

مروری جامع بر کاربرد نانومواد در ازدیاد برداشت نفت (EOR): مکانیسم‌ها، چالش‌ها و روندهای آینده

مسعود بیژنی^{۱*}، امیرحسین سپه‌وند^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

۲. کارشناسی، گروه مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه گرمسار، گرمسار، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: masoudbijani@fmgarmsar.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۸۰ - ۹۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲

چکیده

در این پژوهش، کاربرد نانومواد در صنعت نفت با هدف بهبود فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت^۱ مورد بررسی جامع و تحلیلی قرار گرفته است. نانومواد شامل نانوذرات، نانوکامپوزیت‌ها، نانوسیالات، نانورس‌ها و نانومولسیون‌ها - به دلیل برخورداری از نسبت سطح به حجم بسیار بالا، واکنش‌پذیری شیمیایی چشمگیر و قابلیت تغییر خواص فیزیکوشیمیایی سیستم‌های سنگ-سیال، نقشی کلیدی در افزایش بهره‌وری برداشت نفت از مخازن ایفا می‌کنند. این مطالعه به تحلیل انواع نانومواد مورد استفاده در روش‌های مختلف EOR از جمله روش‌های شیمیایی، حرارتی، میکروبی و ترکیبی می‌پردازد و مکانیسم‌های اصلی مؤثر در بهبود بازیافت نفت - مانند کاهش کشش بین‌سطحی^۲، تغییر ترشوندگی^۳ بهبود خواص رئولوژیکی سیالات و کنترل نسبت تحرک^۴ را به صورت نظام‌مند تبیین می‌کند. علاوه بر این، پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌ی توسعه‌ی نانومواد سبز و نانوکامپوزیت‌های هوشمند که با استفاده از مواد سازگار با محیط‌زیست (از قبیل سورفکتانت‌های طبیعی، پلیمرهای زیستی و نانوذرات با منشأ گیاهی) طراحی شده‌اند، مرور و ارزیابی شده است. در پایان، شکاف‌های تحقیقاتی موجود و چشم‌اندازهای آینده در کاربرد نانومواد در فرآیندهای EOR مطرح گردیده تا مسیر پژوهش‌های آینده و توسعه‌ی فناوری‌های نوین در این حوزه ترسیم شود.

کلیدواژه‌ها: فناوری نانو، نانوسیالات، ازدیاد برداشت نفت (EOR)، کشش بین‌سطحی (IFT)، نانومواد سبز، تغییر ترشوندگی

۱. مقدمه

نانوفناوری به مطالعه و کنترل مواد در مقیاس نانومتری، شامل ابعاد هسته‌ای، اتمی و فوق‌مولکولی (بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) می‌پردازد. این مقیاس دارای خواص منحصر به فرد نوری، مغناطیسی، الکتریکی و شیمیایی است [۱]. نانومواد، به

1. Enhanced Oil Recovery, EOR
2. Interfacial Tension, IFT
3. Wettability Alteration, WAG
4. Mobility Ratio



اثر کوانتومی، مساحت سطح بالا و قابلیت خودآرایی اشاره کرد. کاربردهای متنوع نانومواد در حوزه‌های مختلف علمی، نظیر شیمی، زیست‌شناسی، فیزیک، علم مواد و مهندسی، به‌طور چشمگیری در حال گسترش است [۲]. این فناوری در زمینه‌هایی نظیر فناوری اطلاعات، حمل‌ونقل، پزشکی، ایمنی غذایی، انرژی و علوم محیطی نیز جایگاه ویژه‌ای یافته است. در دنیای امروز، کاهش عرضه نفت و افزایش قیمت آن به‌عنوان یک چالش اقتصادی جهانی شناخته می‌شود. این بحران را می‌توان با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته و راه‌حل‌های نوآورانه کاهش داد. فناوری‌هایی مانند تحلیل داده‌های کلان، هوش مصنوعی، هواپیماهای بدون سرنشین، اینترنت اشیا و کاربرد نانوتکنولوژی به‌عنوان ابزارهای مقرون‌به‌صرفه و کارآمد، قابلیت بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها را فراهم می‌آورند [۳]. مقاله حاضر به بررسی استفاده از نانو ذرات برای بهبود افزایش برداشت از مخازن نفتی می‌پردازد. از آنجائی که مخازن نفتی کشور در نیمه دوم عمر خود هستند استفاده از تکنولوژی نانو می‌تواند برای افزایش تولید حداکثری مقرون‌به‌صرفه باشد و به تولید هرچه بیشتر از مخازن نفتی ما را تسهیل تر کند. این مطالعه یک بررسی جامع و متمرکز بر روی استفاده از نانو ذرات برای بهبود افزایش برداشت و همچنین کاربرد نانوذرات در ترکیب با سایر روش‌های ازدیاد برداشت نفت را ارائه می‌دهد.

۲. طبقه‌بندی نانومواد

نانومواد، اجزای ساختاری با ابعاد خارجی در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر هستند که در این مقیاس، خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها با مواد در مقیاس بالک متفاوت است [۴]. نانومواد به شکل‌های کروی، لوله‌ای و نامنظم موجود دارند و می‌توانند به‌صورت منفرد، ذوب‌شده، انباشته یا آگلومره یافت شوند. نانومواد بر اساس شکل و ساختار به سه دسته نانوذرات، نانورس و نانومولسیون‌ها طبقه‌بندی می‌شوند. (شکل ۱) نانوذره به‌عنوان یک ذره بسیار ریز با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (nm) نیز شناخته می‌شود. نانوذرات به دو دسته نانو ذرات آلی و معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. نانوذرات معدنی شامل نانوذرات فلزی و سرامیکی است. نانوذرات آلی، نانوذرات مبتنی بر کربن، نانوذرات لیپیدی و پلیمری هستند. نانوذرات بیشتر به‌عنوان نانوبلورها، نانوخوشه‌ها، نانولوله‌ها، سوپر مولکول‌ها و غیره طبقه‌بندی می‌شوند. نانورس‌ها نانوذراتی هستند که از لایه‌های سیلیکات معدنی با ضخامت ۱ نانومتر و عرض ۷۰ تا ۱۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند [۵]. مونت

موریلونیت، کائولینیت و ساپونیت چند نمونه از نانورس‌ها هستند. نانومولسیون‌ها سیستم‌های کلوئیدی هستند که در آن‌ها اندازه زیر میکرون از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است [۴]. نانومولسیون‌ها به‌عنوان نانومولسیون‌های روغن داخل آب، نانومولسیون‌های آب در روغن و نانومولسیون‌های دو پیوسته طبقه‌بندی می‌شوند.

۱-۲. نانو ذرات

اندازه نانوذرات بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است [۵]. ساختار نانوذرات به شکل نانوکامپوزیت‌ها یافت می‌شوند. تمام نانوساختارها عمدتاً از واحدهای ابتدایی با ابعاد کم (بلوک) تشکیل شده‌اند. آن‌ها ممکن است بدون ابعاد، یک بعد، دوبعدی و سه‌بعدی که اثر اندازه بر مشخصه حاصله نیز به‌عنوان نقاط کوانتومی قابل مشاهده است. همان‌طور که در (جدول ۱) مشاهده می‌گردد نانومواد به‌عنوان بلوک‌های ساختمانی برای ساختن مواد نانوساختار به نانوذرات صفر بعدی (نقاط کوانتومی)، یک‌بعدی (سیم‌های، کوانتومی)، دوبعدی (لایه‌های نازک) و نانوذرات سه‌بعدی تقسیم می‌شوند. در نانومواد صفر بعدی، حرکت الکترون در هر سه جهت متفاوت است [۶]. در یک بعد الکترون‌ها فقط می‌توانند در جهت X حرکت کنند. در دو بعد، آن‌ها می‌توانند در Y, X حرکت کنند و سه‌بعدی آن‌ها در جهت X, Y, Z حرکت کنند. نانوذرات بسته به نوع موادشان به دو دسته آلی یا معدنی طبقه‌بندی می‌شوند. رسوب نمک‌های معدنی که توسط فعل و انفعالات فلزی و کووالانسی به مولکول‌ها متصل می‌شود، نانوذرات معدنی تولید می‌کند [۳]. نانوذرات آلی به‌صورت خودآرایی در یک ساختار سه‌بعدی قرار می‌گیرند. برای تهیه نانوذرات آلی از ترکیبات آلی مصنوعی و طبیعی مانند امولسیون شیر، دانه‌های پروتئینی، اجسام لیپیدی و سایر ساختارهای پیچیده برای ساخت نانوذرات آلی (ویروس‌ها و غیره) استفاده می‌گردد [۷].

