مروری بر روش‌های کاهش گرانروی نفت خام سنگین با استفاده از نانوکاتالیست‌ها و سایر روش‌ها

آرمین ثابت قدم اصفهانی[۱و۲]، یگانه داودبیگی[۳*]، رؤیا باغستانی[۴]، سید محمود لطیفی[۵]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. شرکت گاز استان هرمزگان، صندوق پستی ۹۸۴۶۹۹۵۱۹۷، بندرعباس، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۵. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی خوردگی و حفاظت از مواد، پردیس دریاساحلی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بندرعباس، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir

مقاله‌ی مروری

صفحه ۱۸ - ۴۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

چکیده

نفت خام سنگین به دلیل گرانروی بالا، استخراج و حمل‌ونقل دشواری دارد که نیازمند روش‌های کارآمد کاهش گرانروی است. این مطالعه مروری، تکنیک‌های مختلفی را با تمرکز بر نانوکاتالیست‌ها ارزیابی می‌کند. نانوکاتالیست‌هایی مانند نانوسیلیکا، نانونیکل، نانواکسید آهن و نانوکربن، کاهش چشمگیری در گرانروی (تا ۹۹ درصد در شرایط آزمایشگاهی) از طریق تسهیل واکنش‌های شیمیایی و تجزیه مولکولی نشان داده‌اند. کارایی آن‌ها با ترکیب با فناوری‌هایی مانند گرمایش مایکروویو و امواج فراصوت افزایش می‌یابد. با وجود پتانسیل بالا، نانوکاتالیست‌ها با چالش‌هایی نظیر پایداری در شرایط عملیاتی، هزینه‌های تولید بالا و مشکلات بازیابی مواجه هستند. روش‌های جایگزین مانند رویکردهای زیست‌فناوری با استفاده از امولسیون کننده‌های باکتریایی، راه‌حل‌های دوستدار محیط‌زیست با کاهش ۶۰-۸۰ درصد گرانروی ارائه می‌دهند. تحقیقات آینده بر بهبود پایداری کاتالیست‌ها، توسعه کاتالیست‌های زیست‌سازگار و یکپارچه‌سازی با هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی فرآیندها تمرکز خواهد داشت. این مطالعه مروری، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی روش‌های مبتنی بر نانوکاتالیست را برجسته می‌کند و بر لزوم تحقیقات مداوم برای غلبه بر چالش‌ها و تسهیل کاربرد صنعتی تأکید دارد.

کلید واژه‌ها: گرانروی، نفت خام سنگین، نانوکاتالیست، روش‌های نوین، سنتز نانوکاتالیست

۱. مقدمه

تقاضای روزافزون جهانی برای انرژی و محدودیت منابع نفت سبک، توجه به استخراج و استفاده از نفت خام سنگین را افزایش داده است. با توجه به اینکه ذخایر نفت معمولی به‌سرعت در حال کاهش هستند، کشورهای تولیدکننده نفت به دنبال بهره‌برداری از ذخایر نفت سنگین هستند که به دلیل گرانروی بالای آن، استخراج و حمل و نقل آن چالش‌برانگیز است [۱, ۲]. این چالش‌ها نه تنها بر هزینه‌های تولید تأثیر می‌گذارند، بلکه می‌توانند بر محیط‌زیست نیز اثرات منفی داشته باشند؛ بنابراین، کاهش گرانروی نفت سنگین به‌عنوان یک اولویت در صنعت نفت مطرح شده است.

کاهش گرانروی نفت سنگین می‌تواند مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد. این کاهش موجب افزایش جریان در خطوط لوله، کاهش هزینه‌های مربوط به تجهیزات پیچیده و بهبود کیفیت فرآورده‌های نفتی می‌شود [۳]. همچنین، با کاهش گرانروی، امکان تولید فرآورده‌های با ارزش‌تر و جلوگیری از خام‌فروشی فراهم می‌شود [۴, ۵].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که روش‌های مختلفی برای کاهش گرانروی نفت سنگین وجود دارد. این روش‌ها شامل گرمایش، رقیق‌سازی با حلال‌ها، تشکیل امولسیون آب و نفت و استفاده از نانوکاتالیست‌ها هستند. نانوکاتالیست‌ها مانند نانو سیلیس، نانو نیکل و نانو اکسید آهن به دلیل قابلیت‌های ویژه خود در تسهیل واکنش‌های شیمیایی و تغییر خواص فیزیکی نفت، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته‌اند [۶, ۷].

در این تحقیق، مطالعه‌ای جامع بر روی روش‌های مختلف کاهش گرانروی نفت سنگین انجام شده است. این مطالعه شامل بررسی نقاط قوت و ضعف هر یک از روش‌ها و تأثیر پارامترهای مختلف مانند دما، نوع حلال و اندازه فشار بر گرانروی می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجهی در گرانروی نفت سنگین با استفاده از نانوکاتالیست‌ها بوده است که در برخی موارد این کاهش حتی تا بالای ۹۹ درصد نیز گزارش شده است.

۲. بررسی کاربرد نانوذرات در کاهش گرانروی نفت سنگین

نانوذرات به‌عنوان کاتالیست‌ها در فرآیند کاهش گرانروی نفت خام سنگین نقش کلیدی ایفا می‌کنند. این نانوذرات به دلیل ابعاد کوچک و ویژگی‌های کشش سطحی بالا، قابلیت بالایی برای تعامل با مولکول‌های نفت دارند. این تعاملات منجر به افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی و کاهش انرژی فعال مورد نیاز برای این واکنش‌ها می‌شود. در نتیجه، گرانروی نفت کاهش یافته و جریان آن بهبود می‌یابد.

استفاده از نانوذرات به‌عنوان راهکاری مؤثر برای کاهش گرانروی نفت، به دلیل کارایی بالا و عدم نیاز به دماهای بالا که در روش‌های سنتی معمول است، مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. علاوه بر این، این روش می‌تواند هزینه‌ها را کاهش داده و بهره‌وری را در صنعت نفت افزایش دهد [۸].

۲-۱. تأثیر انواع نانوذرات بر گرانروی نفت سنگین

در مطالعه‌ای که توسط هارشکومار و همکاران [۹] انجام شده است، از سه نوع نانو ذره اکسید فلز (Fe_2O_3، CuO و NiO) برای بررسی تأثیر آن‌ها بر گرانروی نفت سنگین استفاده شد. این نانوذرات در سه غلظت مختلف (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی) مورد آزمایش قرار گرفتند. برای تمام مایعات مورد آزمایش، اندازه‌گیری‌های رئولوژیکی در چهار دمای مختلف از ۲۷ تا ۷۱ درجه سانتی‌گراد انجام شد.

کار آزمایشگاهی با دو نمونه نفت سنگین بسیار ویسکوز با گرانروی تقریباً ۷۷ و ۳۵۰ پاسکال-ثانیه در دمای محیط انجام شد. این مطالعه از نظر تنوع گرانروی نمونه‌های نفت سنگین بررسی شده بی‌سابقه است؛ نمونه‌های نفت سنگین مورد استفاده در این مطالعه ۹ تا ۴۰ برابر چسبناک‌تر از نمونه‌های مورد استفاده در مطالعات مشابه قبلی بوده‌اند.

افزودن نانوذرات منجر به کاهش قابل توجه گرانروی هر دو نمونه نفت سنگین شد. برای هر نوع از نانوذرات، ۵۰ تا ۷۰ درصد کاهش گرانروی مشاهده گردید. میزان کاهش گرانروی به انواع نانوذرات، غلظت آن‌ها و دمای سیال بستگی دارد. علاوه بر این، نتایج نشان‌دهنده این است که غلظت تأثیر زیادی در کاهش گرانروی دارد؛ زیرا در غلظت بهینه حداکثر کاهش گرانروی رخ می‌دهد.

۲-۲. تأثیر نانوذرات بر نقطه شروع رسوب آسفالتین[1]

نانوذرات به‌عنوان کاتالیست‌ها در فرآیند کاهش گرانروی نفت خام سنگین نقش کلیدی ایفا می‌کنند. تحقیقات آزمایشگاهی انجام شده توسط افضل و همکاران [۱۰] نشان داد که شش نوع نانوذره مختلف شامل Co_2O، Al_2O_3، Co_3O_4، Fe_3O_4، NiO و TiO_2 بر روی کاهش گرانروی نفت آسفالتین‌دار[2] اثرگذارند. درصدهای وزنی مختلف (۰/۰۵، ۰/۰۳، ۰/۰۱، ۰/۰۸ و ۰/۱) برای آزمون کاهش گرانروی استفاده شد و برای بررسی تأثیر بر نقطه شروع رسوب آسفالتین، درصد وزنی ۰/۰۱ مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج کار حاکی از آن بود که هر نوع خاص از نانوذرات عملکرد منحصر به فردی داشته و در درصد وزنی خاصی بهترین عملکرد را نشان می‌دهد. بهترین عملکرد را چهار نانوذره زیر داشته و ترتیب میزان کاهش گرانروی نانوذرات به ترتیب بیان شده در زیر می‌باشد:

$$(Fe)_3O > (Co)_2O_3 > (2NiOCO)_3O_4 > TiO_2$$

1. Asphaltene
2. Asphaltene-rich Oil

در حوزه نقطه شروع رسوب نیز به ترتیب نانوذرات زیر بهترین عملکرد را در به تأخیر انداختن نقطه شروع رسوب آسفالتین نشان داده‌اند:

$$NiO > TiO_2 > Co_2O > AL_2O_3 = (CO)_3O_4 > (Fe)_3O_4$$

افزودن نانوذرات به نفت موجب جداسازی آسفالتین و در نتیجه کاهش گرانروی می‌شود. برای این بررسی از دستگاه اندازه‌گیری گرانروی در دما و فشار مخزن استفاده شد. با قرار دادن نمونه نفت و افزودن نانوذرات به آن آزمایش انجام و گرانروی اندازه‌گیری شد و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، کاهش گرانروی در حضور نانوذرات را تأیید کرد.

عملکرد نانوذرات در جداسازی آسفالتین‌ها به دلیل سطح بالای تماس آن‌ها با مولکول‌های نفت است که منجر به کاهش تجمع آسفالتین‌ها و در نتیجه کاهش گرانروی می‌شود. این امر باعث بهبود جریان نفت در خطوط انتقال و فرآیندهای تولید می‌شود.

کاهش گرانروی نفت نه‌تنها باعث افزایش کارایی استخراج نفت می‌شود بلکه هزینه‌های تولید را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه آسفالتین‌ها یکی از عوامل اصلی ایجاد مشکلات در خطوط انتقال نفت هستند، استفاده از نانوذرات به‌عنوان راهکاری مؤثر برای مدیریت این مشکلات بسیار حائز اهمیت است.

۲-۳. روش ماکروویو با حضور نانوکاتالیزورها

روش ماکروویو با حضور نانوکاتالیزورها یکی از روش‌های نوین و کارآمد در کاهش گرانروی نفت سنگین است. این روش به دلیل توانایی تولید حرارت سریع و یکنواخت از طریق تابش امواج ماکروویو، به‌طور خاص در فرآیندهای شیمیایی و پالایشی مورد توجه قرار گرفته است. نانوکاتالیزور در این روش به‌عنوان یک عامل تسریع‌کننده عمل می‌کند و با تولید حرارت، تجزیه مولکول‌های نفت را تسهیل می‌نماید.

در این فرآیند، نفت در یک مخزن قرار داده شده و نانوکاتالیزور به آن اضافه می‌گردد. سپس، امواج ماکروویو به مخزن اعمال می‌شود و با تولید حرارت توسط نانوکاتالیزور، کاهش گرانروی صورت می‌گیرد. یکی از مزایای کلیدی این روش، عدم افزایش دمای نفت است که احتمال تشکیل رسوب در لوله‌های نفتی را کاهش می‌دهد.

این ویژگی باعث می‌شود که این روش به‌عنوان یک گزینه ایمن و کارآمد برای کاهش گرانروی نفت سنگین مطرح شود. همچنین، سادگی و کارایی این روش، آن را به یک انتخاب محبوب در صنعت نفت تبدیل کرده است.

نتایج تجربی نشان داد که حداکثر کاهش گرانروی زمانی حاصل می‌شود که محتوای آب ۵۰ درصد وزنی باشد. در این شرایط، تحت گرمایش مایکروویو با توان ۶۱۴ وات و دمای گرمایش مایکروویو ۶۸ درجه سانتی‌گراد و غلظت نانوکاتالیست نیکل ۰/۸ درصد وزنی، کاهش گرانروی به میزان ۹۶/۸۱ درصد ثبت شده است. این روش دارای مزایای زیر است:

- سرعت بالای واکنش: استفاده از گرمایش ماکروویو باعث تسریع در تجزیه مولکول‌های بزرگ نفت می‌شود.
- عدم نیاز به دماهای بالا: این روش امکان کاهش گرانروی را بدون نیاز به دماهای بالا که معمولاً در فرآیندهای سنتی لازم است، فراهم می‌کند.
- کاهش هزینه‌ها: با کاهش نیاز به تجهیزات پیچیده و زمان‌های طولانی واکنش، هزینه‌های کلی فرآیند کاهش می‌یابد.
- افزایش بهره‌وری: این روش می‌تواند بهره‌وری را در صنعت نفت افزایش دهد و مشکلات مربوط به رسوب آسفالتین‌ها را کاهش دهد [۱۱].

۲-۴. بررسی نانوذرات فلزی (فلزات واسطه)

نانوذرات فلزی، به‌ویژه فلزات واسطه مانند آهن، نیکل و مس، به‌عنوان کاتالیست‌ها در فرآیندهای کاهش گرانروی نفت سنگین مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات به دلیل ابعاد کوچک و ویژگی‌های خاص خود، قابلیت بالایی برای تعامل با مولکول‌های نفت دارند که منجر به افزایش سرعت واکنش‌های شیمیایی و کاهش انرژی فعال مورد نیاز برای این واکنش‌ها می‌شود. در نتیجه، گرانروی نفت کاهش یافته و جریان آن بهبود می‌یابد.

شکرلو و همکاران [۱۲] در تحقیق خود به بررسی نانوذرات فلزی از جمله آهن، نیکل، مس و میکرو ذره‌ی مس پرداخته‌اند. آن‌ها با اندازه‌گیری گرانروی نفت سنگین در دو دمای ۵۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و مقایسه نتایج به دست آمده از این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات، به مؤثرتر بودن ذرات میکرو نسبت به ذرات نانو در کاهش گرانروی دست یافتند.

این مطالعه نشان می‌دهد که نانوذرات فلزی به‌عنوان کاتالیست‌ها می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر روی خواص

رئولوژیکی نفت داشته باشند. استفاده از نانوذرات فلزی به‌عنوان کاتالیست در فرآیندهای شیمیایی، به‌ویژه در کاهش گرانروی نفت سنگین، یک رویکرد نوین و مؤثر است.

۳. بررسی نانوکاتالیست‌های خاص

۳-۱. نانو کاتالیست سیلیس

نانو سیلیس به‌عنوان یک ماده پرکاربرد در صنایع مختلف از جمله پوشش‌دهی، رنگ و رزین، بتن، لاستیک و پلاستیک شناخته می‌شود. این نانوذره به دلیل اندازه نانومتری ذراتش، خواصی متفاوت و بهتر نسبت به سیلیس معمولی دارد. به‌طور کلی، نانو سیلیس دارای خواصی مانند بالا بودن کشش سطحی، مقاومت بالا در برابر حرارت، مقاومت بالا در برابر شکستگی و سایش، قابلیت جذب رطوبت پایین و بالا بودن شفافیت است.

از کاربردهای نانو سیلیس شامل، بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن، افزایش مقاومت پوشش‌های رنگی و رزینی، پایداری لاستیک‌ها، بهبود خواص حرارتی پلاستیک‌ها اشاره کرد.

نانو سیلیس همچنین به‌عنوان کاتالیست در بسیاری از واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. این ماده به دلیل سطح بالایی که دارد، قابلیت جذب و فعالیت بالایی در واکنش‌های شیمیایی را دارا می‌باشد. نانوسیلیس به‌عنوان یک ماده آب‌دوست به راحتی در محلول‌های آبی حل می‌شود و به همین دلیل از آن به‌عنوان کاتالیست محلول در آب برای تسریع واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود.

ثابت و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای مربوط به استفاده از نانوسیلیس، نتایج کاهش گرانروی نفت خام فوق سنگین را بر اساس حرارت مستقیم و تشعشعات مایکروویو به‌عنوان منبع گرمایش غیرمستقیم، در حضور کاتالیزور ZSM-5 و همچنین سیلیس، خاک رس و نیکل سنتز کرده‌اند.

با توجه به یافته‌ها، نانوسیلیس بهترین کارایی را در میان سایر موارد نشان می‌دهد؛ زیرا باعث کاهش ۹۸/۳ درصدی گرانروی نفت خام فوق سنگین می‌شود. تقریباً ۶۰ درصد گرانروی نفت نمونه در ۹۰ ثانیه کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل نفت ارتقاء یافته نشان می‌دهد که افزودن نانوکاتالیست اضافی به نفت خام فوق سنگین به دلیل تجمع نانوذرات موجب کاهش کارایی می‌شود.

نانوسیلیس دارای سطح بالا و ساختار پلیمری است که باعث افزایش سطح تماس بین نفت و آب می‌شود. به این ترتیب، نفت به خوبی با آب ترکیب شده و گرانروی آن کاهش می‌یابد. همچنین، نانوسیلیس می‌تواند به‌عنوان جاذب برای مولکول‌های سنگین نفت عمل کند و آن‌ها را به مولکول‌های کوچک‌تر و سبک‌تر تبدیل کند. همین فرآیند باعث کاهش گرانروی نفت و افزایش قابلیت استخراج آن می‌شود.

روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل سیل‌زدایی شیمیایی، سیل آب و رانش گاز برای تصفیه غیرحرارتی هستند؛ در حالی که تزریق بخار غرق آبی آب گرم و احتراق در محل برای تصفیه حرارتی رایج هستند و اغلب استفاده می‌شوند.

۳-۲. نانو کاتالیست نیکل

نانوکاتالیست نیکل، نوعی نیکل نانومتری است که اندازه ذرات آن در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. پراکنش نانوذرات نیکل به‌صورت گسترده در صنایع مختلفی از جمله الکترونیک، پزشکی، فرآیندهای صنعتی و ... استفاده می‌شود. نانونیکل به دلیل خواص و ویژگی‌هایی مانند بالا بودن کشش سطحی، نسبت سطح به حجم بالا، فعالیت کاتالیستی بالا، انعطاف‌پذیری، مقاومت بالا به کرنش و کشش و همچنین خواص الکترونیکی و مغناطیسی بسیار ویژه، دارای کاربردهای متنوعی است.

به‌عنوان مثال، نانونیکل در تولید کاتالیست‌های نانو، باتری‌های لیتیوم-یون، سوزن‌های پزشکی، پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی، سطوح ضدعفونی‌کننده و همچنین در تولید فرآیندهای صنعتی مانند سنتز نانوذرات و تولید هیدروژن به کار می‌رود. به‌عنوان نوعی از نانوذرات، استفاده از نانونیکل باید با رعایت اصول ایمنی و بهداشتی مناسب صورت گیرد؛ زیرا این ذرات به دلیل اندازه کوچک خود ممکن است برای سلول‌ها و بافت‌های بدن آسیب‌هایی ایجاد کنند.

