

## Experimental Investigation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Activated Carbon Effect on the Heavy Oil Upgrading Process by Electromagnetic Heating

Parya Torkaman<sup>1</sup>, Ramin Karimzadeh<sup>\*1</sup>, Arezou Jafari<sup>\*1</sup>  
<sup>1</sup>Faculty of Chemical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Faculty of Chemistry and Chemical Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

### Abstract

**Research subject:** Electromagnetic heating is one of the new methods of upgrading and increasing heavy oil extraction. In this method, electromagnetic waves will increase temperature, break heavy compounds, reduce viscosity, and improve and increase oil recovery.

**Research approach:** In this research, magnetic iron oxide nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) were synthesized by the co-precipitation method, and the efficiency of these nanoparticles in the process of electromagnetic heating and heavy oil upgrading was investigated. Also, a comparison was made between the effect of these nanoparticles in the process of electromagnetic heating and activated carbon. In this process, oil samples containing 0.1% of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles or activated carbon were irradiated with microwave (frequency 2.54 GHz and power 400 W) for 0 to 8 minutes, and the temperature and viscosity variation were investigated.

**Main results:** The results showed that microwave radiation increased the temperature of the samples. The temperature of the sample of crude oil, crude oil with activated carbon (0.1 wt. %), and crude oil with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles (0.1 wt. %) increased from ambient temperature to 70, 82, and 90 °C, respectively, under wave radiation for 8 minutes. Also, the most significant decrease in viscosity was reported in 4 minutes: the viscosity of crude oil sample, crude oil with activated carbon, and crude oil with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles under wave irradiation for 4 minutes decreased 295 mPa.s to 261, 254, and 223 mPa.s, respectively. In other words, the viscosity of the samples under wave irradiation for 4 minutes for crude oil, crude oil with activated carbon, and crude oil with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles decreased by 11.5, 13.9 and 24.4%, respectively.

### key words

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles

Activated Carbon

Electromagnetic Waves

Synthesis

Viscosity

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

## بررسی آزمایشگاهی اثر نانوذرات $Fe_3O_4$ و کربن فعال در فرایند ارتقای نفت سنگین توسط گرمایش الکترومغناطیس

پریا ترکمان<sup>۱</sup>، رامین کریم زاده<sup>۱\*</sup>، آرزو جعفری<sup>۱\*</sup>

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

**موضوع تحقیق:** روش گرمایش الکترومغناطیس یکی از روش‌های نوین ارتقا و ازدیاد برداشت نفت سنگین است. در این روش انرژی امواج الکترومغناطیس صرف افزایش دما، شکست ترکیبات سنگین، کاهش گرانشی، ارتقا و ازدیاد برداشت نفت خواهد شد.

**روش تحقیق:** در این پژوهش نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) به روش هم‌رسوبی سنتز شده و کارایی این نانوذرات در فرایند گرمایش الکترومغناطیس و ارتقا مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه‌ای بین اثر این نانوذرات در فرایند گرمایش الکترومغناطیس و کربن فعال صورت گرفت. در این فرایند نمونه‌های نفت خام حاوی ۰/۱ درصد نانوذرات  $Fe_3O_4$  یا کربن فعال، در بازه زمانی صفر تا ۸ دقیقه تحت تابش امواج میکروویو (پسامد ۲/۵۴ گیگاهرتز و توان ۴۰۰ وات) قرار گرفته و تغییرات دما و گرانشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

**نتایج تحقیق:** نتایج نشان داد تابش امواج الکترومغناطیس (مایکروویو) سبب افزایش دمای نمونه‌ها خواهد شد. دمای نمونه نفت خام، نفت خام به همراه ۰/۱ درصد کربن فعال، نفت خام به همراه ۰/۱ درصد نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج به مدت ۸ دقیقه به ترتیب از دمای محیط تا ۸۲، ۷۰ و ۹۰°C افزایش یافت. همچنین در شرایطی که نمونه‌ها به مدت ۴ دقیقه تحت تابش امواج بودند، بیشترین کاهش گرانشی گزارش شد. گرانشی نمونه نفت خام (قبل از فرآیند)، نفت خام به همراه کربن فعال و نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه به ترتیب از ۲۹۵ mPa.s تا ۲۵۴، ۲۶۱ و ۲۲۳ mPa.s کاهش یافت. به عبارتی گرانشی نمونه‌ها تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه برای نمونه نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  به ترتیب ۱۱/۵، ۱۳/۹ و ۲۴/۴ درصد کاهش داشته و نانوذرات  $Fe_3O_4$  بیشترین کارایی را در افزایش دما و کاهش گرانشی داشتند.

### کلمات کلیدی

نانوذرات  $Fe_3O_4$

کربن فعال

امواج الکترومغناطیس

سنتز

گرانشی

\*مسئول مکاتبات:

ramin@modares.ac.ir

## ۱ مقدمه

تولید انرژی یکی از مهم‌ترین موضوعات حال حاضر دنیا است. فعالیت‌های اقتصادی و مصرف انرژی ارتباط نزدیکی با هم دارند. با پیشرفت فناوری، علاوه بر سوخت‌های فسیلی، سایر منابع تولید انرژی نیز به کار گرفته شده‌اند و میزان انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی طی سال‌های اخیر کاهش یافته است، باین وجود همچنان بخش فراوانی از انرژی مورد نیاز در دنیا از طریق سوخت‌های فسیلی و عمدتاً از نفت خام تأمین می‌شود. از سوی دیگر با توجه به کم شدن منابع نفت خام سبک، لازم است تا از چاه‌ها و مخازن حاوی نفت سنگین و فوق سنگین نیز بیشتر استفاده شود [۱ و ۲].

استفاده از نفت خام سنگین به دلیل گرانبه‌بودن، مقادیر بالای گوگرد، فلزات سنگین و نیتروژن مطلوب نبوده و به همین دلیل بسیاری از مخازن نفت خام سنگین در دنیا دست نخورده باقی مانده‌اند. گرانبه‌بودن بالای نفت سنگین باعث ایجاد اصطکاک بین نفت و دیواره‌های مخزن و لوله می‌شود و افت فشار بسیار زیادی را در لوله و خطوط انتقال در پی خواهد داشت، در نتیجه نمی‌توان با استفاده از نیروی ثقلی نفت سنگین را منتقل کرده و تولید، بهره‌برداری و انتقال آن با مشکلاتی همراه بود [۳ و ۴].

