



## Experimental Investigation of Bubble-Droplet Coalescence Phenomenon in Water

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Hosseinalipour S.M.<sup>\*1</sup> PhD,  
Ami Ahmadi H.<sup>1</sup> MA,  
Ebadi A.<sup>1</sup> MSc,  
Abdollahi Gol M.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Hosseinalipour S.M, Ami Ahmadi H, Ebadi A, Abdollahi Gol M. I. Experimental Investigation of Bubble-Droplet Coalescence Phenomenon in Water. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(1):241-250.

<sup>1</sup>Energy, Water & Environment Research Lab, Mechanical Engineering School, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Energy, Water & Environment Research Lab, Mechanical Engineering School, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran  
Phone: +98 (21) 77491228  
Fax: +98 (21) 77240488  
alipour@iust.ac.ir

#### Article History

Received: February 20, 2019  
Accepted: May 7, 2018  
ePublished: January 01, 2020

### ABSTRACT

Nowadays, the interaction of oil droplets with gas bubbles plays an important role in many industrial, environmental and biological processes. Therefore, in this paper, the outcome of a collision between a silicon oil droplet and an air bubble in water has studied in order to identify the effective parameters in this process. For this purpose, an especial setup was built and four series of experiments in both dynamic (in which the relative velocity of collision is equal to the bubble velocity due to the Buoyancy force) and static conditions were carried out. The results of these experiments were presented and discussed in the form of several tables and pictures. In these experiments, a high-speed camera and image processing were used to gain a better understanding about bubble-drop coalescence qualitatively, and to obtain some quantitative information such as contact time, velocity, and kinetic and interfacial energies of bubbles and drops during the impact. The results of this study show that in addition to the spreading coefficient, the kinetic energy of bubble/droplet in the collision and their contact time, are also determinative parameters in the determination of the outcome of a collision. In the dynamic and static states, the effect of kinetic energy and contact time are more effective, respectively.

**Keywords** Bubble-Droplet Interaction; Spreading Coefficient; Multi-Phase Interaction; Bubble; Droplet

### CITATION LINKS

[1] Foam-oil interaction in porous ... [2] Oil removal from produced water during laboratory- and ... [3] Induction and coverage times for crude oil droplets ... [4] Photographic observations showing spreading and non-spreading ... [5] Performance analysis of a novel compact ... [6] Bubble-bubble interaction in aqueous ... [7] Drop and bubble micro manipulator (DBMM)-a unique ... [8] Microfluidic study on the attachment of crude ... [9] Gas/liquid/liquid three-phase flow patterns and ... [10] Coalescence of bubbles covered by ... [11] The influence of interfacial ageing and temperature ... [12] Flow induced coalescence of drops in a viscous ... [13] Modeling film drainage and coalescence of drops in a viscous ... [14] Direct measurement of the interaction of model food ... [15] Bubble coalescence in pure ... [16] The modelling of coalescence processes in ... [17] Effect of insoluble surfactants on drainage and rupture ... [18] Coalescence of drops in a turbulent flow ... [19] Measurement of coalescence frequency in an agitated ... [20] A literature review on mechanisms and models for the coalescence ... [21] Bubble coalescence and break-up in air-sparged ... [22] Breakage and coalescence of drops in a batch stirred ... [23] A transport equation for the interfacial area density applied ... [24] From single drop coalescence to droplet swarm-scale-up considering ... [25] Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: A review ... [26] Compound sessile ... [27] Homo- and hetero-interactions between air bubbles and oil droplets measured ... [28] Inertial dynamics of air bubbles crossing ... [29] Role of bubble-drop interactions and salt addition ... [30] Dynamics of a bubble bouncing at a liquid/liquid/gas ... [31] Nanoemulsions obtained via bubble-bursting at a compound ... [32] Satellite formation during bubble transition through an ... [33] Stabilization of thin liquid films by repulsive van der Waals ... [34] Four reversible and reconfigurable structures for ... [35] Microfluidic production of multiple emulsions and functional ... [36] Liquid encapsulation by binary collisions of immiscible liquid ... [37] Recent advances in multiple emulsions and their ... [38] Three-phase interactions in shear and electrical ... [39] Coalescence of two immiscible liquid ... [40] The influence of approach velocity on bubble ... [41] Influence of bubble kinetic energy on its bouncing during collisions ... [42] Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater ... [43] Bubble colloidal AFM probes formed from ultrasonically generated ... [44] Bubble meets droplet: Particle-assisted reconfiguration of wetting morphologies in colloidal multiphase ...

## بررسی عوامل تأثیرگذار در پدیده ائتلاف قطره- حباب درون آب به روش تجربی

سیدمصطفی حسینیعلی پور\* PhD

آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

حسام آملی احمدی MA

آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

عادل عبادی MSc

آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

محمد عبدالمولی گل MSc

آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

### چکیده

امروزه پدیده برهم‌کنش قطرات نفتی/روغنی و حباب‌های گازی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، محیط زیستی و بیولوژیکی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. از این رو در این مقاله نتیجه برخورد یک قطره از جنس روغن سیلیکون با حباب هوا درون محیط ثالث آب با هدف تعیین پارامترهای اثرگذار در این پدیده، مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور مدار آزمایشگاهی خاصی ساخته شده و چهار سری آزمایش در دو حالت برهم‌کنش‌های استاتیک و برخورد دینامیک (اختلاف سرعت و صعود ناشی از نیروی شناوری وارد بر حباب) طراحی شده و نتایج آن در قالب چندین جدول و شکل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این آزمایش‌ها برای فهم و شناخت بهتر پدیده به لحاظ کیفی و نیز برای استخراج اطلاعات کمی از قبیل زمان تماس، سرعت و انرژی‌های جنبشی و سطحی در لحظه برخورد، از دوربین سرعت بالا و پردازش تصاویر ضبط شده بهره گرفته شد. نتایج به دست آمده از این آزمایش‌ها حاکی از آن است که علاوه بر ضریب پخش، انرژی جنبشی و زمان تماس نیز در *Determine the outcome of a collision* تأثیر گذار خواهد بود که در حالت دینامیک اثربخشی انرژی جنبشی و در حالت استاتیک تأثیر زمان تماس بیشتر مشهود است.

**کلیدواژه‌ها:** ائتلاف قطره حباب، ضریب پخش، برهم‌کنش چندفازی، حباب، قطره

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۲/۱۷

\*نویسنده مسئول: alipour@iust.ac.ir

### ۱- مقدمه

جریان‌های چندفازی همراه با قطرات و حباب‌ها از جمله جریان‌های کاربردی و متداول در صنایع مختلف از نفت و گاز و پتروشیمی گرفته تا صنایع غذایی و آرایشی-بهداشتی، زیست‌محیطی و چپ‌های میکروسیالی به‌شمار می‌روند. اینگونه جریان‌ها با توجه به حضور سطوح مشترک و فازهای مختلف، عموماً با پدیده‌های جالب توجه و در عین حال پیچیده‌ای همراه‌اند.

