

Review Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2046468.1978



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Synergistic of nanoparticles/low salinity water/surfactant: A review on applications, advantages and mechanisms

Ehsan Jafarbeigi^{1,2}, Eghbal Sahraei¹, Khaled Maroufi^{1*}

¹ Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

² Department of Chemical and Petroleum Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

Received: 21 Nov 2024 Accepted: 12 Feb 2024

Abstract

The synergistic technique of nanoparticles, low salinity water and surfactant represents a promising and innovative strategy for enhancing oil recovery and preventing the deposition of asphaltenes. In this study, the applications and advantages of the aforementioned technique are studied. Additionally, the mechanisms of oil displacement, field applications, economic considerations, and future research directions are presented. The findings indicate that the simultaneous use of nanoparticles, low salinity water, and surfactants can significantly reduce costs while enhancing recovery rates by altering wettability to a hydrophilic state, preventing the migration of fine rock particles, and decreasing surfactant adsorption on the rock surface. By employing this technique, the interfacial tension and wettability can be reduced to 0.99 mN/m and 22°, respectively. Furthermore, this technique effectively addresses the challenges related to the asphaltene deposition by dispersing asphaltene molecules within the porous media. Investigations have demonstrated that concentration is a critical factor; therefore, concentrations exceeding 0.2 wt% of nanoparticles are rarely recommended. Future research should focus on exploring the synergy between surfactants/low-salinity water and nanoparticles such as silica, aluminum oxide, and graphene oxide. The results reported in this study can assist researchers in selecting the optimal synergistic combinations for enhanced oil recovery tests, thereby minimizing the detrimental effects of incompatibilities while increasing recovery rates.

Keyword: Nanoparticle, Low Salinity Water, Surfactant, Enhanced Oil Recovery (EOR), Asphaltene Deposition, Mechanism.

* maroufi@sut.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Jafarbeigi, E., Sahraei, E., Maroufi, K., "Synergistic of nanoparticles/low salinity water/surfactant: A review on applications, advantages and mechanisms", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 88, pp. 33-50, In Persian, (2025).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2046468.1978



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

هم‌افزایی نانوذرات/آب کم شور/سورفکتانت: مروری بر کاربردها، مزیت‌ها و مکانیسم‌ها

احسان جعفری‌بیگی^{1,2}، اقبال صحرایی¹، خالد معروفی^{1*}

¹ دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

² گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دریافت: 1403/09/01 پذیرش: 1403/11/24

چکیده

تکنیک هم‌افزایی نانوذرات، آب کم شور و سورفکتانت یک استراتژی امیدوارکننده و نوآورانه برای افزایش بازیافت نفت و جلوگیری از رسوب آسفالتین می‌باشد. در این مطالعه، کاربردها و مزایای تکنیک مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، مکانیسم جابه‌جایی نفت، کاربرد میدانی، ملاحظات اقتصادی و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی آینده نیز ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از نانوذرات، آب کم شور و سورفکتانت می‌تواند با تغییر ترشوندگی به حالت آب‌دوست، جلوگیری از مهاجرت ذرات ریز و کاهش جذب سورفکتانت بر روی زمینه سنگی، هم‌زمان با افزایش ضریب بازیافت، هزینه‌ها را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. استفاده از تکنیک مذکور می‌تواند کشش سطحی و ترشوندگی سنگ را به ترتیب تا $0/99$ mN/m و 22° کاهش دهد. ضمناً، این تکنیک با پخش کردن مولکول‌های آسفالتین در محیط متخلخل، در زمینه مقابله با چالش‌های مرتبط با رسوب آسفالتین نیز موثر می‌باشد. بررسی‌ها نشان داد که غلظت، فاکتور کلیدی می‌باشد. بر همین اساس، غلظت بالاتر از $0/2$ درصد وزنی نانوذرات به ندرت توصیه می‌شود. تحقیقات آینده می‌تواند در راستای هم‌افزایی سورفکتانت و آب کم شور با نانوذرات سیلیکا، آلومینیوم و اکسید گرافن متمرکز باشد. نتایج این مطالعه به محققین کمک می‌کند تا بهترین ترکیبات هم‌افزایی شده را برای تست‌های ازدیاد برداشت نفت انتخاب کرده و علاوه بر افزایش بازیافت نفت، آسیب‌های ناشی از ناسازگاری‌ها را به حداقل رسانند.

کلمات کلیدی: نانوذره/آب کم شور/سورفکتانت، ازدیاد برداشت نفت، رسوب آسفالتین، مکانیسم.

* maroufi@sut.ac.ir

1- مقدمه

سوخت های فسیلی منابع اصلی تأمین انرژی برای چند دهه آینده هستند، به طور کلی، بسیاری از مخازن هیدروکربنی را نمی توان به طور کامل تخلیه کرد و اغلب بیش از 70 درصد نفت پس از مرحله بازیافت اولیه دست نخورده باقی می ماند [1]. فرآیندهای بازیافت نفت به سه دسته اصلی اولیه، ثانویه و ثالثیه طبقه بندی می شوند. فرآیند بازیافت اولیه نفت می تواند از طریق جریان طبیعی و فراآوری مصنوعی انجام شود. انرژی نیروهای رانش طبیعی با گذشت زمان کاهش یافته و نیازمند روش هایی خواهند بود تا این کاهش انرژی جبران شود. مرحله ثانویه برداشت از مخازن شامل اعمال نیرو از خارج مخزن و از طریق چاه های تزریقی می باشد. معمولاً این رویکرد با تزریق آب و گاز غیرامتزاجی به ترتیب به آبد و کلاهدک گازی مخزن انجام می گیرد. علیرغم اینکه مرحله ثانویه برداشت باعث افزایش بهره وری مخازن خواهد شد لیکن بعد از اتمام این مرحله نیز کماکان حجم بسیاری زیادی از هیدروکربن ها (بالای 50 درصد) در داخل مخازن باقی می ماند. هدف مرحله ثالثیه، تولید هیدروکربن های باقیمانده در مخزن می باشد. روش هایی که در این مرحله استفاده می شوند عمدتاً با نام ازیاد برداشت نفت مطرح می باشند. انجام این مرحله می تواند منجر به تولید نهایی بالاتر از 80 درصد نفت درجا شود [2].

روش های ازدیاد برداشت را می توان در سه دسته حرارتی، تزریق گاز و شیمیایی طبقه بندی نمود. روش های حرارتی مبتنی بر اعمال حرارت به مخزن جهت کاهش ویسکوزیته و در نتیجه تولید بیشتر می باشند. این روش ها در مورد ذخایر سنگین و فوق سنگین کاربرد داشته و عمدتاً در مخازن ماسه سنگی مثرتر بوده اند. از سوی دیگر، تزریق دی اکسید کربن و نیتروژن از جمله روش های تزریق گاز می باشند. همچنین، تکنیک هایی که با اضافه کردن مواد شیمیایی (نظیر پلیمر، نانوذرات و سورفکتانت) در صدد تغییر کشش سطحی بین آب و نفت هستند را روش های شیمیایی ازیاد برداشت نفت گویند [3-9]. مثلاً سورفکتانت ها عوامل فعال سطحی هستند که به عنوان یک عامل آب دوست برای کاهش کشش سطحی بین دو فاز مختلف عمل می کنند. مولکول های سورفکتانت معمولاً ترکیبات آلی هستند که شامل یک دم آگریز و یک سر آب دوست هستند. در این راستا، سورفکتانت های آنیونی و کاتیونی معمولاً به منظور کاهش کشش سطحی بین نفت و آب در مخازن ماسه سنگی و کربناته استفاده می شوند [10-13]. البته سورفکتانت های آنیونی و غیر آنیونی می توانند به عنوان بازدارنده یا پخش کننده نیز استفاده شوند [14-20]. دانش کامل از مکانیسم ها و برهمکنش های بین نفت و سورفکتانت ها، به دلیل پیچیدگی ساختاری نفت، نقش مهمی در فرموله بندی پراکنده کننده ها و بازدارنده ها ایفا می کند [21-25]. یکی از روش های دیگر، تزریق نانوذرات به مخازن است. نانوذرات در مخازنی که با مشکل نفوذپذیری کم، رسوب آسفالتین و تخلخل کم روبرو هستند، به خوبی تاثیرپذیری خود را نشان داده اند. این مواد توانسته اند به وضوح بازده جابجایی نفت را در صورت ترکیب با سایر عوامل جابجایی نفت، افزایش دهند. مکانیسم های آن شامل کاهش کشش سطحی بین آب و نفت، تغییر ترشوندگی سنگ و ایجاد یک فشار جداسازی ساختاری می باشد [26]. همچنین یکی از روش های دیگر، تزریق آب کم شور است که جزء روش های اقتصادی و سازگار با محیط زیست بوده و توسط شرکت های نفتی مختلف پیشنهاد شده است [27-29]. با این حال، کاربرد این روش در سازندهایی با حضور رس فراوان، سطوح نفت دوست، آب کاهش نیافتنی حاوی یون های چند ظرفیتی و غیره با محدودیت های خاصی مواجه است [30]. برای غلبه بر چنین محدودیت هایی اخیراً

دوز پایینی از افزودنی‌ها (به عنوان مثال سورفکتانت و نانوذرات) برای ماسه‌سنگ نفت‌دار با نتایج امیدوارکننده‌ای در آزمایش‌های ماکرو و میکرو گزارش شده است [31 و 32].

