Journalof Farayandno – Vol. 20 – No. 92 (2026): 65-78

Review Article

DOI: 10.22034/farayandno.2026.2064917.2001

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

A Review of the Mechanisms of Novel Nanocomposites in Controlling Asphaltene: From Characterization to Performance

Yaser Ahmadi [1*]

[1] Chemical and Petroleum Engineering Department, Ilam University, P.O. Box 69315/516, Iran, Iran

Received: 6 Sep 2025 **Accepted:** 14 Feb 2026

Abstract

Asphaltene deposition is a major challenge in the petroleum industry, reducing production and increasing costs. Recently, nanoparticles and novel nanocomposites have emerged as an effective strategy for controlling this phenomenon. This review examines the role of nanoparticles in inhibiting asphaltene adsorption, precipitation, and sedimentation, emphasizing common nanomaterial characterization techniques. Analytical methods include XRD, FTIR, SEM, TEM, EDX, and BET surface area analysis. Langmuir and Freundlich adsorption isotherms are also presented to model the interactions. Results show that nanocomposites such as EC-NCs and ZZC exhibit high adsorption capacities (109 and 124 mg/g, respectively) and can reduce asphaltene precipitation by up to 50%. This review provides a fundamental step toward designing efficient adsorbents and optimizing enhanced oil recovery processes.

Keyword: Asphaltene, Nanocomposite, Adsorption, Enhanced Oil Recovery

* Yaser.ahmadi@ilam.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Ahmadi, Y., “A Review of the Mechanisms of Novel Nanocomposites in Controlling Asphaltene: From Characterization to Performance”, Journal of Farayandno – Vol. 20 – No. 92, pp. 65-78, In Persian, (2026).

مقاله مروری

DOI: 10.22034/farayandno.2026.2064917.2001

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

مروری بر سازوکارهای نانوکامپوزیت‌های نوین در مهار آسفالتین: از مشخصه‌یابی تا عملکرد

یاسر احمدی [1]*

[1] دانشیار گروه مهندسی شیمی و نفت، دانشکده مهندسی، دانشگاه ایلام، ایلام، ایران

دریافت: 1404/06/15 پذیرش: 1404/11/25

چکیده

رسوب آسفالتین چالشی عمده در صنعت نفت است که تولید را کاهش و هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. اخیراً استفاده از نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های نوین به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کنترل این پدیده مطرح شده است. این مطالعه مروری نقش نانوذرات را در مهار جذب، رسوب و ته‌نشینی آسفالتین بررسی کرده و بر روش‌های رایج مشخصه‌یابی نانومواد تأکید دارد. روش‌های آنالیز شامل XRD، FTIR، SEM، TEM، EDX و BET است .همچنین ایزوترم‌های جذب لانگمویر و فروندلیچ برای مدل‌سازی برهمکنش‌ها ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد نانوکامپوزیت‌هایی مانند EC-NCs و ZZC ظرفیت جذب بالایی (به ترتیب 109 و 124 میلی‌گرم بر گرم) داشته و می‌توانند رسوب را تا 50% کاهش دهند. این بررسی گامی اساسی برای طراحی جاذب‌های کارآمد و بهینه‌سازی فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت محسوب می‌شود.

کلمات کلیدی: آسفالتین، نانوکامپوزیت، جذب سطحی، ازدیاد برداشت نفت

* Yaser.ahmadi@ilam.ac.ir

استناد به مقاله:

احمدی،ی.، "مروری بر سازوکارهای نانوکامپوزیت‌های نوین در مهار آسفالتین: از مشخصه‌یابی تا عملکرد"، نشریه فرآیندنو، سال نوزدهم، شماره 92، صص.78-56، (زمستان 1404).

1- مقدمه

رسوب آسفالتین در چاه‌های نفت و خطوط انتقال، یکی از پرهزینه‌ترین مشکلات در صنعت بالادستی نفت محسوب می‌شود. آسفالتین‌ها به عنوان سنگین‌ترین و قطبی‌ترین اجزای نفت خام، تحت تأثیر تغییرات دما، فشار یا ترکیب سیال (مانند تزریق حلال‌های سبک) ناپایدار شده و رسوب می‌کنند [1]. این پدیده به کاهش نفوذپذیری سازند، مسدود شدن تجهیزات و افت شدید تولید منجر می‌شود. بر اساس مطالعات، هزینه‌های ناشی از رسوب آسفالتین سالانه به میلیاردها دلار می‌رسد [2،3] . مکانیسم‌های رسوب آسفالتین شامل تجمع کلوئیدی، ناپایداری ترمودینامیکی و جذب سطحی است [15]. در دهه اخیر، نانوذرات به عنوان راهکاری انقلابی در کنترل رسوب آسفالتین مطرح شده‌اند. این مواد به دلیل سطح ویژه بالا، گروه‌های عاملی فعال و سازوکارهای جذب چندمنظوره (مانند برهمکنش‌های قطبی، واندروالسی و پیوند هیدروژنی)، جذب انتخابی آسفالتین را تسهیل می‌کنند [16-18]. مطالعات نشان می‌دهند نانوذرات فلزی مانند CuO،Fe_3O_4، نانوکامپوزیت‌های پلیمری و زئولیت‌ها ظرفیت جذب بالایی دارند [19]. برای نمونه، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی مانند ترکیب‌های اکالیپتوس-اکسید مس-مگنتیت-زانتان و زئولیت-زیرکونیا-مس عملکرد بسیار خوبی در مهار رسوب نشان داده‌اند [3،20]. هدف این مطالعه، ارائه مروری تحلیلی-سیستماتیک بر نقش نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های نوین در کنترل رفتار آسفالتین با تأکید بر سازوکارهای جذب سطحی، رسوب و ته‌نشینی است. در این راستا، روش‌های رایج مشخصه‌یابی نانومواد شامل XRD، FTIR، SEM، TEM، BET و EDX مورد بررسی قرار گرفته و مدل‌سازی ایزوترم‌های جذب (لانگمویر و فروندلیچ) به‌منظور تحلیل تعادل سطحی ارائه شده است.