نانوذرات اکسید نیکل می‌توانند به‌عنوان یک عامل پایدارکننده برای امولسیون‌های نفت و آب استفاده شوند. با اضافه کردن این ذرات به امولسیون، پایداری آن افزایش یافته و جداسازی آن سخت‌تر می‌شود. به‌طور کلی، استفاده از نانوذرات اکسید نیکل می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد برای کاهش گرانروی نفت سنگین و پایدارسازی امولسیون‌های نفت و آب مورد استفاده قرار گیرد.

یکی از مزایای کاتالیزورهای نانوذرات، سطح نسبتاً بالای آن‌ها است که آن‌ها را برای گرمازدگی کاتالیستی ایده‌آل می‌کند؛ به گونه‌ای که کسر سبک نفت خام را افزایش داده و در نتیجه کیفیت کلی نفت سنگین را بهبود می‌بخشد.

استفاده از نانوذرات به‌عنوان مواد پایدارساز در نفت می‌تواند به کاهش گرانروی و بهبود جریان نفت کمک کند.

نانـوذرات به دلیـل اندازه کوچک‌تـر از انـدازه مولکول‌های نفـت، درون سیسـتم نفت خوب جذب شـده و مانـع از تراکم بیشتر مولکول‌های نفت در هم می‌شوند. این امر سبب کاهش گرانروی می‌شـود. ذرات نانـو نیکل با افزایش سـطح تماس با مایـع، پایـداری بیشـتری را فراهم کـرده و به‌عنـوان یک ماده جاذب جهت جذب مولکول‌های نفت عمل می‌کنند.

برای اسـتفاده در واکنـش آکواترمولیز، نفت فوق سـنگین در دمای ۲۰۰ درجه سـانتی‌گراد مورد اسـتفاده قرار می‌گیرد. کاتالیزور نانو نیکل نیز با روش‌های میکروامولسیونی تهیه شد. مشـخصات میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)[1] نشان داد که اندازه کاتالیزور نانو نیکل حدود ۲/۴ نانومتر است و کاهش گرانروی در حدود ۹۰/۳۶ درصد صورت گرفته است.

ترکیبـات پس از واکنش تغییـر کرده‌اند؛ همچنین کاهش آسـفالتین و رزیـن بـه ترتیـب ۵/۲۸ درصـد و ۶/۴۸ درصـد مشـاهده شـده اسـت. در حـالی کـه هیدروکربن‌های اشـباع و آروماتیـک ۶/۷۳ درصـد و ۵/۰۳ درصـد افزایـش یافتند. بر اسـاس این یافته‌ها، سعی شده اسـت تا نانوذرات اکسید نیکل بـا اسـتفاده از روش‌های رسـوب هم‌زمان به کمـک مایکروویو سنتز شوند.

اسـتفاده از $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ به‌عنـوان منبـع نیـکل بـا NH_4HCO_3 و اثـر نانـوذرات NiO بـر کاهـش گرانروی نفت سنگین پس از واکنش کاتالیزوری آب گرمازا حدود ۲۲ درصد گزارش شده است.

نانوکاتالیسـت‌های پایه نیکل می‌توانند به‌عنوان اهداکننده هیدروژن برای بهبود بیشتر ویژگی‌های نفت سنگین از طریق مکانیسم‌هایی که در واکنش گرمازا توضیح داده شد مؤثر واقع شـوند. ذرات نانو نیکل به دسـت آمده دارای قطر متوسط ۳/۶ نانومتر بودند.

در تحقیق فوق‌الذکر، نانو نیکل به‌عنوان کاتالیزور در واکنش گرمـازای نفت فوق سـنگین در دمای ۲۸۰ درجه سـانتی‌گراد مورد استفاده قرار گرفت. بهترین کاهش گرانروی نفت سنگین در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت حضور کاتالیزور نانو نیکل با کاهش گرانروی تا ۹۸ درصد به دست آمد.

عـلاوه بر کاهش گرانـروی، افزایش نسـبت H/C و کاهش میزان آسـفالتین، رزین و محتوای گوگرد نیز در نفت سنگین کاتالیزوری واکنش‌دهنده با آکواترمولیز مشاهده شد.

نانو نیـکل از طریـق آزمایـش میکروامولسیون مجـدداً در دمـای واکنش بسیـار پایین‌تـر از ۲۰۰ درجه سـانتی‌گراد نیز مورد استفاده قرار گرفت؛ اما عملکرد کاتالیزوری بالا با کاهش گرانروی بیش از ۹۰ درصد به دست آمد [۱۴].

پینزون و همـکاران [۱۵] نیز در مطالعه‌ای دیگر از نانوذره اکسید نیکل که در تولوئن توسـط حمام آلتراسونیک پراکنده شـده اسـت برای کاهش گرانروی نفت سـنگین حاوی درصد بالایی آسـفالتین اسـتفاده کردند که نتایج نشان داد با افزودن مقـدار کمی درصد وزنی نانوذرات، مقدار گرانروی نفت کاهش می‌یابد.

۳-۳. نانو کاتالیست اکسید آهن

نانو اکسیـد آهن یکی از انواع نانوذرات اسـت که از اکسید آهن به‌عنوان ماده اصلی تشـکیل شـده اسـت. ایـن نانوذره به علـت خـواص و ویژگی‌هـایی ماننـد انـدازه کوچـک، کشـش سـطحی بالا، فعالیت کاتالیسـتی، خواص مغناطیسی و خواص نـوری، در صنایع مختلفی ماننـد الکترونیـک، نانوالکترونیک، پزشـکی و صنایع شیمیـایی به‌عنوان یک مـاده پرکاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در صنایـع شیمیـایی، نانـو اکسیـد آهـن به‌عنـوان یـک کاتالیست در فرآیندهای شیمیایی مانند تولید آمونیاک، نفت شوینده‌ها و گاز سنتز استفاده می‌شود. همچنین، این نانوذرات به‌عنوان یک ماده رنگ‌زا در تولید رنگ‌های نانو، رنگ‌های ضد خـوردگی و رنگ‌های ضد خش در صنایـع رنگ و رزین نیز به کار می‌روند.

به‌طور کلی، دو شـکل نانوکاتالیسـت مبتنی بر آهن وجود دارد:

۱. هماتیت (α-Fe_2O_3)
۲. مگنتیت (Fe_3O_4)

مـواد مغناطیـسی که بـا گشـتاور مغناطیسی نشـان داده می‌شـوند، جـاذب خـوبی هسـتند و بـرای اسـتفاده به‌عنـوان کاتالیزور مناسب می‌باشند.

فـری و همکاران [۱۴] در یـکی از تحقیقات صورت گرفته تأثیـر کاتالیزور یـونی Fe^{3+} تحت روش سـنتز مـورد آزمایش قـرار دادند که از Fe_2O_3 یا Fe و اسید سـولفونیک معطر تهیه می‌شـود. آزمایش‌هـای کاتالیـزوری آکواترمولیز با اسـتفاده از

1. Transmission Electron Microscopy

نسبت نفت به آب ۷:۳ و ۰/۳ گرم کاتالیزور انجام شد. پس از واکنش، گرانروی نفت در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد حدود ۹۵ درصد کاهش یافت.

با تغییر ترکیبات پارامترها کیفیت بهتر نفت سنگین را نشان دادند؛ زیرا در آزمایش‌ها سطح هیدروکربن‌های اشباع و معطر و نسبت H/C افزایش یافت، در حالی که در رزین و آسفالتین این مقادیر کاهش یافتند. نانوسیال Fe_3O_4 مبتنی بر آب تأثیر مثبتی بر افزایش راندمان و کاهش گرانروی نفت سنگین نسبت به استفاده از دیگر نانوذرات نشان داده است.

استفاده از نانوکاتالیست آهن به‌عنوان یک روش جدید و کارآمد برای کاهش گرانروی نفت محسوب می‌شود. در این روش، ذرات نانو آهن به‌عنوان کاتالیست در نفت اضافه می‌شوند که باعث تشکیل پلیمرهایی در نفت می‌شود که گرانروی آن را کاهش می‌دهند. همچنین، نانوکاتالیست آهن به‌عنوان یک ماده اکسیداسیون و ضد حرارت عمل کرده و باعث افزایش عمر مفید نفت می‌شود.

این روش به دلیل کارآمدی و سادگی اجرای آن، به‌عنوان یک روش پرکاربرد در صنعت نفت شناخته شده است. تحقیقات در مورد انواع روش‌های کاهش گرانروی نفت خام سنگین نشان می‌دهد که اکثر روش‌ها پرهزینه، با ایمنی پایین و نیازمند تجهیزات زیاد و حجیم هستند که این موارد بیشتر ناشی از دما و فشار بسیار بالای این روش‌ها می‌باشد.

حال به بررسی تحقیقات صورت گرفته در حوزه استفاده‌ی هم‌زمان از امواج فراصوت به همراه نانوکاتالیست اکسید آهن پرداخته می‌شود. در این روش، امواج فراصوت به نفت اعمال شده و باعث شکسته شدن پیوندهای مولکولی نفت می‌شوند. همین موضوع باعث کاهش گرانروی نفت شده و جریان آن را بهبود می‌بخشد.

این روش به دلیل کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی در صنعت نفت و گاز، جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی است. با توجه به رویکردهای اصلی صنعت نفت مبنی بر استفاده از روش‌های بهره‌برداری با حداقل تخریب و آلودگی زیست‌محیطی و همچنین هزینه عملیاتی پایین، نیاز به استفاده از تکنولوژی‌های جدید مانند امواج فراصوت در این صنعت مورد توجه است.

طبق نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشات صورت گرفته بر روی نفت، تابش امواج فراصوت با افزایش دمای نفت و تغییر در ساختار مولکولی اجزاء سازنده آن باعث کاهش گرانروی نفت خام شده است.

استفاده ترکیبی از این روش و نانوکاتالیست اکسید آهن نشان‌دهنده تأثیر مثبت مشترک آن‌ها بر کاهش گرانروی است[۱۶]. این نانوذرات با توجه به اندازه کوچک خود قابلیت نفوذ بیشتری دارند که منجر به افزایش سطح تماس با نفت شده و باعث کاهش گرانروی آن می‌شوند. همچنین، این نانوذرات می‌توانند با تولید حرارت در فرآیند اصلاح نفت، باعث کاهش گرانروی آن شوند.

۳-۴. نانوکاتالیست کربن

نانوکربن یک نوع کربن نانومتری است که اندازه ذرات آن در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. این نانوکربن‌ها انواع مختلفی دارند، مانند نانو لوله‌های کربنی و گرافن. نانوکربن به دلیل خواص و ویژگی‌هایی مانند کشش سطحی بالا، مقاومت بالا در برابر کشش، هدایت حرارتی و الکتریکی بالا، استحکام و سختی بالا، قابلیت انعطاف‌پذیری و وزن کم، در صنایع مختلفی از جمله الکترونیک، پزشکی، مهندسی مواد و ... استفاده می‌شود.

به‌عنوان مثال، نانو لوله‌های کربنی در ساخت باتری‌های لیتیومی، مواد کاتالیستی، ساخت سوئیچ‌های الکترونیکی و نانوساختارهای مدارهای الکترونیکی به کار می‌روند. همچنین گرافن در تولید الکترودهای بسیار قوی، پوشش‌های شفاف الکترونیکی، حسگرهای نانو، لامپ‌های الکتریکی و مواد کاتالیستی استفاده می‌شود.

به‌عنوان نوعی از نانوذرات، استفاده از نانوکربن باید با رعایت اصول ایمنی و بهداشتی مناسب صورت گیرد؛ زیرا این ذرات به دلیل اندازه کوچک خود ممکن است برای سلول‌ها و بافت‌های بدن آسیب‌های جدی ایجاد کنند. نانوکربن یا نانو لوله کربنی، یکی از مواد نانوساختار است که از تک‌لایه‌های کربنی به شکل لوله تشکیل می‌شود. برخی از کاربردهای نانوکربن شامل الکترونیک، نانو الکترودها، کاتالیزورها، ترموکوپل‌ها، مواد حرارتی، مواد ساختمانی و پوشش‌های ضدزنگ است.

ثابت و همکاران [۱۷] در تحقیق دیگری از روش مایکروویو در حضور نانوکاتالیست کربن استفاده کردند که کاهش گرانروی به میزان ۹۹/۷ درصد گزارش شده است. البته این روش‌ها به علت شرایط پیچیده و تجهیزات خاص هنوز تجاری‌سازی نشده‌اند و تحقیقات بر روی آن‌ها ادامه دارد.

نانوکاتالیست کربن به دلیل سطح تماس بالایی که دارد می‌تواند با مولکول‌های نفت تعامل کند و اندازه ذرات نفت

را کاهش دهد. با کوچک شدن اندازه ذرات نفت، گرانروی آن نیز کاهش می‌یابد و رفتار رئولوژیکی آن بهبود می‌یابد. همچنین با افزایش سطح تماس نانوکاتالیست کربن با نفت، قابلیت استخراج نفت از مخزن بهبود می‌یابد.

به‌علاوه، استفاده از نانوکاتالیست کربن به دلیل اندازه کوچک آن می‌تواند به‌عنوان یک روش ارتقاء درجا محسوب شود؛ زیرا تزریق نانوکاتالیست کربن به داخل مخزن نفت به‌صورت مستقیم در محل استخراج نفت انجام می‌شود و نیازی به حمل و نقل نفت به خارج از مخزن و اعمال فشار بر روی آن نیست.

در این روش، نانوکاتالیست کربنی با استفاده از روش‌های شیمیایی تهیه می‌شود. سپس نفت با نانوکاتالیست کربنی مخلوط شده و در یک واکنش‌گر قرار داده می‌شود. در این واکنش، با استفاده از گرمایش مایکروویو، نانوکاتالیست به‌سرعت گرم می‌شود و این گرما به نفت منتقل می‌شود. این گرما باعث تجزیه مولکول‌های بزرگ نفت به مولکول‌های کوچک‌تر می‌شود و در نتیجه گرانروی نفت کاهش می‌یابد. این روش دارای مزایای زیر است:

- سرعت بالای واکنش: با استفاده از گرمایش مایکروویو، نانوکاتالیست کربنی به‌سرعت گرم می‌شود و به تبدیل نفت به مولکول‌های کوچک‌تر کمک می‌کند.
- کاهش هزینه: این روش هزینه کمتری نسبت به روش‌های دیگر دارد.
- عدم نیاز به مواد شیمیایی خطرناک: در این روش از مواد شیمیایی خطرناک استفاده نمی‌شود که باعث ایمن‌تر شدن فرآیند می‌شود.

در نتیجه، استفاده از نانوکاتالیست کربنی با گرمایش مایکروویو می‌تواند روشی اقتصادی و امن برای کاهش گرانروی نفت باشد. روش‌های فعلی معمولاً به دماهای بالا و مدت زمان واکنش طولانی نیاز دارند که ممکن است باعث ایجاد آلودگی‌های جدی محیطی شوند.

با استفاده از نانوکاتالیست‌های کربنی، می‌توان نفت خام سنگین را در دمای نسبتاً پایین حدود ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به نفت سبک‌تر ارتقا داد. دمای نفت خام با حرارت دادن مایکروویو افزایش یافت. این روش دارای مزایای زیر است:

- کاهش گرانروی بیش از ۹۶ درصد
- زمان واکنش کوتاه (کم‌تر از ۱ ساعت)
- دمای مورد نیاز پایین
- زمان رگرسیون گرانروی[1] طولانی

به دلیل این مزایا، ارتقاء نفت خام سنگین به نفت سبک می‌تواند ارزان‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست باشد [۱۸].

۳-۵. نانو کره‌های فریت مس مغناطیسی (CFNS)[2]

فریت مس یک ترکیب شیمیایی است که از مس و آهن تشکیل شده و با فرمول شیمیایی $CuFe_2O_4$ شناخته می‌شود. این ترکیب یکی از فریت‌ها است که با استفاده از روش‌های شیمیایی و یا حرارتی تولید می‌شود. فریت مس به دلیل خواص و ویژگی‌هایی مانند مقاومت بالا در برابر خوردگی، مقاومت بالا در برابر حرارت، ویژگی‌های مغناطیسی، خواص نیمه‌رسانایی و قابلیت استفاده در صنایع مختلفی مانند الکترونیک، صنایع غذایی، پوشش‌دهی و... به کار می‌رود.

همچنین، نانوکره‌های فریت مس مغناطیسی (CFNS) به‌عنوان کاتالیست برای تشکیل پلیمرهایی در نفت عمل می‌کنند که گرانروی آن را کاهش می‌دهند.

فریت مس به‌عنوان یک ماده ضد اکسیداسیون و ضد حرارت عمل کرده و باعث افزایش عمر مفید نفت می‌شود. این روش به دلیل کارآمدی و سادگی اجرای آن، به‌عنوان یک روش پرکاربرد در صنعت نفت شناخته شده است. در یک تحقیق با استفاده از روش سولوترمال[3]، CFNS سنتز شده است. آزمایش‌های جذب و دفع تأیید کردند که بیشتر آسفالتین‌های جذب‌شده می‌توانند برای استفاده مجدد از نانوذرات حذف شوند.

در طول آزمایش‌های رئولوژی، نانوذرات CFNS در سیکل اول با غلظت‌های مختلف از ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر ارزیابی شدند که منجر به کاهش گرانروی ۱۸ درصدی در غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر شدند. نانوذرات SiO_2 برای مسائل مقایسه مورد ارزیابی قرار گرفتند و نتایج مشابهی در مورد کاهش گرانروی به دست آمد.

پس از اندازه‌گیری، CFNS با آهنربا برداشته شد، با تولوئن شسته شد و برای چرخه دوم کاهش گرانروی خشک شد. آزمایش رئولوژی برای بار دوم با غلظت ثابت ۵۰۰ میلی‌گرم

1. Viscosity Regression
2. Magnetic Copper Ferrite Nanospheres
3. Solvothermal method

در لیتـر انجام شـد و تفاوت‌های جزئی نسـبت بـه سیکل اول مشاهده گردید.

در نهایت، تغییرات در ریزساختار نفت فوق سنگین پس از افزودن CFNS با توجه به کاهش قابل توجه مدول الاستیک و ویسـکوز مشاهده شد. سیالات مختلفی مانند نفت خام سبک، نفتـا، دیـزل و ... همچنین گازهـا (عمدتاً CO_2) معمـولاً برای کاهش گرانروی نفت خام اسـتفاده می‌شـوند. با این حال، این حلال‌ها می‌توانند بی‌ثباتی آسـفالتین‌ها را ایجاد کنند و بیشتر تشکیل خطوط لوله نفت را مسدود کنند.

در روشی کـه از عوامـل کاهش‌دهنده گرانـروی مختلف بر مبنای ترپلیمرها استفاده شد، با کاهش ۶۰ درصدی گرانروی بـا دوز ۳ درصـد V/V اسـتفاده کرده‌انـد. علاوه بر ایـن، اخیراً استفاده از نانوذرات و نانو سیال‌ها را برای کاهش گرانروی نفت سنگین ارزیابی کرده‌اند.

نتایـج این مطالعه نشـان داد که اسـتفاده از نانـو کره‌های فریـت مـس (CFNS) قادر بـه افزایش جریـان و تحرک نفت خام سـنگین است و تکنیکی مکمل برای فرآیندهای معمولی با عملکرد امیدوارکننده بـرای صنعت نفت و گاز ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که نانوذرات SiO_2 هشت نانومتر می‌توانند به‌طور انتخابی آسفالتین‌ها و رزین‌ها را روی سطح خود جذب کننـد که منجر بـه تغییـرات در دانه‌های آسـفالتین و کاهش بیشتر گرانروی می‌شود.

