Applied Research in Chemical - Polymer Engineering

Vol. 7, No.4
page 3-14 ,winter 2023

Experimental Study of the Effect of Microwave and Ultrasonic Waves on the Upgrading and Asphaltene Content of Heavy Crude Oil

Hamidreza Farshadfar, Reza Gharibshahi, Arezou Jafari*, Sharif Shoushtari

Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

Research subject: Using microwave and ultrasonic waves is a novel method in the petroleum industry that has been investigated for various purposes. Due to polar elements such as oxygen, nitrogen, and sulfur, oil molecules are affected by the electric field of microwave waves and create dipole moments that generate hotspots, increasing the temperature of the oil and breaking down heavy compounds such as asphaltene. Ultrasonic waves eliminate intermolecular forces by creating tiny bubbles and bursting them. It also leads to the breakdown of heavy molecules such as asphaltene.

Research approach: In this study, crude oil was exposed to microwave and ultrasonic radiation, and changes in its properties were investigated. The effects of changing parameters such as power and time on crude oil properties were also examined. Changes in the specific gravity and API can indicate the extent of the breakdown of heavy molecules such as asphaltene and improvement in crude oil quality.

Main results: Using microwave and ultrasonic waves can reduce the viscosity of crude oil by 12.4% and 6% and increase the API by 2.8 and 1.2 degrees, respectively. Asphaltene reduction due to microwave and ultrasonic waves is 9.3% and 4.3%, respectively, indicating the breakdown of these compounds and the conversion to smaller compounds soluble in oil, resulting in improved crude oil quality. The EDS results show an increase in the weight percentage of carbon and the reduction of elements such as oxygen and sulfur, which confirms this issue. Examining crude oil structure under microwave and ultrasonic radiation showed that microwave waves, in addition to affecting straight-chain hydrocarbons, also reduced aromatic compounds. However, ultrasonic waves had a more significant effect on straight-chain hydrocarbon structure.

key words

Microwave

Ultrasonic

Asphaltene

Upgrading

Viscosity

*To whom correspondence should be addressed:
ajafari@modares.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

پژوهش های کاربردی
مهندسی شیمی - پلیمر

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته ای
سال هفتم، شماره ۴، نسخه ۱
زمستان ۱۴۰۲ ، صفحه ۱۴-۳

مطالعه آزمایشگاهی تأثیر امواج ماکروویو و فراصوت بر بهبود کیفیت و میزان آسفالتین موجود در نفت خام سنگین

حمیدرضا فرشادفر، رضا غریب شاهی، آرزو جعفری*، شریف شوشتری

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیـــده

موضـوع تحقیـق: استفاده از امواج ماکروویو و فراصوت روش نوینی در صنعت نفت است که تاکنون برای مقاصد مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مولکول‌های نفت به دلیل داشتن عناصر قطبی همانند اکسیژن، نیتروژن و گوگرد تحت تأثیر میدان الکتریکی امواج ماکروویو قرار گرفته و با ایجاد ممان دوقطبی نقاط گرمی را به وجود می‌آورند که هم دمای نفت را افزایش داده و هم ترکیبات سنگین همانند آسفالتین را می‌شکند. امواج فراصوت نیروهای بین‌مولکولی را با ایجاد حباب‌های کوچک و ترکیدن آن‌ها از بین می‌برند. هم‌چنین ترکیدن حباب‌ها سبب شکستن مولکول‌های سنگین همانند آسفالتین می‌شود.

روش تحقیـق: در این تحقیق نفت خام تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت قرار گرفته و تغییرات خواص آن مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین تأثیر تغییر پارامترهایی همانند توان و زمان بر خواص نفت خام بررسی شده است. تغییرات گرانروی و API می‌تواند نشان دهنده میزان شکست مولکول‌های سنگین همانند آسفالتین و ارتقا نفت خام باشد.

نتایـج اصلـی: استفاده از امواج ماکروویو و فراصوت به ترتیب سبب کاهش ۱۲/۴ و ۶ درصدی گرانروی نفت خام و افزایش ۲/۸ و ۱/۲ درجهAPI می‌شود. هم‌چنین کاهش میزان آسفالتین در اثر اعمال امواج ماکروویو و فراصوت به ترتیب ۹/۳ و۴/۳ درصد است که نشان دهنده شکسته شدن این ترکیبات و تبدیل به ترکیبات سبک‌تر و در نتیجه ارتقا نفت خام می‌شود. در آزمون طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) افزایش درصد وزنی کربن و کاهش عناصری همانند اکسیژن و گوگرد تأییدکننده این موضوع است. بررسی ساختار نفت خام تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت نشان دهنده این است که امواج ماکروویو علاوه بر تأثیر بر هیدروکربن‌های راست زنجیر باعث کاهش ترکیبات آروماتیک نیز شده‌اند، اما امواج فراصوت بیشتر بر ساختار هیدروکربن‌های راست زنجیر تأثیر گذاشته‌اند.

کلمـات کلیـدی

ماکروویو

فراصوت

آسفالتین

ارتقا

گرانروی

*مسئول مکاتبات:
ajafari@modares.ac.ir

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

۱ مقدمه

حذف آسفالتین موجود در نمونه‌های نفتی می‌تواند از مشکلات عدیده‌ای در مخزن، دهانه چاه و حتی خطوط لوله جلوگیری کند و هزینه‌های پالایش نفت خام را کاهش می‌دهد. روش‌هایی که تاکنون برای حذف آسفالتین موجود در نمونه‌های نفت سنگین به کار برده شده است، عموماً مبتنی بر استفاده از مواد شیمیایی می‌باشد. این روش‌ها دارای مشکلات متعددی از قبیل قیمت بالا، هدر رفت درون مخزن و آسیب به سازند، کارایی پایین، عدم تحمل دما و فشار مخزن، عدم امکان استفاده در مخازن نامتعارف و ... هستند. استفاده از امواج ماکروویو و فراصوت می‌تواند به برداشت بیشتر نفت خام از میادین نفت سنگین به‌منظور تأمین انرژی موردنیاز صنایع بزرگ، جلوگیری از آسیب به سازند، بهبود کارایی اقتصادی تولید از مخازن نفت سنگین، کاهش هزینه‌های پایین‌دستی نظیر پالایش نفت خام سنگین و فوق سنگین و بیتومن‌ها، جلوگیری از پیامدهای منفی زیست‌محیطی و انتشار گازهای آلاینده و ... کمک بسیاری نماید [۱]، [۲].

