DOI: http://dx.doi.org/ 10.22104/IFT.2023.6250.2140

Innovative Food Technologies, 10(3), 267-279, Spring 2023

Research Article

Experimental investigation of droplet rising behavior of edible olive and canola oils in the presence of a food stabilizer

Fatemeh Takhtaei[1], Habib Abbasi[2,3], Ana Abiri[4], Mojtaba Shafiei[5], Safoora Karimi[6*]

1. Senior Expert, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
2. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
3. Associate Professor, Department of Nutrition Sciences, School of Health, Larestan University of Medical Sciences, Larestan, Iran
4. Senior Researcher, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
5. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran
6. Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

(Received 6 May 2023, Received in revised form 8 September 2023, Accepted 10 September 2023)

Introduction: Today, liquid-droplet interactions are recognized as one of the most challenging topics in multiphase flow. For example, the presence of oil in water in food industry is one case where it has become important to study the behavior of oil droplets in fluid [1]. Olive oil is the main source of fat in the Mediterranean diet. Low erucic acid canola oil is considered the most popular vegetable oil in Scandinavian countries [4]. Olive oil constitutes less than 2% of the total vegetable oil production, and its consumption is increasing in non-producing countries. For the mentioned reasons, the two edible oils are the object of this study. Studies have shown that when a droplet rises in fluid, its rising velocity depends on impurities in the continuous fluid. For example the presence of surfactant prevents the internal circulation of the droplet and causes the surfactant to accumulate on the back surface of the droplet and reduces the drop velocity. The reduction in droplet velocity, known as Marangoni effect, was first introduced by Framkin and Lovich [21]. The presence of excess oil droplets in the industrial wastewater treatment systems of oil factories and industrial food production and the need to remove them to prevent their entry into the environment indicates the importance of studying these systems. Thus, in the present study, we conducted an experimental investigation to compare the behavior of the rising drop at different surfactant concentrations using two edible oils, olive and canola. Terminal velocity, equivalent diameter, and drag coefficient are the parameters evaluated in this study.

Materials and methods: In order to experimentally investigate droplet formation, a system was designed. It consisted of a vertical column filled with a continuous phase containing different concentrations of Tween 80 surfactant. The diameter of injection needle was considered constant, equal to 0.9 *mm*. The experiment was performed at a constant volume flow rate of 0.4 *mm/min*. A Canon SX540 HS model camera installed in front of the column for recording images and behind the column was placed LED lamp. A semi-transparent fabric diffuser was also placed between the lamp and the column to properly diffuse the light. For image processing, recorded videos were first converted into photo collection using Master Video Image software (V.1.2.8). Then, Image J software (v1.52) was used to measure the area and perimeter of the droplet, as well as the center of its surface in all images. Finally, variables such as terminal velocity, equivalent diameter and drag coefficient were calculated and their dependence on operating conditions were evaluated.

* Corresponding author: s.karimi@jsu.ac.ir

DOI: http://dx.doi.org/ 10.22104/IFT.2023.6250.2140

Innovative Food Technologies, 10(3), 267-279, Spring 2023

Results and discussion: First of all, testing and image processing methods were validated by comparing our results in pure water with those of other researchers. The velocity differences was less than 10%, which is acceptable for experimental work.

According to the results, surfactant concentration did not affect the equivalent diameter, so that it will be constant as surfactant concentration increased. Comparing the present result with those of other researchers indicates that regardless of the liquid type, the surfactant concentration does not significantly affect the droplet equivalent diameter. This is related to the increased kinetic stability of the emulsion due to the presence of surfactants, resulting in no change in droplet size. In addition, the droplet type (olive or canola oil) had no noticeable effect on the equivalent diameter. This may be due to the close interfacial tensions of the two mentioned oils.

The more surfactant concentration, the less terminal, although the reduction is not noticeable. Considering that Tween80 has a reported critical micelle concentration (CMC) of 0.001 *mMol* [39], the velocity increases with enhancement of surfactant concentration, since all the concentrations used are above the CMC. The droplet size is constant and only its velocity decreased compared to pure water due to the Marangoni effect.

In the present study, the Reynolds number varies between 200 and 450. Therefore, according to theoretical studies, we are in a transition zone from low Reynolds to high Reynolds. The drag coefficient decreased with increasing Reynolds number at all concentrations. This was expected from previous studies [18, 33].

Conclusion: In the present study, we evaluated the behavior of two edible oils, canola and olive, in a stationary fluid containing Tween 80. The parameters investigated were the equivalent diameter of the droplet, its terminal velocity, drag coefficient and Reynolds number. In general, it can be concluded that the surfactant concentration and the oil type did not determine the droplet size. Also, the more Reynolds, the less drag coefficient. Therefore, increasing the Reynolds number could be a proposed solution if hydrodynamic resistance needs to be reduced in similar systems.

Keywords: Oil drop, surfactant, rising drop, drag coefficient, Tween 80

How to cite this article:

Takhtaei, F., Abbasi, H., Abiri, A., Shafiei, M., & Karimi, S., (2023). Experimental investigation of droplet rising behavior of edible olive and canola oils in the presence of a food stabilizer . *Innov. Food Technol., 10(3)*, 267-279.

DOI: http://dx.doi.org/ 10.22104/IFT.2023.6250.2140

فصلنامه فناوری‌های جدید در صنعت غذا، دوره ۱۰، شماره ۳، صفحه ۲۷۹-۲۶۷، بهار۱۴۰۲

مقاله پژوهشی

بررسی آزمایشگاهی رفتار صعود قطره روغن‌های خوراکی زیتون و کلزا در حضور یک پایدار کننده غذایی

فاطمه تختایی[۱]، حبیب اله عباسی[۲و۳]، آنا عبیری[۴]، مجتبی شفیعی[۵]، صفورا کریمی[۶*]

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
۲. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
۳. دانشیار، گروه علوم تغذیه، دانشکده بهداشت اوز، دانشکده علوم پزشکی لارستان، ایران
۴. محقق ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران
۵. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران،
۶. دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، ایران

(تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶، تاریخ آخرین بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۹)

چکیده

امروزه با افزایش چشم‌گیر کاربرد صنایع غذایی در زندگی روزمره، بررسی رفتار هیدرودینامیک انواع مختلف روغن‌ها در حضور پایدارکننده‌های غذایی اهمیت زیادی پیدا کرده است. در مطالعه حاضر رفتار دو قطره روغن خوراکی زیتون و کلزا درون سیال ساکن حاوی سورفکتانت توین ۸۰ به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شد. به‌منظور تزریق قطره روغنی به درون سیال، از سوزن تزریق با قطر ۰/۹ mm استفاده شد که قطر معادل قطره‌ی آن در حدود ۴ mm بود. در ابتدا با اندازه‌گیری سرعت حرکت حد قطره در سیال خالص آب نتایج و محاسبات اعتبارسنجی شد، سپس اثر غلظت پایدارکننده بر قطر معادل قطره، سرعت حد آن و وابستگی ضریب دراگ بر عدد رینولدز در هر کدام از روغن‌ها به‌طور جداگانه بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور سورفکتانت بر قطر معادل قطره تأثیر چشم‌گیری ندارد و با افزایش غلظت سورفکتانت، قطر معادل در حدود ۴ mm ثابت باقی می‌ماند. همچنین با توجه به اینکه تمام غلظت‌ها بالای غلظت بحرانی مایسلی قرار دارند، در حضور سورفکتانت، میزان سرعت تغییر محسوسی نداشت. علاوه بر آن، نتایج مربوط به وابستگی ضریب دراگ به عدد بی‌بعد رینولدز گزارش شد که نشان داد با افزایش عدد رینولدز، ضریب دراگ به‌طور تدریجی کاهش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که غلظت سورفکتانت و نوع روغن چندان تعیین‌کننده اندازه‌ی قطرات نیستند. همچنین در صورت نیاز به کاهش مقاومت هیدرودینامیکی در دستگاه‌های مشابه افزایش رینولدز به شیوه‌هایی چون افزودن سورفکتانت و یا ایجاد اغتشاش جریانی می‌تواند یک راهکار پیشنهادی باشد.

