



Theoretical and Experimental Elucidation of Emulsion Breaking of Crude Oil in Water by Increasing the Weight of Dispersed Droplets

Mehdi Ghanbari^{1*}, Kobra Salehi²

¹ Assistant Professor, Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran .

² Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Darab Branch, Islamic Azad University, Darab, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 2024.12.29

Revised: 2025.04.04

Accepted: 2025.12.14

Keyword:

Crude oil
Emulsion
oily waste water
oil in water
magnetic demulsification
surfactant

*Corresponding Author:

Mehdi Ghanbari

Email: M-Ghanbari@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In this research, oil-in-water emulsion, as an example of oily wastewater produced from crude oil desalting units in refineries, using oleic acid-coated magnetic micron-sized particles. This novel demulsification method is based on increasing the weight of dispersed oil droplets using magnetic micron-sized particles, which does not necessarily require the application of a magnetic field for demulsification and does not necessitate the addition of a surfactant. However, the magnetic property of the particles provides an opportunity for their recovery. The effect of seven factors—mixing time, temperature, acidity (pH), salt concentration, wettability (weight ratio of oleic acid to magnetic particles), mixing speed, and weight of magnetic particles, on the removal efficiency of the dispersed phase were evaluated. The results showed that, firstly, all the mentioned factors affect the demulsification efficiency and oil removal from water. Secondly, the highest oil removal rate was achieved by reducing the mixing time and increasing the amount of magnetic particles. However, the effect of acidity on oil removal is more significant, such that, the acidic conditions combined with the use of pure magnetic particles can lead to complete oil removal. Furthermore, to achieve an oil removal efficiency of 82% or less, it is possible to offset the consumption of the magnetic demulsifier by increasing the mixing time.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Emulsified oily residues pose a significant environmental threat. Existing wastewater treatment methods are often inefficient, complicated, and energy-intensive, prompting a search for more effective approaches. The magnetic demulsification method has emerged as a promising solution due to its recyclability and eco-friendliness. This process consists of three steps: 1) magnetizing the dispersed water phase with functionalized magnetite particles, 2) separating the magnetized droplets using a magnetic field, and 3) recovering the demulsifier. However, this method faces challenges, including time consumption and the need for strong magnetic fields at low temperatures, limiting its industrial scalability. Ghanbari and Esmaeilzadeh proposed a new demulsification approach that does not require a magnetic field or surfactants. Their method involves mixing magnetite flocs with the emulsion, sedimentation of the laden droplets, and recovery of particles, enhanced by their magnetic responsiveness. This method effectively facilitates sedimentation and coalescence of oil droplets, with the potential for eco-friendly recovery.

Methodology

Materials

The micron-sized MPs were obtained from Kimia Mavad Co., Iran. The particles were round-shape, $\geq 98\%$ purity and average size of 220 nm. The Oleic-acid, $\geq 98\%$ purity, was obtained from the local market. The NaCl, $\geq 99.5\%$ purity, was purchased from the Merck Co. (Germany). The crude oil with the properties reported in Table 1 was taken from Sarvestan oil field, one of the oil fields in Iran. Distilled water was utilized, throughout.

Methods

Emulsion Preparation

An o/w mother emulsion was produced by ultrasonically blending of 150 mL of water, 0.6 mL of the crude oil. The blending was done by using an ultrasonicator (Qsonica, Q700) at the amplitude of 70 for 10 min. Then, 600 mL of the collected mother emulsion was then diluted to 1000 mL. The produced emulsion has good stability with no significant breaking for a week. 10 mL of the emulsion were mixed with 10 mL of the deionized water and adjusted its salinity and PH by adding NaCl, and the HCl/NH₄OH solutions.

Demulsification Procedure

Magnetite particles (0.2 – 1.2 g) were mixed with the emulsion in a 50 mL vial using a mechanical stirrer (Mtops, MS-280D) at 500–1500 rpm and 25–60 °C for 30–180 seconds. The collision of dispersed water droplets with magnetite flocs led to sedimentation within minutes post-mixing. To assess the serum layer for suspended magnetite particles (MPs), 3 mL of supernatant was removed immediately and analyzed for overall absorbance (Ao). A second 3 mL sample was analyzed after 1 hour to obtain ultimated absorbance (Au), from which the Absorbance Index (AI) was calculated as the difference between Ao and Au, indicating turbidity from suspended particles. The Relaxation Period (PR) was defined as the time until AI reached zero. Oil removal efficiency was calculated using:

$$\text{Oil removal (\%)} = (C_i - C_e) / C_i \times 100 \quad (1)$$

where C_i and C_e are the initial and residual oil concentrations, respectively.

Covering of MPs with Oleic Acid

Magnetite particles were coated with Oleic acid to study wettability effects on oil

removal efficiency. This was done by adding 50 g of Oleic acid to 500 mL of water (adjusted to pH 8) under stirring at 500 rpm and 80 °C, followed by the gradual addition of 12.5–25 g of magnetite particles over 1 hour.

Experimental Design

A two-level fractional factorial design was used to explore the main and two-factor interaction effects in the co-sedimentation demulsification of the oil-water emulsion. All experiments, conducted in duplicate and randomly ordered, resulted in 32 experiments, including three center points, as detailed in Tables 2 and 3.

Table 1. Properties of the crude oil used in this study.

No.	Property	Unit	Value
1	Density	g/cm ³	0.852
2	Saturates	wt.%	67.70
3	Aromatics	wt.%	30.20
4	Resins	wt.%	0.72
5	Asphaltenes	wt.%	1.38
6	Sulfur content	wt.%	1.60
7	Water content	v/v%	0.1-0.2
8	Salt content	g/lit	0.792
9	Sediment	v/v%	< 0.01
10	Viscosity at 15 °C*	mPa.s	5.63

Table 2. The selected factors and their experimental domain.

Factors	Unit	Factor ID	Level		
			-1	0	1
Mixing time	sec	A	30	105	180
Oleic-Acid Weight/ Magnetite Weight	-	B	0	1	2
OAW/ MW					
Magnetite weight/Dispersed oil weight	-	C	0.2	0.7	1.2
MW/DOW					
pH	-	D	4	7	10
Mixing Speed	rpm	E	500	1000	1500
Salt Content	ppm	F	0	3000	6000

Results and discussion

The effects of seven independent factors including: mixing time, temperature, pH, salt content, magnetic wettability, mixing speed, and magnetite dosage have been taken into account using two level fractional factorial design to investigate their effects upon the co-sedimentation demulsification of crude oil in water emulsion. Based on the designed experiments, the observed and predicted values of the separation efficiency and magnetite residue were shown in Table 4.

Conclusion

In this research, crude oil emulsions in water, as a model of oil-contaminated wastewater produced from crude oil desalting units, were demulsified using oleic acid-coated magnetic micron-sized particles. This method does not necessarily require the application of a magnetic field for emulsion removal and does not require the addition

of a surfactant. However, the magnetic properties of the particles provide an opportunity for their recovery. The effects of seven factors, including mixing time, temperature, pH, salt content, wettability (weight ratio of oleic acid to magnetic particles), mixing speed, and the weight of magnetic particles on the removal efficiency of the dispersed phase were evaluated using the fractional factorial design by Design-Expert version 7.1.5 on the oil removal efficiency.



کارافن

فصلنامه علمی دانشگاه ملی مهارت

بهار ۱۴۰۵، دوره ۲۳، شماره ۱، ۶۷۱-۶۴۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir>

doi: [10.48301/kssa.2025.490388.3089](https://doi.org/10.48301/kssa.2025.490388.3089)



مطالعه نظری و آزمایشگاهی شکستن امولسیون نفت خام در آب با افزایش وزن قطرات پراکنده

مهدی قنبری^{۱*}، کبری صالحی^۲

۱- گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران.

۲- گروه مهندسی شیمی، واحد داراب، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق امولسیون‌زدایی از نفت خام در آب، به عنوان نمونه ای از پساب نفتی تولید شده در واحد نمک‌زدایی نفت خام در پالایشگاهها، با استفاده از ذرات میکرونی مغناطیسی پوشش داده شده با اسید اولئیک مورد بررسی قرار گرفت. این روش جدید امولسیون‌زدایی مبتنی بر افزایش وزن قطرات نفت پراکنده با استفاده از ذرات مغناطیسی میکرونی است که در آن جهت جداسازی لزوماً نیازی به اعمال میدان مغناطیسی برای حذف امولسیون وجود ندارد و نیازمند افزودن ماده فعال سطحی نیز نمی‌باشد. با این حال، خاصیت مغناطیسی ذرات، فرصتی را برای بازیافت آنها فراهم می‌کند. اثر هفت عامل شامل زمان اختلاط، دما، اسیدیته، غلظت نمک، درجه ترشوندگی (نسبت وزنی اولئیک اسید به ذرات مغناطیسی)، سرعت اختلاط و وزن ذرات مغناطیسی بر رانندگی حذف فاز پراکنده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اولاً تمام عوامل ذکر شده بر بازدهی امولسیون‌زدایی و حذف نفت از آب تأثیر دارند و ثانیاً بالاترین میزان حذف نفت با کاهش زمان اختلاط و افزایش میزان ذرات مغناطیسی به دست می‌آید. اما تأثیر اسیدیته بر حذف نفت از اهمیت بیشتری برخوردار است بطوریکه شرایط اسیدی، همراه با استفاده از ذرات مغناطیسی خالص می‌تواند منجر به حذف کامل نفت شود. همچنین برای دستیابی به بازدهی حذف نفت کمتر یا برابر با ۸۲٪، میزان مصرف امولسیون‌زدای مغناطیسی می‌تواند با افزایش زمان اختلاط جبران شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹

بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۴/۲۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

کلید واژگان:

نفت خام
امولسیون
پساب نفتی
نفت در آب
امولسیون‌زدایی مغناطیسی
ماده فعال سطحی

*نویسنده مسئول: مهدی قنبری

پست الکترونیکی:

M-Ghanbari@tvu.ac.ir



©2024 the authors. Published by National University of Skill, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

۱- مقدمه

ورود پساب‌های نفتی به محیط زیست و طبیعت به خطرات جدی برای کل زیست‌بوم منجر خواهد شد [۴-۱]. به همین دلیل همواره روش‌های متعددی برای تصفیه این پساب‌ها مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته اند؛ اما متأسفانه بیشتر آنها ناکارآمد، پیچیده و پرهزینه هستند [۵]. بنابراین، امروزه توسعه روش‌های اقتصادی‌تر و کارآمدتر برای تصفیه این نوع پساب‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است [۶؛ ۲].

