

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حرکت قطره نفتی از بین سطح مشترک آب-نفت

صفورا کریمی*

آنا عبیری

مجتبی شفیعی

نگین محمدزاده

استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران
 کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران
 استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران
 کارشناس ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

چکیده

امروزه بحث تعامل قطره با سیال از مباحث چالش برانگیز در جریان‌های چند فازی (مایع-مایع) است. در مطالعه‌ی حاضر به بررسی آزمایشگاهی حرکت قطره‌ی نفتی از درون سیال ساکن آب و سپس عبور آن از سطح مشترک آب-نفت پرداخته شده است. برای این منظور از سامانه تصویربرداری و سپس پردازش تصویر استفاده شده است. نفت مورد استفاده، نفت خام سنگین گرفته شده از یکی از چاه‌های نفتی ایران می‌باشد و قطر قطره‌ی حاصله در محدوده‌ی ۲ تا ۳ میلی‌متر کنترل شده است. در ابتدا دامنه مقادیر اعداد بدون بعد بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی سایر محققان مقایسه و اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط اعمال شده شکل قطره به صورت بیضوی است و با افزایش نسبت ابعاد آن، مقدار عدد وبر کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات زمان ماند با قطر قطره از روند یکنواختی پیروی نمی‌کند. در نهایت نیز با مقایسه‌ی نتایج با معادلات تجربی ارائه شده، بهترین رابطه برای پیش‌بینی زمان ماند قطره‌ی نفتی معرفی شده است.

واژه‌های کلیدی: نفت خام سنگین، سطح مشترک مایع-مایع، زمان ماند، نسبت ابعاد قطره، عدد وبر.

Experimental Study on a Rising Oil Droplet through a Water-Oil Interface

S. Karimi

A. Abiri

M. Shafiei

N. Mohamadzadeh

Chemical Engineering Department, Jundi-Shapour University of Technology, Dezful, Iran

Chemical Engineering Department, Jundi-Shapour University of Technology, Dezful, Iran

Chemical Engineering Department, Jundi-Shapour University of Technology, Dezful, Iran

Chemical Engineering Department, Jundi-Shapour University of Technology, Dezful, Iran

Abstract

Today, the discussion of the droplets interaction with fluid is one of the most challenging topics in multi-phase (liquid-liquid) flow. In the present work, an experimental study was done to investigate the oil droplet rising through a stagnant fluid water and crossing the water-oil interface. Thus, an image recording and processing have been used. The employed oil in the experiments is a heavy crude oil extracted from an Iranian oil reservoir and the drop diameter is controlled in the range of 2 to 3mm. Firstly, the range of the obtained dimensionless numbers was compared and validated with the experimental data of the other works. The results showed that in the applied conditions, the drop shape is ellipse-like and the Weber number decreased by increasing aspect ratio. Moreover, residence time versus drop diameter did not follow a uniform procedure. Finally, the best correlation was introduced to predict the residence time of oil droplets by comparing the experimental results with the presented empirical equations.

Keywords: Heavy crude oil, Liquid-liquid interface, Residence time, Droplet aspect ratio, Weber number.

۱- مقدمه

اسپری نشتی نفت در ستون آب به عنوان یک روش ترمیم‌دهنده (اصلاح کننده)، ارائه شد که در تلاش اول حدود ۳۰ درصد از کل نشتی نفت در نقطه انتشار را کاهش داد. علاوه بر آن، این روش باعث کاهش تنش سطحی بین آب و نفت شده و در نتیجه قطرات بزرگتر به قطرات ریزتر خرد می‌شوند [۳]. اما با وجود اهمیت بالای این موضوع هنوز مطالعات انجام شده بر روی حرکت قطره از بین سطح مشترک دو سیال بسیار محدود می‌باشد. نخستین تلاش‌های نظری برای پیش‌بینی ناپایداری بین سطحی در یک سامانه مایع-مایع توسط استرلینگ و اسکرین [۴] انجام شد. در سال‌های بعد، مطالعات نظری کامل‌تری نیز توسط برخی دیگر از محققان صورت گرفت [۵-۱۰]. به عنوان مثال پیوستن یک قطره به سطح مشترک مایع-مایع متحرک توسط دنگ و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت. آنها بیان کردند با افزایش سرعت سطح مشترک، انعقاد قطره به تأخیر می‌افتد [۱۱].

حرکت و پویایی قطرات در یک فاز پیوسته، ماهیت بسیار

از جمله کاربردهای صنعتی مطالعه حرکت قطره در سیال در صنعت می‌توان به استخراج مایع-مایع، انتقال حرارت تماس مستقیم، جریان‌های واکنش‌پذیر، عملیات متالورژیکی، تصفیه فاضلاب و صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی، نفت و پلیمرها اشاره کرد. به عنوان مثال در فرآیند استخراج نفت یکی از خطرات زیست محیطی که با آن مواجه هستند پیدایش لکه‌هایی از قطرات نفت در آب‌های عمیق است. اثر کشش سطحی بین گاز، نفت و مایع باعث تشکیل قطرات با اندازه متفاوت و توزیع آن در آب‌های عمیق می‌شود [۱]. تعداد قطرات در آب افزایش پیدا می‌کند و با حرکت به طرف بالا، در سطح آب یک لایه تشکیل می‌دهند. در سال ۲۰۱۰، حدود ۴/۹ میلیون بشکه نفت در خلیج مکزیک نشت کرد. محل انتشار ۵۰۰۰ فوت در عمق دریا بود که یکی از عظیم‌ترین نشتی‌های زیر دریا در زمان‌های اخیر بوده است [۲].

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: s.karimi@jsu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۷/۰۷

