

راهکارهای نوآورانه برای پیشگیری و درمان آسیب‌های آسفالتینی در چاه‌های نفتی

احسان جعفریگی*؛ سید حسین حسینی
گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده



واژه‌های کلیدی:

آسفالتین، آسیب سازند، نانوذرات، آب کم شور، مخزن.

:Keywords

Asphaltenes,
Formation damage,
Nanoparticles,
Low-salinity water,
Reservoir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

نوع مقاله: علمی - پژوهشی

حضور آسفالتین در مخازن نفتی باعث آسیب سازند، رسوب در خطوط لوله و عوارض جدی در تضمین روان آب و کاهش بازیافت نفت می‌شود. بنابراین، در این راستا، بررسی کامل ساختار و خصوصیات آسفالتین برای کنترل این موضوع ضروری است. به طور کلی، این مقاله یک بررسی جامع برای شناخت بهتر و مدیریت آسفالتین را ارائه می‌کند، و به نوبه خود به درک مکانیسم‌های حاکم در مخازن نفتی کمک می‌کند. همچنین، مواردی شامل روش‌های پیشگیری با استفاده از نانوذرات و آب کم شور، مطالعات موردی صنعتی برای درک کاربرد نظریه‌ها در مسائل عملی و پر کردن شکاف بین نظریه و شرایط میدانی، ارائه چشم انداز و فن آوری‌های جدید و جهت‌گیری تحقیقات آینده در مورد آسفالتین مورد بحث قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که دستیابی به حداکثر کارایی در روش‌های ترکیبی آب کم شور و نانوذرات برای کنترل رسوب آسفالتین مستلزم بهینه‌سازی همزمان سه عامل کلیدی شامل فرمولاسیون دقیق مواد شیمیایی، انجام ارزیابی‌های آزمایشگاهی جامع و اجرای برنامه‌های پایش مستمر در شرایط میدانی می‌باشد که این سه گانه حیاتی در واقع اساس توسعه راهکارهای صنعتی کارآمد برای غلبه بر چالش‌های ناشی از رسوب آسفالتین در مخازن نفتی محسوب می‌شود. به طور کلی، این مطالعه بینش‌هایی جدیدی را ارائه می‌دهد و در عین حال تضمین‌کننده جریان مداوم در عملیات چاه‌های نفت است.

مقدمه

یا انسداد تجهیزات به دلیل تشکیل جامدات، مانند واکس، آسفالتین و هیدرات از جنبه‌های کلیدی تضمین جریان در انرژی نفت و گاز می‌باشد. در این راستا، آسفالتین‌ها ترکیبات سنگینی هستند که در نفت خام یافت می‌شوند. چهار بخش اصلی نفت شامل اشباع، آروماتیک،

پیش‌بینی می‌شود تقاضای افزایش مصرف انرژی تا سال ۲۰۳۰ دو برابر شود. لذا در این راستا، تضمین جریان شامل حفظ تولید پایدار هیدروکربن از مخزن تا تأسیسات یک مسئله اساسی می‌باشد. به طوری که، مدیریت جریان هیدروکربن و جلوگیری از آسیب سازند

*عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: e.jafarbigi@ilam.ac.ir

رجاع: احسان جعفریگی، سید حسین حسینی، راهکارهای نوآورانه برای پیشگیری و درمان آسیب‌های آسفالتینی در چاه‌های نفتی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳) ۴۴: ۱۳۵ تا ۱۶۲ (۱۴۰۴).

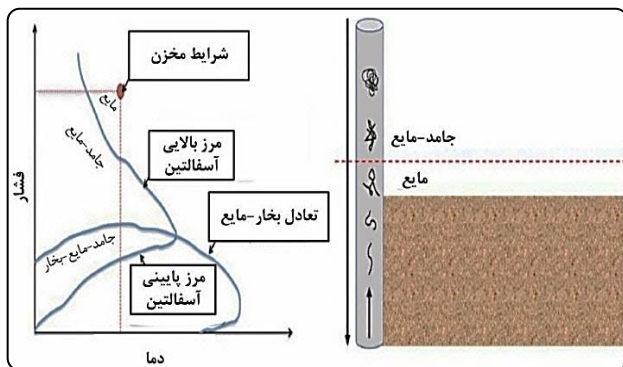
چالش اصلی در محیط‌های متخلخل، حفظ جریان سیال در مواجهه با کاهش فشار، تغییرات ترکیبی و برهمکنش‌های الکترواستاتیکی در سیستم سنگ-سیال است که منجر به رسوب آسفالتین و تغییرات نامطلوب در خواص پتروفیزیکی مانند نفوذپذیری و ترشوندگی می‌گردد. این پدیده پیچیده، با تأثیر مستقیم بر هزینه‌های عملیاتی، درآمد خالص و ضریب بازیافت نفت، به یکی از دغدغه‌های اصلی صنعت نفت تبدیل شده است. مطالعه حاضر با هدف ارائه راهکارهای نوین برای کنترل رسوب آسفالتین از سطح شیمی و مولکولی تا مقیاس میدانی، بررسی نظام‌مند عوامل مؤثر، مکانیسم‌های رسوب‌زایی و روش‌های بازدارندگی می‌پردازد. در این راستا، تأثیر آب کم‌شور و نانوذرات به عنوان راهکارهای امیدبخش، برهمکنش‌های شیمیایی آسفالتین با کانی‌های سنگی، و پارامترهای عملیاتی مؤثر به تفصیل تحلیل شده‌اند. این پژوهش با ترکیب دانش بنیادی از شیمی نفت و آسفالتین، به دنبال پاسخ به این پرسش‌های کلیدی است: چه ترکیباتی بهینه‌ترین عملکرد را در کنترل رسوب آسفالتین دارند؟ چه ویژگی‌های مولکولی این برتری را ایجاد می‌کنند؟ و چگونه می‌توان این یافته‌ها را در مقیاس میدانی به کار برد؟ این و بسیاری از سؤالات دیگر، محورهایی هستند که این مقاله بر آنها استوار است، تنها هدف ارائه دیدگاهی روشن به محققان و هموار نمودن حوزه‌هایی باز برای تحقیقات بیشتر است. نتایج این مطالعه نه تنها درک ما از مکانیسم‌های انتقال در محیط‌های متخلخل را عمق می‌بخشد، بلکه راهنمای ارزشمندی برای محققان و متخصصان صنعت نفت در مواجهه با چالش رسوب آسفالتین ارائه می‌دهد.

آسفالتین‌ها

آسفالتین‌ها مولکول‌ها یا ساختارهای پیچیده‌ای هستند که در نفت‌ها وجود دارند که منجر به تغییر چگالی و ویسکوزیته آنها می‌شوند [۴۸-۵۲]. شکل ۱ رویکرد آسفالتین در محیط متخلخل و مشکلات مربوط به بارش و رسوب آسفالتین را در میداین نفتی نشان می‌دهد. روش‌های مختلفی برای شناسایی و مطالعه ساختار و ترکیب آسفالتین در نفت خام استفاده می‌شود. این روش‌ها برای تعیین جنبه‌های مختلف نفت خام استفاده می‌شوند و از نظر دقت و نحوه تشخیص آسفالتین متفاوت هستند. برخی از این روش‌ها حتی می‌توانند تجزیه و تحلیل اشباع، آروماتیک، رزین و آسفالتین را با تعیین بخش‌های مختلف نفت خام و ترکیبات آنها انجام دهند. روش‌های مورد استفاده شامل میکروسکوپ اسکن لیزری کانفوکال و روش طیف سنجی نوری است. در حالی که سایر روش‌ها بر روی رویکرد جزء به جزء متمرکز هستند که در آن ترکیب نفت خام بر اساس رویکردهای مختلف درون نفت ساخته می‌شود، مانند روش‌های کروماتوگرافی [۵۳-۵۵]. علاوه بر اینکه فشار و ترکیب متغیرهای

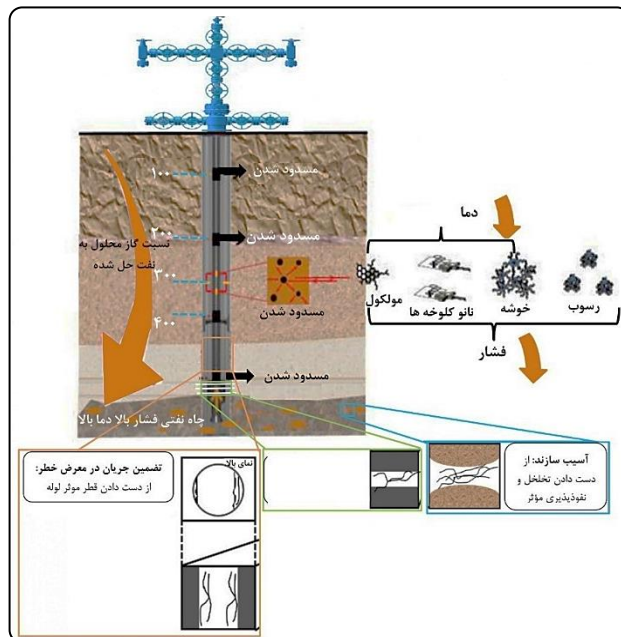
رزین و آسفالتین^۱ می‌باشد، که در بین آنها مشخصات بخش آسفالتین پیچیده‌ترین است، زیرا این بخش از سنگین‌ترین مولکول‌ها، با قطبیت بالاتر و ساختارهای مولکولی حاوی حلقه‌های آروماتیک تشکیل شده است [۱-۴]. آسفالتین‌ها به دلیل تغییر در ترکیب نفت، فشار و دما در محیط متخلخل، خطوط لوله و تجهیزات تصفیه رسوبات جامد تشکیل می‌دهند و مشکلات عملیاتی متعددی را ایجاد می‌کنند [۵-۹]. این مشکلات باعث آسیب‌های اقتصادی می‌شوند، زیرا می‌توانند ویژگی‌های پتروفیزیکی مخازن نفتی را تغییر داده و باعث آسیب شدید به مخزن شود. همچنین، رسوب آسفالتین‌ها به شکل جامد منجر به مسدود شدن منافذ در سازند تولیدی، از بین رفتن تخلخل موثر، تغییر در نفوذپذیری و ترشوندگی می‌شود [۱۰-۱۸]. فرآیند آسفالتین را می‌توان به چهار مرحله یعنی بارش، لخته‌سازی، تجمع و رسوب گذاری تقسیم نمود [۱۹ و ۲۰]. در میان این مراحل، بارش دشوارترین فرآیند برای پیش‌بینی است و زمانی که یک فاز نامحلول متشکل از جامدات در هیدروکربن ظاهر می‌شود، قابل شناسایی است [۲۱-۲۳]. آسفالتین‌ها در نفت به صورت پخش کننده کلوئیدی یافت می‌شوند، لذا وقتی ناپایدار می‌شود، مواد آسفالت نامحلول شناسایی می‌شود [۲۴-۲۶]. به طور کلی، فشاری که در آن آسفالتین‌ها در یک دمای ثابت شروع به رسوب می‌کنند، فشار شروع بارش آسفالتین نامیده می‌شود. دانستن دقیق این فشار اطلاعات بیشتری را در اختیار مهندسان مخزن قرار می‌دهد تا برای پیشنهاد جایگزین‌ها و راه حل‌ها برای غلبه بر مشکل مربوط به ناپایداری آسفالتین‌ها تصمیم‌گیری نمایند [۲۷-۳۰]. بسیاری از کارهای مربوط به تعیین رسوب آسفالتین در فشار اتمسفر [۳۱-۳۳] و رفتار آسفالتین‌ها در شرایط مخزن [۳۴-۳۷]، در دسترس هستند. امروزه، در رابطه با بحث چالش‌های آسفالتین در مخازن نفتی، علاقه به تزریق آب کم‌شور و نانو مواد (نانوذرات و نانوکامپوزیت‌ها) به منظوری جلوگیری از رسوب آسفالتین در حال رشد است. به طور کلی، نانومواد مناطق فوق‌العاده بزرگ و کاربردی در رابطه با فعالیت سطحی با مولکول‌های آسفالتین و همچنین تغییر ترشوندگی سنگ ارائه می‌دهند [۳۸ و ۳۹]. از طرف دیگر، آب کم‌شور، محلول آب نمک تنظیم‌شده با غلظت نمک کمتر از ۲۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است [۴۰]. این تکنیک به دلیل مزایایی مانند هزینه کم، سهولت تنظیم شیمی آب و ویژگی‌های سازگار با محیط زیست، توجه زیادی را از سوی صنعت نفت و گاز به خود جلب کرده است [۴۱]. بسیاری از محققان اظهار دارند که آب کم‌شور می‌تواند به طور قابل توجهی ترشوندگی سطح سنگ را از حالت نفت‌دوست به حالت آب‌دوست تغییر داده و به نوعی به عنوان پایدار کننده نفت آسفالتینی شناخته شود [۴۲ و ۴۳]. کارهای آزمایشگاهی و میدانی انجام شده با آب کم‌شور نشان می‌دهد که استفاده از آب کم‌شور برای بازیافت نفت و مقابله با بارش/رسوب آسفالتین موثر است [۴۴-۴۷].

(۱) Saturate, Aromatic, Resin and Asphaltene (SARA)



شکل ۲ - نمودار پوش فازی آسفالتین.

در این راستا، کوروپ و همکاران^۲ [۷۰] رسوب‌گذاری میدان ونتورا^۳ را بررسی نمودند. آنان تزریق کربن دی اکسید و سایر تکنیک‌های ازدیاد برداشت نفت به عنوان دلایل تغییرات ترکیبی در خواص سیال را عامل رسوب‌گذاری میدان ونتورا دانستند. العبدلی و همکاران^۴ [۷۱]، یک مطالعه میدانی بر روی مخزن ماگوا مارات^۵، برای تعیین خطر رسوب آسفالتین و بهترین استراتژی کاهش بر اساس داده‌های تولید از ۳۶ چاه به دست آمده در بازه زمانی ۳۰ سال با جمع‌آوری ۲۲ گزارش از اندازه‌گیری فشار شروع آسفالتین ارائه کردند. آنان بر اساس مدل‌سازی فشار-حجم-دما به این نتیجه رسیدند که مخزن در معرض خطر شدید رسوب آسفالتین نیست، با این حال، نظارت مداوم بر عملکرد چاه بسیار مهم است. هاسکت و تارتر^۶ [۷۲] رسوب آسفالتین را در میدان حسی مسعود^۷ الجزایر بررسی کردند و فشار اولیه مخزن را ۶۸۲۵ psi گزارش نمودند. نقطه حباب بین ۲۱۳۰ تا ۲۸۸۰ psi و نسبت گاز به نفت بین ۱۰۳۰ تا ۱۳۹۰ ft³/bbl متغیر بود. مقدار آسفالتین با روش لوئیس ۵۰۰ میلی گرم بر لیتر تخمین زده شد و از لوله‌های مختلفی برای چاه‌ها با تولید روزانه متفاوت استفاده شد. رسوبات عمدتاً (۸۳،۴٪) از آسفالتین تشکیل شده بود و تنها در فشارهای بالاتر از نقطه حباب رخ می‌داد. استفاده از کاهنده^۸ باعث کاهش فشار سر چاه از ۱۰۰۰ psi به ۷۸۰ psi و افزایش تولید از ۸۹۲۵ به ۹۷۰۰ بشکه در روز شد. پس از اصلاحات، میانگین شستشو از هر ۴۱،۶ روز به ۱۶۳ روز افزایش یافت، که نشان‌دهنده موفقیت روش بود. هرچند این نتایج به چاه‌های با لوله ۴ و ۱/۲ اینچی و جریان بالا محدود شد و نیاز به بررسی بیشتر برای سایر اندازه‌های لوله داشت. الکافیف و همکاران^۹ [۷۳] به منظور جلوگیری از رسوب آسفالتین با حفظ محلول آسفالتین‌ها در نفت، مدلی را برای پیش‌بینی شروع رسوب آسفالتین در شرایط میدانی ایجاد کردند. در این راستا، داده‌ها از چاه‌های عمیق مارات (ژوراسیک) غرب کویت با استفاده از دیتالاگر جمع‌آوری نمودند.



شکل ۱ - نمایش گرافیکی تاثیر حضور آسفالتین در مقیاس میدانی.

غالبی هستند که می‌توانند میزان بارش آسفالتین‌ها را تعیین کنند، دما نیز می‌تواند بر روند بارش آسفالتین تأثیر بگذارد [۵۷ و ۵۶]. نمونه واضحی از تأثیر ترکیب بر رسوب آسفالتین را می‌توان در فرآیندهایی مشاهده کرد که نیاز به تزریق نوعی سیال به مخزن دارند، مانند تحریک چاه، که در آن مقادیر قابل توجهی از مواد تزریق می‌شود و این می‌تواند آسفالتین‌ها را در نفت ناپایدار کند. این امر به این دلیل اتفاق می‌افتد که چنین موادی تغییراتی در پارامتر حلالیت نفت ایجاد می‌کنند. بنابراین، رسوب آسفالتین می‌تواند زمانی رخ دهد که نفت با مواد ناسازگار (کربن دی اکسید، گازها یا حلال‌ها) مخلوط شود [۵۸-۶۱]. از طرفی دیگر، تغییر فشار باعث می‌شود، در برخی از مراحل تولید، فشار به پوش فازی رسوب آسفالتین^۱ برسد. در این مرحله، تمام مواد محلول آسفالتین در نفت رسوب می‌کنند و منجر به رسوب در مخزن و لوله‌ها می‌شود [۶۲-۶۵]. شکل ۲ نقاط بحرانی برای شروع بارش آسفالتین را نشان می‌دهد. به طور کلی، وقتی فشار کاهش می‌یابد، میزان آسفالتین‌های رسوب شده افزایش می‌یابد [۶۶-۶۸]. دو نظریه در مورد رسوب آسفالتین وجود دارد: یکی از آنها، آسفالتین‌ها را در حالت مایع واقعی در نفت در نظر می‌گیرد و با استفاده از تکنیک‌های ترمودینامیکی برای پیش‌بینی رفتارهای فازی، آسفالتین‌ها را در حالت کلوتیدی می‌داند. نظریه دوم آسفالتین را به صورت ذرات معلق در نفت می‌داند و از تکنیک‌های علوم کلوتیدی برای پیش‌بینی رفتارهای فازی استفاده می‌کند [۶۹ و ۷۰]. لذا در گذشته، در حضور مواد شیمیایی مطالعاتی انجام شده است.