۲-۲. نانورس‌ها

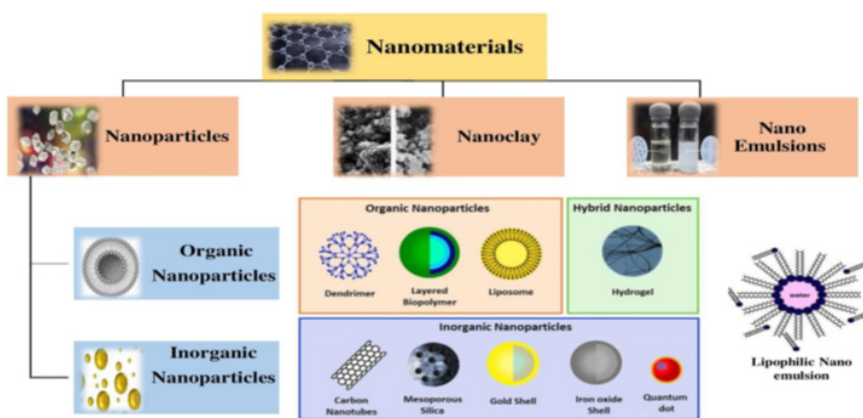
نانورس‌ها نانوذراتی هستند که از لایه‌های سیلیکات معدنی تشکیل شده‌اند. نانورس‌ها بر اساس ترکیب شیمیایی و مورفولوژی نانوذرات به کلاس‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند. نانورس‌هایی که معمولاً یافت می‌شوند عبارتند از مونتموریلونیت، بنتونیت، کائولینیت، هکتوریت و هالوژنیت را شامل می‌گردند. به‌عنوان مثال، مونت موریلونیت از لایه‌های متعددی از ذرات کریستالی با قطر ۱۰۰ تا ۲۰۰ نانومتر و



۲-۳. نانو امولسیون‌ها

نانوامولسیون‌ها سیستم‌های کلونیدی هستند که اندازه زیر میکرون آن‌ها از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است [۱۰]. پلیمرها، قطرات و مواد جامد در یک مایع چسبناک پراکنده شده و در نتیجه یک ماده نرم جذب می‌شود [۱۰]. فاز داخلی که فاز ناپیوسته نیز نامیده می‌شود، فاز پراکنده است، در حالیکه محیط فاز خارجی است. واسطه یا فاز داخلی به‌عنوان یک عامل امولسیون کننده نیز شناخته می‌شود. امولسیون سازی با انرژی بالا (همگن سازی با فشار بالا، فراصوت، میکروسیال ساز) و امولسیون سازی با انرژی کم (وارونگی دمایی فاز، ترکیب وارونگی فاز و جابجایی حلال) دو روش برای ساخت نانوامولسیون‌ها هستند [۱۱].

ضخامت متوسط ۰/۹۶ نانومتر تشکیل شده است [۸]. ترکیب شیمیایی نانورس‌ها را می‌توان به راحتی با استفاده از پلاسمای جفت شده القایی^۱ تعیین کرد. بسته به بار لایه‌ای سطحی و انواع یون‌های بین لایه‌ای، دو شکل نانورس کاتیونی و آنیونی وجود دارد. برای تهیه نانورس و رس ارگانیک به شکل آبی یا جامد از مولکول‌های باردار (آب دوست) مانند فسفونیوم یا ایمیدازولیوم، آلکیل یا آریل آمونیوم استفاده می‌شود. واکنش تبادل یونی نانوذرات به صورتی است که فاصله بین صفحات منفرد را افزایش می‌دهد، به زنجیره‌های کاتیونی آلی اجازه می‌دهد بین آن‌ها حرکت کنند و کیفیت سطح هر صفحه را از آب دوست به آب گریز یا آلی دوستی تغییر می‌دهد [۹].

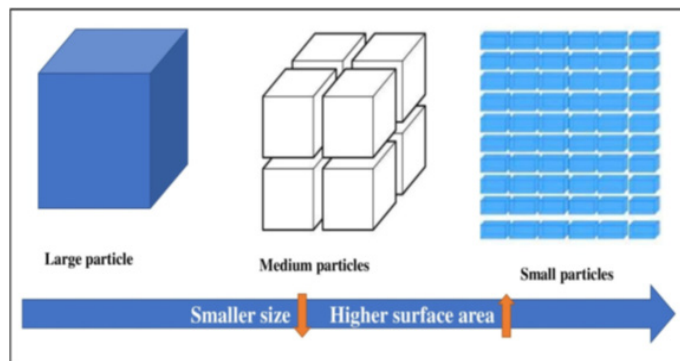


شکل ۱: طبقه بندی نانومواد: نانوذرات، نانورس، نانوامولسیون‌ها [۴]

۳. خصوصیات نانو ذرات

استفاده از تکنیک‌های مختلفی مانند میکروسکوپ نیروی اتمی، پراکندگی نور دینامیکی^۲، میکروسکوپ الکترونی، طیف‌سنجی مرئی، پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی FTIR، طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (UV) انجام داد [۱۲].

توصیف یا اندازه گیری خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات شاخه‌ای از نانومترولوژی است؛ بنابراین، شناسایی روش‌های مشخصه یابی مناسب به تحقیق در مورد خواص نانوذرات کمک می‌کند. شناسایی نانوذرات و نانومواد را می‌توان با



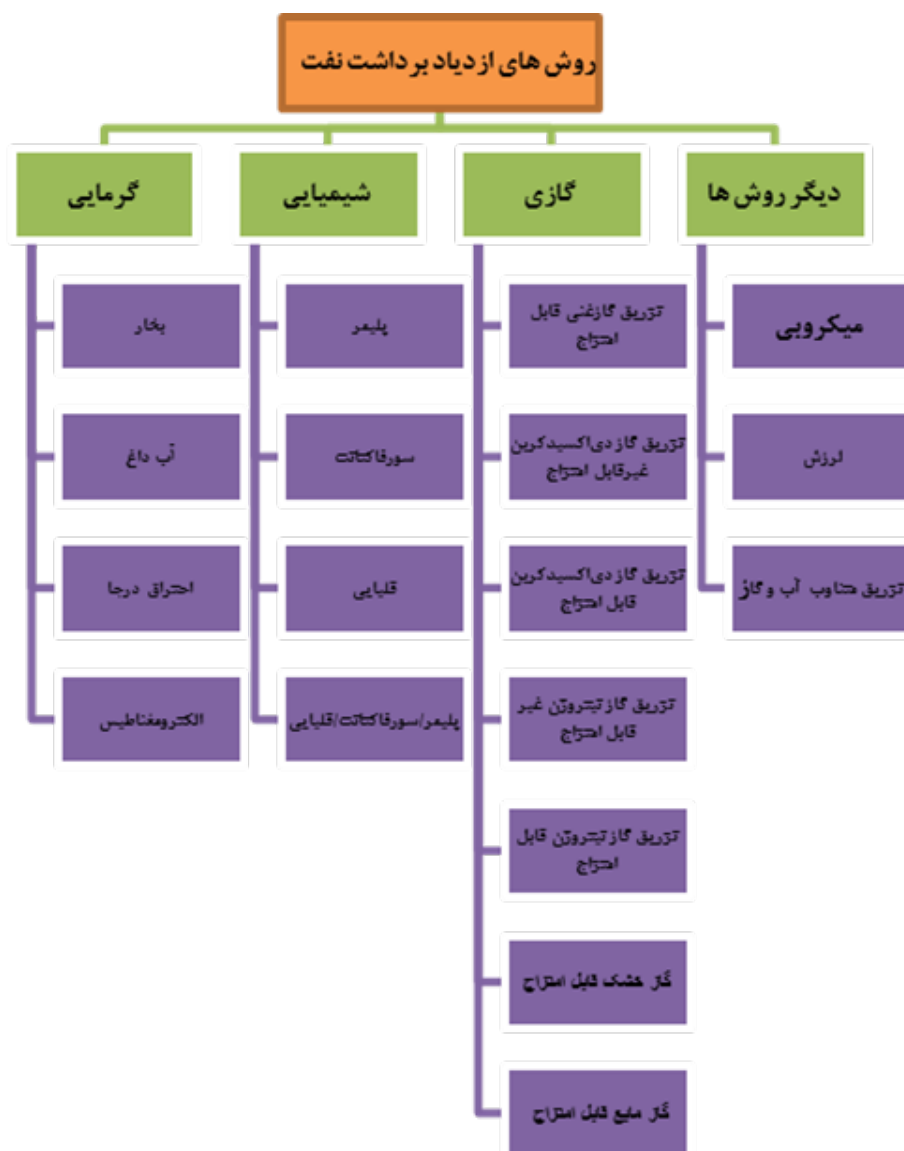
شکل ۲: نانوذرات با نسبت سطح به حجم زیاد [۱۳]