مرسوم‌ترین روش برای کاهش گرانبه‌بودن و ازدیاد برداشت در جای نفت خام سنگین، روش‌های حرارتی مانند تزریق آب گرم، تزریق بخار و تخلیه گرانبه‌بودن یا ریزش ثقلی بخار (Steam Assisted Gravity Drainage) است، اما اثرات زیست‌محیطی این روش‌ها و پتانسیل آن‌ها برای ایجاد آلودگی محیط‌زیستی (آلودگی آب، خاک و هوا) و هزینه‌های اجرایی و عملیاتی و یا بعضاً ایجاد تغییرات ساختاری در مخازن توسط این روش‌ها ممکن است از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی فراتر از معیارها و محدودیت‌های تعیین شده باشد [۵ و ۶]. روش‌های حرارتی آبی همچون سیلابزنی آبی و فرایندهای تزریق بخار، طغیان بخار، تحریک بخار حلقوی و تخلیه گرانبه‌بودن به کمک بخار که به صورت تجاری برای باز یافت نفت سنگین استفاده می‌شوند، برای تولید بخار به مقدار زیادی آب شیرین نیاز دارند. مشکل دیگر این روش‌ها، تفاوت خصوصیات زمین‌شناسی در مخازن مختلف است. روش‌های حرارتی با استفاده از بخار برای مخازن عمیق، بسیار کم عمق و مخازنی که سازندهایی با نفوذپذیری کم دارند، مؤثر نیستند [۷ و ۸].

از این رو پژوهشگران در تلاش برای توسعه و به کارگیری روش‌های نوینی هستند تا مشکلات روش‌های مرسوم را در پی نداشته و برای مخازن نفت سنگین نیز کارایی خوبی داشته باشند.

یکی از روش‌های نوین برای کاهش گرانبه‌بودن و ارتقای نفت سنگین، روش گرمایش الکترومغناطیسی (Electromagnetic Heating) با استفاده از بسامد رادیویی/میکروویو است. این روش به دلیل محدودیت‌های فنی روش‌های مرسوم، در برخی مخازن ناهمگن، مخازن با نفوذپذیری کم و حتی برای میدان‌های خارج از ساحل مورد توجه قرار گرفته است [۹، ۱۰ و ۱۱]. نتیجه تحقیقات انجام شده در خصوص گرمایش میکروویو در مقایسه با روش‌های گرمایش معمولی، نشانگر کارایی بیشتر روش گرمایش میکروویو است. باین حال، این روش باید مورد بررسی‌های بیشتری قرار گیرد تا برای کاربردهای صنعتی و تجاری کارآمد، مناسب و اقتصادی شود [۹]. در این روش امواج توسط مواد دی‌الکتریک موجود در مخزن جذب شده، دما را افزایش داده و نفت را گرم می‌کنند و در نتیجه گرانبه‌بودن نفت کاهش می‌یابد و در اثر گرانبه‌بودن از چاه گرمایش به چاه تولیدی منتقل می‌شود [۱۰ و ۱۱]. یکی دیگر از روش‌های ارتقای در جای نفت، استفاده از فرایندهای کاتالیزوری است. به طور کلی کاتالیزورها در فرایندهای ازدیاد برداشت و ارتقای در جای نفت سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما با توجه به مشکلاتی همچون رسوب دوده، غیرفعال شدن کاتالیزور یا رسوب آن بر روی سنگ مخزن تلاش برای ایجاد روش‌های مؤثرتر در راستای بهبود فرایندهای کاتالیزوری و رفع مشکلات احتمالی آن‌ها ادامه دارد. با پیشرفت فناوری نانو و با توجه به خصوصیات مانند سطح ویژه، مکان‌های فعال کاتالیزوری و کارایی بالای نانومواد، استفاده از نانوذرات کاتالیزوری در فرایندهای ازدیاد برداشت و ارتقای نفت نیز مورد توجه قرار گرفت. راهکار مؤثر در این فرایندها، استفاده از نانوذرات در ازدیاد برداشت گرمایشی به خصوص گرمایش توسط امواج الکترومغناطیسی است [۱۲ و ۱۳]. نانوذرات فلزی، اکسید فلزی، گرافن، کربن فعال، نانولوله‌های کربنی یا مایعات یونی در کاهش گرانبه‌بودن نفت سنگین و بهبود گرانبه‌بودن آن توسط روش‌های گرمایشی نقش قابل توجه و مؤثری دارند [۱۴ و ۱۵]. در سال‌های اخیر، پژوهشگران تلاش کرده‌اند تا با ترکیب فرایند گرمایش میکروویو و فناوری نانو با یکدیگر و هم‌افزایی بیشتر این فرایندها، کارایی این روش‌ها را ارتقا و کاهش گرانبه‌بودن نفت سنگین افزایش داده و عملکرد هم‌زمان استفاده از نانوذرات و امواج الکترومغناطیسی-میکروویو را مطالعه و بررسی کرده‌اند [۱۳]. از امواج میکروویو می‌توان برای گرمایش نفت سنگین برای کاهش گرانبه‌بودن آن، با سرعت بالا و آلودگی کم استفاده کرد و تا حدی موجب شکست اجزای سنگین نفت مانند رزین‌ها و آسفالتین خواهد شد. از سوی دیگر موادی مانند نانوذرات فلزی یا اکسید فلزی و کربن پتانسیل جذب امواج الکترومغناطیسی را دارند و با جذب این امواج می‌توانند درجه حرارت خود و محیط اطرافشان را افزایش داده و سبب کاهش

سنگین بررسی شد. همچنین اثر پارامترهای نوع ماده، غلظت ماده و مدت زمان تابش در طی فرایند در کاهش گرانیوی نفت طی فرایند گرمایش الکترومغناطیس مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفت.

## ۲ بخش تجربی

### ۲-۱ مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. برای سنتز نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) از کلرید آهن، هیدروکسید آمونیوم و آب یون زدوده استفاده شد. برای انجام آزمون‌های فرایندی از یک نمونه نفت خام (یکی از مخازن جنوب کشور) با گرانیوی  $28^\circ C @ 295 \text{ mPa.s}$ ،  $19/95^\circ \text{API}$  و میزان آسفالتین ۱۲٪ وزنی استفاده شد.

گرانیوی و ارتقای نفت سنگین شوند [۱۵]. این نتایج را می‌توان علاوه بر اثرات گرمایش در نفت و تغییر خواص آن به ارتقای نفت از طریق شکستن پیوندهای C-S یا C-C یا حتی تغییر خصوصیات سطحی تحت تابش امواج الکترومغناطیس نسبت داد. این اثرات نیاز به بررسی بیشتری دارد تا سازوکار آن واضح تر شود. مشاهدات تجربی و تجزیه و تحلیل کمی می‌تواند چشم‌اندازی برای توسعه بیشتر گرمایش توسط امواج الکترومغناطیس به‌عنوان جایگزین برای شرایطی که گرمایش آبی امکان‌پذیر نیست، فراهم کند [۱۰]. از این رو می‌توان با استفاده از نانوذرات جاذب امواج، کارایی امواج الکترومغناطیس-میکروویو را در جهت کاهش گرانیوی و ارتقای نفت سنگین افزایش داد. برای درک بهتر این فرایند و بررسی پارامترهای مؤثر در آن، لازم است پژوهش‌های عملی بیشتری در این خصوص