2- نقش نانو ذرات برای کاهش رسوب آسفالتین

تجزیه نفت خام با استفاده از طیف‌سنجی جرمی کروماتوگرافی گازی[1]چهار ترکیب اصلی را آشکار می‌کند: اشباع‌ها، آروماتیک‌ها، رزین‌ها و آسفالتین‌ها [21]. آسفالتین بزرگترین و متراکم‌ترین جزء قطبی نفت خام با ساختار پیچیده و سطح فعال است که به آن پتانسیل لخته شدن، تجمع و رسوب در مخزن را می‌دهد [22]. مدل تجمع آسفالتین، به نام مدل ین-مولین، یک مدل نظری برای نشان دادن تجمع و لخته شدن آسفالتین است. آسفالتین‌ها در آروماتیک‌ها (مانند زایلن، تولوئن) یا دیزل محلول و در آلکان‌ها (مانند هپتان، پنتان) نامحلول هستند. علاوه بر H و C، هتروواتم‌هایی مانند N، S، O و عناصر آلی-فلزی مانند Ni، Fe، V در ساختار آسفالتین‌ها وجود دارند که در ته‌نشست رسوب آسفالتین مؤثر هستند [23] . تعداد زیادی از محققان روش‌های نوآورانه‌ای را برای تصمیم‌گیری در مورد مسائل ته‌نشست رسوب آسفالتین پیشنهاد کرده‌اند. این روش‌ها شامل روش‌های مکانیکی، سیلاب‌زنی سورفکتانت/حلال [24] و فناوری لیزر [25] است. اما این روش‌ها پرهزینه و زمان‌بر هستند و راندمان پایینی دارند و استفاده زیاد از حلال‌ها باعث اثرات منفی زیست‌محیطی می‌شود که حتی ممکن است نتایج مطلوب را به همراه نداشته باشد. بر اساس نظریه DVLO، قطبیت آسفالتین و بارهای سطحی نانوذرات منجر به برخی تعاملات می‌شود که منجر به پایداری آسفالتین می‌شود. بنابراین، محققان از خواص مشکل‌ساز آسفالتین، مانند قابلیت جذب روی سطوح، بهره می‌برند و از نانوذرات برای جلوگیری از ته‌نشست رسوب آسفالتین استفاده می‌کنند [26]. قابلیت جذب آسفالتین به

[1] GC-MS

گروه‌های کربوکسیل (–C(=O)–OH)، پیریدین (C5H5N)، پیرول (C4H5N) و تیوفن (C4H4S) موجود در آن مربوط می‌شود [22].

ناپایداری ترمودینامیکی بخش آسفالتین باعث می‌شود که در درجه اول به صورت هسته‌های معلق در مخزن نفت وجود داشته باشد. ذرات کلوئیدی آسفالتین توسط رزین تثبیت می‌شوند. با شروع بسته شدن ذرات آسفالتین و تماس آنها با یکدیگر در منافذ رزین، ذرات آسفالتین نیز شروع به تجمع و تجمع می‌کنند. پس از تجمع ذرات آسفالتین و بزرگ شدن آنها تا رسیدن به اندازه‌های قابل مشاهده، پیوندهای واندروالسی که می‌توانند بین این ترکیبات قطبی و نانوذرات کاندید ایجاد شوند، از رسوب آسفالتین‌ها جلوگیری کرده و آنها را در حالت تعلیق نگه می‌دارند [28]. عواملی که بر ناپایداری ترمودینامیکی آسفالتین تأثیر می‌گذارند، ممکن است با فشار و دمای نفت مخزن تغییر کنند [29]. برای مثال، وقتی دمای نفت خام کمتر از دمای ظاهری ذرات آسفالتین باشد، آسفالتین‌ها به راحتی رسوب می‌کنند، می‌چسبند، تجمع می‌کنند و یک محیط متخلخل مخزن فاز جامد تشکیل می‌دهند [30]. در این مثال، دما به عنوان یک تسهیل‌کننده در ته‌نشست رسوب آسفالتین در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در برخی موارد، دما به عنوان یک بازدارنده برای جامدسازی آسفالتین عمل می‌کند [4]. تکنیک‌های شیمیایی ازدیاد برداشت نفت[2]شامل فوم، سورفکتانت، پلیمر، نانوسیال و سیلاب‌زنی قلیایی است [۲۳،۳۱]. محققان با افزودن مواد شیمیایی به محلول، روش‌های مختلفی را برای غلبه بر ته‌نشست رسوب آسفالتین و عوارض جانبی آن معرفی کرده‌اند. امروزه، نانوکامپوزیت‌ها به عنوان یک تکنیک جدید ازدیاد برداشت به طور گسترده برای حل مشکلات تولید در مورد نفت‌های خام سنگین یا نیمه‌سنگین استفاده می‌شوند [32]. نانوذرات کاربردهای مختلفی دارند، مانند ارتقاء نفت از طریق کاهش ویسکوزیته، و افزایش برداشت نفت از طریق کشش سطحی و کاهش زاویه تماس [20،33،34]. این به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات است که آنها را قادر می‌سازد تا به منافذ مخزن نفوذ کرده و خواص سنگ را برای بهبود بازیابی نفت تغییر دهند. در نتیجه، ترکیبات آسفالتین و سایر قطرات نفت به دام افتاده را می‌توان از سطح منافذ سنگ استخراج، و با کاهش نیروی مویینگی پس از تهاجم نانوذرات تولید کرد [35]. نانوذرات موادی کارآمد و مقرون به صرفه برای تحرک نفت، تعلیق آسفالتین و جلوگیری از ته‌نشست رسوب آسفالتین بر اساس ویژگی‌های منحصر به فرد خود از مساحت سطح بالا به حجم انبوه، قابلیت تعلیق بالا، پتانسیل جذب عالی و اندازه کوچک برای جریان آسان از طریق گلوگاه‌های منافذ هستند. علاوه بر این، بر اساس ویژگی کاتالیزوری حرارتی نانوذرات (به ویژه اکسید فلزی)، آنها می‌توانند آسفالتین رسوب شده را حذف کنند [1،36]. جذب رسوب آسفالتین روی سطح نانوذرات توسط گروه‌های عاملی موجود در ساختار آسفالتین ایجاد می‌شود. نیروهای بحرانی دخیل در برهمکنش‌های بین نانوذرات و آسفالتین‌ها، پیوندهای هیدروژنی، برهمکنش‌های وان در والس و برهمکنش‌های اسید-باز هستند [37]. در انتخاب نوع نانوذرات، عوامل عنصری مؤثر هستند. بنابراین، O و N عناصر ضروری برای جذب رسوب آسفالتین توسط نانوذرات هستند، در حالی که N بیشتر، جذب رسوب آسفالتین را افزایش می‌دهد. در مقابل، S تأثیر منفی بر جذب رسوب آسفالتین دارد [38]. در مورد عملکرد نانوذرات، عوامل دیگری نیز وجود دارند که بر جذب رسوب آسفالتین تأثیر می‌گذارند، مانند محتوای آب، نسبت H/C، حلقه‌های آروماتیک، ساختار آسفالتین، محتوای رزین، قطبیت حلال [27].