چالش دیگری که در راستای بازیافت نفت در مخازن وجود دارد، مشکلات ناشی از رسوب آسفالتین است، رسوب آسفالتین یک فرآیند مضر در صنعت نفت است و مشکلات زیادی را در روند تولید نفت ایجاد نموده است [33 و 34]. ته‌نشینی و رسوب آسفالتین به پارامترهای مختلفی نظیر شرایط ترمودینامیکی سیستم، ساختار مولکول‌های آسفالتین، تغییرات در شرایط خارجی مانند دما و فشار یا تغییر در ترکیب نمونه نفت بستگی دارد [35 و 36]. رسوب آسفالتین می‌تواند بر تولید نفت خام تأثیر منفی گذاشته و باعث انسداد تجهیزات شود [37 و 38]. از سوی دیگر، رسوب آسفالتین در داخل مخزن، ترشوندگی سنگ را تغییر داده و منجر به آسیب سازند و کاهش تولید می‌شود [39].

در این مطالعه، مشارکت‌های اخیر انتشار یافته در زمینه استفاده از تکنیک هم‌افزایی نانوذرات، آب کم شور و سورفکتانت جهت بهبود تولید و کاهش مشکلات ناشی از رسوب/بارش آسفالتین مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، مزایا، کاربردها، مکانیسم‌ها، پیامدهای اقتصادی و جهت‌گیری‌های آینده تکنیک هم‌افزایی نانوذرات، آب کم شور و سورفکتانت مورد بحث قرار گرفته است. تحقیقات گزارش شده در این مطالعه نارسایی‌های موجود در مورد پذیرش روش‌های مذکور را تا حدودی مرتفع نموده و مزایای بالقوه آن را نمایان می‌کند.

2- تکنیک هم‌افزایی

تکنیک هم‌افزایی تعامل بین دو یا چند ماده می‌باشد. در این راستا، اثر ترکیبی بیشتر از زمانی است که مواد به تنهایی استفاده می‌شوند. استفاده از تکنیک محلول سورفکتانت، آب کم شور و نانوذره اثر سینرژیک دارد و می‌تواند یک تکنیک بالقوه جهت بهبود بازیافت نفت و مقابله با چالش‌های مرتبط با رسوب آسفالتین در مخازن نفتی می‌باشد. این رویکرد با استفاده از دوزهای پایین از ترکیبات یعنی نانوذره، سورفکتانت و آب کم شور میسر می‌گردد.

3- مزایای هم‌افزایی نانوذرات/ آب کم شور/ سورفکتانت

مزایای ترکیب سه روش ازدیاد برداشت آب کم شور، سورفکتانت و نانوذره را می‌توان در سه بخش کاهش جذب سطحی، تغییر ترشوندگی و کنترل مهاجرت ذرات ریز مورد بحث قرار داد. مزایای هم‌افزایی در هر دو مبحث ازدیاد برداشت و مشکلات رسوب آسفالتین موثر می‌باشند.

یکی از مشکلات اساسی در زمینه تزریق سورفکتانت، جذب سطحی آن بر روی سنگ مخزن می‌باشد. افزایش غلظت سورفکتانت می‌تواند منجر به کاهش کشش سطحی سنگ - نفت شده و بر همین اساس، بازیافت نفت افزایش یابد. اما این افزایش غلظت چالش‌هایی را برای سنگ مخزن به وجود می‌آورد [40-46]. جهت رفع این مشکل می‌توان از نانوذرات استفاده نمود. نانوذرات نقش مهمی را به عنوان یک عامل قربانی بازی می‌کنند. در این راستا، جذب نانوذرات بر روی سطح سنگ می‌تواند میزان سورفکتانت جذب شده بر روی سطح سنگ را کاهش دهد. انتخاب یک نانوذرات مناسب (آب گریز یا آب دوست) و نوع سورفکتانت مربوطه برای انواع مختلف سنگ‌های مخزن، عامل کلیدی در دستیابی به کمترین جذب سورفکتانت و بالاترین بازیافت نفت است. بر همین اساس، ترکیب مناسب سورفکتانت با نانوذرات خاص و آب با شوری کم روشی جدید برای کاهش تلفات بیش از حد سورفکتانت است. این رویکرد در مقابله با رسوب آسفالتین نیز موثر می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی با محوریت مباحث فوق انجام گرفته است. سعیدی-دهاقانی و دانشفر [47] با استفاده از میکرومدل به بررسی تاثیر نانوذره سیلیکا بر عملکرد سیلابزنی آب با

شوری‌های مختلف پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که جابجایی نفت در میکرومدل برای مخلوط تزریقی نانوذرات و آب کم شور در مقایسه با سایر محلول‌ها بیشتر است. این محققان بیان نمودند که نانوذرات می‌توانند کارایی آب کم شور را از طریق تغییر ترشوندگی به سمت شرایط آب دوستی افزایش داده و باعث بهبود بازده جاروبی نفت شوند. در مطالعه ای دیگر، گوررو-مارتین¹ و همکاران [48] با بکارگیری نانو تکنولوژی در راستای رسوب آسفالتین، برهمکنش بین آسفالتین و نانوذرات را مورد بررسی قرار دادند. آنها با استفاده از نتایج مطلوبی که در راستای رسوب آسفالتین به دست آوردند به این نتیجه رسیدند که تحقیقات آینده باید به سوی نانوذرات هوشمند و نانوذرات با ظرفیت خود ترمیم شونده سوق داده شوند. فونتس² و همکاران [49] کاربرد نانوذرات مختلف در بهبود بازیافت نفت و تزریق آب با شوری کم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد نانوذرات/نانوسیال از طریق مکانیسم‌های مختلف از مهاجرت ذرات ریز متحرک در محیط متخلخل که از حفره‌های منافذ جدا شده‌اند، جلوگیری می‌نماید. شادروان و همکاران [50] دو نانوذره سنتزی اصلاح‌سطحی شده یعنی سیلیکا و کلسیم کربنات را به منظور بازدارندگی آسفالتین و بازیافت بیشتر نفت سنتز نمودند. برای درک مکانیسم بارش آسفالتین و تولید نفت با استفاده از بازدارنده‌های سنتزی آنان بررسی‌هایی را بر محتوای آسفالتین، نقطه شروع رسوب آسفالتین، ترشوندگی، کشش بین سطحی و بازیافت نفت انجام دادند. نتایج نشان داد که این نانو بازدارنده‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی نقطه شروع رسوب آسفالتین را با عملکرد متفاوت به تعویق بیندازند. همچنین، نانو بازدارنده کربنات کلسیم کارایی بهتری در غلظت‌های پایین نشان داد و مولکول‌های آسفالتین را در نفت خام معلق نمود. در مقابل، نانو بازدارنده سیلیکا هم عملکرد بالایی از خود نشان داد. آزمایش‌های تغییر ترشوندگی و کاهش کشش سطحی نشان داد که هر نانو بازدارنده در غلظت‌های خاص عملکرد بهینه‌ای دارد. نانو بازدارنده‌های سیلیکا پایداری کلوئیدی بهتری را نشان داد و از طرفی باعث بهبود بازیافت نفت بیش از نانو بازدارنده کلسیم کربنات شد.

تغییر ترشوندگی جزو مکانیسم‌های بهبود بازیافت نفت در فرآیند سیلابزنی است. به طور کلی، درک تعامل سیال/سنگ، کلید اصلی پیش‌بینی موفقیت آمیز بودن هر روش ازدیاد برداشت است. عملیات ازدیاد بازیافت نفت با تزریق آب، مواد شیمیایی پایه آبی و گازی انجام می‌شود. تزریق سیالات به مخزن می‌تواند منجر به فعل و انفعالات مختلفی بین سنگ و سیال شود. در این راستا، با توجه به فعل و انفعالات حاصله و بسته به نوع و ترکیب سیالات تزریقی، حجم تزریقی و نوع مخزن، ویژگی‌های مختلف جریان مخزن و سیال دچار تغییر می‌شود. معمولاً تغییر ترشوندگی در مورد روش‌های شیمیایی ازدیاد برداشت مرتبط موضوعیت می‌یابد [51-53]. از سوی دیگر، فعل و انفعالات سنگ و سیال ممکن است منجر به آسیب سازند نیز شود که یکی از آسیب‌های مهم، رسوب آسفالتین در حین تزریق سیالات است [54 و 55]. این تغییرات بر بازیافت کلی مخزن تأثیرگذار بوده و بنابراین باید به طور کامل درک شوند [56 و 57]. در واقع، تغییر در ترشوندگی منجر به تغییر متناظر در نفوذپذیری نسبی می‌شود [58]. به طور کلی، شناخت ترکیب کانی‌شناسی سنگ در پیش‌بینی وضعیت اولیه ترشوندگی، بسیار موثر است. ترشوندگی سنگ در طول سیلابزنی شیمیایی می‌تواند به دلیل فعل و انفعالات شیمیایی و فیزیکی بین سیالات تزریق شده و سنگ مخزن تغییر کند [59]. علاوه بر این، تغییرات ترشوندگی در سنگ‌های کربنات، با توجه به ماهیت نفت‌دوستی

¹ Guerrero-Martin

² Fuentes

این نوع سنگ‌ها، از اهمیت بالاتری برخوردار است [60-62]. در این راستا، نانوذرات به دلیل توانایی برهم کنش با سطح سنگ و تغییر ترشوندگی از نفت دوستی به آب دوستی، در تغییر ترشوندگی فعال هستند. اختلاط نانوذرات با سایر افزودنی‌های شیمیایی مانند سورفکتانت منجر به افزایش عملکرد آنها در تغییر ترشوندگی سیستم می‌شود [63]. از نظر مکانیکی، رفتار ترشوندگی یک سیستم سنگ/نفت/شوری توسط فعل و انفعالات سطحی بین فیلم آبی نازک در سطح مشترک سنگ و نفت کنترل می‌شود. در طول فرآیند تزریق آب کم شور، دو لایه الکتریکی به دلیل غلظت یونی کم منبسط می‌شود و منجر به افزایش نیروهای دافعه می‌شود [64-66]. این رویکرد ترشوندگی را به سمت آب‌دوستی بیشتر تغییر می‌دهد. رستمی و همکاران [67] با استفاده از نانوذرات سیلیکا در حضور آب کم شور به بررسی تغییر ترشوندگی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده همزمان از سورفکتانت، نانوذره و آب کم شور، ترشوندگی را به سمت آب‌دوستی تغییر داده و باعث بهبود بازیافت نفت می‌شود.