در گروهی از این جریان‌ها قطرات مایع درون مایع امتزاج‌ناپذیر دیگری پراکنده شده‌اند که اصطلاحاً به آن‌ها امولسیون گفته می‌شود. در گروهی دیگر حباب‌های گازی، فاز پراکنده بوده و یک

محیط مایع به‌عنوان فاز پیوسته عمل نموده که آن‌ها را فوم می‌نامند. اما گروهی دیگر از جریان‌ها وجود دارند که در آن‌ها قطرات مایع و حباب‌های گازی همزمان وجود دارند که این جریان‌ها به نوعی متشکل از هر دوی امولسیون و فوم هستند. در این نوع از جریان‌ها پایداری فیلم نازک مایع شکل‌گرفته بین قطرات و حباب‌ها ممکن است متفاوت از فیلم‌های امولسیونی و فومی رفتار نماید. از این رو برخی از محققان به اینگونه فیلم‌ها واژه فیلم شبه امولسیونی (Pseudo Emulsion) اطلاق نمودند [1].

این نوع از جریان‌ها که در این مقاله مورد توجه هستند، به‌عنوان نمونه در فلوتاسیون گازی (Gas Flotation) برای جداسازی قطرات نفت از آب همراه در میادین نفتی و نیز تصفیه آب و فاضلاب‌های صنعتی [2-5]، در فرآیند ازدیاد برداشت نفت [1]، مواد غذایی مانند بستنی [6,7]، سیستم‌های میکروسیالی برای فرآیندهای جداسازی و واکنش‌های شیمیایی [8,9] مورد استفاده قرار می‌گیرند. شناخت پدیده‌های مؤثر بر برهم‌کنش و ائتلاف قطرات و حباب‌ها از جمله مواردی است که نقشی کلیدی و مهم در کنترل فرآیندهای مذکور خواهد داشت. از این رو پژوهشگران زیادی تا به امروز به تحقیق پیرامون چگونگی این پدیده پرداخته‌اند. البته تحقیقات پیرامون این موضوع به‌دلیل پیچیدگی‌های موجود در آن، در وهله اول ساده سازی شده و صرفاً پیرامون ائتلاف ذرات همسان بوده است که این مساله هم‌اکنون نیز موضوعی مورد تحقیق است. اولین تحقیقات در این زمینه شامل شناسایی مکانیزم‌های ائتلاف ذرات سیالی همسان (قطره-قطره، حباب-حباب) بوده است. لازم به توضیح است که واژه ائتلاف (Coalescence) عموماً در رابطه با ادغام دو ذره سیالی همسان توسط محققان به‌کار گرفته شده است، اما در این پژوهش نیز با توجه به نبود واژه جایگزین برای اتصال ذرات غیرهم‌نوع، در ترکیب حباب-قطره، از واژه ائتلاف استفاده می‌شود. در ادبیات فن از واژگانی همچون پخش (Spreading) قطره روی حباب و احاطه (Coverage) حباب توسط قطره نیز برای این پدیده استفاده شده است [3].

محققان مختلف از منظرهای متفاوتی به بررسی این پدیده پرداخته‌اند. برخی از محققان بیشتر به‌صورت کیفی مراحل مختلف ائتلاف، از نزدیک شدن دو ذره سیالی تا تخلیه فیلم بینابینی و شکست آن و نهایتاً ادغام شدن دو ذره را با یکدیگر مورد مطالعه قرار داده‌اند [10, 11].

برخی دیگر سعی نموده‌اند تا با ایجاد شرایط کنترل‌شده همچون نرخ برش ثابت یا سرعت برخورد ثابت، به کمک آنالیز ابعادی، اعداد بدون بعد تأثیرگذار در مساله و ارتباط آن‌ها با ضخامت بحرانی شکست فیلم (Hcritical)، زمان تخلیه فیلم (Tdrainage)، ادغام یا عدم ادغام ذرات را پیش‌بینی نمایند [12-14].

گروهی دیگر از محققان گام را فراتر برده و در راستای مدل‌سازی و فرمولاسیون ائتلاف قدم برداشته‌اند [15-22]. بدین منظور عمدتاً از سه رویکرد مختلف بهره گرفته می‌شود. تئوری اول، مدلی تحت عنوان سرعت نزدیکی بحرانی (Critical Approach Velocity Model)

از یک سطح مشترک دوفازی، برخورد و برهم‌کنش دو قطره مایع امتزاج‌ناپذیر درون سیال ثالث<sup>[34-39]</sup> و برخورد حباب- قطره درون محلول‌های آبی یا سایر مایعات<sup>[3,8,29]</sup> تقسیم می‌شوند که در ادامه به برخی از مهم‌ترین مطالعات تجربی انجام‌شده در این حوزه‌ها اشاره می‌شود.

کیرکپاتریک و لاکت<sup>[40]</sup> اولین کسانی بودند که اثر انرژی جنبشی حباب بر زمان ائتلاف آن با سطح مشترک آب- هوا (سطح آزاد) را بررسی نمودند. این گروه، زمان ائتلاف حباب‌های نسبتاً بزرگ (5mm) برخوردکننده با سطح آزاد آب مقطر را به‌عنوان تابعی از فاصله تشکیل حباب اندازه‌گیری نمودند. چسترز و هافمن<sup>[15]</sup> به‌صورت تئوری مکانیزم‌های عبور حباب یا بازگشت آن از سطح مشترک مایع- گاز را در مایعات خالص بررسی نمودند و مکانیزم دقیق‌تری برای بازگشت حباب از سطح ارائه نمودند. آنها بازگشت یا ائتلاف حباب با سطح مشترک را به‌عنوان تابعی از رقابت دو فرآیند در نظر گرفتند: الف) باریک‌شدن فیلم مایع بین حباب‌ها و ب) افزایش انرژی آزاد سیستم در اثر افزایش مساحت سطح حباب. افزایش انرژی آزاد سیستم در واقع از ائتلاف انرژی جنبشی حباب ناشی می‌شود.

زاولا و همکاران<sup>[41]</sup> تمایل حباب‌ها به بازگشت از سطح مشترک با افزایش انرژی جنبشی را ناشی از افزایش شعاع فیلم مایع بینابینی عنوان نمودند. شعاع‌های بزرگتر بدین معناست که برای رسیدن فیلم به ضخامت بحرانی شکست مدت زمان بیشتری لازم است و این زمان مورد نیاز بیشتر نیز به مفهوم احتمال بیشتر برای تبدیل شدن انرژی جنبشی حباب به انرژی سطحی است.