[2] CEOR

قطبیت آسفالتین و سطح باردار نانوذرات، شرایط مناسبی را برای برهمکنش بین آنها فراهم می‌کند. با جلوگیری از رسوب آسفالتین‌ها و نگه داشتن آنها در حالت تعلیق با افزودن نانوسیال‌ها به نفت خام یا نمونه‌های نفتی شبیه‌سازی شده، بازیابی نفت می‌تواند تا 8 تا 22 درصد افزایش یابد [39] . تأثیر نانومواد بر افزایش گرانش API نیز شایان ذکر است [40]. تاربودا و همکارانش از نانوذرات سیلیکا در دو نفت سنگین (API=11/2) و نفت سبک (API=42) استفاده کردند. بر اساس نتایج، با افزودن نانوذرات سیلیکا در تنش برشی بین 0 تا 100، ویسکوزیته نفت سنگین به 12 تا 45 درصد کاهش یافت. هنگامی که تجمع آسفالتین کاهش می‌یابد، شبکه ویسکوالاستیک نفت خام شروع به سازماندهی مجدد می‌کند و ویسکوزیته نفت خام کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مشاهده شد که در نفت سبک، نانوذرات به دلیل برهمکنش با آسفالتین، ویسکوزیته را افزایش می‌دهند [40]. نانوذرات می‌توانند با شکستن پیوندهای C=O، C-S و C=N در ساختار آسفالتین‌ها و رزین‌ها، ویسکوزیته نفت را کاهش دهند. از آنجایی که واکنش‌های شیمیایی بین آسفالتین‌ها/نانوذرات قوی‌تر از واکنش‌های بین مولکول‌های آسفالتین است، مولکول‌های آسفالتین تمایل بیشتری به اتصال به سطح نانوذرات دارند [40]. فرانکو و همکاران با تمرکز بر اثرات رزین، از نانوذرات سیلیس و هماتیت برای جذب آسفالتین استفاده کردند. بر اساس نتایج آنها، رزین مانند رفتار حلال، به ویژه در غلظت‌های پایین آسفالتین عمل می‌کند [15]. به طور معمول، ظرفیت نانوذرات در جلوگیری از ته‌نشست رسوب آسفالتین و کاهش ویسکوزیته نفت به عملکرد مثبت کنترل ویسکوزیته و بهبود راندمان جاروب نفت تبدیل می‌شود [37].

3- آنالیز رایج در حضور نانوذرات، نانوذرات نوین

3-1 پراش اشعه ایکس(XRD)

روش آنالیز XRD، داده‌های دقیقی در مورد خواص فیزیکی، ساختار کریستالوگرافی و محتوای شیمیایی مواد ارائه می‌دهد [42،43] . کریستال‌ها از آرایه‌های اتمی منظم ساخته شده‌اند و اشعه ایکس تابش الکترومغناطیسی کوتاه‌تری است. اکثر ویژگی‌ها و عملکردهای نانوذرات به ساختار کریستالی آنها بستگی دارد. از این رو، این تکنیک به طور گسترده در تحقیقات نانوذرات استفاده می‌شود [12،44]. احمدی و همکاران در سال 2025 با استفاده از آنالیز پراش پودری اشعه ایکس (XRD)، ساختارهای فازی نانوکامپوزیت‌های ZrO2، g-C3N4 و ZrO2/g-C3N4 را بررسی کرند [45]. صفحات 100 و 002 فاز نیترید کربن-بن‌گرافیتی به ترتیب با دو پیک پراش در صفحه g-C3N4 در 12/9 درجه و 27/7 درجه نشان داده شدند. این صفحات با واحدهای لایه‌ای و تری-s-تریازین تطبیق داده شدند. طبق نتایج، نانوذرات ZrO2 تولید شده هر دو فاز مونوکلینیک (07-0343JCPDS) و تتراگونال (80-2155JCPDS) را نشان دادند. فاز مونوکلینیک به راحتی به ترتیب به صفحات 011، 111، -111، 022، 211، -112، -202 و 013 داده می‌شود. پیک‌های پراش در 2θ مربوط به موارد زیر است: °24/35، °28/4، °31/6، °34/6، °40/95، °45/75، °1/54 و °55/7. فاز تتراگونال توسط پیک‌های 2θ °4/30، °13/35، ، °475/50 و °60/07 تأیید می‌شود که مربوط به صفحات 101، 110، 112 و 211 هستند. با این وجود، ساختار کریستالی غالب نانوذرات ZrO_2 فاز مونوکلینیک است. پیک پراش نانوکامپوزیت $ZrO_2/g\text{-}C_3N_4$ در زاویه تقریبی 28/2 درجه ممکن است نتیجه همپوشانی بین پیک‌های بازتاب ZrO_2 (صفحه -111) و $g\text{-}C_3N_4$ (صفحه 002) باشد. صفحات نانوساختار ZrO_2 که به عنوان صفحات اختصاص داده شده‌اند، اثبات دیگری از سنتز موفقیت‌آمیز نانوکامپوزیت $ZrO_2/g\text{-}C_3N_4$ ارائه می‌دهند.

3-2 طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه [3]

خواص ارتعاشی مولکول‌ها از طریق طیف‌سنجی FTIR اندازه‌گیری می‌شود که مستعد تغییرات ساختاری جزئی هستند. گروه‌های عاملی دارای ویژگی‌های طیف‌سنجی جذب و بازتاب مادون قرمز هستند که با ارتعاشات اساسی آنها مطابقت دارد [46]. جذب، انتشار و بازتاب نور با استفاده از نمونه توسط FTIR پوشش داده می‌شود [3]. با استفاده از تابع تبدیل فوریه، یک طیف منحصر به فرد از طول موج جذب شده در تشخیص ذرات ایجاد می‌شود. نمونه‌های مختلف طیف‌های جذب مادون قرمز متفاوتی دارند. طیف تولید شده را می‌توان در بانک‌های داده طیف بررسی کرد تا ترکیب ذرات را تعیین کرد [47]. خاکسار منشاد و همکارانش [48] از یک نانوکامپوزیت سبز جدید، بیوپلیمر آلوئه‌ورا $KCl-SiO_2$-زانتان، استفاده کردند و تجزیه و تحلیل FTIR برای تشخیص گروه عاملی نانوکامپوزیت‌های سبز در شکل 11 نشان داده شده است. وجود گلیکوزید، یک ساختار پلی‌ساکارید، در نانوکامپوزیت‌های سبز با طول موج‌های بین $1000\ cm^{-1}$ تا $1200\ cm^{-1}$ نشان داده شد. پیک‌هایی که در محدوده $810\ cm^{-1}$ تا $881\ cm^{-1}$ قرار دارند، نشان‌دهنده پیکربندی‌های β- و α- پلی‌ساکارید هستند. پیکی در $1075/06\ cm^{-1}$ مربوط به پیرانوز یا قند است.