سیلابزنی آب کم شور به دلیل برهمکنش الکترواستاتیکی بین سطح آب نمک-نفت-سنگ باعث مهاجرت ذرات ریز می‌شود. در واقع، فرآیند مذکور منجر به شکل‌گیری نیروهای جاذبه و دافعه بین یون‌های مختلف شده و همزمان با جدا شدن مولکول‌های نفت چسپیده به کانی‌ها، شاهد آزاد شدن ذرات رس نیز خواهیم بود. مهاجرت این کانی‌ها می‌تواند منجر به انسداد منافذ و آسیب سازند شود. در واقع، نرخ بالای جریان تزریق مواد شیمیایی باعث مهاجرت ذرات ریز شده [68] و با کاهش نفوذپذیری مخزن، بازیافت نفت نیز کاهش می‌یابد. مقالات منتشر شده نشان داده‌اند که موضوع مهاجرت ذرات ریز را می‌توان با بکارگیری نانوذرات کنترل یا پیشگیری کرد [69 و 70].

خلاصه‌ای از نتایج مطالعات انجام‌گرفته در زمینه استفاده از تکنیک هم افزایی نانوذرات/آب کم شور/سورفکتانت و اثرات ترکیبات هم‌افزایی شده مختلف بر کشش بین سطحی، زاویه تماس و میزان بازیافت نفت در قالب جدول 1 و 2 ارائه شده است. اطلاعات مذکور می‌تواند برای کاربردهای میدانی در راستای بهبود تولید موثر واقع شود.

جدول 1- خلاصه‌ای از نتایج مطالعات پیشین در زمینه هم افزایی نانوذرات/آب کم شور/سورفکتانت

منابع	نتایج	ترکیب هم افزایی شده
[71]	شوری بالاتر منجر به جذب سورفکتانت بالاتر می‌شود، زیرا دولایه الکتریکی بین مولکول‌ها فشرده شده و نیروی دافعه الکترواستاتیکی بین سورفکتانت و بستر با بار منفی را کاهش می‌دهد. بنابراین سورفکتانت به راحتی روی سطح سنگ جذب می‌شود.	شوری و سورفکتانت
[72]	سورفکتانت آئروسول-OT جذب شده بر روی سطح سنگ با افزایش شوری افزایش می‌یابد. این روند همچنین برای سطوح معدنی، از جمله کائولینیت، مونتموریلونیت، ایلیت و ماسه کوارتزی اعمال شد.	سورفکتانت آئروسول-OT و شوری
[73]	کاهش غلظت یون کلسیم باعث کاهش جذب سورفکتانت بر روی سطح سیلیکا می‌شود. علاوه بر این، استفاده از 50ppm پلی استایرن سولفونات با 0/05 درصد وزنی الکل آلکوکسی سولفات، جذب سورفکتانت را تا 85 درصد کاهش می‌دهد.	نانوذره سیلیکا و سورفکتانت
[74]	جذب سورفکتانت بر روی سطح سنگ با شوری افزایش می‌یابد و عصاره حنا جذب سورفکتانت را تا 53 درصد کاهش می‌دهد.	شوری و سورفکتانت
[75]	نانوذره سیلیکا و سدیم کربنات، جذب سورفکتانت را به ترتیب به میزان 35/7 و 59/7 درصد بر روی سطوح سنگ دولومیت کاهش می‌دهد. همچنین جذب آلکیل بنزن سولفونیک اسید روی سطح سنگ کربناته می‌تواند تا 75 درصد با حضور 0/1 درصد نانوذرات سیلیکا کاهش یابد.	نانوذره سیلیکا و سورفکتانت

[76]	ترکیبی از سیلابزنی شیمیایی (سورفکتانت با نانوذرات) در یک محیط نسبتاً شور (4 درصد وزنی سدیم کلرید) استفاده شد و مشخص شد که این اصلاح کننده جذب سورفکتانت را در سطح سنگ کاهش داده و نفت بیشتری را نسبت به سیلابزنی سورفکتانت بازیافت نمود.	نانوذره و سورفکتانت
[77]	نانوذرات آبدوست جذب سورفکتانت را در سطح سنگ بیش از نانوذرات آبگریز کاهش داد. نانوذرات های آبدوست حاوی یون های هیدروکسیل بیشتری نسبت به نانوذرات های آبگریز هستند که بر پوشش نانوذرات تاثیر می گذارد.	نانوذره و سورفکتانت
[78]	توانایی نانوذرات برای کاهش مهاجرت ذرات به سه عامل اصلی بستگی دارد: بار الکتریکی حاصل از نانوذرات، ذرات ریز و یون های موجود در محلول یونی. بنابراین، نانوذرات مناسب با شرایط خاص باید انتخاب شوند تا نیروهای دافعه و جاذبه بین نانوذرات و ذرات ریز متعادل شوند.	نانوذرات آلومینا و سیلیکا
[79]	تزریق 500 ppm نانوذرات اکسید منیزیم می تواند مهاجرت ذرات ریز را کاهش داده و نفوذپذیری را از 236/62 mD به 390/62 mD در مغزه های ماسه سنگی افزایش دهد.	نانوذرات اکسید منیزیم و سیلیکا
[80]	ترکیبی از نانوذرات دی اکسید زیرکونیوم با آب کم شور و سورفکتانت می تواند مهاجرت ذرات ریز را از طریق جذب محلول که در امتداد دیواره های منافذ رخ می دهد، کاهش داد. جذب محلول، فشار جداسازی ساختاری را افزایش داده و باعث جدا شدن مولکول های نفت را از دیواره های منافذ افزایش می شود. این موضوع باعث افزایش بازیافت نفت به میزان 8/6 درصد شد.	نانوذره دی اکسید زیرکونیوم، آب کم شور و سورفکتانت
[81]	تزریق نانوسیال قبل از سیلابزنی آب کم شور می تواند مهاجرت ذرات ریز را به حداقل رسانده و بازده جارویی را افزایش می دهد.	نانوذره و شوری

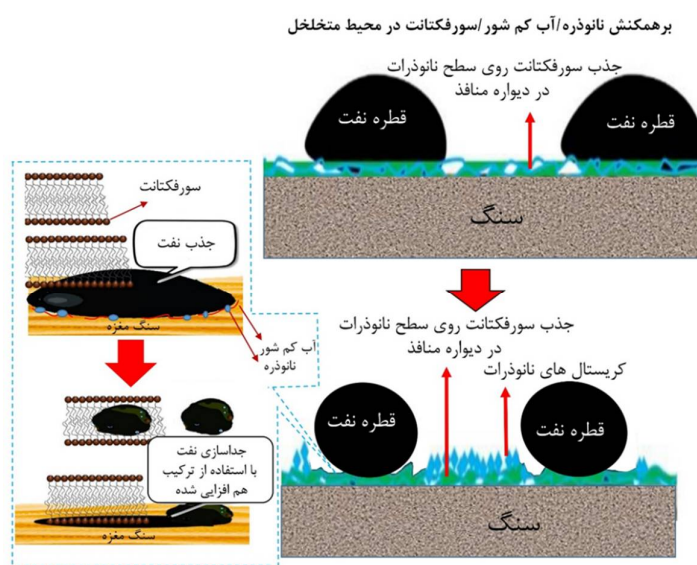
جدول 2- اثرات ترکیبات هم افزایی شده مختلف بر کشش بین سطحی، زاویه تماس و میزان بازیافت نفت

منابع	میزان بازیافت نفت (%)	میزان تغییر در زاویه تماس و کشش بین سطحی		ترکیب هم افزایی شده
		زاویه تماس	کشش سطحی	
[82]	11/28	از 99/19° به 22°	از حالت پایه به 3/69 mN/m	نانوکامپوزیت اکسید آهن /سورفکتانت
[83]	13/1	از 144° به 57°	از 14/5 mN/m به 34/5	سیلیکا/سورفکتانت
[84]	14/1	از حالت پایه به 38/5°	از حالت پایه به 1/73 mN/m	نانوکامپوزیت سیلیکا /بنتونیت /سورفکتانت
[85]	24	از 103° به 48°	از 3/5 mN/m به 36/4	نانوکامپوزیت تیتانیوم دی اکسید/کوارتز/آب کم شور
[86]	14/4	از 134° به 61°	از 9/5 mN/m به 28/3	نقاط کوانتومی گرافن/نانوذرات سیلیکا
[87]	24	از 161° به 31°	از 7 mN/m به 23/34	سیلیکا-کربن کوانتوم دات/آب کم شور
[88]	49	-	از حالت پایه به 1/08 mN/m	نانوذره سیلیکا/سورفکتانت / آب کم شور
[89]	56/01	-	از حالت پایه به 1/03 mN/m	اکسید آلومینیوم گاما / سیلیکا/سورفکتانت