جدول ۱ مواد مورد استفاده در پژوهش  
Table 1. Characteristics of used materials

No.	Material	Company	Application
1	Deionized water	Deionizer-FNR12-	Synthesis and washing the Nanoparticles
2	$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	Merck	Nanoparticles Synthesis
3	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	Merck	Nanoparticles Synthesis
4	Sodium Hydroxide (NaOH)	Merck	Nanoparticles Synthesis
5	Activated carbon	Merck	Electromagnetic Heating Process
6	Crude oil	Southwestern oil Reservoirs of Iran	Electromagnetic Heating Process

### ۲-۲ دستگاه‌ها

در این پژوهش، فرایند گرمایش الکترومغناطیس-میکروویو توسط دستگاه میکروویو خانگی (Feller ۳۰۵-MW) برای تابش امواج الکترومغناطیس در بسامد ۲/۴۵ گیگاهرتز استفاده شد. همچنین دمای نمونه‌ها در طول آزمون هر دو دقیقه توسط دماسنج فروسرخ (MASTECH MS۶۵۳۱C) اندازه‌گیری و ثبت شد. تغییرات دمای نمونه‌ها در ابتدا و انتهای فرایند ثبت شده است. گرانیوی توسط گرانیوسنج سیلندر-مخروطی چرخشی ساخت شرکت Anton Paar اندازه‌گیری شد. در تمامی آزمون‌ها گرانیوی نمونه‌های مختلف نفتی در دمای محیط اندازه‌گیری شده است.

### ۲-۳ سنتز و شناسایی نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ )

در این پژوهش از روش هم‌رسوبی برای سنتز نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) استفاده شده است. طرح‌واره انجام این سنتز در شکل (۱) ارائه شده است. در این روش ۳/۰۸ گرم  $FeCl_2 \cdot 4H_2O$  و ۸/۴ گرم

انجام شود تا بتوان از امواج الکترومغناطیس در مقیاس صنعتی برای ازدیاد برداشت و ارتقای نفت سنگین استفاده کرد. نانوذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  و کربن فعال به دلیل خواص الکترومغناطیسی خود، پتانسیل خوبی در جذب امواج الکترومغناطیس نظیر میکروویو دارند. این خواص سبب می‌شود که نفت حاوی این نانوذرات به خوبی تحت تأثیر امواج میکروویو قرار گرفته و طی فرایند گرمایش میکروویو، گرانیوی آن کاهش یافته و میزان تولید نیز افزایش داشته باشد.

در پژوهش‌هایی که تاکنون در این خصوص صورت گرفته، مقایسه‌ای بین عملکرد و کارایی نانوذرات  $Fe_3O_4$  و کربن فعال در فرایند گرمایش الکترومغناطیس-میکروویو انجام نشده و اثربخشی این مواد در این فرایند در راستای ارتقای نفت و کاهش گرانیوی مورد مقایسه قرار نگرفته است. برای نخستین بار در این پژوهش اثر فرایند گرمایش الکترومغناطیس در حضور نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی سنتز شده به روش هم‌رسوبی ( $Fe_3O_4$ ) و کربن فعال تجاری در کاهش گرانیوی و ارتقای نفت



شکل ۱ طرح‌واره سامانه سنتز اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) به روش هم‌رسوبی  
Figure 1. Schematic of the synthesis system of magnetic iron oxide ( $Fe_3O_4$ ) by co-precipitation method

شد که با شرایط اعمال شده نانوذرات در محلول نفتی نیز توزیع مناسبی خواهند داشت و به خوبی پراکنده می‌شوند. از این رو پس از اضافه کردن ماده مورد نظر به نمونه نفتی، نمونه‌ها با استفاده از همزن مکانیکی به مدت ۱۰ دقیقه هم زده شدند تا توزیع نانوذرات اضافه شده در نفت به خوبی انجام شده و مواد به خوبی در نفت پراکنده شوند. سپس نمونه‌ها تحت تابش امواج میکروویو با توان ۴۰۰ وات قرار گرفت. تغییرات دما در هر سه رویکرد در بازه زمانی صفر تا هشت دقیقه (هر دو دقیقه یکبار) با استفاده از دماسنج فرورسرخ ثبت و نتایج در شکل (۷) ارائه شده است. همچنین تغییرات گرانی در این نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت، پس از تابش امواج و طی بازه زمانی هشت دقیقه نمونه‌ها به مدت دو ساعت سرد شده و سپس گرانی آن در دمای محیط اندازه‌گیری و نتایج در شکل (۸) ارائه شده است.

## ۳ نتایج و بحث

### ۳-۱ مشخصه‌یابی نانوذرات سنتز شده

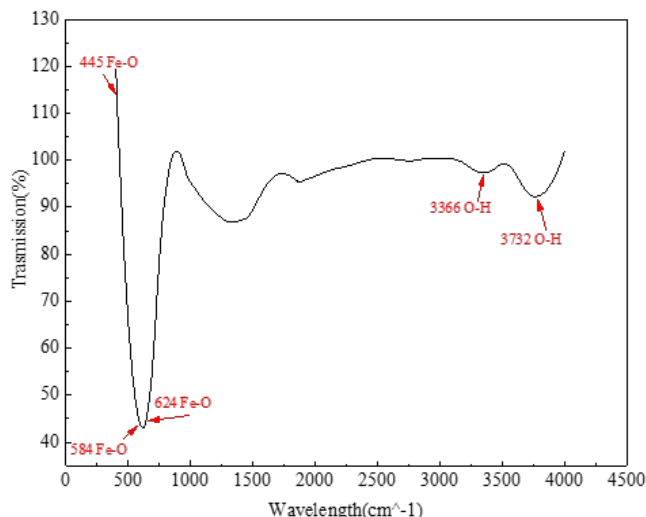
پس از انجام فرایند سنتز، نمونه‌ها با استفاده از آزمون‌های FTIR و XRD مشخصه‌یابی شدند. مطابق طیف FTIR به دست آمده در شکل (۲) دو قله بین  $446$  و  $587$   $cm^{-1}$  مرتبط با پیوندهای فلزی آهن-اکسیژن (Fe-O) در شبکه بلوری  $Fe_3O_4$  هستند. همچنین محدوده جذب پیوند اکسیژن و هیدروژن (O-H) بین  $2850$  تا  $3650$   $cm^{-1}$  است که این دو پیوند نیز در  $3117$  و  $3720$   $cm^{-1}$  مشخص شده‌اند [۱۷ و ۱۶].

