پژوهش نفت شماره ۱۴۱، خرداد و تیر ۱۴۰۴، صفحه ۵۹-۴۲

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر بر کشش بین‌سطحی نفت-آب در سیلاب‌زنی آب هوشمند به نفت حاوی آسفالتین

سید علی حسینی*[۱]، خلیل شهبازی[۱] و میلاد غفوری[۲]

۱- دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

۲- اداره بهره‌برداری، شرکت بهره‌برداری نفت و گاز مارون، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۲۰

چکیده

آسفالتین‌ها باعث مشکلات زیادی در بخش‌های بالادستی و پایین‌دستی صنعت نفت می‌شوند. از طرفی، تولید آب همراه نفت در مخازن نفتی در دوره دوم تولید که دارای آبده فعال یا تحت عملیات سیلاب‌زنی هستند، یکی از چالش‌های اصلی تولیدی را تشکیل می‌دهد. در چنین شرایطی تشکیل امولسیون آب در نفت اجتناب‌ناپذیر بوده و آسفالتین به‌عنوان پایدارکننده امولسیون عمل می‌کند. درنتیجه بیشتر مقالات تنها به مشکلات ناشی از رسوب و ته‌نشینی آسفالتین در شرایط تشکیل امولسیون آب و نفت پرداخته‌اند. در مقابل، تعداد کمی از کارهای انجام‌شده برروی برهم‌کنش سیال-سیال آب و نفت در هنگام تزریق آب به مخازن نفتی دارای آسفالتین متمرکز شده‌اند. بر این اساس، این پژوهش به مطالعه آزمایشگاهی کشش سطحی بین نفت آسفالتین‌دار و آب هنگام تزریق آب هوشمند می‌پردازد. جهت نیل به این هدف برهم‌کنش‌های سیال-سیال با دقت مورد بررسی قرارگرفته و سپس تأثیر پارامترهای مؤثر نظیر شوری و ترکیب یونی آب و نوع نمک، نقش زمان، اثر نفت مدل، نوع آسفالتین و حضور یا عدم حضور نفتنیک اسید بر کشش بین‌سطحی آب هوشمند و نفت حاوی آسفالتین مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان داد که کم‌ترین میزان کشش سطحی برای نمک‌های منیزیم کلرید، کلسیم کلرید و سدیم سولفات در شوری‌های پایین به‌دست می‌آید. در تمام شوری‌ها به‌جز آب دریای دو بار رقیق‌شده، کشش بین‌سطحی بعد از گذشت ده روز مقادیر بیشتری را نسبت به زمانی که نفت و آب تازه در کنار هم قرار داده‌شده، نشان داد. با حضور نفتنیک اسید در فاز توده نفتی نسبت به آسفالتین تنها، کاهش بیشتری از کشش بین‌سطحی دیده شد. همچنین، کمترین میزان کشش بین‌سطحی در شوری آب دریا مشاهده شد. یافته‌های این مطالعه ادبیات حوزه‌ی ازدیاد برداشت در مطالعات میدانی برروی نفت‌های آسفالتین‌دار و آب هوشمند را غنی‌تر خواهد نمود.

کلمات کلیدی: آسفالتین، کشش بین‌سطحی، سیلاب‌زنی آب، آب هوشمند، ازدیاد برداشت نفت

*مسؤول مکاتبات

آدرس الکترونیکی dralihosseini1994@gmail.com

شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2024.5422.3412)

مقدمه

یکی از روش‌هایی که در ازدیاد برداشت نفت با آب پیشنهاد می‌شود، تغییر ویژگی‌های آب تزریقی برای افزایش بازیافت است که عموماً در آن، برداشت نفت با تغییر شیمی آب تزریقی افزایش می‌یابد [۱]. در این رویکرد با تغییر شوری و یا تغییر هوشمندانه یون‌های موجود در آب تزریقی، تأثیراتی که آب، نفت و سنگ برروی‌هم می‌گذارند را تغییر می‌دهند که در نهایت منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود. افزایش بازیافت نفت با استفاده از آب کم شور اولین بار توسط برنارد مورد استفاده قرار گرفت [۲]. شرکت‌های تجاری نیز تحقیقات خود را در این زمینه انجام داده‌اند و هرکدام نام‌های مختلفی را برای آن برگزیده‌اند. شرکت نفت بریتانیا از اصطلاح آب کم شور[1]، اکسون موبیل[2] از مدیریت یونی پیشرفته[3] و شرکت شل از آب طراحی شده[4] برای نام‌گذاری این پدیده استفاده کردند [۳]. براساس حلالیت، آسفالتین‌ها اجزایی از نفت خام هستند که در آلکان‌های سبک مانند پنتان، هپتان و هگزان رسوب می‌کنند اما در حلال‌های آروماتیکی مانند تولوئن و بنزن حل می‌شوند. اجزای آسفالتینی بیشترین میزان هتروواتم‌های موجود در نفت را به‌خود اختصاص می‌دهند. از نظر قطبیت، هیدروکربن‌های اشباع و آروماتیک، غیر قطبی یا دارای قطبیت متوسطی می‌باشند اما آسفالتین‌ها و رزین‌ها قطبی می‌باشند [۴]. آسفالتین‌ها دارای اسکلت هیدروکربنی و شامل گروه‌های قطبی دارای عناصر اکسیژن، نیتروژن و گوگرد هستند. ازآنجایی‌که گروه‌های قطبی آب‌دوست و بخش هیدروکربنی آب‌گریز می‌باشند و هر دو این عوامل در مولکول‌های آسفالتین وجود دارند؛ بنابراین، آسفالتین‌ها مانند مواد فعال‌سطحی عمل می‌کنند [۵]. به این معنا که مانند ماده فعال‌سطحی تمایل دارند جذب سطح مشترک نفت و آب شوند و سر آب‌دوست به‌سمت فاز آبی و سر آب‌گریز به‌سمت ماده نفتی جهت‌گیری داشته باشد. چنان‌چه آسفالتین‌ها قطبیت کافی داشته باشند به‌عنوان ماده فعال‌سطحی عمل کرده و کشش بین‌سطحی آب و نفت را کاهش می‌دهند [۶ و ۷]. رائو و همکاران آب مخزن را به‌وسیله آب مقطر تا یک مقدار مشخص (۶۰٪ آب مخزن در کنار ۴۰٪ آب مقطر) رقیق کردند و کاهش ۱۰٪ در مقدار کشش بین‌سطحی را مشاهده کردند [۸]. الاطیبی و ناصرالدین کشش بین‌سطحی آب و نفت را با استفاده از روش قطره آویزان اندازه‌گیری کردند. طبق مشاهدات آن‌ها، کاهش غلظت نمک باعث افزایش کشش بین‌سطحی می‌شود و همین‌طور یک نقطه بحرانی وجود دارد که در آن کم‌ترین مقدار کشش بین‌سطحی برای افزایش بازیافت نفت دیده می‌شود [۹]. یوسف و همکاران برای آب دریا تأثیر بسیار کم در میزان کشش بین‌سطحی گزارش دادند و نتوانستند تأثیر کشش بین‌سطحی را به‌خوبی در این مورد بیان کنند، اما برای آب دریای ده‌بار رقیق‌شده افزایش بازیافت نفت و کاهش کشش بین‌سطحی را مشاهده کردند [۱۰]. لشکربلوکی و همکاران تأثیر نمک‌های سدیم کلرید، کلسیم کلرید و منیزیم کلرید را بر خواص سطحی آب، نفت و سنگ بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در شوری‌های پایین کاتیون‌های دوظرفیتی تأثیر حضور آسفالتین در کاهش کشش بین‌سطحی بیشتر از رزین است و هرچه غلظت بیشتر باشد تأثیر رزین بیشتر از آسفالتین هست [۱۱]. معینی و همکاران کشش بین‌سطحی را برای نفت سنگین به‌عنوان تابعی از غلظت نمک، فشار و دما با استفاده از روش قطره آویزان و همین‌طور تأثیر یون‌های تک‌ظرفیتی و دو ظرفیتی را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که بین مواد فعال‌سطحی در نفت و نمک در فاز آبی برهم‌کنش‌هایی به‌وجود می‌آید که میزان کشش بین‌سطحی به این برهم‌کنش‌ها بستگی دارد.