[90]	76/50	از حالت پایه به $40/3^\circ$	از حالت پایه به mN/m 0/089	نانوذره اکسید آهن/سورفکتانت
------	-------	------------------------------	---------------------------------	-----------------------------

3- مکانیسم جابه‌جایی نفت با استفاده از ترکیبات هم‌افزایی شده

در زمان تزریق ترکیبات هم‌افزایی شده به محیط متخلخل، فعل و انفعالات بین نفت/آب نمک و آب نمک/ماده معدنی باعث ایجاد بار منفی در سطح سنگ می‌شود. ضخامت فیلم مایع با تزریق آب کم شور افزایش یافته و نانوذرات تزریق شده به سطح سنگ جذب شده و با کانی سنگ مخزن و اسیدهای نفتنیک دارای بار منفی موجود در نفت خام برهمکنش می‌نمایند (شکل 1). در این راستا، دو لایه الکتریکی سطح تماس توسط یون‌ها و جذب نانوذرات به سطح سنگ تحت تأثیر قرار می‌گیرد. وجود سورفکتانت، برهمکنش‌های یون‌های موجود در فیلم مایع را افزایش داده و این رویکرد، اینترفاز را با نفت خام و سنگ تشکیل می‌دهد. یون‌های سورفکتانت نیز با یون نانوذره و الکترولیت موجود در سطح مشترک برهمکنش خواهد داشت. برهمکنش بین یون‌ها با بار منفی سورفکتانت و نانوذره توسط نیروی دافعه متعادل می‌شود، این رویکرد باعث کاهش مقدار نانوذرات موجود در سطح مشترک لایه آب نمک می‌شود. به طور کلی، سورفکتانت اضافی در سیستم با یون‌های الکترولیت‌ها و مواد معدنی سنگ واکنش داده تا ترشوندگی را تغییر دهد. بنابراین، ترکیب هم‌افزایی شده ترشوندگی را با برهمکنش با یون‌های بیشتری در سطح تماس، همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، به حالت آب‌دوست تغییر می‌دهد. این مکانیسم به نوبه خود بازیافت نفت را افزایش داده و از تجمع و بارش/رسوب آسفالتین جلوگیری می‌کند.



شکل 1- مکانیسم اثر ترکیب هم‌افزایی شده در محیط متخلخل

4- کاربرد میدانی ترکیبات هم‌افزایی شده

فرمول‌بندی ترکیبات هم‌افزایی شده در مقیاس میدان نیازمند بینشی اساسی در مورد بازیافت نفت و تعامل آسفالتین با مواد افزودنی مانند سورفکتانت، نانوذره و آب کم شور می‌باشد. در مقیاس میدانی، روش ترکیبی نانوذرات، سورفکتانت و آب کم شور را می‌توان با توجه به وضعیت واقعی شرایط مخزن انتخاب کرد. این گزینه می‌تواند به طور موثر بر تجمع نانوذرات و سورفکتانت در محیط مخزن غلبه کرده و بازده جاروبی نفت را افزایش دهد. نانوذرات سیلیکا

و اکسید آلومینیوم در مقیاس میدانی نسبت به سایر نانوذرات نرخ بازیافت بالاتری را دارا می‌باشد و سیلیکا به دلیل دارا بودن ویژگی‌های نظیر هزینه کم و خلوص بالا، بیشترین بازده را دارد. به طور کلی، وجود آسفالتین بر روی سنگ مخزن حرکت نفت را مختل کرده و در نتیجه بر بازیافت نفت تأثیر سوء دارد. در زمان تزریق همزمان سورفکتانت، نانوذره و آب کم شور به محیط متخلخل اندازه کلوخه‌های آسفالتین به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، سورفکتانت و آب کم شور توانایی کاهش کشش بین سطحی در سطوح آلوده به آسفالتین را دارند. در این راستا، حضور سورفکتانت در ترکیبات هم‌افزایی شده می‌تواند دلیلی برای تغییر برهم‌کنش آسفالتین باشد.

یکی از مثال‌های بارز مطالعات میدانی در این زمینه مربوط به میدان نفتی کوپیاگوا سور³ در کلمبیا می‌باشد. در این میدان، 220 بشکه نانوسیال حاوی نانوذرات آلومینیوم اکسید تزریق شد. بررسی‌ها نشان داد که پس از 8 ماه، تولید نفت حدود 300 بشکه در روز افزایش یافت. همچنین، تزریق نانوذرات مذکور بازدارندگی قابل توجهی در برابر رسوب آسفالتین نشان داد و از طرفی دیگر باعث شد تا تولید نفت بالاتر از خط پایه باقی بماند [19]. به طور مشابه، کاربردهای میدانی نانوسیال در پنج چاه در میدان نفتی سبک تنای⁴ در کلمبیا نیز انجام شد. پس از یک دوره مشخص (10 تا 12 ماه) از ردیابی عملیات، تولید نفت هر چاه حدود 60 بشکه در روز افزایش یافت و کل تولید نفت حدود 249 هزار بشکه افزایش نشان داد. نتایج نشان داد که نانوذرات با غلظت کمتر از 2 ppm توانایی جلوگیری از رسوب آسفالتین را دارند [92]. در مطالعه‌ای دیگر، کاربرد میدانی ترکیب نانوسیال (نانوذرات/آب کم شور/سورفکتانت) در یک میدان نفتی [93] انجام شد. آنان بررسی‌هایی برای دو الگوی تزریق (7 و 17 روز) انجام دادند. نتایج نشان داد تولید تجمعی نفت برای دو الگو نزدیک به 30035 بشکه می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از ایجاد کشش بین سطحی بسیار پایینی بود.

5- پیامدهای اقتصادی ترکیب هم‌افزایی شده

در شرایط اقتصاد بازارمحور مدرن، کارایی اقتصادی فناوری‌های جدید یک موضوع اساسی در میدانی نفتی است. به طور کلی، اجرای فرآیند ازدیاد برداشت نفت به روش شیمیایی می‌بایست از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. در این راستا، ترکیب نانوذرات-سورفکتانت سبز با آب کم شور می‌تواند هزینه سرمایه گذاری را به حداقل رسانده و منجر به تولید نفت مطلوب با ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی شود. سیلابزنی آب کم شور یک فرآیند سازگار با محیط زیست است و نیازی به سرمایه گذاری بالایی برای امکانات سطحی اضافی ندارد. بنابراین، این روش مقرون به صرفه است حتی اگر نفت اضافی کمتری را در مقایسه با سایر روش‌های ازدیاد برداشت نفت بازیافت کند. همچنین، جذب سطحی بیش از حد سورفکتانت بر روی سطح سنگ می‌تواند باعث زیان مالی قابل توجهی شود. با کاهش جذب سورفکتانت بر روی سطح سنگ و استفاده مجدد از سورفکتانت تولید شده از مخزن، فرآیند ازدیاد برداشت نفت به روش شیمیایی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر خواهد شد. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، کاهش جذب سورفکتانت را می‌توان با سنتز سورفکتانت با سایر مواد شیمیایی، که بجای سورفکتانت به سطح سنگ جذب می‌شوند، عملی نمود. هزینه مواد شیمیایی مورد استفاده به عنوان عوامل قربانی نیز باید در نظر گرفته شود. ضمناً، هزینه اجرای پروژه‌های ازدیاد برداشت شیمیایی نفت کمتر از روش ازدیاد برداشت با استفاده از گاز است.

³ Cupiagua Sur

⁴ Tenay

علاوه بر این، مهاجرت ذرات ریز می‌تواند منجر به آسیب سازند، کاهش نرخ تزریق و زیان اقتصادی شود. بنابراین، مشکلات مربوط به مهاجرت ذرات ریز باید کاهش یابد تا میزان تولید نفت خام بالا بماند. کنترل مهاجرت ذرات می‌تواند طول عمر تاسیسات تصفیه سطحی را افزایش دهد و مصرف انرژی را نیز کاهش دهد، زیرا پمپ‌های فشار زمانی که سیال هم افزایی فشار موبینگ را کاهش می‌دهد، نیاز به انرژی کمتری دارند. بر همین اساس، کاهش مهاجرت ذرات ریز در طول روش ازدیاد برداشت شیمیایی نفت می‌تواند هزینه‌های غیرضروری را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد. شایان ذکر است، هم افزایی مواد شیمیایی نانوذرات، سورفکتانت و آب کم شور نه تنها تولید نفت خام را افزایش می‌دهد، بلکه طول عمر مخازن را نیز بالا می‌برد [94].