(۱) APE

(۳) Ventura

(۵) Magwa Marrat

(۷) Hassi Messaoud

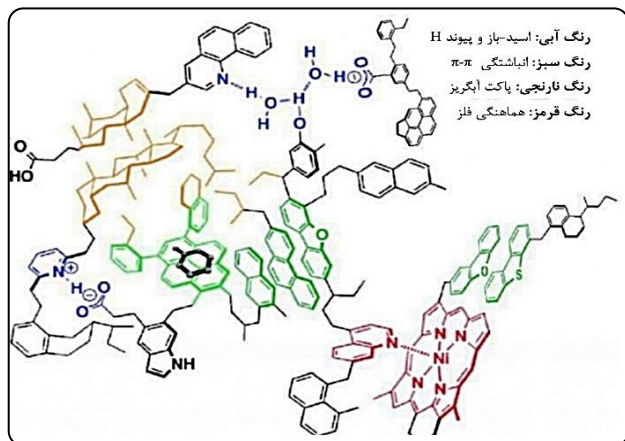
(۹) Alkafeef

(۲) Kurup et al.

(۴) Al-obaidli et al.

(۶) Haskett and Tartera

(۸) Choke



شکل ۳ - مکانیسم برهمکنش نانو خوشه‌های آسفالتین [۸۰].

زیرا این مولکول‌ها معمولاً دارای هسته کوچکتر با مقدار هترو اتم کمتر و حضور بیشتر جایگزین‌های آلکیل هستند [۸۵ و ۸۶]. این آخرین مشخصه معمولاً مربوط به حلالیت بیشتر رزین‌هایی است که کلوخه‌های آسفالتین را احاطه کرده و آنها را در فرم کلوئیدی خود نگه می‌دارند [۸۰]. بنابراین، در نظر گرفته می‌شود که کمبود این کسر، رسوب آسفالتین را امکان‌پذیر می‌سازد [۸۷]. بنابراین، کنترل رسوب آسفالتین در نفت خام با کمبود طبیعی عوامل پایدار کننده، یک نگرانی عمده برای صنعت نفت و گاز برای جلوگیری از کاهش بهره‌وری است که بیشتر در نفت خام سبک دیده می‌شود [۸۸ و ۸۹].

نانوفناوری و فرآیند جذب آسفالتین

نانوذرات به عنوان یک مهارکننده برای جلوگیری از رسوب آسفالتین عمل می‌کنند و در این راستا، مولکول‌های آسفالتین را جذب می‌کنند. آنها مولکول‌های آسفالتین را احاطه کرده و تجزیه می‌کنند، و در نتیجه ویسکوزیته آنها را کاهش می‌دهند و از تجمع، رسوب و رسوب در سطح سنگ جلوگیری می‌کنند. به طور کلی، توسعه مواد برای جذب آسفالتین‌ها در شرایط مخزن به دلیل اندازه نانوذرات کوچک (۱۰۰ نانومتر) امکان‌پذیر است [۹۰]. نانوذرات، آسفالتین‌ها را در حالت کلوئیدی خود جذب می‌کنند و از تجمع آنها جلوگیری می‌کنند، به طور کلی یک تکنیک کارآمد برای جلوگیری از آسیب سازند فراهم می‌کنند [۹۱]. به این ترتیب، بسیاری از محققین بر روی سنتز و ارزیابی انواع مختلف نانومواد با هدف تعیین ظرفیت جذب آنها نسبت به آسفالتین‌ها و بهبود شرایط جریان از طریق آزمایشات سیلابزنی مغزه پس از ایجاد ناپایداری آسفالتین متمرکز شده اند [۹۲ و ۹۳]. در این بخش، جذب آسفالتین بر روی نانوذرات (اکسیدهای فلزی خالص و نانوذرات ترکیبی) توسط نویسندگان مختلف مورد بحث قرار گرفته شده است. به طور کلی، نانوذرات ترکیبی با ترکیب حداقل دو نانوذرات مختلف برای غلبه بر محدودیت‌ها و برای دستیابی به ویژگی‌های مناسب جدید توسعه می‌یابند.

سپس ضخامت رسوب را تخمین زدند و با نتایج حاصل از آزمایش قطر سنج مقایسه نمودند. نویسندگان پیشنهاد کردند که تجمع آسفالتین به معنای وجود رسوب آسفالتین نیست. آنان بیان نمودند اطلاعات فشار سرچاهی برای درک کامل این پدیده بسیار مهم است. مشاهده شد که کاهش فشار سرچاهی در نتیجه تغییر شرایط در امتداد چاه اتفاق می‌افتد. بر اساس داده‌های مشاهده شده از چندین چاه در غرب کویت، فشار شروع آسفالتین (۳۸۰۰ psi) و فشار نقطه حباب ۲۴۰۰ psi اندازه‌گیری شد. با استفاده از پلاگ‌هایی با قطر ۱/۷۴ اینچ، قسمت بالایی رسوب در عمق ۸۰۰۰-۹۰۰۰ فوتی مشاهده شد که بین نقطه حباب و فشار شروع آسفالتین قرار داشت. در این راستا، ضخامت رسوب با اجرای قطر سنج دو بازویی ۰/۳۵ اینچ تعیین شد.

بررسی عوامل مؤثر بر خودآرایی و رسوب آسفالتین‌ها در نفت خام

آسفالتین‌ها یک رفتار خودآرایی دارند که به دلیل ساختار شیمیایی خاص آنها است [۷۴]. در این راستا، مولکول‌های آسفالتین عموماً به عنوان ساختارهای جزیره‌ای توصیف می‌شوند که از یک هسته پلی آروماتیک با شاخه‌های آلکیل و با حضور هترواتم‌هایی مانند گوگرد، اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده‌اند [۷۵ و ۷۶]. این هترواتم‌ها با مکانیسم‌های مختلف مانند برهمکنش‌های اسید-باز و پیوند H در هنگام داشتن گروه‌های پایانی H (H-گروه‌های ترمینال)، آسفالتین‌ها را قادر به خودآرایی می‌سازند. این مکانیسم‌های تجمع معمولاً به برهمکنش گروه‌های عاملی حاوی N (پیرولیک، پیریدین، کینولین) و O (کربونیل، کربوکسیل، هیدروکسیل) مربوط می‌شوند [۷۷-۷۹]. این پدیده‌ها توسط گروه‌های عاملی حاوی N کنترل می‌شوند که می‌توانند به عنوان خوشه‌های دارای بار مثبت با توانایی تعامل با گروه‌های اکسیژن با بار منفی، به دلیل تفاوت در الکترونگاتیوی بین اتم‌های O و عناصر دیگر مانند H، یافت شوند [۸۰]. از سوی دیگر، مکانیسم‌های تجمع اضافی مرتبط با انباشته شدن $\pi-\pi$ به دلیل انباشته شدن هسته‌های پلی آروماتیک آسفالتین‌ها و مجتمع‌های هماهنگ فلزی ناشی از حضور وانادیوم، آهن و نیکل در ساختارهای آسفالتین نیز مشاهده می‌شوند [۸۱ و ۸۲]. مکانیسم‌های تجمع ذکر شده توسط گری و همکاران [۸۰] پیشنهاد شده است (همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود). اگرچه این نیروهای درون مولکولی ضعیف هستند، آنها بیان کردند که ترکیب مکانیسم‌ها عامل حاکم بر پدیده تجمع آسفالتین است. با این وجود، ترکیب نفت خام نقش عمده‌ای در پدیده‌های انباشتگی دارد، زیرا در مطالعات مختلف ثابت شده است که رزین‌ها با نانوذرات آسفالتین برهم‌کنش نموده و رشد آنها را محدود می‌کنند و آنها را در شکل کلوئیدی اولیه خود نگه می‌دارند [۸۳ و ۸۴]. تفاوت اصلی بین رزین‌ها و آسفالتین‌ها در قطبیت آنها است که برای رزین‌ها کمتر است

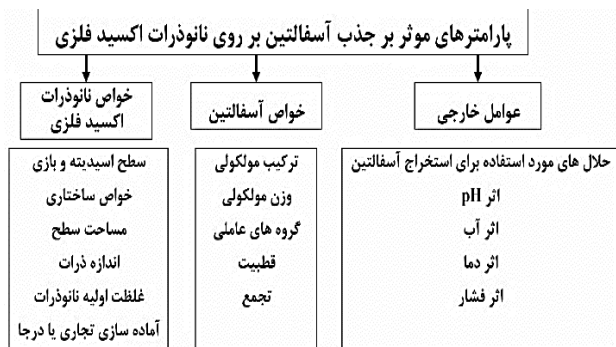
(1) Gray et al.

اکسیدهای فلزی

عوامل و مکانیسم‌های متعددی وجود دارند که جذب آسفالتین بر روی سطوح اکسید فلزی را کنترل می‌کنند. این مکانیسم‌ها در شکل ۴ ارائه شده و در بخش‌های زیر شرح داده شده‌اند.

اسیدیته و بازیسیته سطحی

تأثیر اسیدیته و بازیسیته سطحی نانوذرات اکسید فلزی بر جذب آسفالتین توسط مطالعات متعددی [۹۴-۱۰۱] بررسی شده است. براساس این پژوهش‌ها میزان برهمکنش‌های اسید-باز و جاذبه‌های الکترواستاتیک ممکن است مکانیسم‌های اصلی جذب باشند. قبلاً پیشنهاد شده است که اجزای بازی در نفت خام عمدتاً به شکل بخش‌های آسفالتین وجود دارند [۱۰۱]. بنابراین، اکسیدهای فلزی با بالاترین تراکم مکان‌های اسیدی سطحی، بیشترین ظرفیت و میل ترکیبی را نسبت به آسفالتین‌ها نشان دادند. در میان انواع مختلف اکسیدها/نمک‌های فلزی مورد استفاده برای مطالعات جذب آسفالتین‌ها، گزارش شده است که ظرفیت جذب نانوذرات به صورت زیرکونیوم اکساید > کربنات کلسیم > اکسید منیزیم > اکسید تنگستن > اکسید آهن > نیکل کاهش یافته است. این امر با اثرات هم‌افزایی اسیدیته سطح و همچنین بار خالص کل سطوح نانوذرات مرتبط است [۹۴]. اثرات مشابهی در مطالعه‌ای [۹۶] یافت شد که در آن همه نانوذرات آزمایش‌شده، میل ترکیبی جذب بالاتری (۳/۴-۶۳/۱۲ میلی گرم بر متر مربع) نسبت به آسفالتین‌ها به ترتیب اکسید آهن > اکسید کبالت > نیکل نشان دادند. نصار و همکاران^۱ [۹۵] شش نوع مختلف از نانوذرات اکسید فلزی (تیتانیوم دی اکسید > نیکل > اکسید منیزیم > اکسید آهن > اکسید کبالت > اکسید کلسیم) موجود در بازار را انتخاب کردند و دریافتند که ماهیت اسیدی نانوذرات برای ظرفیت‌های جذب مهم است، زیرا اکسیدهای بازی (اکسید کلسیم و اکسید منیزیم) و اکسیدهای آمفی پروتیک (اکسید آهن و اکسید کبالت) ظرفیت‌های جذب بیشتری نسبت به اکسیدهای اسیدی (نیکل و تیتانیوم دی اکسید) نشان دادند. در مقابل، کیفیت‌های جذب اندازه‌گیری شده برای اکسیدهای اسیدی (تیتانیوم دی اکسید و نیکل) بیشتر گزارش شد. بعدها، بتانکور و همکاران^۲ [۱۰۲] نانوذرات سیلیکا را با اصلاح‌کننده‌های اسیدی، بازی و خنثی تطبیق دادند و تأثیر خواص سطحی نانوذرات بر جذب آسفالتین‌ها از محلول‌های هپتول تخمین زده شد. نتایج نشان داد که نانوذرات با بالاترین اسیدیته کل، بالاترین ظرفیت جذب آسفالتین‌ها را دارند. به طور کلی، شکل ۴ پارامترهای موثر بر جذب آسفالتین بر روی نانوذرات اکسید فلزی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - پارامترهای موثر بر جذب آسفالتین بر روی نانوذرات اکسید فلزی.

نانوذرات تجاری در مقابل نانوذرات آماده‌شده درجا

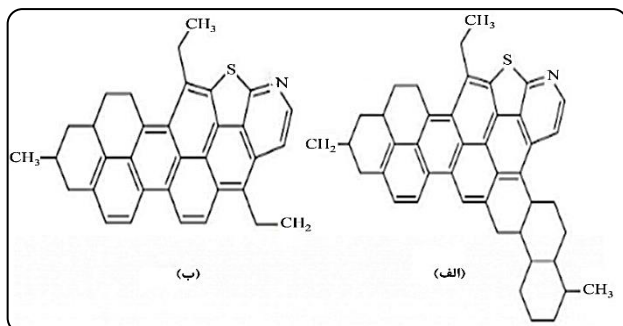
نانوذرات آماده‌شده درجا به دلیل پراکندگی مؤثرشان در محلول، تعامل بهتری با آسفالتین‌ها داشتند. پراکندگی کمتر نانوذرات تجاری به طور بالقوه مساحت کل سطح آنها را کاهش داده و محدودیت‌های انتقال جرم داخلی و خارجی ایجاد کرده است [۱۰۳ و ۱۰۴]. در یکی از مطالعات [۱۰۴] مشاهده شد که نانوذرات نیکل تجاری با اندازه یکسان، ۸۵٪ کمتر از نیکل آماده‌شده درجا، تحت شرایط آزمایشگاهی یکسان، جذب سطحی داشتند. علاوه بر این، آنان نشان دادند که نانوذرات اکسید آهن درجا، جذب بالاتری (۲/۶ ± ۰/۱۲ گرم آسفالتین بر گرم نانوذرات) در مقایسه با نانوذرات اکسید آهن تجاری (۰/۶ ± ۰/۲ گرم آسفالتین بر گرم نانوذرات) را دارا است. کارآمدترین نانوذرات از نظر کاهش ویسکوزیته نفت و رسوب آسفالتین که در مقالات گزارش شده است، اکسید آهن، اکسید آلومینیوم، اکسید نیکل و اکسید کبالت هستند [۱۰۵-۱۰۷].

در مطالعه‌ای [۱۰۸]، عملکرد یک نانوماده هیبریدی متشکل از نانوذرات نیکل (با اندازه‌ی ۱۵ نانومتر) تثبیت‌شده بر روی بستر نانوذرات سیلیکاژل (با اندازه‌ی ۹۰ نانومتر) در جذب آسفالتین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که در دمای ثابت ۲۵ درجه سلسیوس، با افزایش درصد نیکل در نانوماده هیبریدی، ظرفیت جذب آسفالتین به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. با این وجود، افزایش دمای سیستم موجب کاهش جزئی در میزان جذب آسفالتین شد. همچنین، فرانکو و همکاران^۳ [۱۰۹] تأثیر درصد نیکل را بر عملکرد جذب آسفالتین توسط نانومواد هیبریدی متشکل از نانوذرات نیکل تثبیت‌شده بر روی بستر اکسید آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که ظرفیت جذب آسفالتین توسط نانوذرات نیکل بارگذاری شده بر روی اکسید آلومینیوم (۱۲۵،۷ میلی گرم بر گرم) به طور چشمگیری بیشتر از ظرفیت جذب اکسید آلومینیوم خالص (۶۳،۴ میلی گرم بر گرم) است. فرانکو و همکاران [۱۱۰] نانوذرات سیلیکا را با نیکل و اکسید پالادیوم عامل‌دار کردند و جذب آسفالتین‌های

(۱) Nassar et al.

(۳) Franco et al.

(۲) Betancur et al.