کلمات کلیدی: قطره روغنی، سورفکتانت، قطره درحال صعود، ضریب دراگ، توین ۸۰

* نویسنده مسئول، s.karimi@jsu.ac.ir

۱. مقدمه

امروزه بحث تعامل قطره با سیال از مباحث چالش‌برانگیز در جریان‌های چندفازی محسوب می‌شود. یکی از مثال‌های عملیاتی این جریان‌های چند فازی حضور روغن در آب در صنایع غذایی است که بررسی رفتار قطره‌های روغنی در سیال ساکن را دارای اهمیت کرده است [۱]. در حال حاضر تمایل فعلی مصرف‌کنندگان به‌تدریج به سمت غذاهای کمتر فراوری‌شده جهت اجتناب از مواد نگهدارنده مصنوعی گرایش پیداکرده است. به همین دلیل روغن‌هایی که از روش پرس سرد تولید می‌شوند، انتخابی جذاب برای آن‌ها می‌باشد؛ زیرا هیچ‌گونه حلال و فراوری دیگری جز فیلتر کردن در روش تولید آن‌ها وجود ندارد[۲]. روغن زیتون و کلزا به روش پرس مکانیکی در دماهای پایین تولید می‌شوند. روغن‌های تولیدشده از این روش با کیفیت بالایی قابل مصرف می‌باشند [۳]. روغن زیتون، منبع اصلی چربی در رژیم غذایی اطراف مدیترانه است. در حالی که روغن کلزا با اسید اروسیک کم، محبوب‌ترین روغن گیاهی در کشورهای اسکاندیناوی محسوب می‌شود. در سرتاسر جهان، کلزا سومین منبع بزرگ روغن نباتی با تقاضای تولید روبه رشد است [۴]. در مقابل روغن زیتون کمتر از ۲٪ از کل تولید روغن نباتی را تشکیل می‌دهد و مصرف آن در کشورهای غیرتولیدکننده نیز رو به افزایش است. به دلایل ذکرشده دو روغن مذکور هدف مطالعه حاضر قرار گرفته است.

سورفکتانت‌ها گاهی به‌صورت تثبیت‌کننده یا امولسیون کننده به سیستم‌های دو فازی اضافه می‌شوند. در حال حاضرتوسعه سورفکتانت‌های سازگار با محیط زیست برای امولسیون‌های روغن درآب، توجه بسیاری را به‌ویژه در فرمولاسیون غذایی و دارویی به خود جلب کرده است [۵-۷]. امولسیون‌های غذایی با توجه به فاز پیوسته و فاز پراکنده به دودسته کلی تقسیم می‌شوند که پراکنده شدن فاز روغن در فاز پیوسته آب را با به‌اختصار روغن در آب (O/W) و پراکندگی فاز آب درون فاز پیوسته روغن را، آب در روغن (W/O) می‌نامند [۸]. در این میان رایج‌ترین آن‌ها O/W هستند. لازم به ذکر است که امولسیون‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند و با گذشت زمان، به روغن سازنده و فاز آب تفکیک می‌شوند؛ بنابراین اصطلاح پایداری امولسیون به توانایی امولسیون به مقاومت در برابر این شکست اشاره دارد. مواد امولسیون‌کننده واسط بین روغن و آب هستند و با انسجام قطرات و افزایش نیروی دافعه بین قطرات می‌توانند کشش سطحی را کاهش داده و از افزایش اختلاط (پیوستگی) بین فاز آب و فاز روغن جلوگیری کنند [۹،۱۰]. به‌طور کلی مولکول‌های سورفکتانت بر روی فصل مشترک دو فاز پراکنده و پیوسته جهت‌گیری مختلفی دارند که بر حرکت قطره، تحرک سطح آن و درنهایت شکل قطره تأثیر می‌گذارند [۱۱]. در مطالعه حاضر به بررسی حرکت قطرات روغن در حضور این سورفکتانت‌ها پرداخته شده است. به عبارتی نویسندگان بر این باور هستند که رفتار قطره به‌نوعی تعیین‌کننده پایداری امولسیون است. به‌عنوان مثال در صورتی که سورفکتانت حرکت رو به بالای روغن را کاهش دهد می‌توان این اطمینان را حاصل کرد که امولسیون پایدارتری خواهیم داشت. از طرفی مطالعات نشان می‌دهد که یکی از عوامل مؤثر بر ضریب دراگ و درنتیجه سرعت صعود قطرات در حال صعود در مایع پیوسته، نوع و غلظت سورفکتانت‌ها است[۱۲-۱۴]. پیش از این نیز رفتار و شکل دو قطره روغن خوراکی (روغن زیتون و روغن کلزا) هنگام صعود درون سیال ساکن آب و عبور از سطح مشترک آب-روغن توسط کریمی و همکاران [۱] مورد بررسی قرار گرفته است. آنها بیان کردند که به دلیل عدم وجود سورفکتانت در فاز پیوسته، نیروی برشی افزایش یافته و شکل قطرات به‌منظور غلبه بر اثرات نیروهای هیدرودینامیکی از حالت کروی خارج می‌شود. همچنین، برای معرفی نیروهای هیدرودینامیکی و کشش سطحی داخلی قطرات از عدد بی بعد رینولدز، وبر و اتوس استفاده کردند.

تاکنون مطالعات زیادی با هدف بررسی رفتار حرکتی قطره‌ها [۱۵،۱۶] و حباب‌هایی با جنس متفاوت [۱۷،۱۸] و نیز قطره‌های نفتی و غیرخوراکی [۱۹،۲۰] درون سیال حاوی سورفکتانت صورت گرفته است. این مطالعات نشان می‌دهد که برای یک قطره کروی در حال حرکت درون سیال، سرعت بالا رفتن قطره به عوامل زیادی ازجمله قدرت چرخش، ساختار دنباله‌ی پشت قطره و خلوص جریان بستگی دارد. ایجاد ناخالصی درون سیال پیوسته مانند حضور سورفکتانت در سطح قطرات مانع از گردش داخلی قطره شده و باعث می‌شود سورفکتانت بر سطح پشتی قطره تجمع پیدا کند و سرعت بالا رفتن قطره را کاهش دهد. این کاهش سرعت حرکت قطره درون سیال به دلیل حضور سورفکتانت که به اثر مارانگونی معروف است، اولین بار توسط فرامکین و لوویچ

[۲۱] ارائه شده است؛ بنابراین می‌توان گفت نیروی مقاومتی در برابر حرکت که به نیروی دراگ شناخته می‌شود علاوه بر سرعت و شکل قطره به غلظت ناخالصی‌ها نیز وابسته است چراکه وجود آن‌ها بر گردش داخلی قطره تأثیر می‌گذارد. طبق بررسی‌های صورت گرفته مشخص‌شده که اکثر تحقیقات بر روی حباب و قطره‌های غیرخوراکی بوده است. از طرفی حضور قطره‌های روغنی در عملیات‌هایی چون سیستم‌های تصفیه پساب‌های صنعتی خروجی کارخانجات روغن و تولید مواد غذایی صنعتی غیرقابل انکار است. حضور قطرات روغن مازاد در این سیستم‌ها و نیاز به حذف آنها به‌منظور جلوگیری از ورود آنها به محیط زیست یکی از مواردی است که اهمیت مطالعه و مقایسه روغن‌ها در این سیستم‌ها را نشان می‌دهد. به همین منظور در مطالعه‌ی حاضر به مطالعه‌ی تجربی و مقایسه رفتار قطره‌ی روغن صعودکننده در غلظت‌های مختلف سورفکتانت پرداخته شده است. در مطالعه حاضر از دو نوع روغن خوراکی زیتون و کلزا استفاده شده است. سرعت حد، قطر معادل و ضریب دراگ ازجمله پارامترهایی است که در این مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱ مواد مورد استفاده

