجام آزمایش‌ها از دو نوع نفت سنتز شده و نفت خام استفاده شد که نتایجی که از این دو نوع نفت به دست آمد تقریباً مشابه یکدیگر بودند. مهمترین نتایجی که در آزمایش‌های مربوط به این مطالعه به دست آمد شامل موارد زیر است:

- در تزریق آلكالین به نفت‌های سنتز شده در مقایسه با نفت‌های خام، میزان تشکیل امولسیون، به علت کمتر بودن اجزای اسیدی در نفت سنتز شده، کمتر است. این در شرایطی است که به طور کلی واکنش‌پذیری ترکیباتی با خاصیت آروماتیکی بالا (مثل نفت سنتز شده) بیشتر از نفت‌های

مطابق شکل ۱۰، ناحیه اول لحظه میانشکنی آب مقطر را نشان می‌دهد. لحظه میانشکنی با افت فشار بسیار زیادی همراه است. این افت فشار ناشی از رسیدن سیال جا به جا کننده به انتهای مسیر است، چرا که با رسیدن به انتهای میکرومدل، فشار مویینه به صورت ناگهانی افت پیدا می‌کند. اما در ناحیه دوم افت فشار پس از کاهش ناشی از میانشکنی آب، مجدداً افزایش پیدا می‌کند. یکی از دلایل این پدیده، گرفتگی حفرات و مسیرهای عبوری سیال است. از آنجا که آسفالتین در این فرآیندها، دچار ترسیب شده است، زمانی که تزریق آب مقطر ادامه پیدا می‌کند، ذرات ترسیب شده آسفالتین جا به جا می‌شوند. جابه‌جایی ذرات آسفالتین منجر به افزایش امکان گرفتگی حفرات می‌شود. ناحیه بعدی که قابل تشخیص است، لحظه تزریق آلكالین است. تزریق آلكالین به سیستم به معنای ورود یک فاز جدید به سیستم است. با افزایش تعداد فاز های موجود در سیستم، افت فشار نیز افزایش خواهد یافت. آلكالین پس از تزریق، به دنبال یافتن مسیر جدیدی خواهد بود که از آن عبور کند. عبور آلكالین از مسیرهای جریانی متفاوت دیگر عاملی است که منجر به افزایش افت فشار می‌شود. فرآیند افزایش افت فشار تا لحظه میانشکنی آلكالین افزایش پیدا می‌کند. پس از لحظه میانشکنی، مجدداً افت فشار سیستم به صورت ناگهانی افت پیدا خواهد کرد. اما این روند پایدار نیست. پس از مدتی، مجدداً افت فشار سیستم افزایش پیدا می‌کند. که این افزایش افت فشار تحت تأثیر فرآیند رسوب ذرات آسفالتین است. در این مرحله علاوه بر رسوب ذرات آسفالتین به عنوان عامل اصلی، تشکیل جزئی امولسیون نیز باعث افزایش افت فشار می‌شود.

نکته دیگر میزان نوسان فشار در فرآیند تزریق آب مقطر و آلكالین است. نوسان در رفتار فشاری سیستم نفت خام به همراه آسفالتین رسوب کرده، ناشی از جذب آسفالتین به سطح شیشه میکرومدل و محدود شدن مسیر جریان سیال (عامل افزایش

با نفت، کاهش یابد.
- ترسیب آسفالتین و تشکیل امولسیون تاثیر زیادی بر رفتار فشاری فرآیند تزریق آلكالین دارند. وجود آسفالتین و رسوب گذاری آن سبب به وجود آمدن نوسان در رفتار فشاری سیستم می گردد. ترسیب آسفالتین سبب گرفتگی حفرات می شود، که گرفتگی و باز شدن مجدد حفرات سبب ایجاد نوسان می شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می دانند تا از شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب که امکان انجام آزمایش ها را با حمایت و تهیه نفت خام میسر کرد، قدردانی به عمل آورند. از همکارانی که ما را در مراحل مختلف ساخت میکرومدل ها، آماده سازی مواد و تجهیزات مورد نیاز و نیز انجام آزمایش ها یاری کردند، کمال سپاس و تشکر را داریم.