پيچيده‌ای دارد [۱۲-۱۴]. مطالعات تحلیلی انجام شده تاکنون اغلب محدود به موارد ساده بوده است. از این رو مطالعات مبتنی بر آزمایش برای پیش‌بینی رفتار و بررسی دینامیک و شکل قطره لازم است. اولین مطالعات گسترده در مورد حرکت قطره‌ها و حباب‌ها درون فاز پیوسته مایع توسط کاکس [۱۵]، تیلور و اکریوس [۱۶]، والک و همکاران [۱۷] و سو [۱۸] انجام شد. بیشتر این مطالعات اولیه در مطالعه‌ی مروری کلیت و همکاران [۱۹] خلاصه شده است. اخیراً، عشاقی و همکاران حرکت حباب درون سیالات نیوتونی و غیرنیوتونی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نشان دادند در رژیم‌های مختلف شکل حباب در حال صعود از حالت دوکی شکل تا کروی تغییر پذیر است [۲۰]. هایکک و گارنر [۲۱] با تمرکز بر روی قوانین گردش داخلی قطره، بر روی دینامیک قطره بررسی‌هایی انجام دادند. آنها آزمایش‌های خود را بر روی ترکیب کربن‌تتراکلرید و سیکلوهگزان به عنوان فاز پراکنده و محلول ۸۳٪ وزنی از گلیسرول و آب به عنوان فاز پیوسته انجام دادند و برای تجسم الگوهای جریان داخل قطره از ذرات آلومینیوم به عنوان فاز پراکنده استفاده کردند. وینیکوو و همکاران [۲۲] حرکت قطرات در سامانه‌های خالص را در طیف گسترده‌ای از عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند که شروع نوسان قطره‌ها با جاری شدن گردابه‌های دوره‌ای در پشت قطره‌ها صورت می‌گیرد و نیروی پسا را برای قطره‌های نوسانی و غیرنوسانی در نقطه گذار مشخص کردند و نشان دادند که با افزایش نوسانات ضریب پسا افزایش می‌یابد. کوریموتو و همکاران [23] به مطالعه‌ی رفتار قطره روغن سیلیکون با لزجت‌های متفاوت در قطرهای مختلف از ۳ mm تا ۳ قطره تیلور درون یک محلول آب-گلیسرول در حضور سورفکتانت پرداختند و نشان دادند که حضور سورفکتانت بر روی شکل قطره سیلیکون بسیار تأثیر گذار است. هایکک و گارنر [۲۱] دریافتند که سورفکتانت باعث ماندگاری گردش داخلی قطره خواهد شد و نشان دادند شکل قطره‌ها در قطرهای کوچک (1 mm) کروی است، به دلیل آن که فشار ناشی از کشش سطحی داخلی قطره غالب است. همچنین آنها به دست آوردند که قطرات بزرگتر نیز پس از مدتی به حالت کروی تبدیل می‌شوند. به طور کلی شکل قطره به تعادل بین نیروهای کشش سطحی که تمایل به کروی بودن قطره است و نیروهای شناوری که تمایل به تغییر شکل آن دارد وابسته است. راؤ و همکاران [۲۴] تأثیر سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات (SDS) در پویایی یک قطره نفت خام مطالعه کردند. آنها دریافتند که جذب سورفکتانت باعث کاهش تنش سطحی در فصل مشترک آب و نفت شده است که همین امر منجر به تولید قطرات کوچکتر در نازل و باعث صاف شدن شکل قطرات می‌شود. در نتیجه سرعت صعود قطرات کاهش می‌یابد.

یکی از مباحث کاربردی در مطالعات مربوط به حرکت قطره بدست آوردن اطلاعات درباره دینامیک قطره در فصل مشترک مایع-مایع است که در گذشته مطالعات اندکی به طور آزمایشگاهی و عددی [۸، ۲۵، ۲۶] بر روی آن انجام گرفته است. با نزدیک شدن قطره به سطح مشترک دوفاز، ممکن است قطره‌ها به مدت چند ثانیه "شناور" به نظر برسند که این اتفاق اولین بار توسط رینولدز [۲۷] گزارش شده است. از آن زمان به بعد، تعدادی از محققان به این پدیده علاقه نشان داده‌اند و سعی کرده‌اند زمان اقامت (زمان ماند) قطرات را در سطح مشترک دوفاز را اندازه‌گیری یا محاسبه کنند [۲۸-۳۱]. سرانجام، ضخامت بین

دو فاز به اندازه کافی کوچک می‌شود تا جایی که نیرو واندروالس اهمیت پیدا کند، در این مرحله دو سطح به هم می‌پیوندند و قطره در تماس کامل با سطح قرار می‌گیرد [32]. بوریل و وود [۳۳] صعود قطره‌هایی با اندازه‌های مختلف از جنس‌های متفاوت تولوئن، آنیزول و سیکلوهگزانول و ترکیبی از آنها را از بین سطح مشترک بین آب-نفت در حضور سورفکتانت بررسی کردند. آنها برای بررسی فیلم تشکیل شده اطراف قطره و همچنین زمان ماند قطره در سطح مشترک دو فاز آب-نفت از روش تداخل نور استفاده کردند. در این روش با تاباندن نور رنگی به فیلم آب به دام افتاده بین قطره و سطح مشترک آب-نفت و تغییر رنگ ایجاد شده زمان ماند را تعیین می‌کنند. همچنین، کسیم و لانگمیر [26] از مخلوط روغن سیلیکون-آب به عنوان قطره استفاده کردند. آنها با عبور دادن قطره از بین سیالات متفاوت، اثر لزجت محلول و در نتیجه تأثیر عدد رینولدز بر روی حرکت قطره را بررسی کردند. فاز پیوسته استفاده شده در آزمایش آنها، مخلوطی از آب مقطر و گلیسرین است. سپس در بالای این ترکیب، از دو نوع روغن سیلیکون با لزجت‌های مختلف استفاده شده است. آنها ارائه کردند که برای عدد رینولدز بالا شکل قطره در طول سقوط صاف است در نتیجه با افزایش عدد رینولدز قطره از حالت کروی خارج می‌شود. همچنین آنها مشاهده کردند هنگامی که قطره به سطح مشترک برخورد می‌کند، امواج سطحی ایجاد شده است که به صورت شعاعی به سمت خارج حرکت می‌کردند اما بررسی آنها نشان داد که برگشت موج نقشی در رفتار قطره بعدی نداشته است. به طور کلی مطالعات نشان می‌دهد که زمانی که نیاز است تا قطره به سطح بالک جذب شود و از بین برود، عوامل مختلفی مثل اندازه، شکل و سرعت صعود قطره تأثیرگذارند. به عبارت دیگر تغییر شکل قطره از یک جهت بر روی سطح مشترک دو فاز و در نتیجه سرعت انتقال جرم و از طرف دیگر بر روی ضریب پسا و بنابراین سرعت حد تأثیرگذار است [۳۴].

همانطور که ملاحظه می‌شود با این که مطالعات بسیاری بر روی حرکت قطره منفرد در بالک مایع انجام شده است اما تاکنون بررسی کاملی از زمان اقامت قطره به ویژه قطره‌های نفتی در فصل مشترک دو سیال صورت نگرفته است، از این رو، در این مطالعه شواهد تجربی مربوط به پدیده انتقال قطره نفتی از فصل مشترک آب-نفت ارائه شده است. پارامترهای به دست آمده در کار حاضر قطر، شکل و مدت زمان اقامت قطره بر روی فصل مشترک دو سیال تا زمان محو شدن آن در فاز بالک نفت، سرعت صعود قطره و همچنین اعداد بدون بعد رینولدز، اوتوس و مورتن است که مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- روش انجام کار

۲-۱- مجموعه آزمایشگاهی

تمامی آزمایش‌ها در فشار اتمسفری و دمای محیط (25°C) صورت گرفته است. مجموعه آزمایشگاهی طراحی شده برای این کار به صورت طرحواره در شکل ۱ نشان داده شده است. این مجموعه شامل یک ستون عمودی از جنس پلکسی گلس با ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و سطح مقطع داخلی 80×80 میلی‌متر مربع است. این ستون تا ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر نیمی از آب مقطر و نیمی از نفت خام پر شده است. محدوده‌ی مورد مطالعه سطح مشترک دو فاز است که در آن قطره نفت

ستون مایع به صورت عمودی و دقیقاً مقابل فصل مشترک دو فاز مستقر شد. به منظور بهبود کیفیت نورپردازی و جلوگیری از انعکاس نور توسط قطره‌های در حال صعود، از پخش‌کننده نیمه‌شفاف بین ستون و لامپ LED استفاده شده است. این پخش‌کننده نه تنها سبب پخش یکنواخت نور بر روی ستون مایع شده بلکه از گرم شدن محل تست جلوگیری می‌کند. محل دقیق پخش‌کننده به صورت دستی و با انجام تست‌های مختلف بدست آمد. به منظور به حداقل رساندن خطای آزمایشگاهی هر آزمایش حداقل ۳ بار تکرار شده و از میانگین نتایج آنها به عنوان نتیجه‌ی نهایی استفاده شد.