لی و همکاران<sup>[32]</sup> با استفاده از یک دوربین سرعت بالا (۶۲۰۰۰ فریم بر ثانیه)، برهم‌کنش یک حباب هوای در حال صعود را با یک سطح مشترک مایع- مایع (دو مایع امتزاج‌ناپذیر) مورد مطالعه قرار دادند و حرکت یا تغییر شعاع گردنه تماس بین حباب و سطح مشترک را بررسی نمودند. نتایج این گروه نشان می‌دهد که برای مایعات با لزجت نسبتاً کم، نرخ افزایش شعاع از رابطه قانون- توانی تبعیت می‌کند و ضریب آن بر پایه برآیند خالص سه کشش بین سطحی تعیین می‌شود. این گروه عدد اونزورگ بحرانی برای تشکیل حباب‌های پیرو (Daughter or Satellite Bubbles) در سیستم مورد مطالعه خود را مشخص نمودند.

گرتونی و همکاران<sup>[4]</sup> با ارائه تصاویری از فرآیند پخش و نیز عدم پخش شدن نفت روی حباب‌های گازی در محیط‌های متخلخل، اهمیت و ارتباط این پدیده برای تصفیه پساب‌های نفتی به‌وسیله فلوتاسیون گازی را مورد بررسی قرار دادند. بر این اساس در فلوتاسیون نفت موجود در پساب اتصال حباب- قطره نفت کلیدی‌ترین و به نوعی غالب‌ترین مرحله است<sup>[4, 42]</sup>.

فتخارداخواه و اوپه<sup>[3]</sup> با استفاده از روش کنترل‌کننده میکرو (Micromanipulator) حباب- قطره، برهم‌کنش بین قطرات نفت خام و حباب‌های هوا را به‌منظور محاسبه زمان‌های القاء (Induction) و پوشش (Coverage) قطره روی حباب، مورد

است که توسط لیر و موپیس<sup>[23]</sup> و مبتنی بر روابط تجربی ارائه شده است.

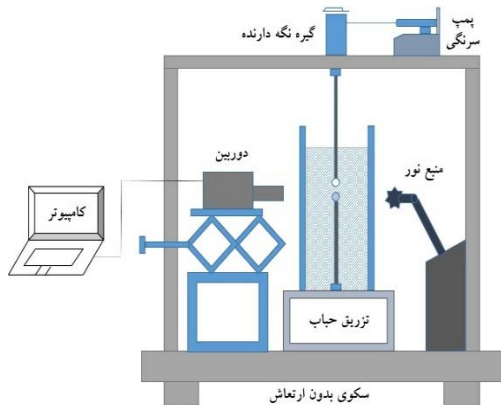
مدل دوم که اولین بار توسط هوارث<sup>[18,19]</sup> پیشنهاد شد، مدل انرژی نام دارد. براساس این مدل، ذرات سیال دارای انرژی‌های جنبشی و سطحی در نظر گرفته می‌شوند و شرط وقوع ائتلاف، غلبه انرژی جنبشی بر انرژی سطحی در لحظه برخورد است. دیدگاه سوم، مدل تخلیه فیلم (Drainage model) است که توسط محققان بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است<sup>[20,24,25]</sup>. در این مدل بازدهی ائتلاف براساس دو زمان مشخصه تخلیه فیلم و زمان تماس دو ذره سیال تعیین می‌شود.

علی‌رغم تلاش‌های صورت‌گرفته برای فهم و مدل‌سازی پدیده ائتلاف که از اواسط قرن گذشته آغاز شده و هنوز هم سالیانه تعداد بسیار زیادی مقاله در این راستا منتشر می‌شود، کماکان مدل واحدی برای پیش‌بینی این پدیده که تمامی فیزیک حاکم را در بر داشته و در تمامی حالات و شرایط صادق باشد، وجود ندارد. مساله ائتلاف با پیچیدگی‌های زیادی همراه است، چرا که برهم‌کنش دو سطح مشترک و تغییرات توپولوژیک آن‌ها در لحظه برخورد شامل وقوع پدیده‌هایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف است.

تمامی بحث‌های فوق و مدل‌های مطرح‌شده برای جریان‌های دوفازی و برهم‌کنش‌های قطره- قطره و حباب- حباب ارائه شده‌اند. در ادبیات فن در مقایسه با جریان‌های دوفازی، توجه بسیار کمتری معطوف به جریان‌های سه‌فازی (برهم‌کنش قطره- حباب) شده است. دلیل این امر اضافه‌شدن یک سطح مشترک دیگر و پیرو آن، افزایش تعداد پارامترهای درگیر در مساله و نهایتاً پیچیده‌تر شدن فرآیند برهم‌کنش است.

هنگامی که دو ذره سیال همانند (به‌عنوان مثال دو قطره یا دو حباب همسان) با یکدیگر ادغام می‌شوند، جسم حاصله یک تک‌قطره یا تک‌حباب پیوسته با حجمی متشکل از جمع دو جسم مجزای اولیه خواهد بود. حال در سوی دیگر، برای برهم‌کنش‌های چندگانه که دو جسم یا ذره سیال تغییر شکل‌پذیر و غیرقابل امتزاج (مانند یک حباب گازی و یک قطره نفتی هیدروکربنی یا یک قطره هیدروکربنی و یک قطره فولئورکربنی) نتیجه حاصله به‌مراتب پیچیده‌تر خواهد بود. در این حالت، دو جسم یک ساختار ترکیبی را تشکیل می‌دهند که به لحاظ مفهومی شبیه یک قطره یا عدسی روغنی شناور در سطح مشترک هوا- آب است و در آن هر ترکیبی از سطوح مشترک هوا- آب، روغن- آب و هوا- روغن ممکن است وجود داشته باشد<sup>[26,27]</sup>. با پیشرفت تکنولوژی و گسترش دوربین‌های سرعت بالا و نیز کامپیوترهایی با توان پردازشی بالا از یکسو و به‌وجود آمدن کاربردهای جدید برای جریان‌های سه‌فازی و اهمیت یافتن مطالعه آن‌ها در چند سال اخیر از سوی دیگر، پدیده برهم‌کنش و برخورد دو سطح غیرهمسان درون یک محیط ثالث نیز مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته است<sup>[8, 28-33]</sup>. تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه با توجه به کاربردهای مختلف جریان‌های سه‌فازی یا سه‌جزئی همراه با قطرات و حباب‌ها، عمدتاً به سه دسته عبور حباب یا قطره