3-3 میکروسکوپ الکترونی روبشی[4]

یکی از رایج‌ترین دستگاه‌های مورد استفاده برای مورفولوژی ریزساختار و آنالیز ترکیب شیمیایی، SEM است [49]. SEM از پرتوهای الکترونی متمرکز برای اسکن ماده در مسیرهای موازی و برهمکنش با اتم‌ها برای ایجاد توپوگرافی سطح سه‌بعدی استفاده می‌کند [50]. سیگنال انتشار الکترون ثانویه، سیگنال اصلی پس از برخورد پرتو الکترونی اولیه به ذره است. هنگامی که پرتو اولیه به نمونه برخورد می‌کند، اتم‌ها را یونیزه می‌کند و الکترون‌های پیوندی ضعیفی به نام الکترون‌های ثانویه منتشر می‌کند. این الکترون‌های ثانویه، موقعیت‌یابی پرتو و وضوح داده‌های توپوگرافی را بهبود می‌بخشند [51]. علی و همکارانش [52] از این تکنیک‌ها برای تعیین اندازه و مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های نانوکامپوزیت ZnO/SiO_2 با پوشش پلیمری استفاده کردند، همانطور که در شکل 13 نشان داده شده است.

3-4 میکروسکوپ الکترونی عبوری[5]

TEM برای تصویربرداری از ساختارهای داخلی مواد، به ویژه برای نانوذرات، استفاده می‌شود. تکنیک پرتو الکترونی تمام انرژی مبتنی بر میکروسکوپ. الکترون‌ها از یک نمونه سطحی عبور کرده، توسط لنزها متمرکز شده و توسط یک آشکارساز جمع‌آوری می‌شوند. سپس تصویر بر روی یک دستگاه عکاسی مانند فیلم عکاسی، صفحه فلورسنت و غیره که کل نمونه را منتقل می‌کند، بزرگنمایی می‌شود. الکترون‌های ساطع شده با نمونه تعامل می‌کنند تا یک تصویر ایجاد کنند [53]. TEM داده‌های نانوساختاری و عنصری را از نمونه‌های مورد مطالعه با وضوح بالاتر از میکروسکوپ نوری ارائه می‌دهد. TEM می‌تواند ساختار بلوری ذرات در مقیاس هسته‌ای را تصویربرداری کند. TEM با وضوح بالا می‌تواند جنبه‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی مواد را تجزیه و تحلیل کند [54]. علی و همکاران از این تکنیک‌ها

[3] FTIR
[4] SEM
[5] TEM

برای تعیین اندازه، شکل و توزیع نانوکامپوزیت‌های ZnO/SiO_2 با پوشش پلیمری سبز مطابق شکل 16 استفاده کردند [54].

3-5 اشعه ایکس با پراکندگی انرژی[6]

هر ماده‌ای را می‌توان از نظر شیمیایی توصیف کرد و عناصر آن را با استفاده از طیف‌سنجی اشعه ایکس با پراکندگی انرژی (EDX/EDS) شناسایی یا تعیین مقدار کرد [55]. EDS با ارزیابی کیفی یا کمی عناصر شیمیایی در مکان‌های مختلف، نقشه ماده را ترسیم می‌کند [55]. این فرآیند از برخورد الکترون‌های قدرتمند با نمونه‌ها برای آزاد کردن اشعه ایکس با طول موج‌های دقیق که ساختارهای اتمی عنصری را شناسایی می‌کنند، استفاده می‌کند.

3-6 آزمایش براوناور-امت-تلر[7]

آزمایش BET مساحت سطح ویژه ذرات (مساحت سطح توده‌ای در هر جرم) را با استفاده از ارزیابی‌های ایزوترم جذب گاز نیتروژن (N_2) در دمای 77 کلوین و فشار تعادل اندازه‌گیری می‌کند[45] . اکثر آزمایش‌های BET از نیتروژن، یک گاز بی‌اثر که با مواد واکنش نمی‌دهد، استفاده می‌کنند. مدل BET به جذب چندلایه گاز روی جاذب اشاره دارد. اکثر آنالیزهای BET مساحت سطح نانوذرات را با اندازه‌گیری حجم گاز نیتروژن جذب‌شده روی نانوذرات ارزیابی می‌کنند. فرض کنید گاز N_2 (جذب‌شونده) می‌تواند به تمام سطوح نانوذرات دسترسی پیدا کند. جذب گاز به صورت چندلایه رخ می‌دهد [56].

4- خلاصه عملکرد و پارامترهای جذب نانوکامپوزیت‌های مختلف در کنترل آسفالتین

جدول 1 خلاصه نتایج انواع نانوکامپوزیت‌های نوین به منظور کاهش مشکلات رسوب آسفالتین و کاهش ته‌نشست رسوب آسفالتین را در محیط متخلخل نشان می‌دهد. جدول 1 خلاصه‌ای از عملکرد انواع نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های منتخب در جذب و مهار رسوب آسفالتین ارائه شده است. این جدول بر اساس مطالعات تجربی معتبر، کارایی نانومواد مختلف را از طریق پارامترهای کلیدی همچون ظرفیت جذب بیشینه (Q_m)، ثابت فروندلیچ (K_F)، و بهبودهای مشاهده‌شده در بازیابی نفت و نفوذپذیری، مقایسه می‌کند. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی و مهندسی‌شده عملکرد به‌مراتب برتری نسبت به نانوذرات ساده یا پایه از خود نشان می‌دهند. برای نمونه، نانوکامپوزیت زیرکونیا-زینک‌اکسید-اکسید مس با ظرفیت جذب 188/92 میلی‌گرم بر گرم، کارایی بالاتری نسبت به نانوذره زیرکونیا به تنهایی (132 میلی‌گرم بر گرم) دارد. به‌طور مشابه، نانوکامپوزیت زئولیت-زیرکونیا-اکسید سریم (ZZC) با نسبت‌های Q_m و K_F بسیار بالاتر در مقایسه با زئولیت معمولی، برتری خود را در جذب انتخابی آسفالتین اثبات می‌کند. این بهبودها عمدتاً ناشی از افزایش سطح ویژه، ایجاد گروه‌های عاملی فعال و برهمکنش‌های سینرژیستی بین اجزای تشکیل‌دهنده نانوکامپوزیت‌ها است. نتایج کمی مندرج در جدول، گواهی بر تأثیر مثبت این نانومواد بر پارامترهای عملیاتی مخزن نیز هست. به عنوان مثال، استفاده از نانوکامپوزیت کاردانول/سیلیکا منجر به بیش از 50% بهبود در بازیابی نفت شده است. این یافته‌ها در کنار بهبود نفوذپذیری گزارش‌شده برای سایر نانوکامپوزیت‌ها، پتانسیل بالای این مواد را نه تنها در جلوگیری از آسیب رسوب، بلکه در ارتقای فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت (EOR) نشان

[6] EDX
[7] BET

می‌دهد. داده‌های این جدول مبنای مناسبی برای انتخاب و طراحی نانوجاذب‌های کارآمد با توجه به شرایط خاص هر مخزن فراهم می‌آورد.