در سالیان اخیر استفاده از تابش امواج ماکروویو به عنوان یک راهکار مناسب برای غلبه بر این مشکلات مورد توجه محققین قرار گرفته است [۳]. انتشار امواج ماکروویو در مخزن به دو صورت شکل می‌گیرد، یکی از طریق آنتن گسیل کننده امواج و دیگری هدایت امواج از سطح به درون مخزن ازطریق لوله جداری. باید به این نکته توجه داشت که وقتی منبع گسیل کننده در سطح وجود داشته باشد می توان از طریق لوله‌ی تولیدی و یا ازطریق فضای خالی بین جداری و لوله، امواج را به درون مخزن ساطع کرد. برای تزریق سیال در فرآیند گرمایش الکترومغناطیسی، می توان از دو جفت چاه افقی مانند پیکربندی SAGD یا دو چاه عمودی استفاده کرد [۴]. همچنین می‌توان در ابتدا سیال را تزریق کرده و برای مدت زمان مشخصی با نفت خام باقی گذاشت و سپس امواج ماکروویو را به آن تابش داد. اما به نظر می رسد که این روش باعث کاهش کارایی فرآیند گرمایش می‌شود. زیرا منطقه گرم محدود خواهد شد. اساس تمام روش های حرارتی ازدیاد برداشت نفت خام مانند گرمایش الکترومغاطیسی، گرم کردن حجم بیشتری از مخزن به صورت بهینه است [۵]. یکی از چالش‌های استفاده از امواج درون مخزن، عمق نفوذ محدود آنها است. عواملی مختلف مانند، طول موج و خواص سنگ و سیال همانند نوع نفت، دما، فشار، جنس سنگ و ... بر میزان عمق نفوذ این امواج درون سازند تأثیر گذار است. با جذب انرژی امواج تابیده شده توسط سنگ مخزن، موج به مرور زمان میرا می‌شود و انرژی خود برای نفوذ در سازند را از دست می‌دهد[۶]. از این رو استفاده از یک سیال تزریقی به عنوان حامل انرژی می‌تواند نقش مهمی در افزایش کارایی این روش از طریق جذب و انتقال گرما در حجم بزرگتری از مخزن شود.

آسفالتین‌ها مولکول‌های قطبی بزرگی هستند که تحت تأثیر میدان الکتریکی جهت‌گیری کرده و جاذب خوبی برای امواج ماکروویو می‌باشند. مولکول‌های آسفالتین تحت تأثیر تابش امواج ماکروویو و جذب انرژی تابیده شده از این امواج شکسته شده و به مولکول‌های کوچک‌تری تبدیل می‌شوند [۷]. این امر سبب کاهش نیروی چسبندگی بین نفت سنگین و سنگ و مثبت‌تر شدن بار سطحی آسفالتین می‌شود و حرکت نفت درون محیط متخلخل تسهیل می‌شود. لذا می‌توان میزان نفت بیشتر و با کیفیت‌تری را از یک مخزن نفتی برداشت کرد [۸].

امواج فراصوت با استفاده از ارتعاش متناوب خطی و دامنه بزرگ که به صورت زیگزاگ می‌باشد سبب ایجاد فشار زیادی در محیط و تغییرات در دما می‌شود. در شرایط محیطی سیال حاوی اتم‌های بسیار ریزی است که دارای گاز یا بخار غیرقابل انحلال است. اگر فشار محیط سیال به فشار بخار تغییر کند، این اتم‌ها به شکل بزرگ‌تری درمی‌آیند که به صورت حفره‌هایی خود را نشان می‌دهند. حال اگر این فشار توسط امواج فراصوت به مقدار بالاتری تأمین شوند، حباب‌ها حالت انفجاری پیدا می‌کنند و انرژی جنبشی باعث ایجاد شوک در نتیجه شکستن مولکول‌های سنگینی از جمله آسفالتین شوند [۹].

کاهش گرانروی نفت‌های سنگین نیازمند شکستن و تجزیه مولکول‌های سنگین آسفالتین می‌باشد، انرژی تفکیک پیوندهای C-S کمتر از انرژی تفکیک پیوندهای دیگر مولکول‌ها است. بنابراین، این پیوند اولین پیوندی است که شکسته شده و در نتیجه گرانروی نفت کاهش می‌یابد. انرژی تجزیه را می‌توان با واکنش‌های شیمیایی گرمازا بین ذرات فلزی و فاز نفت در حضور گرما تأمین کرد. در مطالعات گوناگونی کاهش گرانروی نفت بعد از قرار گرفتن در معرض امواج ماکروویو مشاهده شده است [۳].

تاکنون از امواج فراصوت در صنعت نفت برای اهداف مختلفی از جمله کاهش گرانروی [۱۰]، حذف پلاگ‌ها و رسوبات پارافینی [۱۱]، جلوگیری از رسوب نمک‌ها [۱۲]، افزایش تراوایی نسبی نفت خام [۱۳] و استفاده به منظور تحریک چاه [۱۴] استفاده شده است. مزیت‌های این روش نسبت به بقیه روش‌های تحریک چاه این است که دارای هزینه‌ی کمتری است، مواد اولیه کمتری نیاز دارد، مشکلات زیست‌محیطی کمتری دارد و هم‌چنین هم‌زمان با تولید از چاه و در حین عملیات بهره‌برداری نیز می‌توان از این روش استفاده کرد [۱۵]. تأثیر استفاده از امواج فراصوت بر میزان و ترکیب آسفالتین تاکنون به صورت دقیق مورد بررسی محققان نبوده است.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

آسفالتین به صورت کلوئیدی در نفت وجود دارد، بررسی آسفالتین‌هایی که تحت تابش امواج فراصوت قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد تابش این امواج سبب کاهش اندازه مولکول‌هایی آسفالتین می‌شود. به نظر می‌رسد، بعد از مدتی این تغییرات برگشت‌ناپذیر می‌شوند. ذکر این نکته ضروری است که این امواج تا یک مدت زمان مشخص سبب کاهش اندازه ذرات می‌شود و پس از مدتی اعمال امواج نتیجه عکس داشته و سبب افزایش اندازه ذرات و رسوب آسفالتین می‌شود. لذا انتخاب زمان به صورت بهینه ضروری به نظر می‌رسد. علت رسوب در اثر افزایش زمان را می‌توان تجمع رادیکال‌های شکسته دانست؛ به‌طوری‌که به هم پیوستن مجدد این رادیکال‌ها سبب کلوخه شدن ذرات آسفالتین و در نهایت رسوب آن‌ها می‌شود [۱۶].

در این تحقیق تأثیر استفاده از امواج ماکروویو و فراصوت بر خواص نفت خام از جمله گرانروی و درجه API بررسی و باهم مقایسه شده است. با توجه به ضرورت بهینه‌سازی توان و زمان، تأثیر این پارامترها بر میزان گرانروی و دمای نفت بررسی شده است. تغییرات ساختار نفت در اثر اعمال امواج ماکروویو و فراصوت با استفاده از تحلیل نتایج FTIR مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این تغییرات میزان آسفالتین موجود در نفت و عناصر موجود در آن در اثر اعمال امواج ماکروویو و فراصوت تحلیل شده است.