در سالهای اخیر تحقیقات بسیاری بر روی روش جدا سازی با استفاده از ذرات مغناطیسی، در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته و نتایج این تحقیقات امیدهای بسیاری را برای کاربرد آن در فرآیندهای صنعتی امولسیون‌زدایی ایجاد کرده است. یکی از مزیت‌های قابل توجه این روش مزیت منحصربه‌فرد بازیافت‌پذیری ذرات مغناطیسی است که آن را به عنوان روش دوست‌دار محیط زیست مطرح می‌نماید [۷-۱۰].

ذرات مغناطیسی معمولاً نیاز به اصلاح با مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها یا پلیمرها) دارند تا فعالیت بین سطحی و قابلیت پراکندگی آن‌ها بهبود یابد [۱۱-۱۴]. امولسیون‌زدای مغناطیسی می‌تواند در فصل مشترک آب و روغن تجمع یافته و خواص مغناطیسی خود را به قطرات پراکنده شده منتقل کند. بنابراین، تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی خارجی، قطراتی که تحت تأثیر امولسیون‌زدای مغناطیسی قرار گرفته اند، به سرعت با یکدیگر ادغام شده و از فاز پیوسته جدا می‌شوند. امولسیون‌زدای مغناطیسی را می‌توان توسط یک آهن‌ربا بازیابی و مجدداً استفاده نمود. به همین دلیل، این مواد دارای مزایای کاربرد ساده، قابلیت بازیافت و احتمالاً هزینه کمتر هستند [۱۴]. از این رو تعداد پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه در سال‌های اخیر به سرعت افزایش یافته است [۲؛ ۱۵-۱۷].

دوئن و همکاران (۲۰۱۷) نانوذرات کامپوزیت مغناطیسی حساس به دما را با پیوند دادن یک عامل تجاری امولسیون‌زدا به نام DMEA به ذرات مغناطیسی تهیه کردند. فرآیند امولسیون‌زدایی از قطرات روغن در آب شامل (۱) مغناطیسی کردن قطرات پراکنده توسط M-DMEA با کمک امواج مافوق صوت به مدت ۵ دقیقه و (۲) جداسازی فاز پراکنده با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه بود. نتایج نشان داد که استفاده از ۲/۵ گرم بر لیتر از عامل امولسیون‌زدا، ۹۲٪ از قطرات روغن را از آب جداسازی نموده است. مکانیسم پیشنهادی این نوع امولسیون‌زدایی شامل انعقاد قطرات و تشکیل لایه فیلم نازک توسط M-DMEA بود. آنها معتقد بودند که خاصیت مغناطیسی عامل امولسیون‌زدا می‌تواند با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی در تسریع انعقاد مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر عملکرد امولسیون‌زدایی M-DMEA پس از سه دوره استفاده متوالی به ۷۱٪ کاهش پیدا کرد [۱۵].

لی و همکاران (۲۰۱۴) یک امولسیون‌زدای مغناطیسی جدید به نام M-5010 را از طریق واکنش ماده شیمیایی تجاری 5010 که در میادین نفتی به عنوان امولسیون‌زدا استفاده می‌شود، با ذرات مغناطیسی احاطه شده با ذرات سیلیکا و دارای گروه عاملی اپوکسی سنتز کردند. سپس یک امولسیون روغن در آب با غلظت ۱ گرم بر لیتر تهیه کرده و مقادیر مختلفی از امولسیون‌زدا را به ۲۵ میلی‌لیتر از این امولسیون اضافه کردند و مخلوط را ۲۰۰ بار با دست تکان دادند. بهترین نتیجه‌ای که آنها در امولسیون‌زدایی به دست آوردند، جداسازی امولسیون با استفاده از M-5010 در مدت زمان ته‌نشینی ۳ ساعت و دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد و برابر با ۹۷٪ بود، در حالی که با استفاده از ماده تجاری امولسیون‌زدای 5010 این مقدار به ۹۵٪ رسید. همچنین M-5010 می‌تواند با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی که به عنوان جداکننده فاز مواد عمل می‌کند، بازیافت و مجدداً مورد استفاده قرار داد، اما سرعت حذف روغن پس از چهار دوره بازیافت به ۷۰٪ کاهش یافت [۱۱].

لیانگ و همکاران (۲۰۱۴) با تنظیم قابلیت تر شوندگی ذرات مغناطیسی تو سط یک پوشش اسید اولئیک، امولسیون نانومقیاس سیکلو هگزان در آب را تحت میدان مغناطیسی خارجی امولسیون زدایی کردند. آزمایش امولسیون زدایی با استفاده از ۰/۴-۰/۵ گرم از نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با اسید اولئیک، در ۱۰ میلی لیتر امولسیون نانومقیاس تازه با غلظت ۰/۹٪ از فاز پراکنده انجام گرفت. مخلوط به مدت ۳ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد تکان داده شد تا به تعادل برسد. سپس محتوای باقیمانده روغن پس از ته نشینی به مدت حدود ۲ دقیقه روی یک آهنربای دستی اندازه گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که بیشترین بازدهی امولسیون زدایی ۹۸٪، زمانی حاصل می شود که زاویه تماس بین نانوذرات مغناطیسی و آب ۹۰ درجه باشد. همچنین بازدهی فرآیند امولسیون زدایی مستقل از اسیدیته و غلظت الکترولیت بوده و نمونه های نانوذرات مغناطیسی پوشیده شده با اسید اولئیک بازدهی بیشتری نسبت به نانوذرات مغناطیسی خالص داشتند. آزمایش های باز یافت نیز نشان داد که هیچ تغییر قابل توجهی در بازدهی امولسیون زدایی طی شش دوره باز یافت و استفاده مجدد وجود ندارد [۱۸]. با این حال، تکنیک های جدا سازی مغناطیسی زمان بر هستند و نیاز به چند ساعت اختلاط ذرات مغناطیسی با امولسیون ها دارند تا قطرات پراکنده مغناطیسی شوند [۱۹].

لیو و همکاران (۲۰۱۷) جدا سازی گازوئیل از آب در یک امولسیون را با استفاده از نانوذرات مغناطیسی که به ترتیب با لایه های سیلیکا و ۳-آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) پوشش داده شده بودند، مورد مطالعه قرار دادند. بدین ترتیب که امولسیونی از گازوئیل در آب دیونیزه (با غلظت وزنی ۰/۲ درصد گازوئیل) را از طریق اختلاط با امواج فراصوت به مدت ۵ دقیقه تهیه کردند. سپس مقادیر مختلفی از نمونه های نانوذرات مغناطیسی با امولسیون ها به مدت ۲۰ ثانیه به صورت دستی مخلوط شدند. پس از آن، مخلوط ها به مدت ۲۰ ثانیه در معرض یک میدان مغناطیسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد نانوذرات مغناطیسی بدون پوشش نمی توانند به طور مؤثر امولسیون را جدا کنند، اما نانوذرات مغناطیسی پوشش داده شده با APTES توانایی بالایی در جداسازی امولسیون به ویژه در شرایط اسیدی نشان دادند. همچنین نتایج نشان دهنده وجود یک امولسیون زدای جدید با قابلیت پاسخ دهی به تغییرات اسیدیته بود. به این ترتیب، باز یافت امولسیون زدای استفاده شده از طریق شستشو با آب قلبایی انجام گرفت. همچنین به دلیل جاذبه و چسبندگی بین ذرات که به عنوان عامل لخته کننده عمل می کردند، لخته سازی قطرات مغناطیسی شده نیز مشاهده گردید اما هیچ نشانه ای از به هم پیوستن فاز پراکنده وجود نداشت و نتایج نشان می داد لایه های نانوذرات مغناطیسی و فیلم نازک مایع موجود در قطرات از هم پیوندی جلوگیری می کنند [۲۰].

محققان مذکور در تحقیق دیگری امولسیون زدای مغناطیسی حساس به دما را طراحی کردند. بدین ترتیب که نانوذرات مغناطیسی سنتز شده را با یک لایه سیلیکای اصلاح شده با ۷-متیل آکریلوکسی پروپیل تری ایزوپروپوکسی سیلان پوشش دادند و نانوذرات مغناطیسی حساس به دما از طریق یک واکنش با پلی N-ایزوپروپیل آکریل آمید و نانوذرات مغناطیسی اصلاح شده تولید نمودند. مشاهدات نشان داد در حالی که نانوذرات مغناطیسی حساس به دما در دماهای پایین تر از ۳۳ درجه سانتی گراد روی سطح قطرات تجمع پیدا می کنند، در دماهای بالاتر از رابط سطحی جدا می شوند. به همین دلیل برای احیای نانوذرات مغناطیسی از آب گرم (۶۰ درجه سانتی گراد) استفاده شده و نتایج نشان داد فرآیند احیا و باز یافت مناسب بوده و به عنوان روشی دوستدار محیط زیست برای تصفیه فاضلاب امیدبخش است [۲۱-۲۳].

ما و همکاران (۲۰۱۶) با یک روش دو مرحله ای نانوکامپوزیت های مغناطیسی آب گریزی را تولید کردند. این روش شامل (۱) مغناطیسی کردن گرافن اکسید کاهش یافته با ذرات مغناطیسی و (۲) اصلاح آن با یک عامل جفت کننده سیلان بود. این امولسیون زدا برای جدا سازی هر دو نوع امولسیون روغن در آب و آب در روغن با کمک یک میدان مغناطیسی به مدت ۲ دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، این نانوذرات به راحتی با

اعمال یک میدان مغناطیسی احیا شدند. جداسازی کامل امولسیون ها با صرف مدت زمان حدود یک ساعت انجام گرفت [۲۴].

المبارک و الممانی (۲۰۲۱) نانوذرات مغناطیسی را برای بازیافت نفت از آب سازند از طریق امولسیون نفت در آب مورد استفاده و مطالعه قرار دادند. نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن با استفاده از روش سنتز احتراقی در دمای بین ۱۵۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد سنتز و با استفاده از تکنیک های تحلیلی مختلف آنالیز گردید. سپس اثرات پارامترهایی مانند اسیدیته، غلظت نفت، دوز ماده مغناطیسی و غلظت ماده فعال سطحی بر بازدهی جداسازی نفت و درصد حذف نفت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوذرات مغناطیسی می توانند تا ۹۸/۶٪ نفت را بازیابی کنند؛ و بهترین بازده در دوز ۱۰ میلی گرم بر لیتر از ماده مغناطیسی مشاهده گردید. بازدهی جداسازی با افزایش اسیدیته به ۷ و افزایش غلظت ماده فعال سطحی به ۰/۱ گرم بر لیتر کاهش یافت. همچنین پس از هفت دوره، نانوذرات مغناطیسی تا ۹۰٪ از نفت را بازیابی کردند که نشان دهنده قابلیت استفاده مجدد آن ها بود. نتایج نشان داد این نانوذرات ظرفیت جذب بالایی دارند و رفتار آن ها مطابق مدل های لانگمویر و فرندلی است [۲۵].