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد استفاده شده در مطالعه حاضر

خواص فیزیکی	نفت	آب
چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	۹۲۶	۱۰۰۰
لزجت (سانتی پویز)	۰/۷۴۹	۰/۹۸

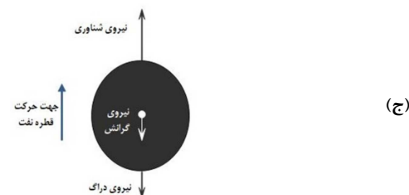
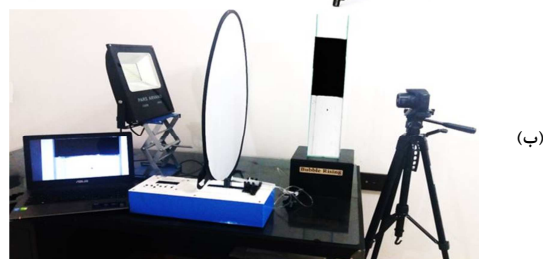
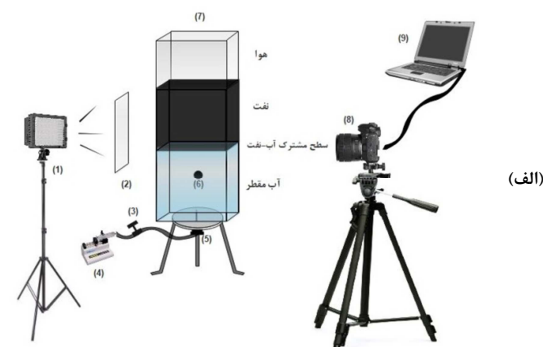
۲-۲- پردازش تصویر

به منظور مطالعه‌ی دینامیک قطره در سطح مشترک دو فاز، حرکت آن توسط یک دوربین که در یک سمت ستون مایع تعبیه شده است ثبت می‌شود. پارامترهای هندسی، مکان قطره و همچنین مدت زمان محو شدن آن در فاز نفت به کمک آنالیز مجموعه تصاویر بدست آمده، محاسبه شد. ابتدا فیلم گرفته شده توسط دوربین به کمک نرم افزار Video image master V1.2.5 به مجموعه عکس در زمان‌های مختلف تبدیل شده است. سپس به کمک نرم افزار ImageJ V1.51 پس از برش کاری‌های لازم بر روی محدوده‌ی عکس، مرز بین قطره و سیال مشخص می‌شود. در نهایت به کمک این نرم‌افزار سرعت، مرکز سطح قطره، نسبت ابعاد و زمان محو شدن آن در توده‌ی نفت بدست آمد. نتایج به دست آمده به روش مذکور پیش از این توسط نویسندگان اعتبارسنجی شده است [۳۵].

۳- نتایج

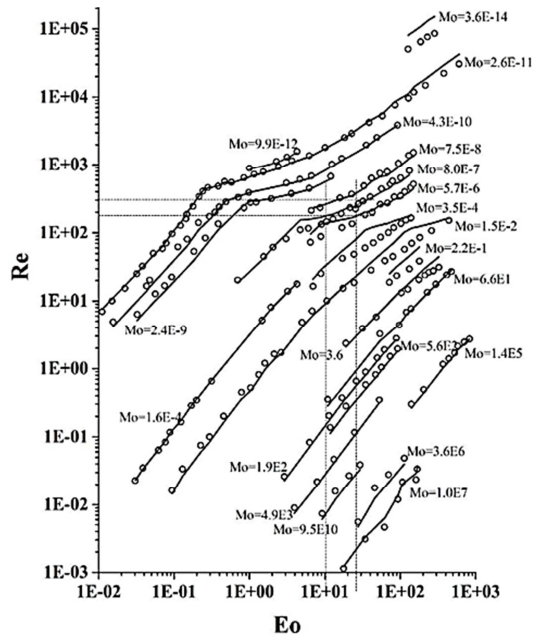
به منظور مطالعه‌ی حرکت رو به بالا و الحاق قطره‌ی شناور به سطح مشترک دو فاز، نیروهای وارد بر آن بررسی می‌شود. نیروهای اصلی وارد بر قطره علاوه بر وزن، دو نیروی کشش سطحی و شناوری (بوانسی) هستند (رجوع به شکل ۱(ج)). در ابتدا جدا شدن قطره از نازل بستگی به تعادل بین این دو نیرو دارد. به طوری که نیروی شناوری محرک اصلی جداسدن قطره از دهانه‌ی نازل و حرکت رو به بالای آن است و در مقابل نیروی کشش سطحی باعث متصل ماندن قطره به نازل می‌شود. در نهایت پس از رسیدن قطره به اندازه‌ی مورد نظر و توازن این دو نیرو و نیروی وزن، قطره تشکیل و با توجه به اختلاف چگالی آن با سیال ساکن ستون (آب) به سمت بالا حرکت می‌کند. در این شرایط نه تنها کشش بین سطحی بلکه قطر دهانه‌ی نازل کنترل‌کننده‌ی حجم قطره است. در این آزمایش به دلیل وجود ستون آب و نفت روی هم فشار در پایین ستون افزایش یافته و در نتیجه سبب به تأخیر افتادن حرکت رو به بالای قطره نفت می‌شود. در واقع نیروی کشش سطحی در مایعات باعث می‌شود لایه بیرونی آن‌ها به صورت لایه‌ی کشسان عمل کند [۳۶]. همین امر موجب روپایش دو