در مطالعه حاضر از دو نوع روغن خوراکی کلزا و زیتون به‌عنوان قطره در حال صعود و سیال حاوی سورفکتانت تویین ۸۰ استفاده شد. تغییر نوع روغن و غلظت سورفکتانت ازجمله پارامترهای متغیر در این آزمایش بود. روغن‌های خوراکی زیتون وکلزا که از بازارچه محلی در شهر دزفول خریداری شده بود، به روش صنعتی پرس سرد مکانیکی تهیه شده است. این روغن‌ها به ادعای سازنده آنها دارای درصد خلوصی بالای ۹۹/۹ می‌باشند و هیچ‌گونه افزودنی در آنها استفاده نشده است. سورفکتانت تویین ۸۰ مورد استفاده در مطالعه حاضر نیز از شرکت مرک آلمان خریداری شده است. با توجه به اینکه تویین ۸۰ از جمله سورفکتانت‌های آبدوست می‌باشد، به‌عنوان امولسیون روغن در آب انتخاب مناسبی است و پایدارکننده خوبی برای سیستم‌های آب-روغن محسوب می‌شود. غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایش برابر ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۱۴، ۰/۰۲ و ۰/۰۲۵ میلی مولار بود . با انجام آزمایشات اولیه مشخص شد که محلول‌های به‌دست‌آمده با غلظت‌های انتخابی مذکور، شفاف بوده و مشکلی برای تصویربرداری ایجاد نکردند بنابراین ویدئوهای ضبط‌شده قابلیت پردازش تصویر را به‌سادگی داشتند. از طرف دیگر با توجه به اینکه غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایش بسیار پایین است، برای تعیین ویسکوزیته سیال حاوی سورفاکتانت تویین ۸۰ از ویسکومتر استوالد استفاده شده است. نتایج نشان داد که مقدار ویسکوزیته به‌دست‌آمده بسیار نزدیک به ویسکوزیته آب بوده است. به همین دلیل در کار حاضر از ویسکوزیته آب برای تمامی آزمایشات استفاده شده است. با توجه به اینکه غلظت‌های مورد استفاده در این آزمایش بسیار پایین است، این فرض معتبر به نظر می‌رسد. همچنین، برای تعیین چگالی سیال حاوی سورفکتانت، از نسبت جرم به حجم سیال استفاده شده است که مشابه با تعیین ویسکوزیته، چگالی سیال موردنظر برابر چگالی آب درنظر گرفته شده است؛ بنابراین ویسکوزیته و چگالی سیال حاوی سورفکتانت برابر خواص فیزیکی آب درنظر گرفته شد. خواص فیزیکی مربوط به قطره‌های روغنی و سیال پیوسته در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱) پارامترهای فیزیکی قطره و فاز پیوسته در دمای محیط ($27^{o}C$) و فشار اتمسفریک

Table 1. Physical parameters of the droplets and continuous phase

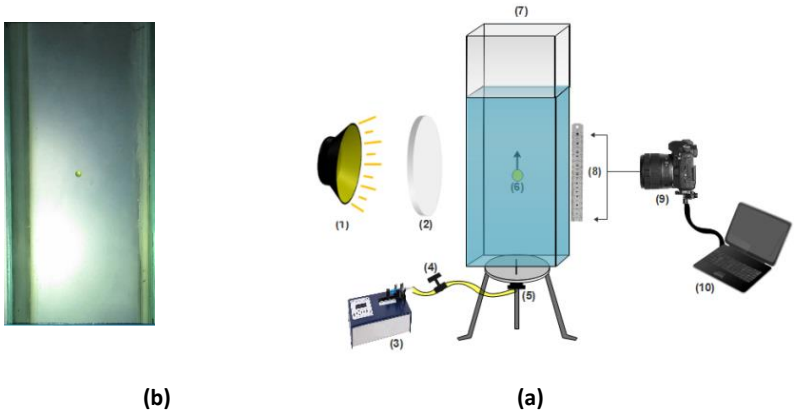
Physical properties	Density (kg/m^3)	Viscosity $(kg/m.s \times 10^{-3})$
Olive oil	842	-
Canola oil	854	-
Fluid containing surfactant *	998	1.793

* To be the same as water

۲.۲ دستگاه آزمایشگاهی و روش پردازش تصویر

به‌منظور بررسی تجربی تشکیل قطره‌ی روغن مانند آنچه در شکل (۱) مشاهده می‌شود یک سیستم طراحی شد. این سیستم، شامل یک ستون عمودی مکعب مستطیل شکل از جنس شیشه بود که تا ارتفاع مشخصی از فاز پیوسته پر شده است. ستون به‌اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفته شد که اثرات دیواره بر روی حرکت قطره قابل صرف‌نظر کردن است. برای به دست آوردن نتایج دقیق، تمام آزمایشات در فشار و دمای ثابت صورت گرفت. به همین منظور بالای ستون باز و در تماس با اتمسفر و در دمای محیط ۲۷°C قرار گرفت. اندازه قطره تولیدشده توسط سوزن تزریق کنترل شد که در کار حاضر قطر سوزن تزریق ثابت و برابر ۰/۹ mm در نظر گرفته شد. یک لوله انعطاف‌پذیر، سوزن تزریق را به پمپ سرنگی متصل کرده تا سرعت جریان قطره روغن ورودی را کنترل کند. آزمایش در دبی حجمی ثابت ۰/۴ ml/min انجام شد. این دبی به گونه‌ای انتخاب شد که عملاً برهمکنشی بین قطرات در حال صعود صورت نمی‌گرفت. محدوده رینولدز به‌دست‌آمده با توجه به‌سرعت حد قطره و نیز خصوصیات فیزیکی سیال محاسبه شده است.

برای تصویربرداری از یک دوربین تعبیه‌شده در جلوی ستون با مدل Canon SX540 HS و سرعت تصویربرداری 60 frames/s و 1920 × 1080 pixel/frame استفاده شد. در این آزمایش توازن نورپردازی از موارد پر اهمیتی است که لازم است در زمان تصویربرداری به‌دقت بررسی شود تا تصویر واضح و شفاف حاصل شود. از آنجایی که قطرات در حال صعود نور را منعکس و پخش می‌کنند در پشت ستون از یک لامپ LED و به فاصله مناسب از آن استفاده شد. علاوه بر آن یک پخش‌کننده پارچه‌ای نیمه شفاف بین لامپ و ستون تعبیه شد تا نور را به‌درستی پخش کند. درون ستون نیز با سیالی حاوی سورفکتانت توین ۸۰ با غلظت‌های مختلف استفاده شد.