ملهس و همکاران (۲۰۲۳) استفاده از نانوذرات اکسید آهن با اندازه های ۳ و ۱۵-۲۰ نانومتر برای حذف روغن از امولسیون آب در روغن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که این نانوذرات توانایی بالایی در حذف روغن دارند و حداکثر درصد حذف روغن برای نانوذرات ۳ نانومتر ۹۴٪ و برای نانوذرات ۱۵-۲۰ نانومتر ۸۳٪ بود. آنها برای بهینه سازی فرآیند، پارامترهای مختلفی مانند میزان جاذب، اندازه ذرات، زمان اختلاط، اسیدیته، دما و غلظت روغن را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که بهترین شرایط برای حذف روغن شامل غلظت روغن برابر با ۱۰۰ mg/L، مقدار جاذب ۸۰ mg، اسیدیته برابر با ۶ در دمای محیط بود. همچنین، نانوذرات پس از ۹ چرخه استفاده مجدد، تا ۷۷٪ و ۶۴٪ روغن را بازیابی کردند. این نانوذرات دارای ظرفیت جذب بالای ۳۲۸۰ mg/g و ۳۲۳۵ mg/g برای اندازه های ۳ نانومتر و ۱۵-۲۰ نانومتر بودند [۲۶].

ویوروس و همکاران (۲۰۲۴) کارایی نانوذرات مغناطیسی و نانوذرات مغناطیسی پوشش داده شده با آمین و اسید اولئیک را به عنوان وسیله ای برای امولسیون زدایی امولسیون های نفت خام سبک و متوسط مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که کارایی امولسیون زدایی ذرات مغناطیسی به شدت به فعل و انفعال بین بار سطحی نانوذرات و ماده فعال سطحی بستگی دارد و در نتیجه بر جذب ماده فعال سطحی بر روی سطح ذره تأثیر می گذارد. در حالی که جداسازی گرانشی به تنهایی اثربخشی جزئی دارد، میدان مغناطیسی حرکت ذرات را افزایش داده و منجر به ناپایداری بیشتر می شود. همچنین امولسیون زدایی مغناطیسی با مواد فعال سطحی سازگار با محیط زیست مؤثرتر است و در اکثر موارد به جداسازی ۱۰۰ درصدی منجر می شود [۲۷].

تحقیقات انجام گرفته نشان می دهد که متأسفانه، روش های جداسازی مغناطیسی فوق الذکر دو نقص عمده دارند. اولاً، زمان بر هستند؛ ثانياً، مطالعات صورت گرفته در مقیاس پایلوت سیستم های جداسازی مغناطیسی نشان داده است که، نیاز به ایجاد میدان مغناطیسی کارآمد (بیش از ۱ تسلا) مستلزم دمایی کمتر از ۸۰ کلوین است که این مسئله ممکن است مانعی برای گسترش آن به مقیاس صنعتی باشد [۲۸، ۲۹].

قنبری و اسماعیل زاده (۲۰۱۸) روشی را ارائه کردند که لزوماً نیازی به اعمال میدان مغناطیسی و بکارگیری افزودنی فعال سطحی برای فرآیند امولسیون زدایی ندارد. آنها امولسیون نفت در آب و آب در نفت را با افزایش وزن فاز پراکنده توسط جذب فیزیکی- شیمیایی ذرات مغناطیسی بر روی قطرات و یا درون قطرات، شکستند. در این روش، نیروی گرانشی رو به پایین منجر به رسوب همزمان قطرات پراکنده و ذرات مغناطیسی می شود و پاسخ مغناطیسی ذرات مغناطیسی منحصراً می تواند برای بازیابی آنها مورد استفاده قرار گیرد. این فرآیند را می توان در سه مرحله اصلی انجام داد: (۱) اختلاط ذرات مغناطیسی با امولسیون، (۲) ته نشین شدن قطرات پراکنده

سنگین شده توسط ذرات مغناطیسی ۳) بازایی ذرات مغناطیسی با استفاده از میدان مغناطیسی. مکانیسم این روش در ذیل آمده است [۱۷؛ ۳۰].

هنگامی که پودر مغناطیسی با اندازه ذرات میکرونی با امولسیون نفت در آب مخلوط می‌شود، لخته‌های کوچک ذرات مغناطیسی به قطرات نفت پراکنده برخورد می‌کنند. با توجه به ماهیت آبدوستی این ذرات، لخته‌ها از طریق این برخوردها بر روی سطح قطرات جذب می‌شوند و اجتماعی از ذرات و قطرات نفت به شکل "خوشه‌های نامرطوب" تشکیل می‌دهند. از سوی دیگر، اگر خاصیت ترشوندگی ذرات مغناطیسی به آب‌گریزی تغییر کند، این لخته‌ها به درون قطرات نفت نفوذ کرده و "خوشه‌های مرطوب" ایجاد می‌کنند. خوشه مرطوب به تجمع توده ذرات و قطره‌ای اطلاق می‌شود که در آن توده می‌تواند توسط قطره خیس شود [۳۰].

اتصال توده‌ها ممکن است به دلیل نیروهای جاذبه واندروالسی که بین ذرات میکرونی و زیرمیکرونی غالب است، توسعه یابد [۳۱]. بنابراین، وزن توده‌ها افزایش یافته و در نتیجه باعث ته‌نشینی می‌شود. یک رابطه پنهان بین فاز آب شفاف و فاز آب جمع شده با ذرات مغناطیسی ایجاد می‌شود و در حالی که خوشه‌ها/لخته‌ها ته‌نشین می‌شوند، جریان رو به بالایی از فاز پیوسته رخ می‌دهد. این مسئله ممکن است فرآیند جداسازی را به دلیل معلق ماندن برخی توده‌های سبک‌وزن یا لخته‌های نفت در فاز آب مختل کند. شدت این جریان‌ها به شدت به توزیع اندازه اجزای ته‌نشین شونده بستگی دارد [۳۲؛ ۳۳]. هنگامی که سطح مشترک بین فاز آب شفاف شده و فاز شامل ذرات مغناطیسی و قطرات نفت به سطح مشترک رسوب رسیده، سرعت ته‌نشینی شروع به کاهش کرده و در این مرحله مکانیزم ته‌نشینی تغییر یافته و در نتیجه رسوب با حرکت بسیار جزئی فاز پیوسته به سمت بالا فشرده‌تر شده و به هم پیوستن قطرات نفت در بستر رسوب اتفاق می‌افتد. سپس ذرات مغناطیسی استفاده‌شده مجدداً بازیافت می‌شوند. خاصیت مغناطیسی امولسیون زدا، فرآیند بازیابی را بهبود می‌بخشد و این روش را به یک روش دوست‌دار محیط زیست تبدیل می‌کند. با توجه به خواص منحصر بفرد نانوذرات مغناطیسی می‌توان انتظار داشت فرآیند امولسیون‌زدایی با نانوذرات مغناطیسی دارای بازدهی بهتری باشد.

هدف از این مطالعه بررسی اهمیت متغیرهای دما، اسیدیته، میزان نمک، ترشوندگی مغناطیسی، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و غلظت ذرات مغناطیسی بر جداسازی امولسیون نفت خام در آب توسط روش افزایش وزن قطرات توسط ذرات مغناطیسی است. برای این منظور آزمایشات لازم توسط نرم افزار طراحی آزمایش و روش طراحی فاکتوریل جزئی تدوین می‌شود.

۲- روش انجام آزمایش

۲-۱- مواد:

پودر مغناطیسی میکرونی آبدوست^۱ با خلوص بیش از ۹۸٪ و اندازه متوسط ۲۲۰ نانومتر از شرکت کیمیا مواد ایران، نمک کلرید سدیم با خلوص بیش از ۹۹/۵٪ از شرکت مرک آلمان و اسید اولئیک آزمایشگاهی با خلوص بیش از ۹۸٪ از بازار داخلی تهیه گردید. نفت خام با خواص ارائه شده در جدول (۱) از میدان نفتی سروستان تهیه گردید و در تمام آزمایشات از آب مقطر دی یونیزه برای تهیه آب نمک استفاده شد.

^۱ Fe₃O₄

جدول ۱. خواص نفت مورد استفاده در این تحقیق [۳۱]

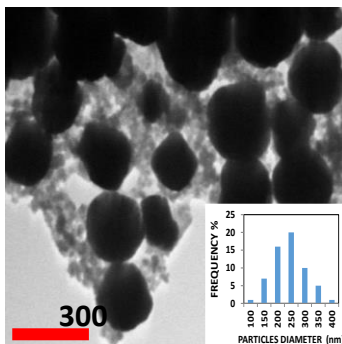
ردیف	خاصیت/غلظت	مقدار	واحد
۱	چگالی	۰/۸۵۲	g/cm ³
۲	ترکیبات اشباع	۶۷/۷۰	wt. %
۳	آروماتیک‌ها	۳۰/۲۰	wt. %
۴	رزین‌ها	۰/۷۲	wt. %
۵	آسفالتینها	۱/۳۸	wt. %
۶	سولفور	۱/۶۰	wt. %
۷	آب	۰/۱-۰/۲	v/v %
۸	نمک	۰/۷۹۲	g/lit
۹	ذرات جامد	< ۰/۰۱	v/v %
۱۰	گرانروی در ۱۵ °C	۵/۶۳	mPa.s

۲-۲- آزمایشات تجربی

۲-۲-۱- پوشش‌دهی ذرات مغناطیسی با اسید اولئیک

به منظور ارزیابی اثرات ترشوندگی بر حذف نفت از آب، ذرات مغناطیسی با اسید اولئیک پوشش داده شدند [۳۴؛ ۳۵]. این فرآیند با استفاده از روش زیر انجام گرفت. ۵۰ گرم اسید اولئیک به تدریج به ۵۰۰ میلی لیتر آب در دمای ۸۰ °C که با افزودن محلول آبی هیدروکسید آمونیوم (۲۵٪) اسیدیته آن به ۸ تنظیم شده بود، اضافه گردید. هنگامی که اسید اولئیک به طور یکنواخت در آب پراکنده شد، ۱۲/۵ تا ۲۵ گرم از ذرات مغناطیسی به تدریج به مخلوط تحت هم‌زدن مداوم در طول ۱ ساعت اضافه شده و پس از سرد شدن مخلوط ذرات مغناطیسی پوشش داده شده با استفاده از آهنربای دائمی جمع‌آوری شدند. ذرات به طور مکرر با اتانول و آب شستشو شد تا اسید اولئیک اضافی حذف شود. سپس در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد در مدت ۲۴ ساعت خشک شدند.