شکل ۵ - نمایش ساختارهای شیمیایی برای بخش‌های (الف) A1 و (ب) A2 آسفالتین‌ها [۱۱۳]

الف (کسر A1) دارای تعداد بیشتری از حلقه‌های آروماتیک است، در حالی که ب (کسر A2) دارای یک جایگزین آلکیل اضافی است [۱۱۳]. آروماتیک بودن بیشتر بخش A1 مانع از حلالیت آن می‌شود. این عدم حلالیت، تعامل بین گونه‌های A1 را از طریق مکانیسم‌های پیوند اسید-باز و پیوند H به دلیل قطبیت بالای آنها تسهیل می‌کند. این رفتار منجر به تشکیل هسته‌ها و گونه‌های کوچک بیشتری می‌شود که گونه‌های A2 با آن‌ها شروع به تعامل می‌کنند [۱۱۲ و ۱۱۴ و ۱۱۵]. شایان ذکر است که شکل نانوکلوخه‌های آسفالتینی به طور مداوم در حال تغییر (اندازه، آرایش مولکولی) هستند، زیرا نانوکلوخه‌ها در برابر نیروهای برشی مانند آنهایی که سیالات در محیط متخلخل و در سیستم‌های تولید اعمال می‌کنند به شدت در برابر شرایط محیطی (فشار و دما) حساس می‌باشند [۱۱۶-۱۱۸]. با این حال، قبل از افزودن نانوذرات، میکروساختار نفت خام حداقل برای یک بازه زمانی در حالت تعادل تعریف می‌شود. به این ترتیب، نانوذرات با آسفالتین‌ها تعامل می‌کنند، زیرا افزودن آنها تعادل میکروساختار نفت خام را مختل می‌کند [۱۱۶]. فعل و انفعالات آسفالتین - نانوذرات توسط همان مکانیسم‌های تجمع آسفالتین هدایت می‌شوند [۱۱۹]. این امر بر دو اصل استوار است: (۱) وجود سایت‌های فعال روی سطح نانوذرات [۱۲۰] و (۲) مقدار انرژی فعال کم [۱۲۱]. از این رو، هنگامی که نانوذرات به نفت خام اضافه می‌شوند، گنجاندن آنها منجر به اختلال در تعادل ریزساختار می‌شود [۱۲۲]. بنابراین، جذب آسفالتین در سطح نانوذرات خود به خود و به طور کلی گرم‌تر است [۱۲۳ و ۱۲۴]. همانند تجمع آسفالتین که در آن هسته‌ها توسط قطبی‌ترین تجمع تشکیل می‌شوند، برهم‌کنش آسفالتین-نانوذره ابتدا توسط کسر A1 هدایت می‌شود [۱۲۵]. از این رو، کسر A1 با سطح جاذب تعامل نموده و روی سطح جاذب جذب می‌شود تا جایی که سایت‌های فعال آن به دلیل اشباع بودن یا اثرات فضایی دیگر غیرقابل دسترس باشد [۱۲۵]. در این مرحله، در نظر گرفته می‌شود که آسفالتین‌های جذب‌شده یک تک لایه روی سطح نانومواد تشکیل داده‌اند [۱۲۱]. علاوه بر این، آسفالتین‌های جذب‌شده می‌توانند با آسفالتین‌های آزاد موجود در نفت خام بسته به همان اثرات فضایی ذکر شد، تعامل داشته باشند. به این معنا که آسفالتین‌هایی که روی

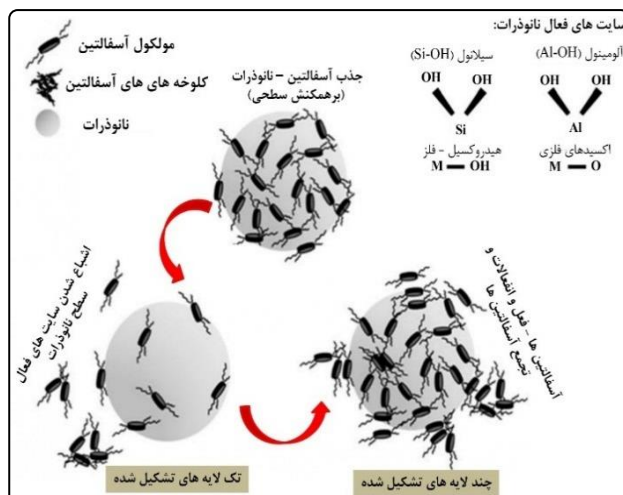
به دست آمده از نمونه‌های نفت خام سنگین را بررسی کردند. نشان داده شد که جذب بر روی نیکل و/یا اکسید پالادیوم پشتیبانی شده بر روی سیلیکا بسیار کارآمدتر از جذب بر روی سیلیکا خالص است. همچنین، نویسندگان نشان دادند که نانوذرات سیلیکا عامل دار سینتیک جذب سریع‌تر و جذب آسفالتین بیشتری نسبت به سایر نانوذرات دارند [۱۱۰]. سرعت بالای جذب آسفالتین توسط نانوذرات نیکل به نیروهای بین مولکولی (یعنی نیروهای الکتریکی و برهمکنش‌های قطبی) بین گروه‌های عاملی قطبی و هترواتم‌ها در ساختار آسفالتین و نیکل پشتیبانی شده بر روی ماتریس‌های نانوذرات مختلف نسبت داده شد. علاوه بر این، میل ترکیبی بالا به آسفالتین‌ها به پراکندگی خوب نیکل روی سطوح ماتریس پایه نسبت داده شد. پناهی و همکاران [۱۱۱] نانوذرات هیبریدی مبتنی بر نیکل، نانوذرات اکسید آهن پشتیبانی شده توسط کیتوزان و سیلیکا برای جذب آسفالتین از محلول‌های تولوئن آزمایش شدند. نتایج نشان داد که نانوذرات کیتوزان/اکسید آهن مقادیر قابل توجهی بالاتری از آسفالتین‌ها را جذب می‌کنند و مقادیر آسفالتین‌های جذب شده روی سطوح مختلف نانوذرات به صورت کیتوزان > سیلیکا > سیلیکا/اکسید آهن > اکسید آهن > کیتوزان/اکسید آهن است. علاوه بر این، مشاهده شد که تفاوت‌های جذب در محدوده غلظت بالاتر نانوذرات افزایش می‌یابد و رابطه مستقیمی با غلظت آسفالتین‌ها دارد. نویسندگان پیشنهاد کردند که جذب بالای آسفالتین‌ها روی اکسید آهن به دلیل برهمکنش‌های مولکولی بین الکترون‌های π در حلقه‌های آروماتیک با آهن در نانوذرات اکسید آهن است [۱۱۱].

رویکردهای پدیدارشناختی برهمکنش آسفالتین

رفتار بخش‌های نفت خام از نظر برهمکنش با نانوذرات

تفاوت‌ها در ساختار شیمیایی آسفالتین‌ها به دلیل قطبیت متفاوت، رفتار مشخصی را از نظر حلالیت برای هر مولکول ایجاد می‌کند [۱۱۲]. چندین مطالعه آسفالتین‌ها را بسته به حلالیت و در نتیجه قطبیت آنها به دو گروه A1 و A2 طبقه‌بندی کرده‌اند که گروه اول قطبی‌ترین گروه است. در این راستا، مشخص شده است که A1 دارای حلالیت معمولی ۹۰ میلی گرم بر لیتر در تولوئن است، در حالی که A2 حلالیت بسیار بالاتری بین ۵-۱۲٪ دارد [۱۱۳]. تفاوت در حلالیت به عوامل مختلفی مانند آروماتیک بودن بالاتر برای A1 نسبت داده شده است؛ به عنوان مثال، هسته پلی آروماتیک بزرگتر و یا نسبت حلقه‌های آروماتیک به گروه‌های آلکیل بالاتر، در حالی که کسر A2 دارای مقدار بیشتری از جایگزین‌های آلکیل است. که در این راستا، پایداری آن را در حلال‌های آروماتیک تسهیل می‌کند [۱۱۳]. در نتیجه، کسر A2 از نظر ساختار شیمیایی و نقش در تجمع آسفالتین شباهت زیادی با رزین‌ها دارد [۱۱۳]. یک نمایش عمومی از هر دو بخش در شکل ۵ ارائه شده است.

برای تشخیص نقطه شروع بارش آسفالتین استفاده نمودند. طیف‌سنجی مادون قرمز نشان داد که این نانوسیالات در شرایط اسیدی شدید قادر به رسوب‌دهی آسفالتین نیستند، اما تیتانیوم دی‌اکسید به‌عنوان پخش‌کننده عمل کرده و پایداری آسفالتین را افزایش داد. نتایج پراکندگی نور دینامیکی نیز تأیید کرد که این نانوسیالات تنها در محیط اسیدی (زیر نقطه حباب) مؤثر است. با این حال، با توجه به نیاز به تزریق بازدارنده‌ها قبل از نقطه شروع رسوب و عدم قطعیت در مورد شرایط اسیدی مخزن، کاربرد عملی تیتانیوم دی‌اکسید به‌عنوان پخش‌کننده با چالش‌هایی همراه است. لوریرو و همکاران^۱ [۱۳۱] پایدار کننده‌های آسفالتین را با استفاده از طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد پایدار کننده‌ها به غلظت آنها و ماهیت آسفالتین بستگی دارد زیرا عملکرد با منابع آسفالتین، متفاوت است. کاظم زاده و همکاران [۱۳۲] کنترل لخته‌سازی آسفالتین را با استفاده از نانوذرات سیلیکا، اکسید نیکل و اکسید آهن گزارش کردند. نویسندگان تکنیک‌های استاتیکی و دینامیکی (میکرومدل) را برای تعیین ظرفیت جذب نانوذرات ترکیب کردند و نتیجه گرفتند که ظرفیت جذب به ترتیب اکسید آهن > اکسید نیکل > سیلیکا است. آنان تأکید کردند که حضور نانوذرات حتی اگر از لخته شدن آسفالتین جلوگیری می‌کند، از بارش یا رسوب بر روی سطوح جلوگیری نمی‌کند. شایان و میرزایی [۱۳۳] نانوذرات ماگنیت و هماتیت را برای جذب آسفالتین در یک آزمایش دسته‌ای سنتز کردند و از تجزیه و تحلیل سطحی استفاده کردند که نشان دهنده ظرفیت جذب خوب نانوذرات و نمایش جذب چند لایه است. هاشمی و همکاران [۱۳۴] استفاده از نانوذرات نیکل بر رسوبات آسفالتین را بررسی نمودند و کاربرد آن را در مواردی که کربن دی‌اکسید به صورت امتزاجی گزارش نمودند. لو و همکاران^۲ [۱۳۵] استفاده از نانوذرات آلومینا را برای کنترل بارش آسفالتین بررسی کرده و کاهش بارش را با افزایش تعداد نانوذرات گزارش کردند. فرانکو و همکاران [۱۳۶] از نانوذرات بر پایه فلز برای جذب آسفالتین استفاده کردند. آنان به دلیل عملیات اسیدی سطح مشاهده بهبود خاصی در مهار رسوب آسفالتین کردند. مدحی و همکاران [۱۳۷] ظرفیت جذب آسفالتین توسط نانوذرات سیلیکا، آلومینا و منیزیم اکسید را تجزیه و تحلیل کردند و قابلیت جذب را به ترتیب در سیلیکا، منیزیم اکسید و آلومینا مشاهده نمودند. این مشاهده به شیمی سطح و تفاوت در ناحیه خاصی از نانوذرات نسبت داده شد. کاستیوو و همکاران^۳ [۱۳۸] جذب آسفالتین بر روی نانوذرات آهن صفر ظرفیتی را با استفاده از طیف‌سنجی نیروی اتمی، پراکندگی نور پویا، طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش مطالعه نمودند. آنان گزارش کردند که جذب آسفالتین بر روی نانوذرات به دلیل اثر ترکیبی میدان‌های الکتریکی محلی، برهم‌کنش‌های پراکندگی و قطبش مولکولی است.



شکل ۶ - پدیده جذب آسفالتین در سطح نانوذره.

سطح نانوذرات تجمع می‌کنند به دلیل این است که جذب آسفالتین در چند لایه جمع می‌شود [۱۲۶]. این چند لایه به دلیل در دسترس بودن بیشتر در مقایسه با A1 عمدتاً از بخش A2 تشکیل شده است. بنابراین، برهمکنش بین آسفالتین‌های تک لایه و آسفالتین‌های آزاد توسط انباشتگی $\pi-\pi$ انجام می‌گیرد [۱۲۱]. نمایشی از این پدیده در شکل ۶ نشان داده شده است. از سوی دیگر، رزین‌ها با پوشش دادن مجموعه‌های A1-A2 نقش کلیدی در تشکیل و تثبیت کلوخه‌ها ایفا می‌کنند. با این حال، مطالعات نشان داده‌اند که برهمکنش این رزین‌ها با سطح نانوذرات بسیار ضعیف است. مکانیسم جذب مشاهده شده [۱۲۷] عمدتاً به گشتاور دوقطبی ذاتی رزین‌ها نسبت داده می‌شود. در مورد جزء A2، رزین‌ها در مقایسه با مولکول‌های A1 دارای گشتاور دوقطبی جزئی هستند که ناشی از ساختار شیمیایی متفاوت آنهاست، به ویژه وجود جایگزین‌های آلکیل بیشتر در ساختارشان. این ویژگی باعث می‌شود بخش کوچکی از رزین‌های جذب‌شده بر سطح نانوذرات، به‌عنوان بخشی از ساختار چندلایه‌ای در کنار جزء A2 در نظر گرفته شوند [۱۲۸]. کرمیگی و همکاران [۱۲۹] استفاده از ترکیبات حاوی گروه عاملی کربوکسیلیک و هیدروکسیل را به‌عنوان بازدارنده آسفالتین به دلیل قابلیت برهمکنش $\pi-\pi$ با آسفالتین را بررسی کردند. آنان نشان دادند که افزایش غلظت بازدارنده ممکن است باعث افزایش خودتجمعی بازدارنده شود. بنابراین، این رویکرد کارایی عملیاتی فرآیند جذب را کاهش می‌دهد. آنان ترکیبات حاوی گروه عاملی کربوکسیلیک و هیدروکسیل را به‌عنوان بازدارنده در دوزهای پایین برای مخازن توصیه نمودند. محمدی و همکاران [۱۳۰] تأثیر نانوسیالات تیتانیوم دی‌اکسید، سیلیکا و اکسید زیرکونیوم را در جلوگیری از رسوب آسفالتین بررسی کردند. آن‌ها با سنتز این نانوسیالات و تزریق آن‌ها به نمونه‌های نفت خام ایران، از n-هپتان به‌عنوان رسوب‌دهنده و روش تیتراسیون

(۱) Loureiro et al.

(۳) Castillo et al.

(۲) Lu et al.

ترکیبات شیمیایی تک و چندعملکردی (مانند آمین‌ها، آمونیوم‌های چهارتایی و کربوکسیلات‌ها) از برهمکنش‌های آسفالتین با سطوح معدنی نظیر سیلیکا و کلسیم کربنات (به ترتیب به عنوان نماینده ماسه‌سنگ و سنگ آهک) حائز اهمیت است. این گروه‌های عاملی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین عدد اسیدی و بازی نفت خام ایفا می‌کنند. مطالعات [۱۴۵] نشان می‌دهند یون‌های نمک می‌توانند از طریق تشکیل دوقطبی‌های یونی یا برهمکنش‌های یون-یون مستقیماً با آسفالتین‌ها واکنش دهند. این فعل و انفعالات بر نیروهای بین‌مولکولی آسفالتین‌ها تأثیر گذاشته و الگوی تجمع آنها را تغییر می‌دهد. البته مکانیسم دقیق این تأثیرات به عواملی مانند نوع و غلظت یون‌ها و ترکیب آسفالتین‌ها بستگی دارد [۱۴۵]. در محیط متخلخل مخزن، جذب مواد معدنی بر سطح خوشه‌های آسفالتین موجب ایجاد دفع بین‌کلوئیدی شده و از یک سو پایداری خوشه‌ها را افزایش داده و از سوی دیگر از رسوب آسفالتین جلوگیری می‌کند. تأثیر ترکیبات گوگردی همراه با سایر عناصر و گروه‌های عاملی بر سطوح آسفالتین‌ها، رفتار کلوئیدی، پایداری و برهمکنش‌های الکترواستاتیک آنها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تشکیل بلورهای نمک در اطراف آسفالتین‌ها در سیستم‌های آب-نفت خام را می‌توان حاصل توازن پیچیده‌ای بین کشش سطحی، نیروهای جاذبه و شرایط ویژه سیستم دانست [۱۴۸-۱۴۶]. در فشارهای موینیگی بالا، سطح مشترک نفت/آب به سطح ناهموار سنگ فشار وارد کرده و منافذ را با آب پر می‌کند. این فرآیند منجر به خیس‌شدگی قله‌های زیر سطح شده و شرایطی ایجاد می‌کند که آسفالتین‌ها در سطح مشترک بر بخش‌های مرتفع سنگ رسوب کرده و آن را نفت‌دوست می‌کنند [۱۴۹-۱۵۳]. سونگ و همکاران^۳ [۱۵۴] بر اهمیت درک نقش اجزای فعال سطحی موجود در آسفالتین‌ها در فرآیند تغییر ترشوندگی در طول آب کم شور تأکید کرد. اوروزکو و همکاران^۴ [۱۵۵] نشان دادند که اسیدهای آمینه می‌توانند به عنوان اصلاح‌کننده ترشوندگی برای تغییر سطح کربناته نفت دوست به آب دوست عمل کنند. از طرفی دیگر، موانگی و همکاران^۵ [۱۵۶] نشان دادند که آب دوستی در سنگ‌های ماسه‌سنگ و کربناته در حضور اسیدهای با زنجیره بلند افزایش می‌یابد. همچنین، آب دوستی در حضور اسیدهای زنجیره کوتاه افزایش می‌یابد. چندین گروه به نقش کربوکسیلات‌ها [۱۵۷] در رسوب غیر قابل برگشت نفت خام روی سطح توجه کرده‌اند. عدد اسیدی نشانه‌ای از محتوای اسیدی آزاد موجود در نفت خام است و با یک رویکرد استاندارد [۱۵۸] آزمایش شده است، که بعداً توسط فن و باکلی^۶ [۱۵۹] برای بهبود اندازه‌گیری‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

احمدی و امین شهیدی [۱۳۹] به بررسی تأثیر نانوذرات آبگریز کلسیم اکسید و سیلیکا بر رسوب آسفالتین تحت شرایط مختلف دما و تزریق دی اکسید کربن پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که در غلظت ثابت دی اکسید کربن، افزایش دما منجر به کاهش بارش آسفالتین می‌شود. همچنین حضور نانوذرات به‌طور قابل توجهی باعث کاهش تشکیل رسوب آسفالتین گردید، که در این میان نانوذرات کلسیم اکسید به دلیل ظرفیت جذب بالاتر، عملکرد مؤثرتری نسبت به نانوذرات سیلیکا از خود نشان دادند. چن و همکاران^۱ [۱۴۰] در مطالعه‌ای انحلال آسفالتین را با استفاده از نانوذرات زئولیت با آلومینا/سیلیکا بررسی نمودند. آنان به این نتیجه رسیدند که افزایش اسیدیته در محیط متخلخل به دلیل رقابت بین خودتجمعی و جذب سطحی منجر به انحلال آسفالتین می‌شود. محمدی و همکاران [۱۴۱] نانوکامپوزیت اکسید نیکل/فسفات آلومینوم را با استفاده از تترا متیل گوانیدین زیست تخریب‌پذیر برای حذف آسفالتین توسعه دادند و بازده ۸۳/۷۳ درصد را به دست آوردند. آریاس مادرید و همکاران^۲ [۱۴۲] جذب آسفالتین را با استفاده از اکسید نیکل، اکسید آهن و اکسید مولیبدن بر روی نانوکاتالیست سیلیکا مورد ارزیابی قرار دادند و دریافتند که وجود آهن در سیستم میل ترکیبی نانوذرات را افزایش می‌دهد و حضور آسفالتین و بارگذاری اکسیدهای فلزی بالاتر ظرفیت جذب نانوذرات را افزایش می‌دهد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر، نجار و همکاران [۱۴۳] به این نتیجه رسیدند که نانوذرات اکسید منیزیم نقطه شروع آسفالتین را به تعویق می‌اندازند و رشد تجمعات آسفالتین را در نفت خام به تأخیر می‌اندازند.