۲ بخش تجربی

۲-۱ مواد و روش‌ها

در این تحقیق از یک نمونه نفت سنگین API ۱۶/۹۸ استفاده شده است که گرانروی آن در دمای ^{o}C ۲۵ برابر با ۳۳۰ سانتی پواز بوده است، هم‌چنین میزان آسفالتین این نمونه نفتی بر اساس استاندارد IP-۱۴۳ برابر با ۱۱/۹ است. نمونه‌های نفت در معرض هرکدام از امواج ماکروویو و فراصوت قرار گرفته و به مدت ۲۴ ساعت در یخچال نگهداری شدند و سپس آنالیز ارتقای کیفیت آنها در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. مخلوط نفت در یک سیستم کاملاً بسته و درون یک بطری که درب آن بوسیله نوار تفلون کاملاً نشت‌بندی شده است، تحت تابش امواج قرار گرفت تا از عدم خروج ترکیبات سبک موجود در نفت خام اطمینان حاصل شود. همچنین پس از انجام هر فرآیند گرمایش، به محلول نفتی اجازه داده شد تا به دمای محیط برسد به این ترتیب برش‌های تبخیر شده دوباره به صورت مایع درآمده و مجددا وارد سیستم شدند.

دستگاه ماکروویو در توان ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ و دستگاه فراصوت در توان ۲۸۰ وات استفاده شده است. هم‌چنین فرکانس دستگاه ماکروویو ۲/۴۵ گیگاهرتز و فرکانس امواج فراصوت ۲۵ کیلوهرتز بوده است. برای استخراج آسفالتین نیز از تولوئن و هپتان شرکت مرک (Merck) و کاغذ صافی واتمن (Whatman) استفاده شده است.

۲-۲ اندازه‌گیری گرانروی و دما

برای اندازه‌گیری گرانروی محلول‌های مختلف از دستگاه رئومتر آنتون پار استفاده شده است، این دستگاه از نوع استوانه‌ای-مخروطی است و گرانروی مخروط‌ها را به صورت چرخشی اندازه‌گیری می‌کند. این دستگاه از اسپیندل‌های مختلف استفاده می‌کند که هرکدام توانایی اندازه‌گیری گرانروی در بازه‌های مختلف را دارد. در این تحقیق از اسپیندل CC۲۷ برای اندازه‌گیری گرانروی نمونه‌های نفتی استفاده شده است. نمونه‌ها در محفظه استوانه مانند ریخته می‌شود و با چرخش اسپیندل گرانروی نمونه ثبت می‌شود. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به گرانروی بالای محلول‌های نفتی، نرخ برشی بر روی ۱۰۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شده است. دمای نمونه‌ها نیز با استفاده از دماسنج لیزری اندازه‌گیری شده است.

۲-۳ اندازه‌گیری چگالی و درجه API

برای اندازه‌گیری چگالی از پیکنومتر استفاده شده است، با توجه به اینکه حجم این وسیله ۲۵ میلی‌لیتر است با اندازه‌گیری وزن مایعی که وارد آن می‌شود می‌توان چگالی و درجه API را با توجه به روابط زیر به دست آورد. که در آن m جرم مایع بر حسب گرم، v حجم مایع برحسب سانتی‌مترمکعب و ρ چگالی مایع بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

$$\rho = m/v \quad (۱)$$

$$API = (۱۴۱.۵/\rho) - ۱۳۱.۵ \quad (۲)$$

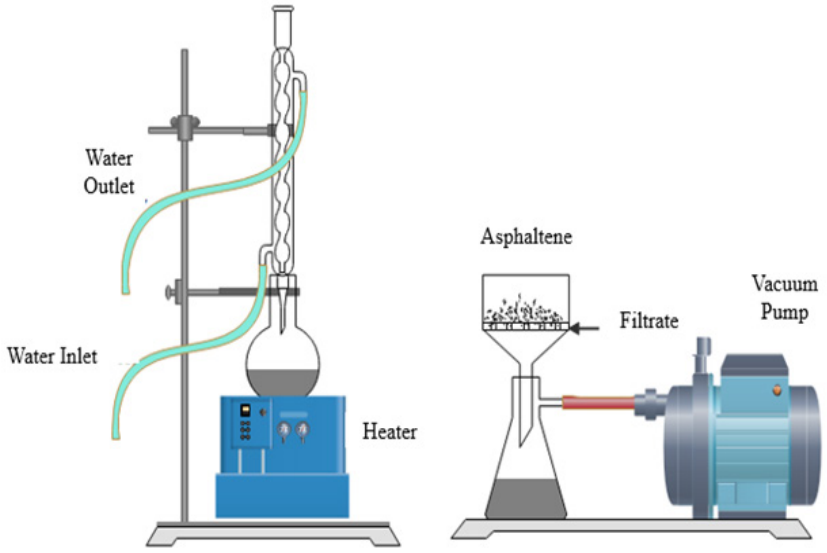
۲-۴ استخراج آسفالتین

برای استخراج آسفالتین در این پژوهش از روش استاندارد IP-۱۴۳ استفاده شده است که مبنای آن عدم حل شدن آسفالتین در آلکان‌ها و حل شدن آن در مواد دیگری همانند تولوئن و زایلین است. شماتیک این روش در شکل ۱ دیده می‌شود. برای شناسایی عناصر موجود در ترکیب آسفالتین نفت خام و بررسی تغییرات آن تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت از آنالیز EDS استفاده شده است.

۲-۵ آزمون طیف‌سنجی فروسرخ تبدیل فوریه (FTIR)

یکی از روش‌های طیف‌سنجی با امواج مادون‌قرمز است که در آن پرتو مادون‌قرمز به نمونه برخورد کرده، تعدادی از این پرتوها جذب نمونه شده و تعدادی از آن‌ها نیز از نمونه عبور می‌کنند. در نتیجه طیف‌ها جذب و عبور مادون‌قرمز توسط مولکول‌های نمونه را نشان می‌دهند. با استفاده از این روش می‌توان ساختار

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



شکل ۱. سامانه استخراج آسفالتین
Figure 1. Asphaltene extraction system

مواد سنتز شده یا ناشناخته را شناسایی کرد، هم‌چنین غلظت و کیفیت آن را بررسی نمود. در این تحقیق آزمون طیف‌سنجی با امواج مادون‌قرمز از نمونه‌های نفت خام و نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت با هم مقایسه شده است.