با استفاده از آزمون XRD نوع نانوذرات، بافت، جهت‌گیری بلوری و اندازه بلور مشخص می‌شود. شکل (۳) آزمون XRD نانوذرات  $Fe_3O_4$  سنتز شده را نشان می‌دهد. با استفاده از استاندارد JCPDS به شماره  $03-065-0862$ ، پراش در زوایای  $30/17$ ،  $35/5$ ،  $43/3$ ،

$FeCl_3 \cdot 6H_2O$  به همراه  $400$  میلی‌لیتر آب یون زدوده (به‌عنوان حلال) به فلاسک سه‌دهانه اضافه شده و محلول درون حمام آب  $70^\circ C$  قرار می‌گیرد و با استفاده از عامل رسوب‌دهنده، فرایند ترسیب رخ می‌دهد. از محلول هیدروکسید آمونیوم  $30\%$  درصد برای تنظیم pH و ترسیب نانوذرات استفاده می‌شود و این محلول در طی فرایند تا زمانی که pH به  $11$  رسید، به‌صورت آهسته اضافه شد. هم‌زمان با حرارت دادن به محلول با استفاده از فشار گاز نیتروژن از واکنش مجدد اکسید آهن نیز جلوگیری می‌شود. در این مرحله رسوب سیاه رنگ نانوذرات  $Fe_3O_4$  تشکیل می‌شود. پس از طی زمان مورد نیاز برای ترسیب محلول، نانوذرات سنتز شده با استفاده از آب یون زدوده چندین مرتبه شسته شدند، سپس رسوب سیاه‌رنگ حاصل به مدت  $12$  ساعت در دمای  $70$  درجه سانتی‌گراد توسط آون خشک شد.

### ۲-۴ آزمون‌های فرایندی

سه رویکرد برای بررسی میزان تأثیر و کارایی گرمایش میکروویو و نیز مقایسه اثر حضور نانوذرات  $Fe_3O_4$  سنتز شده و کربن فعال، در فرایند گرمایش میکروویو در نظر گرفته شد و تغییرات دما و گرانی در نمونه نفتی در طی فرایند مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا  $50$  میلی‌لیتر نمونه نفت خام تحت تابش امواج میکروویو با توان  $400$  وات (بسامد  $2/45$  گیگاهرتز) قرار گرفت. در رویکرد دوم و سوم به ترتیب،  $1/1$  درصد وزنی از کربن فعال و نانوذرات  $Fe_3O_4$  سنتز شده، در  $50$  میلی‌لیتر از نمونه نفت خام پراکنده شد. برای توزیع مناسب نانوذرات در نمونه‌های نفتی از همزن مکانیکی استفاده شده است. برای اطمینان از توزیع نانوذرات در نفت ابتدا از محلول روغنی شفاف استفاده شد. نانوذرات با درصد وزنی مورد نظر در محلول روغنی شفاف اضافه شدند و سپس به کمک همزن مکانیکی و به مدت  $10$  دقیقه پخش شدند. با توجه به مشاهدات و اطمینان از توزیع مناسب نانوذرات در محلول روغنی این اطمینان حاصل



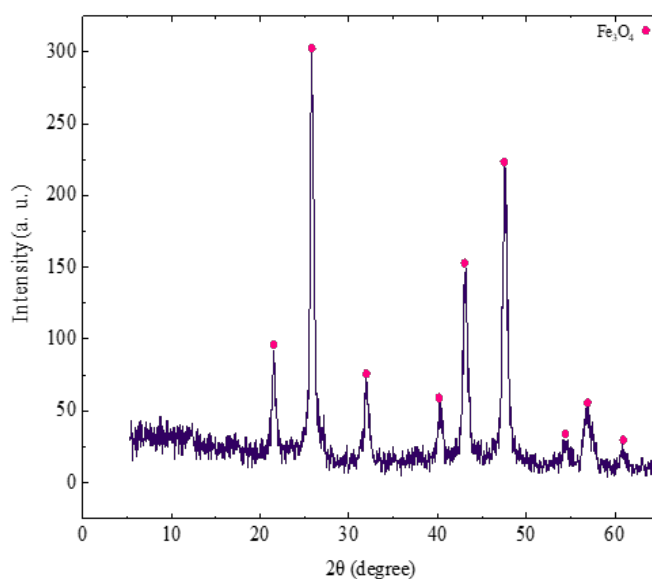
شکل ۲ نتایج آزمون FTIR نمونه  $Fe_3O_4$  سنتز شده  
Figure 2. FTIR analysis results of  $Fe_3O_4$  synthesized

با استفاده از معادله شرر ۱۸ نانومتر برآورد شده است. خواص الکترومغناطیس یکی از پارامترهایی است که می‌تواند قابلیت و کارایی مواد در فرایند گرمایش الکترومغناطیس را مورد ارزیابی قرار دهد. در این پژوهش خواص دی‌الکتریک نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی و کربن فعال با یکدیگر مقایسه شده‌اند. گذردهی الکتریکی یکی از پارامترهای مؤثر در جذب امواج الکترومغناطیس و شامل دو بخش حقیقی ( $\epsilon'$ ) و موهومی ( $\epsilon''$ ) است. قسمت حقیقی گذردهی همان کمیت ثابت دی‌الکتریک است که نشان‌دهنده میزان قطبش ماده در اثر اعمال میدان الکتریکی خارجی است و قسمت موهومی میزان اتلاف انرژی را بیان می‌کند. مسیر اتلاف انرژی دی‌الکتریک به‌عنوان مسیری که انرژی را از شکل میدان الکتریکی در حال انتشار به گرمایش حاصل از برهم‌کنش مواد انتقال

دهد، به ترتیب مطابق با صفحات (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۴۰) از نانوذرات  $Fe_3O_4$  است [۱۶]، [۱۷]. با توجه به مطابقت قله‌های نمودار با الگوهای استاندارد، نانوذرات سنتز شده اکسید آهن مغناطیسی ( $Fe_3O_4$ ) است. آزمون XRD برای تعیین توزیع اندازه ذرات انجام شد. توزیع اندازه نانوذرات  $Fe_3O_4$  با معادله شرر به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$d = K\lambda / \beta \cos\theta \quad (1)$$

که  $d$  میانگین اندازه بلور نانوذرات است،  $K$  ضریب شکل بدون بعد بوده که معمولاً بین ۰/۸۹ - ۰/۹ است و  $\beta$  نصف حداکثر عرض کامل قله (FWHM) است. متوسط اندازه بلور نانوذرات  $Fe_3O_4$  سنتز شده

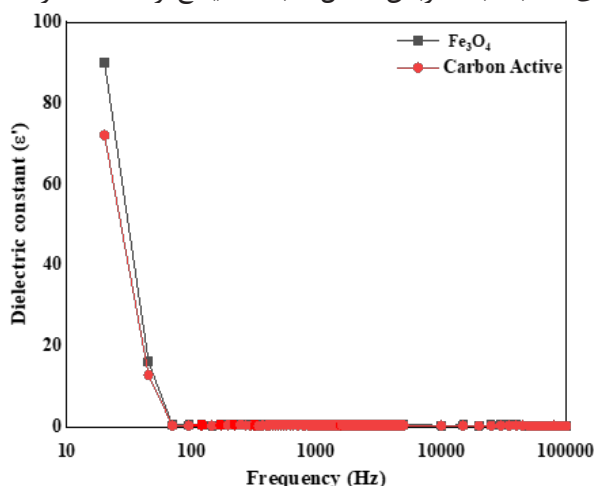


شکل ۳ نتایج آزمون XRD نمونه  $Fe_3O_4$  سنتز شده  
Figure 3. XRD analysis results of the synthesized  $Fe_3O_4$