رفتار بخش‌های نفت خام از نظر برهمکنش با آب کم شور

آب کم‌شور به عنوان یکی از روش‌های امیدبخش در ازدیاد برداشت نفت، به دلیل مزایای قابل توجه نسبت به سایر روش‌ها، مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی متعدد، تأثیر مثبت این روش را در افزایش ضریب بازیافت نفت به اثبات رسانده‌اند. موفقیت یا شکست این تکنیک عمدتاً به ترکیب سه‌گانه‌ای از ویژگی‌های نفت خام آسفالتینی، ترکیب آب تزریقی و خصوصیات سطحی سنگ مخزن وابسته است. در بررسی تأثیر خواص آسفالتین بر بازیافت نفت، چالش اصلی آزادسازی بخشی از نفت به دام افتاده بر سطح سنگ است که به صورت نیمه‌برگشت‌ناپذیر محبوس شده است. پیچیدگی این فرآیند ناشی از تنوع ترکیبات نفتی و ناهمگونی ویژگی‌های سطحی و شیمیایی آسفالتین‌هاست. برای درک بهتر این سیستم پیچیده، می‌توان با تفکیک مسئله به بخش‌های کوچکتر به تحلیل آن پرداخت. در این راستا، بررسی چگونگی تقلید

(۱) Chen et al.

(۳) Song et al.

(۵) Mwangi et al.

(۲) Arias-Madrid et al.

(۴) Orozco et al.

(۶) Fan and Buckley.

جدول ۱ - تأثیر مشخصات آسفالتین بر بازیافت نفت.

منبع	بازیافت ثالثیه (کل نفت درجا اضافی)	بازیافت ثانویه (کل نفت درجا)	عدد بازی کل	عدد اسیدی کل	محتوای آسفالتین (درصد وزنی)
[۱۶۲]	۷/۸۰	۴۰/۶۰	۰/۳۳	۱/۱۶	۰/۷۸۰
[۱۶۳]	۱/۳۰	۵۸/۶۰	۰/۱۷	۲/۲۹	۸/۹۸
	۷/۶۰	۵۷/۷۰	۰/۱۶	۱/۸۲	۳/۲۰
	۱/۳۰	۵۸/۱۰	۱/۴۶	۲/۴۹	۶/۳۰
[۱۶۴]	۱۱/۰۰	۶۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۹۵	۲/۳۰
[۱۶۵]	۱۰/۰۰	۵۰/۰۰	۱/۸۲	۰/۵۴	۰/۸۰
[۱۶۶]	۱۵/۰۰	۲۰/۰۰	۰/۱۲	۱/۷۸	۰/۸۵
	۵/۵۶	۴۶/۵۸	-	-	۱۰/۴۰
	۴/۰۰	۳۹/۵۴	۰/۰۷۴	۰/۹۲	۱/۴۰
[۱۶۷]	۱۷/۹۳	۶۷/۰۴	۰/۲۵	-	۵/۵۰
	۱۹/۵۳	۷۴/۱۲			
[۱۶۸]	۵/۷۷	۳۰/۷۷			
	۱/۰۵	۳۴/۷۴			
	۰/۰۰	۵۲/۸۹	۱/۴۶	۲/۴۹	۶/۳۰
	۲/۰۶	۳۹/۱۸			
	۱/۸۴	۶۳/۱۹			
[۱۶۹]	۸/۱۰	۵۰/۰۰	۰/۳۵	۴/۹۰	۰/۴۰

ارتقاء می‌دهد. آزمون‌های مشابهی توسط فرانکو و همکاران^۳ [۱۰۹] با نانوذرات آلومینا عامل‌دار شده با اکسید نیکل انجام شد. آنان افزایش چشمگیری در تحرک نفت خام به دست آوردند. نتایج نشان داد نانوذرات سنتز شده باعث جلوگیری از آسیب سازند می‌شود و از طرفی باعث افزایش ۹ درصدی ضریب بازیافت شد. هاشمی و همکاران [۱۷۰] اثر نانو ذرات اکسید نیکل را در حذف آسفالتین از محیط متخلخل کربناته تحت تزریق کربن دی اکسید ارزیابی کرد. آنها مشاهده کردند که غلظت آسفالتین باقیمانده در مغزه تا ۸۸٪ کاهش یافت. همچنین، عزیزخانی و همکاران اثر نانوذرات را به عنوان بازدارنده آسفالتین در طی فرآیندهای تزریق کربن دی اکسید ارزیابی کردند [۱۷۱]. در این راستا، آنان از نانوذرات اکسید آهن و آلومینا استفاده کردند و در هنگام استفاده از آلومینا، میزان کمتری از تجمع آسفالتین را مشاهده نمودند. بارش آسفالتین تقریباً ۸۳ درصد کاهش یافت (شکل ۷) [۱۷۲ و ۱۷۳]. با در نظر گرفتن پیشرفت‌های ذکر شده مبتنی بر نانوذرات برای مهار بارش آسفالتین، تکنیک جرم‌سازی با استفاده از یک نانوسیال بر پایه آلومینا برای مهار آسیب‌های مرتبط با آسفالتین در میدان کویاگوا سور^۴ انجام شد [۱۷۴]. پس از تزریق نانوسیال، نظارت بر تولید روزانه صورت گرفت و در آن مشاهده شد که این فرآیند حذف آسیب سازند را ترویج می‌دهد. درمان بیش از ۱ سال ماندگاری داشت و افزایش ۱۵۰۰۰۰ بشکه‌ای در تولید

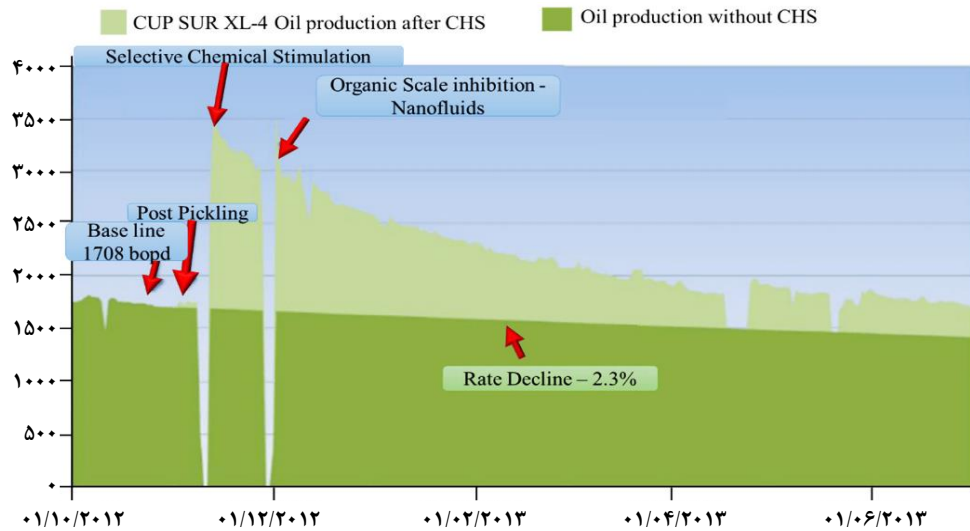
روچا و همکاران^۱ [۱۶۰] نشان دادند که کاهش شوری منجر به افزایش پایداری امولسیون و کاهش کشش سطحی می‌شود. آنها همچنین گزارش دادند که جرم آسفالتین‌ها در سطح مشترک به غلظت آسفالتین در فاز توده‌ای نفت بستگی دارد. مختاری و آیت‌اللهی نشان دادند که در سیستم‌های امولسیون آب/نفت، رقابت بین ذرات آسفالتین و ذرات اسید نفتتیک برای جذب به سطح مشترک به شدت به شوری آب نمک بستگی دارد [۱۶۱]. در تحقیقات نفتی، گاهی اوقات عدد اسیدی به فعالیت (غلظت) کربوکسیلات‌ها نسبت داده می‌شود که تنها یکی از چندین جزء خام اسیدی مانند اسیدهای نفتتیک هستند. در جدول ۱ اثر عدد اسیدی کل و عدد بازی کل بر بازیافت نفت گزارش شده است.

افزایش مقیاس از طریق آزمایش سیلاب‌زنی و کاربرد میدانی

بررسی سیلاب‌زنی با نانوسیالات تزریقی دارای ترکیبات آب‌دوست و سیلاب‌زنی آب کم شور تزریقی با ترکیب و قدرت یونی از پیش تعیین شده برای افزایش تولید نفت و کنترل آسفالتین‌ها بسیار موثر می باشد. بتانکور و همکاران^۲ [۱۰۲] نانوذرات سیلیکا را برای جذب و جداسازی آسفالتین ارزیابی کردند. آنان نانوسیال را با استفاده از نانومواد سنتز کردند تا پس از القای آسیب سازند مرتبط با آسفالتین، افزایش تزریق را از طریق آزمایش‌های سیلاب‌زنی تعیین کنند. نویسندگان تعیین کردند که تزریق نانوسیال بازیافت نفت را ۱۱ درصد

(۱) Rocha
(۳) Franco et al.

(۲) Betancur
(۴) Cupiagua Sur.



شکل ۷ - تولید نهایی در فرآیند تزریق نانوسیال آلومینا [۶۹ و ۱۷۲].

چشم انداز و فن آوری های جدید

بررسی‌ها نشان داد نانوذرات برای پخش نمودن کلوخه‌های آسفالتین و جلوگیری از بارش آسفالتین کاربرد اساسی دارند. در این راستا، این ترکیبات را باید از نظر شیمیایی اصلاح کرد تا به صورت انتخابی با آسفالتین‌ها برهم‌کنش داشته باشند و بتوانند از رسوب آسفالتین بر روی خطوط لوله و تجهیزات تولید جلوگیری کنند. نانوذرات را باید به گونه‌ای طراحی نمود که ابعادی در اندازه نانومتری داشته باشند و برای برهم‌کنش با آسفالتین‌ها، مانع از تجمع و رسوب آن‌ها شوند. آنها را می‌توان با استفاده از تکنیک‌های مختلف سنتز کرد و عملکرد آنها بر اساس خواص شیمیایی است. برای تولید بهینه این نانوذرات از اکسیدهای فلزی مانند سیلیکا، اکسید آلومینیوم، تیتانیوم دی‌اکسید، کبالت، نیکل و آهن استفاده شود. متعاقباً، از تکنیک‌های سنتز مانند رسوب شیمیایی و تجزیه حرارتی استفاده شود. هر روش دارای مزایایی است و بر اساس مواد و ویژگی‌های نانوذرات مورد نظر انتخاب می‌شود. پس از سنتز نانوذرات، می‌توان اصلاح سطحی را برای افزایش میل ترکیبی و انتخاب پذیری آنها نسبت به آسفالتین‌ها انجام داد. این شامل معرفی گروه‌های عاملی خاص بر روی سطح نانوذرات است که امکان تعاملات شیمیایی با آسفالتین‌ها را فراهم می‌کند. عملکرد نانوذرات پخش‌کننده به برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین نانوذرات و آسفالتین‌ها از طریق مکانیسم‌های مختلف نسبت داده می‌شود. در برهم‌کنش الکترواستاتیکی نانوذرات باردار، کلوخه‌های آسفالتین با بار مخالف را جذب و پراکنده می‌کنند. مکانیسم دیگر برهم‌کنش فضایی است که در آن نانوذرات بر روی سطح آسفالتین‌ها جذب می‌شوند و از تجمع و رسوب آنها جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، پایداری نانوذرات شامل کنترل بار سطحی نانوذرات، انتخاب گروه‌های عاملی مناسب و بهینه‌سازی شرایط پراکندگی است. این عوامل به افزایش خواص پراکندگی و اثربخشی نانوذرات کمک می‌کنند. توجه به این نکته مهم است

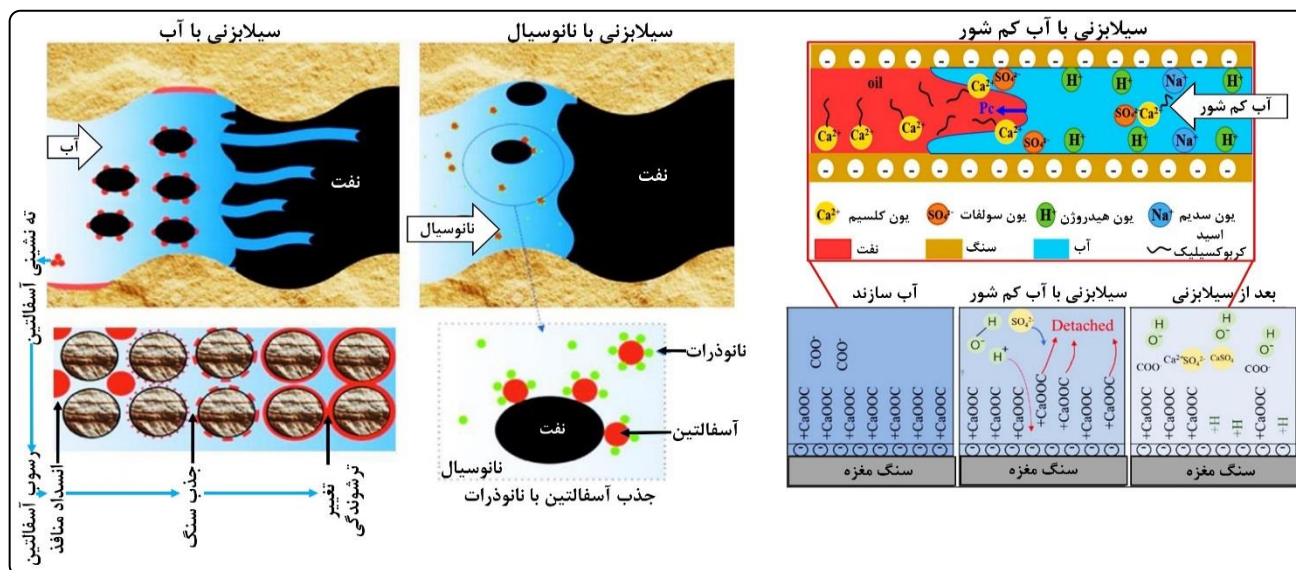
تجمعی نفت طی ۸ ماه اول مشاهده شد. همچنین در کلمبیا به منظور کاهش رسوب آسفالتین در نزدیکی چاه در میدان نفتی، آزمایش میدانی نانوسیال انجام شد. در این مخزن، ۲۲۰ بشکه نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید آلومینیوم به مخزن تزریق شد. پس از یک دوره عملیات ردیابی هشت ماهه، نتایج نشان داد که محتوای آسفالتین در نفت تولیدی چاه ثابت مانده است و تولید نفت حدود ۳۰۰ بشکه در روز بیشتر شده است. با ردیابی و اندازه‌گیری غلظت نانوذرات در آب تولیدی، نشان دادند که با افزایش زمان عملیات، فرآیند مهار رسوب آسفالتین مؤثر بوده و تولید نفت بالاتر از سطح پایه باقی مانده است [۱۷۵]. مشاهده‌ها نشان داد که کاربرد نانوفناوری در میدان نفتی در حال رونق گرفتن است و تأیید نمود جذب مولکول‌های آسفالتین توسط نانوذرات مؤثر است. از طرفی دیگر، کاربرد میدانی نانوسیال در میدان نفتی سبک دیگری در کلمبیا بر روی پنج چاه انجام شد. دمای مخزن ۲۲۰ درجه فارنهایت و فشار مخزن ۲۳۰۰ psi بود. در طول عملیات تزریق، نانوسیال به شعاع ۴ فوتی وارد شد. پس از یک دوره مشخص (۱۲ ماه) از ردیابی عملیات انجام شده، حدود ۶۰ بشکه در روز تولید نفت هر چاه افزایش یافت، منحنی کاهش به طور قابل توجهی بهبود یافت، این رویکرد برای بیش از ۱۲ ماه حفظ شد و تولید نفت به حدود ۲۴۹۰۰۰ بشکه افزایش یافت [۱۷۶]. مهربان و همکاران یک آزمایش برای بررسی اثرات ریزپراکندگی سیال و کانی‌های رسی بر افزایش بازیابی نفت در طول سیلابزنی آب کم شور انجام دادند. برای سیلابزنی مغزه نمونه نفت خام غنی از ترکیبات اسیدی مانند آسفالتین‌ها، اسیدهای کربوکسیلیک یا گروه‌های عاملی کربوکسیلیک مرتبط استفاده شد. مشخص شد که وقتی آب کم شور به مغزه تزریق می‌شود، و با بارهای سطحی نفت خام مانند اسیدهای کربوکسیلیک یا آسفالتین‌ها برهم‌کنش می‌کند باعث تغییرات ترشوندگی و تورم نفت خام می‌شود [۱۷۷].