جهت تولید قطرات از روغن سیلیکون با مشخصات جدول ۱ استفاده شده است. خواص سایر مواد نیز در آزمایشگاه اندازه‌گیری و در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱) شماتیک مدار آزمایشگاهی

جدول ۱) خواص مواد استفاده‌شده در آزمایش در دمای ۲۵°C

ماده	کشش بین سطحی (mN/m)			چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ویسکوزیته (mPas)
	روغن	هوا	آب		
آب	۳۷	۷۲/۴	-	۹۹۸	۰/۸۹
هوا	۲۰/۷	-	۷۲/۴	۱/۲	۰/۰۱۸۵
روغن	-	۲۰/۷	۳۷	۹۳۴	۳۳۷

### ۳- مطالعه تجربی

#### ۳-۱- تعیین شرایط مرزی سطوح مشترک

در مطالعه جریان‌های چندفازی همراه با قطرات و حباب‌ها یکی از اساسی‌ترین مواردی که مقیاس‌های زمانی مشخصه برهم‌کنش‌های هیدرودینامیکی بین قطره-حباب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باید مد نظر قرار گیرد، تعیین وضعیت سطوح مشترک به لحاظ غیرمتحرک (Immobile)، متحرک (Mobile) یا نیمه‌متحرک بودن (Partially Mobile) است. در این دست جریان‌ها معمولاً به دلیل حضور مواد سطح‌فعال درون محلول همواره مقداری از این مواد در سطح حباب‌ها یا قطرات جذب می‌شوند. جذب مواد سطح‌فعال در سطح قطرات و حباب‌ها منجر به رفتار سطوح آن‌ها مشابه یک ذره جامد می‌شود. به عبارت دیگر مولکول‌های سیال مجاور یک سطح جامد در هر دو راستای نرمال و مماسی با سرعت برابر سرعت سطح مشترک حرکت خواهند کرد که به آن شرط عدم لغزش گفته می‌شود. این شرط برای قطرات و حباب‌ها اصطلاحاً در ادبیات فن به شرط مرزی هیدرودینامیکی غیرمتحرک مشهور است. در سوی دیگر سطوح مشترک گاز-مایع تمیز (در واقع حالتی که هیچ ماده سطح‌فعال در سطح مشترک حضور نداشته باشد) توانایی تحمل تنش برشی نخواهند داشت که از آن با عنوان شرط مرزی کاملاً متحرک یاد می‌شود. در این میان سطوح مایع-مایع در شرایطی بینابینی بوده و نسبت ویسکوزیته دو سیال، مشخص‌کننده وضعیت تحرک سطح خواهد بود. به‌طور مثال اگر موادی با نسبت ویسکوزیته بالا

مطالعه قرار دادند.

چکویی و همکاران [29] با استفاده از یک مدار فلوتاسیون آزمایشگاهی اثر شوری بر بازدهی فرآیند جداسازی را بررسی نموده و نشان دادند که با افزایش غلظت نمک، اتصال و ائتلاف قطره-حباب بهبود یافته و بازدهی فرآیند فلوتاسیون افزایش می‌یابد. در یکی از جدیدترین مطالعات انجام‌شده در این راستا، دودک و ویه [8] از یک سیستم میکروسالی (Microfluidic) برای بررسی اتصال قطرات نفت خام به حباب‌های گازی از طریق پخش‌شدن (Spreading) و پوشش کامل قطره روی حباب استفاده نمودند. این گروه نشان دادند که با افزایش میزان غلظت نمک در آب، ائتلاف بهبود می‌یابد. همچنین بالاترین میزان بازدهی اتصال در پی‌اچ‌های (pH) پایین یا خنثی به‌دست می‌آید. تمرکز مطالعه این گروه بر محاسبه بازدهی جداسازی قطرات نفتی از طریق شمارش حباب‌های متصل به قطرات بوده است.

در دو مطالعه اخیر، هدف اصلی بررسی فرآیند جداسازی در سطح گروهی بوده است و به مطالعه ائتلاف در سطح فردی قطره-حباب و زیرفرآیندهای آن توجهی نشده است. حال در مطالعه حاضر هدف بررسی برهم‌کنش قطره-حباب و شناخت بهتر پدیده و شناسایی برخی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند ائتلاف است.

#### ۲- مدار آزمایشگاهی و مواد مصرفی

به‌منظور مطالعه پدیده برخورد قطره-حباب درون محلول‌های آبی، مدار آزمایشگاهی خاصی طراحی و ساخته شد که مزیت سیستم‌های آزمایشگاهی دینامیک و استاتیک را همزمان دارا باشد؛ یعنی به‌گونه‌ای که بتوان هم ائتلاف ذرات ساکن (برخورد به‌واسطه رشد قطره یا حباب) و هم ذرات در حال حرکت (صعود حباب بر اثر نیروی شناوری) را به‌وسیله آن رصد نمود. بدین منظور همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، از محفظه‌ای از جنس پلکسی‌گلس با ابعاد ۱۵×۱۴×۱۰ cm استفاده شده است. در قسمت تحتانی محفظه، حفره‌ای جهت قرارگیری نازل تولید حباب تعبیه شد. برای تولید حباب‌های بسیار ریز، از سوزن‌های کوارتز با قطر داخلی ۷ میکرومتر و برای تولید حباب‌های نسبتاً درشت‌تر، نازلی از جنس استنلس استیل طراحی و ساخته شد. این نازل‌ها در ابتدا با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر تراشکاری شده و سپس سوراخ‌کاری با قطر مشخص به‌صورت راه بدر توسط سوپر دریل انجام شد و درنهایت، در نوک آن الکترودهای با قطر داخلی ۱۰۰ میکرومتر کاشته شد.

به‌منظور تولید قطره، نازلی از جنس کوارتز روی جابجاگر خطی سه‌محوره (xyz stage) با دقت ۱ میکرومتر قرار داده شده و جهت کنترل میزان تزریق نیز از پمپ سرنگی با قابلیت ۴ تزریق همزمان استفاده شده است.

جهت عکس‌برداری از دوربین پی‌سی‌ا ۱۲۰۰ (PCO 1200) با نرخ ۶۳۸ fps و لنز ماکرو ۱X بهره گرفته شد. همچنین جهت نورپردازی مناسب، از یک منبع نوری جریان مستقیم استفاده شده است. نمای کلی مدار آزمایشگاهی در شکل ۱ دیده می‌شود.

سرعت تابعی از نیروی شناوری است، لذا سرعت، تابعی از اندازه و قطر حباب‌ها نیز است.