در اثر توازن نیروها از طریق سطح مشترک از فاز آب وارد توده سیال نفت می‌شود. ستون طراحی شده به اندازه‌ای بزرگ در نظر گرفته شده است که اثرات دیواره بر روی حرکت قطره قابل صرف‌نظر کردن است. بالای ستون باز و در تماس با اتمسفر است. قطر قطره نفت تولید شده توسط نازل کنترل می‌شود. نازل‌های مورد استفاده در انجام این آزمایش سوزن‌هایی با قطرهای داخلی ۰/۶ تا ۱/۶ میلی‌متر است. نازل از طریق یک لوله انعطاف‌پذیر به یک پمپ سرنگی متصل است که سرعت جریان ورودی را کنترل می‌کند. آزمایش‌ها در دبی حجمی ۰/۴ میلی‌لیتر بر دقیقه انجام شده است. این دبی به اندازه‌ای پایین هستند که در آن توازن بین نیروی کشش سطحی و نیروی شناوری تعیین کننده شکل قطره است. همچنین فاصله‌ی بین دو قطره به اندازه‌ای زیاد است که عملاً برهمکنشی بین آنها صورت نمی‌گیرد. سیالات مورد استفاده در این آزمایش‌ها آب مقطر در دمای آزمایش و نفت خام سنگین برگرفته از یکی از چاه‌های ایران در مناطق بنگستان است. خواص فیزیکی این مواد استفاده شده در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- مجموعه آزمایشگاهی، (الف) به صورت طر حواره، ۱: لامپ LED، ۲: دیفیوزر، ۳: شیر یک طرفه، ۴: پمپ سرنگی، ۵: نازل سامانه، ۶: قطره نفت در حال صعود در ستون مایع آب-نفت، ۷: ستون حاوی مایع، ۸: دوربین، ۹: سامانه پردازش تصویر؛ (ب) تصویر واقعی مجموعه؛ (ج) نمایش برداری نیروهای وارد بر قطره ی در حال صعود

برای تصویربرداری از دوربین مدل Canon SX540 Hs با سرعت 60frames/s و 1920×1080 pixel/frame استفاده شده است. همانطور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده است دوربین در جلوی



شکل ۲- مشخص کردن محدوده‌ی عملیاتی کار حاضر (بین خطوط نقطه چین) و مقایسه‌ی آن با نتایج گراس و همکاران [۳۹]

۳-۱- نسبت ابعاد

شکل ۳، تصویر حقیقی قطره در حال صعود در آب در نزدیکی فصل مشترک آب-نفت را برای دو قطر نازل ۰/۹ و ۱/۶ میلی‌متر نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشخص شده است، قطره نفت در هر دو حالت تقریباً بیضوی شکل است. از این رو نسبت ابعاد قطره (E) برای تمام آزمایشات اندازه‌گیری و در جدول ۳ آورده شده است. به نسبت بین بزرگترین قطر عمودی (زاویه ۹۰ درجه با محور افقی) و بزرگترین قطر افقی (زاویه صفر درجه با محور افقی)، نسبت ابعاد (Aspect Ratio) گفته می‌شود.

برای ذرات کروی نسبت ابعاد برابر یک است و هر چه مقدار این عدد از یک کمتر باشد، قطره از حالت کروی خارج شده و به شکل بیضوی در می‌آید. با نزدیک شدن نسبت ابعاد به صفر قطره شکل دوکی مانند به خود می‌گیرد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که در آزمایشات حاضر قطره‌ی نفتی به شکل بیضوی است و با افزایش قطر نازل، نسبت ابعاد قطره کاهش می‌یابد. به عبارتی با بزرگتر شدن قطره‌ی نفتی شکل آن از حالت کروی دورتر می‌شود. نتیجه حاصل با نتایج بدست آمده توسط رآو و همکاران [۲۴] که بر روی قطره نفت خام در حال صعود درون آب انجام شده است همخوانی نسبتاً بالایی دارد و تفاوت مشاهده شده تنها ناشی از حضور سورفکتانت (در کار رآو و همکاران [۲۴]) و اندازه قطر نازل به کار رفته در دو کار مذکور است. مقدار نسبت ابعاد بدست آمده در نتایج آنها برای حرکت قطره درون فاز آب مایع برابر ۰/۸۵ بدست آمده است که همانطور که مشخص است با نتایج کار حاضر مطابقت دارد. رآو و همکاران [۲۴] نشان دادند که شکل قطره نفت در آب خالص تقریباً بیضوی است و با افزودن سورفکتانت این نسبت کاهش می‌یابد.

سطح مایع به یکدیگر و در نتیجه الحاق قطره نفتی به سطح مشترک می‌شود [۱۹]. در این مطالعه ویژگی‌های شکلی و مدت زمان اقامت قطره در سطح مشترک مورد بررسی قرار گرفته است.

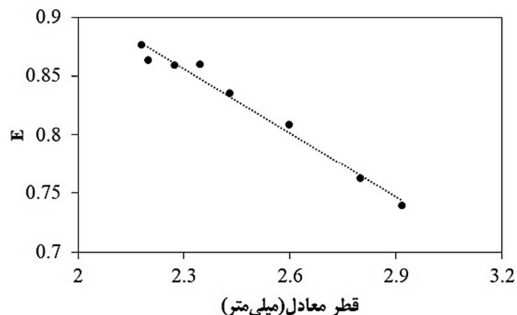
به منظور مطالعه‌ی نیروهای وارد بر قطره از اعداد بدون بعد رینولدز (Re)، اتوس (Eo) و عدد مورتن (Mo) استفاده شده است. عدد رینولدز $(Re = \rho_l d_{eq} V_l / \mu_l)$ نشان‌دهنده‌ی اثر لزجت است. عدد اتوس $(Eo = \rho_l g d_{eq}^2 / \sigma)$ که عدد باند (Bo) نیز نامیده می‌شود، در دینامیک سیالات نشان‌دهنده‌ی اهمیت نیروی گرانش نسبت به نیروهای کشش سطحی است. این عدد در ترکیب با عدد مورتن $(Mo = g \mu_l^4 \Delta \rho / \rho_l^2 \sigma^3)$ تعیین‌کننده‌ی شکل قطره در حال صعود است. مطالعات نشان می‌دهد که برای تشریح دینامیک قطرات و حباب‌های در حال صعود عدد اتوس مناسب‌تر از دو عدد رینولدز و مورتن است [۳۷، ۳۸]. مقدار اعداد بدون بعد مذکور در مطالعه‌ی حاضر در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مقدار اعداد بدون بعد رینولدز (Re)، اتوس (Eo) و مورتن (Mo) در قطرهای مختلف نازل