پل‌هایی تشکیل می‌دهد که بیشتر به تغییر ترشوندگی کمک می‌کند. بنابراین، علاوه بر کاهش کشش سطحی، افزایش غلظت نمک در الکترولیت آب کم‌شور می‌تواند تجمع آسفالتین‌ها را در فصل مشترک نفت-آب تسهیل نماید. باید توجه داشت که آب سازند معمولاً حاوی طیف وسیعی از کاتیون‌ها (مانند سدیم، کلسیم و منیزیم) و آنیون‌ها (نظیر کلرید و سولفات) با غلظت‌های نسبتاً بالا می‌باشد. مطالعات نشان داده‌اند که ترکیب خاص و غلظت این یون‌ها قادر است به‌طور معناداری ویژگی‌های ترشوندگی سطح سنگ مخزن را تعدیل کند، که این پدیده در نهایت می‌تواند منجر به بهبود ضریب بازیافت نفت گردد. از طرفی دیگر، در سنگ با ترشوندگی حد وسط، مولکول‌های نفت توسط انواع مختلف پیوندهای شیمیایی که ترشوندگی نفت دوستی سطح سنگ را افزایش می‌دهند. لذا در این راستا، محکم به سطح رس متصل شده‌اند. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، سطح ماسه‌سنگ (کوارتز و رس) و کربوکسیلات‌ها دارای بار منفی هستند. کاتیون‌های دو ظرفیتی به گروه‌های کربوکسیل متصل می‌شوند و COOCa^+ تولید می‌کنند که نفت خام را محکم روی سطح سنگ جذب می‌کند. در شرایط اولیه سازند، آب سازند با شوری بالا و نفت خام در تعادل هستند و نفت خام به‌طور پایدار روی سطح سنگ جذب می‌شود. هنگامی که آب با شوری کم به سازند تزریق می‌شود، تعادل شکسته می‌شود. لایه دوگانه الکتریکی مولکول‌های نفت خام و سطح سنگ متورم می‌شود. کاتیون‌های تک ظرفیتی (سدیم) یا پروتون‌ها (H^+) در آب، جایگزین کلسیم دخیل در پل زدن روی سطح سنگ می‌شوند و تعداد گروه‌های کربوکسیلات پل زده شده روی سطح سنگ کاهش می‌یابد. این جایگزینی منجر به کاهش تعداد گروه‌های کربوکسیلات پل زده شده به سطح سنگ می‌شود. در نتیجه، میل ترکیبی سطح سنگ برای نفت خام کاهش می‌یابد و میل ترکیبی برای مولکول‌های آب افزایش می‌یابد و در نتیجه ترشوندگی سطح سنگ به سمت آب دوستی تغییر می‌کند. هنگامی که ترشوندگی تغییر می‌کند، مولکول‌های نفت خام که در ابتدا روی سطح سنگ جذب شده بودند، جدا می‌شوند. این تغییر در ترشوندگی منجر به تغییر متناظر در فشار مویبندی می‌شود. تحت تأثیر نیروی مویبندی، پدیده خودجذبی^۱ سنگ آب‌دوست می‌تواند نفت خام را به‌طور مؤثر از فضای منافذ خارج کند. به‌طور کلی، پدیده انگشتی ویسکوز^۲ در مغزه کاهش می‌یابد و راندمان جاروبی و به نوبه خود، میزان بازیافت را افزایش می‌دهد. وقتی غلظت کاتیون‌های دو ظرفیتی در آب کاهش می‌یابد، اجزای قطبی متصل به سطح سنگ جدا می‌شوند و در نتیجه آب‌دوستی ایجاد می‌شود. این امر در واکنش‌های تبادل یونی نشان داده شده است که فرآیندهای اتصال گروه‌های کربوکسیلات به سطح سنگ هستند و همچنین می‌توانند فرآیند جدا شدن کربوکسیلات از سطح سنگ به دلیل کاهش غلظت یون را نشان دهند. با افزایش غلظت یون‌های سولفات،

که پوشش‌های نانوساختار دارای خواص سطحی منحصر به فردی از جمله انرژی سطحی کم، آبگریز یا آب دوست باشند. این خواص به‌طور مؤثر مانع از چسبندگی آسفالتین‌ها به سطوح پوشش داده شده و حذف بعدی آنها می‌شود. پوشش‌های نانوساختار با ایجاد مانع فیزیکی یا شیمیایی روی سطح از چسبندگی آسفالتین جلوگیری می‌کنند. این مانع از تماس مستقیم بین آسفالتین‌ها و بستر جلوگیری می‌کند و در نتیجه توانایی چسبندگی و تشکیل رسوبات را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، آنها به حذف آسان آسفالتین‌ها در طول فعالیت‌های تعمیر و نگهداری کمک می‌کنند. ویژگی‌های سطحی ویژه این پوشش‌ها، جابجایی یا انحلال آسفالتین‌ها را آسان‌تر می‌کند و نیاز به روش‌های تمیزکاری مکانیکی یا شیمیایی گسترده را به حداقل می‌رساند. علاوه بر این، این پوشش‌ها به گونه‌ای هستند که در شرایط سخت تولید نفت، بادوام و پایدار باشند، در برابر سیالات خورنده، فشارهای بالا و دماهای بالا که معمولاً در سیستم‌های تولید با آن مواجه می‌شوند، مقاومت کنند. از طرفی دیگر، آب کم‌شور، با دفع ترکیبات قطبی آلی (از جمله آسفالتین‌ها) از سطوح معدنی، ترشوندگی سنگ را به سمت شرایط آب‌دوست‌تر تغییر می‌دهد. آب کم‌شور، قدرت یونی را کاهش می‌دهد و لایه دوگانه الکتریکی را در اطراف سطوح رس و سنگ گسترش می‌دهد. به‌طور کلی، آب کم‌شور (محتوای سولفات) برای کنترل آسفالتین‌ها باید بهینه شود. لذا از میدان‌های الکتریکی برای افزایش اثرات شوری کم بر تجمع آسفالتین استفاده شود. تزریق آب کم‌شور می‌تواند pH را به دلیل انحلال مواد معدنی (مانند کربنات، رس) افزایش دهد و یونیزاسیون آسفالتین را افزایش داده و در این راستا، حلالیت افزایش می‌یابد. کاتیون‌های دو ظرفیتی (کلسیم و منیزیم) در آب با شوری بالا، با ایجاد پل بین مولکول‌های آسفالتین با بار منفی، تجمع آسفالتین را افزایش می‌دهند. به‌منظور رفع چالش فوق، با تزریق آب کم‌شور می‌توان غلظت کاتیون‌های دو ظرفیتی را کاهش داد، و از طرفی اثرات پل‌سازی را به حداقل رساند و آسفالتین‌ها را پایدار نمود. با توجه به شکل ۸ می‌تواند نشان داد، نانوذرات و آب کم‌شور می‌توانند رسوب آسفالتین را کاهش دهند. در این راستا، نانوذرات با جذب مولکول‌های آسفالتین به عنوان یک ممانعت‌کننده عمل می‌کنند تا از رسوب آسفالتین در نفت خام جلوگیری کنند. این اثر با کاهش ویسکوزیته حاصل می‌شود. نانوذرات از طریق سطح ویژه بالای خود روی نفت خام و سطح سنگ جذب می‌شوند. در این راستا، هر دو عامل در کاهش کشش سطحی نقش دارند. عملکرد همزمان نانوذرات و آب کم‌شور، گرادیان فشار ساختاری را ایجاد و افزایش می‌دهد و یک ساختار مثلثی شکل در فصل مشترک نانوسیال-نفت-سنگ تشکیل می‌دهد و در نتیجه زاویه تماس را ایجاد می‌کند. علاوه بر این، یون کلسیم در آب کم‌شور، با گروه‌های کربوکسیلیک اسید در نفت خام و CO_3^- در سنگ،

(۱) Self-absorption.

(۲) Viscosity finger.



شکل ۸ - مکانیسم جلوگیری از رسوب آسفالتین توسط نانوذرات و آب کم شور.

در شرایط سخت مخزن تجزیه شوند و منجر به جداسازی فاز و رسوب شوند. از این رو، انتخاب مواد شیمیایی بسیار سازگار و مناسب برای شرایط مخزن ضروری است. نگرانی‌های زیست‌محیطی و امکان‌سنجی اقتصادی در بازیافت نفت نیز از ملاحظات مهم هستند. جدول ۲ داده‌هایی را برای مطالعه مقایسه‌ای جهت ارزیابی نانوذرات مناسب در بین نانوذرات رایج مورد استفاده ارائه می‌دهد. در نظر گرفتن معیارهای غربالگری اضافی نیز مهم است. عواملی مانند خواص سیال مخزن و کانی‌شناسی سنگ نیز در اجرای نانو ذرات برای پروژه‌های نفتی قابل توجه هستند. بنابراین، محققان می‌توانند داده‌های مقالات چند نانو ذره (جدول ۲) را به همراه خواص مطلوب آنها در نظر بگیرند تا انتخاب نانوذرات مناسب را برای نیازهای خاص پروژه خود هدایت کنند. این رویکرد امکان تصمیم‌گیری آگاهانه را فراهم می‌کند و آزمایش‌های بیشتر را تشویق می‌کند. برخلاف پراکنده‌کننده‌های سنتزی استفاده شده در راستای چالش‌های آسفالتین، آب کم شور یک سیال غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر است که این رویکرد آن را به جایگزینی سبزتر تبدیل می‌کند. از طرف دیگر، تزریق آب کم شور در مقایسه با تصفیه‌های شیمیایی به پردازش انرژی کمتری نیاز دارد و منجر به انتشار دی‌اکسید کربن کمتری می‌شود.

جهت‌گیری تحقیقات آینده

تحقیقات آینده در زمینه کنترل آسفالتین باید بر پیشگیری از آسیب‌های غیرقابل بازگشت سازند متمرکز شود، چرا که بسیاری از این آسیب‌ها در مراحل اولیه حفاری و تکمیل چاه رخ می‌دهد. با وجود سرمایه‌گذاری‌های کلان در تحقیقات آسفالتین که منجر به پیشرفت‌های مهمی در درک وزن مولکولی و ساختار آن شده است، هنوز چالش‌های اساسی در مکانیسم‌های بارش و مدل‌های پیش‌بینی رسوب وجود دارد.

آنها با یون‌های کلسیم پیوند می‌خورند تا کمپلکس‌هایی تشکیل دهند که از اتصال کلسیم به گروه اسید کربوکسیلیک و سطح سنگ جلوگیری می‌کنند. این امر منجر به دفع نفت خام از سطح سنگ و معکوس شدن ترشوندگی می‌شود. علاوه بر این، کاهش غلظت یون‌های کلسیم و افزایش یون‌های سولفات در آب تزریقی می‌تواند منجر به افزایش pH شود. در سطوح بالای pH، مواد معدنی سنگ یون‌های هیدروکسی را آزاد می‌کنند که به صورت شیمیایی با اجزای واکنش‌پذیر نفت خام واکنش می‌دهند تا سورفکتانت‌های درجا تولید کنند. این واکنش‌ها، ترشوندگی سنگ در برابر آب را بهبود می‌بخشند.

تأثیر زیست‌محیطی

تأثیر زیست‌محیطی نانوذرات هنگام ارزیابی مناسب بودن آنها برای مقابله با چالش آسفالتین مبتنی بر نانو مواد، یک ملاحظه حیاتی است. سمیت نانوذرات باید ارزیابی شود تا استفاده ایمن آنها با در نظر گرفتن خطرات بالقوه برای سلامت انسان و محیط زیست تضمین شود. انجام ارزیابی چرخه عمر نانوذرات، درک جامعی از تأثیر کلی زیست‌محیطی آنها از تولید تا دفع فراهم می‌کند. شیوه‌های صحیح دفع و مدیریت پسماند برای به حداقل رساندن تجمع نانوذرات در محیط ضروری است. با پرداختن به این عوامل، انتخاب و استفاده از نانوذرات در نانو مواد برای مقابله با چالش آسفالتین می‌تواند به شیوه‌ای مسئولانه از نظر زیست‌محیطی انجام شود. انتخاب نانوذرات به دلیل عوامل مختلف دخیل، فرآیندی پیچیده است. به طور خلاصه، اطمینان از پایداری نانو مواد برای ازدیاد برداشت نفت بسیار مهم است. بنابراین، برای جلوگیری از افت راندمان نانو ذرات در شرایط شوری بالا (100000 ppm) و دمای بالا (85 درجه سلسیوس) باید از روش‌های مناسبی مانند اصلاح سطح استفاده شود. عوامل پایدار کننده ممکن است

جدول ۲ - مقایسه بین رایج‌ترین نانوذرات و نانوسیالات بر اساس معیارهای غربالگری.

منابع	انواع مختلف نانوسیال						فاکتورهای بررسی شده
	نیکل اکسید	اکسید آهن	زینک اکسید	تیتانیوم دی اکسید	آلومینیوم اکسید	سیلیکا	
[۱۷۹ و ۱۷۸]	-۱۸	-۱۷	-۱۶	-۱۷	-۱۹	-۲۰	پایداری (پتانسیل زتا) سیال پایه (آب) pH= ۱۰-۸
[۱۷۹-۱۸۳]	دما (۹۰°C)، فشار (۹۰۰ psi)	-	-	شوری (۳۰۰۰ ppm) دما (۶۰°C)	دما (۹۰°C)، فشار (۷۵۰ psi)	شوری (۱۰ ppm) دما (۹۰°C)	سازگاری (شوری، دما، فشار)
[۱۸۴-۱۷۶]	متوسط	متوسط	پایین	بالا	بالا	پایین	تأثیر بر کشش سطحی
[۱۷۴]	متوسط	متوسط	پایین	بالا	متوسط	متوسط	تأثیر بر تغییر ترشوندگی
[۱۷۴-۱۸۸]	کاهش	کاهش (به طرز چشمگیری)	کاهش	تأثیر منفی	کاهش	کاهش	ویسکوزیته نفت خام
[۱۸۴]	۱۹/۱	۲۴/۱	۲۱/۶	۱۸/۳	۱۹/۹	۱۹/۱	درصد باز یافت نفت (سیال پایه، آب مقطر، نوع سنگ)
[۱۸۹]	۷۸	۴۵	۴۵	۵۵	۴۵	۴۵	هزینه (۲۵ کیلوگرم / دلار)
[۱۹۰-۱۹۴]	سنتر سبز (سمیت کمتر)	تأثیر منفی	تأثیر منفی	تأثیر منفی	غیرسمی، پایدار، غیرواکنشی	غیرسمی، پایدار، غیرواکنشی	تأثیرات زیست محیطی

در هر زمان تکنیک‌های ازدیاد برداشت نفت و اثرات آن بر عملکرد مخزن باید در مراحل اولیه هر پروژه توسعه پیش بینی شود. در صورتی که نتوان از رسوب آسفالتین‌ها جلوگیری کرد، حداقل می‌تواند کنترل و مدیریت شود. لذا برای رسیدگی به مشکل رسوب آسفالتین در میادین نفتی تا به امروز تلاش‌های فراوانی انجام شده است. با این حال، با توجه به بررسی عمیق مطالعات به نظر می‌رسد که در زمان نزدیک، یک راه حل قوی پیدا خواهد شد، حتی اگر هنوز در مورد علم آسفالتین چیزهای زیادی به عنوان راز باقی مانده باشد. یافته‌های ما نشان می‌دهد که مدیریت مؤثر آسفالتین نیازمند پیش‌بینی دقیق رفتار رسوب در مراحل اولیه توسعه میدان و درک عمیق عوامل تأثیرگذار بر پایداری آن است. مطالعه حاضر با بررسی مکانیسم‌های گذار فاز آسفالتین که منجر به تشکیل ذراتی تا ۴۰۰ میکرومتر از تجمع مولکول‌های ۵-۲۰ نانومتری می‌شود، موفقیت‌های بازدارنده‌های مبتنی بر فناوری نانو و آب کم‌شور را با توجه به وابستگی شدید آنها به ساختار مولکولی آسفالتین و ویژگی‌های دوقطبی آن اثبات کرده است. نتایج حاکی از آن است که نفت‌های خام با عدد بازی بالا نسبت به نمونه‌های اسیدی به انرژی بیشتری برای فرآیندهای ازدیاد برداشت نیاز دارند. رویکرد پیشنهادی این تحقیق با معرفی نانوذرات و نانوسیالات به عنوان جایگزین‌های ایمن، اقتصادی و سازگار با محیط زیست برای روش‌های مرسوم پرهزینه و پرخطر، گامی مؤثر در جهت کاهش کشش سطحی و بهبود عملکرد کاتالیزوری برداشته است. بررسی تأثیر ترکیبات معدنی در مغزه‌ها نشان داد که محتوای آهن موجب حفظ نفوذپذیری می‌شود، در حالی که کلسیم اثر معکوس دارد.

رویکرد نوین در این زمینه، بررسی مسئله از منظر برهمکنش سنگ/سیال است که شامل مطالعه تأثیر مواد معدنی با شیمی سطح و بارهای الکتریکی متفاوت بر پایداری آسفالتین می‌باشد. یک راهکار امیدبخش، استفاده از سیالات قربانی برای پوشش سطح سنگ و جلوگیری از تماس مستقیم آسفالتین با مواد معدنی مستعد رسوب است. همچنین، بررسی تأثیر رسوب آسفالتین بر خواص صوتی و الکتریکی سنگ مخزن می‌تواند افق‌های جدیدی در پایش تغییرات ترشوندگی از طریق داده‌های لرزه‌ای ایجاد کند. استراتژی جامع مدیریت آسفالتین باید شامل پنج مرحله کلیدی باشد: ارزیابی پایداری نفت خام، تست‌های سازگاری، انتخاب مواد شیمیایی مناسب، بهینه‌سازی غلظت بازدارنده‌ها و اعتبارسنجی میدانی یافته‌های آزمایشگاهی. جهت تحقیقات آینده، تمرکز بر فناوری‌های پیشرفته شامل نانوذرات هوشمند پاسخگو به محرک‌های محیطی، سیستم‌های خودآرا و مواد با قابلیت خودترمیم‌شوندگی در ترکیب با آب‌های کم‌شور مهندسی شده می‌تواند انقلابی در کنترل آسفالتین ایجاد کند. این سیستم‌های چندمنظوره قادر خواهند بود با مکانیسم‌های ترکیبی، آزادسازی هدفمند عوامل کنترل‌کننده و ایجاد سطوح ضدچسبندگی، چالش‌های موجود در مدیریت آسفالتین را به‌طور اساسی حل نمایند.