جدول 1- خلاصه آزمایش‌های اخیر روی جذب آسفالتین توسط نانوکامپوزیت‌های کارآمد مختلف

منبع	محاسبات	نتایج	نوع نانوذره
[4]	تقریباً 188/92 میلی‌گرم بر گرم و 132 میلی‌گرم بر گرم جذب آسفالتین به ترتیب روی سطوح زیرکونیا و این نانوکامپوزیت مشاهده شد.	در مقایسه با نانوذرات زیرکونیا، این نانوکامپوزیت پتانسیل جذب آسفالتین بیشتری داشتند و از ته‌نشست رسوب آسفالتین جلوگیری می‌کردند. نفوذپذیری و تخلخل در حضور این نانوکامپوزیت بهبود یافته است.	زیرکونیا-زینک اکساید-اکسید مس
[5]	نسبت Q_m ZZC/Q_m Na-ZSM-5 برابر با 3/84 و KF ZZC/K_F Na-ZSM-5 برابر با 4/1576 بود.	در غلظت 30 ppm، نانوکامپوزیت ZZC آسفالتین بیشتری نسبت به زئولیت Na-ZSM-5 جذب کردند.	زئولیت-زیرکونیا-اکسید سریم (ZZC) زئولیت (Na-ZSM-5)
[6]	بازیابی نفت پس از استفاده از این نانو کامپوزیت ها بیش از 50 درصد بهبود یافت.	با افزایش مقدار کاردانول روی سطح نانوذرات سیلیکا، برهمکنش‌های بین آسفالتین‌ها و نانوکامپوزیت‌ها افزایش یافت.	کاردانول/سیلیکا
[11]	Q_m=25.17, 24.72, 23.91, 23.36 mg/g	نانوکامپوزیت عملکرد خوبی در جلوگیری از رسوب آسفالتین نشان دادند.	نیکل اکساید-زئولیت
[12]	جذب آسفالتین بیشتر روی نانولوله‌های کربنی در فشارهای 1350، 1500 و psi 1650 با غلظت 30 ppm نانولوله‌های کربنی رخ داد.	نانوذرات اکسید نیکل-زئولیت در مقایسه با سیال پایه مخزن، مقدار بیشتری آسفالتین را روی سطوح خود جذب کردند.	نیکل اکساید-زئولیت
[13،14]	نانوکامپوزیت‌های گاما آلومینا-نیکل اکساید بازدارنده آسفالتین با راندمان 28 تا 48 درصد در غلظت 20 درصد وزنی بودند.	نانوکامپوزیت‌ها عملکرد خوبی در به تعویق انداختن نقطه شروع رسوب آسفالتین و همچنین در مهار آسفالتین‌ها داشتند.	گاما آلومینا-نیکل اکساید

5- مدلسازی و بررسی ایزوترم‌های جذب رسوب آسفالتین در حضور نانو کامپوزیت‌ها

برای مدل‌سازی جذب، ایزوترم‌های جذب رسوب آسفالتین روی نانوذرات با مدل‌های لانگمویر و فروندلیچ همبستگی داده شدند. ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ به ترتیب با معادلات 1 و 2 بیان می‌شوند. داده‌های خطی لانگمویر و فروندلیچ مطابق شکل 3 رسم شده‌اند. سپس، دو نمودار را روی هم قرار داده و آنها را با هم مقایسه می‌کنیم. به عنوان مثال، پس از مقایسه نتایج شکل 2، مشخص است که مدل لانگمویر بهترین تطابق را با داده‌های تحلیل شده دارد [63].

$$Q_e = Q_m \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (1)$$

$$Q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

که در آن Q_e مقدار آسفالتین جذب شده روی جاذب (NPs) (میلی‌گرم بر متر مربع)، C_e غلظت تعادلی آسفالتین در محلول (میلی‌گرم بر لیتر)، K_L ثابت جذب تعادلی لانگمویر است که به میل ترکیبی جایگاه‌های اتصال (L/mg) نسبت داده می‌شود و برای ارزیابی کیفیت جذب استفاده می‌شود، و Q_m حداکثر ظرفیت جذب آسفالتین به ازای هر جرم نانوذرات برای پوشش کامل تک لایه (میلی‌گرم بر متر مربع) است و برای ارزیابی کمیت (ظرفیت) جذب استفاده می‌شود. K_F و 1/n هر دو ثابت‌های فروندلیچ هستند. K_F شاخص ظرفیت جذب است و 1/n مربوط به شدت جذب (بدون واحد) است. واضح است که K_F بالاتر ظرفیت جذب بیشتر و 1/n کمتر قدرت جذب بیشتر را نشان می‌دهد. فرضیات اصلی در مدل لانگمویر عبارتند از: جاذب دارای سطح یکنواخت است، انرژی‌های یکنواختی روی مکان‌های جذب وجود دارد، جذب روی سطوح همگن رخ می‌دهد و جذب تک لایه روی سطح جاذب رخ می‌دهد. در همین حال، در ایزوترم فروندلیچ، انرژی‌های متفاوتی روی مکان‌های جذب وجود دارد، جذب چند لایه وجود دارد و جذب روی سطوح ناهمگن رخ می‌دهد [1]. احمدی و همکاران، مطابق نتایج، جذب آسفالتین روی سطوح (EC-NCs) eucalyptus/CuO/Fe_3O_4/xanthan را در غلظت‌های اولیه مختلف آسفالتین، از ppm 10 تا 600 ، بررسی کردند. تمام آزمایش‌های این مطالعه در سه تکرار انجام شد [1].