وقـتی غلظـت از ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر فراتـر رود، تأثیر بر کاهـش گرانروی ناچیز اسـت و افزایش جـزئی در گرانروی ممکن اسـت در مخلوط نفت سـنگین و CFNS ظاهر شـود. بر اسـاس تئوری گرانروی انیشـتین، تجمع باعث می‌شـود که ذرات به‌عنـوان جامـدات بزرگ‌تـر رفتـار کننـد؛ برهمکنش با آسفالتین‌ها را کاهش داده و باعث افزایش گرانروی می‌شود.

قابـل ذکـر اسـت کـه در ۵۰۰ میلی‌گـرم در لیتـر، کاهش گرانروی ۱۸ درصد به دسـت آمد که بهترین عملکرد CFNS را در طیف وسیعی از غلظت‌های ارزیابی شـده نشـان می‌دهد. این یک نتیجه امیدوارکننده در جسـتجوی طراحی نانو سیال است که قادر به افزایش فرآیندهای حمل و نقل باشد.

علاوه بر ایـن، این فرآیند ممکن اسـت نهایتاً باعث کاهش مصـرف رقیق‌کننده‌ها بـا صرفه‌جویی اقتصادی و انرژی شـود. نتایـج قبلی نشـان داد که بهتریـن غلظت به‌دسـت‌آمده برای استفاده از نانوذرات نفت سـنگین در ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر عمدتاً برای نانوذرات SiO_2 بود [۱۹].

بـه طـور خلاصه، (جـدول ۱) نشـان می‌دهد کـه نانوذرات مختلـفی مانند نیـکل (Ni)، اکسید آهـن (Fe_2O_3) و نانوآهن مغناطیـسی (Fe_3O_4) با اسـتفاده از روش‌های سـنتزی مانند میکروامولسیون، هم‌رسـوبی با مایکروویو، یا ترکیب با زئولیت، توانسـته‌اند گرانـروی نفت سـنگین را تـا ۹۸/۲ درصد کاهش دهند. عملکرد این نانوکاتالیزورها به اندازه ذرات (۶/۳ تا ۱۳۵ نانومتر) و روش سـنتز مسـتحکم شـده با فناوری‌هـایی مانند مایکروویو بسیار وابسته است [۱۴].

جدول ۱: خلاصه‌ای از نانوذرات مختلف در کاهش گرانروی نفت سنگین [۱۴]

نانوذره	روش سنتز	اندازه ذرات	عملکرد کاتالیزوری	مرجع
Ni	میکروامولسیون[1]	۶/۳ نانومتر	کاهش گرانروی: ۹۸/۲ درصد	[۲۰]
		۴/۲ نانومتر	کاهش گرانروی: ۹۰/۳۶ درصد	[۷]
NiO	هم رسوبی[2]	۶۰-۷ نانومتر	کاهش گرانروی: ۲۲ درصد	[۲۱]
α-Fe_2O_3	مخلوط کردن اکسید آهن (Fe_2O_3) با اسید سولفونیک آروماتیک	-	حداکثر کاهش گرانروی تا ۹۳/۳ درصد	[۲۲]
		-	کاهش گرانروی: ۹۵/۶ درصد	[۲۳]
α-Fe_2O_3/zeolite	هم رسوبی به کمک مایکروویو + تکلیس	۱۳۵ نانومتر	کاهش گرانروی: ۸۹ درصد	[۲۴]
Fe_3O_4	هم رسوبی به کمک مایکروویو	۴۳ نانومتر	کاهش گرانروی: ۳۰ درصد	[۲۴]
Fe_3O_4/zeolite	هم رسوبی به کمک مایکروویو	۹۶ نانومتر	کاهش گرانروی: ۹۲ درصد	[۲۶]

1. Microemulsion
2. Co-precipitation

۴. روش‌های کاهش گرانروی با استفاده از حلال‌ها و رقیق‌کننده‌ها

۴-۱. استفاده از ترکیب حلال و نفتا

نفتا یک نوع ماده حلال است که از ترکیب هیدروکربن‌های نفتی تولید می‌شود. این ماده به دلیل خواص و ویژگی‌هایی مانند آب‌رسانی، قابلیت حلالیت، قابلیت اشتعال بالا و خواص خنثی‌کنندگی، در صنایع مختلفی مانند صنایع رنگ و رزین، پوشش‌دهی، صنایع چاپ، صنایع نساجی و ... به‌عنوان یک ماده پرکاربرد استفاده می‌شود. همچنین، به دلیل خواص اشتعال‌پذیر و قابلیت حرکت و جریان، در صنایع نفت و گاز به‌عنوان یک ماده پایه برای تولید سوخت‌های مختلف مانند بنزین و دیزل مورد استفاده قرار می‌گیرد.

دهقانی و همکاران [۲۷] در تحقیقی به بررسی ترکیب حلال و نفتا پرداخته‌اند. در این روش، مقدار زیادی حلال مورد نیاز است که می‌تواند رسوب آسفالتین ایجاد کند و خطرات زیست‌محیطی ناشی از تولید گازهای آلاینده را به همراه داشته باشد. به‌طور کلی، ترکیب حلال و نفت باعث کاهش گرانروی نفت می‌شود، زیرا حلال‌ها به‌عنوان مواد جداسازی عمل کرده و پلیمرهای طولانی را از هم جدا می‌کنند. این فرآیند منجر به کاهش گرانروی و بهبود جریان نفت می‌شود.

به‌عنوان مثال، افزودن حلال‌هایی مانند بنزین، هگزان، تتراهیدروفوران و اتانول به نفت می‌تواند به کاهش گرانروی نفت منجر شود. با افزایش غلظت حلال، گرانروی نفت کاهش می‌یابد. با این حال، باید توجه داشت که استفاده از حلال‌های خاص ممکن است باعث تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی نفت شود؛ لذا انتخاب حلال مناسب برای ترکیب با نفت باید با دقت و با توجه به شرایط خاص انجام گیرد.

نفتا نیز به‌عنوان یک حلال قدرتمند برای کاهش گرانروی نفت شناخته می‌شود. این ماده باعث جداسازی پلیمرهای طولانی در نفت شده و در نتیجه گرانروی آن را کاهش می‌دهد. همچنین، نفتا به‌عنوان یک ماده جداسازی عمل کرده و موجب جداسازی آب و دیگر مواد جامد در نفت می‌شود که این امر نیز به کاهش گرانروی نفت کمک می‌کند. در مجموع، نفتا باعث بهبود جریان نفت و کاهش گرانروی آن می‌شود.

دهقانی و همکاران [۲۷]، از روش رقیق‌سازی با استفاده از حلال‌های صنعتی و میعانات گازی بهره برده‌اند. در این تحقیق، گرانروی دو نمونه نفت خام سنگین ایران با اختلاط با حلال‌ها در دماهای مختلف اندازه‌گیری شده است. رقیق شدن هر دو نمونه نفت با تولوئن و هپتان منجر به کاهش گرانروی شد؛ اما اثر آن‌ها در غلظت‌های بالاتر رقیق‌کننده کمتر معنی‌دار شد.

به دلیل تشکیل پیوندهای هیدروژنی، افزودن متانول به نفت خام سنگین منجر به افزایش گرانروی شد؛ اما افزودن میعانات گازی منجر به کاهش گرانروی هر نمونه گردید. میعانات گازی تأثیر بیشتری بر روی نفت سنگین‌تر داشته‌اند؛ هرچند که در دماهای بالاتر اثر آن کاهش یافته است. رقیق شدن با نفتا نیز گرانروی نفت سنگین را به همان روش n-هپتان و تولوئن کاهش داده است.

دوست و همکاران [۲۸] در تحقیقی دیگر اثر تلفیق امواج مافوق صوت و حلال‌ها بر کاهش گرانروی نفت کوره را بررسی کردند. ابتدا اثرات امواج التراسونیک و حلال استونیتریل در حالت تک فرکانس مطالعه شد. شرایط بهینه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، غلظت حلال ۵ درصد و زمان پرتودهی ۵ دقیقه تعیین گردید. تقطیر و طیف API نیز به‌منظور ارزیابی کیفیت نفت کوره انجام شد.

به‌منظور بررسی فرآیند سبک‌سازی و شکست پیوندهای هیدروکربنی نفت کوره، آنالیز API صورت گرفت. نتایج نشان داد که حلال تأثیر چندانی بر این فرآیند ندارد؛ اما امواج آلتراسونیک باعث افزایش شاخص در منحنی تقطیر و کاهش دمای تقطیر نمونه پرتودهی شده نسبت به نمونه اصلی گزارش گردید. بدین ترتیب نقطه‌جوش اولیه ۸ درجه سانتی‌گراد و نقطه‌جوش نهایی ۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یافتند.

طیف FT-IR نشان داد که شکست و کوتاه شدن زنجیره‌های هیدروکربنی در اثر پرتودهی امواج آلتراسونیک صورت گرفته است. تمامی آنالیزها تأییدکننده سبک‌سازی و شکست پیوندهای هیدروکربن بودند.

تلفیق امواج مافوق صوت و حلال‌ها در فرآیند کاهش گرانروی نفت کوره مؤثر است. در این فرآیند، امواج مافوق صوت باعث تولید بلورهای کوچک‌تر از حلال در نفت می‌شوند. این بلورها به‌عنوان یک ماده فعال در نفت عمل کرده و باعث کاهش گرانروی آن می‌شوند. همچنین حرارت تولید شده توسط امواج مافوق صوت باعث افزایش دمای نفت و کاهش گرانروی آن می‌شود.

حلال‌ها نیز با تغییر خواص سطحی نفت موجب کاهش گرانروی آن می‌شوند؛ بنابراین، تلفیق امواج مافوق صوت و حلال‌ها در فرآیند کاهش گرانروی نفت کوره می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های نفت‌کشی مورد استفاده قرار گیرد.

۴-۲. تأثیر امواج مافوق صوت در ترکیب با حلال‌ها

تغییـرات در گرانـروی و میزان سـولفور نفت خـام تحت تأثیر حفـرمزایی کـه یک اثرگـذاری مهـم در امواج فراصوت محسـوب می‌گردد، اتفاق می‌افتد. این امواج با فشردگی و انبساطی که در نفت ایجاد می‌کنند، باعث افزایـش دما و تغییراتی در مولکول‌های نفت می‌شوند. اثر تابش امواج فراصوت بر روی ذرات آسفالتین یکی دیگر از مواردی است که باعث تغییر و شکسته شدن این ذرات می‌گردد.

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشـان داده‌اند که استفاده از امواج فراصوت سـبب خرد شدن ذرات آسفالتین می‌گردد و این تغییر شکل برگشت‌ناپذیر است [۲۹]. اثر امواج آلتراسونیک بر گرانروی دینامیکی نفت حاوی ذرات آسفالتین در خطوط انتقال، به‌عنوان یک روش فیزیکی، می‌تواند به کاهش گرانروی نفت کمک کند. بـا اعمال امواج آلتراسـونیک، ذرات آسـفالتین در نفت به‌صورت موقت جدا شـده و گرانروی نفت کاهـش می‌یابد. همچنین، این روش می‌تواند بهبود عملکرد خطوط انتقال نفت را تضمین کند و هزینه‌های تولید و جداسازی نفت را کاهش دهد.

بـا توجه به اینکـه امواج آلتراسـونیک برای جداسـازی نفت و آب نیز اسـتفاده می‌شوند، می‌توان از این روش برای بهبود فرآیند جداسازی نفت و آب نیز بهره برد. این ویژگی به‌ویژه در شرایطی که نیاز به جداسازی مؤثر آب از نفت وجود دارد، حائز اهمیت است.

۵. روش‌های کاتالیستی کاهش گرانروی

۵-۱. کاتالیست‌های محلول در آب

کاتالیست محلول در آب، یک ماده است که قابلیت حل شدن در آب را دارد و به‌عنوان کاتالیست در واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. بعضی از کاتالیست‌های محلول در آب شامل اسیدها، بازها و فلزات هستند. این کاتالیست‌ها در واکنش‌های شیمیایی مانند افزایش سرعت واکنش، کاهش انرژی فعال سیستم، انعطاف‌پذیری ماده و بهینه‌سازی شرایط واکنش مؤثر هستند. کاتالیست در واقع یک ماده است که سرعت واکنش در یک واکنش شیمیایی را افزایش می‌دهد، اما پس از اتمام واکنش به شکل اصلی بازیابی می‌شود. کاتالیست‌های محلول در آب در بسیاری از صنایع شیمیایی و پزشکی استفاده می‌شوند. در (جدول ۲)، نتایج مطالعات مختلفی که به بررسی تأثیر کاتالیست‌های محلول در آب برای کاهش گرانروی و ارتقاء کیفیت نفت خام سنگین پرداخته‌اند، به‌طور خلاصه آورده شده است [۳۰].

جدول ۲: خلاصه‌ای از کاتالیست‌های محلول در آب در کاهش گرانروی نفت خام [۳۰]

نفت خام	کاتالیست	شرایط واکنش	نتایج آزمایش‌های ارتقاء کیفیت	مرجع
Bitumen	Ru Fe	۳۷۵ تا ۴۱۵ درجه سانتی‌گراد	گوگردزدایی ۲۱ درصد، گوگردزدایی ۱۸ درصد	[۳۱]
Liaohe HO	Transition metals	۱۶۰ تا ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۰ تا ۲۵ مگا پاسکال، ۲۴ تا ۲۴۰ ساعت	کاهش گرانروی تا ۹۰ درصد، اثر ارتقاء کاتالیزوری: $Mo^{2+}>Co^{2+}>Fe^{2+}>Ni^{2+}>Al^{3+}>Cu^{2+}>Zn^{2+}>Mn^{2+}$ هرچه زمان تیمار طولانی‌تر باشد، اثر بهتر است.	[۳۲]
HO	Ni^{2+} Fe^{2+}	۲۲۰ درجه سانتی‌گراد	اثر ارتقاء کاتالیزوری سولفات آهن بهتر از سولفات نیکل است، اما به‌خوبی کاتالیزورهای محلول در روغن از همان گروه نیست.	[۳۳]
GPC HO	$[BMIM][FeC_{14}]$	۷۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد، ۱/۰ درصد وزنی، ۷۲ ساعت، ۳ تا ۳/۵ مگا پاسکال	کاهش گرانروی تا ۷۹ درصد	[۳۴]
Venezuela Bitumen	Ni (II) sulfate	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ دقیقه	کاهش گرانروی تا ۹۰ درصد	[۳۵]
Peace River bitumen Cold Lake bitumen	Ru (III) chloride	۴۱۵ درجه سانتی‌گراد، ۳ ساعت	کاهش گرانروی PRB تا ۹۸/۶ درصد، حذف گوگرد ۳۶/۱ درصد، کاهش محتوای آسفالتن ۴۵/۲ درصد، کاهش گرانروی CLB تا ۹۹/۲ درصد، حذف گوگرد ۳۱/۸ درصد، کاهش محتوای آسفالتن ۲۹/۲ درصد	[۳۶]
Yumen HO	Transition metal complexes	۱۸۰ درجه سانتی‌گراد	کاهش گرانروی بیش از ۷۰ درصد	[۳۷]
Tetrahydrophene; Thiophene	Al (III) sulfate	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۳/۴ مگا پاسکال، ۲۸ روز	حذف گوگرد THT ۶۴ درصد، حذف گوگرد TP ۵۵ درصد	[۳۸]
Tetrahydrophene; Thiophene	VO (II) salts	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۸ روز	حذف گوگرد ۴۶ درصد	[۳۹]

۵-۲. کاتالیست‌های محلول در نفت

کاتالیست محلول در نفت، یک ماده کاتالیستی است که در محلول‌های نفتی استفاده می‌شود تا فرآیندهای شیمیایی را تسریع کند. این کاتالیست‌ها معمولاً شامل فلزات ترنسیشنال هستند که با رفتارهای شیمیایی خود به فرآیندهای نفت و گاز کمک می‌کنند. استفاده از کاتالیست‌های محلول در نفت، امکان آزاد شدن افزایشی از برخی مواد در دسترس دارد و بهبود در سیستم تولید نفت دارایی‌ها مانند تزریق آب و اکسیژن است.

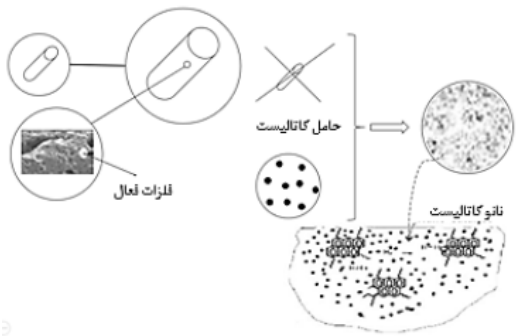
در (جدول ۳)، نتایج مطالعات مختلفی که به بررسی تأثیر کاتالیست‌های محلول در نفت برای کاهش گرانروی نفت خام سنگین پرداخته‌اند، به‌طور خلاصه آورده شده است [۳۰].

جدول ۳: خلاصه‌ای از کاتالیست‌های محلول در نفت در کاهش گرانروی نفت خام [۳۰]

نفت خام	کاتالیست	شرایط واکنش	نتایج آزمایش‌های ارتقاء کیفیت	مرجع
HO	Ni Co	۱۸۰ درجه سانتی‌گراد	کاهش گرانروی ۹۳/۶ درصد و حذف گوگرد ۸۷/۵ درصد	[۴۰]
HO	Ni	۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۸ تا ۱۰ مگا پاسکال، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۸۷ درصد و حذف گوگرد ۸۶/۹ درصد	[۴۱]
Bitumen	Aromatic copper sulfonic acid complex	۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۹۵/۵ درصد	[۴۲]
EX-35 EHO	Iron sulfonate aroma	۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، ۶ تا ۷ مگا پاسکال، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۹۰/۷ درصد	[۲۲]
Fengcheng DF2005 HO	Gemini	۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۶ تا ۷ مگا پاسکال، ۱ ساعت	کاهش گرانروی ۹۹/۳ درصد	[۴۳]
HO	Molybdenum oleate	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۹۰ درصد	[۴۴]
HO	Molybdenum oleate + Emulsifier	۲۰۰ درجه سانتی‌گراد + امولسیفایر، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۹۰ درصد	[۴۵]
Omani HO	Nickel-molybdenum oleate	۲۷۷ درجه سانتی‌گراد، اتمسفر نیتروژن	کاهش گرانروی ۶۹ درصد	[۴۶]
HO	Fe2+ with toluenesulfonic acid as ligand	۲۰۰ درجه سانتی‌گراد	همه شش نمونه به کاهش گرانروی ۹۰ درصد دست یافتند	[۴۷]

۵-۳. کاتالیست‌های پراکنده[1]

کاتالیست پراکنده به یک نوع از کاتالیست‌ها اطلاق می‌شود که در حالت غیرمتمرکز و یا پراکنده بر روی سطح متخلخل یک ماده قرار دارد. این نانوکاتالیست‌ها به جای قرار گرفتن روی پایه کاتالیست در سیال فرایندی مانند نفت خام سنگین باقیمانده سنگین نفتی پخش می‌شوند (شکل ۱) و به علت ساختار نانویی آن‌ها واکنش بر روی سطح مولکول‌های سنگین انجام می‌شود. کاتالیست‌های پراکنده در بسیاری از فرآیندهای شیمیایی و صنعتی به کار می‌روند[۱۷]. در (جدول ۴)، نتایج مطالعات مختلفی که به بررسی تأثیر کاتالیست‌های پراکنده برای کاهش گرانروی نفت خام پرداخته‌اند، به‌طور خلاصه آورده شده است[۳۰].