1. Low Salinity Water
2. ExxonMobil
3. Advanced Ion Management
4. Designer Water

پژوهش نفت شماره ۱۴۱، خرداد و تیر ۱۴۰۴، صفحه ۵۹-۴۲

معینی نشان داد که افزایش دما کشش بین‌سطحی را به‌صورت خطی کاهش می‌دهد [۱۲]. مرادی و همکاران تأثیر شوری و دما را برروی خواص سطحی بررسی کردند. مشاهدات آن‌ها نشان می‌داد که شوری‌های پایین شرایط مطلوب‌تری را برای تشکیل یک فیلم ویسکوالاستیک فراهم می‌کند. از طرفی با افزایش شوری رشد الاستیسیته کم‌تر می‌شود چراکه با افزایش شوری مخصوصاً در غلظت‌های بالای مواد نفتنیکی، بین لایه دوگانه و مواد قطبی یک رقابت به‌وجود می‌آید چراکه در شوری‌های بالا نفتنیک اسیدها تمایل به تفکیک شدن در فاز آبی و تشکیل نمک‌های نفتنی دارند [۱۳]. این مواد همچنین مواد فعال‌سطحی می‌باشند و جذب آن‌ها برروی سطح تماس آب و نفت مانع جذب آسفالتین‌ها برروی سطح شده و ویسکوالاستیسیته سطح را کمتر می‌کند. براساس نتایج آن‌ها، یک نقطه بهینه وجود دارد که در این نقطه هر دو جذب آسفالتین و مواد نفتنیک برروی سطح تماس اتفاق می‌افتد که به‌دلیل نیروی محرک آسفالتین بیشتر است. وانگ و همکاران بیان کردند زمانی‌که آسفالتین و نفتنیک اسید به‌صورت هم‌زمان در سطح تماس وجود دارند، سختی[1] فیلم بین فاز نفتی (تولوئن) و آب کمتر از حالتی است که تنها آسفالتین در فاز نفتی وجود دارد [۱۴]. عامری و همکارن به مطالعه تأثیر حضور نمک‌های مختلف در میزان رسوب آسفالتین و همین‌طور فشار بالایی محدوده رسوب[2] پرداختند. در دمای مخزن فشار بالایی محدوده رسوب آسفالتین را با استفاده از کشش بین‌سطحی برای نمک‌های مختلف بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که با افزایش فشار مقدار کشش بین‌سطحی آب و نفت افزایش می‌یابد اما در یک فشار مشخص میزان کشش بین‌سطحی جهش بزرگ‌تری از خود نسبت به بقیه فشارها نشان می‌دهد که این فشار را، فشار بالایی محدوده رسوب نام‌گذاری کردند. تغییرات کشش بین‌سطحی برای نمک‌های مختلف به این صورت بوده که در شوری‌های پایین با افزایش غلظت نمک میزان کشش بین‌سطحی کاهش پیدا می‌کند و این روند تا یک نقطه بهینه ادامه پیدا می‌کند و پس از نقطه بهینه با افزایش شوری، کشش بین‌سطحی نیز افزایش پیدا می‌کند. آن‌ها غلظت در نقطه بهینه را بهترین غلظت برای افزایش برداشت نفت معرفی کردند [۱۵]. جیان و همکاران تأثیر دما و شوری را برروی کشش بین‌سطحی آب و نفت با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و دستگاه کشش بین‌سطحی بررسی کردند. در این کار از تولوئن به‌عنوان فاز نفتی استفاده‌شده است که بیشتر به‌دلیل کاربرد زیاد آن به‌عنوان جداکننده آسفالتین از دیگر جامدات و همین‌طور وایولنترون[3]-۷۹ به‌عنوان آسفالتین مدل در نظر گرفته‌شده است. براساس مطالعه آن‌ها، در دماهای بالا، با پیوندهای هیدروژنی تشکیل‌شده کمتر، انرژی لازم برای ساختن یک سطح یکسان از مولکول‌های آب کاهش پیدا می‌کند، بنابراین کشش سطحی کمتر می‌شود [۱۶]. محمودوند و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی اثرات یون‌های تک ظرفیتی و دو ظرفیتی بارهای مختلف بر ویژگی‌های سطحی سیستم آب/نفت پرداختند. محلول‌های جداگانه‌ای از آسفالتین استخراج شده در تولوئن و مالتن[4] (نفت آسفالت‌زدایی شده با استفاده از هپتان) تهیه و برای مطالعات تطبیقی استفاده شد. نتایج این مطالعه، نقش عمده‌ی کاتیون‌ها را نشان داد، درحالی‌که تغییرات آنیون‌ها دارای اثرات ناچیز بود [۱۷]. حمیدیان و همکاران شش الکترولیت مختلف را برای ارزیابی تجربی اثر آن‌ها بر کشش بین‌سطحی دینامیکی آسفالتین و رزین در فصل مشترک نفت-آب به کار گرفتند. با تهیه‌ی دو نمونه نفت مصنوعی براساس انحلال آسفالتین و رزین استخراج شده در تولوئن، مقادیر کشش بین‌سطحی در حضور آب نمک‌های مختلف اندازه‌گیری شد.

1. Rigidity
2. Offset Pressure
3. Violanthrone-79
4. Maltene

نتایج نشان داد که کاتیون‌های دو ظرفیتی دارای میل ترکیبی بالاتری نسبت به گروه‌های قطبی اجزای آسفالتین و رزین در حضور کلرید در مقایسه با یون سولفات هستند [۱۸]. آلوز و همکاران تأثیر آسفالتین و رزین از دو نمونه نفت خام مختلف را بر کشش سطحی نفت مدل-آب، همراه با تأثیر آنها بر پایداری امولسیون مطالعه کردند. تفاوت در پایداری آسفالتین با خصوصیات شیمیایی، فعالیت بین‌سطحی و رفتار امولسیونی آسفالتین‌های نفت خام، رزین‌ها و مخلوط‌های آنها با استفاده از محلول‌های تولوئن مقایسه شد. برای نمونه‌ای که دارای آسفالتین‌های پایدار کمتر بود، تثبیت سریع کشش سطحی پویا همراه با کاهش کشش بین‌سطحی در محدوده محتوای آسفالتین مورد مطالعه مشاهده شد. در مقابل، برای نمونه آسفالتین با پایداری بالا، یک رفتار کشش بین‌سطحی پویای گذرا مشاهده شد. نتایج مشابهی برای محلول‌های مدل رزین برای هر دو نفت خام آزمایش شده به‌دست آمد [۱۹]. عاشوریان و همکاران تغییرات رفتار سطحی آسفالتین‌ها با توجه به تغییرات آروماتیکی در توده[1] را بررسی کردند. آن‌ها آزمایش‌های پراکندگی نور دینامیکی[2] (DLS) را همراه با اندازه‌گیری‌های کشش بین‌سطحی و رئولوژی سطحی انجام دادند تا اندازه، تحرک و فعالیت سطحی کلوخه‌های آسفالتین را پس از تغییر خصلت آروماتیک توده، تحلیل کنند. نتایج نشان داد که فعالیت سطحی و ساختار لایه‌های جذب‌شده آسفالتین‌ها به‌طور قابل‌توجهی تحت‌تاثیر خواص توده است و خصلت آروماتیکی کم منجر به افزایش فعالیت سطحی آسفالتین شد [۲۰]. ژانگ و همکاران اثرات دما و غلظت آسفالتین را بر کشش بین‌سطحی دینامیکی نفت-آب با استفاده از روش قطره‌ی آویزان تبیین کردند. تغییر دما از ۲۳ °C تا ۷۰ °C، کشش بین‌سطحی پویا را کاهش داد. فرآیند جذب سه مرحله را به‌عنوان تابعی از زمان جذب نشان داد. در مرحله نخست، سینتیک کاهش کشش بین‌سطحی با انتشار کنترل می‌شود، که طی آن آسفالتین‌ها به‌طور خود به‌خود به سطح مشترک نفت-آب جذب می‌شوند. ضریب انتشار سطحی آسفالتین‌ها به سطح مشترک با افزایش دما و کاهش غلظت آسفالتین افزایش می‌یابد. در مرحله دوم، بازدارنده‌ی فضایی ناشی از آسفالتین‌های جذب‌شده در سطح مشترک نفت-آب از مرحله نخست، تمایل به مهار بیشتر جذب آسفالتین‌ها به‌سطح مشترک دارد. در مرحله سوم، جذب مداوم آسفالتین‌ها به زیرلایه سطح مشترک و پیکربندی مجدد آسفالتین‌های جذب‌شده یا کلوخه‌های آسفالتین اتفاق می‌افتد که به کاهش پیوسته اما بسیار آهسته تنش بین‌سطحی دینامیکی کمک می‌کند [۲۱]. خلیلی و همکاران مجموعه آزمایش‌هایی را برای بررسی پارامترهای مؤثر بر کشش بین‌سطحی برای تزریق آب با شوری پایین انجام دادند و تأثیر شوری آب نمک، غلظت آسفالتین و دما را ارزیابی کردند. آب‌نمک‌های دارای NaCl، $CaCl_2$ و $MgCl_2$ و دو نفت مصنوعی با محتوای آسفالتین ۱ و ۱۰ wt.٪ در دماهای بین ۲۵ تا ۸۰ °C استفاده شد. براساس نتایج، وجود نمک در محلول می‌تواند توزیع اجزای قطبی را در سطح مشترک نفت و آب نمک به‌دلیل اثرات الکترواستاتیکی تغییر دهد که به نوبه‌خود باعث تغییر کشش بین‌سطحی سیستم می‌شود. کشش بین‌سطحی با افزایش دما از ۲۵ °C به ۸۰ °C کاهش یافت. با این حال، سطح تغییرات به شدت به نوع آب نمک، سطح شوری، و محتوای آسفالتین بستگی دارد. همچنین، نفت خام با غلظت آسفالتین بالاتر، کاهش کشش بین‌سطحی بیشتری را در هنگام تماس با آب کم‌شور تجربه می‌کند [۲۲]. لی و همکاران به ارزیابی تأثیر غلظت آسفالتین و دمای آزمایش بر پایداری امولسیون‌های آب در نفت مدل دارای وکس پرداختند.