1. Inductively Coupled Plasma, ICP
2. Dynamic Light Scattering

۴. افزایش بازیافت نفت

می‌شوند شامل تغییر ترشوندگی، کاهش ویسکوزیته نفت خام، کاهش کشش بین سطحی آب و نفت و افزایش کارایی جابجایی نفت هستند [۱۴]؛ بنابراین درک پراکندگی فاز نفت، تجهیز قطرات نفت و تشکیل بانک نفت در این مقیاس برای استفاده از پدیده استفاده از نانوذرات در فرآین EOR ضروری است. طیف گسترده‌ای از انواع نانوذرات مختلف مانند اکسید منیزیم، اکسید آلومینیوم، اکسید روی، اکسید زیرکونیوم، اکسید قلع، اکسید آهن، اکسید نیکل، اکسید سیلیکون آب‌گریز و اکسید سیلیکون ترمیم شده برای بررسی فرایند ازدیاد برداشت نفت با روش سیلاب زنی و تزریق به نمونه سنگ در مطالعات تجربی و آزمایشگاهی انجام شده است [۱۴].

پس از بازیافت اولیه و ثانویه نفت، بیش از ۵۰ درصد نفت درجا همچنان در مخزن باقی می‌ماند. در نتیجه، بازیافت ثالثیه فرآیندی است که به فرایندی گفته می‌شود که در صورتی که نفت مخزن با فشار طبیعی و مکانیزیم‌های رانش مخزن قادر به تولید نباشد که برای بازیافت نفت باقیمانده در مخزن استفاده می‌گردد. به صورت کلی روش‌های ازدیاد برداشت نفت در (شکل ۳) نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین کاربردها نانوذرات استفاده از آن‌ها در ازدیاد برداشت نفت (EOR) است که باعث افزایش برداشت نفت در جای و باقیمانده موجود در مخزن می‌گردد و در نتیجه بازگشت سرمایه‌گذاری سریع‌تری را تضمین می‌کند. فرآیندهایی در مقیاس نانو که به EOR مربوط



شکل ۳: طبقه‌بندی روش ازدیاد برداشت نفت



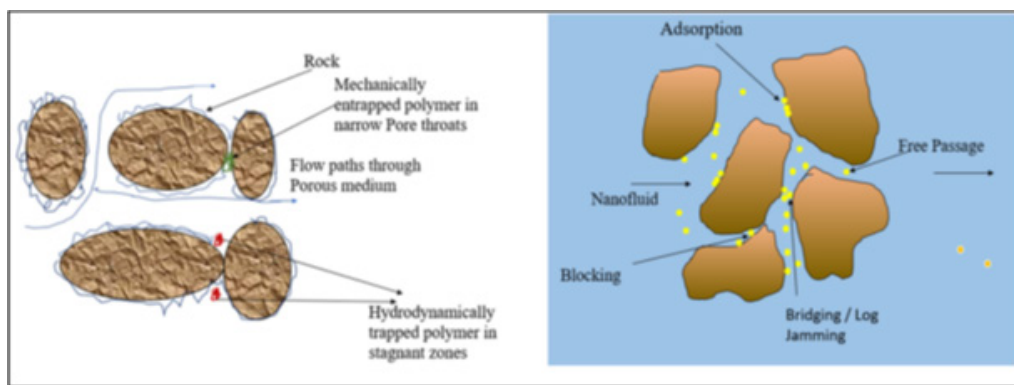
۵. غشاها مورد استفاده در فرایند فیلتراسیون گازی

۱-۵. تخریب و رسوب

کاهش خواص فیزیکی پلیمرها به دلیل تغییرات در استحکام و ترکیب شیمیایی که به عنوان تخریب شناخته می‌شود، رخ می‌دهد. این فرآیند منجر به کاهش پایداری پلیمرها در شرایط خاص می‌شود. رسوب تکنیکی یک روش برای جداسازی و خالص‌سازی پلیمرها است. یک مخزن نفتی دارای شوری، دما و pH مشخصی است. در دماهای بالا، شوری بالا و pH پایین، برخی از ترکیبات تزریقی تخریب شده و ناپایدار می‌شوند. ویسکوزیته محلول پلیمری به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی قرار می‌گیرد. در شرایط شور، مولکول‌های پلیمری توسط کاتیون‌ها در آب نمک مخزن غربال می‌شوند. در این شرایط، با کاهش درهم‌تنیدگی زنجیره پلیمری و افزایش شعاع هیدرودینامیک، ماکرومولکول‌ها انقباض می‌یابند. این امر منجر به کاهش ویسکوزیته محلول پلیمری می‌شود. از سوی دیگر، دماهای بالا باعث هیدرولیز پلیمر و رسوب یون‌های دو ظرفیتی می‌شود [۱۶]. اسیدی شدن مواد شیمیایی نیز می‌تواند به دلیل تزریق محلول‌هایی با pH پایین در شرایط مخزن باشد [۱۷].

۱-۵. جذب و نگهداری

جذب و نگهداری مواد شیمیایی در طول جریان از طریق محیط متخلخل در فرآیند ازدیاد برداشت نفت (EOR) رخ می‌دهد. این تعاملات به نوع مواد شیمیایی تزریق شده به مخزن بستگی دارد. مواد شیمیایی از جمله نانوذرات با سنگ مخزن به روش‌های مختلفی از جمله جاذبه الکترواستاتیکی، نیروهای واندروالسنس، برهمکنش فضایی، کاهش غلظت محلول‌های شیمیایی تزریق شده و غیره با سطح سنگ مخزن تعامل دارند. جذب پلیمر به دلیل چسبندگی مولکول‌های پلیمر به سطح سنگ است. این فرآیند در سطح مشترک جامد-مایع به دلیل انتقال مولکول‌های شیمیایی از فاز محلول حجیم به سطح مشترک جامد و مایع رخ می‌دهد [۱۸]. جاذب‌ها شامل سورفکتانت‌ها و ترکیبات قلبایی هستند. حفظ پلیمر یکی از عوامل ضروری برای کنترل انتشار پلیمر از طریق محیط متخلخل است [۱۹]. گیر افتادن مکانیکی و اندازه ماکرومولکول‌های پلیمری از دلایل اصلی ماندگاری پلیمر هستند. در این راستا، انتشار جریان پلیمر در مخزن به واسطه ویژگی‌های پلیمر و حجم منافذ نفوذ ناپذیر کنترل می‌شود [۲۰]. (شکل ۴) پویایی حفظ پلیمر در سنگ مخزن را به تصویر می‌کشد. به‌طور کلی، اثربخشی فرآیند EOR با جذب شیمیایی یا نگهداری ذرات در محیط متخلخل مخزن تعیین می‌شود [۲۱]. جذب و نگهداری مواد شیمیایی به عواملی چون محتوای معدنی رس، pH، غلظت الکترولیت (شوری)، ترکیب مایع مخزن و دما بستگی دارد [۲۲].