شکل ۱: نحوهٔ عملکرد کاتالیست‌های پراکنده [۱۷]

1. Dispersed catalysts

جدول ۴: خلاصه‌ای از کاتالیست‌های پراکنده در کاهش گرانروی نفت خام[۳۰]

نفت خام	کاتالیست	شرایط واکنش	نتایج آزمایش‌های ارتقاء کیفیت	مرجع
Liaohe EHO	Ni	۲۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۴ ساعت، ۶/۴ مگا پاسکال، ۱۰ میلی‌لیتر کاتالیزور	کاهش گرانروی ۹۴ درصد	[۴۷]
HO	K3PMo12O40 Iron naphthenate	پیرولیز هیدروترمال	کاهش گرانروی ۷۹ درصد، کاهش گرانروی ۹۳ درصد	[۴۸]
Venezuelan HO	Amine chelates	۶۰ تا ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۰ تا ۲۰۰۰ ppm	حداکثر کاهش گرانروی ۶۳ درصد	[۴۹]
Athabasca bitumen	Ni–W–Mo submicronic crystals	۳۲۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۳/۴۵ مگا پاسکال، ۳ تا ۷۰ ساعت	کاهش گرانروی ۹۹/۲ درصد، حذف گوگرد ۳۷/۵ درصد	[۵۰]
HO	Biofro-magnetic catalysts Surface upgrading with Pd	۴۲۵ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ دقیقه	کاهش گرانروی ۹۷/۸ درصد، کاهش بازده کک ۳/۳ درصد، پس از افزودن پالادیوم، کاهش گرانروی ۹۹/۴ درصد، کاهش بازده کک ۷ درصد	[۵۱]

۵-۴. کاتالیست‌های فوق پراکنده

کاتالیست فوق پراکنده یا اسپوت کاتالیست[1]، یک نوع کاتالیست است که در آن، حجم کمی از ماده کاتالیستی در سطح یک ماده پایه فراوان قرار دارد. این نوع کاتالیست به دلیل مساحت سطح بیشتر و قابلیت افزایش تعداد پیوندهای کاتالیستی، کاربرد زیادی در فرآیندهای شیمیایی دارد.

یکی از روش‌های کاهش گرانروی نفت، استفاده از نانوکاتالیزورهای فوق پراکنده است. در (جدول ۵)، نتایج مطالعات مختلفی که به بررسی تأثیر کاتالیست‌های پراکنده برای کاهش گرانروی نفت خام پرداخته‌اند، به‌طور خلاصه آورده شده است[۳۰].

جدول ۵: خلاصه‌ای از کاتالیست‌های فوق پراکنده در کاهش گرانروی نفت خام[۳۰]

نفت خام	کاتالیست	شرایط واکنش	نتایج آزمایش‌های ارتقاء کیفیت	مرجع
Athabasca VR Athabasca VGO	Ni	۲۴۰ درجه سانتی‌گراد، ۱۲ ساعت	کاهش گرانروی ۸۱ درصد	[۵۲]
HO	Supported zero-valent nano-iron-based bifunctional catalyst	۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۴ ساعت	کاهش گرانروی ۷۷ درصد با ذرات Fe/SiO_2	[۵۳]
EHO	Mo-doped goethite nanorods	-	نسبت کاهش گرانروی و کاهش گرانروی به‌طور مؤثر بهبود یافت	[۵۴]
Athabasca Bitumen	Tri-metal catalyst (Ni–W–Mo)	۳۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۰۰ دور در دقیقه، ۳ تا ۷۰ ساعت	درجه API به ۶/۵ درجه افزایش یافت، کاهش گرانروی ۹۸ درصد	[۵۰]

۵-۵. استفاده از نانوکاتالیست در روش شکست هیدروژنی

استفاده از نانوکاتالیست‌ها به‌عنوان یک رویکرد نوین در فرآیندهای پالایش نفت، به ویژه در روش شکست هیدروژنی (هیدروکراکینگ) مورد توجه قرار گرفته است. نانوکاتالیست‌های پراکنده می‌توانند بازدهی واکنش‌های شکست را به طرز چشمگیری افزایش دهند و در شرایط مناسب، درصد کاهش گرانروی نفت را تا ۹۹/۸ درصد بهبود بخشند.

1. Spotted catalyst

تاکنـون نانوکاتالیسـت‌های متعددی مـورد آزمایش قرار گرفته‌اند، از جمله:

- نانوکاتالیست‌های زئولیتی
- نانوکاتالیست‌های کربنی
- نانوکاتالیست‌های آهن و نیکل

این نانوکاتالیسـت‌ها نتایج مثبتی در کاهش گرانروی نفت نشـان داده‌اند. با این حال، استفاده از این روش با چالش‌هایی مواجه اسـت که شامل ساخت نانوکاتالیسـت و بستر واکنشی مناسب و همچنین جمع‌آوری آن‌ها می‌شود.

برای غلبه بر مشکلات موجود، فرآیندهایی با فناوری نوین ماننـد پرتو افکـنی، کاویتاسیون و امـواج الکترومغناطیسی در مقیاس آزمایشـگاهی به کار گرفته شـده‌اند. این فناوری‌ها در حضور نانوکاتالیست‌ها توانسته‌اند نتایج خوبی را در دما و فشار بسیار پایین به همراه داشته باشند.

در روش شکسـت هیدروژنی، با تزریـق هیدروژن به داخل مخـزن نفـت، مولکول‌های نفـت با هیـدروژن واکنـش داده و بخـشی از آن‌ها شکسـته می‌شـوند. در این فرآینـد، هیدروژن به‌عنـوان یـک عامـل کاتالیسـتی عمل می‌کنـد و بـا تعامل با مولکول‌های نفت، آن‌ها را شکسته و به مولکول‌های کوچک‌تر تبدیل می‌کند. این تبدیـل مولکولی منجر به کاهش گرانروی نفت می‌شود.

با کوچک شدن اندازه ذرات نفت، گرانروی آن کاهش یافته و رفتار رئولوژیکی آن بهبود می‌یابد. این ویژگی باعث می‌شود که نفت خام به‌راحتی قابل استخراج و انتقال باشد.

اسـتفاده از شکسـت هیـدروژنی بـه دلیل اینکـه به‌صورت مسـتقیم در محـل اسـتخراج نفـت انجـام می‌شـود، به‌عنوان یک روش ارتقاء درجا محسـوب می‌شـود. این رویکـرد نه‌تنها هزینه‌هـای حمل و نقـل را کاهش می‌دهد بلکـه کیفیت نفت خام استخراج‌شده را نیز افزایش می‌دهد[۵۵].

۵-۶. روش Aquathermolysis تحت افزودن کاتالیزور

روش Aquathermolysis به‌عنـوان یک تکنیک نوآورانه بـرای ارتقـاء کیفیـت نفت خام سـنگین، بـه ویـژه در کاهش گرانروی آن شناخته می‌شـود. این روش بر ارائه کاتالیزورهای نانـوذراتی ماننـد نانوکاتالیسـت‌های مبتـنی بر نیـکل، آهن و کبالـت تمرکـز دارد[۱۴]. در ایـن فرآیند، کاتالیـزور به‌عنوان یـک جاذب برای گرانـروی نفت عمل می‌کند. بـا اضافه کردن کاتالیزور به نفت و اعمال حرارت و فشار، مولکول‌های سنگین نفت به مولکول‌های کوچک‌تر و سبک‌تر تبدیل می‌شوند.

در روش Aquathermolysis، آب به‌عنـوان یـک عامـل گرمایی و همچنین جـاذب گرانروی عمل می‌کند. این فرآیند منجـر به کاهش گرانـروی نفت و تبدیل آن به شـکل پایدارتر و قابل استفاده‌تر می‌شـود. علاوه بر این، Aquathermolysis باعـث شـتاب‌دهی در فرآینـد شکسـت حـرارتی می‌شـود و موجـب صرفه‌جویی در هزینه‌های تولید می‌گردد؛ زیرا مصرف هیدروژن کاهش یافته و کاتالیزور قابل بازیافت است.

در طـول واکنـش Aquathermolysis، نفـت سـنگین با آب یـا بخار در دمـای ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سـانتی‌گراد واکنش نشان می‌دهد و زمان واکنش از چند ساعت تا چند روز متغیر اسـت. با این حال، مشـخص شده اسـت که واکنش آبگرمولیز تنها با استفاده از هیدرولیز آب به‌خوبی پیش‌بینی نشده است. اتم‌هـای ناهمگن مانند نیتـروژن (N)، گوگـرد (S) و اکسیژن (O) در مولکول نفت سـنگین می‌توانند بـا پیوند هیدروژنی یا نیروهای واندروالس با یکدیگر تعامل داشـته باشند و پلیمریزه شـوند تا مولکول‌های بزرگ‌تری تشـکیل دهند. از این رو، این روش ممکن اسـت چندان مؤثری بـرای کاهش گرانروی نفت سنگین نباشد.

گزارش‌هـا نشـان داده‌اند کـه امـکان واکنـش کاتالیزوری نفـت سـنگین بـدون افـزودن آب یـا بخـار یـا واکنـش غیـر Aquathermolysis وجود دارد. با این حال، کاهش گرانروی پس از اضافه شـدن آب یـا بخار به یک سیسـتم قابل توجه‌تر خواهد بود. برای کاهش بیشـتر گرانروی نفت سـنگین نسبت بـه روش آبگرمولیـز فقـط بـا بخـار، اسـتفاده از کاتالیـزور در Aquathermolysis موفقیت‌آمیـز بـوده اسـت، زیـرا مانع از رگرسیـون نـاشی از پلیمریزاسیـون می‌شـود و در عیـن حال باعـث تقویـت پیرولیز بـرای شکسـتن مولکول‌هـای بزرگ‌تر نفت سـنگین به مولکول‌هـای کوچک‌تر و انجـام واکنش‌های هم‌افزایی مانند هیدروژناسیون و باز شدن حلقه می‌شود.

شکسـت پیوندهـای C-S موجـب کاهـش وزن مولکـولی متوسـط، کاهش گرانروی، بهبود خواص جریان و ساده‌سـازی بهره‌بـرداری و حمـل و نقـل نفت سـنگین می‌شـود. در واقع، نه‌تنهـا پیوندهـای C-S بلکـه پیوندهـای C-N و C-O نیـز در یـک واکنـش کاتالیـزوری Aquathermolysis شکسـته می‌شوند. با این حال، به دلیل انرژی پیوند کمتر C-S، کاهش محتوای گوگرد در نفت سـنگین پس از Aquathermolysis کاتالیزوری قابل توجه‌تر است.

به‌طـور کلی، بـا کمک یک کاتالیـزور در واکنـش گرمابی، میـزان آسـفالتین‌ها و رزین‌هـا کاهـش یافتـه و در مقابـل،

مقـدار هیدروکربن‌هـای آروماتیـک و هیدروکربن‌های اشـباع افزایـش می‌یابـد. کل فرآینـد Aquathermolysis با معرفی یـک کاتالیـزور را Aquathermolysis کاتالیسـتی می‌نامند. کاتالیزورهای مورد استفاده برای Aquathermolysis شامل:

- معدنی
- محلول در آب
- محلول در نفت
- پراکنده

این تنوع در نوع کاتالیزورها امکان انتخاب بهترین گزینه را بسته به شرایط خاص فرآیند فراهم می‌آورد[۱۴].

۵-۷. استفاده از افزودنی‌های اهدا کننده هیدروژن (در حضور کاتالیزور)

وجـود افزودنی‌هـای اهداکننـده هیـدروژن در فرآینـد Aquathermolysis می‌تواند تأثیر مثبتی بر کاهش گرانروی نفت سنگین داشـته باشـد. این اهداکننده‌ها نه‌تنها به کاهش گرانروی اضافی نفت کمک می‌کنند، بلکه پایداری این کاهش را نیـز بهبود می‌بخشـند. هنگامی که اهداکننـده هیدروژن به سیسـتم اضافه می‌شـود، مزایای قابل‌توجـهی از جمله کاهش رگرسیون گرانروی پس از واکنش مشاهده می‌شود.

یـکی از منابـع مهم اهداکننـده هیـدروژن، زئولیت اسـت. زئولیت‌ها که شامل سیلیکات و آلومینات با ساختار چهاروجهی هسـتند، به‌عنوان کاتالیست در فرآوری نفت استفاده می‌شوند. در ایـن روش، کاتالیـزور به‌عنـوان یک جـاذب بـرای گرانروی نفـت عمـل می‌کنـد. بـا افـزودن کاتالیزور بـه نفـت در حضور هیدروژن، مولکول‌های سـنگین نفت به مولکول‌های کوچک‌تر و سـبک‌تر تبدیل می‌شـوند. این فرآیند که به‌عنوان کراکینگ هیدروژناسیـونی شـناخته می‌شـود، بـا اسـتفاده از هیـدروژن به‌عنوان اهداکننده عمل می‌کند و منجر به تبدیل مولکول‌های سنگین نفت به مولکول‌های سبک‌تر و کوچک‌تر می‌گردد.

ایـن فرآیند نه‌تنهـا گرانروی نفت را کاهـش می‌دهد، بلکه باعـث شـتاب‌دهی در فرآیند شکسـت حـرارتی نیز می‌شـود. همچنیـن، این روش موجب صرفه‌جـویی در هزینه‌های تولید می‌شـود؛ زیرا مصرف هیدروژن کاهش یافتـه و کاتالیزور قابل بازیافت است.

در آزمایش‌های اسـتاتیکی، درصد کاهش گرانروی معمولاً بیشـتر از آزمایش‌هـای دینامیـکی یا درجا اسـت. ایـن تفاوت ناشی از شـرایط پیچیده‌تـر در آزمایش‌های دینامیکی اسـت، مانند افت تدریجی دمای بخار با افزایش عمق از سـطح زمین. این شـرایط باعـث کاهش مقدار انـرژی مورد نیاز بـرای انجام واکنـش و همچنیـن محدودیـت در حرکـت مولکول‌هـا برای تماس با نفت سنگین می‌شود[۱۴].

۵-۸. جذب کاتالیزور توسط سنگ چاه نفتی

شـرایط دیگری کـه به کاهـش گرانـروی در آزمایش‌های دینامیکی کمک می‌کند، جذب کاتالیزور توسط سنگ یا مواد معدنی داخل چاه نفت است. در این راستا، پیشرفت‌های اخیر در سـنتز کاتالیزورهـا باهـدف غلبه بر ایـن چالش‌ها، طراحی کاتالیزورهای فعال‌شـده در دمای پایین را شامل می‌شود. این کاتالیزورها با اسـتفاده از تحریک امواج فراصوت یا الاسـتیک، بـه واکنش‌هـای کاتالیـزوری Aquathermolysisکمـک می‌کنند.

تحقیقات نشان داده‌اند که هر دو نوع ارتعاش (با فرکانس بـالا و پاییـن) بـه فرآینـد Aquathermolysis کاتالیزوری کمـک می‌کند و اثرات هم‌افزایی بر عملکرد کاهش گرانروی نفـت سـنگین و همچنیـن ترکیبات اشـباع، معطـر، رزین و آسـفالتین ایجاد می‌نماید. در مقایسـه با فرآیند کاتالیسـتی Aquathermolysis، Aquathermolysis کاتالیسـتی به کمـک ارتعاش فرکانـس پایین کاهش گرانـروی بهتری را تا ۶/۶ درصـد بـا نفت خام بـا وزن مولکـولی متوسـط‌تر فراهم می‌کند.

در ایـن روش، کاتالیـزور به‌عنوان یک جـاذب برای کاهش گرانـروی نفـت عمـل می‌کنـد. سـنگ چاه نفـتی کـه معمولاً از سـنگ‌های متخلخـل تشـکیل شـده اسـت، قابلیـت جذب کاتالیـزور را دارد. بـا اضافه کردن کاتالیزور بـه نفت در حضور هیدروژن، مولکول‌های سنگین نفت به مولکول‌های کوچک‌تر و سبک‌تر تبدیل می‌شوند که این امر منجر به کاهش گرانروی نفت می‌گردد[۱۴].

۵-۹. افزودن کاتالیزور به مخزن زیرزمینی

کاتالیزورهـا در فرآیندهـای نفـتی به‌عنـوان عامـلی مؤثـر بـرای کاهش گرانروی نفت مورد اسـتفاده قـرار می‌گیرند. این کاتالیزورها با افزایش دما و فشـار، واکنش‌های شیمیایی را در مخـزن نفت فعال می‌کننـد و با تغییر سـاختار مولکولی نفت، گرانروی آن را کاهش می‌دهند.

علاوه بر این، کاتالیزورها می‌توانند به تجزیه و آسان‌سـازی برخی از ترکیبات سـنگین و پلیمری در نفت کمک کنند. این عمـل نه‌تنها منجر به کاهـش گرانروی نفت می‌شـود، بلکه به تولید نفت خام با کیفیت بالاتر نیز کمک می‌کند[۱۴].

۵-۱۰. ارتقای کیفیت نفت خام فوق سنگین با استفاده از سدیم مولیبدات تجاری

مسعودیان و همکاران [۵۶] در پژوهشی به بررسی استفاده مستقیم از سدیم مولیبدات تجاری به‌عنوان کاتالیستی در دسترس و ارزان برای ارتقای کیفیت نفت خام فوق سنگین و باقی‌مانده‌های سنگین نفتی پرداخته‌اند. هدف اصلی این تحقیق امکان‌سنجی ارتقای کیفیت نفت سنگین از طریق افزایش درجه API، کاهش گستره جوش و تقلیل میزان آسفالتن‌ها با استفاده از این ماده تجاری بود. آزمون‌های واکنش‌گاهی در یک اتوکلاو یک لیتری با نسبت حجمی هیدروژن به هیدروکربن ۱۲۰۰، فشار ۷۰ بار، دمای ۴۴۰ درجه سانتی‌گراد، زمان اقامت۱ ۲۰ دقیقه و درصدهای وزنی متفاوت سدیم مولیبدات نسبت به خوراک انجام شد.

نتایج نشان داد که بازدهی ارتقای کیفیت در شرایط واکنش‌گاه حدود ۵۰ درصد است. افزودن مقدار بیشتر سدیم مولیبدات بر شکست ترکیبات سنگین با نقطه‌جوش بالای ۶۲۰ درجه سانتی‌گراد تأثیری نداشت، اما ارتقای کیفیت ترکیب‌های سبک‌تر را بهبود بخشید. همچنین، استفاده بیش‌تر از این کاتالیست به تشکیل مقدار قابل‌توجهی کک در واکنش‌گاه منجر شد[۵۷].

سدیم مولیبدات تجاری به‌عنوان یک عامل کاهش گرانروی نفت فوق سنگین عمل می‌کند. در فرایند استفاده از این ماده، ابتدا نفت خام فوق سنگین با سدیم مولیبدات ترکیب می‌شود و سپس به یک واحد پالایشگاهی منتقل می‌شود. در این واحد، نفت خام با استفاده از فرآیندهای پالایش، به نفت خام با کیفیت بالاتر تبدیل می‌شود. استفاده از سدیم مولیبدات تجاری مزایای زیر را دارد:

- نبهبود قابل توجه در کیفیت نفت خام در طولانی مدت
- قابلیت استفاده آسان
- هزینه کم

با توجه به این مزایا، سدیم مولیبدات تجاری می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در ارتقای کیفیت نفت خام فوق سنگین مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۱۱. کراکینگ کاتالیستی[۲]

کراکینگ کاتالیستی یکی از مهم‌ترین و کارآمدترین فرایندهای پالایشی است و به‌طور کلی شامل سه نوع مختلف می‌باشد: بسترسیال[۳]، بستر متحرک[۴] و بستر ثابت[۵]. در این روش، به دلیل افزایش سرعت واکنش‌ها در حضور کاتالیست، امکان انجام شکست در شرایط عملیاتی ملایم‌تری نسبت به کراکینگ حرارتی وجود دارد. این ویژگی موجب کاهش واکنش‌های ثانویه می‌شود. در این نوع کراکینگ، علاوه بر دما و زمان، مؤلفه‌های متعددی نیز اهمیت دارند:

۱. نوع خوراک
۲. نسبت کاتالیست مصرفی به خوراک
۳. نوع کاتالیست
۴. زمان فعالیت

در پژوهشی که ثابت و همکاران[۱۷] انجام دادند، تأثیر کاتالیست ZSM-5 بر کاهش گرانروی نفت خام فوق سنگین با گرانروی ۳۵۰۰۰ سانتی‌پویز تا دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس بررسی شد. نتایج نشان داد که در حالت گرمایش مستقیم و بدون استفاده از کاتالیست، گرانروی تنها ۴۰ درصد تغییر کرد؛ اما در حضور کاتالیست، گرانروی نفت فوق سنگین به میزان ۹۱/۶ درصد کاهش یافت.