نتیجه‌گیری

این پژوهش به ارائه یک چارچوب سیستماتیک و راهکارهای نوآورانه برای پیشگیری و کنترل چالش‌های ناشی از رسوب آسفالتین در چاه‌های نفتی پرداخته است. به طور کلی، احتمال وقوع رسوب آسفالتین

این پژوهش بر اهمیت انتخاب ترکیب بهینه آب کم‌شور و نانوذرات، همراه با طراحی دقیق آزمایش‌های آزمایشگاهی و نظارت مستمر میدانی تأکید می‌کند. مجموعه این یافته‌ها نه تنها درک جامعی از فرآیندهای بارش و رسوب آسفالتین ارائه می‌دهد، بلکه پایه‌ای مستحکم برای توسعه روش‌های کارآمد جداسازی شیمیایی آسفالتین از سیالات و سطوح سنگی در محیط‌های متخلخل فراهم می‌سازد. با وجود پیشرفت‌های حاصل شده، اسرار بسیاری در مورد شیمی آسفالتین باقی مانده که حل آنها می‌تواند افق‌های جدیدی در مدیریت این چالش صنعتی بگشاید.

منابع

- [1] Azari V., Abolghasemi E., Hosseini A., Ayatollahi S., Dehghani F., [Electrokinetic Properties of Asphaltene Colloidal Particles: Determining the Electric Charge Using Micro Electrophoresis Technique](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **541**: 68-77 (2018).
- [2] Mansouri M., Ahmadi Y., Jafarbeigi E., [Introducing a New Method of Using Nanocomposites for Preventing Asphaltene Aggregation During Real Static and Dynamic Natural Depletion Tests](#), *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **44(3)**: 7499-7513 (2022).
- [3] Ebrahimi J., Shahsavani B., Ghaedi M., Malayeri M.R., Riazi M., [Experimental Screening of Various Asphaltene Deposition Inhibitors for Utilization in Flowlines](#), *Journal of Molecular Liquids*, **389**: 122935 (2023).
- [4] Mohammadi M., Dadvar M., Dabir B., [Application of Response Surface Methodology for Optimization of the Stability of Asphaltene Particles in Crude Oil by TiO₂/SiO₂ Nanofluids Under Static and Dynamic Conditions](#), *Journal of Dispersion Science and Technology*, **39(3)**: 431-442 (2018).
- [5] Dehghani F., Ayatollahi S., Jafarbeigi E., Moradpour N., [Experimental Study of Asphaltene Onset Condition and Deposition Using Electrical Deposition Technique in the Presence of Various Additives: A Novel Strategy](#), *Fuel*, **357**: Part A (2023).
- [6] Dashtia H., Zanganeh P., Kord S., Ayatollahi S., Amiri A., [Mechanistic Study to Investigate the Effects of Different Gas Injection Scenarios on the Rate of Asphaltene Deposition: An Experimental Approach](#), *Fuel*, **262**: 116615 (2020).
- [7] شجاعی، س.ب؛ میری، ر.ا؛ بازیاری، ا.، بررسی عملکرد و مدل‌سازی هم‌دمای جذب نانوذره اکسید آهن سنتز شده به روش سل-ژل در جذب آسفالتین استخراج‌شده از نفت خام، *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۴۲(۲)**: ۱۶۴-۱۵۵، (۱۴۰۲).
- [8] Hajizadeh N., Moradi G., Ashoori S., [Effect of Combining Rules on Modeling of Asphaltene Precipitation](#), *Chemical Papers*, **75(6)**: 2851-2870 (2021).
- [9] Mousavi D.S.A., Vafaei-Sefti M., Mirzaei B., Fasih M., [Experimental Investigation on Asphaltene Deposition in Porous Media During Miscible Gas Injection](#), *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, **26(4)**: 39-48 (2007).
- [10] Shirazi M.M., Ayatollahi S., Ghotbi C., [Damage Evaluation of Acid-Oil Emulsion and Asphaltic Sludge Formation Caused by Acidizing of Asphaltenic Oil Reservoir](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **174**: 880-890 (2019).
- [11] Taherian Z., Saeedi-Dehaghani A.H., Ayatollahi S., Kharrat R., [The Mechanistic Investigation On The Effect Of The Crude Oil/Brine Interaction On The Interface Properties: A Study On Asphaltene Structure](#), *Journal of Molecular Liquids*, 119495 (2022).

- [12] Monjezi E., Rostami A., Joonaki E., Shadizadeh S.R., [New Application of Henna Extract as an Asphaltene Inhibitor: An Experimental Study](#), *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, **11(6)**: 1027-1034 (2016).
- [13] Lashkarbolooki M., Ayatollahi S., [Experimental and Modeling Investigation of Dynamic Interfacial Tension of Asphaltenic--Acidic Crude Oil/Aqueous Phase Containing Different Ions](#), *Chinese Journal of Chemical Engineering*, **25(12)**: 1820-1830 (2017).
- [14] Ameli F., Hemmati-Sarapardeh A., Dabir B., Mohammadi A.H., [Determination of Asphaltene Precipitation Conditions During Natural Depletion of Oil Reservoirs: A Robust Compositional Approach](#), *Fluid Phase Equilibria*, **412**: 235-248 (2016).
- [15] Mahdavi M.S., Dehaghani A.H.S., [Experimental Study on the Simultaneous Effect of Smart Water and Clay Particles on the Stability of Asphaltene Molecule and Emulsion Phase](#), *Scientific Reports*, **15**: 3393 (2025).
- [16] Lashkarbolooki M., Ayatollahi S., [The Effects of pH, Acidity, Asphaltene and Resin Fraction on Crude Oil/Water Interfacial Tension](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **162**: 341-347 (2018).
- [17] Antonio V., Branco M., Mansoori G.A., Xavier L.C.D.A., Park S.J., Manafi H., [Asphaltene Flocculation and Collapse from Petroleum Fluids](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **32**: 117-230 (2001).
- [18] Salehzadeh M., Husein M.M., Ghotbi C., Taghikhani V., Dabir B., [An Integrated Approach for Predicting Asphaltenes Precipitation and Deposition Along Wellbores](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **203**: 108486 (2021).
- [19] Aminzadeh R., Nikazar M., Dabir B., [Determining the Occurrence Time of Different Stages of Asphaltene Aggregation Using Molecular Dynamics Simulations](#), *Petroleum Science and Technology*, **37(20)**: 2101-2107 (2019).
- [20] Hemmati-Sarapardeh A., Ahmadi M., Ameli F., Dabir B., Mohammadi A.H., Husein M.M., [Modeling Asphaltene Precipitation During Natural Depletion of Reservoirs and Evaluating Screening Criteria for Stability of Crude Oils](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **181**: 10612 (2019).
- [21] Mokhtari R., Hosseini A., Fatemi M., Andersen S.I., Ayatollahi S., [Asphaltene Destabilization in the Presence of an Aqueous Phase: The Effects of Salinity, Ion Type, and Contact Time](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **208**: 109757 (2022).
- [22] Nikooee E., Amin J.S., Ayatollahi S., Alamdari A., Jahromi H., Escrochi M., [Fractal Analysis of Surface Roughness Induced by Asphaltene Deposits: Effect of Surface Topography on Wettability Alteration](#), Shiraz 2009-1st EAGE International Petroleum Conference and Exhibition, cp-125-00076 (2009).
- [23] Hemmati-Sarapardeh A., Ameli F., Dabir B., Ahmadi M., Mohammadi A.H., [On the Evaluation of Asphaltene Precipitation Titration Data: Modeling and Data Assessment](#), *Fluid Phase Equilibria*, **415**: 88-100 (2016).
- [24] Rassamdana H., Dabir B., Nematy M., Farhani M., Sahimi M., [Asphalt Flocculation and Deposition: I. The Onset of Precipitation](#), *AIChE Journal*, **42(1)**: 10-22 (1996).

- [25] Razghandi M., Madani S.A., Ghotbi C., Ayatollahi S., Dabir B., Hemmati-Sarapardeh A., [Effect of Asphaltene Flocculation Size on Deposition Using a Modified Quartz Crystal Microbalance in-House Setup and Microscopic Image Analysis: Model Oil, Inhibitory and Nanoparticle Solutions Case Studies](#), *Geoenergy Science and Engineering*, **237**: 212819 (2024).
- [26] Talebi A., Shafiei M., Kazemzadeh Y., Escrochi M., Riazi M., [Asphaltene Prevention and Treatment by Using Nanomaterial: A Comprehensive Review](#), *Journal of Molecular Liquids*, **382**: 121891 (2023).
- [27] Shahsavari N., Riazi M., Malayeri M.R., [Removal of Asphaltene Deposition in Porous Media Using Emulsified Solvents: A Visual Study](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **191**: 107207 (2020).
- [28] Hasanvand M.Z., Feyzi F., Behbahani R.M., Mousavi-Dehghani S.A., [Detection of Solid Asphaltene Phase Separation Via Viscosity Monitoring at High Pressure High Temperature Conditions](#), *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, **19(4)**: 458-476 (2018).
- [29] Mohammadi S., Rashidi F., Mousavi-Dehghani S.A., Ghazanfari M.H., [On the Effect of Temperature on Precipitation and Aggregation of Asphaltenes in Light Live Oils](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **94(9)**: 1820-1829 (2016).
- [30] Fakher S., Yousef A., Al-Sakkaf A., Eldakar S., [Asphaltene Onset Pressure Measurement and Calculation Techniques: A Review](#), *Petroleum*, **10**: 191-201 (2024).
- [31] Barreira F.R., Reis L.G., Nunes R.D.C.P., Filipakis S.D., Lucas E.F., [Asphaltenes Precipitation Onset: Influence of the Addition of a Second Crude Oil or Its Asphaltenes Fractions \(C3I and C5I\)](#), *Energy Fuels*, **32**: 10391-10397 (2018).
- [32] Nunes R.C.P., Valle M.R.T., Reis W.R.D., Aversa T.M., Filipakis S.D., Lucas E.F., [Model Molecules for Evaluating Asphaltene Precipitation Onset of Crude Oils](#), *Journal of the Brazilian Chemical Society*, **30**: 1241-1251 (2019).
- [33] Guerrero-Martin C.A., Montes-Páez E., de-Oliveira M.C.K., Campos J., Lucas E.F., [Calculating Asphaltenes Precipitation Onset Pressure by Using Cardanol as Precipitation Inhibitor: A Strategy to Increment the Oil Well Production](#), *In Proceedings of the SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Port of Spain, Trinidad and Tobago*, 25-26 (2018).
- [34] Kurup A.S., Wang J., Subramani H.J., Buckley J., Creek J.L., Chapman W.G., [Revisiting Asphaltene Deposition Tool \(ADEPT\): Field Application](#), *Energy Fuels*, **26**: 5702-5710 (2012).
- [35] Mohammadi S., Rashidi F., Mousavi-Dehghani S.A., Ghazanfari M.H., [Asphaltene Particles Growth in Live Oils-Experimental Study on Kinetics of Aggregation at Reservoir Conditions](#), *77th EAGE Conference and Exhibition*, **1**: 1-3 (2015).
- [36] Mohammadi S., Rashidi F., Ghazanfari M.H., Mousavi-Dehghani S.A., [Kinetics of Asphaltene Aggregation Phenomena in Live Oils](#), *Journal of Molecular Liquids*, **222**: 359-369 (2016).
- [37] Bagherzadeh H., Ghazanfari M.H., Kharrat R., Rashtchian D., [Experimental Investigation and Modeling of Permeability Impairment Mechanisms Due to Asphaltene Precipitation Under CO₂ Injection Conditions](#), *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **36(6)**: 591-604 (2014).

- [38] López D., Jaramillo J.E., Lucas E.F., Riazi M., Lopera S.H., Franco C.A., Cortés F.B., Cardanol/SiO₂ Nanocomposites for Inhibition of Formation Damage by Asphaltene Precipitation/Deposition in Light Crude Oil Reservoirs. Part II: Nanocomposite Evaluation and Coreflooding Test, *ACS Omega*, **5(43)**: 27800-27810 (2020).
- [39] Jafarbeigi E., Sahraei E., Maroufi K., A Novel Functionalized Nanoparticle for Inhibiting Asphaltene Precipitation and Deposition, *Physics of Fluids*, **37(1)**: 017164 (2025).
- [40] Katende A., Sagala F., A Critical Review of Low Salinity Water Flooding: Mechanism, Laboratory and Field Application, *Journal of Molecular Liquids*, **278**: 627-649 (2019).
- [41] Chen Q., Otaibi M., Ayirala S., Yousef A., The Prospects and Potential Opportunities of Low Salinity Water Flooding for Offshore Applications in Sandstones, *J. Pet. Sci. Eng.*, **199**: 108260 (2021).
- [42] Wang J., Song H., Wang Y., Investigation on the Micro-Flow Mechanism of Enhanced Oil Recovery by Low-Salinity Water Flooding in Carbonate Reservoir, *Fuel*, **266**: 117156 (2020).
- [43] Bhicajee P., Romero-Zeron L., Effect of Different Low Salinity Flooding Schemes and the Addition of Alkali on the Performance of Low-Salinity Waterflooding During the Recovery of Heavy Oil from Unconsolidated Sandstone, *Fuel*, **289**: 119981 (2021).
- [44] Salari A., Balavi A., Ayatollahi S., Mahani H., Water/Oil Emulsion and Asphaltene Instability in Different Formations During Low-Salinity Waterflooding: An Experimental Study, *Scientia Iranica*, (2024).
- [45] Bazyar S., Nabipour M., Azdarpour A., Honarvar B., Esfandiari N., Experimental Investigation of Asphaltene Precipitation During Waterflooding Using Different Aqueous Phases, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **45(2)**: 4481-4500 (2023).
- [46] Balavi A., Ayatollahi S., Mahani H., The Simultaneous Effect of Brine Salinity and Dispersed Carbonate Particles on Asphaltene and Emulsion Stability, *Energy Fuels*, **37(8)**: 5827-5840 (2023).
- [47] Alizadeh S., Soulgani B., Experimental Investigation of the Brine Effect on Asphaltene Precipitation and Deposition During Water Injection in Porous Media Using Static and Dynamic Systems, *Energy & Fuels*, **35(14)**: 11141-11153 (2021).
- [48] Escrochi M., Mehranbod N., Ayatollahi S., The Gas–Oil Interfacial Behavior During Gas Injection into an Asphaltenic Oil Reservoir, *Journal of Chemical & Engineering Data*, **58(9)**: 2513-2526 (2013).
- [49] Khormali A., Moghadasi R., Kazemzadeh Y., Struchkov I., Development of a New Chemical Solvent Package for Increasing the Asphaltene Removal Performance Under Static and Dynamic Conditions, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **206**: 109066 (2021).
- [50] Parsaei R., Kazemzadeh Y., Riazi M., Study of Asphaltene Precipitation During CO₂ Injection into Oil Reservoirs in the Presence of Iron Oxide Nanoparticles by Interfacial Tension and Bond Number Measurements, *ACS Omega*, **5(14)**: 7877-788 (2020).
- [51] Pourakaberian A., Ayatollahi S., Shirazi M.M., Ghotbi C., Sisakhti H., A Systematic Study of Asphaltic Sludge and Emulsion Formation Damage During Acidizing Process: Experimental and Modeling Approach, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **207**: 109073 (2021).

- [52] Akbarzadeh K., Ayatollahi S., Nasrifar K., Yarranton H.W., Moshfeghian M., [Equations Lead to Asphaltene Deposition Predictions](#), *Oil & Gas Journal*, **100(44)**: 51-51 (2002).
- [53] Mahdavi E., Zebarjad F.S., Ayatollahi S., Taghikhani V., [Experimental Investigation on the Effect of Asphaltene Types on the Interfacial Tension of CO₂-Hydrocarbon Systems](#), *Energy & Fuels*, **29(12)**: 7941-7947 (2015).
- [54] Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H., [Experimental Investigation of the Asphaltene Deposition in Porous Media: Accounting for the Microwave and Ultrasonic Effects](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **163**: 453-462 (2018).
- [55] Taheri-Shakib J., Hosseini S.A., Kazemzadeh E., Keshavarz V., Rajabi-Kochi M., Naderi H., [Experimental and Mathematical Model Evaluation of Asphaltene Fractionation Based on Adsorption in Porous Media: Dolomite Reservoir Rock](#), *Fuel*, **245**: 570-585 (2019).
- [56] Salimi F., Ayatollahi S., Vafaie-Sefti M., [Prediction of Asphaltene Deposition During Turbulent Flow Using Heat Transfer Approach](#), *Petroleum Science and Technology*, **36(9-10)**: 632-639 (2018).
- [57] Mohammadzadeh-Shirazi M., Ayatollahi S., Ghotbi C., [Damage Evaluation of Acid-Oil Emulsion and Asphaltic Sludge Formation Caused by Acidizing of Asphaltenic Oil Reservoir](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **174**: 880-890 (2019).
- [58] Kazemzadeh Y., Parsaei R., Riazi M., [Experimental Study of Asphaltene Precipitation Prediction During Gas Injection to Oil Reservoirs by Interfacial Tension Measurement](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **466**: 138-146 (2015).
- [59] Kazemzadeh Y., Malayeri M.R., Riazi M., Parsaei R., [Impact of Fe₃O₄ Nanoparticles on Asphaltene Precipitation During CO₂ Injection](#), *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **22**: 227-234 (2015).
- [60] Tavakkoli M., Masihi M., Ghazanfari M.H., Kharrat R., [Prediction of Asphaltene Precipitation During Solvent/CO₂ Injection Conditions: A Comparative Study on Thermodynamic Micellization Model With a Different Characterization Approach and Solid Model](#), *Journal of Canadian Petroleum Technology*, **50(03)**: 65-74 (2011).
- [61] Jafari-Behbahani T., Ghotbi C., Taghikhani V., Shahrabadi A., [Investigation of Asphaltene Deposition Mechanisms During Primary Depletion and CO₂ Injection](#), SPE European Formation Damage Conference and Exhibition, SPE-143374-MS (2011).
- [62] Murgich J., Jes-Rodríguez M., Aray Y., [Molecular Recognition and Molecular Mechanics of Micelles of Some Model Asphaltenes and Resins](#), *Energy & Fuels*, **10(1)**: 68-76 (1999).
- [63] Taheri-Shakib J., Shekarifard A., Naderi H., [Analysis of the Asphaltene Properties of Heavy Crude Oil Under Ultrasonic and Microwave Irradiation](#), *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **129**: 171-180 (2018).
- [64] Karami S., Dehaghani A.S., Haghghi M., [Analytical Investigation of Asphaltene Cracking Due to Microwave and Ultrasonic Radiations: A Molecular Insight into Asphaltene Characterization and Rheology](#), *Geoenergy Science and Engineering*, **233**: 212481 (2024).