1. Bulk
2. Dynamic Light Scattering

پژوهش نفت شماره ۱۴۱، خرداد و تیر ۱۴۰۴، صفحه ۵۹-۴۲

افزایش غلظت آسفالتین موجب تسهیل جذب آسفالتین به سطح مشترک نفت-آب شد، بنابراین کشش سطحی و اندازه قطرات آب را کاهش داد. پایداری امولسیون حاوی .wt٪ ۱۰ وکس عمدتاً از دو جنبه کنترل می‌شود. از یک طرف، وکس حالت محلول (۳۰ °C) می‌تواند جذب آسفالتین را در سطح مشترک نفت-آب تسهیل کند، کشش سطحی و اندازه قطرات آب را بیشتر کاهش دهد و در عین حال مدول اتساع سطحی[1] را افزایش دهد. از سوی دیگر، کریستال‌های وکس رسوب‌شده در فاز نفتی (۱۵ °C) می‌توانند یک ساختار شبکه قوی در غلظت‌های آسفالتین نسبتاً بالا (۰/۵ تا .wt٪ ۱/۵) تشکیل دهند و سپس قطرات آب را بی‌حرکت کنند. دو جنبه فوق تا حد زیادی پایداری تهنشینی و تعلیق امولسیون‌ها را در دمای ۱۵ °C بهبود می‌بخشد [۲۳]. در میان پژوهش‌های داخلی، مطالعات کمی به بررسی آزمایشگاهی خواص بین‌سطحی نفت دارای آسفالتین و آب پرداخته‌اند. رضوانی سیمکانی تغییر خواص سطحی را با ترکیب آب هوشمند و نانوذرات اکسید آلومینیوم و اثر آن روی جریان سیال در محیط متخلخل را به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. آزمایش‌های کشش بین سطحی آب و نفت آسفالتینی برای دو حالت طراحی شدند، به‌طوری‌که غلظت سدیم کلرید ثابت و غلظت منیزیم سولفات ثابت برای غلظت‌های گوناگون نانوذره در مقادیر دمایی مختلف در نظر گرفته شد. مطابق نتایج آزمایش‌ها، کاهش یون‌های خنثی سدیم و کلر نسبت به افزایش یون‌های تعیین‌کننده منیزیم و سولفات در سیال پایه اولویت بالاتری در کاهش کشش بین سطحی آب و نفت دارد [۲۴]. عبدی پدیده‌های سطحی سیستم نفت حاوی آسفالتین و آب هوشمند را بررسی کرد. اثر نوع نمک، تنوع شوری، نوع نفت، pH، درصد آسفالتین و پیرشدگی آب هوشمند با نفت با اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی بیانگر این بود که هیدراسیون یون‌های گوناگون در آب به‌دلیل تفاوت در انرژی هیدراسیون و تعداد مولکول درون پوسته هیدراسیون هر یون، اهمیت زیادی در درک رفتار آب هوشمند دارد. هیدراسیون یون‌های گوناگون همراه با تغییر آنتروپی در اثر تغییر دمای محیط نشان داد که افزایش دما در سیستم آب هوشمند پیر شده با نفت، موجب افزایش آنتروپی سطح دو فاز می‌شود و کاهش کشش بین‌سطحی را در پی دارد. همچنین، تغییرات کشش بین‌سطحی در آب هوشمند پیر شده با نفت به ساختار آسفالتین و نوع نمک و میزان شوری وابسته بود [۲۵]. محمدی و همکاران به ارزیابی آزمایشگاهی اثرات غلظت آسفالتین و یون‌های دو ظرفیتی کلسیم، منیزیم و سولفات بر کشش بین‌سطحی هپتول و آب شور پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که در بازه شوری‌های مختلف، افزایش آسفالتین تا غلظتی مشخص موجب کاهش کشش بین‌سطحی هپتول و آب شور می‌شود به‌طوری‌که کمترین کشش بین‌سطحی در آب با شوری ppm ۴۰۰۰۰ رخ داد. همچنین با افزایش ۴ برابری یون کلسیم، کشش بین‌سطحی حدود ۱۰٪ کمتر از حالت مبنا شد که در مقایسه با سایر نمونه‌ها، کمترین مقدار بود [۲۶]. طاهریان تأثیر آسفالتین و خصوصیات آن را روی برهم‌کنش های سیال-سیال در سیلاب‌زنی آب کم شور به‌صورت آزمایشگاهی مطالعه کرد. کشش بین سطحی نفت غیر پیر شده بنگستان، سیاه‌مکان و رگ‌سفید بررسی شد و هنگامی‌که این نفت‌ها با آب دریا پیر شدند، کشش بین سطحی آن‌ها نسبت به نفت تازه به دلیل مهاجرت آسفالتین‌ها از نفت به سطح مشترک افزایش یافت. همچنین آزمایش‌های دیگر نشان داد که میزان مهاجرت آسفالتین به سطح مشترک آب و نفت به ساختار، غلظت و توزیع اتم‌های آسفالتین بستگی دارد [۲۷]. با بررسی کارهایی که توسط پژوهش‌گران برروی آب کم شور و هوشمند و تأثیر حضور آسفالتین در سطح تماس آب و نفت انجام‌شده نتایج زیر حاصل می‌گردد:

1. Interfacial Dilatational Modulus

۱. در زمینه تأثیر آب کم شور بیشتر به کارهایی پرداخته شده که تأثیرپذیری آب کم شور و هوشمند را برروی تغییر ترشوندگی سنگ نشان می‌دهند و نتایج بسیار کمی در زمینه تأثیر و نقش آب کم شور و هوشمند در سطح تماس آب و نفت ارائه شده است. از این رو، در این زمینه عدم قطعیت‌های زیادی وجود دارد.

۲. تأثیر حضور نفتنیک اسیدها به‌عنوان یکی از اجزای نفت خام به‌ندرت در کارهای قبلی دیده‌شده و تحقیقات بسیار کمی در این زمینه صورت گرفته که عمدتاً نیز به نقش نفتنیک اسیدها در مدول‌های الاستیسیته پرداخته است. بنابراین انجام یک تحقیق در این زمینه لازم می‌باشد.

۳. معمولاً نقش زمان بر پدیده‌هایی که بر اثر تماس نفت و آب اتفاق می‌افتد نادیده گرفته‌شده است.

۴. عمده کارهایی که درزمینه آسفالتین انجام‌شده به بررسی پدیده‌ها هنگام تزریق گازهای امتزاجی و غیر امتزاجی پرداخته‌اند، در این پژوهش به بررسی کشش بین‌سطحی در مدل تزریق آب کم شور هوشمند پرداخته شده است.

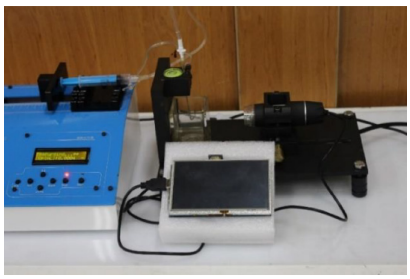
۵. استفاده از نفت‌های مدل در تحقیقات آزمایشگاهی این امکان را می‌دهد که به‌صورت سیستماتیک و شفاف پدیده‌ها را بررسی کرد. به‌عنوان مثال در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر حضور نفتنیک اسیدها، دو سیستم نفت در نظر گرفته شد که در یک سیستم از هپتول و آسفالتین و در دیگری از هپتول، آسفالتین و نفتنیک اسید برای اجزای نفت مدل استفاده شد و تأثیر شوری و حضور نفتنیک اسیدها بررسی شده است.

با توجه به کمبود مطالعات برروی پدیده‌های رخداده برروی سطح تماس نفت حاوی آسفالتین و آب، تمرکز اصلی این پژوهش برروی سطح تماس نفت و آب در اثر تزریق آب کم شور است. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی تأثیر یون شامل نمک منیزیم کلرید، کلسیم کلرید و سدیم سولفات، اثر شوری آب، نقش زمان و اثر نفت مدل بر کشش بین‌سطحی آب هوشمند و نفت حاوی آسفالتین است تا پژوهش‌گران حوزه‌ی ازدیاد برداشت از آن در مطالعات میدانی خود برروی نفت‌های آسفالتین‌دار بهره‌مند شوند.

روش کار

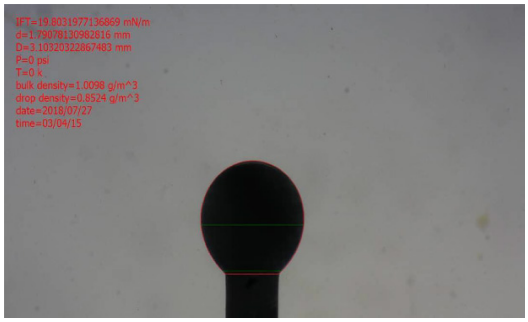
روش اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی

با استفاده از پمپ تزریقی، سیال نمونه را با حجم خیلی کم، از طریق یک سوزن، به‌صورت یک قطره درون توده آبی قرار داده و با استفاده از دوربینی که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به‌صورت برخط از آن عکس‌برداری شده و تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ساخت شرکت کوپال انرژی برای اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی، آنالیز شدند. برای آنالیز تصاویر، ورودی‌های موردنیاز نرم‌افزار کشش بین‌سطحی، وزن مخصوص سیال نفتی و آبی و قطر سوزن بوده که با دریافت این موارد از کاربر و طبق روش قطره آویزان، کشش بین‌سطحی را اندازه‌گیری می‌کند.



شکل ۱ پمپ سرنگی در کنار دستگاه اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی

تصویری از محیط نرم‌افزار اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی در شکل ۲ آمده است. پمپ سرنگی SP ۱۲۰ یک پمپ سرنگی دقیق نانولیتری و قابل‌برنامه‌ریزی خودکار است که برای تزریق دقیق و کنترل‌شده مایعات به کار می‌رود. این دستگاه از یک سرنگ با قطر مشخص تشکیل‌شده که پیستون آن به‌وسیله یک سیستم حرکت خطی دقیق به حرکت درمی‌آید.



شکل ۲ نحوه اندازه‌گیری کشش بین‌سطحی در محیط نرم‌افزار

خصوصیت آب

به‌منظور تهیه آب دریا (SW) و آب سازند (FW)، در آزمایشگاه مقادیر مشخصی از نمک‌های مختلف به آب بدون یون اضافه شد. بنابراین با استفاده از یون‌های تعیین‌شده در آنالیز آب دریای خلیج‌فارس و آب سازندی مربوط به مخزن بنگستان میدان کوپال، آب دریا و آب سازندی با استفاده از نمک‌های آزمایشگاهی به‌صورت مصنوعی ساخته شد. نمک‌های اضافه‌شده به آب بدون یون و میزان آن‌ها در جدول ۱ آمده است. در این مطالعه، برای این‌که تأثیر شوری یا همان قدرت یونی آب بررسی شود، سه نوع محلول آبی آب دریا (SW)، آب دریای دو بار رقیق‌شده (۲ SW) و آب دریای ده بار رقیق‌شده (۱۰ SW) تهیه شد.

خصوصیت نفت

در این پژوهش، از نمونه نفت مربوط به یکی از مخازن نفتی جنوب کشور استفاده شد که اطلاعات آن در جدول ۲ آمده است. در این ارزیابی، جهت بررسی سیستماتیک و واضح هر یک از عوامل تأثیرگذار، از نفت مدل استفاده‌شده است. به‌دلیل این‌که در این مطالعه، سعی شد که تأثیر آسفالتین برروی سطح تماس مشاهده شود و همچنین پدیده‌هایی که در اثر در تماس بودن آب و نفت و تغییر شوری رخ می‌دهد بررسی شود، در ساخت نفت مدل از آسفالتین به‌عنوان تنها جزء حل‌شده در سیال توده (در اینجا نرمال هپتان و تولوئن) استفاده‌شده است. آسفالتین موردنیاز از طریق روش ASTM-D6560-12 استخراج‌شده است [۲۸]. همین‌طور در بخش دیگری از تحقیق از نفتنیک اسید استفاده شد تا تأثیر حضور آن در کنار آسفالتین مشاهده شود.