پارافینی یا نفت های با خاصیت آروماتیکی پایین است. کمتر بودن میزان تشکیل امولسیون به معنای واکنش پذیری کمتر آلكالین و در نتیجه تاثیر کمتر این فرآیند است. لذا میزان افزایش برداشت نفت سنتز شده طی تزریق آلكالین، کمتر از میزان ازدیاد برداشت نفت خام خواهد بود.
- ترسیب آسفالتین به شدت بر روی عملکرد آلكالین تاثیرگذار است. این پدیده سبب کاهش میزان نفوذ یون هیدروکسید به نفت می شود که این باعث عدم کارایی مناسب آلكالین در فرآیند کاهش کشش سطحی می شود. آسفالتین ترسیب کرده، به صورت یک فاز جامد، با قرار گرفتن در سطح تماس سیال تزریقی و نفت از نفوذ مولکول های ماده قلیایی جلوگیری کرده و باعث کاهش عملکرد مثبت آن می شود. از طرفی ترسیب آسفالتین موجب می شود تا میزان ترکیبات اسیدی موجود در نفت کاهش یافته و در نتیجه واکنش پذیری ماده قلیایی

مراجع

- [1]. Samanta A., Ojha K. and Mandal A., "Interactions between acidic crude oil and alkali and their effects on enhanced oil recovery", Energy and Fuels, Vol. 25, No. 4, pp. 1642-1649, 2011.
- [2]. Jennings Jr H. Y., Johnson Jr C. E. and McAuliffe C. D., "A caustic waterflooding process for heavy oils", Journal of Petroleum Technology, SPE-4741-PA, Vol. 26, No. 12, p. 1344, 1974.
- [3]. Johnson Jr C. E., "Status of caustic and emulsion methods", Journal of Petroleum Technology, Vol. 28, No. 01, pp. 85-92, 1976.
- [4]. Ge J., Feng A., Zhang G., Jiang P., Pei H., Li R. and Fu X., "Study of the factors influencing alkaline flooding in heavy-oil reservoirs", Energy and Fuels, Vol. 26, pp. 2875-2882, 2012.
- [5]. Mayer E. H., Berg R. L., Carmichael J. D. and Weinbrandt R. M. "Alkaline injection for enhanced oil recovery-A status report", Journal of Petroleum Technology, Vol. 35, No. 01, 209-221, 1983.
- [6]. Srisuriyachai F., "Evaluation of alkali flooding combined with intermittent flow in carbonate reservoir", (Ph.D.Thesis), University of Bologna, Bologna, Italy, 2008.
- [7]. Sheng J. J., "Modern chemical enhanced oil recovery – theory and practice", In: Sheng, J.J. (Ed.), Alkaline-Surfactant Polymer Flooding. Elsevier Inc., USA, pp. 501-567, 2011.
- [8]. Tadros T. F., "Emulsion formation and stability", John Wiley & Sons, 2013.
- [9]. Mehranfar A. and Ghazanfari M. H. "Investigation of the microscopic displacement mechanisms and macroscopic behavior of alkaline flooding at different wettability conditions in shaly glass micromodels", Journal of

Petroleum Science and Engineering, Vol. 122, pp. 595-615, 2014.

[10]. Angle C. W., Hamza H. A. and Dabros T., "Size distributions and stability of toluene diluted heavy oil emulsions", AIChE Journal, Vol. 52, No. 3, pp.1257-1266, 2006.

[11]. McLean, J. D. and Kilpatrick P. K., "Effects of asphaltene aggregation in model heptane-toluene mixtures on stability of water-in-oil emulsions", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 196, No. 1, pp. 23-34, 1997.

[12]. Tumanyan B. P., Petrukina N. N. and Allogulova K. O., "Stability of Petroleum Asphaltene Fractions in Model Hydrocarbon Systems", Chemistry and Technology of Fuels and Oils, Vol. 50, No. 1, pp. 28-38, 2014.