شکل (۱) تصویر ذرات مغناطیسی ثبت شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و شکل (۲) تصاویر اندازه‌گیری زاویه تماس ذرات مغناطیسی بدون پوشش و ذرات پوشش یافته با اسید اولئیک توسط روش قطره چسبیده را نشان می‌دهند [۲]. لازم به ذکر است که به دلیل سطح زیر دیسک ذرات مغناطیسی آماده شده، میزان زاویه تماس در این روش بیشتر از زاویه تماس واقعی برآورد می‌شود [۱].



شکل ۱. تصویر ذرات مغناطیسی ضبط شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی [۲]



شکل ۲. اندازه‌گیری زاویه تماس [۱]، الف: ذرات پوشش یافته با اسید اولئیک، ب: ذرات مغناطیسی بدون پوشش

تهیه امولسیون

یک امولسیون مادر نفت در آب (o/w) با اختلاط ۰/۶ میلی لیتر نفت خام در ۱۵۰ میلی لیتر آب با استفاده از دستگاه اولتراسونیک (Qsonica، مدل Q700) با دامنه ۷۰ به مدت ۱۰ دقیقه تهیه شد. سپس ۶۰۰ میلی لیتر از امولسیون مادر با اب مقطر تا ۱۰۰۰ میلی لیتر رقیق گردید. امولسیون تولید شده دارای پایداری خوبی بود و تا یک هفته شکست امولسیون قابل توجهی نداشت. ۱۰ میلی لیتر از این امولسیون با ۱۰ میلی لیتر آب دیونیزه که شوری و اسیدیته آن با افزودن NaCl و محلول‌های HCL/NH₄OH تنظیم شده بود، مخلوط گردید.

۲-۲-۲ روش شکست امولسیون

مقادیر مشخصی از ذرات مغناطیسی (۰/۲ - ۱/۲ گرم) به ویال ۵۰ میلی لیتری حاوی امولسیون تهیه شده اضافه گردید و با یک همزن مکانیکی (Mtops، مدل MS-280D) با سرعت ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ دور در دقیقه در دمای ۲۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، به مدت ۳۰ تا ۱۸۰ ثانیه به هم زده شد. قطرات پراکنده هنگام برخورد با یکدیگر در طول عمل اختلاط، لخته‌های مغناطیسی را جذب کردند. پس از توقف اختلاط، خوشه‌ها/لخته‌ها در عرض چند دقیقه ته‌نشین شده و از فاز پیوسته جدا شدند. با این حال، در این زمان ممکن است لایه شفاف حاوی مقداری ذرات مغناطیسی معلق باشد. بنابراین جهت بررسی آن، ۳ میلی لیتر از فاز صاف شده بلافاصله از ظرف نمونه برداشته تا کدورت لایه سرم به دلیل لخته‌های معلق و قطرات نفت باقی مانده در نظر گرفته شود. مقادیر این اندازه‌گیری‌ها به عنوان جذب کلی (A₀) نام‌گذاری شدند. به دلیل ته‌نشینی لخته‌ها/خوشه‌های ذرات

مغناطیسی معلق این جذب با گذشت زمان کاهش می‌یابد. البته این زمان آنچنان زیاد نیست تا قطرات نفت در فاز پیوسته تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. برای اندازه‌گیری کارایی جداسازی، ۳ میلی‌لیتر دیگر از لایه سرم نیز حدود ۱ ساعت پس از ته‌نشینی برداشته شد. با انجام چندین آزمایش روشن شد که یک ساعت مدت زمانی کافی است تا اطمینان حاصل شود، ذرات مغناطیسی دیگر به‌طور جدی در اعداد جذب ثبت شده تأثیری نخواهند داشت. بعبارت دیگر این عدد جذب اندازه‌گیری شده تنها شامل جذب ناشی از قطرات باقی مانده نفت در آب است. این اندازه‌گیری‌ها به عنوان جذب نهایی (A_{II}) نام‌گذاری شدند. شاخص جذب (A_I) به عنوان تفاوت بین A_0 (که با گذشت زمان کاهش می‌یابد) و A_{II} (جذبی که با زمان تغییر نمی‌کند) تعریف شد که شاخصی برای کدورت لایه سرم ناشی از وجود ذرات مغناطیسی معلق می‌باشد. دوره استراحت (R_p) به عنوان مدت زمانی تعریف شد که در آن A_I به صفر می‌رسد. به عبارت دیگر، R_p مدت زمانی است که طی آن آخرین ذره مغناطیسی ته‌نشین می‌شود. کارایی حذف نفت از مقدار نفت باقی مانده با معادله (۱) محاسبه گردید:

$$(1) \quad (C_i - C_e) / C_i \times 100 = \text{حذف نفت } (\%)$$

جدول ۲. عوامل مورد بررسی و دامنه عددی آنها

واحد	سطح			شناسه عامل	فاکتورها
	۱	۰	-۱		
sec	۱۸۰	۱۰۵	۳۰	A	زمان اختلاط
min	۲	۱	۰	B	نسبت وزنی اولئیک اسید به ذرات مغناطیسی (OAW^1/MW^2)
-	۱/۲	۰/۷	۰/۲	C	وزن ذرات مغناطیسی/وزن روغن پراکنده (MW/DOW^3)
-	۱۰	۷	۴	D	اسیدیته
rpm	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰	E	سرعت اختلاط
mg/lit	۶۰۰۰	۳۰۰۰	۰	F	محتوای نمک

که در آن C_i و C_e به ترتیب غلظت‌های اولیه و باقی مانده نفت در امولسیون‌ها هستند. غلظت‌های نفت باقی مانده با اندازه‌گیری جذب هر نمونه و مقایسه با منحنی استاندارد حاصل از مجموعه‌ای از امولسیون‌ها با غلظت‌های مختلف نفت محاسبه می‌شوند.

۳-۲- طراحی آزمایش

تأثیرات عوامل اصلی و برهمکنش‌های دو تایی آنها در امولسیون زدایی هم‌ر سوبی از امولسیون نفت خام در آب از طریق "طراحی عاملی دو سطحی کاهش یافته"^۴ برای هفت عامل مورد بررسی قرار گرفت. بدین ترتیب

^۱ Oleic-Acid Weight

^۲ Magnetite Weight

^۳ Dispersed oil weight

^۴ two level fractional factorial design

این طراحی که به عنوان وضوح چهار^۱ شناخته می‌شود، در دو سطح اعمال شد. تمام آزمایش‌ها به صورت تکراری و به صورت تصادفی انجام شدند. تأثیرات اصلی و برهم‌کنش‌های دو عاملی از یکدیگر تفکیک شدند؛ در حالی که برهم‌کنش‌های دو عاملی ممکن است با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند. اگر برهم‌کنش‌های دو عاملی نقش حاشیه‌ای در مدل پیشنهادی داشته باشند، پیش‌بینی مقادیر پاسخ مناسب خواهد بود [۳۶]. عوامل آزمایشی و محدوده آن‌ها بر اساس نتایج پژوهش انجام شده توسط قنبری و اسماعیل‌زاده انتخاب شدند [۳۰]. جدول (۲) عوامل و محدوده آن‌ها را نشان می‌دهد.

۳- نتایج و بحث

اثرات هفت عامل مستقل شامل: زمان اختلاط، دما، اسیدیته، محتوای نمک، ترشوندگی (OAW/MW)، سرعت اختلاط و وزن ذرات مغناطیسی با استفاده از طراحی عامل دو سطحی کاهش یافته برای ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر کارایی امولسیون زدایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مربوط به حذف نفت و مقادیر پیش‌بینی شده آن‌ها بر اساس آزمایش‌های طراحی شده در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۳. ماتریس ترکیب فاکتورها و آزمایش‌های انجام شده. حذف نفت با استفاده از نتایج جذب و معادله (۱) محاسبه شده است.

عوامل	پاسخ				
	مقادیر حذف نفت پیش‌بینی شده (۱)	مقادیر حذف نفت تجربی (۲)	مقادیر جذب پیش‌بینی شده (A ₁) تجربی	مقادیر جذب آزمایشگاهی	شماره آزمایش
A					
B					
C					
D					
E					
F					
۱	۷۲	۷۵	۰/۱۵۳	۰/۱۹۲	۱/۴۷۴
۲	۷۲	۶۶	۰/۱۵۳	۰/۰۸۸	۲/۰۰۰
۳	۸۵	۸۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۷۶۵
۴	۵۷	۶۴	۰/۰۷۱	۰/۰۷۶	۲/۱۵۶
۵	۹۹	۱۰۰	۰/۰۰۱	۰	۰/۰۰۵
۶	۹۵	۹۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۵	۰/۳۶۷
۷	۸۰	۸۴	۰/۱۰۵	۰/۰۹۰	۰/۹۶۲
۸	۶۷	۶۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۹۴۴
۹	۶۷	۶۷	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۹۴۰
۱۰	۸۱	۸۳	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۹۸۱

جدول ۳. ماتریس ترکیب فاکتورها و آزمایش های انجام شده. حذف نفت با استفاده از نتایج جذب و معادله (۱) محاسبه شده است.