جدول ۱ مشخصات نمک‌های مورد استفاده برای ساختن آب‌های کم‌شور و هوشمند

نمک	FW (g/L)	نمک	SW (g/L)	۲ SW (g/L)	۱۰ SW (g/L)
NaCl	۱۳۷/۲۷۳۵	NaCl	۱/۴۲۱۲	۰/۷۱۰۰	۰/۱۴۲۱
KCl	۰/۰۰۰۰	KCl	۰/۰۴۱۳	۰/۰۲۰۰	۰/۰۰۴۱
$CaCO_3$	۱/۶۲۷۸	$MgCl_2$	۰/۳۲۱۵	۰/۱۶۰۸	۰/۰۳۲۱
$MgCl_2$	۵۳/۳۷۰۰	$CaCl_2$	۰/۰۶۹۲	۰/۰۳۴۵	۰/۰۰۶۹
$CaCl_2$	۶/۰۹۸۰	Na_2SO_4	۰/۲۲۴۵	۰/۱۱۲۱	۰/۰۲۲۴
Na_2SO_4	۲/۵۸۷۰	$NaHCO_3$	۰/۰۰۵۳	۰/۰۰۴۲	۰/۰۰۰۵
$NaHCO_3$	۲/۰۱۵۷				
TDS (g/50mL)	۹/۴۸۴۴	TDS (g/50mL)	۲/۰۸۰۰	۱/۰۴۱۷	۰/۲۰۸۰
IS (mole/L)	۳/۶۷۴۷	IS (mole/L)	۰/۸۳۲۶	۰/۴۱۶۳	۰/۰۸۳۳

جدول ۲ مشخصات نفت مورد استفاده

نمونه نفت	چگالی @ 90 °C (g/cm^3)	گرانروی (cp@90 °C)	عدد اسیدی (mg KOH/g oil)	درصد آسفالتین (wt.٪)
KL	۰/۸۴	۲/۳۵	۰/۱۴	۰/۶۰

برای ساخت نفت مدل، آزمایش SARA مربوط به نفت کوپال انجام شد و متناسب با اجزای آن از mL ۷۰ هپتان و mL ۳۰ تولوئن استفاده کرده و مخلوط توسط همزن مغناطیسی همگن شد. در جدول ۳ مشخصات نرمال هپتان و تولوئن و ترکیب آن‌ها ذکرشده است. نمونه‌هایی از سیالات ساخته شده در این پژوهش در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

روند انجام آزمایش‌ها

در ابتدا آب با شوری موردنظر ساخته شد که در اینجا آب‌های نمکی مورد استفاده FW، SW، SW ۲ و SW ۱۰ می‌باشند. نمونه نفتی تهیه‌شده با استفاده از کاغذ صافی صاف شد تا در صورت وجود شن، ماسه و یا مواد سنگینی که در نفت خام وجود دارد این مواد از نفت خام جدا شوند. mL ۱۰۰ نفت خام برروی مگنت استیرر گذاشته شد و آب با شوری موردنظر در طول یک ساعت به آن اضافه شد. درب ظرف شیشه‌ای که آب و نفت در آن قرارگرفته‌اند بسته شد و اجازه داده شد به‌مدت h ۲۴ برروی همزن مغناطیسی با هم مخلوط شوند. پس از گذشت h ۲۴، نمونه‌ها از روی همزن مغناطیسی برداشته شدند و در دمای آزمایشگاه برای انجام آزمایش‌های بعدی قرار داده شدند. در روزهای مشخص‌شده، برای انجام آزمایش کشش بین‌سطحی، نمونه‌گیری با استفاده از سرنگ با دقت از نزدیک سطح تماس دو فاز انجام شد. عمل نمونه‌گیری با استفاده از سرنگ این امکان را می‌دهد که آزمایش برای همه نمونه‌ها به‌صورت یکسان باشد. برای انجام آزمایش کشش بین‌سطحی، نمونه‌ها از سطح تماس نفتی که در کنار آب در طول مدت‌زمان خاصی پیر شده بود، انتخاب شدند و کشش بین‌سطحی آن‌ها با آب‌های نمکی تازه اندازه گرفته شد. برای اطمینان از نتایج کشش بین‌سطحی هرکدام از نمونه‌ها (آزمون‌های تکرارپذیری) آزمایش‌ها پنج بار تکرار شدند. لازم به ذکر است تمام آزمایش‌ها در دمای محیط (°C ۲۰) انجام شد. خلاصه‌ای از کلیه آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج و بحث

در این بخش، نتایج مربوط به تأثیر یون شامل نمک منیزیم کلرید، کلسیم کلرید و سدیم سولفات، اثر شوری آب و اثر نفت مدل بر کشش بین‌سطحی آب هوشمند و نفت حاوی آسفالتین ارائه و تحلیل شده است.

تأثیر یون

در این پژوهش، برای بررسی تأثیر یون‌های مختلف از سه نمک $CaCl_2$، $MgCl_2$ و Na_2SO_4 استفاده‌شده است.

جدول ۳ مشخصات مواد استفاده‌شده در ساخت نفت مدل

اولئیک[1] اسید	هپتول (۷۰-۳۰)	هپتان	تولوئن	درصد آسفالتین (wt/.)
۰/۸۹۰۰	۰/۷۱۷۶	۰/۶۵۹۵	۰/۸۵۵۴	۰

شکل ۳ نمونه سیالات ساخته شده برای آزمون کشش بین‌سطحی

1. Oleic

جدول ۴ خلاصه‌ای از آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

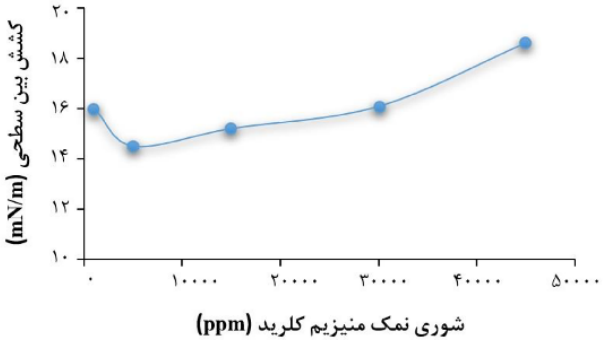
ردیف	آزمایش	متغیر
۱	تأثیر شوری نمک منیزیم کلرید بر کشش بین‌سطحی نفت‌مدل دارای آسفالتین و آب‌نمک	شوری (ppm): ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰
۲	تأثیر شوری نمک کلسیم کلرید بر کشش بین‌سطحی نفت‌مدل دارای آسفالتین و آب‌نمک	شوری (ppm): ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰
۳	تأثیر شوری نمک سدیم سولفات بر کشش بین‌سطحی نفت‌مدل دارای آسفالتین و آب‌نمک	شوری (ppm): ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۵۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۵۰۰۰
۴	تأثیر شوری آب دریا بر کشش بین‌سطحی آب و نفت تازه و پیر شده	شوری: FW، SW، ۲ SW و ۱۰ SW زمان پیرشدگی: نفت تازه، ۱۰ روز، چهل روز
۵	تأثیر شوری آب دریا بر کشش بین‌سطحی در دو نوع نفت مدل پس از بیست روز	شوری: FW، SW، ۲ SW و ۱۰ SW نفت مدل: A و B حضور یا عدم حضور نفتنیک اسید
۶	تکرار هر آزمایش برای ۵ مرتبه برای اطمینان از نتایج	-

این سه نمک به‌دلیل این‌که در بررسی کارهایی که توسط محققان مختلف صورت گرفته، بیشترین تأثیر را نسبت به نمک‌های دیگر مخصوصاً یون‌های تک‌ظرفیتی ایفا می‌کردند برای این کار انتخاب شدند [۱۱ و ۲۹].

نمک منیزیم کلرید

به‌دلیل ساختار پیچیده نفت خام، تغییرات مشاهده‌شده در کشش بین‌سطحی را نمی‌توان دقیقاً به تأثیر یک جزء خاص نسبت داد. در چنین مواردی می‌توان از نفت مدل به‌منظور سهولت بررسی ساز و کارها استفاده کرد. زمانی‌که از نفت‌های مدل استفاده می‌شود به‌دلیل این‌که تنها یک پارامتر در نفت مدل موردبررسی قرار می‌گیرد، تفسیر پدیده‌های مشاهده‌شده راحت‌تر خواهد بود. در این پژوهش برای نمک منیزیم کلرید نفت مدل را استفاده کرده و در این نفت تنها از آسفالتین استفاده‌شده تا به‌صورت واضح‌تر تأثیر حضور آسفالتین مشاهده شود. همان‌گونه که از شکل ۴ مشخص است با افزایش شوری نمک منیزیم کلرید تا غلظت ppm ۵۰۰۰ کشش بین‌سطحی کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر شوری (بیشتر از ppm ۵۰۰۰) مقدار کشش بین‌سطحی افزایش می‌یابد. این روند باعث شده است که کمترین مقدار کشش بین‌سطحی در شوری ppm ۵۰۰۰ نمک منیزیم کلرید مشاهده شود. جمع شدن مولکول‌های آسفالتین در سطح تماس آب و نفت موجب می‌شود تعادل ترمودینامیکی بین اجزای نفت به‌هم بخورد، درنتیجه مولکول‌های آسفالتینی که در فاز نفتی قرار دارند از رزین‌هایی که آن‌ها را احاطه کردند رها می‌شوند و به‌دلیل حرکت براونی[1] سعی در نزدیک شدن به‌هم می‌کنند. این حرکت براونی سبب می‌شود مولکول‌ها باهم برخورد کرده و نیروهای واندروالسی موجب تجمع آن‌ها شود. هرچه مولکول‌های آسفالتین قطبی‌تر باشند نیروهای واندروالسی قوی‌تر عمل می‌کنند و تجمع بیشتری اتفاق می‌افتد و در نهایت آسفالتین ته‌نشین می‌شود. در سطح تماس آب و نفت، مولکول‌های آسفالتین که مولکول‌هایی قطبی می‌باشند به یون‌های موجود در فاز آبی جذب می‌شوند و سبب ارتباط فاز آبی و فاز نفتی می‌شوند و این عمل باعث کاهش کشش بین‌سطحی آب و نفت می‌شود [۳۰]. در غلظت‌های پایین، غلظت آسفالتین به نسبت نمک‌ها بیشتر است بنابراین مولکول‌های آسفالتین بیشتری نیز در سطح تماس بین دو فاز وجود دارند و همین عامل باعث می‌شود خاصیت سورفکتانتی یا عامل سطحی بودن آسفالتین به پدیده شوره‌زنی[2] غلبه کرده و موجب برهم‌کنش آسفالتین با یون‌های نمکی موجود در فاز آبی شود.