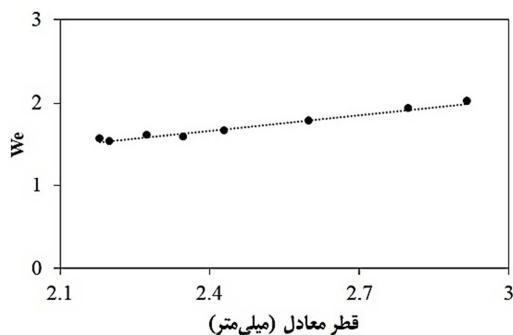
قطر نازل (میلی‌متر)	$Mo \times 10^7$	Eo	Re
۰/۶	۲/۵۰۲۶۸	۷/۸۷۲۲۱۸۵۸۹	۱۲۴/۹۷۸۸۷۶۴
۰/۷	۲/۵۰۲۶۸	۸/۰۱۷۳۳۵۵۵۶	۱۲۴/۲۸۷۶۴۰۴
۰/۸	۲/۵۰۲۶۸	۸/۵۷۳۲۷۹۰۴۵	۱۳۰/۲۵۵۶۱۸
۰/۹	۲/۵۰۲۶۸	۹/۱۳۳۳۰۳۶۳۴	۱۲۸/۰۵۸۳۳۷۱
۱/۲	۲/۵۰۲۶۸	۹/۷۸۹۳۵۴۹۳۶	۱۳۴/۵۵۱۷۵۲۸
۱/۴	۲/۵۰۲۶۸	۱۱/۱۹۷۷۵۲۲۲	۱۴۴/۰۲۲۴۷۱۹
۱/۵	۲/۵۰۲۶۸	۱۲/۹۸۶۷۴۲۲۲	۱۵۵/۸۸۷۶۴۰۴
۱/۶	۲/۵۰۲۶۸	۱۴/۱۰۴۴۰۳۷۹	۱۶۲/۹۰۳۰۸۷۶

در ابتدا به منظور اعتبار سنجی نتایج بدست آمده در این مطالعه، دامنه مقادیر اعداد بدون بعد بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی گراس و همکاران [۳۹] مقایسه شده است. نتایج آزمایشگاهی آنها محدوده‌ی وسیعی از اعداد رینولدز، اتوس و مورتن را شامل می‌شود. نتایج حاصل نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی بین سه عدد رینولدز، اتوس و مورتن است که در شکل ۲ نشان داده شده است. محدوده‌ی عملیاتی کار حاضر $(7 < Eo < 15)$ و $(120 < Re < 165)$ در شکل ۲ با خط‌چین مشخص شده است. مطابق شکل ۲ و نتایج گراس و همکاران [۳۹] محدوده‌ی مورد انتظار برای عدد بدون بعد مورتن برای شرایط بدست آمده $8 \times 10^{-7} < Mo < 7.5 \times 10^{-8}$ است. این در حالی است که عدد مورتن بدست آمده در آزمایشات حاضر مطابق آنچه که در جدول ۲ آورده شده است برابر با $Mo = 2.5027 \times 10^{-7}$ است که با داده‌های گراس و همکاران [۳۹] مطابقت دارد و تأییدکننده‌ی نتایج بدست آمده است.

تطابق است. علاوه بر آن وانگ و همکاران [۴۰] با آزمایشاتی که بر حرکت حباب پوشش داده شده با اکتان و روغن سیلیکون از بین سیال آب انجام دادند، نشان دادند که برای حباب‌هایی با قطر بین ۲/۵ تا ۵/۵ میلی‌متر با افزایش قطر نسبت ابعاد از ۰/۹ به ۰/۶ کاهش می‌یابد که با نتایج ارائه شده در شکل حاضر نیز هم‌خوانی دارد.

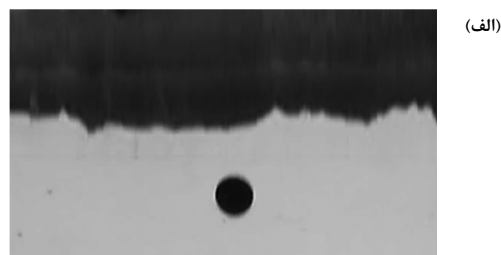


شکل ۴- وابستگی نسبت ابعاد قطره به قطر معادل آن در نزدیکی سطح مشترک

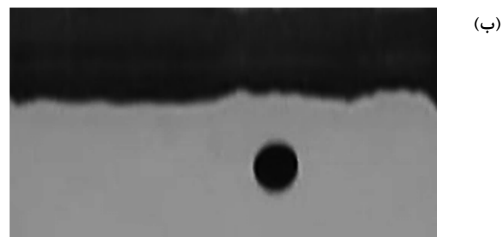


شکل ۵- تغییرات عدد وبر برحسب قطر معادل قطره

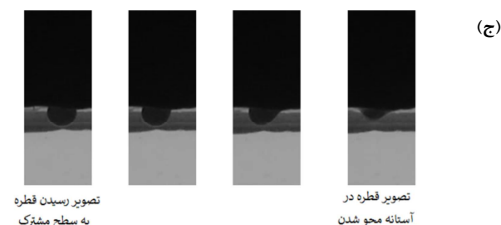
همانطور که گفته شد در آزمایشات حاضر آب، فاز پیوسته و قطرات نفت فاز پراکنده هستند. بنابراین، به دلیل اختلاف چگالی بین فاز پیوسته و پراکنده، قطرات نفت به سمت بالا حرکت کرده و در شرایطی که قطره به سطح می‌رسد، انرژی جنبشی حرکت آن در فصل مشترک فاز باعث الحاق قطره نفت در بالک نفت خواهد شد [۴۱]. انرژی جنبشی اعمال شده بر روی سطح قطره سبب تغییر شکل‌های مختلف قطره می‌شود. به‌طور کلی ابتدا، قطره در سطح مشترک کشیده می‌شود و سپس ممکن است به قطرات کوچک ثانویه تبدیل شود. قبل از پیوستن قطره باید برخی از شرایط مانند زمان ماند و اندازه قطره باید مورد بررسی قرار گیرد [۴۲]. در پیوستن قطرات، تعامل بین نیروهای هیدرودینامیک در اثر تلاطم و کشش سطحی بین قطره و سیال مجاور نقش عمده‌ای دارند. رابطه نیروی هیدرودینامیکی و کشش سطحی درونی قطره توسط عدد بدون بعد وبر ($We = \frac{\rho V_{eq}^2 d_{eq}}{\sigma}$) بیان می‌شود. بنابراین، افزایش قطر قطره نفت باعث افزایش عدد وبر خواهد شد که این افزایش نشان می‌دهد که نیروی هیدرودینامیکی به نیروی کشش سطحی درونی قطره غالب شده و باعث کمتر شدن زمان اقامت قطره در فصل مشترک خواهد شد. جدول ۴، مقادیر عدد بدون بعد وبر برای قطره‌های متفاوت را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳- تصویر قطره نفت در حال صعود در آب پیش از رسیدن به سطح مشترک آب-نفت در قطرهای متفاوت نازل (الف) ۰/۹ میلی‌متر و (ب) ۱/۶ میلی‌متر؛ (ج) تصویر محو شدن قطره در سطح مشترک