مقادیر حذف نفت پیش بینی شده (۱)	مقادیر حذف نفت تجربی (/)	شاخص جذب (A) پیش بینی شده	شاخص جذب (A) تجربی	جذب آزمایشگاهی	عوامل						شماره آزمایش
					F	E	D	C	B	A	
۹۹	۱۰۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۶	-۱	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱۱
۹۷	۱۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۷	۰/۰۱۵	۱	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱۲
۸۴	۸۸	۰/۰۰۸	۰/۰۱۲	۰/۷۱۴	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱۳
۶۳	۶۵	۰/۰۱۲	۰/۱۰۴	۲/۰۷۶	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۱۴
۹۵	۹۲	۰/۰۱۱	۰/۰۳۵	۰/۴۴۵	۱	-۱	۱	۱	-۱	-۱	۱۵
۸۲	۸۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۳	۰/۹۹۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱۶
۸۳	۷۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲۶	۱/۲۹۳	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۱۷
۸۲	۸۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۷	۱/۰۲۴	-۱	۱	-۱	۱	۱	-۱	۱۸
۸۴	۸۷	۰/۰۰۸	۰/۰۱۳	۰/۷۴۲	-۱	۱	۱	۱	-۱	۱	۱۹
۸۱	۸۶	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۰/۸۰۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰
۱۰۰	۱۰۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۴	۰/۰۱۸	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۲۱
۵۷	۶۰	۰/۰۷۱	۰/۱۰۰	۲/۳۵۶	۱	۱	۱	-۱	۱	-۱	۲۲
۸۶	۹۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۴۸۰	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۲۳
۶۱	۵۷	۰/۰۴۷	۰/۰۸۴	۲/۵۳۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲۴
۸۵	۸۵	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۹۰۲	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۱	۲۵
۸۰	۷۴	۰/۰۱۵	۰/۰۸۶	۱/۵۶۶	-۱	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۲۶
۸۳	۸۲	۰/۰۰۱	۰/۰۰۴	۱/۰۶۴	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۲۷
۸۳	۸۱	۰/۰۲۷	۰/۰۵۷	۱/۱۱۹	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	-۱	۲۸
۸۶	۷۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۱/۲۲۹	۱	-۱	۱	-۱	-۱	۱	۲۹
۶۳	۶۳	۰/۰۱۲	۰/۱۰۰	۲/۱۹۸	-۱	-۱	۱	-۱	۱	۱	۳۰
۱۰۰	۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۱۶	۰/۰۵۳	۱	۱	-۱	-۱	-۱	۱	۳۱
۸۳	۸۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۱/۰۰۶	۱	-۱	-۱	۱	۱	۱	۳۲
۸۱	۸۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۹	۰/۸۹۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۳

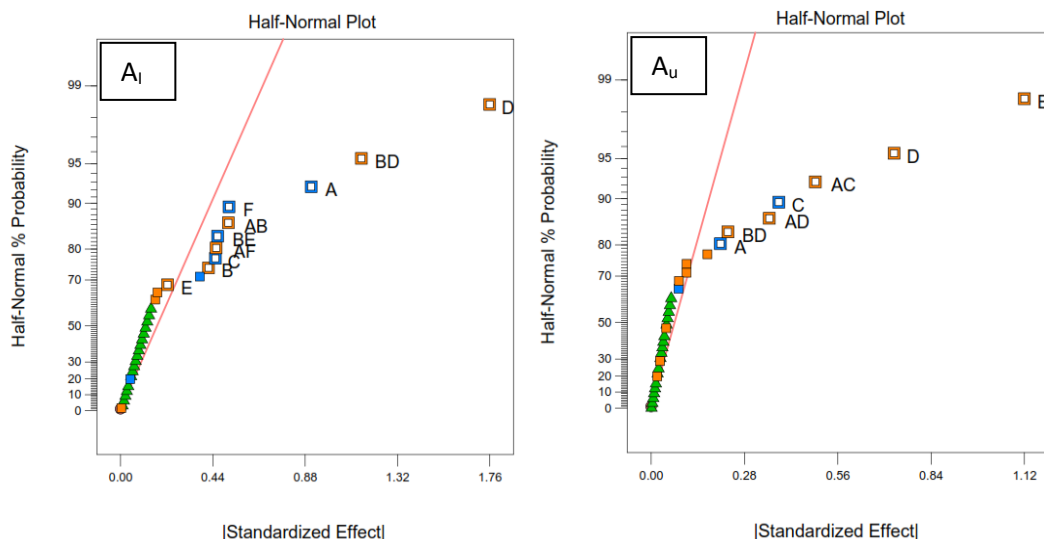
جدول ۳. ماتریس ترکیب فاکتورها و آزمایش های انجام شده. حذف نفت با استفاده از نتایج جذب و معادله (۱) محاسبه شده است.

عوامل							پاسخ			
مقادیر حذف نفت پیش بینی شده (٪)	مقادیر حذف نفت تجربی (٪)	شاخص جذب (A) پیش بینی شده	شاخص جذب (A) تجربی	جذب آزمایشگاهی	F	E	D	C	B	A
شماره آزمایشی										
۹۷	۱۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۱	۱	-۱	۱	-۱	۳۴
۶۱	۵۷	۰/۰۴۷	۰/۰۲۴	۲/۵۳۰	۱	۱	۱	۱	۱	۳۵

۳-۱- نمودار احتمال نیم-نرمال اثرات استاندارد

اهمیت تأثیر عوامل بر حذف نفت و شاخص جذب از طریق نمودارهای احتمال نیم-نرمال در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به این شکل، اثرات بی اهمیت بر حذف نفت در امتداد یک خط نزدیک به صفر قرار دارند، در حالی که بزرگترین اثر، یعنی B، از خط فاصله زیادی دارد و در سمت راست قرار گرفته است. بنابراین، ترتیب اهمیت عوامل بر حذف نفت به این صورت است:

$\text{زمان اختلاط} \times \text{اسیدیته} > \text{MW/DOW} > \text{زمان اختلاط} \times \text{MW/DOW} > \text{اسیدیته} > \text{OAW/MW}$
 $\text{زمان اختلاط} > \text{اسیدیته} \times \text{OAW/MW}$



شکل ۳. نمودار احتمال نیم- نرمال برای A_I و A_u

این در حالی است که اثرات شوری و سرعت اختلاط بر حذف نفت معنادار نبودند. از طرف دیگر، ترتیب اهمیت عوامل بر A_I به ترتیب زیر است:

$OAW/MW > \text{زمان اختلاط} > \text{شوری} > \text{زمان اختلاط} > \text{اسیدپتِه} > \text{اسیدپتِه} > OAW/MW$
 $OAW/MW > \text{زمان اختلاط} > \text{شوری} > \text{سرعت اختلاط} > OAW/MW$

۳-۲- تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA)

تجزیه و تحلیل واریانس (ANOVA) با استفاده از نرم افزار Design-Expert نسخه ۷،۱،۵ برای یافتن عوامل آماری معنادار ($P < 0.05$) انجام شد. جداول (۴) و (۵) تجزیه و تحلیل ANOVA برای فقدان تناسب، معناداری مدل رگرسیون و معناداری انحناء را نشان می دهد.

جدول ۴. نتایج ANOVA برای مدل فاکتوریل جزئی (تابع پاسخ جذب نهایی سرم (A_u))

تحلیل واریانس						
Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	Prob > F	اهمیت
Model	۱۹/۲۳۲	۷	۲/۷۴۷	۵۸/۴۳۹	<۰/۰۰۰۱	مهم
Curvature	۰/۱۴۹	۱	۰/۱۴۹	۳/۱۷۲	۰/۰۸۶۶	بی اهمیت
Residual	۱/۲۲۲	۲۶	۰/۰۴۷			
Lack of fit	۰/۵۴۷	۸	۰/۰۶۸	۱/۸۲۰	۰/۱۳۸۸	بی اهمیت
Pure error	۰/۶۷۶	۱۸	۰/۰۳۸			

Cor. total	۲۰/۶۰۳	۳۴	R-squared	
	Adeq Precision	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared
Values	۲۳/۲۲۱	۰/۹۴۰۲	۰/۹۲۴۲	۰/۸۹۳۴

جدول ۵. نتایج انووا برای مدل فاکتوریل جزئی (تابع پاسخ (A_I))

Analysis of variance						
source	Sum of squares	df	Mean square	F value	Prob > F	Significance
Model	۵۳/۱۹	۱۰	۵/۳۲	۲۰/۵۸	<۰/۰۰۰۱	مهم
Curvature	۱/۰۰	۱	۱/۰۰	۳/۸۸	۰/۰۶۱۲	بی‌اهمیت
Residual	۵/۹۴	۲۳	۰/۲۶			
Lack of fit	۱/۶۴	۵	۰/۳۲۷	۱/۳۷	۰/۲۸۳۰	بی‌اهمیت
Pure error	۴/۳۱	۱۸	۰/۲۴			
Cor. total	۶۰/۱۳	۳۴				
R-squared						
	Adeq Precision	R-Squared	Adj R-Squared	Pred R-Squared		
Values	۱۳/۴۸۶	۰/۸۹۹۵	۰/۸۵۵۸	۰/۷۶۶۷		

۳-۳- جذب نهایی سرم (A_{II})

ضریب تعیین محاسبه شده (R-squared) برابر با ۰/۹۴، که به عدد ۱ نزدیک است، نشان می‌دهد که مدل می‌تواند ۹۴٪ از تغییرپذیری پاسخ را پیش‌بینی کند. ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adj R-Squared) برابر با ۰/۹۲۴ با ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده (Pred R-Squared) برابر با ۰/۸۹۳ مطابقت خوبی قرار دارد. همچنین Adeq Precision برابر با ۲۳/۲۲، که به مراتب بالاتر از ۴ است، نشان‌دهنده یک سیگنال کافی برای مقایسه با نویز است. بنابراین، مدل پیشنهادی می‌تواند برای هدایت پاسخ در فضای طراحی استفاده شود. P-value بالاتر از ۰/۰۵ نشان‌دهنده یک منبع غیرمعنادار است. بنابراین، انحنای نسبت به نویز در فضای طراحی معنادار نیست. علاوه بر این، عدم تناسب نسبت به خطای خالص معنادار نبود. معادله رگرسیون برای A_{II} به صورت معادله (۲) می‌باشد:

$$A_{II} = +1.12 - 0.10 A + 0.56 B - 0.19 C + 0.37 D + 0.25 AC + 0.18 AD + 0.12 BD \quad (2)$$

۳-۴- شاخص جذب (A_I)