1. Brownian Motion
2. Salting Out



شکل ۴ کشش بین‌سطحی نفت و آب نمک‌های مختلف منیزیم کلرید

با افزایش بیشتر غلظت، یک‌روند افزایشی در میزان کشش بین‌سطحی مشاهده می‌شود. ساز و کار غالب در این قسمت شوره‌زنی است که با افزایش یون‌ها اتفاق می‌افتد و سبب می‌شود مولکول‌های قطبی از سطح تماس دور شوند. خالی شدن سطح تماس نفت و آب از مولکول‌های آسفالتین باعث می‌شود که یون‌های نمک نیز از سطح تماس وارد فاز توده آبی شوند و این اتفاق منجر به افزایش کشش بین‌سطحی خواهد شد.

نمک کلسیم کلرید

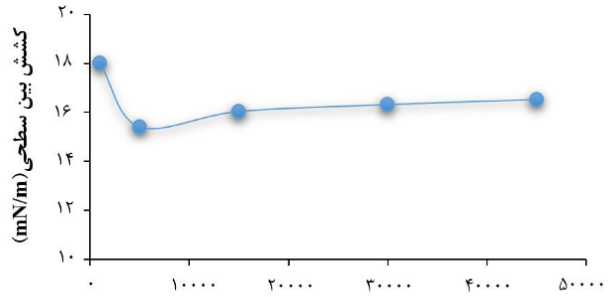
شکل ۵ که کشش بین‌سطحی را برای نمک کلسیم کلرید نمایش می‌دهد کم‌ترین میزان کشش بین‌سطحی را در غلظت ppm ۵۰۰۰ نشان می‌دهد. همان‌طور که برای نمک منیزیم کلرید بیان‌شده به‌علت مهاجرت ذرات آسفالتین از روی سطح به درون فاز توده کشش بین‌سطحی با افزایش غلظت افزایش پیدا می‌کند.

نمک سدیم سولفات

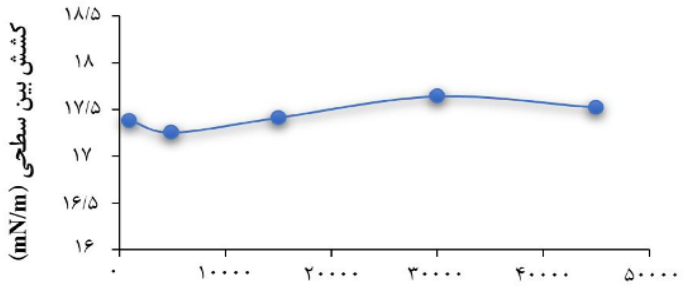
نمودار مربوط به کشش بین‌سطحی نفت دارای آسفالتین و آب نمک سدیم سولفات در شکل ۶ رسم شده است. مطابق با نمودار، در غلظت‌های کم نمک (در محدوده ۱۰۰۰ تا ppm ۵۰۰۰) با افزایش میزان نمک ضریب فعالیت یون‌ها بیشتر می‌شود. در این محدوده آسفالتین که مانند سورفکتانت‌ها عمل کرده با یون‌های موجود در سطح تماس نفت و آب برهم‌کنش داده و موجب می‌شود تا کشش بین‌سطحی نفت و آب کم شود. با افزایش بیش‌تر شوری با دور شدن آسفالتین از سطح تماس و برگشت آن‌ها به فاز توده نفتی، آسفالتین وارد فاز نفتی شده که به‌علت جدایش قبلی آن‌ها از رزین‌ها، این مولکول‌ها که به‌وسیله رزین‌ها پایدار نشدند حالت خود تجمعی پیدا می‌کنند و رسوب می‌کنند. ساز و کاری که برای رسوب آسفالتین و کشش بین‌سطحی نمک سدیم سولفات مطرح می‌شود مشابه نمک‌های منیزیم کلرید و کلسیم کلرید می‌باشد که در قسمت‌های قبل به‌صورت کامل توضیح داده‌شده است.

اثر شوری آب دریا

در قسمت قبل تأثیر نمک‌های دوظرفیتی و تک ظرفیتی برروی کشش بین‌سطحی آب و نفت مشاهده شد. اما در واقعیت آبی که برای ازدیاد برداشت از مخازن استفاده می‌شود آبی نیست که تنها از یک نمک ساخته شود بلکه آب تزریقی به مخازن نفتی (معمولاً آب دریا) حاوی نمک‌های مختلفی است که همگی در فرایند ازدیاد برداشت تأثیرگذار می‌باشند. در این پژوهش برای تأثیر شوری از آب دریا (SW)، آب دریای دو بار رقیق‌شده (SW ۲)، آب دریای ده‌بار رقیق‌شده (SW ۱۰) و آب سازند (FW) استفاده‌شده است. برای این‌که به‌صورت دقیق‌تر پدیده‌هایی که در حال رخ دادن می‌باشند موردبررسی قرار گیرند آزمایش‌های کشش بین‌سطحی را یک‌بار درحالتی‌که آب و نفت تازه در تماس باهم قرار داده‌شده محاسبه‌شده است و در مرحله بعد از نمونه نفت پیر شده و آب تازه پس از ده و چهل روز برای آزمایش کشش بین‌سطحی استفاده‌شده است.



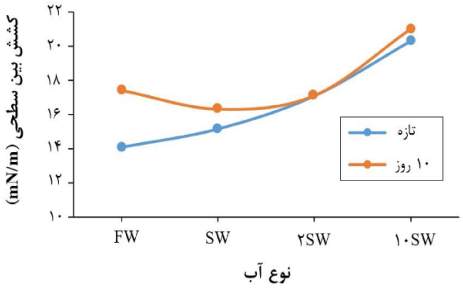
شکل ۵ کشش بین‌سطحی نفت و غلظت‌های مختلف آب‌نمک کلسیم کلرید



شکل ۶ کشش بین‌سطحی نفت و غلظت‌های مختلف آب نمک سدیم سولفات

در شکل ۷ مقادیر مربوط به کشش بین‌سطحی آب دریا، آب دریای دو بار رقیق‌شده، آب دریای ده بار رقیق‌شده و آب سازندی در کنار نفت آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش شوری کشش بین‌سطحی آب و نفت کاهش می‌یابد. پدیده‌هایی که در سطح تماس آب و نفت اتفاق می‌افتند درواقع تأثیرپذیر از اثر ترکیبی جذب مولکول‌های آسفالتین و نفتنیک اسید برروی سطح تماس آب و نفت می‌باشند. در شوری‌های کم، برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی بین لایه دوگانه فاز آبی و مولکول‌های قطبی فاز نفتی مانند آسفالتین، باعث جذب آسفالتین برروی سطح تماس و برهم‌کنش آن با یون‌های موجود در فاز آبی می‌شود. از طرفی با افزایش قدرت یونی، مولکول‌های نفتنیک اسید که ماده فعال‌سطحی می‌باشند تمایل به تفکیک در فاز آبی دارند و هر چه شوری بیشتر باشد مولکول‌های نفتنیک بیشتری در فاز آبی تفکیک می‌شوند. می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که عامل نفتنیکی نسبت به عامل الکترواستاتیکی غلبه می‌کند و نفتینک اسیدها به‌دلیل این‌که آب سازندی شوری بیشتری دارد بیشتر تفکیک می‌شوند و قادر خواهند بود کشش بین‌سطحی را بیشتر کاهش دهند. کشش بین‌سطحی برای آب دریای دو بار رقیق‌شده بیشتر از آب دریا و آب سازندی است که به‌دلیل تأثیرپذیری بیشتر نفتنیک اسیدها در آب دریا و آب سازند در مقایسه با آسفالتین‌هایی است که در آب دریای دو بار رقیق‌شده روی سطح آمده‌اند. همان‌طور که توضیح داده‌شده، آسفالتین و نفتنیک اسید هر دو ماده فعال‌سطحی می‌باشند اما تأثیرپذیری نفتنیک اسیدها برای این نوع نفت بیشتر از آسفالتین‌ها است و این با نتایج قبلی محققان دیگر از جمله لشکر بلوکی و همکاران [۱۱] نیز سازگار است. پس از گذشت ده روز از مجاورت آب با شوری‌های مختلف و نفت، کشش بین‌سطحی فاز توده نفتی پیر شده و آب اندازه‌گیری شد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها برحسب شوری‌های مختلف در شکل ۸ رسم شده است.