- [65] Tajikmansori A., Saeedi-Dehaghani A.H., Sadeghnejad S., Haghighi M., [New Insights into Effect of the Electrostatic Properties on the Interfacial Behavior of Asphaltene and Resin: An Experimental Study of Molecular Structure](#), *Journal of Molecular Liquids*, **377**: 121526 (2023).
- [66] Enayat S., Babu N.R., Kuang J., Rezaee S., Lu H., Tavakkoli M., Wang J., Vargas F.M., [On the Development of Experimental Methods to Determine the Rates of Asphaltene Precipitation, Aggregation, and Deposition](#), *Fuel*, **260**: 116250 (2020).
- [67] Alizadeh A., Nakhli H., Kharrat R., Ghazanfari M.H., [An Experimental Investigation of Asphaltene Precipitation During Natural Production of Heavy and Light Oil Reservoirs: The Role of Pressure and Temperature](#), *Petroleum Science and Technology*, **29(10)**: 1054-1065 (2011).
- [68] Vafaie-Sefti M., Mousavi-Dehghani S.A., [Application of Association Theory to the Prediction of Asphaltene Deposition: Deposition Due to Natural Depletion and Miscible Gas Injection Processes in Petroleum Reservoirs](#), *Fluid Phase Equilibria*, **247(1-2)**: 182-189 (2006).
- [69] Al-Jabari M., Nassar N., Husein M., [Separation of Asphaltenes from Heavy Oil Model-Solutions by Adsorption on Colloidal Magnetite Nanoparticles](#), *In Proceeding of the International Congress of Chemistry Environment (3rd ICCE), Kuwait City, Kuwait*, 18-20 (2007).
- [70] Kurup A.S., Buckley J.S., Wang J., Subramani H.J., Creek J.L., Chapman W.G., [Asphaltene Deposition Tool: Field Case Application Protocol](#), *In: Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, Houston, Texas* (2012).
- [71] Al-Obaidli A., Al-Nasheet A., Snasiri F., Al-Shammari O., Al-Shammari A., Sinha S., Amjad Y.M., Gonzalez D., Gonzalez F., [Understanding Reservoir Fluid Behavior to Mitigate Risk Associated to Asphaltene Deposition in the Reservoir Rock Near to Asphaltene Onset Pressure AOP in the Magwa Marrat Depleted Reservoir](#). In: SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. *Society of Petroleum Engineers.*, 1-21 (2019).
- [72] Haskett C.E., Tartera M., [A practical Solution to the Problem of Asphaltene Deposits-Hassi Messaoud Field, Algeria](#), *Journal of Petroleum Technology.*, **17(4)**: 387-391 (1965).
- [73] Alkafeef S.F., Al-Medhadi F., Al-Shammari A.D., [A Simplified Method to Predict and Prevent Asphaltene Deposition in Oilwell Tubings: Field Case](#), *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Denver, CO.* (2003).
- [74] Yen T., Chilingarian, G., [Asphaltenes and Asphalts](#), Develop-Ments in Petroleum Science; Elsevier Science BV: Los Angeles, CA, USA. (1994).
- [75] Mullins, O. C., [The Asphaltenes](#). *Annual Review of Analytical Chemistry.*, **4**: 393-418 (2011).
- [76] Mullins, O. C., Andrews, B., Pomerantz, A., Dong, C., Zuo, J. Y., Pfeiffer, T., Larter, S., [Impact of Asphaltene Nanoscience on Understanding Oilfield Reservoirs](#), *In Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, CO, USA.* (2011).
- [77] Hassanzadeh M., Majid Abdouss., [Essential Role of Structure, Architecture, and Intermolecular Interactions of Asphaltene Molecules on Properties \(Self-Association and Surface Activity\)](#), *Heliyon.*, **8(12)**: e12170 (2022).

- [78] Abutaqiya M.I.L., Sisco C., Kuang J., Lin P., Wang F., Tavakkoli M., Vargas F.M., *Case Studies and Field Applications. In Asphaltene Deposition: Fundamentals, Prediction, Prevention, and Remediation*, Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, (91): 284-323 (2018).
- [79] Xie K., Karan K., *Kinetics and Thermodynamics of Asphaltene Adsorption on Metal Surfaces: A Preliminary Study, Energy Fuels.*, **19**: 1252-1260 (2005).
- [80] Gray M.R., Tykwinski R.R., Stryker J.M., Tan X., *Supramolecular Assembly Model for Aggregation of Petroleum Asphaltenes, Energy Fuels.*, **25**: 3125-3134 (2011).
- [81] Castillo J., Vargas V., *Metal Porphyrin Occlusion: Adsorption During Asphaltene Aggregation, Petroleum Science and Technology.*, **34**: 873-879 (2016).
- [82] Koots J.A., Speight J.G., *Relation of Petroleum Resins to Asphaltenes, Fuel.*, **54**: 179-184 (1975).
- [83] León O., Contreras E., Rogel E., Dambakli G., Acevedo S., Carbognani L., Espidel J., *Adsorption of Native Resins on Asphaltene Particles: A Correlation Between Adsorption and Activity, Langmuir.*, **18**: 5106-5112 (2002).
- [84] Pereira J.C., López I., Salas R., Silva F., Fernández C., Urbina C., López J.C., *Resins: The Molecules Responsible for the Stability/Instability Phenomena of Asphaltenes, Energy Fuels.*, **21**: 1317-1321 (2007).
- [85] Carnahan N.F., Salager J.L., Antón R., Dávila A., *Properties of Resins Extracted from Boscan Crude Oil and Their Effect on the Stability of Asphaltenes in BOSCAN and Hamaca Crude Oils, Energy Fuels.*, **13**: 309-314 (1999).
- [86] Porte G., Zhou H., Lazzeri V., *Reversible Description of Asphaltene Colloidal Association and Precipitation, Langmuir.*, **19**: 40-47 (2003).
- [87] Leon O., Contreras E., Rogel E., Dambakli G., Espidel J., Acevedo S., *The Influence of the Adsorption of Amphiphiles and Resins in Controlling Asphaltene Flocculation, Energy Fuels.*, **15**: 1028-1032 (2001).
- [88] Junior L.C.R., Ferreira M.S., da-Silva-Ramos A.C., *Inhibition of Asphaltene Precipitation in Brazilian Crude Oils Using New Oil Soluble Amphiphiles, Petroleum Science and Technology.*, **51**: 26-36 (2006).
- [89] Ghloum E.F., Al-Qahtani M., Al-Rashid, A., *Effect of Inhibitors on Asphaltene Precipitation for Marrat Kuwaiti reservoirs, Petroleum Science and Technology.*, **70**: 99-106 (2010).
- [90] Franco C.A., Zabala R., Cortes F.B., *Nanotechnology Applied to the Enhancement of Oil and Gas Productivity and Recovery of Colombian Fields, Journal of Petroleum Technology.*, **157**: 39-55 (2017).
- [91] Franco C.A., Nassar N.N., Ruiz M.A., Pereira-Almao P., Corte F.B., *Nanoparticles for Inhibition of Asphaltenes Damage: Adsorption Study and Displacement Test on Porous Media, Energy Fuels.*, **27**: 2899-2907 (2013).
- [92] Rezakazemi M., Mirzaei S., Asghari M., Ivakpour J., *Aluminum Oxide Nanoparticles for Highly Efficient Asphaltene Separation from Crude Oil Using Ceramic Membrane Technology, Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles.*, **72**: 34 (2017).

- [93] Bennion D.B., [An Overview of Formation Damage Mechanisms Causing a Reduction in the Productivity and Injectivity of Oil and Gas Producing Formations](#), *Journal of Canadian Petroleum Technology.*, **41** (2002).
- [94] Hosseinpour N., Khodadadi A.A., Bahramian A., Mortazavi Y., [Asphaltene Adsorption onto Acidic/Basic Metal Oxide Nanoparticles toward in Situ Upgrading of Reservoir Oils by Nanotechnology](#), *Langmuir*, **29(46)**: 14135-14146 (2013).
- [95] Nassar N.N., Hassan A., Carboognani L., Lopez-Linares F., Pereira-Almao P., [Iron Oxide Nanoparticles for Rapid Adsorption and Enhanced Catalytic Oxidation of Thermally Cracked Asphaltenes](#), *Fuel.*, **95**: 257-262 (2012).
- [96] Nassar N.N., Hassan A., Pereira-Almao P., [Metal Oxide Nanoparticles for Asphaltene Adsorption and Oxidation](#), *Energy Fuels.*, **25**: 1017-1023 (2011).
- [97] Babaei E., Bazyari A., Shojaei B., Thompson LT., [Nanostructured Iron and Nickel Oxide Aerogels Revolutionizing Asphaltene Removal in Hydrocarbon Processing](#), *Scientific Reports.*, **15**, 12729 (2025).
- [98] Tabora EA., Franco C.A., Lopera S.H., Alvarado V., Cortés F.B., [Effect of Nanoparticles/Nanofluids on the Rheology of Heavy Crude Oil and Its Mobility on Porous Media at Reservoir Conditions](#), *Fuel.*, **184**: 222-232 (2016).
- [99] Shayan N.N., Mirzayi B., [Adsorption and Removal of Asphaltene Using Synthesized Maghemite and Hematite Nanoparticles](#), *Energy Fuels.*, **29**: 1397-1406 (2015).
- [100] Mirzayi B., Shayan N.N., [Adsorption Kinetics and Catalytic Oxidation of Asphaltene on Synthesized Maghemite Nanoparticles](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **121**: 134-141 (2014).
- [101] Kashefi S., Lotfollahi M.N., Shahrabadi A., [Investigation of Asphaltene Adsorption onto Zeolite Beta Nanoparticles to Reduce Asphaltene Deposition in a Silica Sand Pack](#), *Oil and Gas Science and Technology.*, **73**: 2 (2018).
- [102] Betancur S., Carmona J.C., Nassar N.N., Franco C.A., Cortés F.B., [Role of Particle Size and Surface Acidity of Silica Gel Nanoparticles in Inhibition of Formation Damage by Asphaltene in Oil Reservoirs](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research.*, **55 (21)**: 6122-6132 (2016).
- [103] Abu-Tarboush B.J., Husein, M.M., [Adsorption of Asphaltenes from Heavy Oil onto in Situ Prepared NiO Nanoparticles](#), *Journal of Colloid and Interface Science.*, **378(1)**: 64-69 (2012).
- [104] Abu-Tarboush, B.J., Husein, M.M., [Dispersed Fe₂O₃ Nanoparticles Preparation in Heavy Oil and Their Uptake of Asphaltenes](#), *Fuel Processing Technology Journal.*, **133**: 120-127 (2015).
- [105] Wu C., Su J., Zhang R., Lei G., Cao Y., [The Use of a Nano-nickel Catalyst for Upgrading Extra-heavy Oil by an Aquathermolysis Treatment Under Steam Injection Conditions](#), *Petroleum Science and Technology.*, **31(21)**: 2211-2218 (2013).
- [106] Nassar N.N., Hassan A., Pereira-Almao P., [Application of Nanotechnology for Heavy Oil Upgrading: Catalytic Steam Gasification/Cracking of Asphaltenes](#), *Energy and Fuels.*, **25(4)**: 1566-1570 (2011).
- [107] Goh C.S., Gupta M., Jarfors A.E.W., Tan M.J., Wei J., [Magnesium and Aluminium Carbon Nanotube Composites](#), *Key Engineering Materials.*, **425**: 245-261 (2010).

- [108] Cortes F.B., Mejía J.M., Ruiz M.A., Benjumea P., Riffel D.B., [Sorption of Asphaltenes onto Nanoparticles of Nickel Oxide Supported on Nanoparticulated Silica Gel](#), *Energy Fuels*, **26**(3): 1725-1730 (2012).
- [109] Franco C., Patiño E., Benjumea P., Ruiz M.A., Cortés F.B., [Kinetic and Thermodynamic Equilibrium of Asphaltenes Sorption onto Nanoparticles of Nickel Oxide Supported on Nanoparticulated Alumina](#), *Fuel*, **105**: 408-414 (2013).
- [110] Franco C.A., Montoya T., Nassar N.N., Pereira-Almao P., Cortés F.B., [Adsorption and Subsequent Oxidation of Colombian Asphaltenes onto Nickel and/or Palladium Oxide Supported on Fumed Silica Nanoparticles](#), *Energy Fuels*, **27**(12): 7336-7347 (2013).
- [111] Panahi S., Sardarian A.R., Esmaeilzadeh F., Mowla, D., [Synthesize and Characterization of Chitosan and Silica Supported on Fe₃O₄ Nanoparticles for the Adsorption and Removal of Asphaltene Molecules from Crude Oil](#), *Materials Research Express*, **5**(9): 095022 (2018).
- [112] Acevedo S., Cordero T.J.M., Carrier H., Bouyssiére B., Lobinski R., [Trapping of Paraffin and other Compounds by Asphaltenes Detected by Laser Desorption Ionization--Time of Flight Mass Spectrometry \(LDI--TOF MS\): Role of A1 and A2 Asphaltene Fractions in this Trapping](#), *Energy Fuels*, **23**: 842-848 (2009).
- [113] Acevedo S., Castro A., Vásquez E., Marcano F., Ranaudo M.A.A., [Investigation of Physical Chemistry Properties of Asphaltenes Using Solubility Parameters of Asphaltenes and Their Fractions A1 and A2](#), *Energy Fuels*, **24**: 5921-5933 (2010).
- [114] Acevedo S.C., Castillo J., Vargas V., Castro A., Delgado O., Corte F.B., Bouyssiére B., [Suppression of Phase Separation as a Hypothesis to Account for Nuclei or Nanoaggregate Formation by Asphaltenes in TOLUENE](#), *Energy Fuels*, **32**: 6669-6677 (2018).
- [115] Acevedo S., Guzman K., Ocanto O., [Determination of the Number Average Molecular Mass of Asphaltenes \(Mn\) Using Their Soluble A2 Fraction and the Vapor Pressure Osmometry \(VPO\) Technique](#), *Energy Fuels*, **24**: 1809-1812 (2010).
- [116] Nassar, N. N., Betancur, S., Acevedo, S. C., Franco, C. A., Corte, F. B., [Development of a Population Balance Model to Describe the Influence of Shear and Nanoparticles on the Aggregation and Fragmentation of Asphaltene Aggregates](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **54**: 8201-8211 (2015).
- [117] Torkaman M., Bahrami M., Dehghani M.R., [Influence of Temperature on Aggregation and Stability of Asphaltenes. II. Orthokinetic Aggregation](#), *Energy Fuels*, **32**: 6144-6154 (2018).
- [118] Rahmani N.H., Masliyah J.H., Dabros T., [Characterization of Asphaltenes Aggregation and Fragmentation in a Shear Field](#). *AIChE Journal*, **49**: 1645-1655 (2003).
- [119] Montes D., Orozco W., Taborda E.A., Franco C.A., Cortés F.B., [Development of Nanofluids for Perdurability in Viscosity Reduction of Extra-Heavy Oils](#), *Energies*, **12**: 1068 (2019).
- [120] Soler C.A.C., Malagueta D.C., Martin C.A.G., [Feasibility of Implementation of Solar Thermal Energy in Steam-Assisted Gravity Drainage \(SAGD\) in Extra-Heavy Oil Field in Colombia](#), *Geoenergy Science and Engineering*, **222**: 211463 (2023).
- [121] Adams J. J., [Asphaltene Adsorption, a Literature Review](#), *Energy Fuels*, **28**: 2831-2856 (2014).