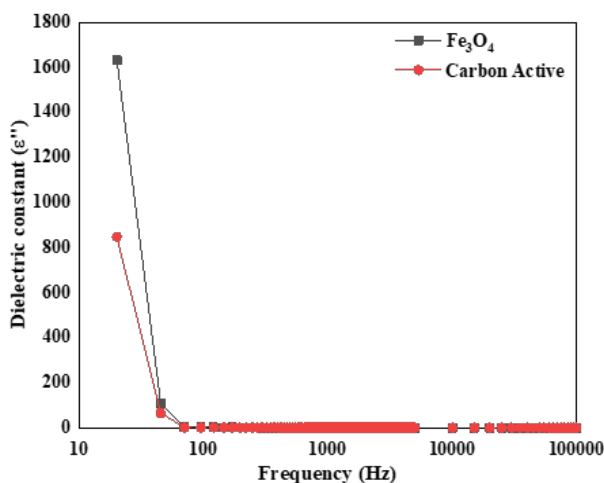
دارد. بنابراین نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی کارایی مناسبتری در جذب امواج الکترومغناطیسی دارند. از آنجایی که نمی‌توان به‌تنهایی از مؤلفه گذردهی الکتریکی برای محاسبه میزان اتلاف انرژی و تولید گرما استفاده کرد، کمیت دیگری تحت عنوان تانژانت اتلاف دی‌الکتریک (Dielectric Loss Tangent) تعریف شده است. تانژانت اتلاف دی‌الکتریک به‌صورت نسبت قسمت موهومی گذردهی الکتریکی به قسمت حقیقی آن تعریف می‌شود. تانژانت اتلاف ( $\tan\delta_e$ ) توانایی ماده برای تبدیل انرژی الکترومغناطیسی به گرما در بسامد و دمای خاص را تعیین می‌کند. شکل (۶) تغییرات تانژانت اتلاف را برحسب تغییرات بسامد نشان می‌دهد. هرچه تانژانت اتلاف ماده بیشتر شود، ماده موردنظر در زمان ثابت انرژی بیشتری در طول فرایند گرمایش الکترومغناطیسی جذب خواهد کرد و این انرژی را به گرما تبدیل می‌کند. در نهایت گرما و انرژی بیشتری توسط ماده به محیط اطراف منتقل می‌شود. با توجه به نتایج ارائه‌شده در شکل (۶) مشخص است که

می‌دهد، توصیف می‌شود. به عبارتی مسیر اتلاف در مواد وجود دارد که بخش موهومی گذردهی الکتریکی نشانگر آن بوده و می‌توان آن را نوعی اصطکاک برای جابه‌جایی ذرات در نظر گرفت و در این صورت با عبور امواج الکترومغناطیس، گرما تولید خواهد شد [۱۸].

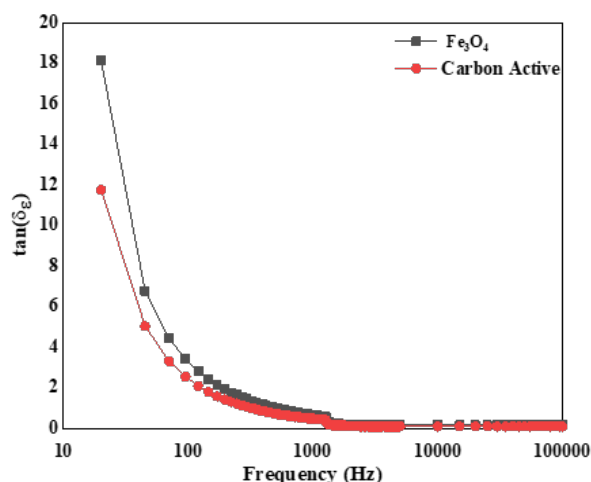
تغییرات بخش حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی و کربن فعال برحسب بسامد در شکل (۴) و (۵) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) و شیب منحنی بخش حقیقی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon'$ ) نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی بیشتر تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند و در این شرایط به‌خوبی قطبی می‌شوند. نتایج مشابهی توسط غریب‌شاهی و همکاران [۱۵] برای نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی گزارش شده است. بخش موهومی گذردهی الکتریکی ( $\epsilon''$ ) نشان‌دهنده توانایی مواد در جذب امواج الکترومغناطیسی است. مطابق شکل (۵) قسمت موهومی گذردهی الکتریکی نانوذرات اکسید آهن شیب قابل توجه‌تری نسبت به کربن فعال



شکل ۴ تغییرات گذردهی الکتریکی (بخش موهومی) برحسب بسامد  
Figure 4. Dielectric constant ( $\epsilon''$ ) versus frequency



شکل ۴ تغییرات گذردهی الکتریکی (بخش حقیقی) برحسب بسامد  
Figure 4. Dielectric constant ( $\epsilon'$ ) versus frequency



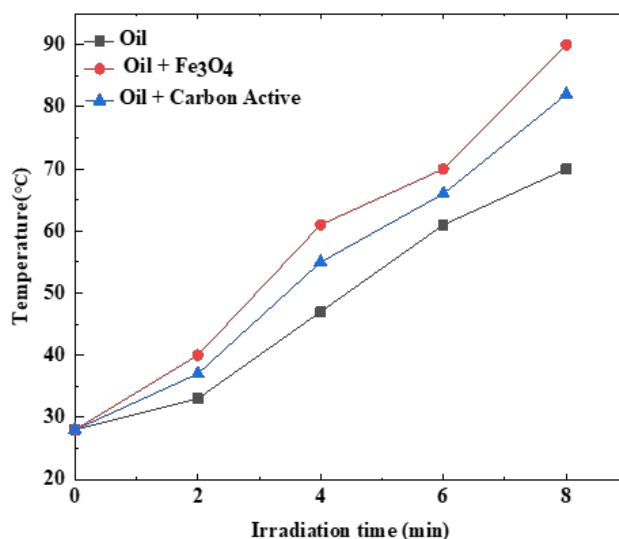
شکل ۶ تغییرات تانژانت اتلاف گذردهی الکتریکی بر حسب بسامد  
Figure 6. Loss tangent versus frequency

۹۰ °C افزایش یافت. مطابق شکل (۷) با افزایش زمان تابش امواج، دمای نمونه‌ها نیز افزایش یافته است؛ زیرا مقدار حرارت تولیدشده در طول فرایند افزایش پیدا کرده و منجر به بالا رفتن دمای نمونه‌ها شده است. نمونه نفت خام کم‌ترین میزان افزایش دما و نمونه نفت حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  بیشترین میزان افزایش دما را داشتند. امواج الکترومغناطیس از جفت شدن دو میدان متناوب الکتریکی و میدان مغناطیسی ایجاد می‌شوند و گرمایش الکترومغناطیس به حرارت و گرمایی اشاره دارد که توسط این امواج در مواد ایجاد می‌شود. تابش امواج الکترومغناطیس مانند امواج میکروویو به مواد منجر به اتلاف انرژی در اثر اصطکاک، نیروهای الاستیک و اینرسی و گرم شدن مواد می‌شوند. در طول گرمایش میکروویو، جذب انرژی الکترومغناطیسی باعث افزایش دمای نمونه می‌شود. دمای نانوذرات پس از جذب امواج میکروویو افزایش می‌یابد و نقطه داغ محلی (Hot Spot) در نفت ایجاد می‌شود که منجر به

نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی کارایی بهتری در جذب امواج و تبدیل انرژی امواج به گرما را دارند. بنابراین این نانوذرات قابلیت امیدوارکننده‌ای برای استفاده در فرایند گرمایش الکترومغناطیسی داشته و می‌تواند به تولید گرما در مخازن نفت سنگین، شکستن اجزای سنگین، کاهش گرانیوی کمک کرده و سبب افزایش تولید نفت سنگین خواهند شد.