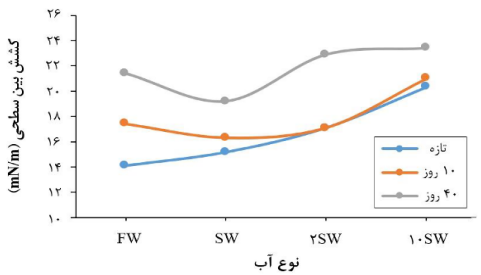
شکل ۷ تأثیر میزان شوری آب بر کشش بین‌سطحی نفت و آب تازه



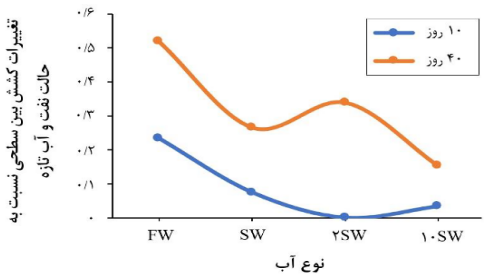
شکل ۸ مقایسه تأثیر شوری آب بر کشش بین‌سطحی نفت ده روز پیر شده و آب تازه

در تمام شوری‌ها به‌جز در آب دریای دو بار رقیق‌شده، کشش بین‌سطحی بعد از گذشت ده روز مقادیر بیشتری را نسبت به‌زمانی‌که نفت و آب تازه در کنار هم قرار داده‌شده، نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد در شوری‌های بالا نفتنیک‌اسیدها در سطح تماس آب و نفت قرار می‌گیرند و اجازه حضور مولکول‌های آسفالتین را در سطح تماس نمی‌دهند. بنابراین در شوری بالا نفتنیک اسیدها از فاز نفتی وارد سطح تماس نفت و آب می‌شوند و فاز توده نفت مقداری از نفتنیک اسید و آسفالتین خود را که هر دو ماده فعال‌سطحی می‌باشند، از دست می‌دهد و با کم‌تر شدن غلظت آسفالتین و نفتنیک‌اسید در فاز نفتی میزان کشش بین‌سطحی نفتی که مواد فعال‌سطحی خود را ازدست‌داده است، با آب تازه بیشتر می‌شود. هر چه شوری آب بیشتر می‌شود به‌دلیل این‌که نفتنیک‌های بیشتری قادر به تفکیک‌شدن هستند، تغییرات کشش بین‌سطحی نسبت به‌حالتی‌که شوری کمتر است، بیشتر است و دلیل اختلاف بیشتر بین دو نمودار در مورد آب سازند نسبت به آب دریا، به تفکیک بیشتر اسیدهای نفتنیک در اثر شوری بالاتر آب سازند بازمی‌گردد. در غلظت‌های پایین، نیروهای الکترواستاتیکی لایه دوگانه پدیده حاکم هستند و نفتنیک اسیدها توانایی تفکیک‌شدن در غلظت‌های پایین را ندارند، بنابراین در آب دریای ده بار رقیق‌شده آسفالتین‌ها به‌علت لایه الکتریکی دوگانه ایجادشده و قطبیت بالایی که دارند جذب سطح تماس می‌شوند و ازآنجایی‌که آب دریای ده بار رقیق‌شده قدرت یونی بالایی ندارد آسفالتین‌های کمی وارد سطح تماس می‌شوند، پس فاز توده نفتی مقادیر کمی از آسفالتین های خودش را ازدست‌داده است و به همین خاطر کشش بین‌سطحی نسبت به‌حالت تازه مقدار خیلی کمی افزایش‌یافته است.برای آب دریای دو بار رقیق‌شده، ازآنجایی‌که در این حالت ازیک‌طرف نیروهای الکترواستاتیکی لایه الکتریکی دوگانه به‌اندازه کافی قوی می‌باشند و از طرف دیگر قدرت یونی آن به نسبت آب دریای ده بار رقیق‌شده بیشتر است و اجزای نفتنیکی آن بیشتر است بنابراین هر دو ساز و کار قادر خواهند بود تغییراتی ایجاد کنند. طبق توضیحات بالا هر دو ساز و کار گفته‌شده برای آب دریای دو بار رقیق‌شده قدرت کافی را دارند، به همین علت بین مولکول‌های نفتنیک و مولکول‌های آسفالتین رقابتی برای جذب در سطح تماس آب و نفت ایجاد می‌شود که این رقابت در طی زمان‌های مختلف حالات مختلفی به‌خود می‌گیرد. با وجود اینکه فاز نفتی آسفالتین خود را ازدست‌داده است کشش بین‌سطحی آن نسبت به حالت قبل تغییری نکرده است. بنابراین نتیجه می‌شود باوجود از دست رفتن آسفالتین موجود در فاز توده نفتی، مولکول‌های نفتنیک به‌دلیل قدرت یونی متوسط آب دریای دو بار رقیق‌شده، همچنان توانایی جذب در سطح تماس را دارند و این امر موجب می‌شود کمبود آسفالتین را جبران کرده و مانع از افزایش کشش بین‌سطحی شوند. برای پی بردن به ساز و کاری که در پشت این فعل و انفعالات بین آسفالتین‌ها و نفتنیک‌ها وجود دارد

نفتنیک‌ها وجود دارد مدت‌زمان بیشتری به آب و نفت اجازه داده شد در تماس باهم قرار گیرند چراکه تقابل بین آسفالتین و نفتنیک برای نشستن برروی سطح تماس نفت و آب ممکن است باگذشت زمان دچار تغییراتی شود. بدین منظور بعد از گذشت چهل روز از آماده‌سازی نمونه‌ها از توده فاز نفتی نمونه گرفته شد و کشش بین‌سطحی در شوری‌های مختلف اندازه‌گیری شد. برای تحلیل نتایج، در شکل ۹ داده‌های به‌دست‌آمده بعد از گذشت چهل روز همراه با داده‌های مربوط به ده روز و نفت تازه رسم شده است. همان‌گونه که در نمودار مشخص است نمونه‌های آنالیز شده پس از چهل روز، در تمامی شوری‌ها، کشش بین‌سطحی بیشتری را نسبت به نمونه‌های قبل نشان داده‌اند. در شوری‌های بالا مانند آب دریا و آب سازندی به‌دلیل این‌که آب موردنظر قدرت یونی بالایی دارد و قدرت یونی بالا در جهت جذب مواد نفتنیکی به روی سطح تماس نفت و آب عمل می‌کنند، بنابراین باگذشت زمان نفتنیک‌ها بیشتر جذب سطح تماس نفت و آب می‌شوند پس آسفالتین‌های بیشتری از سطح تماس نفت و آب وارد فاز توده نفتی می‌شوند و در آنجا رسوب می‌کنند. از طرفی، فاز توده نفتنیک‌های بیشتری را به‌دلیل مهاجرت به سطح تماس از دست می‌دهد. همین عامل سبب می‌شود که برای شوری بالا، نفت که مواد فعال‌سطحی بیشتری را ازدست‌داده، کشش بین‌سطحی بیشتری را در تماس با آب تازه نسبت به روزهای گذشته نشان دهد. در شوری‌های پایین مانند آب دریای ده بار رقیق‌شده نیروهای الکترواستاتیکی نیروهای غالب برای جذب آسفالتین برروی سطح می‌باشند. از طرفی به‌دلیل این‌که آب قدرت یونی خیلی بالایی ندارد آسفالتین‌ها به‌میزان کم جذب سطح می‌شوند و نفتنیک‌ها نیز به‌دلیل قدرت یونی آب قادر به عمل نخواهند بود. بنابراین در این حالت کشش بین‌سطحی توده نفتی به‌دلیل مهاجرت آسفالتین‌ها به سطح تماس بین نفت و آب پس از ده روز تنها به مقدار ۰/۷ و پس از چهل روز به‌میزان ۲ واحد افزایش می‌یابد. در آب دریای دو بار رقیق‌شده بیشترین اختلاف بین کشش بین‌سطحی در چهل و ده روز مشاهده‌شده است. شکل ۱۰ تغییرات نسبی کشش بین‌سطحی نسبت به حالت آب و نفت تازه را برای آب‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق نمودار برای آب دریای دو بار رقیق‌شده بعد از گذشت زمان ده روز کشش بین‌سطحی نسبت به حالت آب و نفت تازه تغییری نداشته اما بعد از گذشت زمان چهل روز جهش بزرگی داشته است. در آب دریای دو بار رقیق‌شده هر دو ساز و کاری که قبلاً در مورد آن‌ها توضیح دادیم فعال هستند، درواقع به‌علت قدرت یونی که این آب دارد ازیک‌طرف نیروهای الکترواستاتیکی لایه دوگانه باعث جذب آسفالتین برروی سطح تماس آب و نفت می‌شوند و از طرف دیگر قدرت یونی آب نسبت به حالت ده بار رقیق‌شده بیشتر است و اجزای نفتنیکی که مواد فعال‌سطحی نیز می‌باشند توانایی تفکیک‌پذیری و درنهایت جذب برروی سطح تماس آب و نفت را دارند.



شکل ۹ مقایسه تأثیر شوری آب بر کشش بین‌سطحی بعد از ده روز و چهل روز



شکل ۱۰ تغییرات نسبی کشش بین‌سطحی بعد از ۱۰ و ۴۰ روز نسبت به حالت نفت و آب تازه

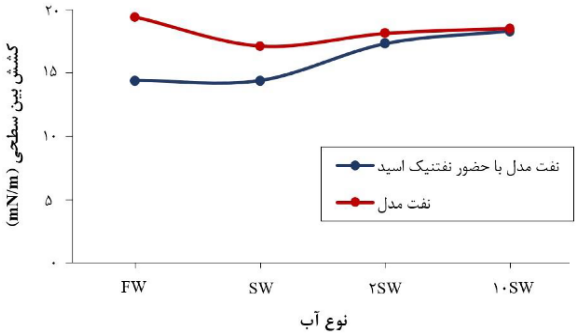
بنابراین همان‌طور که مرادی و همکاران [۱۳] در آزمایش‌های مربوط به ویسکوالاستیک سیالات نشان دادند رقابت بین اجزای آسفالتینی و نفتنیکی به‌وجود می‌آید که درنهایت آسفالتین‌ها روی سطح جذب می‌شوند، اما بعد از گذشت مدت زمانی اجزای نفتنیکی روی سطح می‌آیند. تا زمان ده روز از آماده‌سازی نمونه‌ها، آسفالتین‌ها به‌روی سطح تماس نفت و آب آمده اما بعد از گذشت زمان‌های بیشتر اجزای نفتنیکی به‌صورت تدریجی جذب سطح تماس نفت و آب می‌شوند. با جذب نفتنیک‌ها و جدا شدن از فاز توده نفتی، نفت مواد فعال‌سطحی خود را ازدست‌داده و به همین علت در آزمایش‌های کشش بین‌سطحی که بعد از گذشت چهل روز انجام شد، نفت و آب کشش بین‌سطحی بیشتری را از خود نشان می‌دهند.