شکل (۱) الف) شماتیک دستگاه آزمایشی ۱: لامپ LED، ۲: دیفیوزر پارچه‌ای نیمه شفاف ۳: پمپ سرنگی ۴: دریچه یک‌طرفه، ۵: سوزن تزریق، ۶: قطره در حال صعود درون ستون مایع، ۷: ستون مایع، ۸: خط‌کش، ۹: دوربین، ۱۰: سیستم پردازش تصویر. ب) تصویر واقعی از قطره در حال صعود درون ستون حاوی سیال

Fig 1. a) Schematic of the experimental set-up 1: LED lamp, 2: Semi-transparent fabric diffuser, 3: Syringe pump, 4: One-way valve, 5: Injection needle, 6: Droplet rising inside the liquid column, 7: Liquid column, 8: ruler, 9: camera, 10: image processing system. b) Real image of the droplet rising inside the fluid column

۳.۲ روش محاسبه

به‌منظور محاسبه پارامترهای مورد نیاز، در ابتدا ویدئوهای ضبط‌شده توسط دوربین با استفاده از نرم‌افزار(V.1.2.8) Video image master به مجموعه‌ای از عکس‌ها تبدل شد و تصاویر به‌دست‌آمده مورد پردازش قرار گرفت. سپس، با استفاده از نرم‌افزار Image J (v1.52) مساحت و محیط قطره و نیز مرکز سطح آن در تمام تصاویر اندازه‌گیری شد. مرکز سطح قطره درواقع نشان‌دهنده محل فیزیکی آن در ستون است که به کمک آن و با در نظر گرفتن فواصل زمانی بین تصاویر می‌توان سرعت صعود قطره را به دست آورد. به عبارتی مسیر صعود قطره درون سیال در دو جهت x و y صورت می‌گیرد و در هر لحظه قطره دارای مختصات خاص (x,y) است؛ بنابراین، با تعیین مرکز سطح قطره و داشتن

تعداد فریم‌های دوربین، مقدار سرعت صعود قطره درون سیال ساکن به‌صورت زیر در هر بازه زمانی (Δt) محاسبه شد.

$$L=\sqrt{(x_i+x_{i-1})^2+(y_i+y_{i-1})^2} \quad (۱)$$

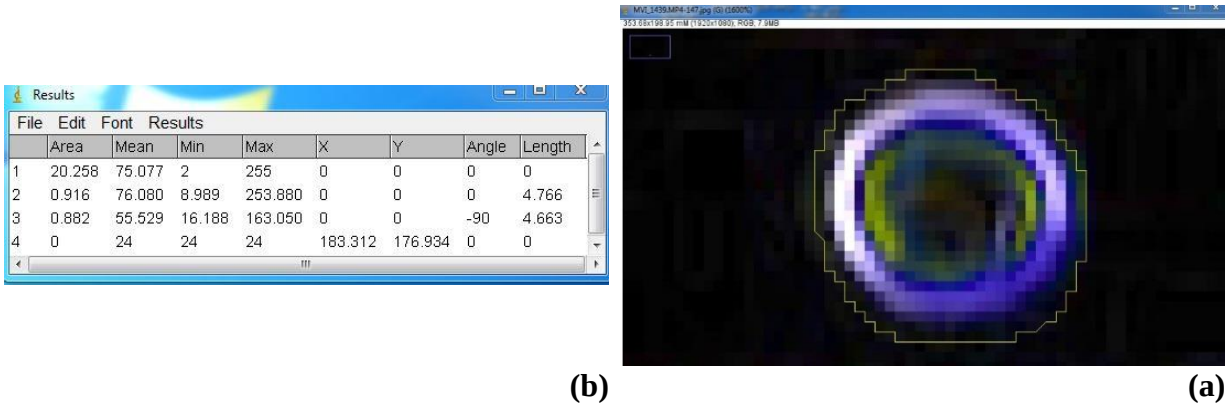
$$V=L/\Delta t \quad (۲)$$

که در آن، (x_i,y_i) و (x_{i-1}, y_{i-1}) مختصات قطره به ترتیب در لحظه اولیه t و $t+\Delta t$ بر حسب ثانیه است،(mm) L فاصله‌ی طی شده در این بازه زمانی و (mm/s) V سرعت صعود قطره درون سیال را مشخص می‌کند [۱۸].

برای به دست آوردن قطر معادل قطره از تعریف آن استفاده شد که برابر است با قطر کره‌ای است که مساحت آن برابر با مساحت سطح تصویر شده قطره باشد [۲۴]؛ بنابراین طبق رابطه (۳) می‌توان قطر معادل را تعیین کرد:

$$d_{eq}=\sqrt{4A/\pi} \quad (۳)$$

که در آن A سطح تصویر شده قطره و d_{eq} قطر معادل قطره است. در شکل (۲(a)) نمونه‌ای از تصویر قطره در زمان پردازش و شکل (۲(b)) نمونه‌ای از نتایج ارائه‌شده در محیط نرم‌افزار نشان داده شده است. در شکل (۲ (b)) ستون دوم از سمت چپ (Area) اندازه مساحت تصویر شده قطره داده می‌شود که از آن برای تعیین قطر معادل قطره استفاده می‌شود. در ستون آخر (Length) سطر دوم و سوم به ترتیب مقادیر مربوط به بزرگترین قطر و کوچکترین قطر مشخص شده است که با محاسبه نسبت آنها نسبت ابعاد قطره به دست می‌آید. همچنین با مشخص شدن مقادیر ستون X و ستون Y مرکز سطح قطره محاسبه می‌شود تا از طریق آن بتوان موقعیت قطره را در طول ستون مایع بررسی کرد. به‌منظور اطمینان از نتایج به‌دست‌آمده و همچنین کاهش خطای پردازش تصویر، برای هر قطره آزمایشات سه بار تکرار شد.



شکل (۲) پردازش تصویر در نرم‌افزار ImageJ a) نمونه‌ای از تصویر واقعی قطره در حال پردازش، b) تصویری از اطلاعات قطره در محیط نرم‌افزار

Fig 2. Image processing in ImageJ software a) An example (sample) of a real drop image processing, b) An image of the drop information in the software

با توجه به آزمایشات اولیه صورت گرفته، محدوده‌ی مورد مطالعه ۱۷۵ mm بالای کف ستون در نظر گرفته شده است که در آن قطره به‌سرعت حد خود (سرعت ثابت) رسیده است. زمانی که یک قطره با سرعت حد خود حرکت می‌کند، نیروهای وارد شده بر قطره از نظر تئوری به تعادل رسیده‌اند. در محدوده خزشی این نیروها شامل نیروی بویانسی (شناوری)، نیروی دراگ و نیروی وزن است؛ بنابراین، معادله حرکت قطره طبق رابطه (۴) به دست می‌آید [۱۸]:

$$(\rho_l-\rho_o)g\frac{\pi\times d_H^{\,3}}{6}=CD\times\frac{1}{2}\times\rho_l\times V^2\times\frac{\pi\times d_H^{\,2}}{4} \quad (۴)$$

با ساده‌سازی رابطه فوق، ضریب دراگ (CD) به دست می‌آید:

$$CD=\frac{4\times d_H\times g\times(\rho_l-\rho_O)}{3\times V^2\times\rho_l} \quad (۵)$$

که در آن ρ_O چگالی روغن، ρ_l چگالی سیال و g شتاب جاذبه است. ضریب دراگ وابسته به شکل تصویر جسم بر راستای عمود بر جریان است. به‌عنوان مثال تصویر کره یک دایره است یا تصویر یک مکعب، یک مربع است. از این رو در رابطه (۵)، d_H قطر افقی قطره در حال صعود است. لازم به توضیح است که در اینجا حرکت نسبی قطره و سیال در

راستای قائم است، بنابراین از تصویر قطره بر روی سطح افق برای محاسبه ضریب دراگ استفاده می‌شود. به دلیل تقارن سیستم فرض شده که این تصویر به‌صورت دایره با قطر d_H است.