۳ نتایج و بحث

۳-۱ تأثیر امواج بر گرانروی

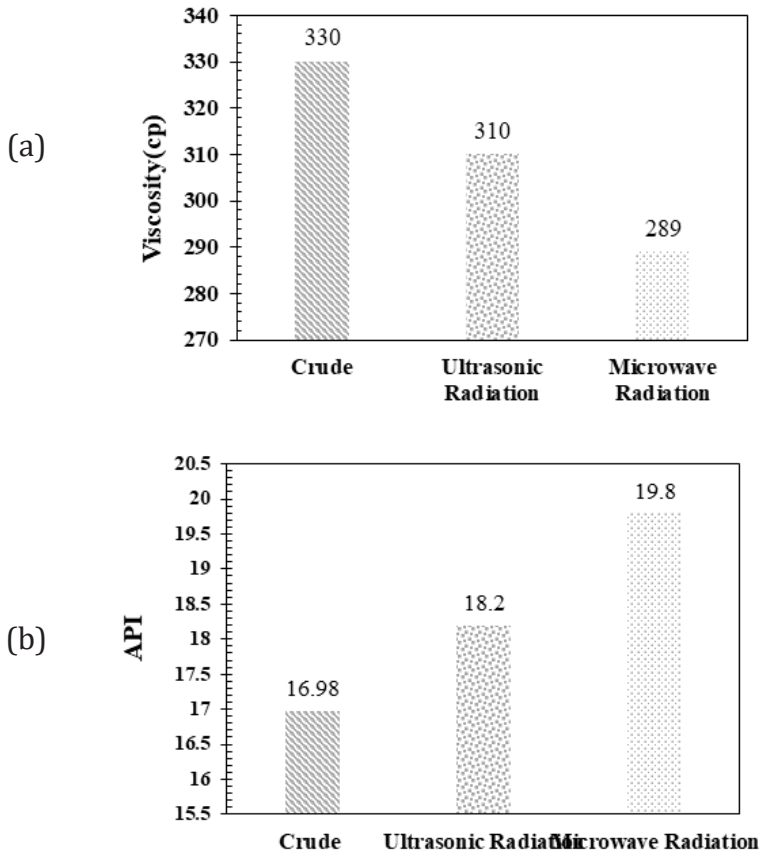
به علت وجود عناصر قطبی همانند اکسیژن، نیتروژن و گوگرد در ساختار مولکول‌های نفت خام به‌ویژه آسفالتین پس از اعمال امواج ماکروویو این مولکول‌ها در میدان الکتریکی جهت‌گیری کرده و اصطکاک حاصل از حرکت این مولکول‌ها سبب ایجاد ناحیه‌هایی با عنوان نقاط گرم می‌شود [۱۷]. این نقاط سبب توزیع یکسان دما در سرتاسر محلول می‌شوند و با رسیدن دما به بالاتر از دمای جوش سبب ممانعت از تغییر فاز مایع و کاهش نیروی‌های چسبندگی بین‌مولکولی به حداقل میزان ممکن می‌شوند. با کاهش نیروی چسبندگی نفت خام و هم‌چنین ممانعت مایع فوق گرم از خروج اجزای سبک‌تر، گرانروی محلول کاهش پیدا می‌کند. امواج فراصوت تأثیر زیادی بر روی خواص فیزیکی و رئولوژی نفت دارند [۱۸]. با افزایش مدت زمان تابش این امواج به دلیل ایجاد حباب ریز و افزایش سایز این حباب‌ها تا زمان ترکیدن آن‌ها سبب شکسته شدن مولکول‌های بزرگ از جمله آسفالتین و رزین می‌شوند، شکسته شدن این مولکول‌ها سبب کاهش گرانروی می‌شود، البته همان‌طور که بیان شد تا مدت زمان مشخصی و از آن به بعد با به هم پیوست رادیکال‌های شکسته گرانروی روند افزایش پیدا می‌کند.

شکل ۲ نشان دهنده گرانروی و درجه API نفت خام و نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت با توان ۲۸۰ وات می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، گرانروی هردو نمونه تحت تابش امواج از گرانروی نفت خام کمتر است. کاهش گرانروی در امواج ماکروویو بیشتر است که علت آن ایجاد نقاط گرم و جلوگیری از خروج ترکیبات سبک از نفت می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۳ درجه API نفت خام و نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت نشان داده شده است، درجهAPI نفت تحت تابش امواج ماکروویو افزایش بیشتری داشته است که به دلیل ارتقا ترکیبات سنگین و کاهش گرانروی نفت می‌باشد.

در شکل ۳ تغییرات گرانروی نفت خام تحت تابش امواج ماکروویو برای زمان و توان‌های مختلف رسم شده است. به‌طورکلی می‌توان گفت برای تمامی توان‌های اعمالی تا یک بازه زمانی این امواج سبب کاهش گرانروی نفت می‌شوند که دلیل آن شکستن مولکول‌های سنگین نفت توسط این امواج است و پس از آن امواج سبب افزایش گرانروی شده که دلیل آن فراریت هیدروکربن‌های سبک از محلول نفتی می‌باشد. هم‌چنین در این شکل ملاحظه می‌شود که در توان ۱۲۰۰ وات زمان رسیدن گرانروی به مقدار اولیه کوتاه‌تر از توان‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ وات می‌باشد. هم‌چنین بیشترین کاهش گرانروی با توان ۴۰۰ وات و زمان ۹ دقیقه اتفاق می‌افتد.

توان‌های بالا در زمان‌های کوتاه‌تر تاثیر بیشتری بر کاهش گرانروی نفت خام می‌گذارند. علت این امر انتقال میزان زیادی انرژی به نفت است که سبب شکسته شدن برش‌های سنگین موجود در نفت خام می‌شود. اما با افزایش زمان تابش و به تبع آن میزان انرژی جب شده، احتمال خروج برش‌های سبک‌تر از

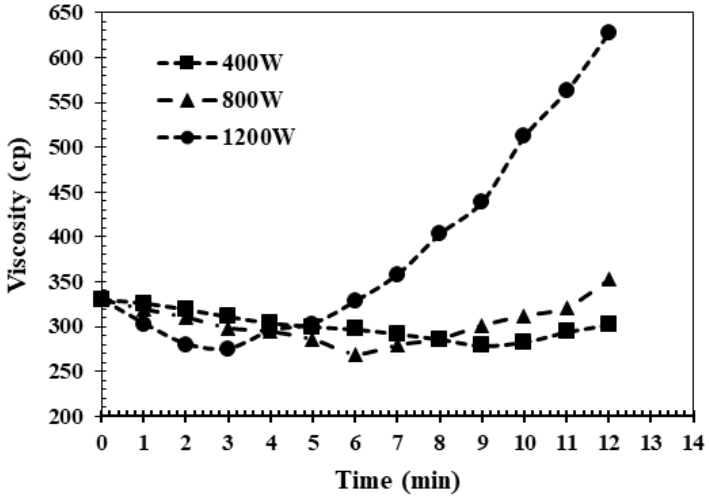
[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



شکل۲. الف) گرانروی و ب) درجه API نفت خام و نفت تحت تابش امواج فراصوت و ماکروویو
Figure 2. a) Viscosity and b) API gravity of crude oil and oil under ultrasonic and microwave radiation

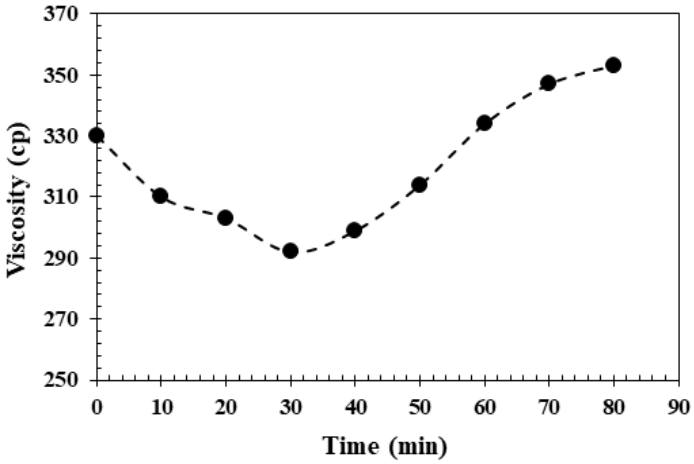
نفت افزایش می‌یابد که سبب افزایش میزان گرانروی نفت خام می‌شود. اما در توان‌های پایین انتقال انرژی به نفت به صورت مستمر انجام شده است که این موضوع سبب شکسته شدن ترکیبات سنگین و عدم فراریت برشهای سبک به دلیل انتقال تدریجی انرژی بوده است.