مقدار آسفالتین جذب شده روی نانوذرات مغناطیسی کربنی (EC-NCs) با افزایش غلظت آسفالتین در محلول به ppm 25 افزایش قابل توجهی نشان داد. متعاقباً، با افزایش غلظت آسفالتین در محلول، مقدار آسفالتین جذب شده روی نانوذرات به حالت پایدار رسید. شکل 4 نشان می‌دهد که مدل لانگمویر در 48 ساعت، داده‌های جذب را بهتر از مدل فروندلیچ برازش می‌دهد و در 96 ساعت رفتار معکوس مشاهده شد. به عبارت دیگر، در 96 ساعت، ایزوترم فروندلیچ در مقایسه با لانگمویر، برازش بهتری با داده‌ها داشت. در حالی که مدل لانگمویر یک سطح همگن با پوشش کامل تک لایه را فرض می‌کرد، مدل فروندلیچ وجود یک سطح ناهمگن با چندین مکان انرژی جذب را حدس زد. نتایج تحقیقات ما نشان داد که 96 ساعت در مقایسه با 48 ساعت ظرفیت جذب بالاتری دارد. نوع جاذب تأثیر قابل توجهی بر مدل‌های ایزوترم داشت. طبق یافته‌ها، 96 ساعت بالاترین ظرفیت جذب آسفالتین‌ها را در مقایسه با 48 ساعت نشان داد، زیرا بیشترین مقدار آسفالتین جذب شده به ازای واحد وزن نانوذرات (Q_m) را داشت. مقادیر Q_m برای 48 ساعت 32/4675 میلی‌گرم بر گرم و برای 96 ساعت 109/8901 میلی‌گرم بر گرم بود. علاوه بر این، مقادیر ثابت فروندلیچ (K_F) نشان می‌دهد که قابلیت‌های جذب 48 ساعت و 96 ساعت به ترتیب 7/6049 و 29/8907 ([mg/g][L/mg]) است. 96 ساعت مقدار ثابت جذب تعادلی لانگمویر (K_L) پایین‌تری را نشان داد، اگرچه مقدار Q_m بالاتری داشت. این الگو برهمکنش‌های واضح و مشخصی را بین آسفالتین‌ها و نانوذرات نشان می‌دهد. کار دوداسووا و همکاران نیز یافته‌های مشابهی را گزارش کرد [62]. آزمایش‌های قابلیت استفاده مجدد جاذب EC-NCs در جذب آسفالتین در طول مطالعات چهار چرخه‌ای انجام شد. پس از تمیز کردن با تولوئن مقطر، جاذب به مدت پنج ساعت در دمای 60 درجه سانتی‌گراد خشک شد. پس از هر آزمایش جذب، در یک تحقیق جدید استفاده شد. چهار چرخه متوالی EC-NCs در 48 و 96 ساعت، ظرفیت جذب آسفالتین (q) به ترتیب (31/62، 31/02، 30/21 و 29/67 میلی‌گرم بر گرم)، (104/10، 103/56، 102/75 و 102/10 میلی‌گرم بر گرم) داشتند. همچنین احمدی و همکارانش از نانوکامپوزیت‌های جدید زئولیت-زیرکونیا-مس (ZZC) برای کاهش رسوب آسفالتین استفاده کردند [5]. احمدی و همکاران در سال 2023، آزمایش‌های دسته‌ای تا ppm 1000 جذب آسفالتین روی نانوذرات زئولیت ZZC و -Na

ZSM-5 را نشان می‌دهد. دو شیب روی نمودار قابل مشاهده است. در مرحله بعد، آسفالتین به ترتیب با غلظت تقریبی 124 و 33 میلی‌گرم بر گرم بر روی زئولیت‌های ZZC و Na-ZSM-5 جذب شد. نتایج مدل ایزوترم مطالعه نشان داد که داده‌های جذب با ایزوترم لانگمویر بیشتر از ایزوترم فروندلیچ مطابقت دارند، که نشان می‌دهد سطح جذب همگن و تک‌لایه بوده است. در این مطالعه، میزان رسوب آسفالتین در غیاب و حضور نانوکامپوزیت‌های زئولیت-زیرکونیا-مس (ZZC) اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، ZZC می‌تواند یک نانوکامپوزیت مفید برای کاهش رسوب آسفالتین باشد. بر اساس نتایج، نسبت شیب دوم به اول از 19/697 در شرایط پایه به 20/8995 و 38/806 به ترتیب با استفاده از Na-ZSM-5 و ZZC افزایش یافت. بنابراین جذب آسفالتین بیشتری در حضور ZZC در مقایسه با Na-ZSM-5 رخ داد.

6- نتیجه‌گیری

این مقاله مروری، نقش نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های نوین را در کنترل رفتار آسفالتین-شامل جذب، رسوب و ته‌نشینی مورد بررسی قرار داده است. با توجه به هزینه‌های بالای ناشی از رسوب آسفالتین در صنعت نفت، استفاده از نانومواد به‌عنوان راهکاری کارآمد و اقتصادی در پیشگیری و کاهش این پدیده مطرح می‌باشد. در این راستا، روش‌های مختلف مشخصه‌یابی و آنالیز نانوذرات به‌همراه مدل‌سازی ایزوترم‌های جذب، ابزارهای اساسی برای درک سازوکارهای سطحی و بهینه‌سازی عملکرد نانوجاذب‌ها هستند. یافته های کلیدی این تحقیق عبارتند از:

- نانوکامپوزیت‌های سبز و کارآمد: نانوکامپوزیت‌های هیبریدی مانند EC-NCs (پایه‌پلیمری حاوی اکسید مس و آهن) و ZZC (زئولیت-زیرکونیا-مس) به دلیل ساختار و گروه‌های عاملی ویژه، بالاترین ظرفیت جذب آسفالتین را نشان می‌دهند.
- ظرفیت جذب برتر: مقادیر جذب برای نانوکامپوزیت‌های EC-NCs و ZZC به ترتیب به 109 mg/g و 124 mg/g می‌رسد که عملکردی به‌مراتب بهتر از نانوجاذب‌های متعارف (مانند Na-ZSM-5 با 33 mg/g) دارد.
- کاهش چشمگیر رسوب: استفاده از این نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند رسوب آسفالتین را تا 50% کاهش دهد و از افت شدید نفوذپذیری مخزن جلوگیری کند.
- مدل‌سازی رفتار جذب: ایزوترم لانگمویر در زمان‌های تماس کوتاه (48 ساعت) و ایزوترم فروندلیچ در زمان‌های طولانی‌تر (96 ساعت) برازش بهتری با داده‌های تجربی نشان می‌دهند که نشان از تغییر مکانیسم جذب از تک‌لایه بر روی سطوح همگن به چندلایه بر روی سطوح ناهمگن با گذشت زمان است.
- تأیید با روش‌های پیشرفته آنالیز: داده‌های حاصل از روش‌هایIFT ، BET، TGA، XRD، SEM/TEM و FTIR به‌طور هماهنگ تشکیل فیلم آسفالتینی، افزایش سطح ویژه و برهمکنش‌های شیمیایی بین نانوذرات و آسفالتین را تأیید می‌کنند.
- پایداری و قابلیت استفاده مجدد: نانوکامپوزیت‌های مورد مطالعه پس از چهار چرخه استفاده، کمتر از 6% کاهش ظرفیت جذب نشان دادند که گواهی بر پایداری و توجیه‌پذیری اقتصادی آنهاست.
- تأثیر مثبت بر ازدیاد برداشت نفت (EOR): این نانومواد علاوه بر مهار رسوب، با کاهش کشش سطحی و بهبود راندمان جاروب، بازیافت نفت را نیز افزایش می‌دهند.