طبق مطالعاتی که تاکنون انجام شده است [۲۵, ۲۶]، برای یک قطره در حال صعود، ضریب دراگ می‌تواند تابعی از گروه‌های بدون بعد مختلف باشد. یکی از مهمترین این اعداد بی‌بعد که رفتار قطره در حال حرکت درون سیال را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، عدد بی‌بعد رینولدز (Re) است که طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_l V d_{eq}}{\mu} \qquad (۶)$$

که در آن μ_l ویسکوزیته فاز پیوسته است. در ادامه وابستگی ضریب دراگ به رینولدز بررسی و نتایج ارائه شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ اعتبار سنجی

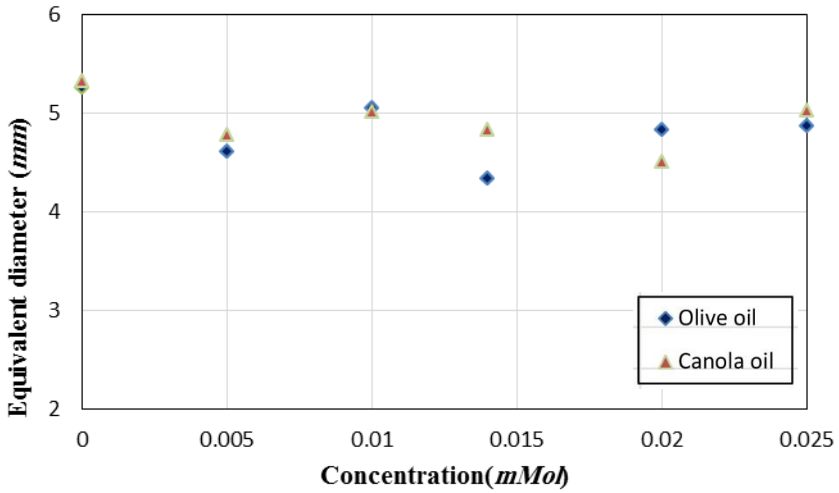
به‌منظور بررسی دقت روش پردازش تصویر و صحت نتایج به‌دست‌آمده، در ابتدا آزمایشات با آب خالص انجام شد. کریمی و همکاران[۱] حرکت روغن‌های خوراکی کلزار و زیتون را بررسی کردند طبق نتایج آنها برای یک قطره در حال صعود با قطر معادل ۳/۸mm، میزان سرعت حد قطره برابر ۸۷ mm/s گزارش شده است. در کار حاضر نیز مقدار سرعت حد قطره روغن کلزا و روغن زیتون درون آب خالص به ترتیب برابر ۷۸ و ۸۰ mm/s حاصل شد. بنابراین اختلاف سرعت به‌دست‌آمده کمتر از ۱۰ درصد است. این میزان اختلاف در مطالعات آزمایشگاهی قابل قبول و نشان‌دهنده صحت روش در آزمایشات و استخراج نتایج به روش پردازش تصویر است. در ادامه آزمایشات در پنج غلظت سورفکتانت (علاوه بر آب خالص که معادل غلظت صفر است) برای دو قطره روغنی کلزا و زیتون انجام شدند.

۲.۳ اثر غلظت سورفکتانت بر قطر معادل قطره در حال صعود

در شکل (۳) تغییرات قطر معادل قطره در غلظت‌های مختلف سورفکتانت برای دو نوع قطره روغن زیتون و روغن کلزا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر غلظت سورفکتانت بر قطر معادل تأثیر نداشته و با افزایش غلظت سورفکتانت، میزان قطر معادل ثابت باقی مانده است. نتایج مشابهی نیز توسط جامی الاحمدی و مولر-اشتاینهاگن [۱۲] گزارش شد. آنها در مطالعه خود، نتایج مشابهی را در مورد تأثیر غلظت کلرید پتاسیم و اتانول بر قطر معادل حباب به دست آوردند. کریمی و همکاران [۲۷] نیز اثر حضور سورفکتانت کاتیونی CTAB را بر روی قطر معادل حباب بررسی کردند و نشان دادند که اندازه حباب تحت تأثیر غلظت CTAB نمی‌باشد و قطر حباب مستقل از غلظت سیال است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که صرف نظر از نوع سیال، تغییرات غلظت سورفکتانت اثر قابل توجهی بر قطر معادل قطره ایجاد نمی‌کند. دلیل این امر را می‌توان به افزایش پایداری سینتیکی امولسیون در اثر حضور سورفکتانت‌ها مربوط دانست که در نتیجه آن اندازه قطرات در طول زمان بدون تغییر باقی می‌ماند.

علاوه بر آن نوع قطره (روغن زیتون و یا کلزا) تأثیر محسوسی بر قطر معادل نداشت. دلیل این امر می‌تواند مربوط به نزدیکی مقدار کشش بین سطحی دو روغن مذکور با سیال باشد. به عبارتی کشش بین سطحی مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری قطره است و تأثیر مستقیم بر روی شکل آن (کروی، بیضوی، کلاهکی و یا ... بودن) و نیز قطر معادل آن دارد [۲۸]. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایشات حاضر قطرات تشکیل شده به شکل تقریباً کروی با نسبت ابعاد بالاتر از ۰/۹ بودند.

نکته آخری که از شکل (۳) برداشت می‌شود، کاهش قطر معادل در سیال حاوی سورفکتانت نسبت به آب خالص (در شکل ۳، غلظت صفر) است. این نتیجه نیز با توجه به نتایج کریمی و همکاران [۲۷] و سیزیسکی و همکاران[۲۹] قابل پیش‌بینی بود. در واقع با جذب مولکول‌های سورفکتانت بر روی سطح قطره، سطح خارجی ذره مانند جسم صلب عمل کرده و باعث می‌شود نوسان سطح کاهش یافته و درنتیجه قطر قطره در حال صعود درون سیال حاوی سورفکتانت نسبت به سیال خالص کاهش می‌یابد.



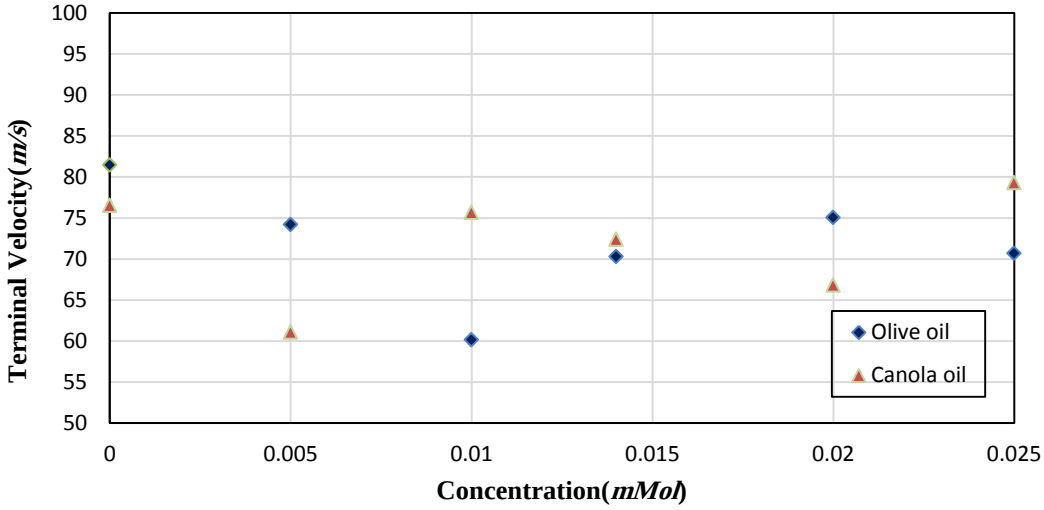
شکل (۳) اثر غلظت سورفکتانت بر قطرمعادل قطره روغن زیتون و کلزا

Fig 3. The effect of surfactant concentration on the equivalent droplet diameter of Olive and Canola oil