در شکل ۴ گرانروی نفت تحت تابش امواج فراصوت در زمان‌های مختلف نشان داده شده است، با افزایش زمان مقدار گرانروی کاهش پیدا می‌کند تا جایی که فراریت اجزای سبک به شکستن هیدروکربن‌های سنگین غلبه کند و پس از آن گرانروی افزایشی خواهد بود. نقطه بهینه برای امواج فراصوت در زمان ۳۰ دقیقه رخ می‌دهد. از مقایسه این شکل با شکل قبل می‌توان به تأثیر بیشتر امواج ماکروویو نسبت به امواج فراصوت



شکل ۳. تغییرات گرانروی نفت تحت تابش امواج ماکروویو در زمان و توان‌های مختلف
Figure 3. Changes in oil viscosity under microwave radiation at different times and power levels

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



شکل ۴. تغییرات گرانروی نفت تحت تابش امواج فراصوت در زمان‌های مختلف
Figure 4. Viscosity variation under ultrasonic wave radiation at different times

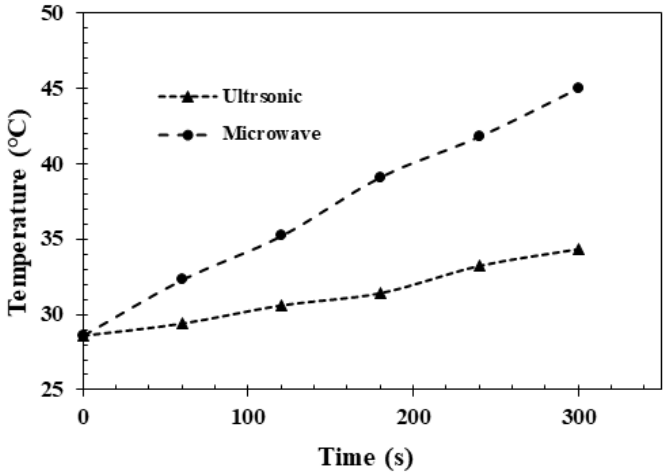
در میزان گرانروی پی برد.

۳-۲ تأثیر امواج ماکروویو و فراصوت بر دمای نفت

در شکل ۵ افزایش دمای ۵۰ میلی‌لیتر نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت با توان ۲۸۰ وات باهم مقایسه شده است. امواج ماکروویو با ایجاد برهم‌کنش میان بارهای محلول نفتی و ایجاد ممان‌های دوقطبی و کانون‌های داغ در محلول‌ها سبب افزایش دمای محلول‌ها می‌شوند. هنگامی که نفت در معرض امواج فراصوت قرار می‌گیرد، کاویتاسیون اتفاق می‌افتد [۱۹] و در آن حباب‌های بزرگی ایجاد شده و سپس می‌ترکند که فروپاشی این حباب‌ها سبب ایجاد تلاطم و موجی در اطراف آن شده که تولید گرما می‌کند. ماکرو مولکول‌ها توسط نیروهای برشی هیدرو مکانیکی ناشی از کاویتاسیون فراصوت از بین می‌روند. هم‌چنین امواج فراصوت با استفاده از ارتعاش متناوب خطی و دامنه بزرگ که به صورت زیگزاگ می‌باشد سبب ایجاد فشار زیادی در محیط و تغییرات در دما می‌شود. افزایش دما توسط امواج ماکروویو همواره بیشتر از امواج فراصوت می‌باشد که نشان می‌دهد قدرت انتقال انرژی توسط این امواج از امواج فراصوت بیشتر است. هم‌چنین شکل ۶ دمای نفت تحت تابش توان‌های مختلف از ۲۰۰ وات تا ۱۲۰۰ وات را نشان می‌دهد. هرچه میزان توان اعمالی بیشتر باشد، انرژی بیشتری منتقل شده و دمای نفت بالاتر می‌رود. این افزایش دما سبب افت چشمگیری در گرانروی نفت می‌شود که در تولید از مخزن عامل مطلوبی به شمار می‌آید.

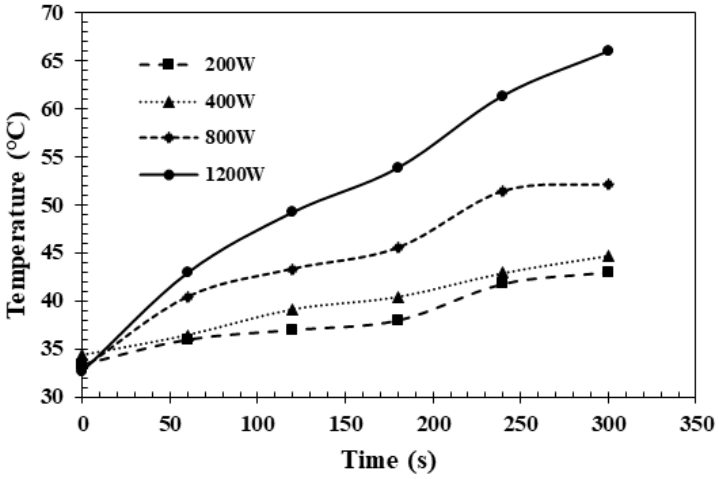
۳-۳ تغییر ساختار نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت

در این قسمت ساختار نفت خام و نفت در معرض امواج ماکروویو و فراصوت در شرایط بهینه زمان و توان با بررسی آزمون FTIR تحلیل شده است. در جدول ۱ پیک‌های شاخص و نوع ناحیه آن ارائه شده است. پیک‌های موجود در $2850\ cm^{-1}$ و $2926\ cm^{-1}$ به ترتیب مربوط به پیوندهای CH_2 نامتقارن و متقارن می‌باشد. هم‌چنین پیوندهای $2962\ cm^{-1}$ و $2872\ cm^{-1}$ نشان دهنده پیک‌های CH_3 نامتقارن و متقارن



شکل ۵. تغییرات دمایی نفت خام تحت تابش امواج الکترومغناطیسی و فراصوت
Figure 5. Temperature changes of crude oil under microwave and ultrasonic wave radiation