شکل ۴: جذب پلیمرها در محیط متخلخل EOR معمولی (سمت چپ)، EOR نانوسیال (راست) [۱۵، ۱۶]

۶. کاربردهای نانوذرات در ازدیاد برداشت نفت (EOR)

می‌شوند تا تولید نفت را در فرآیند EOR بهبود بخشند. استفاده از نانوذرات در روش‌های EOR به دلیل ویژگی‌های خاص این مواد و چالش‌های مرتبط با مکانیزم‌های مختلف آن‌ها، توجه زیادی را جلب کرده است [۲۵]. (جدول ۱)، طبقه‌بندی نانوذرات و خواص مرتبط با آن‌ها را نشان

فناوری نانو به‌عنوان یک راه‌حل نوآورانه در صنعت نفت و گاز معرفی شده و در حوزه‌های مختلفی مانند حفاری، سیمان‌کاری، شکست هیدرولیک و ازدیاد برداشت نفت (EOR) کاربرد دارد. نانوذرات به سیالات تزریقی اضافه

می‌دهد. همچنین، انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده در فرآیند بازیابی نفت به‌روش ثالثیه بازیافت نفت (EOR) و نتایج تحقیقات مختلف در این زمینه آورده شده است [۲۶]. نانوذرات بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مختلف، شامل انواع کربنی، فلزی، لیپیدی، سرامیکی، پلیمری و نیمه‌هادی دسته‌بندی می‌شوند. نانوذراتی مانند نانولوله‌های کربنی (CNT)، گرافن، و حامل‌های لیپیدی نانوساختار، کشش سطحی (IFT) را کاهش داده و بهبود بازیابی نفت را تسهیل می‌کنند. نانوذرات فلزی مانند TiO_2 و SiO_2 نیز در

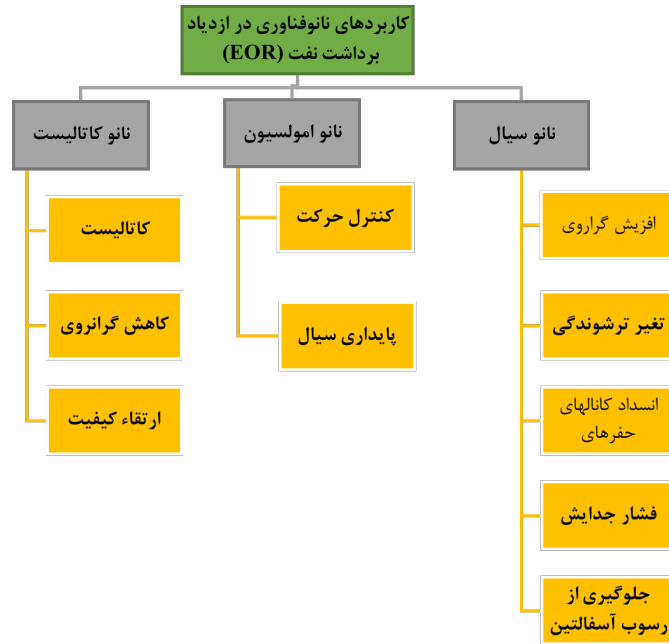
کاهش IFT، تغییر ترشوندگی و تثبیت امولسیون نفت-آب مؤثرند [۲۶ و ۲۷]. علاوه بر این، نانوذرات سرامیکی همچون اکسید آلومینیوم، منیزیم و مس و نانوذرات پلیمری، به کاهش ویسکوزیته نفت و بهبود فرآیند EOR کمک می‌کنند. نانوذرات نیمه‌هادی نیز در کاهش IFT و تغییر ترشوندگی مؤثر هستند. در نهایت، نانوذرات SiO_2 و TiO_2 به‌عنوان پرکاربردترین نانوذرات در صنعت نفت شناخته شده و نقشی کلیدی در بهبود کارایی فرآیندهای EOR دارند [۲۸ و ۲۹].

جدول ۱: طبقه‌بندی و انواع نانوذرات مورد استفاده در فرآیند EOR [۲۶]

طبقه بندی نانوذرات	نوع نانوذرات	ویژگی‌های کلیدی	مکانیسم اثر در EOR
نانوذرات بر پایه کربن	بر پایه نانوذرات کربن	۱. دو ماده اصلی مانند نانولوله‌های کربنی یک لوله از صفحات گرافن و فولرن ساخته شده. ۲. نانولوله‌های کربنی ۱۰۰ برابر قوی‌تر از فولاد هستند.	این نانوذرات به دلیل سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی و شیمیایی مناسب می‌توانند به بهبود جریان نفت در مخازن کمک کنند. همچنین، توانایی جذب و نگهداری مواد شیمیایی می‌تواند به افزایش کارایی مواد شیمیایی تزریقی کمک کند.
نانوذرات فلزی	نانوذرات سیلیس	۱. نانوذرات فلزی را می‌توان به‌روش‌های مختلفی مانند شیمیایی سنتز کرد. ۲. سطح انرژی بالایی دارند.	نانوذرات فلزی مانند نقره و طلا می‌توانند به‌عنوان کاتالیزور عمل کنند و واکنش‌های شیمیایی را تسریع کنند. این نانوذرات همچنین می‌توانند به‌عنوان عوامل ضد باکتری برای جلوگیری از ایجاد رسوب در چاه‌های نفت استفاده شوند.
نانوذرات بر پایه لیپید	نانوساختارهای لیپیدی به‌عنوان حامل سورفکتانت	۱. شکل کروی دارند و قطر آن‌ها بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر است. ۲. از لیپید جامد و ماتریکسی از مولکول‌های لیئوفیل محلول تشکیل شده‌اند.	این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان حامل‌های دارویی برای انتقال مواد شیمیایی به مخازن نفت عمل کنند. آن‌ها همچنین می‌توانند به کاهش کشش سطحی بین نفت و آب کمک کنند که منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود.
نانوذرات پلیمری	نانوذرات پلیمری با پوشش سیلیکات	۱. نانوذرات الی، نانوذرات سیلیکات با پوشش پلیمری هستند. ۲. ساختار نانوکپسول یا نانوکره دارند.	این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان مواد افزودنی برای بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی سیالات حفاری و تزریقی استفاده شوند. آن‌ها می‌توانند به افزایش ویسکوزیته و پایداری سیالات کمک کنند و در نتیجه برداشت نفت را افزایش دهند.
نانوذرات سرامیکی	اکسید فلز/ SiO_2 نانوکامپوزیت‌ها	۱. این نوع نانوذرات با استفاده از اکسیدها، کاربیدها، کربنات‌ها و فسفات‌ها و جامدات معدنی هستند. ۲. از نظر شیمیایی بی‌اثر و مقاومت بالایی دارند.	این نانوذرات معمولاً به‌عنوان فیلترها یا مواد جاذب در فرآیندهای تصفیه و جداسازی استفاده می‌شوند. آن‌ها می‌توانند به بهبود کیفیت نفت خام و کاهش ناخالصی‌ها کمک کنند که در نهایت منجر به افزایش برداشت نفت می‌شود.
نانوذرات نیمه‌هادی	نانوذرات اکسید روی	۱. نانوذرات نیمه‌هادی در جدول تناوبی در گروه‌های ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷ هستند. ۲. نانوذرات نیمه‌هادی در فتوکاتالیزور، الکترونیک، فتوپنیتیک استفاده شده است.	این نانوذرات می‌توانند در حسگرها و سیستم‌های نظارتی مورد استفاده قرار بگیرند تا شرایط مخزن را بهتر کنترل کنند. با ارائه داده‌های دقیق‌تر، می‌توان استراتژی‌های بهتری برای ازدیاد برداشت نفت طراحی کرد.

۵-۱. کاربرد نانوذرات در سیلاب زنی شیمیایی

سیلاب زنی شیمیایی یک تکنیک بازیابی نفت است که با افزودن مواد شیمیایی مختلف به آب تزریق شده انجام می‌شود. روش‌های شیمیایی EOR عبارتند از پلیمر، قلیایی، سورفکتانت، فوم و سیلاب زنی ترکیبی (قلیایی/سورفکتانت/پلیمر) هستند. EOR شیمیایی به دلیل افزایش کارایی، فناوری، صرفه اقتصادی و هزینه سرمایه پایین، روشی امیدوارکننده است [۱۷].



شکل ۵: کاربرد نانوتکنولوژی در EOR [۱۸]

۱-۱-۶. نانو سیالات پلیمری

دادن ویسکوزیته زمانی رخ می‌دهد که کاتیون‌های موجود در آب‌نمک‌ها با مولکول‌های گروه‌های آمید و کربوکسیلات پلیمرها تماس پیدا کنند [۱۹]. برهمکنش پلیمر با نانوذرات اثر سینرژیک دارد که هم رئولوژی پلیمر و هم پایداری نانوذرات را بهبود می‌بخشد. جاذبه الکترواستاتیکی نانوذرات در حضور آب‌نمک افزایش می‌یابد، که این امر موجب تجمع نانوذرات و تقویت عملکرد سطحی در فرآیند EOR می‌شود [۳۳].