به‌طور خلاصه، فناوری نانو با ارائه نانوکامپوزیت‌های طراحی‌شده، راه‌حلی امیدوارکننده برای غلبه بر چالش دیرینه رسوب آسفالتین ارائه می‌دهد. موفقیت این راهکار، وابسته به درک عمیق روابط ساختار-عملکرد از طریق مشخصه‌یابی دقیق و مدل‌سازی صحیح فرآیند جذب است. تمرکز آتی تحقیقات می‌تواند بر بهینه‌سازی سنتز، افزایش مقیاس تولید و انجام آزمایش‌های میدانی گسترده برای تسریع در تجاری‌سازی این فناوری قرار گیرد.

6- منابع

[1] Y. Ahmadi, M. Fatahi, Synthesis of novel green nanocomposites by considering enhanced oil recovery and asphaltene adsorption effectiveness in calcite and dolomite formations, Fuel 381, pp. 133410, 2025.
[2] E. Jafarbeigi, F. Salimi, E. Kamari, M. Mansouri, Effects of modified graphene oxide (GO) nanofluid on wettability and IFT changes: Experimental study for EOR applications, Pet. Sci. 19, 2022.
[3] 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, J. Mol. Liq. 371, 2023.
[4] C.A. Franco, M.M. Lozano, S. Acevedo, N.N. Nassar, F.B. Cortés, Effects of Resin i on Asphaltene Adsorption onto Nanoparticles: A Novel Method for Obtaining Asphaltenes/Resin Isotherms, Energy and Fuels 30, 2016.
[5] N.S. Rayeni, M. Imanivarnosfaderani, A. Rezaei, S. Rezaei Gomari, An experimental study of the combination of smart water and silica nanoparticles to improve the recovery of asphaltenic oil from carbonate reservoirs, J. Pet. Sci. Eng. 208, 2022.
[6] B.J. Abu Tarboush, M.M. Husein, Oxidation of asphaltenes adsorbed onto NiO nanoparticles, Appl. Catal. A Gen., pp. 445–446, 2012.
[7] H.W. Yarranton, H. Hussein, J.H. Masliyah, Water-in-hydrocarbon emulsions stabilized by asphaltenes at low concentrations, J. Colloid Interface Sci. 228, 2000.
[8] K.A. Quainoo, B. Baojun, W. Mingzhen, Review on asphaltene precipitation and deposition kinetics and CO2 interactions, Adv. Colloid Interface Sci. 341, pp. 103488, 2025.
[9] M. Mansouri, Y. Ahmadi, M.A. Sedghamiz, B. Vaferi, Experimental investigation of the influence of ZnO–CuO nanocomposites on interfacial tension, contact angle, and oil recovery by spontaneous imbibition in carbonate rocks, Physics of Fluids 36, 2024.
[10] M. Hemmati, Y. Ahmadi, Combining zinc oxide nanoparticles with green and novel nanocomposites for enhanced oil recovery in porous media by considering asphaltene deposition and production parameters, J. Pet. Explor. Prod. Technol. 15, pp. 15, 2025.
[11] Y. Ahmadi, M. Mansouri, An experimental investigation of using Ni-doped ZnO–ZrO2 nanoparticles as a new asphaltene deposition inhibitor in ultra low carbonate porous media, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 44, 2022.
[12] Y. Ahmadi, M. Malekpour, T. Kikhavani, B. Bayati, The study of the spontaneous oil imbibition in the presence of new polymer-coated nanocomposites compatible with reservoir conditions, Pet. Sci. Technol. 42, 2024.
[13] M. Karimi, M. Hillestad, H.F. Svendsen, Natural Gas Combined Cycle Power Plant Integrated to Capture Plant, Energy & Fuels 26, pp. 1805–1813, 2012.
[14] A.Y. Zekri, S.A. Shedid, H. Alkashef, A Novel Technique for Treating Asphaltene Deposition Using Laser Technology, in: SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, SPE, 2001.
[15] Y. Ahmadi, A. Akbari, M. Mansouri, A.H. Alibak, B. Vaferi, Innovative xanthan gum-based nanocomposites for asphaltene precipitation prevention in shale and carbonate rocks, Int. J. Biol. Macromol. 280, pp. 136331, 2024.

[16] N.N. Nassar, A. Hassan, P. Pereira-Almao, Thermogravimetric studies on catalytic effect of metal oxide nanoparticles on asphaltene pyrolysis under inert conditions, J. Therm. Anal. Calorim. 110, pp. 1327–1332, 2012.
[17] J. Escobedo, G.A. Mansoori, Heavy-organic particle deposition from petroleum fluid flow in oil wells and pipelines, Pet. Sci. 7, 2010.
[18] P. Bahrami, R. Kharrat, S. Mahdavi, Y. Ahmadi, L. James, Asphaltene laboratory assessment of a heavy onshore reservoir during pressure, temperature and composition variations to predict asphaltene onset pressure, Korean Journal of Chemical Engineering 32, 2015.
[19] Y. Ahmadi, M. Mansouri, An experimental investigation of using Ni-doped ZnO–ZrO 2 nanoparticles as a new asphaltene deposition inhibitor in ultra low carbonate porous media, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 44, pp. 9429–9447, 2022.
[20] 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 44, 2022.
[21] Y. Ahmadi, F. Javadi, T. Kikhavandi, Effect of different salinity on low permeability carbonate reservoir recovery using a new green polymeric nanocomposites, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects 45, 2023.
[22] E. Aliabadian, S. Sadeghi, A. Rezvani Moghaddam, B. Maini, Z. Chen, U. Sundararaj, Application of graphene oxide nanosheets and HPAM aqueous dispersion for improving heavy oil recovery: Effect of localized functionalization, Fuel 265, 2020.
[23] Y. Ahmadi, M. Mansouri, Using New Synthesis Zirconia-Based Nanocomposites for Improving Water Alternative Associated Gas Tests Considering Interfacial Tension and Contact Angle Measurements, Energy and Fuels 35, 2021.
[24] A. Ahmadi, A.K. Manshad, M. Akbari, J.A. Ali, P.T. Jaf, A.F. Abdulrahman, Nano-stabilized foam for enhanced oil recovery using green nanocomposites and anionic surfactants: An experimental study, Energy 290, 2024.
[25] G.S. Negi, S. Anirbid, P. Sivakumar, Applications of silica and titanium dioxide nanoparticles in enhanced oil recovery: Promises and challenges, Petroleum Research 6, 2021.
[26] S. Babamahmoudi, S. Riahi, Application of nano particle for enhancement of foam stability in the presence of crude oil: Experimental investigation, J. Mol. Liq. 264, 2018.
[27] S. Tazikeh, J. Sayyad Amin, S. Zendehboudi, A. Shafiei, Effects of asphaltene structure and polythiophene-coated magnetite nanoparticles on surface topography and wettability alteration of silica surface, J. Mol. Liq. 349, 2022.
[28] N.N. Nassar, A. Hassan, L. Carbognani, F. Lopez-Linares, P. Pereira-Almao, Iron oxide nanoparticles for rapid adsorption and enhanced catalytic oxidation of thermally cracked asphaltenes, Fuel 95, 2012.
[29] Y. Kazemzadeh, S.E. Eshraghi, K. Kazemi, S. Sourani, M. Mehrabi, Y. Ahmadi, Behavior of Asphaltene Adsorption onto the Metal Oxide Nanoparticle Surface and Its Effect on Heavy Oil Recovery, Ind. Eng. Chem. Res. 54, pp. 233–239, 2015.
[30] E.A. Taborda, C.A. Franco, M.A. Ruiz, V. Alvarado, F.B. Cortés, RETRACTED: Striking behavior of the rheology in heavy crude oils by adding nanoparticles, Adsorption Science & Technology 36, NP2–NP17, 2018.
[31] M. Iravani, Z. Khalilnezhad, A. Khalilnezhad, A review on application of nanoparticles for EOR purposes: history and current challenges, J. Pet. Explor. Prod. Technol. 13, 2023.
[32] A. Ali, Y.W. Chiang, R.M. Santos, X-Ray Diffraction Techniques for Mineral Characterization: A Review for Engineers of the Fundamentals, Applications, and Research Directions, Minerals 12, 2022.