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



شکل ۶. تغییرات دمایی نفت خام تحت تابش امواج ماکروویو در توان‌های مختلف
Figure 6. Temperature changes of crude oil under microwave wave radiation at different power levels

جدول ۱. انواع پیک FTIR همراه با طول‌موج آن‌ها
Table 1. FTIR peaks along with their corresponding wavelengths

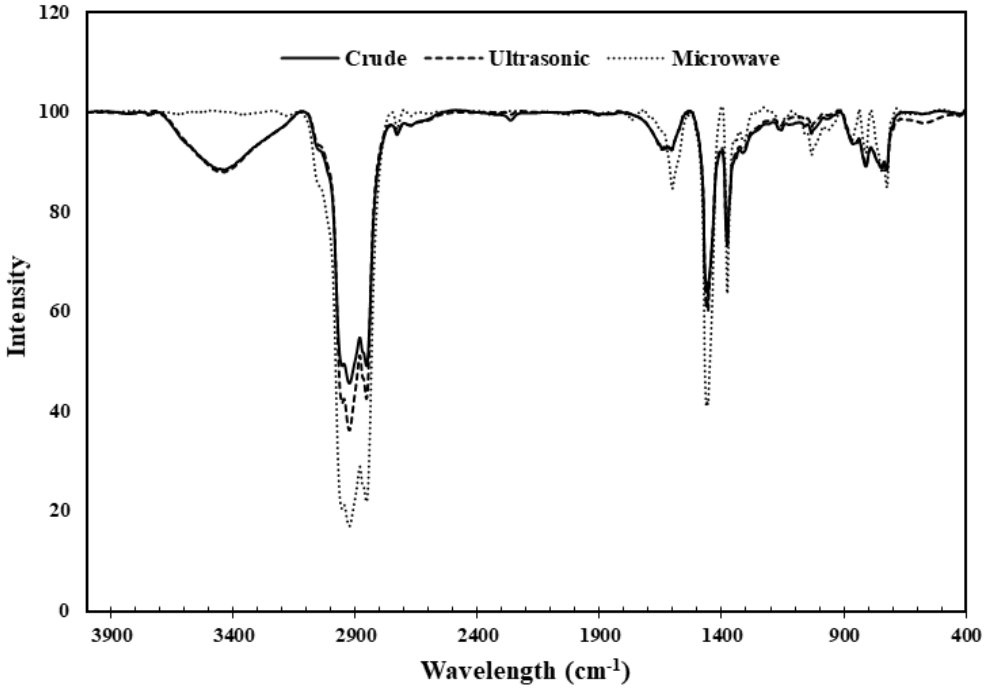
Wavelength	Region	Bonds	References
400-1000	Aromatic	Aromatic	[8], [22]
1000-1600	Single Bond	C-C C-N C-O	[8], [20]
1600-2000	Double bond	C=C C=O C=N	[8], [16], [22]
2000-2300	Triple bond	C≡C C≡N	[8], [20]
2500-3700	Hydrogen stretching	C-H N-H O-H	[8], [22]

می‌باشند. پیک CH_3 چتری در طول‌موج ۱۳۷۵ cm^{-1} مشاهده می‌شود و هم‌چنین پیک‌های CH_2 سخت و قیچی در طول‌موج‌های ۱۴۵۵ cm^{-1} و ۷۲۰ cm^{-1} وجود دارند[۱۹-۱۶]. این پیک‌های مربوط به ساختار هیدروکربنی نفت می‌شود و هم‌چنین پیک‌های بین ۴۰۰ cm^{-1} تا ۱۰۰۰ cm^{-1} پیک‌های مربوط به ساختارهای آروماتیک موجود در نفت می‌باشند. پس نمونه نفتی به صورت هم‌زمان شامل ساختارهای هیدروکربنی خطی و آروماتیک می‌باشد.

همان‌گونه که در شکل ۷ مشخص است از سه نمونه نفت آزمون FTIR گرفته شده، در نفت تحت تابش هردو نوع امواج شدت پیک‌های مربوط به CH_2 و CH_3 نامتقارن و متقارن، CH_2 سخت و قیچی و CH_3 چتری افزایش یافته که نشان دهنده افزایش میزان آلکان‌ها و ارتقا نفت خام می‌باشد. البته این افزایش در نفت تحت تابش ماکروویو بیشتر بوده که تأییدکننده میزان آسفالتین استخراج‌شده از آن می‌باشد. هم‌چنین افزایش شدت در پیک‌های مربوط به CH_3 بیشتر از CH_2 می‌باشد که علت سبک‌تر شدن هیدروکربن می‌باشد. تفاوت دیگر در ساختار ترکیبات آروماتیک نفت می‌باشد. پیک‌هایی همانند C=C حلقوی (cm^{-1} ۱۶۲۰-۱۴۰۰)، C-H خنثی داخل (cm^{-1} ۱۰۰۰ و cm^{-1} ۱۲۰۰) و خارج از (cm^{-1} ۱۰۰۰-۷۰۰) نشانگر ترکیبات آروماتیک می‌باشند. شدت پیک‌های آروماتیک مربوط نفت تحت تابش امواج ماکروویو کمتر از دو نمونه دیگر است که نشان می‌دهد انرژی این امواج ترکیبات آروماتیک را کاهش داده است. پیک‌های آروماتیک نفت تحت تابش امواج فراصوت تقریباً منطبق با نفت خام است که نشان از عدم تغییر این ترکیبات توسط امواج فراصوت می‌باشد.

انرژی موجود در امواج ماکروویو و فراصوت می‌تواند سبب شکسته شدن پیوندهای موجود در نفت می‌شود.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



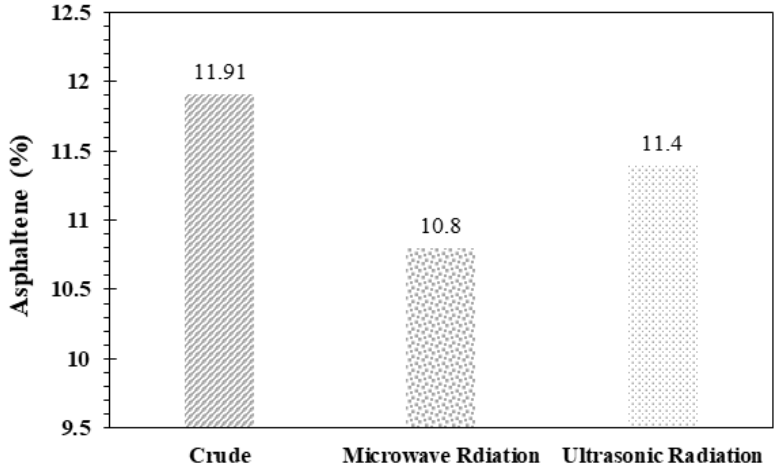
شکل ۷. نتایج آزمونFTIR نفت خام و نفت قرار گرفته در معرض امواج ماکروویو و فراصوت
Figure 7. FTIR results of crude oil and oil exposed to microwave and ultrasonic waves

در ابتدا پیوندهای یگانه که انرژی کمتری دارند شکسته می‌شوند، سپس با ادامه تابش سایر پیوندها نیز شکسته می‌شوند. تابش امواج ماکروویو با توجه به ایجاد نقاط داغ در محلول سبب کاهش میان ترکیبات آروماتیک نیز شده است. اما امواج فراصوت ترکیبات راست زنجیر را شکسته و تأثیر زیادی بر ترکیبات حلقوی و آروماتیک ندارد. بر اساس نوع تابش و مدت زمان تابش و انرژی منتقل شده به امواج ترکیبات مختلفی می‌توانند شکسته شوند و از محلول خارج شوند.