### ۲-۳ بررسی تغییرات دما و گرانیوی

در این بخش اثر نانوذرات  $Fe_3O_4$  و کربن فعال در تغییرات دمای نمونه‌های نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج در بازه زمانی بین ۰ تا ۸ دقیقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد تابش امواج میکروویو سبب افزایش دمای نمونه‌ها شده و دمای نمونه‌ها طی مدت زمان ۸ دقیقه تابش امواج میکروویو از دمای محیط به ترتیب تا دمای ۷۰، ۸۲ و



شکل ۷ تغییرات دما در طی گرمایش میکروویو در حضور اکسید آهن مغناطیسی و کربن فعال و عدم حضور آن‌ها  
Figure 7. Temperature variation during microwave heating in the presence of  $Fe_3O_4$  oxide and activated carbon and their absence



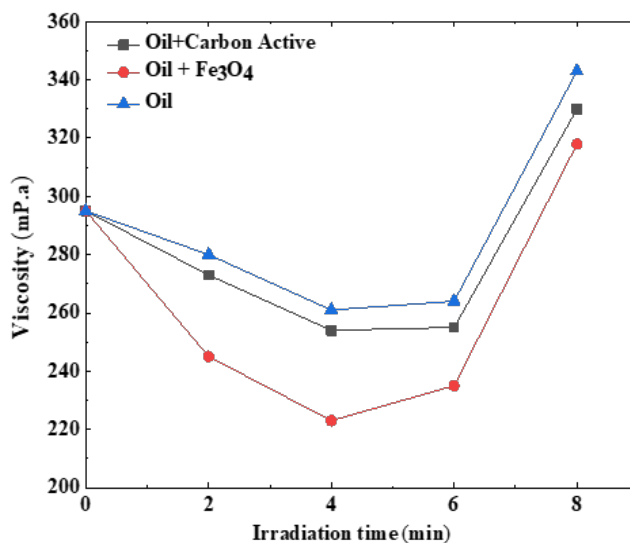
نمونه دیگر (نمونه نفت خام و نمونه نفت حاوی کربن فعال) کاهش قابل توجهی در گرانشی داشت و طی مدت زمان تابش ۴ دقیقه، بیشترین کاهش گرانشی گزارش شد. گرانشی نمونه نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه به ترتیب از ۲۹۵ تا ۲۶۱، ۲۵۴ و ۲۲۳ mPa.s به عبارتی گرانشی نمونه‌ها تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه برای نمونه نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  به ترتیب ۱۱/۵، ۱۳/۹ و ۲۴/۴ درصد کاهش داشته و به طور کلی نانوذرات  $Fe_3O_4$  بیشترین کارایی را در افزایش دما و کاهش گرانشی داشتند.

با شروع تابش امواج میکروویو، تولید گرما در مواد در اثر تابش امواج میکروویو، به دلیل حرکت ارتعاشی یا چرخشی مولکول‌های موجود در مواد صورت می‌گیرد که به آن جهت‌گیری دوقطبی نیز می‌گویند. این فرایند گرمایش سریع و حجیمی را نسبت به گرمایش سطحی فراهم و سبب افزایش دما می‌شود که این افزایش دما در طی فرایند در شکل (۷) تأیید شد. با افزایش دما، شکست ترکیبات نفت رخ می‌دهد. شکست ترکیبات نفت خصوصاً ترکیبات سنگین سبب کاهش گرانشی نفت و نیز ارتقای آن می‌شود. از طرفی با افزایش دما شکست ترکیبات سبک و سنگین نیز افزایش خواهد داشت اما ترکیبات سبک فرارتر بوده و امکان فرار ترکیبات سبک‌تر در این شرایط افزایش می‌یابد. در این شرایط فرار ترکیبات سبک سبب افزایش گرانشی خواهد شد که نتایج ارائه شده در شکل (۸) به این مسئله اشاره دارد. مطابق شکل (۸) پس از گذشت زمان ۴ دقیقه و با افزایش دمای نمونه‌ها میزان گرانشی افزایش داشت زیرا با افزایش

افزایش کارایی نانوذرات شده، دما افزایش و گرانشی نیز کاهش خواهد داشت. از طرفی سرعت واکنش‌های شکست نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به مشخصه‌یابی انجام شده و نتایج ارائه شده در شکل‌های (۴-۶) نانوذرات فلزی آهن خواص الکترومغناطیسی بهتری نسبت به کربن فعال داشته و پتانسیل بیشتری در جذب امواج الکترومغناطیس نسبت به کربن فعال دارند و مطابق پژوهش‌های پیشین این نتایج تأیید می‌شوند [۱۲ و ۱۵]. از این رو انتظار می‌رود که نانوذرات اکسید آهن یا  $Fe_3O_4$  نیز نسبت به کربن فعال در فرایند گرمایش الکترومغناطیس کارایی بیشتری داشته باشند. از طرفی برای افزایش کارایی نانوذرات آهن می‌توان از هیبرید اکسید آهن و کربن فعال استفاده کرد. مطابق نتایج حاصل نانوذرات  $Fe_3O_4$  سبب افزایش قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی توسط نفت خام شده و انرژی دریافتی و جذب شده از امواج را به خوبی به دما تبدیل کرده و به محیط اطراف (نمونه نفتی) منتقل می‌کنند. به همین دلیل نمونه نفت خام حاوی این نانوذرات افزایش دمای بیشتری نسبت به نمونه نفت خام حاوی کربن فعال داشته است.