کراکینگ کاتالیستی با توجه به مزایای آن در کاهش گرانروی نفت خام و امکان انجام فرآیند در شرایط ملایم‌تر، یک گزینه مؤثر برای بهبود کیفیت نفت خام است. حضور کاتالیست می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد این فرایند داشته باشد و به کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک کند.

۶. روش‌های فیزیکی کاهش گرانروی

۶-۱. روش بازیافت حرارتی

روش بازیافت حرارتی یکی از روش‌های مورد استفاده برای کاهش گرانروی نفت است. در این روش، نفت به دمایی بالاتر از دمای اتاق گرم شده و سپس تحت‌فشار و با سرعت بالا به یک مخزن فشار قابل تنظیم منتقل می‌شود. حرکت چرخشی نفت در مخزن باعث کاهش تماس بین ذرات و در نتیجه کاهش گرانروی می‌شود. روش بازیافت حرارتی دارای مزایای زیر است:

1.Residence time
2. Catalytic Cracking
3. Fluid Catalytic Cracking
4. Moving Bed Catalytic Cracking
5. Fixed Bed Catalytic Cracking

- کاهش گرانروی نفت
- افزایش جریان نفت در لوله‌های نفتی و حفاری
- کاهش احتمال تشکیل رسوبات در لوله‌های نفتی
- افزایش عمر لوله‌ها

روش‌هـای مختلـفی برای بازیـابی حرارتی وجـود دارد که شامل:

۱. تحریک بخار چرخه‌ای[1] (CSS)
۲. سیل بخار[2] (SF)
۳. زهکشی گرانشی به کمک بخار[3] (SAGD)
۴. (THAI)[4]
۵. احتراق درجا[5] (ISC)

فناوری ISC به دلیل ردپای کربن کوچک و نسبت بازیافت بالا، امکان‌پذیرتر، کارآمدتر و امیدوارکننده‌تر برای توسعه نفت سنگین است. مکانیسم‌های تأثیرگذار در کاهش گرانروی نفت سنگین شامل موارد زیر است:

۱. کاتالیزورهای معدنی
۲. کاتالیزورهای محلول در آب
۳. کاتالیزورهای محلول در نفت
۴. کاتالیزورهای اسید جامد
۵. کاتالیزورهای پراکنده
۶. نانو کاتالیزورهای فوق پراکنده[۳۰].

۶-۲. روش پرتوافکنی (لیزر و سایر پرتوها)[6]

روش نوین پرتوافکنی روشی اسـت کـه جهت تبدیل نفت خام سـنگین به اجزاء سـبک و نیز بهبود ترکیبـات آن، به کار می‌رود و می‌تواند مزایای زیادی در پی داشـته باشد. این روش می‌تواند توسـط اشـعه گاما، الکتـرون، پروتون و سـایر پرتوها صورت پذیرد.

نتایج تحقیقات نشـان می‌دهـد که با افزایـش دوز جذبی، سـرعت کاهـش گرانروی ابتـدا افزایش یافته و سـپس کاهش می‌یابـد. همچنین، بیشـترین بـازدهی در سـرعت‌های دوز با دوز جـذبی ۴۰۰۰ گـری در هر دو فرآینـد کراکینگ پرتوی و کراکینگ پرتوی-گرمایی مشاهده شده است [۵۸].

در روش پرتوافکنی با لیزر، مراحل زیر انجام می‌شود:

۱. تابـش پرتو نور لیزر: یـک پرتو نور لیزر بـه نفت تابیده می‌شود.
۲. تغییرات در پاسـخ نفت: تغییرات در پاسخ نفت به پرتو لیزر به دلیل تغییر در ویژگی‌های فیزیکی و شـیمیایی نفـت از جمله گرانروی، شـدت جذب نـور و طول موج بازتابیده شده توسط نفت ایجاد می‌شود.
۳. کاهـش گرانـروی بـدون نمونه‌بـرداری: بـا اسـتفاده از دستگاه‌های پرتوافکنی، می‌توان گرانروی نفت را بدون نیاز به نمونه‌برداری و آزمایشگاه کاهش داد.

استفاده از روش پرتوافکنی دارای مزایای زیر است:

- امـکان اندازه‌گیری و کاهش گرانروی نفت بدون نیاز به نمونه‌برداری
- سرعت بالا در اندازه‌گیری و کاهش گرانروی
- قابلیت استفاده در محل

رابطه بین شدت جذب نور و گرانروی نفت به‌صورت زیر است:

- گرانروی بالا: شدت جذب نور کمتر
- گرانروی پایین: شدت جذب نور بیشتر

این روش امکان اندازه‌گیـری دقیق گرانروی نفت را فراهم می‌کنـد و در صـورت نیـاز، می‌تـوان از روش‌هـای دیگر برای کاهش گرانروی نفت استفاده کرد.

۶-۳. روش پینچ مخازن[7] (به‌عنوان یک روش بهبود انتقال حرارت و فشار)

پینچ مخازن به دو روش زیر به کاهش گرانروی نفت کمک می‌کند:

۱. با افزایش فشـار در مخـزن: با افزایش فشـار در مخزن، حجـم گازهای موجـود در نفـت کاهش می‌یابـد و این باعث افزایش غلظت نفت و کاهش گرانروی آن می‌شود.
۲. بـا اسـتفاده از مواد شـیمیایی: از مواد شـیمیایی مانند

1. Cyclic Steam Stimulation
2. Steam Flooding
3. Steam Assisted Gravity Drainage
4. Toe-to-Heel Air Injection
5. In-Situ Combustion
6. Laser Irradiation and Other Beam Methods
7. Pinch Method for Tanks

پلیمـر پلی وینیـل کلرید بـرای کاهش گرانـروی نفت استفاده می‌شـود. این مواد با تشکیل یک لایه سطحی روی سطح نفت، باعث کاهش اصطکاک بین ذرات نفت می‌شـود و ظرفیـت جـذب آن بـرای مواد جامـد و آب افزایش می‌یابد که باعث کاهش گرانروی نفت می‌شود. در پینچ مخازن، این مواد شـیمیایی به‌صورت مستقیم بـه نفت اضافه می‌شـوند و باعث کاهـش گرانروی نفت می‌شوند.

در پژوهشی که توسط علی و همکاران[۵۹] بر روی اصلاح شـبکه‌ی مبدل‌هـای حـرارتی کاهش گرانـروی با اسـتفاده از تکنولوژی پینچ انجام شد، مشخص گردید که این روش هزینه سـاخت مبدل‌های حرارتی را کاهش می‌دهـد، هرچند هزینه منابع حرارتی برای این مبدل‌ها بالا است. در این مطالعه، واحد کاهش گرانـروی با اسـتفاده از نرم‌افزار پتروسیم شبیه‌سـازی شـد و تکنولوژی پینچ برای انضمام و یکپارچگی فرآیند به‌کار گرفته شـد. محاسـبات تکنولوژی پینچ جهت اصلاح شـبکه‌ی مبدل‌های حرارتی انجام گرفت و نتایج نهایی حاصل از نرم‌افزار پتروسیـم نشـان داد که کمینه دمـای بهینه بیـن جریان‌های سرد و گرم باید حدود ۳۲/۲۱ درجه سانتی‌گراد باشد تا حالت بهینه بین هزینه ساخت مبدل حرارتی و هزینه مصرف انرژی برقرار شود.

۶-۴. کاویتاسیون هیدرودینامیک[1]

کاویتاسیون هیدرودینامیک یک فرآیند فیزیکی اسـت که با اسـتفاده از امواج صوتی با فرکانس بالا، به تولید نانوذرات در مایعات منجر می‌شـود. این روش با اسـتفاده از امواج صوتی با فرکانـس بالا، به تولید نانوذرات کوچک و یکنواخت در مایعات منجر می‌شود. نانوذرات تولیدشـده به‌عنوان کاتالیزور در نفت عمل کرده و باعث افزایش تعامل ذرات نفت با یکدیگر و کاهش گرانروی آن می‌شوند. روش کاویتاسیون هیدرودینامیک دارای مزایای متعددی است که شامل:

- تولید نانوذرات کوچک و یکنواخت
- عدم نیاز به دمای بالا
- کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در صنعت نفت
- بهبود فرآیند پالایش باقی‌مانده‌های برج تقطیر
- افزایش استحصال ترکیبات سبک‌تر و مفیدتر نفت خام سنگین

مکانیسم عملکرد کاویتاسیون شامل مراحل زیر است:

۱. فروپاشی سریع حباب‌ها: در حالت آدیاباتیک، فروپاشی سـریع حباب‌ها باعـث افزایـش ناگهانی فشـار و دمای موضعی سیال می‌شود.

۲. شکسـتن پیوندهـای بین اتم‌هـا: این شـرایط منجر به ایجـاد و انتشـار رادیکال‌های فعال، انجـام واکنش‌های شیمیایی و فعال شدن کاتالیست‌های مجاور حباب‌های در حال فروپاشی می‌شود.

۶-۵. میدان مغناطیسی[2]

لی و همـکاران[۶۱] در پژوهـشی تأثیـر میدان‌هـای مغناطیـسی بر خواص فیزیکی نفت خـام را مورد بررسی قرار دادنـد. در ایـن مطالعه، از میدان‌های مغناطیسی ۰/۵ تسـلا و ۱/۲ تسلا در دماهای ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد و تأثیر آن‌ها بر کشش سـطحی، دانسیته و گرانروی نفت خام مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایـج نشـان داد کـه بـا افزایـش دما، کشـش سـطحی و گرانـروی نفت خام کاهـش می‌یابد. همچنیـن، اعمال میدان مغناطیسی باعث کاهش کشـش سطحی و افزایش گرانروی و دانسیته نفت خام شـد. مقایسـه میدان‌ها حاکی از آن بود که تأثیـر میدان مغناطیسی تونلی ۰/۵ تسـلا بر خواص نفت خام بیشتر از میدان عمودی ۱/۲ تسلا است.

مکانیسـم‌های تأثیر میدان مغناطیسی بر خواص نفت خام به شرح زیر است:

۱. جداسـازی ذرات آسـفالتین: میدان مغناطیسـی باعث جداسـازی ذرات آسـفالتین و دیگـر ذرات سـنگین در نفت می‌شود.

۲. کاهـش گرانـروی: ایـن جداسـازی منجـر بـه کاهـش گرانروی و افزایش دانسیته نفت می‌گردد.

اسـتفاده از میدان مغناطیسی دارای مزایا و کاربردهای زیر در صنعت نفت است:

- روشی جدید برای جداسازی نفت و آب
- کاهش هزینه‌های تولید و جداسازی نفت
- بهبود عملکرد خطوط انتقال نفت

میـدان مغناطیسی همچنین در کاهش کسـر جـرمی متان

1. Hydrodynamic Cavitation
2. Hydrodynamic Cavitation

نسوخته و محصولات احتراق در طی فرآیند احتراق مؤثر است. در حالت گرادیان کاهشی و افزایشی، متان نسوخته نسبت به حالت بدون میدان به ترتیب ۹۹ درصد و ۵۲ درصد کاهش می‌یابد. این یافته‌ها می‌تواند در بهبود فرآیندهای احتراق و کاهش آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی مورد استفاده قرار گیرد.

در مجموع، استفاده از میدان مغناطیسی در صنعت نفت می‌تواند به بهبود فرآیندهای استخراج، انتقال و پالایش نفت کمک کند و هم‌زمان اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد.

۶-۶. میدان الکتریکی[1]

چن و همکاران[۶۲] در پژوهشی آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شدت میدان الکتریکی بر گرانروی دینامیکی و سینماتیکی نفت خام پرداختند و نتایج قابل‌توجهی در زمینه کاهش گرانروی با استفاده از میدان الکتریکی به دست آوردند. در این مطالعه، نفت خام درون سیکل آزمایش قرار گرفت و میدان الکتریکی با شدت ۲/۷۸ ولت اعمال شد، در حالی که دما بین ۷۰ تا ۷۵ درجه فارنهایت تنظیم گردید. نتایج نشان داد که با افزایش دما، گرانروی دینامیکی و سینماتیکی نفت خام کاهش یافت. همچنین، اعمال میدان الکتریکی به کاهش گرانروی دینامیکی و سینماتیکی منجر شد و با گذشت زمان، تأثیر این میدان بر کاهش گرانروی افزایش یافت.

مکانیسم‌های تأثیر میدان الکتریکی بر گرانروی نفت خام شامل موارد زیر است:

۱. از بین رفتن بارهای الکتریکی ذرات نفت
۲. کاهش اندازه گرانول‌های نفتی
۳. جداسازی آب و نفت در امولسیون‌های نفتی

استفاده از میدان الکتریکی برای کنترل گرانروی نفت خام دارای مزایای زیر است:

- روشی مؤثر و قابل کنترل
- امکان استفاده در شرایط مختلف دمایی
- کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای انتقال و پالایش نفت

این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از میدان الکتریکی می‌تواند به‌عنوان یک روش کارآمد برای کنترل گرانروی نفت خام در صنعت نفت مورد استفاده قرار گیرد. این روش می‌تواند به بهبود فرآیندهای استخراج، انتقال و پالایش نفت کمک کند و هم‌زمان هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

۷. روش‌های شیمیایی کاهش گرانروی (سایر موارد)

۷-۱. استفاده از مایعات یونی[2]

استفاده از مایعات یونی به‌عنوان یک روش نوین برای کاهش گرانروی نفت خام در پژوهش‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. سوبرامانی و همکاران[۶۳] در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از مایعات یونی به‌عنوان روشی نوین برای کاهش گرانروی نفت خام پرداختند و نتایج قابل‌توجهی ارائه کردند. نتایج نشان داد که با استفاده از ۵ ppm دودسیل پیریدینیم کلرید، گرانروی نفت خام تا ۳۵ درصد کاهش یافت. کاهش اندازه توده آسفالتین به‌عنوان اصلی‌ترین عامل این کاهش گرانروی شناسایی شد. همچنین، مایعات یونی به دلیل خواص ترموفیزیکی مطلوب، مانند فشار بخار کم، به‌عنوان مولکول‌های عامل‌دار مورد آزمایش قرار گرفتند و عملکرد مؤثری در این فرآیند نشان دادند.

مکانیسم تأثیر مایعات یونی بر خواص نفت خام شامل برهمکنش‌های مولکولی مختلف است که به شرح زیر می‌باشد:

۱. برهمکنش‌های آروماتیک
۲. برهمکنش‌های اسید-باز
۳. برهمکنش‌های انتقال بار

این برهمکنش‌ها مانع تشکیل توده‌های آسفالتین شده و در نتیجه گرانروی را کاهش می‌دهند. روش‌های مختلفی برای کاهش گرانروی با استفاده از مایعات یونی وجود دارد که شامل:

۱. تغییر دما: افزایش دما باعث کاهش گرانروی مایع می‌شود.
۲. افزودن مواد کاهنده گرانروی: استفاده از موادی مانند پلیمرها و پلی‌آمیدها.
۳. استفاده از تجهیزات خاص: مانند سردکن‌های گرمایشی و تجهیزات خنک‌کننده.
۴. فرآیندهای شیمیایی: تغییر pH و استفاده از مواد شیمیایی خاص.

این یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مایعات یونی می‌تواند روشی مؤثر برای کاهش گرانروی نفت خام باشد. این روش می‌تواند به بهبود فرآیندهای استخراج، انتقال و پالایش نفت کمک کند و هم‌زمان هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهد.

1. Electric Field
2. Ionic Liquids

۷-۲. شکست حرارتی[1] (بدون کاتالیزور)

در روش شکست حرارتی، با اعمال حرارت، مولکول‌های هیدروکربن شکسته می‌شوند. کوره، به‌عنوان بخش اصلی هر واحد شکست حرارتی، برای تأمین گرما در این فرآیند حیاتی است و سایر اجزای واحد به‌منظور جداسازی فرآورده‌ها طراحی شده‌اند. واکنش‌های شکست حرارتی از نوع رادیکالی و به‌صورت متوالی انجام می‌شوند. دو مؤلفه کلیدی در این روش برای سبک‌سازی نفت، دما و زمان هستند. با این حال، این روش دارای چندین کاستی است:

۱. دمای بسیار بالا: نیاز به دماهای بالا می‌تواند منجر به مشکلات عملیاتی شود.

۲. مصرف انرژی زیاد: فرآیند شکست حرارتی به انرژی زیادی نیاز دارد که می‌تواند هزینه‌های تولید را افزایش دهد.

۳. تجهیزات پرخطر و پرهزینه: تجهیزات مورد استفاده در این روش معمولاً گران‌قیمت و نیازمند نگهداری دقیق هستند.

۴. نرخ خوردگی بالا: دماهای بالا می‌توانند باعث افزایش نرخ خوردگی در تجهیزات شوند.

۵. عدم پایداری: عدم پایداری در شرایط عملیاتی می‌تواند منجر به مشکلات در فرآیند تولید شود.

۶. تغییر در ساختار کلوئیدی نفت خام: دماهای بالا و حرارت شدید ممکن است باعث تغییر در ساختار کلوئیدی نفت خام گردد.

استفادبا توجه به این چالش‌ها، پژوهشگران به دنبال بهبود روش‌های شکست حرارتی و کاهش هزینه‌ها و خطرات مرتبط با آن هستند [۱۷].

۷-۳. مولکول‌های عامل‌دار شده[2]

مولکول‌های عامل‌دار شده، موادی هستند که به مایعات اضافه می‌شوند تا گرانروی آن‌ها کاهش یابد. این مواد معمولاً شامل پلیمرها و پلی‌آمیدها هستند که به‌صورت محلول در مایعات یونی نفتی اضافه می‌شوند. این مواد با اتصال به مولکول‌های مایع، آن‌ها را از هم جدا کرده و فضای بین آن‌ها را بزرگ‌تر می‌کنند. این عمل باعث کاهش نیروی داخلی بین مولکول‌ها و در نتیجه کاهش گرانروی مایع می‌شود. به‌علاوه، این مواد باعث کاهش تراکم مایعات نیز می‌شوند که باعث افزایش حرکت آن‌ها در لوله‌های نفتی و حفاری می‌شود.

روش‌های سنتی کاهش گرانروی برای سیالات نفتی سنگین شامل روش‌های حرارتی یا رقیق‌سازی است. در این روش، از مولکول‌های عامل‌دار شده استفاده شده که می‌توانند با آسفالتین‌ها تعامل داشته باشند و خواص نفت خام را در سطح مولکولی تغییر دهند و گرانروی را کاهش دهند[۶۳].