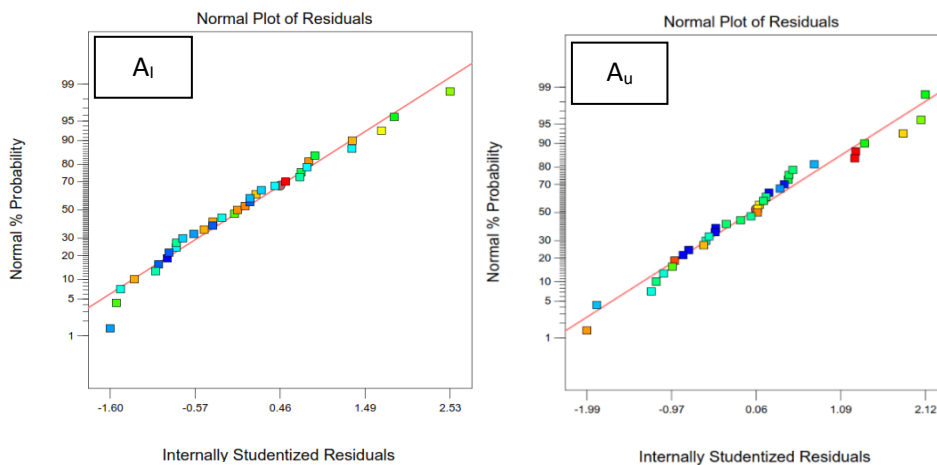
R-squared محاسبه‌شده ۰/۸۹۹ به‌طور قابل‌قبولی نزدیک به ۱ است که نشان می‌دهد ۹۰٪ از تغییرات پاسخ را می‌توان با مدل پیش‌بینی کرد. ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adj R-Squared) برابر با ۰/۸۶۵ با ضریب تعیین پیش‌بینی‌شده (Pred R-Squared) برابر با ۰/۷۶۷ با هم تطابق خوبی داشتند. Adeq Precision برابر با

۱۳/۴۹ نیز نشان دهنده یک سیگنال مناسب در مقایسه با نویز است. بنابراین، مدل پیشنهادی می تواند برای هدایت پاسخ استفاده شود. P-value بالاتر از ۰/۰۵ نشان دهنده یک منبع غیر قابل توجه است. بنابراین در اینجا نیز انحراف نسبت به نویز قابل توجه نیست. معادله رگرسیون برای A_I در قالب عوامل کدگذاری شده به صورت معادله (۳) می باشد:

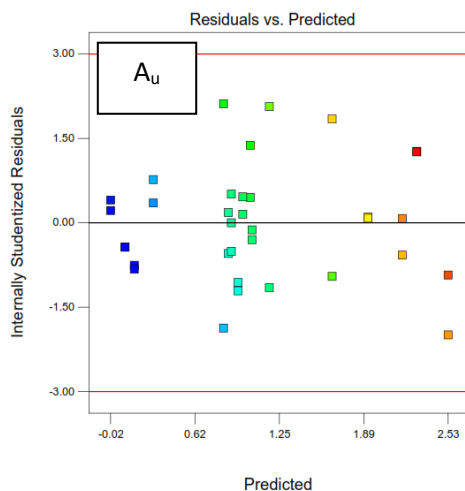
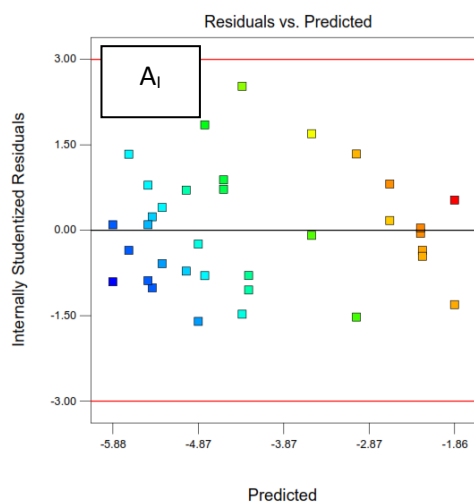
$$\ln(A_I) = -4.11 - 0.46 A + 0.21 B - 0.23 C + 0.88 D + 0.11 E - 0.26 F + 0.26 AB + 0.23 AF + 0.58 BD - 0.23 B \quad (3)$$

نمودارهای احتمال نرمال باقیمانده ها برای A_I و A_{II} در شکل (۴) نشان داده شده است. نقاط نمودارها به طور قابل قبولی یک خط را تشکیل می دهند که نشان دهنده توزیع نرمال خطاها است. علاوه بر این، نمودار باقیمانده بر حسب متغیر پاسخ خروجی که در شکل (۵)، یک الگوی بدون ساختار از نقاط توزیع شده در بالا و پایین محور X را بدون توجه به مقادیر کم تا زیاد پاسخ ها نشان می دهد و در نتیجه فرض واریانس ثابت برآورده شده است. بنابراین در مجموع، می توان اطمینان یافت که مدل پیشنهادی بدون هیچ انتظار تناقضی در پیش بینی های آتی، مناسب است.

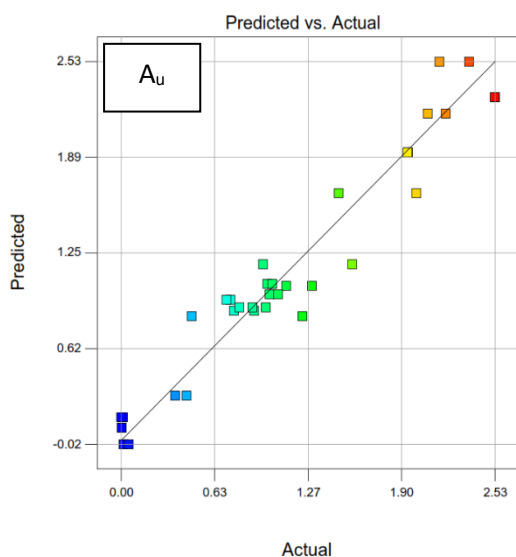
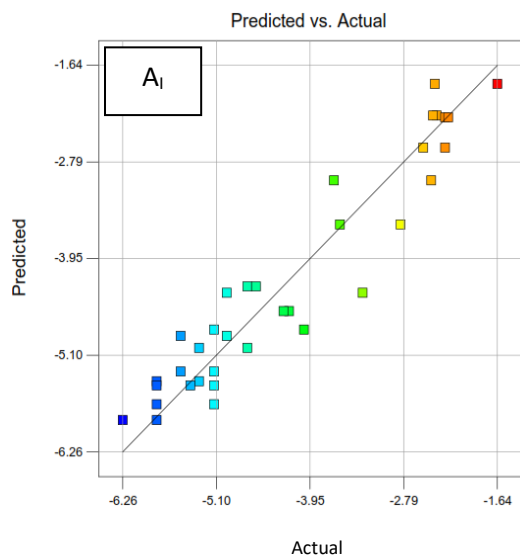
شکل (۶) نیز مقادیر خروجی پیش بینی شده را در مقابل مقادیر واقعی آنها نشان می دهند. از نمودارها مشخص است که مدل توسعه یافته می تواند به طور مناسب دامنه خروجی را توضیح دهد.



شکل ۴. نمودار احتمال نرمال باقی مانده برای A_I و A_{II}



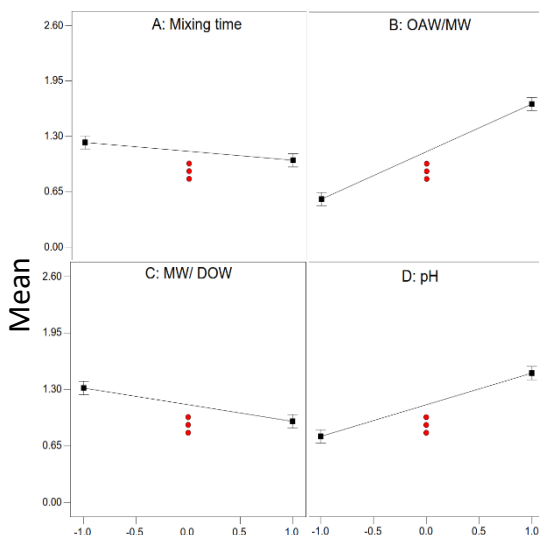
شکل ۵. نمودارهای باقیمانده در مقابل متغیرهای خروجی برای A_I و A_U



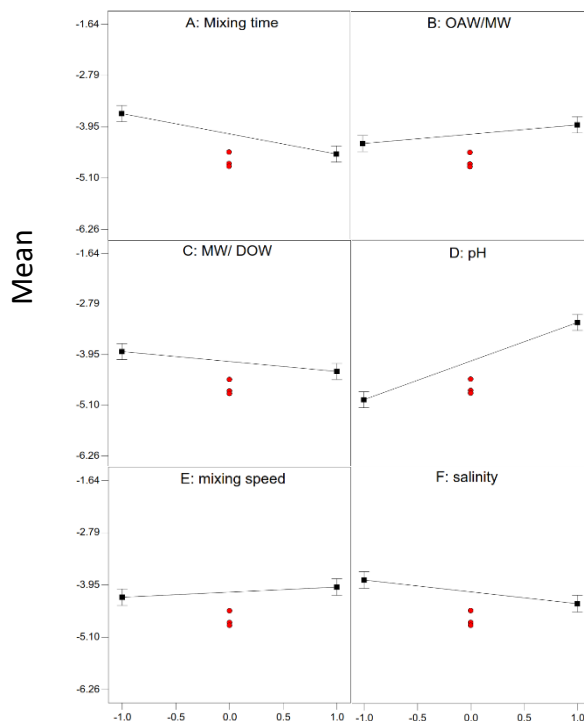
شکل ۶. مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای A_I و A_U

۵-۳- اثرات اصلی و میانگین

شکل‌های (۷) و (۸) مقادیر میانگین پاسخ‌ها را در سطوح مختلف عوامل نشان می‌دهند. شیب منحنی‌ها به‌عنوان مقیاسی برای اندازه نسبی اثرات عوامل قابل تفسیر است. واضح است که عامل B (OAW/MW) تأثیر قابل توجهی بر جذب لایه سرم (یا حذف نفت) داشته است. با این حال، عوامل E (سرعت اختلاط) و F (شوری) هیچ تأثیری بر جداسازی نفت نداشتند. افزودن نقاط مرکزی به طراحی، اهمیت انحنا را نشان داد. به دلیل مشارکت حاشیه‌ای اثرات تعاملی دو عاملی در مدل طراحی شده، مدل‌های خطی توسعه‌یافته می‌توانند برای بررسی رابطه بین پاسخ خروجی A_{II} و متغیرهای مستقل در فضای طراحی استفاده شوند. تمام شش عامل بر شاخص جذب AI تأثیر داشتند. عوامل D (اسیدیته) و E (سرعت اختلاط) به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر جذب لایه سرم ناشی از ذرات معلق اکسید آهن داشتند. از آنجا که C (MW/DOW) در یک تعامل با متغیر دیگر وارد نمی‌شود، شکل مربوط به آن قابل تفسیر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کدورت لایه سرم به دلیل ذرات معلق (یعنی AI) با افزایش MW/DOW کاهش می‌یابد.