۱-۱-۶-۲. مهار جذب برهمکنش

مهار جذب برهمکنش یکی از روش‌های کلیدی در بهینه‌سازی کارایی فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت (EOR) است که به‌ویژه در تعاملات میان مولکول‌های پلیمری و نانوذرات در محیط‌های متخلخل کاربرد دارد. در این فرآیند، هدف اصلی کاهش یا جلوگیری از جذب زیاد مواد شیمیایی تزریقی بر روی سطح سنگ مخزن و حفظ پایداری این مواد در طول جریان در مخزن است [۲۰]. این مهار به‌طور عمده از طریق دو مکانیسم اصلی پیاده‌سازی می‌شود: اول، استفاده از نانوذرات به‌عنوان عامل پراکنده‌کننده که می‌تواند بر تعاملات سطحی میان مولکول‌های پلیمری و سطح سنگ مخزن تأثیر مثبتی بگذارد. دوم، استفاده از پوشش‌دهی مناسب بر روی نانوذرات که به کاهش تجمع و انباشت آن‌ها و جلوگیری از جذب اضافی آن‌ها توسط سطح سنگ مخزن کمک می‌کند. این روش موجب می‌شود که نانوذرات در سیستم باقی بمانند

نانوسیالات پایه پلیمری سیالاتی هستند که در آن‌ها نانوذرات پلیمری با پراکندگی نانوذرات در محلول‌های پلیمری ساخته می‌شوند. روش تهیه نانوسیالات مبتنی بر پلیمر به دو دسته تقسیم می‌شود: ۱- نانوذرات پوشش داده شده با پلیمر ۲- نانوذرات پلیمری. برای غلبه بر مشکلات مربوط به تجمع و تراکم نانوذرات در محیط مخزن نفت، نانوذرات پوشش داده شده با پلیمر کارآمدتر هستند [۳۱]. در همین حال، این نانوذرات توسعه یافته‌اند تا از شکست پلیمر در شرایط خاص مخزن جلوگیری کنند؛ بنابراین، نانوسیالات در فرآیند EOR به دلیل اثرات پلیمرها در افزایش رئولوژی، بهبود پایداری و کنترل تحرک، کاهش جذب پلیمر و تغییر ترشوندگی، نقش مؤثری ایفا می‌کنند [۳۱].

۱-۱-۶-۱. افزایش ثبات رئولوژی و کنترل تحرک

افزایش ثبات رئولوژی و کنترل تحرک، رفتار جریان و ویژگی‌های تغییر شکل سیالات را به‌طور مؤثری تحت تأثیر قرار داده و به تجزیه و تحلیل خواص ویسکوالاستیک پلیمر کمک می‌کند. برای جلوگیری از چسبندگی و حفظ نسبت تحرک مناسب در مخزن، تقویت رفتار رئولوژیکی ضروری است؛ بنابراین، تزریق پلیمرها و نانوذرات برای برنامه‌های EOR ضروری می‌باشد [۳۲]. پلیمرها و نانوذرات در محیط آب‌نمک مخزن ممکن است دچار تخریب شوند. از دست



و از تجمع و رسوب آن‌ها جلوگیری شود، که در نتیجه کارایی فرآیند EOR بهبود می‌یابد. همچنین، با بهینه‌سازی تعاملات بین مولکول‌ها و نانوذرات، ویژگی‌های جریان و پایداری سیالات تقویت شده و از تجزیه زود هنگام پلیمرها جلوگیری می‌شود [۲۱]. پلیمرها و نانوذرات به صورت هم‌افزایی عمل می‌کنند و ترکیب آن‌ها می‌تواند ویژگی‌های عملکردی بهبود یافته‌ای را ایجاد کند. در این راستا، نانوسیالات پلیمری نسبت به نانوذرات پلیمری حاوی نانوس، جذب کمتری در محیط‌های متخلخل دارند. تحقیقات نشان داده است که نانوذرات پلیمری که حاوی نانوذرات SiO_2 هستند، جذب کمتری روی سطوح سنگ ماسه‌سنگ نسبت به سایر انواع نانوذرات نشان داده‌اند. این ویژگی می‌تواند به افزایش کارایی نانوذرات در فرآیندهای بازیابی نفت و کاهش تداخل‌های غیرضروری در سطح سنگ کمک کند، چرا که جذب کمتر روی سطوح سنگ موجب افزایش تحرک و اثربخشی نانوذرات در محیط‌های متخلخل می‌شود [۲۲].

۴-۱-۶. نانو سیالات پلیمری

نانوسیالات سورفکتانت که ترکیبی از نانوذرات و سورفکتانت‌ها است، به‌عنوان یک عامل مؤثر در فرآیندهای تقویت‌شده بازیابی نفت (EOR) شناخته می‌شود. این نانوسیالات با کاهش کشش سطحی (*IFT*) و تغییر ترشوندگی، می‌توانند کارایی جابجایی میکروسکوپی نفت را به‌طور قابل توجهی بهبود دهند. کاهش *IFT* منجر به کاهش نیروهای چسبندگی بین نفت و سطح سنگ مخزن می‌شود که در نهایت به افزایش توانایی جریان نفت در داخل سنگ‌های متخلخل کمک می‌کند. در محیط‌های مخزنی، نانوسیالات سورفکتانت ممکن است برای ایجاد فوم‌ها و امولسیون‌های پایدار به کار روند [۲۳]. این فوم‌ها و امولسیون‌ها می‌توانند به‌عنوان عامل‌های تثبیت‌کننده برای انتقال نفت و گاز در داخل مخزن عمل کنند و باعث بهبود فرآیند جابجایی نفت از نواحی غیرقابل دسترس شوند [۲۴]. این فرآیندها به‌ویژه در مخازن با ویژگی‌های پیچیده و سخت دسترسی که نیاز به تکنیک‌های پیشرفته دارند، اهمیت پیدا می‌کنند. علاوه بر این، نانوذرات موجود در نانوسیالات می‌توانند ویژگی‌های سطحی را تغییر دهند و از طریق ایجاد امولسیون‌های نفت-آب یا فوم‌های پایدار، موجب افزایش راندمان فرآیندهای بازیابی نفت شوند. این ترکیب‌های نانوذرات و سورفکتانت‌ها به‌ویژه در شرایط محیطی چالش‌برانگیز (مثلاً دماهای بالا یا شوری زیاد) می‌توانند نقش مؤثری ایفا کنند و فرآیند EOR

را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشند. [۲۵]. امولسیون‌ها به تضمین کارایی تزریق سیالات کمک می‌کنند، در حالی که فوم‌های پایدار اجازه می‌دهند تا مایع در سراسر مخزن از مناطق با نفوذ بالا به مناطق با نفوذپذیری پایین‌تر هدایت شود. کشش سطحی (*IFT*) و ترشوندگی سیالات در مخزن از جمله معیارهای کلیدی هستند که باید هنگام ارزیابی و جریان سیالات در نظر گرفته شوند. پس از بازیابی ثانویه نفت، بخشی از نفت به دلیل نیروهای موئینگی در مخزن به دام می‌افتد. عدد موئینگی، که عددی بدون بعد است، توزیع نیروی موئینگی را در معادله نشان می‌دهد [۵]:

$$Nc = \frac{\mu \times V}{\sigma \times \cos \theta} \quad (1)$$

در صورتی که Nc عدد موئینگی، m ویسکوزیته سیال جابجایی (پاسکال-ثانیه)، v سرعت جابجایی داری (متر/ثانیه)، q زاویه تماس و s سیال جابجایی و *IFT* سیال جابجا شده (آب و نفت) است. بازیافت نفت و اشباع نفت باقیمانده به Nc مربوط می‌شود. Nc با کاهش اشباع نفت باقیمانده افزایش می‌یابد [۲۶].