۷-۴. مونومرها[3]

مونومرها یا همان تک‌مولکولی‌ها، مولکول‌های کوچکی هستند که قابلیت پلیمریزاسیون (ترکیب با یکدیگر و تشکیل پلیمر) را دارند. در فرآیند تولید پلیمر، مونومرها به‌صورت متوالی به هم پیوند می‌زنند و به شکل زنجیره‌ای طولانی و پلیمری تبدیل می‌شوند. مونومرها در بسیاری از صنایع شیمیایی و پلاستیکی به‌عنوان ماده اولیه استفاده می‌شوند.

با اضافه کردن مونومرها به نفت، ذرات پلیمر تشکیل می‌شوند که به‌عنوان یک ماده کاتالیزوری در نفت عمل کرده و باعث کاهش گرانروی آن می‌شوند. همچنین، پلیمرهای تشکیل شده از مونومرها می‌توانند به‌عنوان یک ماده ضد اکسیداسیون و ضد حرارت عمل کنند و باعث افزایش عمر مفید نفت شوند.

تحقیقات نشان داده‌اند که رقت نفت سفید می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی گرانروی نفت سنگین شنگلی را کاهش دهد و نرخ کاهش گرانروی با افزایش دما کمی تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری گرانروی نفت آسفالت‌زدایی، مشخص شد که گرانروی نفت سنگین پس از عملیات آسفالت‌زدایی به‌شدت کاهش یافته است.

دو مونومر جدید، استر فنتیل الکل اسید اکریلیک و بنزیل آکریلات سنتز شدند و شش کوپلیمر با کوپلیمریزاسیون رادیکال آزاد با استایرن، اکتادسیل آکریلات و N- متوکسی فنیل مالیمید سنتز گردیدند. از طریق ارزیابی کاهش گرانروی، کوپلیمر حاوی اکریلیک اسید فنتیل الکل استر و اکتادسیل آکریلات[4] (AD) بهترین عملکرد را داشت. در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، (AD) به نرخ کاهش گرانروی ۶۱/۷۴ درصد دست یافت که نتیجه تطبیق مواد آروماتیک و حلالیت مونومرها است[۶۴].

1. Thermal Cracking without Catalyst
2. Functionalized Molecules
3. Monomers
4. Octadecyl Acrylate

۷-۵. سورفکتانت پلیمری کربوکسیلیک اسید سولفونات پلی اتر[1]

سورفکتانت‌ها به‌عنوان مواد شیمیایی مهم در صنعت نفت شناخته می‌شوند و نقش کلیدی در کاهش گرانروی نفت سنگین ایفا می‌کنند. یکی از انواع مؤثر این سورفکتانت‌ها، سورفکتانت پلیمری کربوکسیلیک اسید سولفونات پلی اتر است که با تشکیل ساختاری امولسیونی بین نفت و آب، به کاهش گرانروی نفت کمک می‌کند.

این سورفکتانت با جذب به سطح ذرات نفت، باعث تشکیل امولسیونی می‌شود که سطح این امولسیون به شکل توده‌های کوچکی در آب پراکنده شده و نفت درون این توده‌ها قرار می‌گیرد. این عمل نه‌تنها باعث کاهش گرانروی نفت می‌شود بلکه همچنین سهولت در حرکت آن در لوله‌های خطوط نفت را فراهم می‌آورد.

تحقیقات نشان داده‌اند که این سورفکتانت دارای اثر کاهش گرانروی عالی با نرخ کاهش بیش از ۹۵ درصد است. این میزان کاهش قابل توجه، نشان‌دهنده کارایی بالای سورفکتانت پلیمری کربوکسیلیک اسید سولفونات پلی اتر در بهبود خواص رئولوژیکی نفت سنگین است.

سورفکتانت پلیمری با وزن مولکولی پلی اتر ۶۰۰ و طول زنجیره جانبی متوسط، بهترین عملکرد را در کاهش گرانروی دارد. این ویژگی‌ها به آن اجازه می‌دهد تا به‌طور مؤثری با ذرات نفت تعامل کرده و امولسیون‌های پایداری ایجاد کند[۶۵].

۷-۶. امولسیون کننده تولیدی به‌وسیله باسیلوس لیچنیفورمیس[2]

امولسیون‌کننده‌ها موادی هستند که به دلیل داشتن قابلیت امولسیفیکاسیون، توانایی تشکیل امولسیون از دو فاز آبی و نفتی را دارا می‌باشند. در صنعت نفت، این مواد به‌منظور جداسازی نفت از آب و بهبود فرآیندهای استخراج مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از باکتری‌های مهم در این زمینه، باسیلوس لیچنیفورمیس است که قابلیت تجزیه و تحلیل هیدروکربن‌های نفتی را دارد.

با استفاده از باسیلوس لیچنیفورمیس، می‌توان امولسیون‌کننده‌های طبیعی تولید کرد که برای جداسازی نفت از آب و کاهش گرانروی نفت خام سنگین به کار می‌روند. این امولسیون‌کننده‌ها با تشکیل امولسیون بین نفت و آب، باعث می‌شوند که نفت خام سنگین به‌صورت پایدارتر و با گرانروی کمتری قابل استفاده باشد.

استفاده از امولسیون‌کننده‌های تولید شده توسط باسیلوس لیچنیفورمیس منجر به کاهش گرانروی نفت خام سنگین می‌شود. این کاهش گرانروی به دلیل تشکیل امولسیون نفت و آب است که در نتیجه آن، خواص فیزیکی نفت تغییر کرده و امکان انتقال آن در خطوط لوله آسان‌تر می‌شود.

علاوه بر کاهش گرانروی، استفاده از این باکتری می‌تواند هزینه‌های جداسازی نفت از آب را کاهش دهد و بهبود عملکرد فرآیند جداسازی را تضمین کند. بر اساس پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده، ماده امولسیون‌کننده تولیدی توسط این سویه توان بالایی در امولسیون‌سازی نفت سنگین در آب داشته و برای تشکیل امولسیون نفت خام سنگین میدان نوروز ایران در مقیاس نیمه‌صنعتی به کار گرفته شده است.

با تشکیل امولسیون نفت در آب تحت شرایط بهینه (۱۰۰۰۰ cP[3]) شامل دما، درصد آب و درصد امولسیون‌کننده، گرانروی نمونه نفت سنگین کاهش ۸۳۰ cP را نشان داد. این میزان کاهش چشمگیر در گرانروی نفت سنگین و رسوب در مسیر انتقال، انرژی لازم برای انتقال را به‌طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

با به کار بردن سرما طی فرآیند امولسیون‌سازی، پایداری نسبی ۲۴ ساعته برای امولسیون قابل انتقال فراهم شد که این پایداری تا حدود ۷۲ ساعت ادامه داشت. این ویژگی نشان‌دهنده پتانسیل بالای استفاده از باسیلوس لیچنیفورمیس در صنعت نفت برای کاهش گرانروی و بهبود فرآیندهای استخراج است[۶۶].

۷-۷. گوگرد دی اکسید (به‌عنوان افزودنی یا کاتالیزور)

گوگرد دی‌اکسید (SO_2) یک گاز بی‌رنگ با بوی تند و تیز است که در شرایط معمول در هوا غیرقابل رؤیت است. این گاز دارای فرمول شیمیایی SO_2 بوده و از ترکیب یک اتم گوگرد و دو اتم اکسیژن تشکیل شده است. گوگرد دی‌اکسید به دلیل اثرات آن در محیط‌زیست، از جمله اثرات زیان‌بار بر روی سلامت انسان، حیوانات و گیاهان، به‌عنوان یکی از آلاینده‌های هوا شناخته شده است. این گاز در سوختن سوخت‌های فسیلی، فرآیندهای صنعتی، تولید برق، تولید کاغذ و تولید کود به‌طور گسترده‌ای به هوا رها می‌شود.

1. Polymer Surfactant Carboxylic Acid Sulfonate Polyether
2. Emulsifier Produced by Bacillus Licheniformis
3. Centipoise

بـا توجه به خـواص شیمیایی گوگـرد دی‌اکسیـد، این گاز به‌عنـوان یک مـاده شیمیایی مهـم در صنایع مختلـفی مانند تولیـد اسیدسـولفوریک، رنگ‌هـای مصنـوعی و فرآیندهـای کشاورزی به کار می‌رود. همچنین، گوگرد دی‌اکسید به‌عنوان یـک مـاده آنتی‌اکسیـدان و ضدعفونی‌کننـده در بسیـاری از محصولات غذایی نیز استفاده می‌شود.

در صنعـت نفـت، گوگـرد دی‌اکسیـد می‌تواند به‌عنـوان یک افزودنی یا کاتالیزور در فرآیندهای کاهش گرانروی نفت سنگین مـورد اسـتفاده قـرار گیـرد. ایـن گاز با توانـایی خود در تسـهیل واکنش‌های شیمیایی می‌تواند به کاهش گرانروی نفت کمک کند.

اسـتفاده از گوگـرد دی‌اکسیـد به‌عنـوان کاتالیـزور در فرآیندهای مختلف می‌تواند منجر به افزایش کارایی استخراج نفت شـود. با ایـن حال، باید توجه داشـت که اسـتفاده از این مـاده بایـد با دقت انجام شـود تـا از اثـرات منـفی آن بر روی محیط‌زیست جلوگیری گردد[۶۷].

۷-۸. تزریق محلول پلیمری[1]

امروزه با توجـه به تخلیه مخازن هیدروکربـوری و افزایش قیمـت نفـت و همچنیـن افزایش نیاز بشـر بـه انـرژی، انجام عملیات‌هـای ازدیاد برداشـت بـر روی این مخـازن بسیار رایج و مقرون به صرفه اسـت. تزریـق آب به داخل زون نفتی جهت جـاروب نفت باقی‌مانده موجـود در مخزن یـکی از موفق‌ترین روش‌هـا در سـطح جهـان می‌باشـد. با ایـن حـال، آب تمایل شـدیدی جهت عبور از شـکاف‌ها و نواحی با تـراوایی بالا دارد که این تمایل باعث می‌شـود نواحی با تراوایی پایین و متوسط دسـت نخورده باقی بمانند و نفت موجود در آن‌ها تولید نشود. ایـن پدیـده در صنعـت نفت به «انگشـتی شـدن گرانـروی[2]» معروف اسـت که یکی از چالش‌های اسـاسی ازدیاد برداشت از مخازن نفت سنگین است.

تزریـق متنـاوب محلـول پلیمـری به‌منظـور رفـع مشـکل انگشتی‌شـدن گرانروی بسیار رایج بوده است، چرا که با افزایش گرانروی فـاز آب، تحرک‌پذیـری آن به نفت نزدیک می‌شـود و باعث می‌شود که آب به نواحی با تراوایی کمتر نیز نفوذ کند؛ اما تزریق برخی پلیمرها ممکن اسـت باعـث افزایش گرانروی نفت شـود که موجب می‌شـود بـازدهی تزریق به‌شـدت پایین بیاید؛ بنابراین، امروزه یافتن پلیمرهای محلول در آب که حتی‌المقدور موجـب افزایـش گرانـروی نفـت موجـود در مخـزن نشـود، از چالش‌های اساسی عملیات‌های ازدیاد برداشت می‌باشد.

در ایـن روش، پلیمرهـایی بـا وزن مولکـولی بـالا بـه نفت تزریق می‌شـوند. ایـن پلیمرها با افزایش گرانـروی نفت، رفتار رئولوژیـکی آن را بهبـود می‌بخشـند و گرانـروی آن را کاهش می‌دهند. برای این کار، ابتدا پلیمرهای مناسب برای تزریق به نفت انتخاب می‌شـوند. سـپس، با تزریق آن‌ها به داخل مخزن نفت، باعث افزایش گرانروی نفت می‌شوند.

در این روش، پلیمرهـا به‌عنوان یک عامل کاهش گرانروی عمل می‌کنند و با تغییر خصوصیات فیزیکی نفت، گرانروی آن را کاهـش می‌دهند. افزون بر این، ایـن روش می‌تواند به‌عنوان یک روش ارتقاء درجا نیز محسوب شود زیرا تزریق پلیمرها به داخل مخزن نفت، به‌صورت مسـتقیم در محل اسـتخراج نفت انجام می‌شود و نیازی به حمل و نقل نفت به خارج از مخزن و اعمال فشار بر روی آن نیست.

اسـتفاده از محلول‌هـای پلیمـری نه‌تنهـا موجـب کاهـش گرانـروی نفـت سـنگین می‌شـود بلکـه همچنیـن هزینه‌های مربـوط به تجهیزات پیچیـده را کاهش داده و بهـره‌وری را در فرآیند استخراج افزایش می‌دهد[۶۸].

۷-۹. پلیمر پلی وینیل الکل[3] (PVA) (به‌عنوان یک نوع خاص از تزریق پلیمر)

پلی وینیل الکل (PVA) یک پلیمر آب‌رسان و حلال است که از مواد اولیه وینیل الکل تولید می‌شـود. این پلیمر به دلیل خصوصیـات فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد خود، از جمله قابلیت حل در آب، انعطاف‌پذیـری، پایداری حرارتی، مقاومت شیمیایی و الکتریکی، در بسیاری از صنایع مورد اسـتفاده قرار می‌گیـرد. بـرخی از کاربردهای PVA شـامل تولیـد فیلم‌های بسـته‌بندی، چسـب‌ها، رنگ‌هـا، نسـاجی، چـاپ و سـاخت محصولات پزشکی است.

پـلی وینیل الکل به‌عنوان یک ماده بسیـار کارآمد در صنایع مختلف شناخته شده است. ویژگی‌های منحصر به فرد آن شامل:

- قابلیت حل در آب: این ویژگی باعث می‌شـود که PVA به‌راحتی در فرآیندهای صنعتی مورد استفاده قرار گیرد.
- انعطاف‌پذیری: این خاصیت موجب می‌شـود که PVA در تولیـد مـواد مختلف ماننـد فیلم‌های بسـته‌بندی و چسب‌ها کاربرد داشته باشد.

1. Injection of Polymer Solution
2. Viscous Fingering
3. Polyvinyl Alcohol

- پایداری حرارتی: PVA می‌تواند در دماهای بالا پایدار بماند که این امر در کاربردهای صنعتی اهمیت دارد.
- مقاومت شیمیایی و الکتریکی: این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که PVA در صنایع الکترونیک و شیمیایی مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهشی که توسط آلاد و همکاران[۶۹] انجام شده است، تأثیر پلیمر پلی وینیل الکل بر روی مخلوط آب و نفت بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که این پلیمر گرانروی نفت سنگین موجود در مخازن را کاهش می‌دهد.

با توجه به نتایج حاصل از آزمایشگاه، واضح است که این پلیمر عملکرد خود را در دمای میدانی (تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد) نیز حفظ می‌کند. این ویژگی نشان‌دهنده پتانسیل بالای PVA به‌عنوان یک کاهنده گرانروی مؤثر در صنعت نفت است

مکانیسم کاهش گرانروی توسط PVA شامل تغییر خواص سطحی نفت است. با افزودن PVA به مخلوط نفت، سطح تماس بین نفت و آب افزایش یافته و این امر منجر به جداسازی بهتر آسفالتین‌ها و کاهش گرانروی می‌شود.

علاوه بر این، PVA می‌تواند با ایجاد امولسیون‌های پایدار بین نفت و آب، جریان نفت را بهبود بخشد. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که PVA یک گزینه مناسب برای کاهش گرانروی نفت سنگین باشد.

۷-۱۰. روش‌های نانوبیوتکنولوژی[1] (با تمرکز بر بیومولکول‌ها)

در پژوهشی که توسط تابوردا و همکاران[۷۰] انجام شده است، هدف کاهش گرانروی نفت سنگین به‌منظور افزایش درآمد حاصل از فروش نفت، جلوگیری از خام‌فروشی و تولید فرآورده‌های با ارزش بالاتر و رفع آلودگی‌های زیست‌محیطی مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، جداسازی ترکیبات زیستی از میکروارگانیزم‌هایی که در طبیعت واکنش‌های شکست هیدروکربنی را کاتالیز می‌کنند، صورت گرفت.

نانوذرات مختلف که در شکست ترکیبات هیدروکربنی مؤثرند، سنتز شده و مورد بررسی قرار گرفتند. اثرات ترکیبات زیستی و نانوذرات بر ساختار ترکیبات سنگین آلی مورد آزمایش و آنالیز قرار گرفت و نتایج چشمگیری را نشان داد.

بیومولکول‌ها سبب کاهش ویسکوزیتی و نیروهای هیدروفوبی شدند، حال آنکه نانوذرات افزایش در نیروهای هیدروفوبی را نشان دادند. استفاده از روش‌های نانوبیوتکنولوژی می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در کاهش گرانروی نفت سنگین مطرح شود. در این روش، نانوذراتی مانند نانوذرات سیلیکا، نانوذرات کربن و نانوذرات فلزی به‌عنوان عامل کاهش گرانروی نفت سنگین استفاده می‌شوند.

این نانوذرات با تغییر خواص سطحی نفت، باعث کاهش گرانروی آن می‌شوند. همچنین، با افزایش سطح تماس با نفت، می‌توانند به عمق بیشتری در نفت نفوذ کنند و باعث کاهش گرانروی آن شوند. علاوه بر این، این نانوذرات می‌توانند به‌عنوان یک ماده فعال در نفت عمل کنند و با تولید حرارت در فرآیند اصلاح نفت، موجب کاهش گرانروی آن گردند.

با توجه به تحقیقات انجام شده، استفاده از نانوذرات در روش‌های نانوبیوتکنولوژی می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در کاهش گرانروی نفت سنگین داشته باشد. همچنین، تأثیر بیشتری در کاهش گرانروی نفت سنگین در دماهای بالاتر مشاهده می‌شود؛ بنابراین، استفاده از روش‌های نانوبیوتکنولوژی می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر و نوین برای بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌های نفت‌کشی مورد استفاده قرار گیرد.

۷-۱۱. برهمکنش بین مشتق کیتوزان آبگریز و آسفالتین در نفت سنگین برای کاهش گرانروی نفت سنگین

یو و همکاران[۷۱] در تحقیقی به سنتز N-[(2-hydroxy-3-trimethylammonium) propyl] O-stearoyl chitosan tetraphenylboride (sc-CTS-st) از کیتوزان پرداخته‌اند. این ترکیب شامل 2,3-epoxy-propyl trimethyl ammonium chloride، sodium tetraphenylboron و stearyl chloride است.

کلرید sc-CTS-st حاوی هیدروکربن آلیفاتیک اشباع با زنجیره بلند، گروه هیدروکسیل و حلقه بنزن است که می‌تواند به‌طور کامل در نفت سنگین حل شود و با آسفالتین برهمکنش داشته باشد.

در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، گرانروی نفت سنگین را می‌توان حداکثر تا ۱۳۸۰۰ میلی پاسکال کاهش داد که نرخ کاهش گرانروی ۵۴/۵۷ درصد را نشان می‌دهد. تجزیه و تحلیل‌های SEM و XRD نشان دادند که sc-CTS-st می‌تواند بر ساختار تجمع سوپرمولکولی آسفالتین‌ها تأثیر بگذارد.

1. Nanobiotechnology Methods

با استفاده از FT-IR، مشخص شد که sc-CTS-st می‌تواند با آسفالتین به شکل پیوندهای هیدروژنی برهم‌کنش داشته باشد و از این طریق پیوند بین مولکول‌های آسفالتین را تضعیف کند.