۳-۴ تأثیر امواج ماکروویو و فراصوت بر آسفالتین

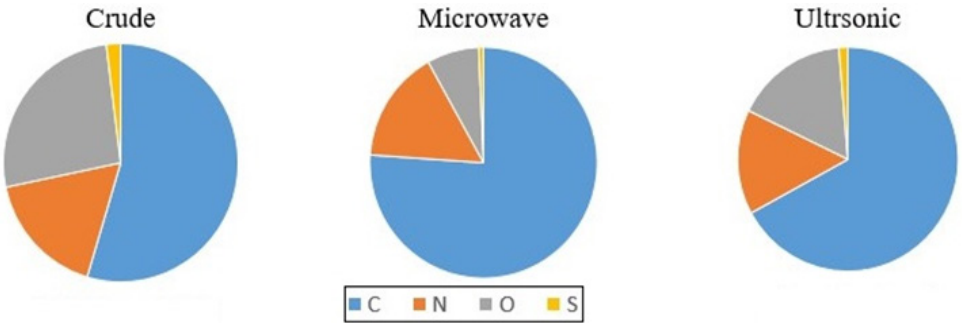
رزین و آسفالتین به دلیل وجود عناصر قطبی در ساختار خود نقش مهمی در جذب امواج ماکروویو دارند، علت آن جهت‌گیری این مولکول‌ها برای قرار گرفتن در جهت میدان الکتریکی می‌باشد. پس از ایجاد نقاط گرم امکان وجود آسفالتین و رزین در این نقاط افزایش پیدا می‌کند و به همین دلیل این دو ترکیب سنگین شکسته می‌شوند [۲۳]. همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود در اثر تابش امواج ماکروویو در شرایط بهینه میزان آسفالتین نفت ۹/۳۱ ٪ کاهش یافته است. این کاهش نشان می‌دهد که مولکول‌های سنگین آسفالتین شکسته شده و به ترکیبات سبک‌تری تبدیل شده‌اند.

امواج فراصوت به صورت فیزیکی انتشار می‌یابند و بر خواص فیزیکی نفت خام تأثیر فراوانی می‌گذارند. همان‌گونه که قبلاً بیان شد با گذشت زمان اندازه



شکل ۸. درصد آسفالتین استخراج شده از نفت خام و نفت تحت تابش امواج الکترومغناطیس و فراصوت
Figure 8. Asphaltene Percentage of crude oil and oil under microwve and ultrasonic wave radiation

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]



شکل ۹. تغییرات عناصر CSNO موجود در آسفالتین نفت خام و نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت

Figure 9. Changes in the CSNO compounds in crude oil asphaltene and asphaltene under microwave and ultrasonic wave radiation

حباب‌های ایجاد شده در اثر کاویتاسیون رشد پیدا می‌کند و افزایش نسبی حجم سیال را در بردارد. ترکیدن حباب‌ها سبب حرکت نفت و کاهش گرانروی و چگالی نفت می‌شود. انرژی ایجاد شده در اثر این انفجارهای کوچک ذرات سنگین نظیر آسفالتین شکسته می‌شوند و نیروهای بین‌مولکولی رزین از بین می‌روند. کاهش ۴/۲۸٪ میزان آسفالتین در اثر تابش امواج فراصوت در زمان بهینه ، نشان دهنده شکسته شدن مولکول‌های آسفالتین و کاهش اندازه آن در نفت خام می‌باشد. کاهش میزان آسفالتین در اثر اعمال امواج ماکروویو بیشتر از امواج فراصوت می‌باشد که علت آن جهت‌گیری ذرات قطبی تحت تابش امواج ماکروویو و ایجاد ممان دوقطبی و نقاط گرم و به‌تبع آن افزایش دما و شکسته شدن مولکول‌های آسفالتین می‌باشد.

شکل ۹ نشان دهنده نتایج EDS و درصد وزنی ترکیبات موجود در آسفالتین استخراج شده از نفت خام و نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت در شرایط بهینه است. باتوجه به اینکه در آنالیز EDS درصد جرمی اتم‌های کربن، نیتروژن، اکسیژن و گوگرد به صورت نسبی نشان داده می‌شود، کاهش نسبی هرکدام از عناصر اکسیژن، نیتروژن و گوگرد می‌تواند سبب افزایش میزان نسبی کربن شود. همان‌گونه که مشخص است پس از تابش امواج ماکروویو و فراصوت میزان کربن افزایش یافته و میزان ترکیبات قطبی همانند گوگرد و اکسیژن کاهش یافته است که نشانگر شکست ترکیبات در مولکول‌های آسفالتین و ارتقا نفت خام است. با توجه به قطبی بودن عناصر اکسیژن و گوگرد کاهش این عناصر در اثر تابش امواج ماکروویو نسبت به امواج فراصوت محسوس‌تر بوده است.

۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از امواج ماکروویو و فراصوت به‌منظور بهبود خواص نفت خام و کاهش میزان آسفالتین موجود در نفت استفاده شد. تابش این امواج سبب کاهش گرانروی، افزایش درجه API، کاهش میزان آسفالتین و افزایش دمای نفت می‌شود که تمامی این عوامل در بهبود تولید نفت مؤثرند. به‌طورکلی نتایج این تحقیق به صورت زیر است.