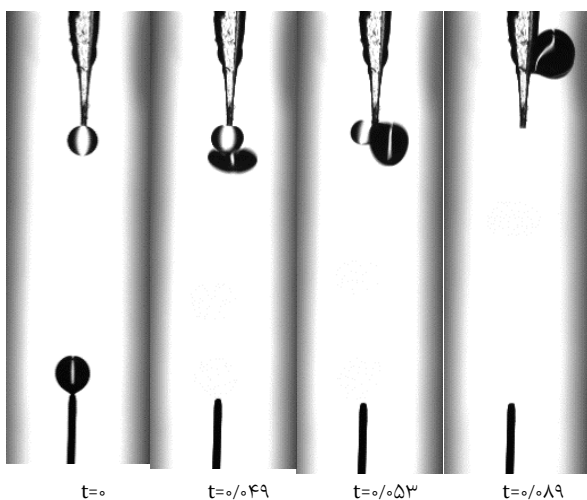
از طرفی پدیده ائتلاف به دلیل وجود عواملی در مقیاس‌های متفاوت همچون نیروهای سطحی، هیدرودینامیکی، بین مولکولی و اندروالس و الکترواستاتیک که مشاهده و اندازه‌گیری دقیق آن‌ها به‌غیر از روش‌های ای‌اف‌ام (Atomic Force Microscope; AFM) یا اس‌اف‌ای (Surface Force Apparatus; SFA) ممکن نیست، دارای ماهیتی آماری است. لذا نیاز است تا برای به‌دست‌آوردن داده‌های معتبر، هر آزمایش به کرات تکرار شده و در نهایت از داده‌ها میانگین‌گیری شود. در آزمایشات انجام‌شده، هر تست ۲۰ بار تکرار شده که نتایج نهایی در جداول ۲ و ۳ آورده شده‌اند. مقادیر گزارش‌شده در جداول ۲ و ۳ میانگین این ۲۰ آزمایش هستند. این آزمایش‌ها در سه گروه انجام شده‌اند که در گروه اول، بازدهی ائتلاف ۱۰٪ و در سایر حالات ائتلافی دیده نشد که نتایج این آزمایشات در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده‌اند.

جدول (۲) اندازه، فاصله اولیه و سرعت نسبی قطره- حباب در لحظه برخورد در آزمایشات ۱ تا ۳

شماره آزمایش	شعاع حباب (mm)	شعاع قطره (mm)	فاصله اولیه (mm)	سرعت (m/s)
۱	۰/۹۸۱±۰/۰۶	۰/۸۰۲±۰/۰۵	۱۰/۵	۰/۲۲±۰/۰۱
۲	۰/۸۱۴±۰/۰۵	۰/۷۵۱±۰/۰۵	۱۸	۰/۲۵±۰/۰۱
۳	۰/۲۲۳±۰/۰۰۵	۰/۶۷۰±۰	۱۴	۰/۰۹±۰/۰۰۴

جدول (۳) انرژی جنبشی حباب و مجموع انرژی‌های سطحی قطره و حباب پیش از برخورد

شماره آزمایش	انرژی سطحی (J)	انرژی جنبشی (J)
۱	۱/۱×۱۰ <sup>-۴</sup>	۹/۳×۱۰ <sup>-۱۱</sup>
۲	۶/۸×۱۰ <sup>-۴</sup>	۶/۸×۱۰ <sup>-۱۱</sup>
۳	۱/۵×۱۰ <sup>-۴</sup>	۱/۹×۱۰ <sup>-۱۳</sup>



شکل (۲) برخورد قطره- حباب در سری آزمایشات شماره ۱ که منجر به ائتلاف و پخش کامل قطره روی حباب شد.

وجود داشته باشند، شرایط بیشتر به سمت شرایط عدم متحرک پیش خواهد رفت.

تعیین این امر که سطح مشترک در کدام یک از وضعیت‌های فوق قرار دارد کار ساده‌ای نخواهد بود؛ اما یکی از راه‌هایی است که توسط محققین مختلف استفاده شده است [24, 43]. محاسبه سرعت حد صعود حباب‌ها و قطرات و مقایسه آن‌ها با روابط تحلیلی موجود است. از این روابط تحلیلی می‌توان به رابطه استوکس برای سطوح غیرمتحرک:

$$U_{St} = (\rho_w - \rho_a)gD^2 / (18\mu)$$

و رابطه هادامارد-ریبزینسکی (Hadamard-Rybczynsky) برای سطوح متحرک:

$$U_{HR} = \left[ \frac{\mu_w + \mu_a}{2\mu_w + 3\mu_a} \right] \times (\rho_w - \rho_g)gD^2 / (6\mu)$$

اشاره کرد که در آن‌ها  $\rho$  چگالی،  $D$  قطر حباب،  $g$  شتاب گرانش،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی است. منظور از زیروندهای  $a$  و  $w$  به ترتیب هوا و آب هستند.

حال در پژوهش حاضر محاسبه سرعت حد صعود حباب‌های با قطر متوسط ۲۲۳ میکرومتر به ۹/۸ سانتی‌متر بر ثانیه منجر شد که با سرعت حد صعود به‌دست‌آمده از رابطه استوکس برای قطر مذکور، ۱۰/۷ سانتی‌متر بر ثانیه، با زیر ۱۰٪ خطا، همخوانی خوبی دارد. لذا براساس این نتیجه و با توجه به اینکه نسبت ویسکوزیته آب و روغن سیلیکون نسبتاً بالا است، فرض سطوح مشترک غیرمتحرک در آزمایشات حاضر معقول خواهد بود. لازم به توضیح است که همان‌گونه که برخی محققین [43]، نیز عنوان نموده‌اند در عمل دستیابی به سطح مشترک کاملاً متحرک امری بسیار مشکل است چرا که وجود کوچکترین ناخالصی یا مواد سطح‌فعال (Surface Active Materials) موجود در مایع می‌تواند منتهی به سطح نیمه‌متحرک یا کاملاً غیرمتحرک شود.