مطابق شکل (۷) تغییرات گرانشی طبق رویکردهای ارائه شده در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت. گرانشی نمونه نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج در بازه زمانی بین ۰ تا ۸ دقیقه بررسی شد. باید توجه داشت گرانشی نمونه‌ها پس از فرایند سرد شدن نمونه‌ها و پس از رسیدن دمای نمونه‌ها به دمای محیط اندازه‌گیری شده است. گرانشی نمونه‌ها با افزایش زمان تابش امواج از ۰ تا ۴ دقیقه روند کاهشی داشت. همچنین در این بازه زمانی (۰ تا ۴ دقیقه) گرانشی نمونه نفت حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  نسبت به دو



شکل ۸ تغییرات گرانشی در طی گرمایش میکروویو در حضور اکسید آهن مغناطیسی و کربن فعال و عدم حضور آن‌ها  
Figure 8. Viscosity variation during microwave heating in the presence of magnetic iron oxide and activated carbon and their absence

از این رو توجه به مدت زمان بهینه تابش ضروری است. در پایان نتایج پژوهش حاضر با سایر مقالات مرتبط مقایسه و در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و نتایج ارائه شده

جدول ۲ مقایسه و بررسی پژوهش‌ها در خصوص تأثیر نانوذرات تحت تابش امواج مایکروویو جهت ارتقا و ازدیاد برداشت نفت

Table 2. Comparison and review of researches regarding the effect of nanoparticles under microwave radiation to upgrading and enhancing oil recovery

Number	Authors & year	Type of nanoparticles	synthesis method	type of waves used	investigation of electromagnetic properties	results
1	Current research	$Fe_3O_4$ , Carbon Active	Co-precipitation	Microwave	+	better efficiency of iron oxide nanoparticles than activated carbon in reducing viscosity
2	Gharibshahi et al, 2022 [15]	Hybrid of iron oxide and carbon nanotubes	Co-precipitation	Microwave	+	Greater efficiency of iron oxide-carbon nanotube nanohybrids in reducing viscosity
3	Shamsi Armandi et al, 2021 [12]	Iron oxide and nickel oxide	Co-precipitation	Microwave	-	Greater efficiency of iron oxide nanoparticles in reducing contact angle, reducing oil viscosity
4	Hasani et al, 19], 2022]	iron oxide, titanium oxide and hybrid iron oxide-titanium oxide	Co-precipitation	Microwave	-	Greater efficiency of iron oxide nanoparticles in increasing oil recovery
5	Ali et al, 20], 2020]	iron oxide and manganese oxide nanoparticles	Sol-Gel	Electromagnetic Wave	+	Enhancing heavy oil recovery
6	Wahaab et al, 2020 [21]	Zinc oxide nanoparticles, ferrite-bismuth	Co-precipitation	Electromagnetic Wave	+	Greater efficiency of iron oxide nanoparticles in increasing oil recovery
7	Xu et al, 22], 2019]	zinc oxide and iron oxide	Co-precipitation	Microwave	-	Reducing viscosity by nanoparticles and increasing the efficiency of magnetic oxide graphene in the presence of hydrogen donor
8	Nasri et al, 23], 2019]	Graphene oxide and iron oxide	Commercial	Microwave	-	Greater efficiency of iron nanoparticles in oil upgrading and asphaltene reduction - increasing efficiency by using hydrogenating agent
9	Taheri-Shakib et al, 5], 2018]	iron, titanium oxide and super active carbon	Commercial	Microwave	-	Greater efficiency of activated carbon in reducing viscosity and greater efficiency of iron nanoparticles in reducing asphaltene
10	Bera et al, 14], 2017]	Carbon and graphene	Commercial	Microwave	-	Increasing efficiency in reducing viscosity by reducing particle size

نتایج اثر کاتالیزوری نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی در شکست ترکیبات سنگین مؤثرتر بوده است. این تفاوت در کارایی نانوذرات  $Fe_3O_4$  و کربن فعال به این دلیل است که نانوذرات  $Fe_3O_4$  سنتز شده نسبت به کربن فعال، قابلیت جذب بهتری برای جذب امواج میکروویو داشته و در نتیجه کارایی بیشتری برای کاهش گرانیوی، شکست ترکیبات سنگین و ارتقای نفت سنگین دارند.

در جدول (۲) می‌توان دریافت خواص الکترومغناطیس نانوذرات به خوبی کارایی آن‌ها را در فرایند گرمایش الکترومغناطیس نشان می‌دهد. همچنین نانوذرات آهن کارایی خوبی در این فرایند داشته و سبب کاهش گرانیوی و ارتقای نفت خواهند شد. از این رو پیشنهاد می‌شود برای ساخت نانو هیبریدهای مناسب از اکسید آهن به عنوان ذره پایه استفاده شود.

#### ۴ نتیجه گیری

هدف اصلی این پژوهش بررسی و مقایسه کارایی نانوذرات مغناطیسی  $Fe_3O_4$  و کربن فعال در فرایند گرمایش الکترومغناطیس، کاهش گرانیوی نفت و ارتقای آن بوده است. به همین منظور در ابتدا نانوذرات اکسید آهن مغناطیسی به روش هم‌رسوبی سنتز و مشخصه‌یابی شدند. پس از مشخصه‌یابی و اطمینان از ساختار نانوذرات، کارایی نانوذرات سنتز شده در فرایند گرمایش الکترومغناطیس و کاهش گرانیوی نفت با کربن فعال مقایسه شد. قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی پارامتری ضروری در افزایش بازده فرایند گرمایش الکترومغناطیسی است. زیرا میزان گرمای تولید شده در طی فرایند افزایش یافته و افزایش دمای مؤثرتری را در پی خواهد داشت. با توجه به نتایج ارائه شده نانوذرات اکسید آهن در افزایش دمای نمونه‌های نفت مؤثرتر بوده است. از طرفی با افزایش دما، گرانیوی نیز کاهش داشته است. نمونه نفت حاوی نانوذرات  $Fe_3O_4$  به‌طور قابل توجهی گرانیوی را در مقایسه با نمونه حاوی کربن فعال و نمونه بدون نانوذرات کاهش داده است. با توجه خواص الکترومغناطیس نانوذرات  $Fe_3O_4$  توانایی بالایی در جذب امواج الکترومغناطیسی و تبدیل آن‌ها به گرما دارند و در طی فرایند میزان بیشتری از امواج را جذب و آن به گرما تبدیل کرده‌اند. با افزایش زمان تابش از صفر تا ۴ دقیقه، گرانیوی نیز کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش گرانیوی تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه گزارش شده است. گرانیوی نمونه نفت خام (قبل از فرایند)، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه به ترتیب از ۲۹۵ تا ۲۶۱، ۲۵۴ و ۲۲۳ mPa.s کاهش داشته و به عبارتی گرانیوی نمونه‌ها تحت تابش امواج به مدت ۴ دقیقه برای نمونه نفت خام، نفت خام به همراه کربن فعال، نفت خام به همراه نانوذرات  $Fe_3O_4$  به ترتیب ۱۱/۵، ۱۳/۹ و ۲۴/۴ درصد کاهش داشته و نانوذرات  $Fe_3O_4$  بیشترین کارایی را در افزایش دما و کاهش گرانیوی داشتند.