۳.۳ اثر غلظت بر سرعت حد قطره

برای یک قطره کروی، سرعت صعود آن به عوامل بسیاری مانند قدرت گردش‌های داخلی و ساختار دنباله (ویک) ایجاد شده در پشت قطره بستگی دارد که گردش داخلی قطره وابستگی شدیدی به نسبت ویسکوزیته قطره به سیال دارد[۱۱]. در شکل (۴) سرعت حد قطره در آب خالص و همچنین در غلظت‌های مختلف سورفکتانت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آب خالص سرعت حد قطره بیشترین مقدار خود را دارد و با اضافه کردن سورفکتانت میزان سرعت حد برای هر دو روغن کلزا و زیتون کاهش یافت. همان‌طور که در شکل (۴) نمایش داده شده است با افزایش غلظت سورفکتانت، سرعت قطره در حال صعود با شیب بسیار ملایم کاهش می‌یابد اما این تغییرات سرعت محسوس نبوده و قابل چشم‌پوشی است. بنابراین، می‌توان گفت با افزایش غلظت سورفکتانت مقدار سرعت تقریباً ثابت باقی می‌ماند. با توجه به اینکه غلظت بحرانی مایسل (CMC) برای توین ۸۰ برابر 001/0 Mol گزارش شده است [۲۸]، می‌توان بیان کرد به دلیل آنکه تمامی غلظت‌های مورد استفاده بالای CMC قرار دارند، درنتیجه با افزایش سورفکتانت سرعت حرکت قطره ثابت بوده و فقط مقدار سرعت آن نسبت به آب خالص به دلیل اثر مارانگونی کاهش یافته است. در واقع در بالاتر از غلظت بحرانی مایسلی، مونومرها و مایسل‌ها در یک تعادل پویا (دینامیکی) قرار دارند از این رو در غلظت‌های بالاتر آن تغییر محسوسی در رفتار قطره دیده نمی‌شود. در غلظت‌های پایین سورفکتانت مولکول‌های آن به‌صورت یون‌های مستقلی در آب حل می‌شوند و تمایل دارند که در فصل مشترک قطره-آب جذب شوند از این رو کشش بین سطحی با افزایش غلظت به‌شدت کاهش می‌یابد. در CMC و پس از آن این کاهش کشش سطحی متوقف می‌شود. فرض بر این است که جذب سورفکتانت از سینتیک لانگمویر پیروی می‌کند. درنتیجه پس از جذب، مولکول‌های سورفکتانت تمایل به کاهش کشش سطحی دارند [۲۹].

یائو و همکاران [۳۰] اثر حضور سورفکتانت را در جریان آشفته ارزیابی کردند. مطالعه آنها به رابطه معکوس بین سرعت حباب و غلظت سورفکتانت اشاره می‌کند. مطالعات بسیار دیگری [۲۴, ۳۱] نتایج مشابهی را برای انواع متفاوتی از سورفکتانت‌ها و قطره‌های تک جزئی ارائه کرده‌اند که بیان می‌کند به دلیل تجمع مولکول‌های سورفکتانت در پشت قطره، سرعت حرکت قطره در حال صعود با افزایش غلظت سورفکتانت کاهش می‌یابد. درنتیجه، هر چه ساختار لایه جذب فعال‌تر باشد، سرعت صعود حباب افزایش می‌یابد [۳۲]. با این وجود همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در ترکیبات چند جزئی این روند متفاوت و در بیشتر مواقع غیرقابل پیش‌بینی است.



شکل (۴) وابستگی سرعت حد قطره درحال صعود به غلظت سورفکتانت

Fig 4. Dependence of the terminal velocity of the rising droplet on the surfactant concentration

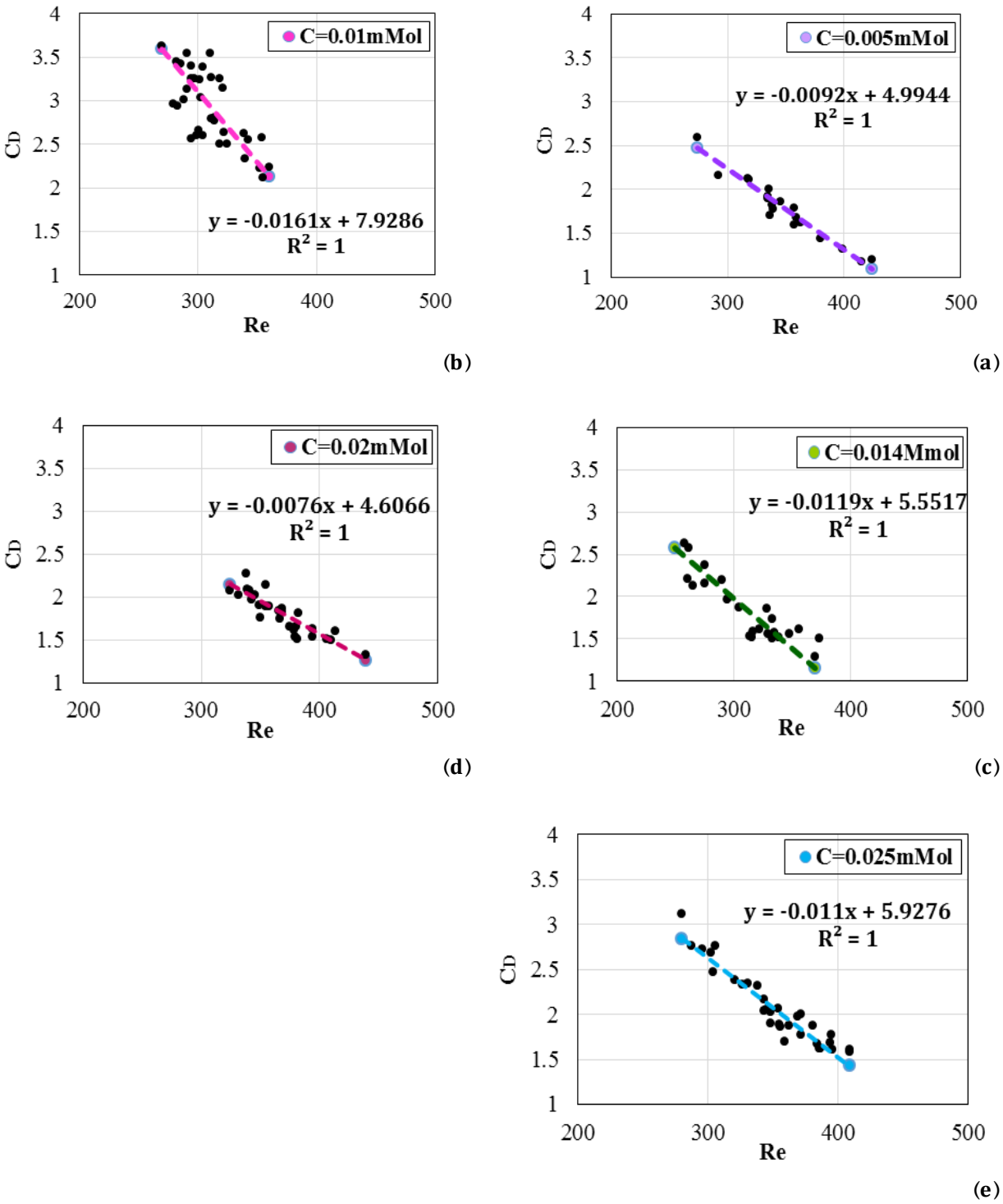
۳.۴ اثر تغییرات عدد رینولدز بر ضریب دراگ قطره