۴-۱-۶-۱. کاهش *IFT*

بررسی اثر سورفکتانت آنیونی و نانوذرات سیلیس (SiO_2) در سطح مشترک نفت و آب برای اندازه‌گیری عملکرد نانوسیالات سورفکتانت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانو سورفکتانت توانست *IFT* را چهار برابر در غلظت ۱۰۰۰ ppm کاهش دهد. در شرایط دمای بالا و شوری زیاد، نانو سورفکتانت‌ها برای استفاده در فرآیندهای EOR توصیه می‌شوند. نانوذرات با تقویت سیستم مکانیزم‌های حاکم، عملکرد سورفکتانت‌ها را بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، اضافه کردن نانوذرات به محلول سورفکتانت باعث افزایش بازیابی نفتی می‌شود [۲۷، ۲۸]. تحقیقات همچنین نشان داده‌اند که این مخلوط باعث جذب سطحی سورفکتانت بر روی سطح نانوذرات و ایجاد سطح آب‌گریز می‌شود، که در نهایت منجر به کاهش بیشتر *IFT* می‌گردد. نانوذرات از جذب مولکول‌های سورفکتانت از سطح مشترک جلوگیری می‌کنند، که به کاهش *IFT* کمک می‌کند [۳۹]. هنگامی که نانوذرات به محلول سورفکتانت افزوده می‌شوند، مولکول‌های سورفکتانت به سطح نانوذرات جذب می‌شوند. این فرآیند باعث ایجاد یک سطح آب‌گریز روی نانوذرات شده و مولکول‌های

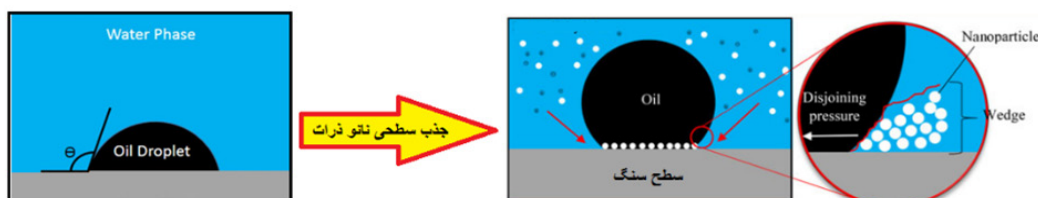


تغییر می‌دهند [۳۱]. این تغییرات موجب می‌شود که نفت به‌جای چسبیدن به سطوح سنگ، به‌راحتی همراه با آب تزریقی حرکت کرده و استخراج شود. همچنین، تحقیقاتی که تأثیر نانوذرات بر ترشوندگی سنگ مخزن را بررسی کرده‌اند، در (جدول ۱) ارائه شده است. نانوسورفکتانت‌ها کشش سطحی در تماس سنگ/نفت/آب نمک را کاهش می‌دهند و به این ترتیب باعث افزایش تغییرات ترشوندگی می‌شوند [۴۰]. هنگامی که نفت و آب با نانوسیال سورفکتانت تعامل می‌کنند، منحنی‌های نفوذپذیری نسبی تغییر می‌کنند. علاوه بر این، استفاده از نانو سورفکتانت‌ها به‌عنوان اصلاح‌کننده‌های ترشوندگی، میزان نفت بازیافتی از مخازن کربناته را افزایش می‌دهد که به دلیل شکاف‌های طبیعی و آب‌گریزی این مخازن، بازیابی نفت در آن‌ها کم است. این امر نشان‌دهنده چالش‌های فشار مؤینگی ناشی از جذب آب در ماتریس سنگ است [۴۱]. بررسی غلظت نانوسورفکتانت‌ها روی سنگ آهک مرطوب نفتی در دمای بین ۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد که نانوذرات استفاده شده ZrO_2 و نیکل اکسید (NiO) همراه با تریتون X-100 و CTAB به‌عنوان سورفکتانت‌ها، تمایل بیشتری به تغییرات ترشوندگی دارند، که ناشی از تماس الکترواستاتیک قوی بین آن‌ها در تمامی شرایط دما است.

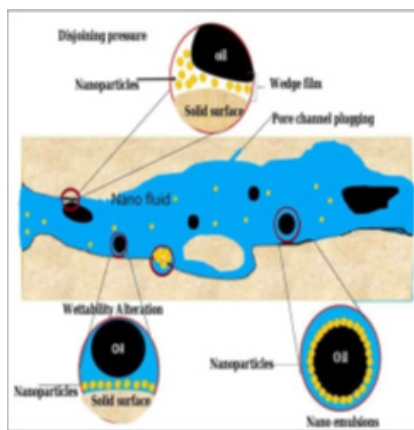
سورفکتانت به سطح مشترک نفت و آب منتقل می‌شوند، که منجر به کاهش کشش سطحی می‌شود. علاوه بر این، نانوذرات از جذب مولکول‌های سورفکتانت به سطح سنگ مخزن یا به یکدیگر جلوگیری می‌کنند، که این باعث می‌شود سورفکتانت‌ها مدت بیشتری در سطح مشترک نفت و آب باقی بمانند و به‌طور مؤثرتری کشش سطحی را کاهش دهند [۲۹]. به دلیل اندازه کوچک نانوذرات، آن‌ها قادرند به‌سادگی وارد سطح مشترک نفت و آب شده و ویژگی‌های سطحی این دو فاز را تغییر دهند. این نفوذ موجب کاهش انرژی سطحی شده و در نتیجه کشش بین سطحی کاهش می‌یابد. این مکانیسم‌ها موجب بهبود فرآیند ازدیاد برداشت نفت می‌شوند، زیرا کاهش کشش سطحی باعث تسهیل جریان نفت در سنگ مخزن و افزایش بازیابی نفت می‌شود [۳۰].

۲-۲-۱-۶. تغییر ترشوندگی

استفاده از نانوذرات در فرآیند تزریق آب باعث تغییر زاویه تماس بین نفت و سطح سنگ مخزن می‌شود (شکل ۶). نانوذرات با ایجاد سطوح آب‌دوست، تمایل سنگ به جذب نفت را کاهش می‌دهند. به‌عبارت دیگر، نانوذرات ترشوندگی سنگ مخزن را از نفت‌دوستی به آب‌دوستی



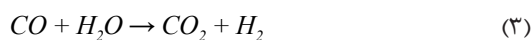
شکل ۶: تغییر ترشوندگی توسط نانوذرات [۴۲]



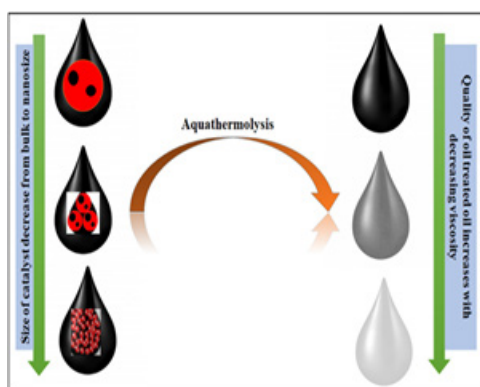
شکل ۷: سورفکتانت‌ها و نانوذرات در محیط متخلخل [۳۲، ۳۳]

۲-۶. کاربرد نانو ذرات در سیلاب زنی حرارتی

ضعیف موجود در ترکیبات نفت سنگین، شامل پیوندهای گوگرد، اکسیژن و نیتروژن را بشکند. فرآیند WGSR نقش کلیدی در ارتقاء کیفیت نفت سنگین در محیط‌های حرارتی و آکوآترمولیز دارد. این واکنش به صورت زیر قابل نمایش است:



هیدروژن تولیدشده در فرآیند WGSR به طور مستقیم در واکنش‌های هیدرولیز و کاهش دخالت کرده و ویسکوزیته، چگالی و میزان گوگرد نفت سنگین را کاهش می‌دهد. این هیدروژن علاوه بر بهبود کیفیت نفت، تجزیه مولکول‌های پیچیده‌ای مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها را تسریع می‌کند. این فرآیند در ارتقاء درجا و بازیافت حرارتی نفت سنگین نقش مهمی دارد و کارایی روش‌های حرارتی EOR را بهبود می‌بخشد. استفاده از نمک‌های فلزی آبی به جای آب در فرآیند تحریک بخار موجب افزایش محتوای آسفالتین و ویسکوزیته نفت بازیافتی شده که به تأثیر کاتالیزوری فلزات در فرآیند آکوآترمولیز مرتبط است [۴۸].