جدول ۳- نسبت ابعاد قطره نفت در قطرهای نازل متفاوت

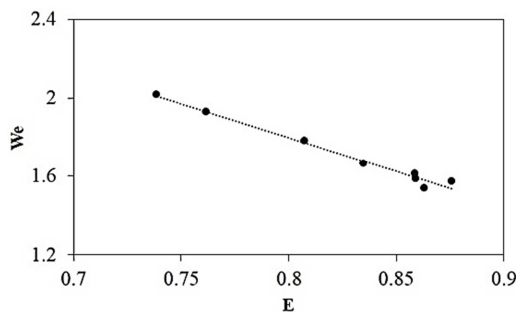
قطر نازل (میلی‌متر)	قطر معادل (میلی‌متر)	E
۰/۶	۲/۱۸	۰/۱۸۷۶۱۴۶۷۸۹
۰/۷	۲/۲	۰/۱۸۶۳۱۸۱۸۱۸
۰/۸	۲/۲۷۵	۰/۱۸۵۸۹۰۱۰۹۹
۰/۹	۲/۳۴۸	۰/۱۸۵۹۴۵۴۸۵۵
۱/۲	۲/۴۳۱	۰/۱۸۳۵۰۴۷۳۰۶
۱/۴	۲/۶	۰/۱۸۰۷۶۹۲۳۰۸
۱/۵	۲/۸	۰/۱۷۶۱۷۸۵۷۱۴
۱/۶	۲/۹۱۸	۰/۱۷۳۸۸۶۲۳۳۴

در شکل ۴ تغییرات نسبت ابعاد برحسب قطر معادل آن رسم شده است طبق تعریف قطر معادل برابر است با قطر کره‌ای که مساحت آن برابر با مساحت قطره است، بنابراین $d_{eq} = \sqrt{4A/\pi}$ که در آن A سطح تصویر شده قطره می‌باشد. همانطور که در شکل مشخص است تغییرات نسبت ابعاد با قطر معادل تقریباً خطی است. با توجه به مطالعات راو و همکاران [۲۴] چون هیچگونه سورفکتانتی در فاز پیوسته وجود ندارد که باعث افزایش نیروی برشی شود، شکل قطره‌ها تحت نیروهای هیدرودینامیکی کاملاً از حالت کروی خارج نشده باشد و همچنین با توجه نتایج کسیم و لانگمیر [۲۶] در عدد رینولدز بالا در نزدیک سطح، شکل قطره پهن‌تر و شکل بیضوی به خود می‌گیرد. این برداشت با مشاهده‌ها و داده‌های بدست آمده از آزمایشات حاضر در

جدول ۴- مقدار عدد بدون بعد وبر در قطرهای مختلف نازل

We	قطر معادل (میلی‌متر)	قطر نازل (میلی‌متر)
۱/۵۶۹۶۰	۲/۱۸	۰/۶
۱/۵۲۶۳۳	۲/۲	۰/۷
۱/۶۱۰۰۴	۲/۲۷۵	۰/۸
۱/۵۸۲۹۴۳	۲/۳۴۸	۰/۹
۱/۶۶۳۳۰۹	۲/۴۳۱	۱/۲
۱/۷۸۰۲۷۷	۲/۶	۱/۴
۱/۹۲۶۹۴۴	۲/۸	۱/۵
۲/۰۱۳۶۶۳	۲/۹۱۸	۱/۶

شکل ۵، تغییرات عدد وبر نسبت به قطر معادل قطره را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش قطر نازل و در نتیجه افزایش قطر معادل قطره، مقدار عدد وبر به صورت خطی افزایش می‌یابد که همانطور که گفتیم نشان می‌دهد نیروی هیدرودینامیکی نسبت به نیروی کشش سطحی درونی قطره بیشتر و در نتیجه باعث کمتر شدن زمان اقامت قطره در فصل مشترک شده است. علاوه بر آن مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از شکل‌های ۴ و ۵ حاکی از آن است که با افزایش نسبت ابعاد، مقدار عدد وبر کاهش می‌یابد که در شکل ۶ این تغییرات نمایش داده شده است.

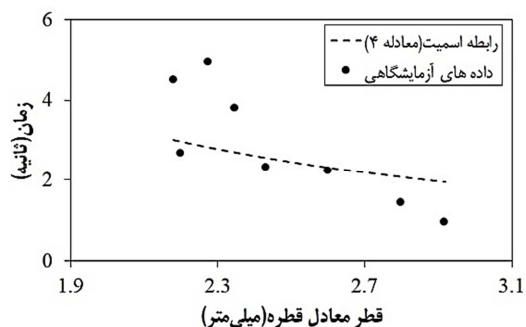


شکل ۶- وابستگی نسبت قطر قطره به عدد وبر

۳-۲- زمان ماند قطره در سطح مشترک

در شکل ۷ زمان ماند قطره در سطح مشترک نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تغییرات زمان ماند با قطر قطره از روند یکنواختی پیروی نمی‌کند. به عبارتی با افزایش قطر سرعت رسیدن قطره به سطح مشترک افزایش می‌یابد. همین امر سبب تسریع در تشکیل لایه‌ی مشترک به دو فاز می‌شود که نتیجه‌ی آن کاهش زمان ماند خواهد بود. از طرفی هرچه حجم قطره زیاد شود، حجم مایعی که قرار است به مایع بالایی ملحق شود بیشتر شده از این رو مدت زمان بیشتری برای محو شدن قطره نیاز است. این دو اثر متضاد باعث غیریکنواختی در تغییرات زمان ماند شده است. علاوه بر آن، برخورد قطره با سطح مشترک سبب ایجاد ناپایداری در آن و به عبارتی موج‌دار شدن آن می‌شود. بدین ترتیب سطح مشترک ابتدا انرژی حاصل از برخورد را در خود ذخیره کرده و سپس آن را آزاد می‌کند [۴۳]. این موج‌دار شدن سطح مشترک نیز شدیداً در غیر یکنواختی زمان ماند تأثیرگذار است. مشابه این نتیجه نیز در کار سینگ و بارت [۴۴] زمانی که محو شدن حباب در سطح مشترک سیالاتی با اختلاف

چگالی تقریباً مشابه کار حاضر را مطالعه می‌کردند نیز مشاهده شده است. موآ و همکاران [۳۶] نیز در مطالعه‌ی خود بر روی حرکت حباب در سطح مشترک آب و روغن نیز چنین غیریکنواختی را مشاهده کرده‌اند.