۷-۱۲. سنتز یک کاهنده گرانروی نفت سنگین حاوی یک حلقه بنزن و مکانیسم کاهش گرانروی آن

با توجه به چالش‌های ناشی از گرانروی بالای نفت سنگین، توسعه کاهنده‌های گرانروی مؤثر به‌عنوان یک راهکار کلیدی در صنعت نفت مطرح شده است. در این راستا، یو و همکاران [۷۲] در مطالعه‌ای به سنتز یک کاهنده گرانروی مولکولی کوچک حاوی حلقه بنزن پرداخته‌اند و توانایی آن را در پخش آسفالتین‌ها و رزین‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

این کاهنده گرانروی باهدف معرفی گروه‌های قطبی به پراکندگی آسفالتین طراحی شده است. ساختار حلقه بنزن می‌تواند باعث نفوذ بهتر مولکول‌های کاهش‌دهنده گرانروی به ساختار انباشته آسفالتین و رزین شود. زنجیره کربن طولانی موجود در مولکول می‌تواند با پارافین تعامل کند تا حالت کریستالی پارافین را تغییر دهد و در نتیجه گرانروی نفت سنگین را کاهش دهد.

این ویژگی‌ها نشان‌دهنده این است که کاهنده گرانروی وظیفه کاهش گرانروی نفت سنگین را بر عهده دارد و وزن مولکولی کوچک‌تر می‌تواند به‌طور مؤثر از پدیده افزایش گرانروی در فرآیند کاهش گرانروی به دلیل وزن مولکولی بیش از حد جلوگیری کند.

نتایج تجربی نشان می‌دهد که کاهنده VR-1 توانایی کاهش گرانروی خوبی دارد. این کاهنده تأثیر بسیار خوبی بر پراکندگی آسفالتین و کاهش اندازه ذرات دارد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که با استفاده از VR-1، اندازه ذرات آسفالتین کاهش یافته و در نتیجه، جریان نفت بهبود یافته است.

مکانیسم کاهش گرانروی توسط این کاهنده شامل دو جنبه اصلی است:

۱. نفوذ به ساختار آسفالتین: حلقه بنزن موجود در ساختار کاهنده، امکان نفوذ به ساختارهای پیچیده آسفالتین را فراهم می‌کند و باعث جداسازی مولکول‌های سنگین می‌شود.

۲. تعامل با پارافین: زنجیره کربن طولانی با پارافین تعامل کرده و باعث تغییر در حالت کریستالی آن می‌شود که نتیجه‌اش کاهش گرانروی نفت است.

۷-۱۳. استفاده از شکست حرارتی[1]

یکی از روش‌های مورد استفاده برای کاهش گرانروی نفت، شکست حرارتی است. این روش به دلیل توانایی خود در تجزیه مولکول‌های سنگین نفت و تبدیل آن‌ها به هیدروکربن‌های سبک‌تر، در صنعت نفت و گاز اهمیت ویژه‌ای دارد. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی این روش، نیاز به دماهای بالا و ناپایداری فرآیند است. به همین دلیل، استفاده از کاتالیزورها برای بهبود برخی از مشکلات مانند ناپایداری و دمای بسیار بالا در این فرآیند ضروری است.

در فرآیند شکست حرارتی، کاتالیزورها می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی راندمان واکنش را افزایش دهند. استفاده از نانوکاتالیست‌های پراکنده در این روش، راندمان واکنش‌ها را به‌شدت افزایش می‌دهد. به‌طوری که در حضور هیدروژن و گرانروی کاتالیست نانو پراکنده، گرانروی نفت تا ۹۹ درصد کاهش می‌یابد.

علاوه بر شکست حرارتی، فرآیندهای با تکنولوژی مدرن مانند تابش، کاویتاسیون و امواج الکترومغناطیسی در مقیاس آزمایشگاهی نتایج خوبی را در دماهای بسیار پایین و فشارهای پایین ایجاد می‌کنند. به‌عنوان مثال، در یکی از این آزمایش‌ها، مایکروویو می‌تواند ۹۹/۷ درصد گرانروی نفت سنگین را در حضور نانوذرات نانو لوله‌های کربنی کاهش دهد[۴].

در روش شکست حرارتی، نفت با دمای بالا و فشار پایین به مخلوطی از هیدروکربن‌های سبک تبدیل می‌شود. نفت در دمای بالا در حضور کاتالیزورهای خاص تجزیه می‌شود و هیدروکربن‌های سبک تولید می‌شوند. این هیدروکربن‌های سبک با ویژگی‌های فیزیکی متفاوت از نفت اصلی، مانند گرانروی کمتر، به‌راحتی از نفت جدا می‌شوند.

شکست حرارتی باعث کاهش گرانروی نفت می‌شود و به تولید نفت خام باکیفیت بالاتر کمک می‌کند. این روش همچنین از نظر اقتصادی به‌صرفه است زیرا نیاز به تجهیزات پیچیده و هزینه‌های بالای انرژی را کاهش می‌دهد.

فرآیندهای شکست حرارتی مانند ویسکوشکن در صنعت نفت برای کاهش گرانروی مواد اولیه سنگین مانند پسماندهای اتمسفر و خلاء بدون تشکیل کک یا آسفالتین‌های ناپایدار استفاده می‌شود.

1. Thermal cracking

گرانـروی مهم‌تریـن ویـژگی بـرای حمل و نقـل نفت خام اسـت، اما این خاصیت همچنین وابستگی غیرخطی زیادی به دما و ترکیب دارد؛ بنابراین، اسـتفاده از روش شکست حرارتی می‌توانـد یک راهکار مؤثر برای مدیریت چالش‌های موجود در حمل و نقل نفت سنگین باشد[۱۷].

۸. جهت‌های آینده[1]

۸-۱. بهبود عملکرد نانوکاتالیزورها با ترکیب با مواد مغناطیسی و پلیمرها

نانوکاتالیزورهـا ماننـد نانوآهـن (Fe_3O_4) و نانوکربـن بـا پوشـاندن آن‌ها با پلیمرهایی مانند پلی اسـتر یا پلی آکریلیک می‌توانند مقاومت بالاتری در برابر شـرایط آکیتوزی و تخلخل سـاختاری داشـته باشـند. مطالعـات اخیـر نشـان داده‌اند که نانوسیلسیت پوشـانده با کربـن توانایی کاهـش گرانروی نفت سـنگین با سطح آسفالتین بالا را تا ۸۵ درصد افزایش می‌دهد [۷۳]. اسـتفاده از میدان‌هـای مغناطیـسی نیـز می‌توانـد بـه جمع‌آوری نانوکاتالیزورها پس از عملکرد کمک کند [۷۴].

۸-۲. توسعه کاتالیزورهای بیوشیمیایی و محیط‌زیست‌مطابق

کاتالیزورهـای تولیـد شـده از میکروب‌هـای غیـر خطرناک مانند باسیلـوس لیچنیفورمیس ACO4 یا ترکیبات بیولوژیکی می‌تواننـد عملکـرد کاهـش گرانـروی را بـا کاهـش سـمیت مـواد شیمیـایی افزایـش دهنـد. مطالعـات نشـان داده‌انـد کـه امولسیون‌سازهای تولید شده از این میکروب‌ها می‌توانند پایداری امولسیون نفت-آب را تا ۷۲ ساعت حفظ کنند[۶۶]. همچنین، استفاده از نانوکاتالیزورهای بیوشکننده مانند آنزیم‌های میکروبی می‌تواند به کاهش آلودگی محیطی کمک کند.

۸-۳. ترکیب نانوتکنولوژی با هوش مصنوعی (AI)

اسـتفاده از شـبکه‌های عصـبی بـرای پیش‌بیـنی عملکرد نانوکاتالیزورهـا در شـرایط مختلـف (دمـا، فشـار، غلظـت نانـوذرات) می‌تواند به بهینه‌سـازی فرآیندها کمک کند. ژنگ و همکاران[۷۵] در پژوهشی از شـبکه عصبی برای مدل‌سازی گرانروی نفت اسـتفاده کردند و هفت پارامتر شامل دما، فشار، وزن مولکولی، ضریب تراکم‌پذیری، وزن مخصوص، نسبت گاز به نفت و ضریب حجمی نفت را به‌عنوان ورودی‌های این شبکه در نظر گرفتند. نتایج محاسـبات نشـان داد که در دمای ۲۰۰ درجه فارنهایت و نسـبت گاز به نفت (GOR) ثابت، با افزایش وزن مولکـولی تا حدود ۱۵۰ درصد، گرانـروی نفت تقریباً ۲۰ درصد افزایـش یافت. همچنین، در همان دمـا و GOR ثابت، بـا افزایش وزن مخصوص تا حـدود ۱۴۳ درصد، گرانروی نفت بین ۱ تـا ۲/۵ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، با افزایش دما از ۲۰۰ به ۲۳۰ درجه فارنهایت و افزایش ضریب تراکم‌پذیری بـه میـزان ۱۸/۸ درصد در فشـارهای مختلـف و GOR ثابت، گرانروی نفت بین ۰/۷ تا ۲/۸ درصد کاهش یافت.

مدل‌هـای AI می‌تواننـد پارامترهـای بهینـه را بـا دقـت بـالا تعییـن کنند، ماننـد مطالعه ژائـو و همـکاران [۳۰] که با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی، به کاهش ۹۵ درصد گرانروی نفت دسـت یافتنـد. همچنین، حسـگرهای الکترونیـکی برای اندازه‌گیری آنلاین گرانروی می‌تواند عملکرد سیسـتم را بهبود بخشد[۷۶].

۸-۴. کاربرد نانوکاتالیزورها در شرایط عملی (میدانی)

آزمایشـات میـدانی بـر روی نانوکاتالیزورهـا در لوله‌هـای انتقـال و مخـازن نفت ضروری اسـت. مطالعات نشـان داده‌اند که نانوآهـن در لوله‌های انتقال می‌تواند رسـوب آسـفالتین را تـا ۶۰ درصـد کاهش دهد[۱۷]؛ امـا نیاز به بـررسی دیرینگی عملکـرد و مقاومت در برابر افت فشـار وجود دارد. اسـتفاده از نانوکاتالیزورهـای قابـل بازیـابی (ماننـد نانوآهـن مغناطیسی) می‌تواند هزینه و آلودگی را کاهش دهد[۷۴].

۸-۵. کاهش وابستگی به مواد شیمیایی سمی

استفاده از حلال‌های غیرسمی مانند اتانول یا آب جایگزین حلال‌های آلی سـمی مانند بنزین می‌توانـد به کاهش آلودگی محیـطی کمک کنـد. مطالعات نشـان داده‌اند کـه نانوکربن با اتانـول توانایی کاهـش گرانروی بـدون تولید اکسیـژن آزاد را دارد[۷۷]. همچنیـن، اسـتفاده از نانوکاتالیزورهـای ترکیـبی (مانند نانوسیلسیت + نانوآهن) می‌تواند عملکرد را در شـرایط مختلف افزایش دهد.

۸-۶. ترکیب روش‌های نانوکاتالیزور با فناوری‌های جدید

- ترکیب با پرتوافکنی لیزری: استفاده از پرتوافکنی لیزری برای فعال‌سازی نانوکاتالیزورها در دماهای پایین می‌تواند کاهش گرانروی را تا ۷۰ درصد افزایش دهد[۷۸].
- ترکیب با امواج فراصوت: امواج فراصوت باعث شکسـت مولکول‌هـای سـنگین نفـت و افزایـش تعامـل آن‌ها با نانوکاتالیزورها می‌شوند[۷۹].

1. Future Directions

- کاربـرد میدان‌هـای الکتریکی/مغناطیسـی: میدان‌های الکتریـکی بـا شـدت ۲/۷۸ ولت تـا ۹۶ درصـد کاهش گرانروی را در نفت سنگین ایجاد کرده‌اند[۷۸].

۸-۷. توسـعه نانوکاتالیزورهـا بـرای نفت‌هـای خاص (ماننـد نفـت آلیافی)

نانوکاتالیزورهـا می‌تواننـد در نفت‌هـای آلیافی (با سـاختار پولیمری آسفالتین) کاربرد داشته باشند. مطالعات نشان داده‌اند که نانوسیلسیت با حفظ سـاختار پولیمری آسفالتین، گرانروی را بدون خسارت به مولکول‌های نفت کاهش می‌دهد[۱۴].

۸-۸. اسـتفاده از مدل‌سـازی تئوریک بـرای طراحی نانوکاتالیزورها

محاسـبات تئوریـک با اسـتفاده از نرم‌افزارهای محاسـبات مولکـولی (ماننـد DFT) می‌تواننـد نقـش نانوکاتالیزورهـا در شکسـت پیوندهـای آسـفالتین را تحلیل کننـد. مطالعه وانگ و همـکاران[۶۵] نشـان داد کـه مدل‌های مولکـولی می‌توانند عملکرد نانوکاتالیزورها را با دقت بالا پیش‌بینی کنند.

۸-۹. توسـعه اسـتانداردهای بین‌المللی برای کیفیت نانوکاتالیزورها

برقراری اسـتانداردهایی مانند اندازه نانوذرات، عملکرد تحت شـرایط میدانی و پایـداری می‌توانـد به افزایـش اعتماد صنعتی بـه این فنـاوری کمـک کند. مطالعـات اخیـر نشـان داده‌اند که نانوکاتالیزورها با اندازه ۱۰-۲۰ نانومتر عملکرد بهتری دارند[۱۱].

۹. نتیجه‌گیری

کاهـش گرانروی نفـت خام سـنگین به‌عنـوان یک چالش کلیـدی در صنعـت نفت، نیازمنـد اسـتفاده از روش‌های نوین و کارآمد اسـت. این مطالعه مروری نشـان می‌دهد که فناوری نانوکاتالیسـت‌ها به‌ویـژه نانـوذرات فلزی (نظیر نیـکل، آهن و مس) و نانوکربن، نقش محوری در کاهش چشـمگیر گرانروی نفت سـنگین ایفا می‌کنند. به‌عنوان مثال، نانوکاتالیسـت‌های نیکل و کربن در ترکیب با گرمایش مایکروویو توانسته‌اند تا ۹۹ درصد کاهش گرانروی را در شرایط آزمایشگاهی محقق سازند. همچنین، نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) و نانوکاتالیسـت‌های سیلیـس بـا مکانیسـم جـذب سـطحی آسـفالتین‌ها، کاهـش گرانروی تا ۹۵ درصد را نشان داده‌اند.

روش‌های ترکیبی نظیر استفاده هم‌زمان از امواج فراصوت یـا میدان‌های مغناطیـسی بـا نانوکاتالیسـت‌ها، به‌دلیل اثرات هم‌افزایی، بهبود قابل‌توجهی در کارایی فرآیند ایجاد می‌کنند. از سـوی دیگر، روش‌های حرارتی مانند Aquathermolysis کاتالیسـتی و شکسـت حـرارتی، اگرچـه پرهزینـه و انرژی‌بـر هسـتند، امـا در کاهـش وزن مولکولی ترکیبات سـنگین نفت موفـق عمـل کرده‌اند. با این حـال، چالش‌هایی نظیـر پایداری نانوکاتالیسـت‌ها در شـرایط عملیـاتی، هزینه سـنتز و بازیافت آن‌ها نیازمند توجه بیشتر است.

روش‌هـای مبتـنی بـر زیسـت‌فناوری، نظیـر اسـتفاده از امولسیون‌کننده‌هـای تولیدشـده توسـط باکتری‌هـا، به‌عنوان گزینه‌ای سـازگار با محیط‌زیست مطرح هسـتند. این روش‌ها ضمـن کاهـش ۶۰-۸۰ درصـد گرانروی، از تشـکیل رسـوبات آسـفالتینی جلوگیـری می‌کننـد. همچنیـن، کاربـرد مایعات یـونی و پلیمرهـای هوشـمند (ماننـد پـلی وینیـل الـکل) بـه دلیل سـازگاری با فرآیندهـای صنعتی، پتانسیل بـالایی برای تجاری‌سازی دارند.

در راسـتای آینده، ترکیب نانوکاتالیسـت‌ها بـا فناوری‌های پیشـرفته نظیـر هـوش مصنـوعی (برای بهینه‌سـازی شـرایط واکنـش) و توسـعه کاتالیسـت‌های چندمنظـوره مغناطیسـی (بـرای بازیـابی آسـان) می‌تواند تحول چشـمگیری در صنعت ایجاد کند. علاوه بر این، استانداردسازی نانوکاتالیست‌ها از نظر اندازه ذرات، پایداری حرارتی و سـازگاری با محیط‌زیست، گام ضروری برای گسـترش کاربرد آن‌ها در مقیاس صنعتی است. درنهایـت، کاهش وابسـتگی بـه حلال‌های سـمی و جایگزینی آن‌هـا با مـواد غیرسـمی (ماننـد آب یا اتانـول) به‌عنـوان یک اولویت زیست‌محیطی مطرح می‌باشد.

فهرست علائم اختصاری

طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه	*FT-IR*
پراش اشعه ایکس	*XRD*
میکروسکوپ الکترونی روبشی	*SEM*
میکروسکوپ الکترونی عبوری	*TEM*
نسبت گاز به نفت	*GOR*
نسبت هیدروژن به کربن	*H/C*
حجم بر حجم	*V/V*
شاخص نفت آمریکا	*API*
هوش مصنوعی	*AI*
واحد اندازه‌گیری گرانروی مایعات	*cP*

مراجع:

[1]. Souas F., Safri A., Benmounah A., "A review on the rheology of heavy crude oil for pipeline transportation," Petroleum Research, vol. 6, pp. 116-136,(2021).

[2]. Soliman A. A., Aboul-Fetouh M. E., Gomaa S., Aboul-Fotouh T. M., Attia A. M., "Optimizing in-situ upgrading of heavy crude oil via catalytic aquathermolysis using a novel graphene oxide-copper zinc ferrite nanocomposite as a catalyst," Scientific Reports, vol. 14, pp. ,(2024).

[3]. Gao C., Xiong R., Guo J., Kiyingi W., Song H., Wang L., Zhang W., Chen X., "A review of chemical viscosity reducers for heavy oil: Advances and application strategies," Fuel Processing Technology, vol. 269, pp. ,(2025).

[4]. Rueda-Velásquez R. I., Gray M. R., "A viscosity-conversion model for thermal cracking of heavy oils," Fuel, vol. 197, pp. 82-90,(2017).

[5]. Zachariah A., De Klerk A., "Partial Upgrading of Bitumen: Impact of Solvent Deasphalting and Visbreaking Sequence," Energy and Fuels, vol. 31, pp. 9374-9380,(2017).

[6]. Sabet S. A., Omidkhah M., Jafari A., "Viscosity reduction of extra-heavy crude oil using nanocatalysts," Korean Journal of Chemical Engineering, vol. 39, pp. 1207-1214,(2022).

[7]. Wu C., Su J., Zhang R., Lei G., Cao Y., "The use of a nano-nickel catalyst for upgrading extra-heavy oil by an aquathermolysis treatment under steam injection conditions," Petroleum Science and Technology, vol. 31, pp. 2211-2218,(2013).

[8]. Zhong X., Chen J., An R., Li K., Chen M., "A state-of-the-art review of nanoparticle applications with a focus on heavy oil viscosity reduction," Journal of Molecular Liquids, vol. 344, pp. ,(2021).

[9]. Patel H., Shah S. N., Ahmed R., Ucan S., "Effects of nanoparticles and temperature on heavy oil viscosity," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. pp. ,(2018).

[10]. Afzal S., Ehsani M. R., Nikookar M., Khodabandeh-Shahraki A. R., Roayaei E., Mohammadi A. H., "Reduction of heavy oil viscosity using nanoparticles in enhanced oil recovery process," Enhanced Oil Recovery: Methods, Economic Benefits and Impacts on the Environment, vol. pp. 169-185,(2015).