- استفاده از امواج ماکروویو بیشتر از امواج فراصوت سبب افزایش دما می‌شود که این امر به دلیل ماهیت این امواج در ایجاد نقاط گرم در نفت می‌باشد.
- تأثیر توان‌های مختلف امواج ماکروویو در افزایش دما نیز بررسی شده که نتایج نشان دهنده آن است توان‌های بالاتر افزایش دمای بیشتری را نشان دادند. افزایش دمای نفت تا یک حدی سبب کاهش گرانروی آن می‌شود. بیشترین کاهش گرانروی در توان ۴۰۰ وات و مدت زمان ۹ دقیقه رخ داد.
- گرانروی نفت در معرض امواج ماکروویو و فراصوت با توان ۲۸۰ وات در مقایسه با گرانروی نفت خام به ترتیب ۱۲/۵ و ۶ درصد کاهش پیدا کرده است. تاثیر توان تابش امواج فراصوت از مباحثی است که در مطالعات آینده می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.
- میزان آسفالتین نفت در معرض امواج ماکروویو و فراصوت به ترتیب ۹/۳ و ۴/۲۸ درصد نسبت به نفت خام کاهش یافته که علت آن شکسته شدن مولکول‌های آسفالتین و ارتقا آن‌ها به ترکیبات سبک‌تر می‌باشد.
- نتایج EDS نشان دهنده افزایش درصد نسبی کربن و کاهش عناصری همانند اکسیژن و گوگرد است که این تغییرات در اثر اعمال امواج ماکروویو با توجه به قطبی بودن برخی عناصر شدیدتر است.
- بررسی FTIR نشان می‌دهد که ترکیبات راست زنجیر در نفت تحت تابش امواج ماکروویو و فراصوت شکسته شده و به ترکیبات سبک‌تر تبدیل می‌شوند. هم‌چنین امواج ماکروویو توانایی تأثیر بر قسمت آروماتیک نفت را نیز دارد.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

مراجع

[1] R. Gharibshahi, A. Jafari, and H. Ahmadi, "CFD investigation of enhanced extra-heavy oil recovery using metallic nanoparticles/steam injection in a micromodel with random pore distribution," J. Pet. Sci. Eng., vol. 174, pp. 374–383, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2018.10.051.

[2] R. Gharibshahi, M. Omidkhah, and A. Jafari, "Parametric Optimization of In-Situ Heavy Oil Upgrading Using Simultaneous Microwave Radiation and Magnetic Nanohybrids Via Taguchi Approach," SSRN Electron. J., 2022, doi: 10.2139/ssrn.4017218.

[3] A. Bera and T. Babadagli, "Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review," Applied Energy, vol. 151. Elsevier Ltd, pp. 206–226, Aug. 01, 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.031.

[4] M. Z. Hasanvand and A. Golparvar, "A critical review of improved oil recovery by electromagnetic heating," Petroleum Science and Technology, vol. 32, no. 6. pp. 631–637, Mar. 19, 2014, doi: 10.1080/10916466.2011.592896.

[5] M. A. Carrizales, "Copyright by Maylin Alejandra Carrizales," Russell J. Bertrand Russell Arch., 2010.

[6] C. Saltiel and A. K. Datta, Heat and Mass Transfer in Microwave Processing, vol. 33, no. C. 1999.

[7] H. Farshadfar, H. Shamsi Armandi, R. Gharibshahi, and A. Jafari, "Simultaneous electromagnetic radiation and nanofluid injection and their interactions in EOR operations: A comprehensive review," J. Magn. Magn. Mater., vol. 580, no. June, p. 170863, 2023, doi: 10.1016/j.jmmm.2023.170863.

[8] J. Taheri-shakib, A. Shekarifard, and H. Naderi, "Experimental investigation of the asphaltene deposition in porous media: Accounting for the microwave and ultrasonic effects," J. Pet. Sci. Eng., 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2018.01.017.

[9] A. Karimov, V. Bogdanov, R. Valiullin, R. Sharafutdinov, and A. Ramazanov, "The Degassing Processes for Oil Media in Acoustic Fields and Their Applications," Polymers (Basel)., vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/polym14081497.

[10] S. A. Shedid and S. R. Attallah, "Influences of Ultrasonic Radiation on Asphaltene Behavior With and Without Solvent Effects," SPE Int. Form. Damage Control Symp. Proc., 2004, doi: 10.2523/86473-ms.

[11] Z. Wang and Y. Xu, "The development of recent high-power ultrasonic transducers for Near-well ultrasonic processing technology," Ultrason. Sonochem., vol. 37, pp. 536–541, 2017, doi: 10.1016/j.ultsonch.2017.01.043.

[12] Z. Wang, Y. Xu, and B. Suman, "Research status and development trend of ultrasonic oil production technique in China," Ultrason. Sonochem., vol. 26, pp. 1–8, 2015, doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.01.014.

[13] B. Keshavarzi, R. Karimi, and I. Naja, "Investigating the role of ultrasonic wave on two-phase relative permeability in a free gravity drainage process," vol. 21, pp. 763–771, 2014.

[14] V. O. Abramov, M. S. Mullakaev, A. V Abramova, I. B. Esipov, and T. J. Mason, "Ultrasonics Sonochemistry Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implemention," Ultrason. - Sonochemistry, vol. 20, no. 5, pp. 1289–1295, 2013, doi: 10.1016/j.ultsonch.2013.03.004.

[15] S. H. Shafiai and A. Gohari, "Conventional and electrical EOR review: the development trend of ultrasonic application in EOR," J. Pet. Explor. Prod. Technol., vol. 10, no. 7, pp. 2923–2945, 2020, doi: 10.1007/s13202-020-00929-x.

[16] J. Taheri-shakib, A. Shekarifard, and H. Naderi, "The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil," J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2017, doi: 10.1016/j.jaap.2017.10.021.

[17] J. Taheri-Shakib, A. Shekarifard, and H. Naderi, "The experimental investigation of effect of microwave and ultrasonic waves on the key characteristics of heavy crude oil," J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 128, pp. 92–101, 2017, doi: 10.1016/j.jaap.2017.10.021.

[18] L. I. Petrella, L. E. Maggi, R. M. Souza, A. V. Alvarenga, and R. P. B. Costa-Félix, "Influence of subcutaneous fat in surface heating of ultrasonic diagnostic transducers," Ultrasonics, vol. 54, no. 6, pp. 1476–1479, 2014, doi: 10.1016/j.ultras.2014.04.018.

[19] R. Tao and H. Tang, "Reducing viscosi-

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]

ty of paraffin base crude oil with electric field for oil production and transportation," Fuel, vol. 118, pp. 69–72, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.10.056.

[20] I. Zojaji, A. Esfandiarian, J. Taheri-shakib, and A. Esfandiarian, "Toward molecular characterization of asphaltene from different origins under different conditions by means of FT-IR spectroscopy," Adv. Colloid Interface Sci., 2020.

[21] J. Taheri-shakib, A. Shekarifard, and H. Naderi, "Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Analysis of the asphaltene properties of heavy crude oil under ultrasonic and microwave irradiation," J. Anal. Appl. Pyrolysis, vol. 129, no. November 2017, pp. 171–180, 2018, doi: 10.1016/j.jaap.2017.11.015.

[22] R. Gharibshahi, M. Omidkhah, A. Jafari, and N. Mehrooz, "Parametric optimization of in-situ heavy oil upgrading using simultaneous microwave radiation and magnetic nanohybrids via Taguchi approach," Fuel, vol. 325, no. April, p. 124717, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124717.

[23] H. Shamsi Armandi, A. Jafari, R. Gharibshahi, and M. Omidkhah, "Application of electromagnetic waves and their effects on 'rock-fluid' and 'fluid-fluid' interactions in enhanced oil recovery," Sci. Propagative J. Oil Gas Explor. Prod., vol. 171, pp. 40–48, 2019.

[Downloaded from arcpe.modares.ac.ir on 2025-04-07]