مزیت عملی اصلی ترکیب‌های هم افزایی دستیابی به بازیافت بالای نفت در مخازن در غلظت‌های نسبتاً کم است. با توجه به رویکرد موجود، هزینه کلی اجرای ترکیب‌ها در مقیاس میدانی کاهش می‌یابد. بعنوان مثال، هنتورن⁵ و همکاران [95] نشان دادند که تزریق مواد شیمیایی، از جمله آب با شوری کم و سورفکتانت‌ها می‌تواند بازده قابل توجه در حدود 40 دلار در هر بشکه را دارا باشد. در رابطه با تحلیل اقتصادی هزینه‌ها، برای یک مخزن فرضی با طول 500 متر، عرض 250 متر، ضخامت 5 متر و تخلخل 18 درصد، حجم منافذ 112500 متر مکعب ایجاد می‌شود. تجمیع بررسی‌های اقتصادی حاصل از مقالات نشان داد که غلظت بهینه نانوذرات، 500ppm است که نیاز به 56/25 کیلوگرم نانوذره برای جلوگیری از تجمع و مسدود شدن مخزن دارد. با فرض اینکه 2000 ppm از اصلاح‌کننده‌های سطح برای مهندسی نمودن نانوذرات مورد نیاز است، در این راستا، 4 کیلوگرم از یک اصلاح‌کننده سطح (به طور متوسط 3/39 دلار به ازای هر کیلوگرم هزینه دارد) باید با 1 کیلوگرم از یک نانوذره خاص ترکیب شود تا خواص سطح را تقویت نموده و نانوسیال‌های پایدار کلئیدی را فراهم آورد. چنین ترکیبی می‌تواند شرایط ترشوندگی سنگ نفت دوست را به آب دوست تغییر دهد. این اصلاح تقریباً 762/75 دلار ($4 \times 3/39$ دلار/کیلوگرم $\times 56/25$ کیلوگرم) هزینه دارد که در مقایسه با قیمت خود نانوذرات بسیار ارزان تر است. همچنین بررسی آزمایش‌های سیلابزنی مغزه با چنین ترکیبی نشان داد که میانگین بازیافت نفت اضافی حدود 20 درصد است که برای مخزن مذکور، 188694/30 بشکه خواهد بود. با فرض قیمت نفت تقریباً 85 دلار در هر بشکه، درآمد حاصله به میزان قابل توجه در حدود 16039015/50 دلار (188694/30 بشکه $\times 85$ دلار برای هر بشکه) افزایش خواهد یافت. بنابراین، در حالی که هزینه‌های اولیه نانوذرات خاص ممکن است بالا باشد، مزایای اقتصادی بالقوه ناشی از افزایش بازیافت نفت می‌تواند قابل توجه باشد، که اهمیت انتخاب نانوذرات مقرون به صرفه برای کاربردهای ازدیاد برداشت نفت را برجسته می‌نماید.

7- جهت‌گیری تحقیقات آینده، اثرات زیست محیطی و ملاحظات نهایی

با توجه به مطالب یاد شده، بررسی ترکیبات هم‌افزایی شده از جنبه‌های مختلف می‌تواند افق‌های مطالعاتی جدید را برای محققین نمایان سازد. به طور کلی، برای کارهای آینده محققان باید فرمول مورد استفاده در مطالعات آسیب آسفالتین و ازدیاد برداشت نفت را به وضوح تعریف کنند. این ابتکارات به محققان کمک می‌کند تا بفهمند ازدیاد برداشت نفت با استفاده از نانوذرات چگونه در دنیای واقعی کار می‌کند. برخی از موارد تحقیقاتی آتی در حوزه اثر ترکیبات هم‌افزایی شده به شرح زیر می‌باشد:

⁵ Henthorne

1. بیشتر میادین نفتی ایران نیمه دوم عمر خود را سپری کرده و انجام روش‌های ازدیاد برداشت کارا در مورد مخازن این میادین ضروری است. با توجه به مزیت‌های ترکیبات هم‌افزایی شده، بررسی کاربرد میدانی آنها در مورد مخازن کشور (خصوصاً مخازن کربناته) می‌تواند یکی از زمینه‌های اصلی مطالعات آینده باشد.
 2. اندازه‌گیری فاکتورهای نظیر جذب، انحلال و ترشوندگی تحت تأثیر عوامل متعددی مانند زبری و شیمی سطح می‌باشند. برای کاهش این عدم قطعیت‌ها، استفاده از ابزارهای تصویربرداری و مشخصه‌یابی حیاتی است. بنابراین، درک این اندازه‌گیری‌های در مقیاس‌های چندگانه با استفاده از طیف وسیعی از رویکردهای آزمایشگاهی در زمان به کارگیری ترکیب هم‌افزایی شده در مخازن نفتی بسیار مهم است.
 2. یکی از مزیت‌های استفاده از نانوذرات غیرآلی و غیرفلزی (نظیر نانوذره سیلیکا) در ترکیبات هم‌افزایی شده، جذب مولکول‌های آسفالتین توسط آنها و پخش شدن این مولکول‌ها در محیط متخلخل است. نظر به اینکه رسوب آسفالتین از جمله چالش‌های مهم در بسیاری از مخازن کشور است، بررسی کارایی این نوع از نانوذرات در کشور ضروری بنظر می‌رسد.
 3. نانوذرات اکسید فلزی (کلسیم اکسید، اکسید کبالت و اکسید آهن)، به دلیل پایداری و عملکرد آسان سطحی، عملکرد بسیار جذابی را در برابر چالش‌های مرتبط با رسوب آسفالتین نشان می‌دهند. از سوی دیگر، استفاده همزمان از نانوذرات، سورفکتانت‌ها (به دلیل مکانیسم امولسیون پیکرینگ) و آب کم شور، منجر به افزایش بازیافت نفت نیز می‌شود. بررسی عملکرد انواع اکسیدهای فلزی در ترکیب با سورفکتانت‌های مختلف می‌تواند بعنوان تحقیقات جدید، مدنظر محققان قرار گیرد.
 4. عامل دار کردن سطح نانوذرات با استفاده از سورفکتانت‌های پایدار و اقتصادی می‌تواند برای افزایش پایداری آنها و همچنین توسعه نانوسیالات ارزان قیمت و سازگار با محیط زیست و سازگار با محیط مخزن، کلید کاربرد آتی نانوسیالات هم‌افزایی شده برای مهار رسوب آسفالتین و بهبود بازیافت نفت باشد. مثلاً ذرات ژانوس به دلیل ترشوندگی دوگانه، می‌توانند پتانسیل فوق‌العاده‌ای در مخازن نفتی داشته باشند.
 5. به طور کلی، علیرغم اینکه تاکنون مطالعات متعددی در زمینه کاربرد ترکیبات افزایش یافته بازیافت نفت و جلوگیری از رسوب آسفالتین انجام شده است، لیکن با توجه به تنوع زیاد نانوذرات و سورفکتانت‌ها، ساخت ترکیبات سنتزی جدید و کارا می‌تواند افق‌های تحقیقاتی فراوانی را مهیا سازد.
- به طور کلی، به نظر می‌رسد که ساده‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش ازدیاد برداشت نفت، استفاده از ترکیبات هم‌افزایی متشکل از آب کم‌شور، نانوذرات معمولی و سورفکتانت‌های کاتیونی (برای مخازن کربناته) و آنیونی (برای مخازن ماسه سنگی) باشد. البته سورفکتانت‌های آنیونی و غیرآنیونی می‌توانند به عنوان بازدارنده آسفالتین نیز عمل کنند. بررسی‌های میدانی نشان داده است که استفاده از ترکیبات هم‌افزایی شده (سورفکتانت/نانوذره/آب کم شور) در مخازن کربناته شکافدار بسیار موثر می‌باشد. اندازه و مهمتر از آن غلظت فاکتورهای کلیدی هستند که در عمل حیاتی‌تر از نوع نانوذره به نظر می‌رسد. در این راستا، غلظت نانوسیال باید با توجه به نفوذپذیری مغزه بهینه شود. غلظت بیش از حد باعث ایجاد مشکلات تجمع و انسداد می‌شود، بنابراین استخراج نفت را محدود کرده و مشکلات مرتبط با فشار ایجاد می‌کند. از طرف دیگر، با توجه به مقرون به صرفه بودن نانوذره سیلیکا، احتمال برهمکنش کمتر آن با سنگ مخزن، جذب مولکول‌های آسفالتین توسط آن، قابلیت پخش شدن راحتتر آن در محیط متخلخل و سازگاری بیشتر با محیط زیست، استفاده از آن را منطقی جلوه می‌دهد. همچنین، بکارگیری نانوذرات اکسید آلومینیوم به دلیل کارایی آن در محیط‌های خشن و اکسید گرافن بدلیل پراکندگی سریعتر و پایداری عالی در شرایط شور، مفید می‌باشد.

از سوی دیگر، دما می‌تواند بر تعاملات سطحی بین سنگ و سیال تأثیر شایانی داشته باشد. دمای بالا با اینکه موجبات کاهش ویسکوزیته سیال و تولید بهتر را فراهم می‌آورد، اما ممکن است تغییراتی در بار الکتریکی سطح سنگ یا سیال ایجاد نماید و بر همین اساس، ترشوندگی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین دما می‌تواند بر رفتار نانوذرات و تعاملات آن‌ها با سنگ و سیالات تأثیرگذار باشد.

در زمینه تأثیرات زیست‌محیطی نانوذرات، نیاز به انجام تحقیقات بیشتر احساس می‌شود. در این راستا، نانوذرات سبز زیست تخریب پذیر هستند و از منابع پایدار تولید می‌شوند. با توسعه نانوذرات سبز می‌توان اثرات زیست محیطی ازدیاد برداشت نفت را کاهش داد. علاوه بر این، یون‌های فلزات سنگین، حلال‌های آلی و نفت خام را می‌توان با استفاده از نانوذره آلومینیوم اکسید به صورت نانوکامپوزیتی حذف کرد. به طور کلی، رفع چالش‌های زیست‌محیطی می‌تواند تجاری‌سازی فناوری نانو را برای افزایش بازیافت نفت تسریع نمود.

8- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نقش چند منظوره ترکیبات هم‌افزایی شده در دو فرآیند ازدیاد برداشت نفت و مهار رسوب آسفالتین مورد بررسی قرار گرفت، در این راستا، نتایج را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

1. بررسی مطالعات پیشین انجام گرفته در این زمینه نشان داد که ترکیب سه روش ازدیاد برداشت آب کم شور، سورفکتانت و نانوذره موجبات افزایش بازیافت نفت را مهیا می‌نماید. در واقع، تزریق هم‌زمان ترکیبات مذکور ترشوندگی سنگ را به سمت آبدوست تغییر داده و کشش سطحی بین آب و نفت را کاهش می‌دهد. این رویکرد موجب می‌شود تا میزان بازیافت نفت نسبت به استفاده‌ی جداگانه‌ی این روش‌ها به میزان قابل توجهی افزایش یابد.
 2. ترکیبات هم‌افزایی شده ممانعت‌کننده‌هایی موثر در برابر تجمع، بارش/رسوب آسفالتین هستند. در این بین، نقش نانوذرات اساسی بوده و اثر آنها در زمینه کاهش کشش بین سطحی و تغییر وضعیت ترشوندگی بارز می‌باشد.
 3. توانایی نانوذرات برای حفظ خواص خود و وضعیت پراکندگی در سیال بسیار بالا است. با اینحال، پایداری بلندمدت نانوذرات زمانی حاصل خواهد شد که یک نانوذره مناسب براساس وضعیت سنگ و سیال مخزن انتخاب شده و در صورت نیاز، از تکنیک‌های اصلاح سطحی شده برای معرفی گروه‌های عامل دار استفاده نمود.
 4. سیلابزنی آب کم شور به طور موثر از تغییر ترشوندگی به حالت آب دوست برای کمک به بازیافت نفت بیشتر پشتیبانی می‌نماید. ضمناً با توجه به این سیلابزنی آب کم شور تکنیکی کم هزینه می‌باشد، استفاده از آن برای مخازن نفت دوست بالغ مقرون به صرفه است.
 5. هم‌افزایی سورفکتانت با سایر مواد شیمیایی (نانوذره و آب کم شور) مانع از جذب بیش از حد سورفکتانت‌ها بر سطح سنگ شده و بر همین اساس، هزینه‌ها کاهش خواهد یافت.
 6. هم‌افزایی نانوذرات/آب کم شور/سورفکتانت در محیط متخلخل مخزن اثر یکدیگر را تکمیل کرده و به دلیل استفاده در دوزه‌های پایین، دارای توجیه اقتصادی می‌باشد.
- به طور کلی، اطلاعات ارائه شده در این تحقیق می‌تواند به محققین کمک کند تا بهترین ترکیبات هم‌افزایی شده را برای تست‌های ازدیاد برداشت نفت انتخاب کرده و بر همین اساس، علاوه بر افزایش بازیافت نفت، آسیب‌ها را به حداقل رسانند.

8- منابع

[1] Y. Chen, A. Sari, Q. Xie, A. Saeedi, "Excess H^+ increases hydrophilicity during CO_2 assisted enhanced oil recovery in sandstone reservoirs", *Energy Fuels*. Vol. 33, pp. 21–814, 2019.

- [2] E. Jafarbeigi, A. Mohammadidoust, B. Ranjbar, "A review on applications of nanoparticles in the enhanced oil recovery in carbonate reservoirs", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 40(15), 2022.
- [3] M. Mansouri, E. Jafarbeigi, Y. Ahmadi, S.H. Hosseini, "Experimental investigation of the effect of smart water and a novel synthetic nanocomposite on wettability alteration, interfacial tension reduction, and EOR", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 13, pp. 226–2251, 2023.
- [4] E. Jafarbeigi, Y. Ahmadi, M. Mansouri, S. Ayatollahi, "Experimental Core Flooding Investigation of New ZnO- γ -Al₂O₃ Nanocomposites for Enhanced Oil Recovery in Carbonate Reservoirs", *ACS omega*, Vol. 7(43), pp. 39107-39121, 2022.
- [5] E. Jafarbeigi, M. Mansouri, S.H. Talebian, "Effect of UiO-66-NH₂/TiO₂ nano-fluids on the IFT reduction and their use for wettability alteration of carbonate rocks", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 299, p. 127496, 2023.
- [6] E. Jafarbeigi, E. Kamari, F. Salimi, A. Mohammadidoust, "Experimental study of the effects of a novel nanoparticle on enhanced oil recovery in carbonate porous media", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 195, p.107602, 2020.
- [7] M. Mansouri, E. Jafarbeigi, Y. Ahmadi, S.H. Hosseini, "Experimental investigation of the effect of smart water and a novel synthetic nanocomposite on wettability alteration, interfacial tension reduction, and EOR", *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, Vol. 13, pp. 2251–2266, 2023.
- [8] M. Golmohammadi, H. Mahani, S. Ayatollahi, "Toward low-salinity waterflooding predictive capability development in carbonates for fast screening of oil-brine-rock candidates", *Geoenergy Science and Engineering*, Vol. 221, p. 111258, 2023.
- [9] J. Villero-Mandon, N. Askar, P. Pourafshary, M. Riazi, "Importance of Fluid/Fluid Interactions in Enhancing Oil Recovery by Optimizing Low-Salinity Waterflooding in Sandstones", *Energies*, Vol. 17(13), 19961073, 2024.
- [10] M.A. Ahmadi, S.R. Shadizadeh, "Implementation of a high-performance surfactant for enhanced oil recovery from carbonate reservoirs", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 110, pp. 66–73, 2013.
- [11] M.A. Ahmadi, Y. Arabsahebi, S.R. Shadizadeh, S.S. Behbahani, "Preliminary evaluation of mulberry leaf-derived surfactant on interfacial tension in an oil-aqueous system: EOR application", *Fuel*, Vol. 117, pp. 749–755, 2014.
- [12] M.A. Ahmadi, M. Galedarzadeh, S.R. Shadizadeh, "Wettability alteration in carbonate rocks by implementing new derived natural surfactant: Enhanced oil recovery applications", *Transport in Porous Media*, Vol. 106, pp. 645–667, 2014.
- [13] M.A. Ahmadi, S.R. Shadizadeh, "Spotlight on the new natural surfactant flooding in carbonate rock samples in low salinity condition", *Scientific Reports*, Vol. 8, pp. 1–15, 2018.
- [14] M.Z. Hasanvand, M.A. Ahmadi, R.M. Behbahani, "Solving asphaltene precipitation issue in vertical wells via redesigning of production facilities", *Petroleum*, Vol. 1, pp. 139–145, 2015.
- [15] S.M. Hashmi, A. Firoozabadi, "Effect dispersant on asphaltene suspension dynamics: Aggregation and sedimentation", *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 114, pp. 15780–15788, 2010.
- [16] D. Subramanian, A. Firoozabadi, "Effect of Surfactants and water on inhibition of asphaltene precipitation and deposition. In Proceedings of the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference; Society of Petroleum Engineers (SPE), Abu Dhabi, UAE, pp. 9–12, 2015.
- [17] M.A. Ahmadi, Z. Chen, "Challenges and future of chemical assisted heavy oil recovery processes", *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 275, pp. 102081, 2020.