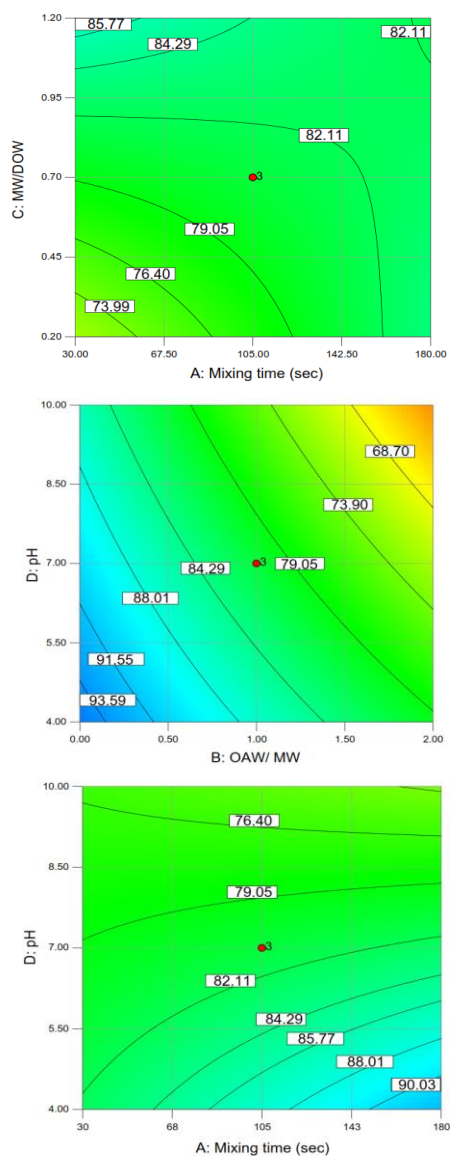
شکل ۷. مقادیر میانگین پاسخ در سطوح مختلف عوامل برای A_{II}



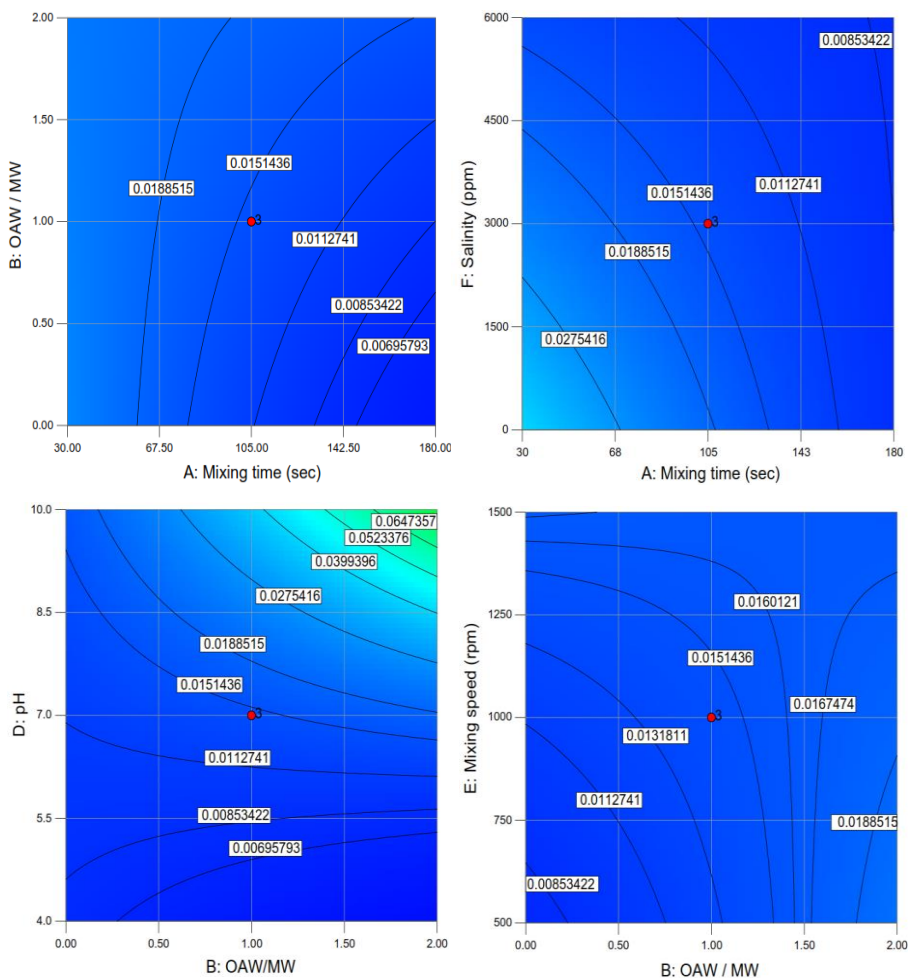
شکل ۸. مقادیر میانگین پاسخ در سطوح مختلف عوامل برای A_1

۳-۶- اثرات تعاملی

شکل‌های (۹) و (۱۰) اثرات تعاملی بر حذف نفت و شاخص جذب (A_1) را نشان می‌دهند. از نمودار AC مشخص است که بالاترین میزان حذف نفت با کاهش زمان اختلاط و افزایش میزان ذرات مغناطیسی به دست می‌آید. با این حال، برای دستیابی به حذف نفت کمتر یا برابر با ۸۲٪، مصرف امولسیون زدا را می‌توان با افزایش زمان اختلاط کاهش داد. همچنین اسیدیته تأثیر زیادی بر حذف نفت دارد و شرایط اسیدی همراه با استفاده از ذرات مغناطیسی خالص می‌تواند منجر به حذف کامل نفت شود؛ زیرا همان‌طور که در نمودار BD شکل (۹) و در نمودار AD نیز مشخص است اختلاط در شرایط اسیدی مؤثرتر صورت می‌گیرد. تحقیقات لیانگ و همکاران (۲۰۱۴) نشان داد که زاویه تماس ذرات مغناطیسی پوشیده شده با اسید اولئیک در شرایط اسیدی افزایش می‌یابد و ذرات مغناطیسی بیشتر به سمت جذب نفت می‌روند [۳۴].



شکل ۹. اثرات تعاملی بر حذف روغن از آب



شکل ۱۰. اثرات تعاملی بر A_1

از سوی دیگر، با افزایش اسیدیته، جاذبه الکترواستاتیکی بین قطرات و کلوخه‌های اکسید آهن افزایش می‌یابد، همان‌طور که در نمودار پتانسیل زتا قابل مشاهده است. در شرایط قلیایی، پتانسیل زتا نشان‌دهنده دفع قوی بین توده‌ها و قطرات است. بنابراین، افزایش مدت زمان مخلوط‌سازی باعث افزایش تعداد برخوردها بین توده‌ها و قطرات می‌شود که به افزایش تعداد خوشه‌های غیر مرطوب و بهبود حذف نفت منجر می‌گردد. با این حال، افزایش بیش از حد زمان مخلوط‌سازی، ممکن است منجر به جدا شدن ذرات چسبیده به قطرات شود و کارایی جدا سازی را کاهش دهد. از این رو، حذف نفت با افزایش تمایل ذرات مغناطیسی به قطرات پراکنده شده بهبود می‌یابد.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، A_1 معیاری برای کدورت لایه سرم به دلیل توده‌ها و خوشه‌های معلق است. باقی ماندن توده‌ها یا خوشه‌ها در فاز تصفیه‌شده مطلوب نیست، زیرا نیاز به یک فرآیند ثانویه برای حذف آن‌ها خواهد

بود. افزایش A (زمان اختلاط) توام با کاهش مقدار B (OAW/MW) منجر به کاهش A_1 می شود (شکل (۱۰)). این رویداد در حالت اسیدی وارونه است. در مقادیر متوسط و پایین B افزایش سرعت اختلاط اثر نامطلوبی بر A_1 خواهد گذاشت. در حالیکه افزایش توامان A (زمان اختلاط) و F (شوری) باعث کاهش A_1 می گردد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش یک روش مؤثر برای جدا نمودن نفت از یک امولسیون پایدار نفت در آب ارایه شده است. این روش مبتنی بر افزایش وزن قطرات پراکنده با استفاده از ذرات مغناطیسی میکرونی است و لزوماً نیازی به اعمال میدان مغناطیسی و افزودن ماده فعال سطحی ندارد. از طرف دیگر خاصیت مغناطیسی ذرات، فرستی را برای بازیافت آنها فراهم می کند. اثرات هفت عامل شامل زمان اختلاط، دما، اسیدیته، محتوای نمک، ترشوندگی (OAW/OA)، سرعت اختلاط و وزن ذرات مغناطیسی با استفاده از طراحی فاکتوریل جزئی تو سط نرم افزار طراحی آزمایش نسخه ۷،۱،۵ بر راندمان حذف نفت خام از آب و شاخص جذب A_1 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تمام اثرات اصلی مهم بوده و ترتیب عوامل مهم تر برای حذف نفت به صورت زیر است.

$OAW/MW > pH > MW/DOW \times \text{زمان اختلاط} > MW/DOW > pH \times \text{زمان اختلاط} > OAW/MW \times pH > \text{زمان اختلاط}$

از سوی دیگر، این ترتیب برای شاخص جذب A_1 عبارت است از:

$pH > OAW/MW \times pH > \text{زمان اختلاط} > شوری > OAW/MW > OAW/MW \times \text{زمان اختلاط} > MW/DOW > OAW/MW \times \text{زمان اختلاط} > شوری > \text{سرعت اختلاط} \times$

همچنین نتایج نشان داد بالاترین میزان حذف نفت با کاهش زمان اختلاط و افزایش میزان ذرات مغناطیسی به دست می آید. با این حال، برای دستیابی به حذف نفت کمتر یا برابر با ۸۲٪، مصرف امولسیون زدا با افزایش زمان اختلاط کاهش می یابد. همچنین اسیدیته تأثیر زیادی بر حذف نفت دارد و شرایط اسیدی همراه با استفاده از ذرات مغناطیسی بدون پوشش می تواند منجر به حذف کامل نفت شود.

۵- تشکر و قدردانی

از آقای دکتر فریدون اسماعیل زاده بابت حمایت و راهنمایی این پژوهش قدردانی می شود. به علاوه نویسندگان این مقاله از دانشگاه شیراز به دلیل نقش برجسته شان در به ثمر رسیدن این پژوهش قدردانی می کنند.