نفت مدل A

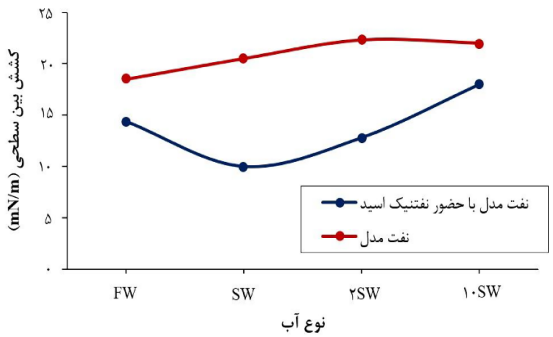
شکل ۱۱ تأثیر شوری بر کشش بین‌سطحی نفت مدل A در حضور و عدم حضور نفتنیک اسید بعد از بیست روز را نشان می‌دهد. باوجود رسوب برابر در آب دریای دو بار رقیق‌شده در هر دوحالت، کشش بین‌سطحی در سیستم شامل نفتنیک اسید کمتر شده است. از آنجا که مقدار آسفالتین در نفت‌ها یکسان بوده است، این کاهش نمایانگر حضور نفتنیک اسید، به‌عنوان یک ماده‌ی فعال‌سطحی، در فاز نفتی است. برای آب دریا و آب سازندی به‌دلیل افزایش قدرت یونی، حضور نفتنیک‌ها در سطح مشترک آب و نفت و بنابراین ماندن اجزای آسفالتین بیشتری در فاز توده به‌دلیل رسوب کمتر، کاهش کشش بین‌سطحی را در این حالت نشان می‌دهد و همچنین نشان می‌دهد که آسفالتین‌ها نسبت به نفتنیک‌ها کشش بین‌سطحی را بیشتر کاهش می‌دهند.

نفت مدل B

برای این‌که تأثیر نوع آسفالتین‌ها مشاهده شود از آسفالتین موجود در نفت دیگر برای ساخت نفت مدل استفاده‌شده است. همانند آزمایش‌های اول برای این نوع نفت مدل نیز از دو ترکیب استفاده‌شده است. در ترکیب اول از هپتول به‌علاوه آسفالتین برای ساخت نمونه استفاده‌شده ولی برای این‌که تأثیر نفتنیک اسیدها مشاهده شود در ترکیب دوم هپتول، آسفالتین و نفتنیک اسید مورد استفاده قرارگرفته‌اند. در شکل ۱۲ کشش بین‌سطحی نمونه‌ها پس از بیست روز نشان داده‌شده است. برای انجام این آزمایش نمونه‌گیری را از فاز نفتی انجام داده و در تماس با آب با شوری‌های مختلف کشش بین‌سطحی اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که از نمودار مشخص است در تمامی شوری‌ها برای حالتی که در نفت مدل از آسفالتین و نفتنیک اسید به‌صورت هم‌زمان استفاده شد نسبت به‌حالتی‌که تنها از آسفالتین در نفت مدل استفاده‌شده، کشش بین‌سطحی کمتر است. با افزایش قدرت یونی به‌دلیل قرار گرفتن اجزای نفتنی در سطح تماس آب و نفت، آسفالتین‌های بیشتری در فاز توده نفتی باقی می‌مانند.



شکل ۱۱ تأثیر شوری آب بر کشش بین‌سطحی نفت مدل A در حضور و عدم حضور نفتنیک اسید بعد از بیست روز



شکل ۱۲ تأثیر شوری آب بر کشش بین‌سطحی نفت مدل B در حضور و عدم حضور نفتنیک اسید بعد از بیست روز

علاوه‌براین، نفتنیک اسید نیز در فاز توده نفتی وجود دارد و هر دو ماده فعال‌سطحی می‌باشند، بنابراین نسبت به‌حالتی‌که تنها آسفالتین در فاز توده وجود دارد و میزانی از آن نیز رسوب‌کرده کشش بین‌سطحی کمتری مشاهده می‌شود. برای آب دریا نیز به‌دلیل قدرت یونی بالا اجزای نفتنی در سطح جذب می‌شوند و همان اتفاقات آب سازند برای آب دریا نیز تکرار می‌شود با این تفاوت که آب دریا به‌علت قدرت یونی پایین‌تری که نسبت به آب سازندی دارد نفتنیک اسیدهای کمتری وارد سطح می‌شوند و از طرف دیگر آسفالتین‌های کمتری نیز رسوب‌کرده، بنابراین هر دو عامل سطحی یعنی آسفالتین و اجزای نفتنی بیشتری در فاز توده وجود دارند و کشش بین‌سطحی کمتری مشاهده می‌شود. به همین خاطر کمترین میزان کشش بین‌سطحی در این شوری دیده شده است.

در آب دریای دو بار رقیق‌شده به‌علت رقابت بین آسفالتین و نفتنیک، در مرحله اول آسفالتین‌ها جذب سطح تماس آب و نفت می‌شوند و بعد از مدت‌زمانی اجزای نفتنی به‌عنوان ماده جذب‌شده دوم، جذب سطح تماس آب و نفت می‌شوند. البته از آنجایی‌که این نمونه‌ها بعد از گذشت بیست روز از آماده‌سازی نمونه انجام‌شده‌اند، در زمان انجام این آزمایش اجزای نفتنی به‌تدریج جذب سطح تماس نفت و آب شده و از حضور آسفالتین‌های بیشتر در سطح تماس ممانعت به‌عمل می‌آورند و کشش بین‌سطحی کمتری که نسبت به‌حالت آسفالتین تنها مشاهده می‌شود به‌علت وجود مواد نفتنیکی است که از جمله مواد فعال‌سطحی می‌باشند. نتایج آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵ خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده در پژوهش حاضر

پارامتر مورد بررسی	نتیجه
میزان نمک سدیم کلرید	کمترین کشش بین‌سطحی در ppm ۵۰۰۰
میزان نمک کلسیم کلرید	کمترین کشش بین‌سطحی در ppm ۵۰۰۰
میزان نمک سدیم سولفات	کمترین کشش بین‌سطحی در ppm ۵۰۰۰
اثر شوری آب دریا در آب و نفت تازه	کاهش کشش بین‌سطحی با افزایش شوری
اثر زمان پیرشدگی نفت	پس از ده روز: افزایش کشش بین‌سطحی برای تمام شوری‌ها به جز دو بار رقیق شده پس از چهل روز: افزایش کشش بین‌سطحی در تمام شوری‌ها
اثر حضور نفتنیک اسید در نفت مدل	کاهش کشش بین‌سطحی در هر دو نفت مدل دارای نفتنیک اسید

نتیجه‌گیری

در این پژوهش در ابتدا با توجه به مطالعاتی که برروی کارهای گذشته انجام‌شد، سه نمک که بیشترین تأثیر را بر کاهش کشش بین‌سطحی داشته انتخاب شد و سپس تأثیر شوری و زمان برروی کشش بین‌سطحی در زمان‌های ده و چهل روز در شوری‌های مختلف آب دریا، آب دریای دو بار رقیق‌شده، آب دریای ده بار رقیق‌شده و آب سازند بررسی‌شد. در ادامه برای بررسی تأثیر نفتنیک اسید برروی کشش بین‌سطحی آب و نفت دو سیستم متفاوت نفت مدل ساخته‌شد:

۱. هپتان-تولوئن-آسفالتین

۲. هپتان-تولوئن-آسفالتین-نفتنیک اسید

و تأثیر شوری برروی هرکدام از این سیستم‌ها مطالعه شد. برای این‌که تأثیر آسفالتین‌های مختلف برروی کشش بین‌سطحی اندازه‌گیری شود، در این پژوهش از آسفالتین‌های مربوط به دو نوع نفت خام مختلف استفاده شد.

در ادامه نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش شرح داده می‌شود:

• کم‌ترین میزان کشش سطحی برای نمک‌های منیزیم کلرید و سدیم سولفات در شوری‌های پایین و در غلظت ppm ۵۰۰۰ و برای نمک کلسیم کلرید در غلظت‌های ppm ۱۰۰۰ و ppm ۵۰۰۰ به‌دست آمدند.

• هر چه شوری بالاتر باشد مولکول‌های نفتنیک بیشتری در فاز آبی تفکیک می‌شوند. بر این اساس، مولکول‌های نفتنیک توانایی جذب در سطح تماس را دارند و کمبود آسفالتین را جبران نموده و مانع افزایش کشش بین‌سطحی می‌شوند.

• در تمام شوری‌ها به‌جز در آب دریای دو بار رقیق‌شده، کشش بین‌سطحی بعد از گذشت ده روز مقادیر بیشتری را نسبت به زمانی که نفت و آب تازه در کنار هم قرار داده‌شده، نشان داد.

• با تشدید قدرت یونی و قرارگیری اجزای نفتنیک در سطح تماس آب و نفت، آسفالتین‌های بیشتری در فاز نفتی باقی می‌مانند. همچنین با حضور نفتنیک اسید در فاز توده نفتی نسبت به‌حالتی‌که تنها آسفالتین در فاز توده وجود دارد کاهش بیشتری از کشش بین‌سطحی دیده می‌شود.

• به‌دلیل قدرت یونی کمتر آب دریا نسبت به آب سازندی، نفتنیک اسیدهای کمتری به سطح وارد شده و آسفالتین‌های کمتری نیز رسوب می‌کنند و در این حالت دو عامل سطحی یعنی آسفالتین و اجزای نفتنی بیشتری در فاز توده اثرگذار هستند و کاهش بیشتری در کشش بین‌سطحی رخ می‌دهد. بنابراین، کمترین میزان کشش بین‌سطحی در این شوری مشاهده شد.