شکل ۸: اثر اندازه کاتالیزور بر عملکرد آکوآترمولیز در بازیافت حرارتی نفت [۳۴]

۲-۳. کاربرد نانو ذرات در تزریق متناوب آب و گاز (WAG)

مخازن نفت طبیعی دارای ضریب بازیافت پایینی هستند. یکی از روش‌های مؤثر در افزایش بازیافت، مکانیزم جابجایی امتزاج‌پذیر CO_2 است. با توجه به محدودیت‌های تزریق آب و گاز، مانند نسبت تحرک نامطلوب، اثر گرانشی و سیلاب‌زنی ناکارآمد، روش تزریق متناوب آب و گاز (WAG) جایگزین سیلاب‌زنی شده است [۴۹]. استفاده از نانو تکنولوژی می‌تواند راندمان میکروسکوپی و ماکروسکوپی فرآیند WAG را بهبود بخشد. تزریق نانو ذرات به عنوان نانو پراکندگی مایع، گزینه‌ای

ترکیبات آلی سنگین مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها به طور عمده در نفت‌های سنگین حضور دارند. این ترکیبات شامل مولکول‌هایی با حداقل ۶۰ اتم کربن هستند که باعث ویسکوزیته بالا، نقطه جوش بالا و وزن مولکولی زیاد می‌شوند [۴۵]. این ویژگی‌ها موجب چالش‌های قابل توجهی در فرآیندهای بازیافت نفت می‌شوند، چرا که تحرک نفت محدود است و جابجایی آن با سیالات ساده مانند آب یا گاز دشوار است؛ بنابراین، روش‌های حرارتی بازیافت پیشرفته (Thermal EOR) به دلیل بهبود راندمان، توجه زیادی را جلب کرده‌اند. نانومواد به عنوان نانو کاتالیست در این فرآیندها به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. نانو کاتالیست‌های مبتنی بر نیکل، آهن و کبالت برای کاهش ویسکوزیته نفت سنگین و همچنین در فرآیند ارتقاء درجا (آکوآترمولیز) نقش کلیدی دارند. نسبت سطح به حجم بالای این نانو کاتالیست‌ها سطح تماس بیشتری بین نفت و کاتالیست فراهم کرده و منجر به زمان واکنش طولانی‌تر و کاهش چگالی و ویسکوزیته نفت می‌شود [۴۶]. با اجرای عملیات حرارتی مناسب، نانو ذرات به راحتی از محیط واکنش جدا می‌شوند. در فرآیند آکوآترمولیز، واکنش‌هایی مانند هیدروژناسیون، سولفورزدایی، هیدروآکسیژناسیون و هیدروکراکینگ باعث شکستن پیوندهای شیمیایی در مولکول‌های حاوی اکسیژن، نیتروژن و گوگرد می‌شوند. این فرآیند در دماهای ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد ویسکوزیته نفت سنگین را کاهش می‌دهد. پیوندهای C-S به عنوان ضعیف‌ترین پیوند شکسته شده و موجب تولید مقادیر کمی گوگرد و ترکیبات سنگین مانند رزین‌ها و آسفالتین‌ها می‌شود. جزء اساسی این واکنش‌ها، هیدرولیز پیوندهای گوگردی آلیفاتیک است که در معادلات (۲) و (۳) به طور دقیق بیان شده است [۴۷].



هیدرولیز در فرآیندهای حرارتی نفت سنگین زمانی رخ می‌دهد که هیدروژن فعال از طریق واکنش تغییر گاز آب (WGSR) تولید شده و به ترکیبات نفت منتقل می‌شود. در این واکنش، آب (H_2O) با کربن مونوکسید (CO) واکنش داده و هیدروژن مولکولی (H_2) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تولید می‌شود. هیدروژن حاصل می‌تواند در واکنش‌های کاهش‌دهنده مانند هیدروژناسیون شرکت کرده و پیوندهای

1. Aquathermolysis
2. Water-Alternating-Gas



نوبین و کارآمد برای بازیابی نفت از مخازن بالغ محسوب می‌شود. کاهش فشار مخزن و رسوب آسفالتین از عوامل کاهش تولید هستند. بررسی‌ها نشان داده‌اند که در فرآیند تزریق CO_2 ، استفاده از نانوذراتی مانند اکسید تیتانیوم (TiO_2) و اکسید آهن (Fe_3O_4) می‌تواند رسوب آسفالتین را به تأخیر بیندازد. مقایسه این دو نشان می‌دهد که Fe_3O_4 مؤثرتر از TiO_2 است. همچنین، تأثیر نانوذرات بر قابلیت اختلاط سیال نفتی و کاهش کشش بین سطحی (IFT) در حضور سورفکتانت‌ها بررسی شد [۵۰]. آزمایش‌های IFT با تانسومتر قطره چرخشی و استفاده از نانوذرات SiO_2 پوشش داده شده با سورفکتانت هگزادسیل تری‌متیل آمونیوم بروماید نشان داد که فرآیند Nano-WAG نسبت به WAG سنتی ضریب بازیافت را بیش از ۲۰ درصد بهبود می‌بخشد. نتایج نشان دادند که جذب نانوذرات SiO_2 روی سطح سنگ موجب تغییر ترشوندگی از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست شده و IFT را کاهش می‌دهد. این دو مکانیسم می‌توانند مشکلات روش WAG را رفع کرده و عملکرد آن را بهبود بخشند. در نتیجه، این مخازن گزینه‌های مناسبی برای پروژه‌های ترسیب کربن (CGS)^۱ محسوب می‌شوند [۵۱].

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی سیستماتیک کاربردهای نانوفناوری در بهبود فرآیند ازدیاد برداشت نفت (EOR) پرداخته است. استفاده از نانوذرات هوشمند در بازیابی هیدروکربن طی سال‌های اخیر به سرعت پیشرفت کرده است و نتایج قابل توجهی ارائه داده است. در این راستا، نانوذرات با اندازه‌ها و غلظت‌های مختلف در روش‌های گوناگون EOR مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، چالش‌های مهمی در زمینه پیاده‌سازی عملی این فناوری‌ها در مقیاس میدانی وجود دارد. یکی از چالش‌های کلیدی، توسعه روش‌هایی است که علاوه بر کاهش هزینه‌ها، با محیط‌زیست نیز سازگار باشند. تولید مصنوعی نانومواد در روش‌های کنونی عمدتاً به فناوری‌ها و موادی وابسته است که کارایی محدودی دارند و می‌توانند به محیط‌زیست آسیب برسانند. از این رو، ابداع و توسعه روش‌های کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست برای تولید و تحویل نانوذرات، اولیویته مهمی در تحقیقات این حوزه محسوب می‌شود. یکی دیگر از چالش‌های اساسی، پراکندگی مؤثر نانوذرات در محیط مخزن نفتی است. برای دستیابی به اثربخشی بیشتر، نیاز به روش‌های کارآمد توزیع و حمل‌ونقل نانوذرات وجود دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که

نانوذرات شیمیایی مانند SiO_2 و TiO_2 در بهبود بازیافت نفت پتانسیل بالایی دارند. علاوه بر این، نانومواد سبز که با استفاده از عصاره‌های گیاهی تولید می‌شوند، به‌عنوان یک گزینه پایدار و سازگار با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، نانوکامپوزیت‌های سبزی که با استفاده از عصاره‌های طبیعی همچون انار، زانتان، پوست تخم‌مرغ، برگ خرما تهیه شده‌اند، توانسته‌اند ویژگی‌هایی نظیر تغییر ترشوندگی، کاهش کشش سطحی (IFT) و افزایش بازیابی نفت در جای مخزن را بهبود دهند. صنعت نفت و گاز می‌تواند به‌طور قابل توجهی از این پیشرفت‌ها در فناوری نانو بهره‌مند شود. این فناوری‌ها نه تنها کارایی تجهیزات و فرآیندهای بازیافت را تحت شرایط عملیاتی سخت بهبود می‌بخشند، بلکه با فراهم کردن ابزارهای مدل‌سازی دقیق، امکان تحلیل بهتر ویژگی‌های سیالات مخزن و فرآیندهای سطحی نظیر کنترل جریان و تغییر ترشوندگی را فراهم می‌کنند. این پیشرفت‌ها به درک عمیق‌تر از مکانیسم‌های مؤثر بر افزایش بازیافت نفت سنگین کمک کرده و راه را برای کاربردهای گسترده‌تر این فناوری در میداین نفتی هموار می‌سازند.