شکل ۷- تغییرات زمان ماند بر حسب قطر قطره

با توجه به غیریکنواختی در زمان ماند که دلایل آن در قسمت قبل توضیح داده شد، تاکنون معادلات تجربی کمی برای محاسبه‌ی زمان ماند در سطح مشترک برای قطره ارائه شده است. در اینجا به برخی از این معادلات اشاره خواهیم کرد. رابطه‌ی استفان-رینولدز [۴۵] اولین رابطه‌ی است که در این زمینه به شکل زیر ارائه شد:

$$t = \frac{\mu_c \Delta \rho g d^2}{4\sigma^2 L^2} \quad (1)$$

در این رابطه فرض شده است که سطح مشترک مایع به صورت صلب عمل می‌کند و بنابراین از موجی شدن آن در اثر برخورد قطره صرف‌نظر شده است. هارتلند [۴۶] نیز رابطه‌ی نظری-تجربی برای محاسبه‌ی زمان ماند به صورت زیر ارائه کرده است:

$$t = \frac{3}{16\pi} n^2 \mu_c \left(\frac{d^2}{\sigma} \right) \left(\frac{1}{L^2} \right) \quad (2)$$

که در آن n تعداد سطوح ساکن تداخل کننده در تشکیل لایه‌ی ایجاد شده در زمان پیوستن قطره است. روابط مشابهی نیز توسط جفری-لاوسون [۴۷] و اسمیت [۴۸] برای محاسبه‌ی زمان ماند بر حسب متغیرهای مستقل ارائه شده است:

$$t = 1.32 \times 10^5 \left(\frac{\Delta \rho g d^2}{\sigma} \right)^{0.32} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.18} \left(\frac{\mu_c d}{\sigma} \right) \quad (3)$$

$$t = 3.1 \times 10^3 \left(\frac{\Delta \rho g d^2}{\sigma} \right)^{-1.24} \left(\frac{\mu_c}{\mu_c} \right)^{1.03} \left(\frac{\mu_c d}{\sigma} \right) \quad (4)$$

خدیو-پارسی [۴۹] نیز رابطه‌ی محاسبه‌ی زمان ماند به صورت زیر ارائه کرده است:

$$t = 4.846 \times 10^3 \left(\frac{\Delta \rho g d^2}{\sigma} \right)^{1.512} \left(\frac{L}{d} \right)^{0.651} \left(\frac{\mu_c}{\mu_c} \right)^{0.203} \left(\frac{\mu_c d}{\sigma} \right) \quad (5)$$

از بین روابط مذکور تنها رابطه‌ی اسمیت (معادله‌ی ۴) تغییرات زمان ماند نسبت به قطر قطره را نزولی پیش‌بینی کرده است. همچنین مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی حاضر با معادلات مذکور نشان می‌دهد که

۶- مراجع

- [1] Brakstad OG., Nordtug T. and Throne-Holst M., Biodegradation of dispersed Macondo oil in seawater at low temperature and different oil droplet sizes. *Marine pollution bulletin*. Vol. 93, pp.144-52, 2015.
- [2] Tao Z., Bullard S. and Arias C., High numbers of *Vibrio vulnificus* in tar balls collected from oiled areas of the north-central Gulf of Mexico following the 2010 BP Deepwater Horizon oil spill. *Ecohealth*, Vol. 8, pp. 507-11, 2011.
- [3] Dave D. and Ghaly AE., Remediation technologies for marine oil spills: A critical review and comparative analysis. *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 7, pp 423, 2011.
- [4] Sterlmg Ca. and Scriven L., Interfacial turbulence: hydrodynamic instability and the Marangoni effect. *AIChE Journal*. Vol. 5, pp. 514-523, 1959.
- [5] Hennenberg M., Bisch PM., Vignes-Adler M. and Sanfeld A., Mass transfer, Marangoni effect, and instability of interfacial longitudinal waves: I. Diffusional exchanges. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 69, pp. 128-137, 1979.
- [6] Hennenberg M., Bisch PM., Vignes-Adler M. and Sanfeld A., Mass transfer, marangoni effect, and instability of interfacial longitudinal waves. II. Diffusional exchanges and adsorption—desorption processes. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 74, pp. 495-508, 1980.
- [7] Nakache E., Dupeyrat M. and Vignes-Adler M., Experimental and theoretical study of an interfacial instability at some oil—Water interfaces involving a surface-active agent: I. Physicochemical description and outlines for a theoretical approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 94, pp. 187-200, 1983.
- [8] Slavtchev S. and Mendes M., Marangoni instability in binary liquid—liquid systems. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 47, pp. 3269-78, 2004.
- [9] Slavtchev S., Hennenberg M., Legros J-C. and Lebon G., Stationary solutal Marangoni instability in a two-layer system. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 203, pp. 354-368, 1998.
- [10] Slavtchev S., Kalitzova-Kurteva P. and Mendes M., Marangoni instability of liquid—liquid systems with a surface-active solute. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 282, pp. 37-49, 2006.
- [11] Dong T., Wang F., Weheliye WH. and Angeli P., Surfing of drops on moving liquid—liquid interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.892, 2020.
- [12] Angeli P. and Hewitt GF., Drop size distributions in horizontal oil-water dispersed flows. *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 3, pp. 133-143, 2000.
- [13] Sajjadi S., Zerfa M. and Brooks BW., Dynamic behaviour of drops in oil/water/oil dispersions. *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 663-75, 2002.
- [14] Lasheras J., Eastwood C., Martinez-Bazán C. and Montanes J., A review of statistical models for the break-up of an immiscible fluid immersed into a fully developed turbulent flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 28, pp. 247-78, 2002.
- [15] Cox B., On driving a viscous fluid out of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 14, pp. 81-96, 1962.
- [16] Taylor T. and Acrivos A., On the deformation and drag of a falling viscous drop at low Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 18, pp. 466-76, 1964.
- [17] Wellek R., Agrawal A. and Skelland A., Shape of liquid drops moving in liquid media. *AIChE Journal*, Vol. 12, pp. 854-62, 1966.
- [18] Soo SL., Fluid dynamics of multiphase systems. *Waltham, Mass, Blaisdell Publishing Co*, Vol. 524, pp. 206, 1967.
- [19] Clift R., Grace J. and Weber M., Bubbles, Drops and Particles, *Academic Press, New York*, Vol 5 Nos 1-4, 1978.
- [20] Oshaghi MR., Shahsavari M., Afshin H. and Firoozabadi B., Experimental investigation of the bubble motion and its ascension in a quiescent viscous liquid. *Experimental Thermal and Fluid Science* Vol. 103, pp. 274-85. 2019.
- [21] Haycock P. and Garner F., Circulation in liquid drops. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*