پس از ۴ دقیقه با افزایش زمان تابش امواج، گرانیوی افزایش داشته است که این مسئله به دلیل افزایش دما و فرار بیشتر ترکیبات سبک از فاز مایع، خواهد بود. بنابراین توجه به مدت زمان بهینه تابش امواج در طی این فرایند امری ضروری است. با توجه به

### مراجع

- [1] Ghalamizade Elyaderani S.M. and Jafari A., Investigation of Interactions between Silica Nanoparticle, Alkaline, and Polymer in Micro-model Flooding for Enhanced Oil Recovery, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effect, 42(8), 919–1039, 2020, doi: 10.1080/15567036.2020.1811428.
- [2] Razavinezhad J., Jafari A., and Ghalamizade Elyaderani S.M., Experimental Investigation of Multi-walled Carbon Nanotubes Assisted Surfactant/Polymer Flooding for Enhanced Oil Recovery, Journal of Petroleum Science and Engineering, 214, 110370, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2022.110370.
- [3] Gharibshahi R., Omidkhah M., Jafari A., and Fakhroueian Z., Hybridization of Superparamagnetic  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanoparticles with MWCNTs and Effect of Surface Modification on Electromagnetic Heating Process Efficiency: A Microfluidics Enhanced Oil Recovery Study, Fuel, 282, 118603, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118603.
- [4] Hanyong L., Kexin C., Ling J., Leilei W., and Bo Y., Experimental Study on the Viscosity Reduction of Heavy Oil with Nano-Catalyst by Microwave Heating Under Low Reaction Temperature, Journal of Petroleum Science and Engineering, 170, 374–382, 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2018.06.078.
- [5] Taheri-Shakib J., Shekarifard A., and Naderi H., Heavy Crude Oil Upgrading Using Nanoparticles by Applying Electromagnetic Technique, Fuel, 232, 704–711, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.06.023.
- [6] Mahmoudi S., Jafari A., and Javadian S., Temperature Effect on Performance of Nanoparticle/Surfactant Flooding in Enhanced Heavy Oil Recovery, Petroleum Science, 16(6), 1387–1402, 2019, doi: 10.1007/s12182-019-00364-6.
- [7] Gaya U., Recent Approaches, Catalysts and Formulations for Enhanced Recovery of Heavy Crude Oils, Period Polytech Chemical Engineering, 65(4), 462–475, 2021, doi: 10.3311/PPCH.17236.
- [8] Zhao F., Liu Y., Lu N., Xu T., Zhu G., and Wang K., A Review on Upgrading and Viscosity Reduction of Heavy Oil and Bitumen by Underground Catalytic Cracking, Energy Reports, 7, 4249–4272, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.06.094.
- [9] Gharibshahi R., Omidkhah M., Jafari A., and Fakhroueian Z., Experimental Investigation of Nanofluid Injection Assisted Microwave Radiation for Enhanced Heavy Oil Recovery in a Micromodel System, Korean Journal of Chemical Engineering, 39(3), 562–575, 2022, doi: 10.1007/s11814-021-0961-7.
- [10] Bera A. and Babadagli T., Effect of Native and Injected Nano-particles on the Efficiency of Heavy Oil Recovery by Radio Frequency Electromagnetic Heating, Journal of Petroleum Science and Engineering, 153, 244–256, 2017, doi: 10.1016/j.petrol.2017.03.051.
- [11] Sivakumar P., Krishna S., Hari S., and Vij R.K., Environmental Technology & Innovation Electromagnetic Heating, an Eco-friendly Method to Enhance Heavy Oil Production: A Review of Recent Advancements, Environmental Technology & Innovation, 20, 101100, 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101100.
- [12] Shamsi Armandi H., Jafari A., and Gharibshahi R., Nanoparticles Assisted Microwave Radiation: Fluid-Rock Interactions in Oil Reservoirs, Petroleum Science, 18(6), 1797–1812, 2021, doi: 10.1016/j.petsci.2021.09.002.
- [13] Vakhin A.V., Khelkhal M.A., Tajik A., Ignashev N.A., Krapivnitskaya T. O., Peskov N.Y., Glyavin M.Y., Bulanova S.A., Slavkina O.V., and Schekoldin K.A., Microwave Radiation Impact on Heavy Oil Upgrading from Carbonate Deposits in the Presence of Nano-sized Magnetite, Processes, 9(11), 1–12, 2021, doi: 10.3390/pr9112021.
- [14] Li K., Hou B., Wang L., and Cui Y., Application of Carbon Nanocatalysts in Upgrading Heavy Crude Oil Assisted with Microwave Heating, Nano Letters., 14(6), 3002–3008, 2014, doi: 10.1021/nl500484d.
- [15] Gharibshahi R., Omidkhah M., and Jafari A., Mehrooz N., Parametric Optimization of In-Situ Heavy Oil Upgrading using simultaneous Microwave Radiation and Magnetic Nanohybrids via Taguchi Approach, Fuel, 325, 124717, 2022, doi: doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124717.
- [16] Chen Z.L.J., Chu K., Kun S., Shiquan C., Hong S., Binghao W., Jianhui Z., Synthesis of Magnetic Core-Shell  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ - $\text{Mn}_3\text{O}_4$  Composite

for Degradation of Sulfadiazine via Peroxymonosulfate Activation: Characterization, Mechanism and Toxicity Analysis, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109230, 2023, doi: 10.1016/J.JECE.2022.109230.

[17] Hernandez J.S.T., Muriel A.A., Quintero W.C., Velasquez J.C.C., Salazar-Camacho N.A., Alcázar G.A.P., and Tabares J.A., Characterization of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  Nanoparticles for Applications in Catalytic Activity in the Adsorption/Degradation of Methylene Blue and Esterification, *Molecules*, 27(24), 8976, 2022, doi: 10.3390/molecules27248976.

[18] Green M. and Chen X., Recent Progress of Nanomaterials for Microwave Absorption, *Journal of Materiomics*, 5(4), 503–541, 2019, doi: 10.1016/j.jmat.2019.07.003.

[19] M. Hasani and A. Jafari, Electromagnetic Field's Effect on Enhanced Oil Recovery Using Magnetic Nanoparticles: Microfluidic Experimental Approach, *Fuel*, 307, 121718, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121718.

[20] Ali H., Soleimani H., Yahya N., Lorimer S., Sabet M., Demiral B.M.R., and Adebayo L.L., Absorption of Electromagnetic Waves in Sandstone Saturated with Brine and Nanofluids for Application in Enhanced Oil Recovery, *Journal of Taibah University for Science*, 14(1), 217–226, 2020, doi: 10.1080/16583655.2020.1718467.

[21] Wahaab F.A., Adebayo L.L., Adekoya A.A., Yusuf J.Y., Obalalu A.M., Yusuff A.O., and Alqasem B., Electromagnetic Wave-Induced Nanofluid-Oil Interfacial Tension Reduction for Enhanced Oil Recovery, *Journal of Molecular Liquids*, 318, 114378, 2020, doi: 10.1016/j.molliq.2020.114378.

[22] Xu Z., Li Z., Jing A., Meng F., Dang F., and Lu T., Synthesis of Magnetic Graphene Oxide (MGO) and Auxiliary Microwaves to Enhance Oil Recovery, *Energy and Fuels*, 33(10), 9585–9595, 2019, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b01841.

[23] Nasri Z., Upgrading Vacuum Distillation Residue of Oil Refinery Using Microwave Irradiation, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 146, 107675, 2019, doi: 10.1016/j.cep.2019.107675.