### ۲-۳- نتایج آزمایش

در این مقاله تمرکز اصلی بر بررسی بازده ائتلاف و تعمیم و صحت‌سنجی مدل‌های موجود دوفازی برای حالت سه‌فازی برخورد قطره روغنی و حباب‌گازی است. طبق اطلاعات نویسندگان مقاله، تاکنون در ادبیات فن، مطالعه‌ای در راستای مدل‌سازی پدیده برخورد سه‌فازی گزارش نشده است. لذا نیاز است تا در ابتدا، پارامترهای اصلی و تأثیرگذار شناسایی شده و سپس براساس آن‌ها مدلی اصلاح یا ارائه شود. مدل‌های موجود برای ائتلاف دوفازی، پارامترهایی را در ذات خود به‌عنوان پارامترهای تعیین‌کننده پیشنهاد می‌کنند. به‌عنوان نمونه در مدل انرژی، انرژی جنبشی و انرژی سطحی تعیین‌کننده نتیجه برخورد در نظر گرفته می‌شوند یا در مدل تخلیه فیلم، دو زمان مشخصه تخلیه فیلم بینابینی و مدت زمان تماس دو قطره- حباب به‌عنوان پارامترهای اساسی در نظر گرفته می‌شوند. در این مقاله سعی بر آن است که پیش‌فرض‌های موجود در مدل انرژی و در واقع تعیین میزان اثرگذاری سرعت نسبی حباب- قطره بر ائتلاف آن‌ها بررسی شود. البته از آنجا که در سیستم طراحی‌شده



است. لازم به توضیح است که در این وضعیت یک عدد حباب با قطر مشخص روی نازل پایین ثابت نگه داشته شد و قطره ابتدا از بالا در یک قطر مشخص تولید شد و سپس با نرخ بسیار پایین رشد داده شد. نتایج و مشخصات این آزمایش مطابق جدول ۴ است. شایان ذکر است آب و روغن سیلیکون امتزاج‌ناپذیر هستند، اما با این حال به منظور جلوگیری از ورود ناخالصی‌ها، برای هر سری از آزمایشات مذکور، آب محفظه کاملاً تعویض شده است.

جدول ۴) اندازه حباب و قطره و زمان تماس ائتلاف

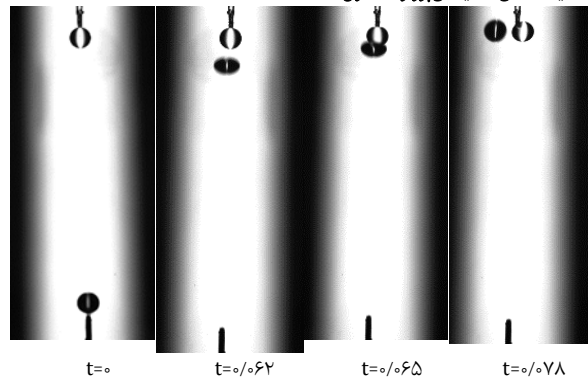
شماره آزمایش	شعاع حباب (mm)	شعاع قطر (mm)	زمان ائتلاف (s)
۴	۰/۹۲۲±۰/۰۴	۰/۷۹۳±۰/۰۵	۰/۴۷±۰/۰۷
۵	۰/۴۴۱±۰/۰۴۰	۰/۴۶۲±۰/۰۳	۰/۹۱±۰/۰۷

\* زمان ائتلاف در جدول ۴ از لحظه تماس اولیه قطره-حباب محاسبه شده و مجموع زمان‌های تخلیه و شکست فیلم و نیز پخش کامل قطره روی حباب را شامل می‌شود.

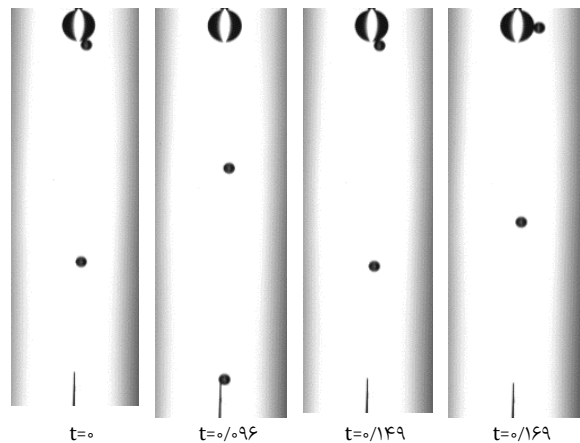
#### ۴- بحث در نتایج

اهم نتایجی که در مطالعه حاضر از آزمایشات طراحی شده حاصل آمد در قالب چندین جدول و تصویر در بخش قبل ارائه شد. شکل‌های ۲ تا ۴ مربوط به تست در حالت دینامیک و شکل ۵ مربوط به تست در حالت استاتیک هستند. در آزمایشات ۱ و ۲، به دلیل بزرگ بودن قطر حباب‌ها و کم بودن فاصله دو نازل، حباب‌ها در لحظه برخورد هنوز به سرعت حد نرسیده و تحت تأثیر نیروی شناوری و پسا و نیروهای دینامیکی از قبیل نیروی بست (Basset) در حال شتاب‌گیری هستند. لذا با تنظیم فاصله قطره و حباب، امکان تغییر سرعت برخورد در این حالات وجود دارد و سرعت صرفاً از نیروی شناوری تأثیر نمی‌پذیرد. در این آزمایش‌ها با توجه به ثابت‌نگه داشتن قطر، سرعت نسبی برخورد معادل سرعت حباب در لحظه برخورد است که این سرعت به کمک پردازش تصویر عکس‌های گرفته شده و با در نظر گرفتن مسافت طی شده حباب و تقسیم آن بر زمان سپری شده، به دست آمده است.

در آزمایش‌های سری اول، از ۲۰ آزمون انجام شده تنها دو مورد منجر به ائتلاف مشاهده شد. در یکی از این حالات که در شکل ۲ به تصویر کشیده شده است، پدیده جالبی رخ می‌دهد. در این حالت اتصال حباب به قطره پس از برخورد اولیه و در لحظه‌ای که حباب در حال جدایش از قطره است، صورت می‌گیرد که در ادبیات فن و در بخش ائتلاف دوفازی به آن ائتلاف در حین جدایش (Separation Coalescence) گفته می‌شود. در ائتلاف دیده شده، اتصال از نوع دربرگیری کامل بوده و قطره به صورت کامل روی حباب پخش می‌شود که این فرآیند از لحظه برخورد اولیه تا پوشش کامل، طی ۴۷ میلی‌ثانیه صورت می‌پذیرد. این زمان را می‌توان به عنوان زمان پوشش (t<sub>coverage</sub>) نیز در نظر گرفت. تا جایی که نویسندگان مقاله اطلاع دارند، زمان پوشش برای برخورد سه‌فازی حباب-قطره تا به امروز تنها در دو مطالعه گزارش شده است. در مطالعه اول که توسط /فتخار/دخواه و /ویه [3] صورت گرفته و در آن برهم‌کنش از نوع استاتیک بوده است. این زمان با توجه به شرایط



شکل ۳) لحظات قبل و بعد از برخورد و عدم ائتلاف آزمایش شماره ۲



شکل ۴) برخورد بین یک قطره و حباب بسیار کوچک در آزمایش شماره ۳ که به عدم ائتلاف انجامید. در این حالت انرژی جنبشی حباب برای تخلیه و شکست فیلم آب بینابینی کافی نیست.