۶- فهرست منابع

- [1] Coca-Prados, J., & Gutiérrez-Cervelló, G. (2011). *Water purification and management*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9775-0>.
- [2] Ali, N., Zhang, B., Zhang, H., Li, W., Zaman, W., Tian, L., & Zhang, Q. (2015). *Novel Janus magnetic micro particle synthesis and its applications as a demulsifier for*

^۱ Oleic-Acid Weight

- breaking heavy crude oil and water emulsion*. Fuel, 141, 258-267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.026>.
- [3] Yu, L., Han, M., & He, F. (2017). *A review of treating oily wastewater*. Arabian journal of chemistry, 10, S1913-S1922. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.07.020>.
- [4] Jamaly, S., Giwa, A., & Hasan, S. W. (2015). *Recent improvements in oily wastewater treatment: Progress, challenges, and future opportunities*. Journal of environmental sciences, 37, 15-30. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.04.011>.
- [5] Xu, H., Jia, W., Ren, S., & Wang, J. (2018). *Novel and recyclable demulsifier of expanded perlite grafted by magnetic nanoparticles for oil separation from emulsified oil wastewaters*. Chemical Engineering Journal, 337, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.084>.
- [6] Fortuny, M., Oliveira, C. B., Melo, R. L., Nele, M., Coutinho, R. C., & Santos, A. F. (2007). *Effect of salinity, temperature, water content, and pH on the microwave demulsification of crude oil emulsions*. Energy & fuels, 21(3), 1358-1364. <https://doi.org/10.1021/ef0603885>.
- [7] Davis, B., & Ocelli, M. (2006). *Magnetic separation of nanometer size iron catalyst from Fischer-Tropsch wax*. Fischer-Tropsch Synthesis, Catalysts and Catalysis, Elsevier. <https://doi.org/10.1201/b19455>.
- [8] Lu, A. H., Salabas, E. e. L., & Schüth, F. (2007). *Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application*. Angewandte chemie international edition, 46(8), 1222-1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>.
- [9] Wang, R., Li, J., Zhou, H., Liu, S., Sun, W., & Zhang, C. (2023). *Research advancement on magnetic nanomaterial demulsifier for oil-water separation*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(5), 110245. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110245>.
- [10] Xu, Z., Zhu, Q., & Bian, J. (2021). *Preparation of a recyclable demulsifier for the treatment of emulsified oil wastewater by chitosan modification and sodium oleate grafting Fe3O4*. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4), 105663. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105663>.
- [11] Li, S., Li, N., Yang, S., Liu, F., & Zhou, J. (2013). *The synthesis of a novel magnetic demulsifier and its application for the demulsification of oil-charged industrial wastewaters*. Journal of Materials Chemistry A, 2(1), 94-99. <https://doi.org/10.1039/C3TA12952G>.
- [12] Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., & Masliyah, J. (2012). *Synthesis of interfacially active and magnetically responsive nanoparticles for multiphase separation applications*. Advanced Functional Materials, 22(8), 1732-1740. <https://doi.org/10.1002/adfm.201102156>.
- [13] Lemos, B. R., Teixeira, A. P. C., Ardisson, J. D., Macedo, W. A., Fernandez-Outon, L. E., Amorim, C. C., Moura, F. C., & Lago, R. M. (2012). *Magnetic amphiphilic composites applied for the treatment of biodiesel wastewaters*. Applied Sciences, 2(2), 513-524. <https://doi.org/10.3390/app2020513>.
- [14] Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., & Masliyah, J. (2012). *Novel magnetic demulsifier for water removal from diluted bitumen emulsion*. Energy & fuels, 26(5), 2705-2710. <https://doi.org/10.1021/ef2014259>.
- [15] Duan, M., Xu, Z., Zhang, Y., Fang, S., Song, X., & Xiong, Y. (2017). *Core-shell composite nanoparticles with magnetic and temperature dual stimuli-responsive*

- properties for removing emulsified oil*. Advanced Powder Technology, 28(5), 1291-1297. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.02.017>.
- [16] Farrokhi, F., Jafari Nasr, M. R., Rahimpour, M. R., Arjmand, M., & Vaziri, S. A. (2018). *Application of a novel magnetic nanoparticle as demulsifier for dewatering in crude oil emulsion*. Separation Science and Technology, 53(3), 551-558. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1373676>.
- [17] Ghanbari, M., Jesmani, S. M., & Salehi, K. (2024). *Application of Micron-sized Oleic-acid Covered Magnetite Particles in Co-sedimentation-demulsification of Water in Crude Oil Emulsion: identification of effective parameters*. In Persian. <https://doi.org/10.48301/kssa.2024.422533.2746>.
- [18] Liang, J., Du, N., Song, S., & Hou, W. (2015). *Magnetic demulsification of diluted crude oil-in-water nanoemulsions using oleic acid-coated magnetite nanoparticles*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 466, 197-202. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.11.050>.
- [19] Liu, J., Huang, X.-f., Lu, L.-j., Li, M.-x., Xu, J.-c., & Deng, H.-p. (2011). *Turbiscan Lab® Expert analysis of the biological demulsification of a water-in-oil emulsion by two biodemulsifiers*. Journal of hazardous materials, 190(1-3), 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.028>.
- [20] Lü, T., Zhang, S., Qi, D., Zhang, D., Vance, G. F., & Zhao, H. (2017). *Synthesis of pH-sensitive and recyclable magnetic nanoparticles for efficient separation of emulsified oil from aqueous environments*. Applied Surface Science, 396, 1604-1612. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.223>.
- [21] Lü, T., Zhang, S., Qi, D., Zhang, D., & Zhao, H. (2016). *Thermosensitive poly (N-isopropylacrylamide)-grafted magnetic nanoparticles for efficient treatment of emulsified oily wastewater*. Journal of Alloys and Compounds, 688, 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.262>.
- [22] Xu, Y., Cheng, L., Wang, Y., & Jia, H. (2024). *Facile Synthesis of Novel Magnetic Janus Graphene Oxide for Efficient and Recyclable Demulsification of Crude Oil-in-Water Emulsion*. Molecules, 29(14), 3307. <https://doi.org/10.3390/molecules29143307>.
- [23] Amiri, Z., Halladj, R., Shekariz, M., & Rashidi, A. (2024). *Synthesis and application of recyclable magnetic cellulose nanocrystals for effective demulsification of water in crude oil emulsions*. Environmental Pollution, 342, 123042. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123042>.
- [24] Ma, S., Wang, Y., Wang, X., Li, Q., Tong, S., & Han, X. (2016). *Bifunctional demulsifier of ODTs modified magnetite/reduced graphene oxide nanocomposites for oil-water separation*. ChemistrySelect, 1(15), 4742-4746. <https://doi.org/10.1002/slct.201601167>.
- [25] Elmobarak, W. F., & Almomani, F. (2021). *Application of magnetic nanoparticles for the removal of oil from oil-in-water emulsion: Regeneration/reuse of spent particles*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 203, 108591. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108591>.
- [26] Malhas, R., El Achkar, J. H., Misbah, B., & Al Radhwan, S. (2023). *Optimizing oil removal from oil-water emulsions using novel iron oxide magnetic nanoparticles*. Water, Air, & Soil Pollution, 234(9), 564. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06590-4>.

- [27] Viveros, L. T. L., Rafati, R., & Haddad, A. S. (2024). *Impact of coated and non-coated magnetic nanoparticles on oil-water separation in green surfactant-based emulsions*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 697, 134366. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134366>.
- [28] Oka, T., Itoh, Y., Yanagi, Y., Yoshikawa, M., Ikuta, H., & Mizutani, U. (2000). *Construction of a 2–5 T class superconducting magnetic field generator with use of an Sm123 bulk superconductor and its application to high-magnetic field demanding devices*. Physica C: Superconductivity, 335(1-4), 101-106. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(00\)00152-0](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(00)00152-0).
- [29] Oka, T., Yokoyama, K., Itoh, Y., Ikuta, H., Mizutani, U., Okada, H., Katagiri, K., & Noto, K. (2003). *Construction of a strong magnetic field generator with use of melt-processed bulk superconductors*. IEEE transactions on applied superconductivity, 13(2), 1584-1587. <https://doi.org/10.1109/TASC.2004.830393>.
- [30] Ghanbari, M., & Esmaeilzadeh, F. (2019). *Demulsification by increasing the gravitational force acting upon the dispersed phase owing to the adsorption/absorption of the magnetite particles*. Journal of Dispersion Science and Technology, 40(11), 1581-1590. <https://doi.org/10.1080/01932691.2018.1518144>.
- [31] Bishop, K. J., Wilmer, C. E., Soh, S., & Grzybowski, B. A. (2009). *Nanoscale forces and their uses in self-assembly*. small, 5(14), 1600-1630. <https://doi.org/10.1002/smll.200900358>.
- [32] Bürger, R. (2000). *Phenomenological foundation and mathematical theory of sedimentation–consolidation processes*. Chemical Engineering Journal, 80(1-3), 177-188. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00089-7).
- [33] Coulson, J., Richardson, J., Backhurst, J., & Harker, J. (1991). *Vol. 2: Particle technology and separation processes*. Oxford. http://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Chemical%20Engineering%3A%20Particle%20Technology%20and%20Separation%20Processes&publication_year=1991&author=Coulson%2CJM&author=Richardson%2CJF&author=Backhurst%2CJR&author=Harker%2CJH.
- [34] Liang, J., Li, H., Yan, J., & Hou, W. (2014). *Demulsification of oleic-acid-coated magnetite nanoparticles for cyclohexane-in-water nanoemulsions*. Energy & fuels, 28(9), 6172-6178. <https://doi.org/10.1021/ef501169m>.
- [35] Viali, W. R., Alcantara, G. B., Sartoratto, P. P., Soler, M. A., Mosiniewicz-Szablewska, E., Andrzejewski, B., & Morais, P. C. (2010). *Investigation of the molecular surface coating on the stability of insulating magnetic oils*. The Journal of Physical Chemistry C, 114(1), 179-188. <https://doi.org/10.1021/jp908732b>.
- [36] Roshan, N., Ghader, S., & Rahimpour, M. R. (2018). *Application of the response surface methodology for modeling demulsification of crude oil emulsion using a demulsifier*. Journal of Dispersion Science and Technology, 39(5), 700-710. <https://doi.org/10.1080/01932691.2017.1385480>.