یکی از پارامترهای مهم در تجزیه‌وتحلیل ضریب دراگ، عدد بی‌بعد رینولدز است. عدد رینولدز مشخص‌کننده نوع رژیم جریان است. در مطالعه حاضر عدد رینولدز بین ۲۰۰ تا ۴۵۰ تغییر می‌کند؛ بنابراین، برطبق مطالعات تئوری، در ناحیه گذر از رینولدز پایین[1] به رینولدز بالا[2] قرار داریم. ضریب دراگ محاسبه‌شده برحسب عدد رینولدز برای روغن زیتون در غلظت‌های مختلف سورفکتانت در شکل (۵) آورده شد. نتایج به‌دست‌آمده برای روغن کلزا نیز مشابه است. همان‌طور که مشخص است در تمامی غلظت‌ها با افزایش عدد رینولدز ضریب دراگ کاهش می‌یابد. این نتیجه طبق مطالعات قبلی [۱۸, ۳۳] قابل انتظار بود. علاوه بر آن در مطالعه‌ای که وگنر و کرامه [۳۴] بر روی سیستم تولوئن-آب انجام دادند نشان دادند که برای $d_{eq}>2$ و در محدوده $100<Re<600$ با افزایش عدد رینولدز ضریب دراگ کاهش می‌یابد. کلبالیف و سیلان [۳۵] نیز تحقیقاتی بر روی رابطه عدد رینولدز و ضریب دراگ حباب‌ها و قطرات مختلف انجام دادند. در این خصوص آنها روابطی را پیش‌بینی کردند. با مقایسه این معادلات با داده‌های تجربی، انحراف قابل‌توجهی مشاهده می‌شود که عامل آن را محدوده عدد رینولدز بیان کردند. به‌طور کلی آنها نشان دادند برای $Re<1000$ ضریب دراگ به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد.

همچنین، خلوص سیال ازجمله عواملی است که گردش داخلی قطره را کنترل می‌کند. وجود ناخالصی‌هایی مانند سورفکتانت روی سطح قطره، گردش داخلی را کاهش می‌دهد و به همین علت قطره بیشتر شبیه ذره صلب رفتار می‌کند [۳۶]. در واقع گردش داخلی به نسبت ویسکوزیته‌ها ارتباط دارد به‌طوری‌که با افزایش آن گردش داخلی کاهش می‌یابد. به‌محض تزریق قطره به درون ستون، جذب سورفکتانت در سطح مشترک آغاز می‌شود. با صعود قطره درون سیال، سورفکتانت بیشتری به سطح آن جذب می‌شود و تغییراتی در کشش بین سطحی ایجاد می‌کند که بر دینامیک قطره تأثیرگذار است. سورفکتانت جذب شده توسط جریان سطحی به لبه عقب منتقل‌شده و تجمع می‌یابد؛ بنابراین، با انتقال سطحی موجود در سطح قطره باعث می‌شود که غلظت سورفکتانت در لبه جلویی قطره متحرک کاهش و در لبه عقب آن افزایش یابد. این اختلاف غلظت باعث ایجاد یک گرادیان کشش سطحی در امتداد سطح مشترک می‌گردد و تنش‌های مارانگونی را ایجاد می‌کند. در نتیجه گردش‌های داخلی قطره کاهش می‌یابد؛ بنابراین، مقدار ضریب دراگ را کاهش می‌دهد [۳۶]. مطالعه اسچیلر و نیومن [۳۷] نیز نشان داد برای $Re < 1000$ رابطه عکس بین ضریب دراگ و عدد رینولدز وجود دارد. آزمایشی که وسر و همکاران [۳۸] برای سیالات مختلف در محدوده رینولدز ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ انجام دادند نشان می‌دهد که برای سیال حاوی سورفکتانت ضریب دراگ ابتدا کاهش و سپس

1. Low Reynolds
2. High Reynolds

افزایش می‌یابد که بسته به نوع سیال و نیز نوع سورفکتانت استفاده شده این مقدارمتفاوت می‌باشد. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است با افزایش غلظت سورفکتانت مقدار ضریب دراگ تغییر می‌کند اما روند مشخصی برای تغییرات آن حاصل نشده است.



شکل (۵) ضریب دراگ به‌دست‌آمده بر حسب عدد رینولدز برای روغن زیتون در غلظت‌های مختلف سورفکتانت، الف) $C=0.005mMol$، ب) $C=0.01mMol$، ج) $C=0.014mMol$، د) $C=0.02mMol$، ه) $C=0.025\ mMol$

Fig 5. Drag coefficient obtained in terms of Reynolds number for olive oil in different concentrations of surfactant, a) C=0.005*mMol*, b) C=0.01*mMol*, c) C=0.014*mMol*, d) C=0.02*mMol*, e) C =0.025*mMol*

۴. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، رفتار حرکتی دو نوع روغن خوراکی کلزا و زیتون درون سیال ساکن حاوی توین ۸۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. ازجمله پارامترهای مورد بررسی قطر معادل قطره، سرعت حد آن، ضریب دراگ و عدد رینولدز بودند. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت سورفکتانت، سرعت حد نسبت به آب خالص کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه تمام غلظت‌ها بالاتر از CMC قرار دارند با افزایش غلظت مقدار سرعت قطره ثابت باقی می‌ماند که علت این پدیده به عوامل بسیاری مانند قدرت گردش‌های داخلی، ساختار دنباله ایجاد شده در پشت قطره و اثر مارانگونی نسبت داده شد. همچنین، اثر غلظت بر روی قطر معادل ارزیابی شد که نشان داد نوع قطره خوراکی و غلظت سیال بر روی قطر معادل تأثیر چندانی ندارد؛ بنابراین، صرف نظر از نوع قطره و نوع سیال، می‌توان نتیجه گرفت قطر معادل تابعیت غلظت ندارد. همچنین، نتایج نشان داد با افزایش عدد رینولدز، ضریب دراگ در تمامی غلظت‌ها برای هر دو قطره روغن زیتون و روغن کلزا کاهش می‌یابد که علت آن حضور سورفکتانت بر سطح قطره در حال صعود می‌باشد. نتایج حاصله در طراحی سیستم‌های تصفیه پساب‌های خروجی کارخانه‌ها روغن و نیز کارخانه‌های تولید مواد غذایی صنعتی بسیار کاربردی خواهد بود.

تشکر و قدردانی

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول انجام شده است، نویسندگان به پاس تمام حمایت‌های انجام‌شده از دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، سپاسگزارند.

مراجع

[1]Karimi, S., Abiri, A. & Shafiee, M. (2022). Experimental study of the passage of canola oil and olive oil droplets between the water-oil interfaces. *J. Food Bio. Eng*, *5*, 16-23.

[2]Pekkarinen, S., Hopia, A. & Heinonen, M. (1998). Effect of processing on the oxidative stability of low erucic acid turnip rapeseed (Brassica rapa) oil. *Lipid Fett*, *100*, 69-74.

[3]Gunstone FD, Harwood JL & FB, P. (1994). Occurrence and characteristics. In: Gunstone FD, Harwood JL, Padley FB (eds) The lipid handbook, Chapman, London. 47-223.

[4]Koski, A., Psomiadou, E., Tsimidou, M., Hopia, A., Kefalas, P., Wähälä, K. & Heinonen, M. (2002). Oxidative stability and minor constituents of virgin olive oil and cold-pressed rapeseed oil. *Eur. Food Res. Technol.*, *214*, 294-298.

[5]Yang, T., Liu, T.-X., Li, X.-T. & Tang, C.-H. (2019). Novel nanoparticles from insoluble soybean polysaccharides of Okara as unique Pickering stabilizers for oil-in-water emulsions. *Food Hydrocoll.*, *94*, 255-267.

[6]Harman, C. L., Patel, M. A., Guldin ,S. & Davies, G.-L. (2019). Recent developments in Pickering emulsions for biomedical applications. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, *39*, 173-189.