در جدول ۳ انرژی‌های جنبشی و سطحی از روابط ۱ و ۲ حاصل شده‌اند.

$$E_{\sigma} = \sigma_{dw} \times A_{drop} + \sigma_{bw} \times A_{bubble} \quad (1)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m V_{relative}^2 \quad (2)$$

که این روابط براساس مدل انرژی دوفازی استخراج شده‌اند و در آن‌ها منظور از  $\sigma_{dw}$  کشش بین سطحی قطره روغن و آب،  $\sigma_{bw}$  کشش بین سطحی حباب هوا و آب و منظور از  $A$ ، سطوح مربوط به قطره و حباب است. همچنین  $m$  مربوط به جرم حباب هوا است که در حال حرکت است.

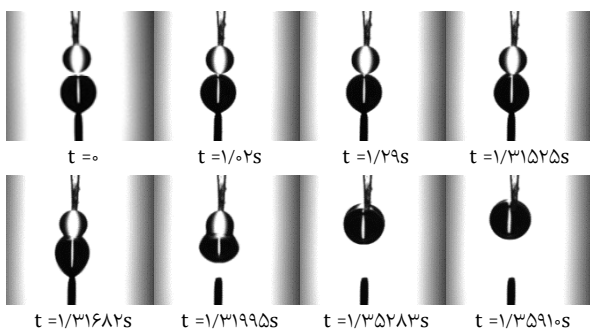
لازم به توضیح است که برای محاسبه سطح حباب‌های بزرگتر از قطر ۱/۵ میلی‌متر، به دلیل تغییر شکل یافتن حباب، از رابطه قطر معادل برای محاسبه سطح استفاده شده که این رابطه در فرمول ۳ مشاهده می‌شود.

$$D \equiv (D_h^2 D_v)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

در این رابطه منظور از  $D_h$  قطر افقی حباب و منظور از  $D_v$  قطر عمودی حباب است.

این آزمایشات در حالت استاتیک یا به عبارتی حالتی که قطره و حباب در مجاورت یکدیگر قرار دارند و برخورد از طریق رشد قطره انجام می‌شود نیز صورت گرفت که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده

و کانال مربوط به تزریق روغن شروع به حرکت می‌کند؛ تا لحظه‌ای که سطوح حباب و قطره با یکدیگر تماس یابند. سپس بلافاصله پمپ متوقف شده و برهم‌کنش آغاز می‌شود (مطابق تصویر ب در شکل ۵).



**شکل ۵** نمونه‌ای از بررسی ائتلاف در حالت استاتیک در سری آزمایشات شماره ۴. در این حالت قطره اندکی کوچکتر از حباب بوده و به‌طور کامل حباب را در بر می‌گیرد.

هر ۵ مورد آزمون انجام شده در این حالت منجر به پخش کامل قطره روی حباب شد و کل فرآیند ائتلاف، از لحظه تماس ظاهری سطوح قطره- حباب با یکدیگر تا دربرگیری کامل حباب توسط قطره طی مدت حدود ۴۷۰ میلی‌ثانیه صورت پذیرفت. همچنین برای برهم‌کنش‌های استاتیک، یک سری آزمایش در اندازه‌های کوچکتر حباب و قطره نیز انجام گرفت که در این حالت مجموع زمان تخلیه و دربرگیری ۹۱۰ میلی‌ثانیه اندازه‌گیری شد. هرچند که این مشاهده حاکی از افزایش زمان تخلیه با کاهش قطر حباب و قطره است، اما به دلیل آن که نسبت قطر حباب به قطره نیز در این دو آزمایش تغییر کرده است و با توجه به ماهیت تصادفی نسبی پدیده به واسطه نوسانات حرارتی که در مقیاس میکروسکوپی رخ می‌دهند، نمی‌توان صرفاً با این مشاهده در مورد رابطه بین زمان تخلیه و نسبت قطر حباب- قطره روند دقیقی را پیش‌بینی نمود و نتیجه‌گیری قطعی در این باره نیازمند انجام تعداد آزمایشات بیشتر و در نظر گرفتن نسبت قطرهای مختلف است.

یکی از نکات جالب توجه در سری آزمایشات استاتیک این است که با آن که انرژی جنبشی وجود ندارد اما کامکان شاهد بروز پدیده ائتلاف هستیم. در واقع اینگونه برمی‌آید که پدیده ائتلاف در حالت استاتیک مستقل از انرژی جنبشی در حال وقوع است و این زمان در کنار هم‌بودن قطره- حباب و کشش‌های بین سطحی هستند که نقش اصلی را در این امر ایفا می‌کنند. لذا اینگونه نتیجه می‌شود که مدل انرژی ذاتاً قادر به بررسی تست‌های استاتیک نیست و پدیده ائتلاف در حالت استاتیک نیز مستقل از انرژی جنبشی می‌تواند رخ دهد که در این فرآیند پارامتر تعیین‌کننده نیروهای سطحی و زمان تماس قطره- حباب است. همچنین با مقایسه آزمایش حالت استاتیک و آزمایش شماره ۱، مشاهده می‌شود که سرعت برخورد تأثیر بسزایی در سرعت تخلیه می‌گذارد و در آزمایش حاضر تقریباً منجر به ۱۰ برابر تسریع در تخلیه شده است.

مختلف (۸ نوع روغن مختلف، شعاع قطرات و حباب‌ها به ترتیب ۰/۴۵ و ۰/۶ میلی‌متر) بین ۰/۸ تا ۶/۵ ثانیه گزارش شده است. در مطالعه دیگر انجام شده توسط دودک و وویه<sup>[۸]</sup> در حالت دینامیک و درون چپ‌ میکروسالی اعدادی کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه برای پوشش کامل یک حباب (با قطری در مرتبه ۱۵۰ میکرومتر) توسط قطرات نفتی (با قطری در اندازه ۵۰ تا ۷۰ میکرومتر) مشاهده شده است. با توجه به این که در آزمایشات حاضر اندازه قطرات و حباب‌ها به مراتب بزرگتر از اندازه‌های گزارش شده توسط دودک و وویه هستند و نیز با توجه به اینکه ویسکوزیته روغن استفاده شده بیش از ۱۰ برابر ویسکوزیته کار انجام شده توسط آن‌ها است، زمان به دست آمده ۴۷ میلی‌ثانیه کاملاً معقول به نظر می‌رسد.

در آزمایشات سری دوم، انرژی جنبشی برخورد اندکی از حالت پیشین کمتر بوده که به نظر می‌رسد همین امر موجب شده که احتمال برخورد منجر به ائتلاف به صفر برسد؛ یعنی احتمال شکست فیلم بینابینی و پوشش حباب توسط قطره در این سطح از انرژی صفر خواهد بود. نکته جالب توجه در این سری از آزمایشات آن است که سرعت حباب‌ها نسبت به آزمایشات سری اول بیشتر ولی به دلیل کوچک بودن اندازه حباب‌ها، انرژی جنبشی کمتر از حالت اول است. بنابراین دیده می‌شود همان‌طور که توسط مدل انرژی نیز پیش‌بینی می‌شود، پارامتر تأثیرگذار در برخورد سه‌فازی قطره- حباب نیز نه سرعت، بلکه انرژی جنبشی خواهد بود.