به جز رابطه‌ی اسمیت هیچ‌کدام قادر به پیش‌بینی زمان ماند آزمایشات حاضر به صورت صحیح نمی‌باشند. در شکل ۷ نتایج بدست آمده از رابطه‌ی اسمیت با نتایج آزمایشگاهی حاضر مقایسه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر حرکت قطره نفت درون سیال ساکن آب و عبور آن از سطح مشترک آب-نفت مورد بررسی قرار گرفت. حرکت قطره درون این سیال بوسیله یک دوربین تصویر برداری شد که به کمک پردازش تصاویر بدست آمده و محاسبات صورت گرفته بر روی نتایج، پارامترهای نسبت ابعاد، زمان ماند و اعداد بی بعدی مانند عدد وبر بدست آمدند. نتایج بدست آمده در این آزمایش نشان می‌دهد شکل قطره در حال صعود به صورت بیضوی است که این اتفاق به دلیل نیروهای وارد شده بر روی سطح نفت می‌باشد. علاوه بر آن نتایج نشان می‌دهد با بزرگتر شدن قطره‌ی نفتی شکل آن از حالت کروی دورتر می‌شود. رابطه عدد بدون وبر برای معرفی نیروهای هیدرودینامیکی و کشش سطحی درونی قطره استفاده می‌شود که با توجه به رابطه آن می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش قطر قطره، عدد وبر افزایش یافته و در نتیجه نیروی هیدرودینامیکی به نیروی کشش سطحی درونی قطره غالب شده است و باعث شده زمان ماند قطره در فصل مشترک آب-نفت کاهش یابد. به دلیل تضاد بین کاهش زمان ماند در نتیجه‌ی افزایش سرعت در اثر بیشتر شدن قطر قطره و افزایش زمان محو شدن به سبب افزایش حجم قطره، زمان ماند قطره از روند یکنواختی پیروی نمی‌کند. از مقایسه‌ی داده‌های آزمایشگاهی و معادلات ارائه شده مشخص شد که معادلات در توافق بسیار خوبی با داده‌های آزمایشگاهی هستند.

۵- نمادها

A	مساحت قطره (mm^2)
Bo	عدد بانند
d_{eq}	قطر معادل (mm)
E	نسبت ابعاد قطره
Eo	عدد اتوس
g	شتاب گرانش (m/s^2)
Mo	عدد مورتن
Re	عدد رینولدز
t	زمان ماند (s)
We	عدد وبر
μ_c	لزجت فاز پیوسته (cp)
μ_d	لزجت فاز پراکنده (cp)
$\Delta\rho$	اختلاف چگالی بین دو فاز (kg/m^3)
ρ_d	چگالی فاز پراکنده (kg/m^3)
ρ	چگالی فاز پیوسته (kg/m^3)
σ	تنش سطح بین دو فاز (N/m)

- [43] Singh K., Gebauer F. and Bart HJ., Bouncing of a bubble at a liquid-liquid interface. *AIChE Journal*. Vol. 63, pp. 3150-7, 2017.
- [44] Singh K. and Bart H-J., Passage of a bubble through the interface between a shear-thinning heavier liquid and a Newtonian lighter liquid. *Chemical Engineering Communications*, Vol. 207, pp. 790-807, 2020.
- [45] Sinegribova O., Andreev A., Voronin O., Dvoeglazov K. and Logsdail D., The Influence of Silicic Acid on the Coalescence of Drop in the Extraction System TBP-HNO₃ (HCl). *Solvent Extraction in the Process Industries*. Vol. 3, 1993.
- [46] Hartland S., Coalescence in Dense Packed Dispersion, Ivanov, IB, Ed., in "Thin Liquid Films". *Marcel Dekker, New York, NY*; 1988.
- [47] Jeffreys G. and Davies G., Coalescence of liquid droplets and liquid dispersion. *Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction*, Pergamon, pp. 495-584, 1971.
- [48] Laddha G. and Degaleesan T., *Dispersion and coalescence. Handbook of Solvent Extraction*, Wiley New York, 1983.
- [49] Khadiv PP. and Mousavian SMA., Suggestion of new correlations for drop/interface coalescent phenomena in the and absence and presence of single surfactant. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 79-88, 2004.
- [22] Winnikow S. and Chao B., Droplet motion in purified systems. *The Physics of Fluids*, Vol 9, pp. 50-61, 1966.
- [23] Kurimoto R., Hayashi K. and Tomiyama A., Terminal velocities of clean and fully-contaminated drops in vertical pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 49, pp. 8-23, 2013.
- [24] Rao A., Reddy RK., Ehrenhauser F., Nandakumar K., Thibodeaux LJ., Rao D., et al., Effect of surfactant on the dynamics of a crude oil droplet in water column: Experimental and numerical investigation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. Vol. 92, pp. 2098-114, 2014.
- [25] Blanchette F. and Bigioni TP., Dynamics of drop coalescence at fluid interfaces. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 620, pp. 333, 2009.
- [26] Mohamed-Kassim Z. and Longmire EK., Drop impact on a liquid-liquid interface. *Physics of Fluids*, Vol. 15, pp. 3263-73, 2003.
- [27] Reynolds O., On the floating of drops on the surface of water depending only on the purity of the surface. *Proc Lit Phil Soc Manchester*. Vol. 21, 1881.
- [28] Cockbain E. and McRoberts T., The stability of elementary emulsion drops and emulsions. *Journal of Colloid Science*, Vol. 8, pp.440-51, 1953.
- [29] Linton M. and Sutherland K., The coalescence of liquid drops. *Journal of Colloid Science*, Vol. 11, pp. 391-7, 1956.
- [30] Charles G. and Mason S., The mechanism of partial coalescence of liquid drops at liquid/liquid interfaces. *Journal of Colloid Science*, Vol. 15, pp. 105-22, 1960.
- [31] Gopinath A. and Koch DL., Collision and rebound of small droplets in an incompressible continuum gas. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 454, pp. 145, 2002.
- [32] Burrill K. and Woods D., Film shapes for deformable drops at liquid-liquid interfaces. III. Drop rest-times. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 42, pp. 35-41, 1973.
- [33] Burrill K. and Woods D., Film shapes for deformable drops at liquid-liquid interfaces. II. The mechanisms of film drainage. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 42, pp. 15-34, 1973.
- [34] Grace J. and TH N., Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids. *Trans. Instit. Chem. Engrs*, Vol. 54, No. 3, pp. 167-173, 1976.
- [35] Karimi S., Shafiee M., Abiri A. and Ghadam F., The drag coefficient prediction of a rising bubble through a non-Newtonian fluid. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52, pp. 71-80, 2019.
- [36] Mao N., Kang C., Teng S. and Mulbah C., Formation and detachment of the enclosing water film as a bubble passes through the water-oil interface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 586, pp. 124236, 2020.
- [37] Karimi S., Shafiee M., Ghadam F., Abiri A. and Abbasi H., Experimental study on drag coefficient of a rising bubble in the presence of rhamnolipid as a biosurfactant. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2020 (in press).
- [38] Zhang C., Zhou D., Sa R. and Wu Q., Investigation of single bubble rising velocity in LBE by transparent liquids similarity experiments. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 108, pp.204-13, 2018.
- [39] Grace J., Shapes and velocities of bubbles rising in infinite liquid. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 51, pp.116-20, 1973.
- [40] Wang S., Zhang Y., Meredith JC., Behrens SH., Tripathi MK. and Sahu KC., The dynamics of rising oil-coated bubbles: experiments and simulations. *Soft matter*, Vol. 14, pp. 2724-34, 2018.
- [41] Zawala J., Krasowska M., Dabros T. and Malysa K., Influence of bubble kinetic energy on its bouncing during collisions with various interfaces. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 85, pp. 669-78, 2007.
- [42] Komrakova AE., Single drop breakup in turbulent flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 97, pp. 2727-39, 2019.