- [122] Montes, D., [Upscaling Process for Nanofluids Usage for Heavy Oil Mobility Enhancement: Experimental Design and Field Trial Application](#), In *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Virtual.*, 27-29 (2020).
- [123] Guzman, J. D., Betancur, S., Carrasco-Marín, F., Franco, C. A., Nassar, N. N., Corte, F. B. (2016). [Importance of the Adsorption Method Used for Obtaining the Nanoparticle Dosage for Asphaltene-Related Treatments](#), *Energy Fuels.*, **30**: 2052-2059 (2016).
- [124] Franco C.A., Lozano M.M., Acevedo S., Nassar N.N., Corte F.B., [Effects of Resin I on Asphaltene Adsorption onto Nanoparticles: A Novel Method for Obtaining Asphaltenes/Resin Isotherms](#), *Energy Fuels.*, **30**: 264-272 (2015).
- [125] Medina, O. E., Olmos, C., Lopera, S. H., Cortés, F. B.; Franco, C. A., [Nanotechnology Applied to Thermal Enhanced Oil Recovery Processes: A Review](#), *Energies.*, **12**: 4671 (2019).
- [126] Acevedo S., Ranaudo M.A., Escobar G., Gutiérrez L., Ortega P., [Adsorption of Asphaltenes and Resins on Organic and Inorganic Substrates and Their Correlation With Precipitation Problems in Production Well Tubing](#), *Fuel.*, **74**: 595-598 (1995).
- [127] Franco C.A., Montoya T., Nassar N.N., Pereira-Almao P., Corte F.B., [Adsorption and Subsequent Oxidation of Colombian Asphaltenes onto Nickel and/or Palladium Oxide Supported on Fumed Silica Nanoparticles](#), *Energy Fuels.*, **27**: 7336-7347 (2013).
- [128] Medina O.E., Gallego J., Arias-Madrid D., Cortés F.B., Franco C.A., [Optimization of the Load of Transition Metal Oxides \(Fe₂O₃, Co₃O₄, NiO and/or PdO\) onto CeO₂ Nanoparticles in Catalytic Steam Decomposition of n-C₇ Asphaltenes at Low Temperatures](#), *Nanomaterials.*, **9**: 401 (2019).
- [129] Karambeigi M.A., Nikazar M., Kharrat R., [Experimental Evaluation of Asphaltene Inhibitors Selection for Standard and Reservoir Conditions](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **137**: 74-86 (2016).
- [130] Mohammadi M., Akbari M., Fakhroueian Z., Bahramian A., Azi, R., Arya S., [Inhibition of Asphaltene Precipitation by TiO₂, SiO₂, and ZrO₂ Nanofluids](#), *Energy Fuels.*, **25**: 3150-3156 (2011).
- [131] Loureiro T.S., Palermo L.C.M., Spinelli L.S., [Influence of Precipitation Conditions \(n-Heptane or Carbon Dioxide Gas\) on the Performance of Asphaltene Stabilizers](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **127**: 109-114 (2015).
- [132] Kazemzadeh Y., Eshraghi S.E., Kazemi K., Sourani S., Mehrabi M., Ahmadi Y., [Behavior of Asphaltene Adsorption onto the Metal Oxide Nanoparticle Surface and Its Effect on Heavy Oil Recovery](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research.*, **54**: 233-239 (2015).
- [133] Shayan, N.N., Mirzayi, B., [Adsorption and Removal of Asphaltene Using Synthesized Maghemite and Hematite Nanoparticles](#), *Energy Fuels.*, **29**: 1397-1406 (2015).
- [134] Hammami A., Phelps C.H., Monger-McClure T., Little T.M., [Asphaltene Precipitation from Live Oils: An Experimental Investigation of Onset Conditions and Reversibility](#), *Energy Fuels.*, **14**: 14-18 (2000).
- [135] Lu T., Li Z., Fan W., Zhang X., Lv Q., [Nanoparticles for Inhibition of Asphaltenes Deposition During CO₂ Flooding](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research.*, **55**: 6723-6733 (2016).

- [136] Franco C.A., Nassar N.N., Montoya T., Ruíz M.A., Cortés F.B., [Influence of Asphaltene Aggregation on the Adsorption and Catalytic Behavior of Nanoparticles](#), *Energy & Fuels.*, **29**(3): 1610-1621 (2015).
- [137] Madhi M., Bemani A., Daryasafar A., Khosravi Nikou M.R. [Experimental and Modeling Studies of the Effects of Different Nanoparticles on Asphaltene Adsorption](#), *Petroleum Science and Technology.*, **35**: 242-248 (2017).
- [138] Castillo J., Vargas V., Piscitelli, V., Ordoñez L., Rojas H., [Study of Asphaltene Adsorption onto Raw Surfaces and Iron Nanoparticles by AFM Force Spectroscopy](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **151**: 248-253 (2017).
- [139] Ahmadi Y., Aminshahidy B., [Effects of Hydrophobic CaO and SiO₂ Nanoparticles on Asphaltene Precipitation Envelope \(APE\): an Experimental and Modeling Approach](#), *Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles.*, **73** (2018).
- [140] Chen W., Vashistha P., Yen A., Joshi N., Kapoor Y., Hartman R.L., [Asphaltenes Dissolution Mechanism Study by in Situ Raman Characterization of a Packed-Bed Microreactor with HZSM-5 Aluminosilicates](#), *Energy Fuels.*, **32**: 12205-12217 (2018).
- [141] Mohammadi M., Sedighi M., Hemati M., [Removal of Petroleum Asphaltenes by Improved Activity of NiO Nanoparticles Supported on Green AIPO-5 Zeolite: Process Optimization and Adsorption Isotherm](#), *Petroleum.*, (2019).
- [142] Arias-Madrid D., Medina O.E., Gallego J., Acevedo S., Correa-Espinal A.A., Cortés F.B., Franc, C.A., [NiO, Fe₂O₃, and MoO₃ Supported over SiO₂ Nanocatalysts for Asphaltene Adsorption and Catalytic Decomposition: Optimization Through a Simplex--Centroid Mixture Design of Experiments](#), *Catalysts.*, **10**: 569 (2020).
- [143] Najjar O.G. P.A.M.Z., Mirzayi B., Mohammadi S., Hemmat A., Mahmoudi-Alemi F., [Application of MgO Based-Nanofluid for Controlling the Growth of Asphaltene Flocs Under Static and Micromodel Dynamic Conditions](#), *The Canadian Journal of Chemical Engineering.*, (2024).
- [144] Liu F., Wang M., [Review of Low Salinity Waterflooding Mechanisms: Wettability Alteration and Its Impact on Oil Recovery](#), *Fuel.*, **267**: 117112 (2020).
- [145] Punase A.D., Hascakir B., [Role of Reservoir Brine and Rock in Modulating Asphaltene Stability: Insights from Experimental Analysis](#), *SPE Journal.*, **28**: 3128-3147 (2023).
- [146] Strand S., Puntervold T., Austad T., [Water Based Eor from Clastic Oil Reservoirs by Wettability Alteration: A Review of Chemical Aspects](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **146**: 1079-1091 (2016).
- [147] Shariatpanahi S., Hopkins P., Aksulu H., Strand S., Puntervold T., Austad T., [Water Based Eor by Wettability Alteration in Dolomite](#), *Energy & Fuels.*, **30**(1): 180-187 (2016).
- [148] Buckley J.S. Evaluation of Reservoir Wettability and its Effect on Oil Recovery, *Technical Reports.* (1999).

[۱۴۹] حسینی، س.ن، پدیده ترشوندگی و برهم‌کنش‌های سطح سنگ و سیال تزریقی هنگام سیلاب‌زنی شیمیایی در فرایند ازدیاد برداشت نفت، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، **(۴) ۴۱: ۴۵۷-۴۸۱** (۱۴۰۱).

- [150] Tanhaei H., Saeedi-Dehaghani A.H., [Improvement of the Quality of Heavy Crude Oil and Reducing the Concentration of Asphaltene Hydrocarbons Using Microwave Radiation During Acidizing](#), *Scientific Reports.*, **15**: 7434 (2025).
- [151] Hayavi M.T., Malayeri M.R., [Assessment of Asphaltene Precipitation Potential Based on Structural Characteristic and Surface Energy Approaches](#), *Journal of Molecular Liquids*, **434**:128011 (2025).
- [152] Bourrel M., Passade-Boupat N., [Crude Oil Surface Active Species: Consequences for Enhanced Oil Recovery and Emulsion Stability](#), *Energy & Fuels.*, **32(3)**: 2642-2652 (2017).
- [153] Drummond C., Israelachvili J., [Surface Forces and Wettability](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **33(1-3)**: 123-133 (2002).
- [154] Song J., Rezaee S., Guo W., Hernandez B., Puerto M., Vargas F.M., Hirasaki G.J., Biswal S.L., [Evaluating Physicochemical Properties of Crude Oil as Indicators of Low-Salinity-Induced Wettability Alteration in Carbonate Minerals](#), *Scientific Reports.*, **10(1)** (2020).
- [155] Orozco RAL., Abeykoon GA., Wang M., Vivas F.J.A., Okuno R., Lake L.W., Ayirala S.C., AlSofi A.M., [Amino Acid as a Novel Wettability Modifier for Enhanced Waterflooding in Carbonate Reservoirs](#), in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers., (2020).
- [156] Mwangi P., Brady P.V., Radonjic M., Thyne G., [The Effect of Organic Acids on Wettability of Sandstone and Carbonate Rocks](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **165**: 428-435 (2018).
- [157] Wang L., Siretanu I., Duits M.H., Stuart M.A.C., Mugele F., [Ion Effects in the Adsorption of Carboxylate on Oxide Surfaces, Studied with Quartz Crystal Microbalance](#), *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **494**: 30-38 (2016).
- [159] ASTM, [D-664: Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration](#), American Society for Testing and Materials (ASTM): Annual Book of ASTM Standards, (1999).
- [159] Fan T., Buckley J.S., [Acid Number Measurements Revisited](#), *SPE Journal*, **12(04)**: 496-500 (2007).
- [160] Rocha J.A., Baydak E.N., Yarranton H.W., Sztukowski D M., Ali-Marcano V., Gong L., Shi C.; Zeng H., [Role of Aqueous Phase Chemistry, Interfacial Film Properties, and Surface Coverage in Stabilizing Water-in-Bitumen Emulsions](#), *Energy Fuels.*, **30(7)**: 5240-5252 (2016).
- [161] Mokhtari R., Ayatollahi S., [Dissociation of Polar Oil Components in Low Salinity Water and Its Impact on Crude Oil-Brine Interfacial Interactions and Physical Properties.](#), *Petroleum Science.*, **16**: 328-343 (2019).
- [162] Zhang Y., Morrow N.R., [Comparison of Secondary and Tertiary Recovery with Change in Injection Brine Composition for Crude Oil/Sandstone Combinations](#), *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. (2006).
- [163] Pu H., Xie X., Yin P., Morrow N.R., [Low-Salinity Waterflooding and Mineral Dissolution](#), in: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, *SPE Journal.*, (2010).
- [164] Cissokho M., Bertin, H., Boussour, S., Cordier P., Hamon, G., [Low Salinity Oil Recovery on Clayey Sandstone: Experimental Study](#), *Petrophysics.*, **51** (2010).

- [165] Austad T., RezaeiDoust A., Puntervold, T., [Chemical Mechanism of Low Salinity Water Flooding in Sandstone Reservoirs](#), *SPE Improved Oil Recovery Symposium*.
- [166] Gamage P., Thyne G. [Comparison of Oil Recovery by Low Salinity Waterflooding in Secondary and Tertiary Recovery Modes](#), *SPE Annual Technical Conference and Exhibition.*, (2011).
- [167] Yousef A.A., Al-Saleh S., Al-Kaabi A., Al-Jawfi M., [Laboratory Investigation of the Impact of Injection-Water Salinity and Ionic Content on Oil Recovery From Carbonate Reservoirs](#), *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, **14(5)**: 578-593 (2011).
- [168] Loahardjo N., Xie X., Yin P., Morrow N.R., [Oil Recovery by Sequential Waterflooding: The Effects of Aging at Residual Oil and Initial Water Saturation](#), *SPE Improved Oil Recovery Symposium*, Tulsa, Oklahoma, USA. (2012).
- [169] Sohrabi M., Mahzari P., Farzaneh S.A., Mills J.R., Tsohis P., Ireland S., [Novel Insights Into Mechanisms of Oil Recovery by Use of Low-Salinity-Water Injection](#), *SPE Journal.*, **22(02)**: 407-416 (2017).
- [170] Hashemi S.I., Fazelabdolabadi B., Moradi S., Rashidi A.M., Shahrabadi A., Bagherzadeh H., [On the Application of NiO Nanoparticles to Mitigate in Situ Asphaltene Deposition in Carbonate Porous Matrix](#), *Applied Nanoscience.*, **6**: 71-81 (2016).
- [171] Azizkhani A., Gandomkar A., [A Novel Method for Application of Nanoparticles as Direct Asphaltene Inhibitors During Miscible CO₂ Injection](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **185**: 106661 (2020).
- [172] Zabala Romero R.D., Acuna H.M., Cortes F., Patino J.E., Cespedes Chavarro C., Mora E., Botero O.F., Guarin L., [Application and Evaluation of a Nanofluid Containing Nanoparticles for Asphaltenes Inhibition in Well CPSXL4](#), *In Proceedings of the OTC Brasil, Rio de Janeiro, Brazil*, 29-31 (2013).
- [173] Yekeen N., Padmanabhan E., Idris A.K., Chauhan P.S., [Nanoparticles Applications for Hydraulic Fracturing of Unconventional Reservoirs: A Comprehensive Review of Recent Advances and Prospects](#), *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **178**: 41-73 (2019).
- [174] Zabala R., Mora E., Botero O., Cespedes C., Guarin L., Franco C., Ospina N., [Nano-Technology for Asphaltenes Inhibition in Cupiagua South Wells](#), *In Proceedings of the IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar*, 19-22 (2014).
- [175] Meneses M.A., Zabala R., Rodríguez E., Cortés F.B., [Asphaltenes Inhibition by Using New Generation of Nanofluids in Tenay Field](#), *In Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Moscow, Russia*, 24-26, (2016).
- [176] Franco CA., Giraldo LJ., Candela CH., Bernal KM., Villamil F., Montes D., Lopera SH., Franco CA., Cortés FB., [Design and Tuning of Nanofluids Applied to Chemical Enhanced Oil Recovery Based on the Surfactant--Nanoparticle--Brine Interaction: From Laboratory Experiments to Oil Field Application](#), *Nanomaterials*, **10(8)**: 1579 (2020).
- [177] Mehraban M.F., Farzaneh S.A., Sohrabi M., Sisson A., [Fluid-Fluid Interactions Inducing Additional Oil Recovery During Low Salinity Water Injection in Inefficacious Presence of Clay Minerals](#), *Fuel.*, **308**: 121922 (2022).

- [178] Zhang Y., Chen, Y., Westerhoff, P., Hristovski, K., Crittenden, J.C., *Stability of Commercial Metal Oxide Nanoparticles in Water*, *Water Research.*, **42(8-9)**: 2204-2212 (2008).
- [179] Cacua K., Ordoñez F., Zapata C., Herrera B., Pabón E., Buitrago-Sierra, R., *Surfactant Concentration and PH Effects on the Zeta Potential Values of Alumina Nanofluids to Inspect Stability*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, **583**: 123960 (2019).
- [180] Almahfood, M.; Bai, B. *The Synergistic Effects of Nanoparticle-Surfactant Nanofluids in EOR Applications*, *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **171**: 196-210 (2018).
- [181] Izadi N., Nasernejad, B., *Newly Engineered Alumina Quantum Dot-Based Nanofluid in Enhanced Oil Recovery at Reservoir Conditions*, *Scientific Reports.*, **12(1)**: 9505 (2022).
- [182] Esfandyari-Bayat A., Junin R., Samsuri A., Piroozian A., Hokmabadi, M., *Impact of Metal Oxide Nanoparticles on Enhanced Oil Recovery from Limestone Media at Several Temperatures*, *Energy Fuels.*, **28(10)**: 6255-6266 (2014).
- [183] Alomair O.A., Matar K.M., Alsaed Y.H., *Nanofluids Application for Heavy Oil Recovery*. In Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, APOGCE 2014 Changing the Game: Opportunities, Challenges and Solutions, Adelaide, Australia, October 2014; Society of Petroleum Engineers (SPE): Richardson, TX, USA, (2014).
- [184] Ogolo N.A., Olafuyi O.A., Onyekonwu M.O., *Enhanced Oil Recovery Using Nanoparticles*. In SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, April 8-11, 2012; Society of Petroleum Engineers: Richardson, TX, USA, 1-10 (2012).
- [185] Hendraningrat L., Torsæter, O., *Metal Oxide-Based Nanoparticles: Revealing Their Potential to Enhance Oil Recovery in Different Wettability Systems*, *Applied Nanoscience.*, **5**: 181-199 (2015).
- [186] Gbadamosi A., Junin R., Manan M., Agi A., Oseh J., *Nanotechnology Application in Chemical Enhanced Oil Recovery: Current Opinion and Recent Advances*. In Enhanced Oil Recovery Processes New Technologies; Samsuri, A., Ed.; IntechOpen, (2019).
- [187] Tajmiri M., Mousa Mousavi, S., Ehsani M.R., Roayaei E., Emadi A., *Wettability Alteration of Sandstone and Carbonate Rocks by Using ZnO Nanoparticles in Heavy Oil Reservoirs*, *Iranian Journal of Oil and Gas Science and Technology.*, **4(4)**: 50-66 (2015).
- [188] Patel H., Shah S., Ahmed R., Ucan S., *Effects of Nanoparticles and Temperature on Heavy Oil Viscosity*, *Journal of Petroleum Science and Engineering.*, **167**: 819-828 (2018).
- [189] US Research Nanomaterials, Inc. <https://www.us-nano.com/> (accessed 2023-12-06).
- [190] Patiño-Ruiz D.A., Meramo-Hurtado S.I., González-Delgado Á.D., Herrera, A., *Environmental Sustainability Evaluation of Iron Oxide Nanoparticles Synthesized via Green Synthesis and the Coprecipitation Method: A Comparative Life Cycle Assessment Study*, *ACS Omega.*, **6(19)**: 12410-12423 (2021).
- [191] Yuan H., Zhang Z., Mi Y., Ye F., Liu W., Kuan J., Jiang X., Luo Y., *Demulsification of Water-Containing Crude Oil Driven by Environmentally Friendly SiO₂@CS Composite Materials*, *Energy Fuels.*, **34(7)**: 8316-8324 (2020).

- [192] Sahiner N., Yasar A.O., [A New Application for Colloidal Silica Particles: Natural, Environmentally Friendly, Low-Cost, and Reusable Catalyst Material for H₂ Production from NaBH₄ Methanolysis](#), *Industrial & Engineering Chemistry Research.*, **55(43)**: 11245-11252 (2016).
- [193] Baysal A., Saygin H., [Physico-Chemical and Toxicological Behaviour of Al₂O₃ Nanoparticles in Fine Particulate Matter](#), *Environmental Engineering and Management Journal.*, **18(12)**: 2683-2694 (2019).
- [194] Ge Y., Schimel J.P., Holden P.A., [Evidence for Negative Effects of TiO₂ and ZnO Nanoparticles on Soil Bacterial Communities](#), *Environmental Science & Technology Journal.*, **45(4)**: 1659-1664 (2011).