[7]Jafari, S. M., He, Y. & Bhandari, B. (2007). Effectiveness of encapsulating biopolymers to produce sub-micron emulsions by high energy emulsification techniques. *Food Res. Int.*, *40*, 862-873.

[8]Kim, H.-J., Decker, E. A. & McClements, D. J. (2006). Preparation of multiple emulsions based on thermodynamic incompatibility of heat-denatured whey protein and pectin solutions. *Food Hydrocoll.*, *20*, 586-595.

[9]McClements, D. J. (2004). *Food emulsions: principles, practices, and techniques*(CRC press Publisher, Place:Published.

[10]Perrier-Cornet, J., Marie, P. & Gervais, P. (2005). Comparison of emulsification efficiency of protein-stabilized oil-in-water emulsions using jet, high pressure and colloid mill homogenization. *J. Food Eng.*, *66*, 211-217.

[11]Clift, R., Grace, J. & Weber, M. (1978). Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, New York.

[12]Jamialahmadi, M. & Müller-Steinhagen, H. (1992). Effect of alcohol, organic acid and potassium chloride concentration on bubble size, bubble rise velocity and gas hold-up in bubble columns. *Chem. Eng. J.*, *50*, 47-56.

[13]Kracht, W. & Finch, J. (2010). Effect of frother on initial bubble shape and velocity. *Int. J. Miner. Process.*, *94*, 115-120.

[14]Sattari, A. & Hanafizadeh, P. (2019). Bubble formation on submerged micrometer-sized nozzles in polymer solutions: An experimental investigation. *Colloids Surf., A*.٢٢-١٠ ,٥٦٤ ,

[15]Pierre, J., Poujol, M. & Séon, T. (2022). Influence of surfactant concentration on drop production by bubble bursting. *Phys. Rev. Fluids*, *7*, 073602.

[16]Constante-Amores, C., Batchvarov, A., Kahouadji, L., Shin, S., Chergui, J., Juric, D & . Matar, O. (2021). Role of surfactant-induced Marangoni stresses in drop-interface coalescence. *J. Fluid Mech.*, *925*, A15.

[17]Karimi, S., Abiri, A., Shafiee, M., Abbasi, H. & Ghadam, F. (2021). New Correlations for the Prediction of Terminal Velocity and Drag Coefficient of a Bubble Rising. *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Mech. Eng.*, *22*, 71-87.

[18]Karimi, S., Shafiee, M., Abiri, A. & Ghadam, F. (2019). The drag coefficient prediction of a rising bubble through a non-Newtonian fluid. *Amir kabir J. Mech. Eng.*, *52*, 863-880. [In Persian].

[19]Karimi, S., Abiri, A., Shafiee, M. & Mohamadzadeh, N. (2022). Experimental Study on a Rising Oil Droplet through a Water-Oil Interface. *J. Mech. Eng.*, *51*, 361-368. [In Persian]

[20]Deng, C., Huang, W., Wang, H ,.Cheng, S., He, X. & Xu, B. (2018). Preparation of micron-sized droplets and their hydrodynamic behavior in quiescent water. *Braz. J. Chem. Eng.*, *35*, 709-720.

[21]Frumkin, A. (1947). On surfactants and interfacial motion. *Zh. Fiz. Khim.*, *21*, 1183-1204.

[22]Dubois, V., Breton, S., Linder, M., Fanni, J. & Parmentier, M. (2007). Fatty acid profiles of 80 vegetable oils with regard to their nutritional potential. *European Journal of Lipid Science and Technology*, *109*, 710-732.

[23]Obiedzinska, A. & Waszkiewicz-Robak, B. (2012). Cold pressed oils as functional food. *Zywnosc-Nauka Technologia Jakosc*, *19*, 27-44.

[24]Karimi, S., Shafiee, M., Ghadam, F., Abiri, A. & Abbasi, H. (2021). Experimental study on drag coefficient of a rising bubble in the presence of rhamnolipid as a biosurfactant. *J. Dispersion Sci. Technol.*, *42*, 835-845.

[25]Tzounakos, A., Karamanev, D. G., Margaritis, A. & Bergougnou, M. A. (2004). Effect of the surfactant concentration on the rise of gas bubbles in power-law non-Newtonian liquids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, *43*, 5790-5795.

[26]Li, Y., Yang, L., Zhu, T., Yang, J. & Ruan, X. (2013). Biosurfactants as alternatives to chemosynthetic surfactants in controlling bubble behavior in the flotation process. *J. Surfactants Deterg.*, *16*, 409-419.

[27]Karimi, S., Abiri, A. & Shafiee, M. (2022). Hydrodynamic study of a rising bubble in the presence of Cetyltrimethylammonium bromide. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, *42*, 486-499.

[28]Maia, P. C., Santos, V. P., Fereira, A. S., Luna, M. A., Silva, T. A., Andrade, R. F. & Campos-Takaki, G. M. (2018). An efficient bioemulsifier-producing Bacillus subtilis UCP 0146 isolated from mangrove sediments. *Colloids Interfaces*, *2*, 58.

[29]Ciszewski, R. K., Gordon, B. P., Muller, B. N. & Richmond, G. L. (2019). Takes Two to Tango: Choreography of the Coadsorption of CTAB and Hexanol at the Oil–Water Interface. *J. Phys. Chem.*, *123*, 8519-8531.

[30]Yao, N., Wang, Y., Liu, J., Sun, X., Hao, Z., Liu, Y., Chen, S. & Wang, G. (2021). Bubble rise characteristics in oscillating grid turbulence. *Miner. Eng.*, *164*, 106832.

[31]Shang, X., Luo, Z., Hu, G. & Bai, B. (2022). Role of surfactant-induced Marangoni effects in droplet dynamics on a solid surface in shear flow. *Colloids Surf., A*, *654*, 130142.

[32]Yan, X., Zheng, K., Jia ,Y., Miao, Z., Wang, L., Cao, Y. & Liu, J. (2018). Drag coefficient prediction of a single bubble rising in liquids. *Ind. Eng. Chem. Res.*, *57*, 5385-5393.

[33]Rodi, W. & Fueyo, N. (2002). Direct test of boussinesq's hypothesis and the k-transport equation using experimental, DNS and LES data. *Eng. Turbul. Modell. Exp.*, 167-176.

[34]Wegener, M., Kraume, M. & Paschedag, A. R. (2010). Terminal and transient drop rise velocity of single toluene droplets in water. *AIChE journal*, *56*, 2-10.

[35]Kelbaliyev, G & .Ceylan, K. (2007). Development of new empirical equations for estimation of drag coefficient, shape deformation, and rising velocity of gas bubbles or liquid drops. *Chem. Eng. Commun.*, *194*, 1623-1637.

[36]Rao, A., Reddy, R. K., Ehrenhauser, F., Nandakumar, K., Thibodeaux, L. J., Rao, D. & Valsaraj, K. T. (2014). Effect of surfactant on the dynamics of a crude oil droplet in water column: Experimental and numerical investigation. *Can. J. Chem. Eng.*, *92*, 2098-2114.

[37]Schiller, L. (1933). A drag coefficient correlation. *Zeit. Ver. Deutsch. Ing.*, *77*, 318-320.

[38]Vecer, M., Lestinsky, P., Wichterle, K. & Ruzicka, M. (2012). On bubble rising in countercurrent flow. *Int. J. Chem. React. Eng.*, *10*.

[39]Bide, Y., Fashapoyeh, M. A. & Shokrollahzadeh, S. (2012). Structural investigation and application of Tween 80-choline chloride self-assemblies as osmotic agent for water desalination. *Sci. Rep.*, *11*, 17068.