مراجع:

- [1]. Hamad, H.T., et al. A review on nanotechnology and its applications on fluid flow in agriculture and water recourses. in IOP conference series: materials science and engineering. 2020. IOP Publishing.
- [2]. Kazemzadeh, Y., et al., Potential effects of metal oxide/ SiO_2 nanocomposites in EOR processes at different pressures. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018. 559: p. 372-384.
- [3]. Boul, P.J. and P.M. Ajayan, Nanotechnology research and development in upstream oil and gas. *Energy Technology*, 2020. 8(1): p. 1901216.
- [4]. Mageswari, A., et al., Nanomaterials: classification, biological synthesis and characterization. *Nanoscience in Food and Agriculture* 3, 2016: p. 31-71.
- [5]. Panchal, H., et al., A systematic review on



- [14]. Nworu, J. and O. Wilberforce, Application of nanotechnology for enhancing oil recovery (EOR) in oil and gas industry: a review. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 2019. 12(2): p. 32-42.
- [15]. Sorbie, K.S., Polymer-improved oil recovery. 2013: Springer Science & Business Media.
- [16]. Gbadamosi, A.O., et al., An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects. *International Nano Letters*, 2019. 9: p. 171-202.
- [17]. Dordzie, G. and M. Dejam, Enhanced oil recovery from fractured carbonate reservoirs using nanoparticles with low salinity water and surfactant: A review on experimental and simulation studies. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021. 293: p. 102449.
- [18]. Ali, J., et al., Greenly synthesized magnetite@ SiO₂@ xanthan nanocomposites and its application in enhanced oil recovery: IFT reduction and wettability alteration. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020. 45: p. 7751-7761.
- [19]. Tahernejad, E., et al., Evaluation of the simultaneous use of α -Fe₂O₃ nanoparticles and polyacrylamide polymer as an enhanced oil recovery method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2025. 47(1): p. 12001-12015.
- [20]. Khoramian, R., et al., Surface modification of nanoparticles for enhanced applicability of nanofluids in harsh reservoir conditions: A comprehensive review for improved oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2024. 333: p. 103296.
- [21]. Khoramian, R., et al., Impact of Relative Permeability Hysteresis on CO₂ Storage in Saline Aquifers. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2025. 15(1): p. 3-12.
- nanotechnology in enhanced oil recovery. *Petroleum Research*, 2021. 6(3): p. 204-212.
- [6]. Strambeanu, N., et al., Nanoparticles: Definition, classification and general physical properties, in *Nanoparticles' Promises and Risks: Characterization, Manipulation, and Potential Hazards to Humanity and the Environment*. 2014, Springer. p. 3-8.
- [7]. Mohanraj, V. and Y. Chen, Nanoparticles-a review. *Tropical journal of pharmaceutical research*, 2006. 5(1): p. 561-573.
- [8]. Khalili Nezhad, S.S. and G. Cheraghian, Mechanisms behind injecting the combination of nano-clay particles and polymer solution for enhanced oil recovery. *Applied Nanoscience*, 2016. 6(6): p. 923-931.
- [9]. Uddin, F., Clays, nanoclays, and montmorillonite minerals. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2008. 39(12): p. 2804-2814.
- [10]. Agista, M.N., K. Guo, and Z. Yu, A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied sciences*, 2018. 8(6): p. 871.
- [11]. Kale, S.N. and S.L. Deore, Emulsion micro emulsion and nano emulsion: a review. *Systematic Reviews in Pharmacy*, 2017. 8(1): p. 39.
- [12]. Mughal, B., et al., Biogenic nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications. *Applied Sciences*, 2021. 11(6): p. 2598.
- [13]. El-Diasty, A.I. and A.M. Ragab. Applications of nanotechnology in the oil & gas industry: Latest trends worldwide & future challenges in Egypt. in *SPE North Africa Technical Conference and Exhibition*. 2013. SPE.

- [30]. Kazemzadeh, Y., et al., Review on application of nanoparticles for EOR purposes: A critical review of the opportunities and challenges. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019. 27(2): p. 237-246.
- [31]. Jafarbeigi, E., A. Mohammadidoust, and B. Ranjbar, A review on applications of nanoparticles in the enhanced oil recovery in carbonate reservoirs. *Petroleum Science and Technology*, 2022. 40(15): p. 1811-1828.
- [32]. Ali, J.A., et al., 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*, 2018. 27(4): p. 1371-1383.
- [33]. Eltoun, H., Y.-L. Yang, and J.-R. Hou, The effect of nanoparticles on reservoir wettability alteration: a critical review. *Petroleum Science*, 2021. 18: p. 136-153.
- [34]. Rezk, M.Y. and N.K. Allam, Impact of nanotechnology on enhanced oil recovery: A mini-review. *Industrial & engineering chemistry research*, 2019. 58(36): p. 16287-16295.
- [22]. Moradi, B., et al. Application of SiO₂ nano particles to improve the performance of water alternating gas EOR process. in *SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition? 2015. SPE*.
- [23]. Zafar, M., et al., Mathematical Modeling of Nanofluid Flow for Enhanced Oil Recovery Under the Effect of the High Temperature. *Journal of Advanced Research in Numerical Heat Transfer*. 29: p. 86-101.
- [24]. Lao, J., et al., Micro/nanoparticle characteristics and flow in porous media: A review towards enhanced oil recovery. *Energies*, 2024. 17(16): p. 4136.
- [25]. Ivanova, A.A., et al., Effect of nanoparticles on viscosity and interfacial tension of aqueous surfactant solutions at high salinity and high temperature. *Journal of Surfactants and Detergents*, 2020. 23(2): p. 327-338.
- [26]. Liu, P., et al., Experimental study of rheological properties and oil displacement efficiency in oilfields for a synthetic hydrophobically modified polymer. *Scientific reports*, 2017. 7(1): p. 8791.
- [27]. Asl, H.F., et al., 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*, 2020. 300: p. 112290.
- [28]. Machale, J., et al., Impact of mineralogy, salinity, and temperature on the adsorption characteristics of a novel natural surfactant for enhanced oil recovery. *Chemical Engineering Communications*, 2022. 209(2): p. 143-157.
- [29]. Hu, J., et al., Preparation and Investigation of Temperature-Responsive SiO₂-PSBMA Janus Nanosheet with Salt-Tolerant Properties for Enhanced Recovery of Heavy Oil. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024. 16(51): p. 70851-70862.



A Comprehensive Review of Nanomaterial Applications in Enhanced Oil Recovery (EOR): Mechanisms, Challenges, and Future Trends

Masoud Bijani^{1*}, Amir Hossein Sepahvand²

1. Assistant Professor, Department of Petroleum and Geoenergy Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran
2. B.Sc., Department of Petroleum and Geoenergy Engineering, University of Garmsar, Garmsar, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 24 August 2025

Revised: 07 October 2025

Accepted: 03 December 2025

Keywords:

Nanotechnology

Nanofluids

Oil recovery

Interfacial tension

Green nanomaterials

Wettability alteration

ABSTRACT

In this paper, the application of nanoparticles in the petroleum industry to enhance oil production of oil reservoirs is comprehensively reviewed. Nanomaterials are employed in various forms, including nanoparticles, nanosensors, nanocomposites, coated nanoparticles, and nanofluids, across different petroleum processes. Nanotechnology plays a pivotal role in enhanced oil recovery (EOR) methods by facilitating the extraction of oil trapped in subsurface reservoirs. Certain nanoparticles have garnered significant attention due to their environmental compatibility and cost-effectiveness. These nanoparticles create favorable conditions for improving oil recovery through their interactions with the rock/oil system. This study explores the types of nanoparticles and nanomaterials utilized in petroleum applications, emphasizing their physicochemical and mechanical properties. Additionally, the role of nanoparticles in chemical, hybrid, thermal, and microbial extraction methods is examined. The research also delves into the various mechanisms associated with nanoparticle usage, such as enhancing rheological properties, controlling fluid mobility, altering rock wettability, and reducing interfacial tension (IFT) between oil and water. Furthermore, the study investigates the potential of green nanomaterials and advanced nanocomposites designed to optimize fluid and oil recovery performance. These materials incorporate environmentally friendly chemical agents, such as surfactants, alcohols, and polymers, to improve the efficiency and sustainability of petroleum extraction processes.

DOR: [20.1001.1.2412.1081.1404.09.12](https://doi.org/10.1001.1.2412.1081.1404.09.12)

How to cite this article

M. Bijani, A.H. Sepahvand, A Comprehensive Review of Nanomaterial Applications in Enhanced Oil Recovery (EOR): Mechanisms, Challenges, and Future Trends. *Iranian Journal of Gas Engineering*, 2025; 12(4): 80-93. (https://ijge.irangi.org/article_735757.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: masoudbijani@fmgarmsar.ac.ir, (M. Bijani).

Available online 11 March 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