[11]. Li H., Gao H., Zhao X., Xia Z., Yu B., Sun D., "Experimental study on viscosity reduction of heavy oil with water content by synergistic effect of microwave and nano-catalyst," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. pp. 109271,(2022).

[12]. Shokrlu Y. H., Babadagli T., "Viscosity reduction of heavy oil/bitumen using micro- and nano-metal particles during aqueous and non-aqueous thermal applications," Journal of Petroleum Science and Engineering, pp. 210-220,(2014).

[13]. Sabet S., Omidkhah M., Jafari A., "Viscosity reduction of extra-heavy crude oil using nanocatalysts," Korean Journal of Chemical Engineering, vol. 39, pp. 1-8,(2022).

[14]. Iskandar F., Dwinanto E., Abdullah M., Muraza O., "Viscosity reduction of heavy oil using nanocatalyst in aquathermolysis reaction," KONA Powder and Particle

aquathermolysis," Materials Science Forum, vol. 737, pp. 93-97,(2013).

[22]. Chen Y., Wang Y., Wu C., Xia F., "Laboratory experiments and field tests of an amphiphilic metallic chelate for catalytic aquathermolysis of heavy oil," Energy & Fuels, vol. 22, pp. 1502-1508,(2008).

[23]. Wang Y., Chen Y., He J., Li P., Yang C., "Mechanism of catalytic aquathermolysis: Influences on heavy oil by two types of efficient catalytic ions: Fe^{3+} and Mo^{6+}," Energy & Fuels, vol. 24, pp. 1502-1510,(2010).

[24]. Nurhayati T., Iskandar F., Khairurrijal K., Mikrajuddin A., "Syntheses of hematite (α-Fe_2O_3) nanoparticles using microwave-assisted calcination method," Materials Science Forum, vol. 737, pp. 197-203,(2013).

[25]. Nugraha M. I., Noorlaily P., Abdullah M., Khairurrijal K., Iskandar F., "Synthesis of $NixFe_3$-xO_4 nanoparticles by microwave-assisted coprecipitation and their application in viscosity reduction of heavy oil," Materials Science Forum, vol. 737, pp. 204-208,(2013).

[26]. Iskandar F., Fitriani P., Merissa S., Mukti R. R., Khairurrijal, Abdullah M., "Fe_3O_4/Zeolite nanocomposites synthesized by microwave assisted coprecipitation and its performance in reducing viscosity of heavy oil," AIP conference proceedings, vol. 1586, pp. 132-135,(2014).

[27]. Dehaghani A. H. S., Badizad M. H., "Experimental study of Iranian heavy crude oil viscosity reduction by diluting with heptane, methanol, toluene, gas condensate and naphtha," Petroleum, vol. 2, pp. 415-424,(2016).

[28]. Doust A. M., Rahimi M., Feyzi M., "Effects Journal, vol. 33, pp. 3-16,(2016).

[15]. Pinzón D. M., "Rheological demonstration of heavy oil viscosity reduction by NiO/SiO_2 nanoparticles-assisted ultrasound cavitation," Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, vol. 2018-September, pp. ,(2018).

[16]. Wang H., Fan W., Li J., Tang X., Qing D., Lu J., "Size effect of iron oxide nanocatalysts on heavy oil viscosity reduction through catalytic aquathermolysis," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 186, pp. ,(2025).

[17]. Sabet S., Omidkhah M., Jafari A., "Methods for Viscosity Reduction of Heavy Crude Oil with Focus on Nano Catalysts: A Review Study," Iranian Chemical Engineering Journal, pp. 74-85,(2020).

[18]. Li K., Hou B., Wang L., Cui Y., "Application of carbon nanocatalysts in upgrading heavy crude oil assisted with microwave heating," Nano letters, vol. 14, pp. 3002-3008,(2014).

[19]. Mateus L., Taborda E. A., Moreno-Castilla C., López-Ramón M. V., Franco C. A., Cortés F. B., "Extra-heavy crude oil viscosity reduction using and reusing magnetic copper ferrite nanospheres," Processes, vol. 9, pp. 175,(2021).

[20]. Wei L., Zhu J.-h., Qi J.-h., "Application of nano-nickel catalyst in the viscosity reduction of Liaohe extra-heavy oil by aqua-thermolysis," Journal of Fuel Chemistry and Technology, vol. 35, pp. 176-180,(2007).

[21]. Noorlaily P., Nugraha M. I., Khairurrijal K., Abdullah M., Iskandar F., "Ethylene glycol route synthesis of nickel oxide nanoparticles as a catalyst in

metals salt solutions as additives in steam recovery processes," SPE Annual Technical Conference and Exhibition?, pp. SPE-18076-MS,(1988).

[36]. Angeles M., Leyva C., Ancheyta J., Ramírez S., "A review of experimental procedures for heavy oil hydrocracking with dispersed catalyst," Catalysis Today, vol. 220, pp. 274-294,(2014).

[37]. Zhang J., Li X., Chen G., Su H., Zhao W., "Study on aquathermolysis of heavy oil at relatively low temperature catalyzed by water-soluble complexes," J. Fuel Chem. Technol, vol. 42, pp. 443-448,(2014(.

[38]. Clark P. D., Dowling N. I., Hyne J. B., Lesage K. L., "The chemistry of organosulphur compound types occurring in heavy oils: 4. the high-temperature reaction of thiophene and tetrahydrothiophene with aqueous solutions of aluminium and first-row transition-metal cations," Fuel, vol. 66, pp. 1353-1357,(1987).

[39]. Clark P. D., Hyne J. B., "Chemistry of organosulphur compound types occurring in heavy oil sands: 3. Reaction of thiophene and tetrahydrothiophene with vanadyl and nickel salts," Fuel, 1649,(1984).

[40]. Zhao X.-f., Tan X.-h., Liu Y.-j., "Behaviors of oil-soluble catalyst for aquathermolysis of heavy oil," Ind Catal, vol. 11, pp. 31-34,(2008).

[41]. Zhao F., Liu Y., Wu Y., Zhao X., Tan L., "Study of catalytic aquathermolysis of heavy oil in the presence of a hydrogen donor," Chemistry and Technology of Fuels and Oils, vol. 48, pp. 273-282,(2012).

[42]. Chao K., Chen Y., Li J., Zhang X., Dong B., "Upgrading and visbreaking of super-heavy oil by catalytic aquathermolysis with of solvent addition and ultrasound waves on viscosity reduction of residue fuel oil," Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, vol. 95, pp. 353-361,(2015).

[29]. Mousavi S. M., Ramazani A., Najafi I., Davachi S. M., "Effect of ultrasonic irradiation on rheological properties of asphaltenic crude oils," Petroleum Science, vol. 9, pp. 82-88,(2012).

[30]. Zhao F., Liu Y., Lu N., Xu T., Zhu G., Wang K., "A review on upgrading and viscosity reduction of heavy oil and bitumen by underground catalytic cracking," Energy Reports, vol. 7, pp. 4249-4272,(2021).

[31]. Maity S., Ancheyta J., Marroquín G., "Catalytic aquathermolysis used for viscosity reduction of heavy crude oils: A review," Energy & Fuels, vol. 24, pp. 2809-2816,(2010).

[32]. Zhong L., Liu Y., Fan H., Jiang S., "Liaohe extra-heavy crude oil underground aquathermolytic treatments using catalyst and hydrogen donors under steam injection conditions," SPE international improved oil recovery conference in Asia Pacific, pp. 84863,(2003).

[33]. Yi Y., Li S., Ding F., Yu H., "Change of asphaltene and resin properties after catalytic aquathermolysis," Petroleum Science, vol. 6, pp. 194-200,(2009).

[34]. Ajumobi O. O., Muraza O., Kondoh H., Hasegawa N., Nakasaka Y., Yoshikawa T., Al Amer A. M., Masuda T., "Upgrading oil sand bitumen under superheated steam over ceria-based nanocomposite catalysts," Applied energy, vol. 218, pp. 1-9,(2018).

[35]. Rivas O., Campos R., Borges L., "Experimental evaluation of transition

[51]. Brown A. R., Hart A., Coker V. S., Lloyd J. R., Wood J., "Upgrading of heavy oil by dispersed biogenic magnetite catalysts," Fuel, vol. 185, pp. 442-448,(2016).

[52]. Hendraningrat L., Souraki Y., Ole T., "Experimental investigation of decalin and metal nanoparticles-assisted bitumen upgrading during catalytic aquathermolysis," SPE/EAGE European unconventional resources conference and exhibition, pp. 1-11,(2014).

[53]. Yang Z., Liu X., Li X., Zhao M., Zhang Z., Su C., "Preparation of silica supported nanoscale zero valence iron and its feasibility in viscosity reduction of heavy oil," Micro & Nano Letters, vol. 9, pp. 355-358,(2014).

[54]. Zhao K., Wang X., Pan H., Li Q., Yang J., Li X., Zhang Z., "Preparation of molybdenum-doped akaganeite nano-rods and their catalytic effect on the viscosity reduction of extra heavy crude oil," Applied Surface Science, vol. 427, pp. 1080-1089,(2018).

[55]. Ovalles C., Filgueiras E., Morales A., Scott C. E., Gonzalez-Gimenez F., Embaid B. P., "Use of a dispersed iron catalyst for upgrading extra-heavy crude oil using methane as source of hydrogen☆," Fuel, vol. 82, pp. 887-892,(2003).

[56]. Masoudian K., Sadighi S., Tofigh A., Khodadadi Z., "Upgrading extra heavy crude oil using technical grade sodium molybdate," Journal of Applied Researches in Chemistry, vol. 7(4), pp. 39-45,(2014).

[57]. He Z., Zhan W., Zhang J., Pang Q., Zhang S., Tian C., "Influence of sodium on coke microstructure in different reaction atmosphere," Minerals, Metals and Materials Series, pp. 161-169,(2017).

aromatic sulfonic copper," Fuel Processing Technology, vol. 104, pp. 174-180,(2012).

[43]. Chen Y., Yang C., Wang Y., "Gemini catalyst for catalytic aquathermolysis of heavy oil," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 89, pp. 159-165,(2010).

[44]. Wen S., Zhao Y., Liu Y., Hu S., "A study on catalytic aquathermolysis of heavy crude oil during steam stimulation," SPE International Conference on Oilfield Chemistry?, pp. SPE-106180-MS,(2007).

[45]. Liu Y., Chen E., Wen S., "The preparation and evaluation of oil-soluble catalyst for aquathermolysis of heavy oil," Chem. Eng. Oil Gas, vol. 34, pp. 511-512,(2005).

[46]. Yusuf A., Al-Hajri R. S., Al-Waheibi Y. M., Jibril B. Y., "In-situ upgrading of Omani heavy oil with catalyst and hydrogen donor," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 121, pp. 102-112,(2016).

[47]. Li C., Meng H., Yang T., Li J., Qin Y., Huang Y., Deng W., "Study on catalytic performance of oil-soluble iron-nickel bimetallic catalyst in coal/oil co-processing," Fuel, vol. 219, pp. 30-36,(2018).

[48]. Chen Y., Wang Y., Lu J., Wu C., "The viscosity reduction of nano-keggin-$K_3PMo1_2O_{40}$ in catalytic aquathermolysis of heavy oil," Fuel, vol. 88, pp. 1426-1434,(2009).

[49]. Chheda B. D., Banavali R. M., Mazza G., "Recovery and transportation of heavy crude oils," Google Patents, ,(2002).

[50]. Galarraga C. E., Pereira-Almao P., "Hydrocracking of Athabasca bitumen using submicronic multimetallic catalysts at near in-reservoir conditions," Energy & Fuels, vol. 24, pp. 2383-2389,(2010).

content," Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 163, pp. 37-44,(2018).

[65]. Wang J., Liu R., Tang Y., Zhu J., Sun Y., Zhang G., "Synthesis of polycarboxylate viscosity reducer and the effect of different chain lengths of polyether on viscosity reduction of heavy oil," Polymers, vol. 14, pp. 3367,(2022).

[66]. Farahbakhsh A., Taghizadeh M., Yakhchali B., Movagharnejad K., "Evaluating the Role of an Emulsifier Produced by Bacillus licheniformis Strain ACO4 in Reducing the Viscosity of Nowruz Heavy Crude Oil," Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran, vol. 30, pp. 53-60,(2011).

[67]. Luo J. H., Zhao C. Q., Zhang D., Wang K., Jiang B., "A Preliminary Study on Viscosity Reduction of Heavy Crude Oil by Using Sulfonated Heavy Crude Oil," Oilfield Chemistry, 208,(2003).

[68]. Fei D., Guo J., Xiong R., Zhang X., Kang C., Kiyingi W., "Preparation and Performance Evaluation of Amphiphilic Polymers for Enhanced Heavy Oil Recovery," Polymers, vol. 15, pp. ,(2023).

[69]. Alade O. S., Al Shehri D., Mahmoud M., Mokheimer E. M. A., Al Hamad J., Kamal M. S., Al-Nakhli A., Sasaki K., "A novel technique for heavy oil recovery using poly vinyl alcohol (PVA) and PVA-NaOH with ethanol additive," Fuel, vol. 285, pp. ,(2021).

[70]. Taborda E. A., Alvarado V., Franco C. A., Cortés F. B., "Rheological demonstration of alteration in the heavy crude oil fluid structure upon addition of nanoparticles," Fuel, vol. 189, pp. 322-333,(2017).

[71]. Yu J., Quan H., Huang Z., Shi J., Chang S., Zhang L., Chen X., Hu Y., "Interaction between hydrophobic chitosan derivative

[58]. Alfi M., Barrufet M. A., Da Silva P. F., Moreira R. G., "Simultaneous application of heat and electron particles to effectively reduce the viscosity of heavy deasphalted petroleum fluids," Energy and Fuels, vol. 27, pp. 5116-5127,(2013).

[59]. Ali E., Wazeer I., Almutlaq A., Rallapalli J., Hadj-Kali M. K., "Retrofitting Heat Exchanger Network of Industrial Ethylene Glycol Plant using Heat Integration based on Pinch Analysis," Polish Journal of Chemical Technology, vol. 24, pp. 8-20,(2022).

[60]. Askarian M., Vatani A., Edalat M., "Heavy oil upgrading in a hydrodynamic cavitation system: CFD modelling, effect of the presence of hydrogen donor and metal nanoparticles," Canadian Journal of Chemical Engineering, vol. 95, pp. 670-679,(2017).

[61]. Li X., Hou L., He S., Chai C., Huang Y., "Experimental Investigation of Magnetic Field Influence on Viscosity of Waxy Crude Oil Emulsion," Environmental Science and Engineering, pp. 183-194,(2023).

[62]. Chen X., Hou L., Li W., Li S., "Influence of electric field on the viscosity of waxy crude oil and micro property of paraffin: A molecular dynamics simulation study," Journal of Molecular Liquids, vol. 272, pp. 973-981,(2018).

[63]. Subramanian D., Wu K., Firoozabadi A., "Ionic liquids as viscosity modifiers for heavy and extra-heavy crude oils," Fuel, vol. 143, pp. 519-526,(2015).

[64]. Zhu L., Wang Y., Wang S., Huo T., Jing X., Li A., Xia D., "High viscosity-reducing performance oil-soluble viscosity reduction agents containing acrylic acid ester as monomer for heavy oil with high asphaltene

and asphaltene in heavy oil to reduce viscosity of heavy oil," International Journal of Biological Macromolecules, vol. 247, pp. 125573,(2023).

[72]. Yu J., Quan H., Huang Z., Li P., Chang S., "Synthesis of a Heavy-Oil Viscosity Reducer Containing a Benzene Ring and Its Viscosity Reduction Mechanism," ChemistrySelect, vol. 7, pp. e202102694,(2022).

[73]. Abdollahzadeh Sharghi E., "Challenges in using heavy crude oil: formation of stable emulsions and difficulties in pipeline transportation," Farayandno, vol. 13, pp. 61-84,(2018).

[74]. Tandon R., Tandon N., Patil S. M., "Overview on magnetically recyclable ferrite nanoparticles: synthesis and their applications in coupling and multicomponent reactions," RSC Advances, pp. 29333-29353,(2021).

[75]. Zheng Y. P., Liu Q., Nie C., Sun X., Chene Q. Q., "Research on the viscosity prediction model of viscous oil mixtures based on BP-neural network," Oilfield Chemistry, vol. 31, pp. 231-235,(2014).

[76]. Wang G., Li F., "Online viscosity measurement based on the electromechanical impedance of piezoelectric transducers," Proceedings of the 7th Asia-Pacific Workshop on Structural Health Monitoring, APWSHM 2018, pp. 450-457,(2018).

[77]. Vakili-Nezhaad G., Al-Wadhahi M., Gujrathi A. M., Al-Maamari R., Mohammadi M., "Effect of temperature and diameter of narrow single-walled carbon nanotubes on the viscosity of nanofluid: A molecular dynamics study," Fluid Phase Equilibria, vol. 434, pp. 193-199,(2017).

[78]. Zhang S., Sun X., Zheng D., Liu C., Miao X., Zhao K., "Characterization of crude oil viscosity change under laser irradiation," Laser Physics Letters, pp. ,(2022).

[79]. Azeez A. W., Hussein H. Q., "Viscosity reduction of heavy crude oil using ultrasonication assisted by SiFe nanoparticles," Chemical Papers, 2517,(2025).

IRANIAN JOURNAL OF GAS ENGINEERING

Volume 12 / Issue 2 / NO. 22 / Summer 2025 / Pages 18-49

Journal Homepage: www.ijge.irangi.org

A Review of Heavy Crude Oil Viscosity Reduction Methods Using Nanocatalysts and Other Techniques

Armin Sabetghadam-Isfahani[1,2], Yegane Davoodbeygi[3*], Roya Baghestani[4], Seyed Mahmoud Latifi[5]

1. Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran
2. Hormozgan Province Gas Company(HPGC), Bandar Abbas, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
4. M.Sc., Department of Safety Engineering and Technical Inspection, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
5. M.Sc. Student, Department of Corrosion and Materials Protection Engineering, Daryasahili Campus, Amirkabir University of Technology, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:
Received: 01 February 2025
Revised: 26 April 2025
Accepted: 07 May 2025

Keywords:
Viscosity
Heavy Crude Oil
Nanocatalyst, Advanced Methods
Nanocatalyst synthesis

ABSTRACT

Heavy crude oil, due to its high viscosity, poses difficulties in extraction and transportation, necessitating efficient methods for viscosity reduction. This review study evaluates various techniques, with a focus on nanocatalysts. Nanocatalysts such as nanosilica, nanonickel, nano iron oxide, and nanocarbon have shown significant reductions in viscosity (up to 99% under laboratory conditions) through facilitating chemical reactions and molecular breakdown. Their efficiency is enhanced when combined with technologies such as microwave heating and ultrasonic waves. Despite their high potential, nanocatalysts face challenges such as stability under operational conditions, high production costs, and recovery issues. Alternative methods, such as biotechnological approaches using bacterial emulsifiers, offer environmentally friendly solutions with viscosity reductions of 60-80%. Future research will focus on improving catalyst stability, developing environmentally friendly catalysts, and integrating with artificial intelligence for process optimization. This review highlights the economic and environmental benefits of nanocatalyst-based methods and emphasizes the need for ongoing research to overcome challenges and facilitate industrial application.

DOR: 20.1001.1.2502.1086.1404.02.17

How to cite this article

A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, R. Baghestani, S.M. Latifi, A Review of Heavy Crude Oil Viscosity Reduction Methods Using Nanocatalysts and Other Techniques. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2025 12(2): 18-49. (https://www.ijge.irangi.org/article_732239.html)

* Corresponding Author.
E-mail address: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir, (Y. Davoodbeygi).

Available online 22 September 2025

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)