پیشنهادهایی برای ادامه پژوهش در این حوزه ارائه می‌گردد:

• بررسی تأثیر رزین در رسوب آسفالتین که برای انجام این کار لازم است نفت مدلی ساخته شود که در آن تأثیر حضور و عدم حضور رزین برروی رسوب آسفالتین بررسی شود.

• آزمایش‌های مربوط به ویسکوالاستیک انجام شود که مدول‌های الاستیک و ویسکوز را برای فیلم مشترک بین آب و نفت مورد استفاده در این پژوهش بررسی کند.

• انجام آزمون‌های کلیدی شامل بررسی آزمون تخلیه آشام توسط سل آموت، آزمون زاویه تماس در فاز آب و نفت، بررسی اثر دما و pH مخزن، اندازه‌گیری بار الکتریکی سیالات پتانسیل زتا، اندازه‌گیری امولسیون‌های به‌دست آمده نفتنیکی-آسفالتینی و تعیین اندازه امولسیون‌ها با پراکندگی نور پویا[1] (DLS)

مراجع

[1]. Lemos B., Winter A., Blini E. K., Kim N. R., and Almeida R. V. (2024). Laboratory data for oil recovery by injecting low-salinity water into sandstone from Brazilian Campos Basin reservoir, Journal of Petroleum Science and Technology, 14(2), 25–37. doi: 10.22078/jpst.2025.5516.1949.

[2]. Jadhunandan, P. P., & Morrow, N. R. (1991). Spontaneous imbibition of water by crude oil/brine/rock systems. In Situ;(United States), 15(4).

[3]. Morrow, N., & Buckley, J. (2011). Improved oil recovery by low-salinity waterflooding. Journal of petroleum Technology, 63(05), 106-112. doi.org/10.2118/129421-JPT.

[4]. Goual, L., & Firoozabadi, A. (2002). Measuring asphaltenes and resins, and dipole moment in petroleum fluids. AIChE Journal, 48(11), 2646-2663. doi.org/10.1002/aic.690481124.

[۵]. شهابی، م.، قربانپور، ف.، آیت‌اللهی، ش.، و ماهانی، ح. (۱۴۰۳)، بررسی آزمایشگاهی ناپایداری آسفالتین در تزریق آب کم‌شور با استفاده از سامانه دیداری هله-شاو، پژوهش نفت، دوره ۳۴، شماره ویژه ازدیاد برداشت نفت با استفاده از روش‌های پایه آبی، ۱۳۵، (۱۶–۳). doi: 10.22078/pr.2024.5254.3331.

[6]. Speight, J. G. (2004). Petroleum Asphaltenes-Part 1: Asphaltenes, resins and the structure of petroleum. Oil & gas science and technology, 59(5), 467-477. doi.org/10.2516/ogst:2004032.

1. Dynamic Light Scattering

[7]. Sheu, E. Y., Storm, D. A., & Maureen, M. (1991). Asphaltenes in polar solvents. Journal of non-crystalline solids, 131, 341-347. doi.org/10.1016/0022-3093(91)90326-2.
[8]. Vijapurapu, C. S., & Rao, D. N. (2003, February). Effect of brine dilution and surfactant concentration on spreading and wettability. In SPE International Conference on Oilfield Chemistry? (pp. SPE-80273). SPE. doi.org/10.2118/80273-MS.
[9]. Alotaibi, M. B., & Nasr-El-Din, H. A. (2009, April). Chemistry of injection water and its impact on oil recovery in carbonate and clastic formations. In SPE International Conference on Oilfield Chemistry? (pp. SPE-121565). SPE. doi.org/10.2118/121565-MS.
[10]. Yousef, A. A., Al-Saleh, S., Al-Kaabi, A., & Al-Jawfi, M. (2010, October). Laboratory investigation of novel oil recovery method for carbonate reservoirs. In SPE Canada Unconventional Resources Conference (pp. SPE-137634). SPE. doi.org/10.2118/137634-MS.
[11]. Lashkarbolooki, M., Ayatollahi, S., & Riazi, M. (2014). Effect of salinity, resin, and asphaltene on the surface properties of acidic crude oil/smart water/rock system. Energy & Fuels, 28(11), 6820-6829. doi.org/10.1021/ef5015692.
[12]. Moeini, F., Hemmati-Sarapardeh, A., Ghazanfari, M. H., Masihi, M., & Ayatollahi, S. (2014). Toward mechanistic understanding of heavy crude oil/brine interfacial tension: The roles of salinity, temperature and pressure. Fluid phase equilibria, 375, 191-200. doi.org/10.1016/j.fluid.2014.04.017.
[13]. Moradi, M., & Alvarado, V. (2016). Influence of aqueous-phase ionic strength and composition on the dynamics of water–crude oil interfacial film formation. Energy & Fuels, 30(11), 9170-9180. doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01841.
[14]. Wang, X., Pensini, E., Liang, Y., Xu, Z., Chandra, M.S., Andersen, S.I., Abdallah, W. and Buiting, J.J., 2017. Fatty acid-asphaltene interactions at oil/water interface. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 513, pp.168-177. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.10.029.
[15]. Ameri, A., Esmaeilzadeh, F., & Mowla, D. (2019). Effect of brine on asphaltene precipitation at high pressures in oil reservoirs. Petroleum Chemistry, 59(1), 57-65.
[16]. Jian, C., Poopari, M. R., Liu, Q., Zerpa, N., Zeng, H., & Tang, T. (2016). Mechanistic understanding of the effect of temperature and salinity on the water/toluene interfacial tension. Energy & Fuels, 30(12), 10228-10235. doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01995.
[17]. Mahmoudvand, M., Javadi, A., & Pourafshary, P. (2019). Brine ions impacts on water-oil dynamic interfacial properties considering asphaltene and maltene constituents. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 579, 123665. doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123665.
[18]. Hamidian, R., Lashkarbolooki, M., & Amani, H. (2020). Evaluation of surface activity of asphaltene and resin fractions of crude oil in the presence of different electrolytes through dynamic interfacial tension measurement. Journal of Molecular Liquids, 300, 112297. doi.org/10.1016/j.molliq.2019.112297.
[19]. Alves, C. A., Yanes, J. F. R., Feitosa, F. X., & de Sant'Ana, H. B. (2022). Influence of asphaltenes and resins on water/model oil interfacial tension and emulsion behavior: Comparison of extracted fractions from crude oils with different asphaltene stability. Journal of Petroleum Science and Engineering, 208, 109268. doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109268.
[20]. Ashoorian, S., Javadi, A., Hosseinpour, N., & Nassar, N. N. (2023). Interrelationship of bulk and oil-water interfacial properties of asphaltenes. Journal of Molecular Liquids, 381, 121761. doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121761.
[21]. Zhang, S., Zhang, L., Lu, X., Shi, C., Tang, T., Wang, X., Huang, Q. and Zeng, H., 2018. Adsorption kinetics of asphaltenes at oil/water interface: Effects of concentration and temperature. Fuel, 212, 387-394, doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.051.
[22]. Khalili, H., Fahimpour, J., Sharifi, M., & Isfehani, Z. D. (2022). Investigation of influential parameters on oil/water interfacial tension during low-salinity water injection. Journal of Energy Resources Technology, 144(8), 083008. doi.org/10.1115/1.4053138.
[23]. Li, Y., Li, C., Zhao, Z., Cai, W., Xia, X., Yao, B., Sun, G. and Yang, F., 2022. Effects of asphaltene concentration and test temperature on the stability of water-in-model waxy crude oil emulsions. ACS omega, 7(9), 8023-8035, doi: 10.1021/acsomega.1c07174.
[۲۴]. رضوانی سیمکانی، ح. (۱۳۹۷). بررسی آزمایشگاهی تغییر خواص سطحی با استفاده از ترکیب آب هوشمند و نانوذرات اکسید آلومینیوم و تأثیر آن بر جریان سیال در محیط متخلخل، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف، دانشکده مهندسی معدن دانشگاه صنعتی اصفهان.
https://library.iut.ac.ir/dL/search/default.aspx?Term=13947&Field=0&DTC=107

[۲۵]. عبدی، ا. (۱۳۹۹)، بررسی پدیده سطحی سیستم آب هوشمند و نفت آسفالتینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-مخازن هیدروکربوری، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز دانشگاه شیراز، پایان‌نامه.
[۲۶]. محمدی، ا.، چهاردولی م. و سیم‌جو م. (۱۴۰۰). بررسی آزمایشگاهی تأثیر غلظت آسفالتین و یون‌های دوظرفیتی محلول در آب بر کشش بین‌سطحی سیستم هپتول/آب شور، مجله پژوهش نفت، ۳۱، ۱۲۱، (۱۴۰-۱۲۸). doi.org/10.22078/PR.2021.4322.2958.
[۲۷]. طاهریان ز. (۱۴۰۱). بررسی تجربی اثر آسفالتین و خصوصیات آن روی برهم‌کنش‌های سیال/سیال در سیلاب‌زنی آب کم شور، رساله دکتری مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس.
[28]. Shojaei, S. A., Osfouri, S., Azin, R., & Dehghani, S. A. M. (2020). Kinetic modeling of asphaltene nano-aggregates formation using dynamic light scattering technique. Journal of Petroleum Science and Engineering, 192, 107293.doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107293.
[29]. Lashkarbolooki, M., Ayatollahi, S., & Riazi, M. (2014). The impacts of aqueous ions on interfacial tension and wettability of an asphaltenic–acidic crude oil reservoir during smart water injection. Journal of Chemical & Engineering Data, 59(11), 3624-3634. doi.org/10.1021/je500730e.
[30]. Chávez-Miyauchi, T. E., Firoozabadi, A., & Fuller, G. G. (2016). Nonmonotonic elasticity of the crude oil–brine interface in relation to improved oil recovery. Langmuir, 32(9), 2192-2198. doi.org/10.1021/acs.langmuir.5b04354.