[33] Y. Ahmadi, Z. Sadeghi, T. Kikhavani, A.H. Alibak, B. Vaferi, Synthesis and application of eucalyptus plant- and walnut shell- CuO/Fe3O4/Xanthan polymeric nanocomposites for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs, J. Pet. Explor. Prod. Technol. 14, pp. 3045–3054, 2024.
[34] P.B. Raja, K.R. Munusamy, V. Perumal, M.N.M. Ibrahim, Characterization of nanomaterial used in nanobioremediation, in: Nano-Bioremediation : Fundamentals and Applications, Elsevier, pp. 57–83, 2022.
[35] Y. Ahmadi, Relationship between Asphaltene Adsorption on the Surface of Nanoparticles and Asphaltene Precipitation Inhibition During Real Crude Oil Natural Depletion Tests, Petroleum Engineering Research Article Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology 10, 2021.
[36] Y. Ahmadi, M. Tanzifi, Using Polymeric Carbon Nitride/ZrO2 Nanocomposite for Low Salinity Water Flooding in Carbonate Porous Media at Real Reservoir Conditions, Polymers (Basel). 17, pp. 649, 2025.
[37] Y. Ahmadi, M. Mohammadi, M. Sedighi, Introduction to chemical enhanced oil recovery, in: Chemical Methods, 2021.
[38] E. Jafarbeigi, Y. Ahmadi, M. Mansouri, S. Ayatollahi, Experimental Core Flooding Investigation of New ZnO-γAl2O3Nanocomposites for Enhanced Oil Recovery in Carbonate Reservoirs, ACS Omega 7, 2022.
[39] A. Khaksar Manshad, A. Kabipour, E. Mohammadian, L. Yan, J. A. Ali, S. Iglauer, A. Keshavarz, M. Norouzpour, A. Azdarpour, S.M. Sajadi, S. Moradi, Application of a Novel Green Nano Polymer for Chemical EOR Purposes in Sandstone Reservoirs: Synergetic Effects of Different Fluid/Fluid and Rock/Fluid Interacting Mechanisms, ACS Omega 8, pp. 43930–43954, 2023.
[40] Y. Ahmadi, B. Aminshahidy, Effects of hydrophobic CaO and SiO2 nanoparticles on Asphaltene Precipitation Envelope (APE): An experimental and modeling approach, Oil and Gas Science and Technology 73, 2018.
[41] Y. Ahmadi, B. Aminshahidy, Inhibition of asphaltene precipitation by hydrophobic CaO and SiO2 nanoparticles during natural depletion and CO2 tests, International Journal of Oil, Gas and Coal Technology 24, 2020.
[42] M.Y. Sameeh, An Overview of Nanoparticles from Medicinal Plants: Synthesis, Characterization and Bio-Applications, Advances in Bioscience and Biotechnology 14, 2023.
[43] J.A. Ali, K. Kolo, S. Mohammed Sajadi, A.K. Manshad, K.D. Stephen, Green synthesis of ZnO/SiO2 nanocomposite from pomegranate seed extract: Coating by natural xanthan polymer and its characterisations, Micro Nano Lett. 14, 2019.
[44] B.J. Inkson, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization, in: Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods, 2016.
[45] M. Nasrollahzadeh, M. Sajjadi, S.M. Sajadi, Z. Issaabadi, Green Nanotechnology, pp. 145–198, 2019.
[46] H. Kumar, R. Rani, Structural and Optical Characterization of ZnO Nanoparticles Synthesized by Microemulsion Route, International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy 19, 2013.
[47] A. Galarneau, D. Mehlhorn, F. Guenneau, B. Coasne, F. Villemot, D. Minoux, C. Aquino, J.P. Dath, Specific Surface Area Determination for Microporous/Mesoporous Materials: The Case of Mesoporous FAU-Y Zeolites, Langmuir 34, 2018.
[48] Y. Ahmadi, M. Mansouri, Formation damage reduction during CO2 flooding in low permeability carbonate reservoir with using a new synthesized nanocomposites, Pet. Sci. Technol. 41, 2023.
[49] D. López, L.J. Giraldo, E.F. Lucas, M. Riazi, C.A. Franco, F.B. Cortés, Cardanol/SiO2Nanocomposites for Inhibition of Formation Damage by Asphaltene Precipitation/Deposition in Light Crude Oil Reservoirs. Part I: Novel Nanocomposite Design Based on SiO2-Cardanol Interactions, Energy and Fuels 34, 2020.

[50] M. Mansouri, M. Parhiz, B. Bayati, Y. Ahmadi, Preparation of Nickel Oxide Supported Zeolite Catalyst (NiO/Na-ZSm-5) for Asphaltene Adsorption: A Kinetic and Thermodynamic Study, Petroleum Engineering Research Article Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology 10, 2021.
[51] S. Alizadeh, F. Fazelipour, S.M. Mousavi, R. Mansourian, J. Qajar, A comparative experimental evaluation of the performance of additive compounds for inhibition of asphaltene precipitation from crude oil, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, 2021.
[52] N. Hosseinpour, A.A. Khodadadi, A. Bahramian, Y. Mortazavi, Asphaltene adsorption onto acidic/basic metal oxide nanoparticles toward in situ upgrading of reservoir oils by nanotechnology, Langmuir 29, 2013.
[53] N.N. Nassar, A. Hassan, P. Pereira-Almao, Metal oxide nanoparticles for asphaltene adsorption and oxidation, Energy and Fuels 25, 2011.
[54] F.S. Alhumaidan, M.S. Rana, H.M.S. Lababidi, A. Hauser, Pyrolysis of Asphaltenes Derived from Residual Oils and Their Thermally Treated Pitch, ACS Omega 5, 2020.