- [18] E.H. Kwon, K.S. Go, N.S. Nho, K.H. Kim, "Effect of alkyl chain length of ionic surfactants on selective removal of asphaltene from oil sand bitumen", *Energy Fuels*, vol. 32, pp. 9304–9313, 2018.
- [19] A.M. Atta, M.M. Abdullah, H.A. Al-Lohedan, A.O. Ezzat, "Demulsification of heavy crude oil using new nonionic cardanol surfactants", *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 252, pp. 311–320, 2018.
- [20] M. Alhreez, D. Wen, "Molecular structure characterization of asphaltene in the presence of inhibitors with nanoemulsions", *RSC Advances*, Vol. 9, pp. 19560–19570, 2019.
- [21] G.T. Li, "Shallow talk about the prevention and control measures of asphaltene precipitation in Iran Yada Oilfield", *Science, Technology and Innovation*, Vol. 6, pp. 3, 2018.
- [22] W.X. Zhang, F.C. Shu, Y.C. Yin, P.Y. Yao, "Evaluation of inhibition effect of asphaltene deposition inhibitor by transmittance method", *Petrochem. Appl*, Vol. 37, pp. 5, 2018.
- [23] Y.C. Gu, L.G. Yuan, G. Cao, C.Y. Yin, "Study on the mechanism and inhibitor of mixed caking of heavy oil and condensate in Tahe Oilfield Pipeline Technology and Equipment", *Pipeline Tech. Equip*, Vol. 1, pp. 8–11, 2020.
- [24] K. Panthi, K.K. Mohanty, "Development of surfactant formulation for high-temperature off-shore carbonate reservoirs", *Frontiers in Chemistry*, Vol. 12, 1408115, 2024.
- [25] M.A. Ahmadi, S.R. Shadizadeh, "Nano-surfactant flooding in carbonate reservoirs: A mechanistic study", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 132, pp. 246, 2017.
- [26] M. Mansouri, Y. Ahmadi, E. Jafarbeigi, "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, Vol. 44(3), 2022.
- [27] E. Jafarbeigi, S. Ayatollahi, Y. Ahmadi, M. Mansouri, F. Dehghani, "Identification of novel applications of chemical compounds to change the wettability of reservoir rock: A critical review", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 371, pp. 121059, 2022
- [28] A. Toupchian, H. Mahani, S. Ayatollahi, "The impact of grain size heterogeneity on the performance of low-salinity waterflooding in carbonate formations", *Fuel*, Vol. 356, pp. 129513, 2022.
- [29] E.W. Al-Shalabi, K. Sepehrnoori, "A comprehensive review of low salinity/engineered water injections and their applications in sandstone and carbonate rocks", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 139, pp. 137–161, 2016.
- [30] R. Mokhtari, A. Hosseini, M. Fatemi, S.I. Andersen, S. Ayatollahi. "Asphaltene destabilization in the presence of an aqueous phase: The effects of salinity, ion type, and contact time", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp.109757, 2022.
- [31] N.K. Jha, S. Iglauer, A. Barifcani, M. Sarmadivaleh, J.S. Sangwai, "Low-Salinity Surfactant Nanofluid Formulations for Wettability Alteration of Sandstone: Role of the SiO₂ Nanoparticle Concentration and Divalent Cation/SO₄²⁻ Ratio", *Energy and Fuels*, Vol. 33, pp. 739–746, 2019.
- [32] N.K. Jha, S. Iglauer, J.S. Sangwai, "Effect of Monovalent and Divalent Salts on the Interfacial Tension of n-Heptane against Aqueous Anionic Surfactant Solutions", *Journal of Chemical & Engineering Data*, Vol. 63, pp. 2341–2350, 2018.
- [33] ی. احمدی، "بررسی پارامترهای سنگ و سیال در انتخاب مناسب‌ترین غلظت نانو کامپوزیت در مخازن ماسه سنگی"، نشریه علمی فرآیند نو، دوره 17، شماره 79، صص. 24-15، سال 1401.
- [34] ف. سلیمی، "پیش بینی نرخ رسوب آسفالتین در سیستم‌های جریان‌ی با استفاده از مدل‌های رسوبگذاری در مبدل‌ها"، نشریه علمی فرآیند نو، دوره 11، شماره 53، صص. 18-30، خرداد 1395.
- [35] A. Balavi, S. Ayatollahi, H. Mahani, "The Simultaneous Effect of Brine Salinity and Dispersed Carbonate Particles on Asphaltene and Emulsion Stability", *Energy Fuels*, Vol. 37(8), pp. 5827–5840, 2023.

- [36] M. Razghandi, S.A. Madani, C. Ghotbi, S. Ayatollahi, B. Dabir, A. Hemmati-Sarapardeh, "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*, Vol. 237, pp. 212819, 2024.
- [37] M. Shafiei, Y. Kazemzadeh, M. Escrochi, F.B. Cortés, C.A. Franco, M. Riazi, "A comprehensive review direct methods to overcome the limitations of gas injection during the EOR process", *Scientific Reports*, Vol.14, pp. 7468, 2024.
- [38] A. Talebi, M. Shafiei, M. Escrochi, Y. Kazemzadeh, M. Riazi, "Investigating the CO₂ injection and the performance of nanoparticles in preventing formation damage at different pressures and concentrations", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2024.
- [39] M.A. Karambeigi, N. Fallah, M. Nikazar, R. Kharrat, "A novel test method for evaluate asphaltene inhibitor efficiency on damage permeability", *Petroleum Science and Technology*, Vol. 37, pp. 2146–2149, 2019.
- [40] J.A. Ali, K. Kolo, A.K. Khaksar-Manshad, A.H. Mohammadi, Recent advances in application of nanotechnology in chemical enhanced oil recovery: effects of nanoparticles on wettability alteration, interfacial tension reduction, and flooding", *Egyptian Journal of Petroleum*, Vol. 27(4), pp. 1371-1383, 2018.
- [41] Z. Liu, P. Hedayati, M.K. Ghatkesar, W. Sun, H. Onay, D. Groenendijk, J.v. Wunnik, E.J. Sudhölter, "Reducing anionic surfactant adsorption using polyacrylate as sacrificial agent investigated by QCM", *Journal of Colloid and Interface Science*, 585, pp. 1-11, 2021
- [42] Z. Liu, G. Zhao, M. Brewer, Q. Lv, E.J. Sudhölter, "Comprehensive review on surfactant adsorption on mineral surfaces in chemical enhanced oil recovery, *Advances in Colloid and Interface Science*", Vol. 294, pp. 102467, 2021.
- [43] F. Yakasai, M.Z. Jaafar, S. Bandyopadhyay, A. Agi, M.A. Sidek, "Application of iron oxide nanoparticles in oil recovery: A critical review of the properties, formulation, recent advances and prospects", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp. 109438, 2022.
- [44] A.S. Adila, E.W. Al-Shalabi, W. Alameri, "Geochemical investigation of hybrid Surfactant and low salinity/engineered water injections in carbonates: a numerical study", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 208, pp. 109367, 2022.
- [45] N. Yekeen, E. Padmanabhan, A.K. Idris, S.M. Ibad, "Surfactant adsorption behaviors onto shale from Malaysian formations: influence of silicon dioxide nanoparticles, surfactant type, temperature, salinity and shale lithology", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 179, pp. 841-854, 2019.
- [46] G.R. Quezada, A. Mejía, E. Piceros, P. Robles, S. Nieto, E. Galvez, R.I. Jeldres, "Describing the adsorption of sodium tripolyphosphate on kaolinite surfaces in a saline medium by molecular dynamics", *Minerals Engineering*, Vol. 175, pp. 107280, 2022.
- [47] A.H. Saeedi-Dehaghani, R. Daneshfar, "How much would silica nanoparticles enhance the performance of low-salinity water flooding?", *Petroleum Science*, Vol. 16(3), pp. 591–605, 2019.
- [48] C.A. Guerrero-Martin, D. Montes-Pinzon, M. Meneses-Motta-da-Silva, E. Montes-Paez, L.E. Guerrero-Martin, R. Salinas-Silva, S. Camacho-Galindo, E. Fernandes-Lucas, A. Szklo, "Asphaltene Precipitation/Deposition Estimation and Inhibition through Nanotechnology: A Comprehensive Review", *Energies*, Vol. 16, pp. 4859, 2023.
- [49] J.F. Fuentes, D. Montes, E.F. Lucas, E.G. Montes-Páez, A. Szklo, C.A Guerrero-Martin, "Nanotechnology Applied to the Inhibition and Remediation of Formation Damage by Fines Migration and Deposition: A Comprehensive Review", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 216, pp. 110767, 2022.

- [50] A. Shadervan, A. Jafari, A. Teimouri, R. Gharibshahi, A.H.S. Dehaghani, "Mechanistic understanding of asphaltene precipitation and oil recovery enhancement using SiO₂ and CaCO₃ nano-inhibitors", *Scientific Reports*, Vol. 14, pp. 15249, 2024.
- [51] F. Dehghani, S. Ayatollahi., E. Jafarbeigi, N. Moradpour, "Experimental study of asphaltene onset condition and deposition using electrical deposition technique in the presence of various additives: A novel strategy", *Fuel*, Vol. 357, Part A, pp. 129514, 2023.
- [52] K.Z. Abdelgawad, M. Mahmoud, S. Elkatatny, A. Abdulaheem, S. Patil, "Reaction kinetics and coreflooding study of high-temperature carbonate reservoir stimulation using GLDA in seawater", *Energies*, Vol. 12(18), pp. 3407, 2019.
- [53] P. Zanganeh, S. Ayatollahi, A. Alamdari, A. Zolghadr, H. Dashti, S. Kord, "Asphaltene deposition during CO₂ injection and pressure depletion: A visual study", *Energy Fuels*, Vol. 26(2), pp. 1412–1419, 2012
- [54] M. Rahbar, H. Pahlavanzadeh, S. Ayatollahi, M. Manteghian, "Predicting the rock wettability changes using solutions with different pH, through streaming potential measurement", *J. Pet. Sci. Eng.* Vol. 167, pp. 20–27, 2018.
- [55] M. Shalbafan, F. Esmailzadeh, A. Safaei, W. Xiaopo, Experimental investigation of wettability alteration and oil recovery enhance in carbonate reservoirs using iron oxide nanoparticles coated with EDTA or SLS", *J. Pet. Sci. Eng.*, Vol. 180, pp. 559–568, 2019.
- [56] P. Zhang, T. Austad, "Wettability and oil recovery from carbonates: Effects of temperature and potential determining ions", *Colloids Surf. A.* Vol. 279 (1–3), pp. 179–187, 2006.
- [57] K. Rodríguez, M. Araujo, "Temperature and pressure effects on zeta potential values of reservoir minerals", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 300 (2), pp. 788–794, 2006
- [58] K. Jarrahan, O. Seiedi, M. Sheykhan, M.V. Sefti, S. Ayatollahi, "Wettability alteration of carbonate rocks by surfactants: a mechanistic study", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 410, pp. 1-10, 2012.
- [59] M. Arif, S.A. Abu-Khamsin, Y. Zhang, S. Iglauer, "Experimental investigation of carbonate wettability as a function of mineralogical and thermo-physical conditions", *Fuel*, Vol. 264, pp. 116846, 2020.
- [60] M. Blunt, L. Kearney, A. Alhosani, Q. Lin, B. Bijeljic, "Wettability characterization from pore-scale images using topology and energy balance with implications for recovery and storage", In: *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2021.
- [61] A.M. Selem, N. Agenet, M.J. Blunt, B. Bijeljic, "Pore-scale imaging of tertiary low salinity waterflooding in a heterogeneous carbonate rock at reservoir conditions. In: *Proceedings-SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2021.
- [62] S. Goodarzi, A. Settari, M.D. Zoback, D.W. Keith, "Optimization of a CO₂ storage project based on thermal, geomechanical and induced fracturing effects", *J Pet Sci Eng*, Vol. 134, pp. 49–59, 2015
- [63] H. Eltoun, YL. Yang, J.R. Hou, "The effect of nanoparticles on reservoir wettability alteration: a critical review", *Pet. Sci*, 18, pp. 136–153, 2021.
- [64] H. Mahani, A.L. Keya, S. Berg, W.B. Bartels, R. Nasralla, W.R. Rossen, "Insights into the Mechanism of Wettability Alteration by Low-Salinity-Flooding (LSF) in Carbonates", *Energy & Fuels*, 29(3), pp. 1352-1367, 2015.
- [65] H. Mahani, A.L. Keya, S. Berg, R. Nasralla, "Electrokinetics of carbonate/brine interface in low-salinity waterflooding: Effect of brine salinity, composition, rock type, and pH on ζ -potential and a surface-complexation model", *SPE Journal*, 22 (1), 2017.

- [66] H. Mahani, R. Menezes, S. Berg, A. Fadili, R. Nasralla, D. Voskov, V. Joekar-Niasar, "Insights into the impact of temperature on the wettability alteration by low salinity in carbonate rocks", *Energy & Fuels*, 31(8), pp. 7839-7853, 2017.
- [67] P. Rostami, M. Sharifi, B. Aminshahidy, J. Fahimpour, "Enhanced oil recovery using silica nanoparticles in the presence of salts for wettability alteration", *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 41(3), pp. 402-413, 2020.
- [68] M. Mansouri, A. Nakhaee, P. Pourafshary, "Effect of SiO₂ nanoparticles on fines stabilization during low salinity water flooding in sandstones", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 174, pp. 637-648, 2019.
- [69] R. Hasannejad, P. Pourafshary, A. Vatani, A. Sameni, Application of silica nanofluid to control initiation of fines migration, *Petroleum Exploration and Development*, Vol. 44(5), pp. 850-859, 2017.
- [70] R. Moghadasi, A. Rostami, A. Hemmati-Sarapardeh, M. Motie, "Application of nanosilica for inhibition of fines migration during low salinity water injection: experimental study, mechanistic understanding, and model development", *Fuel*, Vol. 242, pp. 846-862, 2019.
- [71] C.A. Paternina, A.K. Londono, M. Rondon, R. Mercado, J. Botett, "Influence of salinity and hardness on the static adsorption of an extended surfactant for an oil recovery purpose", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 195, pp. 107592, 2020.
- [72] A.H. Abbas, A. Moslemizadeh, W.R.W. Sulaiman, M.Z. Jaafar, A. Agi, "An insight into a di-chain surfactant adsorption onto sandstone minerals under different salinity-temperature conditions: chemical EOR applications", *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 153, pp. 657-665, 2020.
- [73] J. Liu, Z. Liu, T. Yuan, C. Wang, R. Gao, G. Hu, J. Zhao, "Synthesis and properties of zwitterionic gemini surfactants for enhancing oil recovery", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 311, pp. 113179, 2020.
- [74] M.S.M. Musa, W.R.W. Sulaiman, Z.A. Majid, Z.A. Majid, A.K. Idris, K. Rajaei, "Henna extract as a potential sacrificial agent in reducing surfactant adsorption on kaolinite: the role of salinity", *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, Vol. 32(8), pp. 543-547, 2020.
- [75] A. Rezaei, M. Riazi, M. Escrochi, R. Elhaei, "Integrating surfactant, alkali and nano-fluid flooding for enhanced oil recovery: a mechanistic experimental study of novel chemical combinations", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 308, pp. 113106, 2020.
- [76] R.S. Kumar, K.R. Chaturvedi, S. Iglauer, T. Sharma, "Impact of anionic surfactant on stability, viscoelastic moduli, and oil recovery of silica nanofluid in saline environment", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 195, pp. 107634, 2020.
- [77] J. Foroozesh, S. Kumar, "Nanoparticles behaviors in porous media: application to enhanced oil recovery", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 316, pp. 113876, 2020.
- [78] S.O. Olayiwola, M. Dejam, Synergistic interaction of nanoparticles with low salinity water and surfactant during alternating injection into sandstone reservoirs to improve oil recovery and reduce formation damage", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 317, pp. 114228, 2020.
- [79] O. Massarweh, A.S. Abushaikha, "The use of surfactants in enhanced oil recovery: a review of recent advances", *Energy Reports*, Vol. 6, pp. 3150-3178, 2020.
- [80] N.K. Jha, M. Lebedev, S. Iglauer, M. Ali, H. Roshan, A. Barifcani, M. Sarmadivaleh, "Pore scale investigation of low salinity surfactant nanofluid injection into oil saturated sandstone via X-ray micro-tomography", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 562, pp. 370-380, 2020.

- [81] B. Yuan, R.G. Moghanloo, "Nanofluid pre-treatment, an effective strategy to improve the performance of low-salinity waterflooding", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 165, pp. 978-991, 2018.
- [82] J.A. Ali, "Effect of Fe₃O₄/Mineral–Soil Nanocomposites on Wettability Alteration and Oil Production Under the Spontaneous Imbibition Process", *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 48(7), pp. 9259-9268, 2023.
- [83] H.F. Asl, G. Zargar, A. Khaksar-Manshad, M.A. Takassi, J.A. Ali, A. Keshavarz, "Effect of SiO₂ nanoparticles on the performance of L-Arg and L-Cys surfactants for enhanced oil recovery in carbonate porous media", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 300, pp. 112290, 2020.
- [84] A. Khaksar-Manshad, M. Mobaraki, J.A. Ali, M. Akbari, A.F. Abdulrahman, P.T. Jaf, H. Bahraminejad, S.M. Sajadi, "Performance Evaluation of the Green Surfactant-Treated Nanofluid in Enhanced Oil Recovery: Dill-Hop Extracts and SiO₂/Bentonite Nanocomposites", *Energy & Fuels*, Vol. 38 (3), pp. 1799-1812, 2024.
- [85] G. Zargar, T. Arabpour, A. Khaksar-Manshad, J.A. Ali, S.M. Sajadi, A. Keshavarz, A.H. Mohammadi, "Experimental investigation of the effect of green TiO₂/Quartz nanocomposite on interfacial tension reduction, wettability alteration, and oil recovery improvement", *Fuel*, Vol. 263, pp. 116599, 2020.
- [86] M. Mirzavandi, J.A. Ali, A. Khaksar-Manshad, B. Majeed, B.S. Mahmood, S. Iglauer, A. Keshavarz, "Performance Evaluation of Silica–Graphene Quantum Dots for Enhanced Oil Recovery from Carbonate Reservoirs", *Energy & Fuels*, Vol. 37 (2), pp. 955-964, 2023.
- [87] F. Salimi, E. Jafarbeigi, C. Karami, E. Khodapanah, "Synthesis of cost-effective Si-CQD for effective oil separation from core rock", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 394, pp. 123722, 2024.
- [88] A. Khajeh Kulaki, S.M. Hosseini-Nasab, F. Hormozi, "Low-salinity water flooding by a novel hybrid of nano γ -Al₂O₃/SiO₂ modified with a green surfactant for enhanced oil recovery", *Scientific Reports*, Vol. 14, pp. 14033, 2024.
- [89] I. Ngo, K. Sasaki, L. Ma, R. Nguele, Y. Sugai, "Enhancing surfactant desorption through low salinity water post-flush during Enhanced Oil Recovery", *Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles*, Vol. 76, p. 68, 2021.
- [90] S. Paryoto, Y. Romdoni, I. Kurnia, O. Muraza, M. Khalil, Synergy of surfactant mixtures and Fe₃O₄ nanoparticles for Enhanced oil recovery (EOR), *Inorganic Chemistry Communications*, Vol. 155, pp. 111125, 2023.
- [91] R.D. Zabala-Romero, H.M. Acuna, F. Cortes, J.E. Patino, C. Cespedes-Chavarro, E. Mora, O.F. Botero, L. Guarin, "Application and Evaluation of a NanoFluid Containing NanoParticles for Asphaltene Inhibition in Well CPSXL4", In Proceedings of the OTC Brasil, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 29–31, 2013.
- [92] M.A. Meneses, R. Zabala, E. Rodríguez, F.B. Cortés, "Asphaltene Inhibition by Using New Generation of Nanofluids in Tenay Field (In Russian)", In Proceedings of the SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition, Moscow, Russia, pp. 24–26, 2016.
- [93] CA. Franco, LJ. Giraldo, CH. Candela, KM. Bernal, F. Villamil, D. Montes, SH. Lopera, CA. Franco, FB. Cortés, "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), pp. 1579, 2020.
- [94] L. Henthorne, M. Hartman, A. Hayden, "Improving chemical EOR economics by optimizing water quality". In: SPE Enhanced Oil Recovery Conference. Kuala Lumpur, Malaysia, 2013.
- [95] L. Henthorne, M. Hartman, A. Hayden. Improving chemical EOR economics by optimizing water quality, SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013.