در حالت ۳، حباب‌ها به دلیل اندازه کوچکشان فوراً و در فاصله‌ای کمتر از فاصله قرارگیری اولیه دو نازل، به سرعت حد خود می‌رسند و در لحظه برخورد صرفاً تحت تأثیر نیروهای شناوری و پسا قرار دارند. در این حالت همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، حباب‌ها پس از رسیدن به سطح قطره و تماس با آن به آرامی روی سطح آن لغزیده و با طی مسیری روی سطح قطره، بدون هیچ‌گونه اتصالی از آن جدا می‌شوند. اینگونه به نظر می‌رسد که در این حالت علی‌رغم زمان تماس بیشتر، به دلیل کم بودن انرژی جنبشی و ممتنوم، حباب‌های کوچک توانایی غلبه بر فشار انفصال (Disjoining Pressure) درون فیلم باریک و در نتیجه تخلیه و شکست آن را نداشته و در نتیجه ائتلافی صورت نپذیرفته است.

شایان ذکر است در انجام آزمایشات سعی بر برخورد سربه‌سر بوده است تا زاویه برخورد در نتایج اثرگذار نباشد؛ اما به دلیل خطاهای آزمایش از قبیل عدم تقارن کامل نازل‌ها در تولید حباب و قطره و لرزش‌های احتمالی سطح آب، بعضاً برخوردهای زاویه‌داری در آزمایشات مشاهده شد. اما این زاویه برخوردها به صورت آماری و تصادفی بوده و با توجه به میانگین‌گیری ۲۰ مورد آزمایش، این عامل سبب بروز خطای سیستماتیک نخواهد شد.

در سری آزمایشات چهارم، برهم‌کنش بین قطره- حباب به صورت استاتیک مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۵). در این حالت دو نازل در فاصله‌ای معادل با مجموع قطرهای حباب و قطره قرار گرفته است. ابتدا یک حباب به وسیله پمپ سرنگی تولید شده و پس از رسیدن حباب به اندازه‌ای مشخص کانال مربوط به تزریق هوا متوقف شده

بوده و در ابتدای راه خود قرار دارد، در مقاله حاضر با طراحی یک سری آزمایشات اولیه سعی بر آن بوده که در وهله اول با کمک دوربین سرعت بالا اطلاعات کیفی از فرآیند برخورد و ائتلاف یک تک قطره و یک تک حباب درون محیطی ثالث، مانند آب به دست آید. در وهله دوم تلاش شد تا با ارائه اطلاعات کمی از قبیل زمان ائتلاف، انرژی و سرعت در لحظه برخورد و نیز بازدهی موفقیت برخورد، قدمی در راستای شناخت بهتر این پدیده و شناسایی پارامترهای تأثیرگذار در برخورد حباب-قطره برداشته شود.

نتایج چهار سری آزمایش در نظر گرفته شده در این مطالعه حاکی از آن است که پیش بینی نتیجه برخورد قطره حباب و شرایط لازم برای وقوع ائتلاف بسیار پیچیده بوده و به عوامل زیادی بستگی دارد. انرژی جنبشی و زمان برخورد در کنار ضریب پخش از مهم ترین عوامل مؤثر در این پدیده هستند که در مسائل دینامیک اثربخشی انرژی جنبشی و در مسائل استاتیک تأثیر زمان تماس بیشتر خواهد بود. همچنین اثر سرعت صرفاً در انرژی جنبشی دیده می شود و نباید از آن به صورت جداگانه به عنوان عامل اثرگذار یاد نمود. البته قابل ذکر است که برای اظهار نظر قطعی تر در مورد این پدیده نیاز به انجام تعداد زیادی آزمایش تحت شرایط خاص و مدون و با مشمولیت دادن سایر پارامترهای تأثیرگذار از جمله نیروهای سطحی و اثرات تغییرات کشش سطحی، بازه اندازه گسترده تر برای حباب و قطره، حضور مواد سطح فعال (سورفاکتانت) است که این آزمایشات در حال انجام بوده و نتایج آن ها در قالب مقالات دیگری در آینده ارائه خواهد شد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان مقاله از جناب آقای دکتر حجت قاسمی و سرکار خانم دکتر مهیار جان احمدی جهت مساعدت هایشان در تکمیل مدار آزمایشگاهی و انجام آزمایشات، تشکر و قدردانی خود را اعلام می نمایند.

**تاییدیه اخلاقی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** سیدمصطفی حسینی پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشناس/پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ حسام آمی احمدی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۲۵٪)؛ عادل عبادی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ محمد عبدالمی گل (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## منابع

- 1- Farajzadeh R, Andrianov A, Krastev R, Hirasaki GJ, Rossen WR. Foam-oil interaction in porous media: Implications for foam assisted enhanced oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2012;183-184:1-13.
- 2- Eftekhardadkhah M, Aanesen SV, Rabe K, Øye G. Oil

پارامتری که معمولاً توسط محققین در جریان های سه فازی (یا به عبارتی دیگر جریان هایی که در آن ها سه سطح مشترک متفاوت با هم برهم کنش دارند) مورد استفاده قرار می گیرد، ضریب پخش نام دارد. این ضریب در حالت کلی به فرم معادله ۴ تعریف می شود.

$$S_j = \sigma_{jk} - (\sigma_{ij} + \sigma_{ik}) \quad (4)$$

که در آن  $ijk$  فازهای سیال اند و منظور از  $\sigma_{ij}$  کشش سطحی میان سطح  $i$  و  $j$  است. حال در مطالعه حاضر که پخش شدن قطره روغنی روی حباب مد نظر است، این رابطه به شکل رابطه ۵ درمی آید.

$$S_{oil} = \sigma_{water/air} - (\sigma_{oil/water} + \sigma_{oil/air}) = 72.4 - (37 + 20.4) > 0 \quad (5)$$

که مثبت بودن  $S_{oil}$  به منزله امکان پخش قطره روغنی روی حباب است.

نکته قابل توجه آن است که بیشتر محققان در مطالعات تجربی و عددی خود برای تعیین نتیجه برخورد از این پارامتر، به عنوان پارامتر غالب و تعیین کننده استفاده نموده اند که تنها به کشش های بین سطحی فازها بستگی دارد. حال آن که مطالعه حاضر نشان داد علی رغم آن که ضریب پخش مثبت است، تنها تعداد محدودی از برخوردها منجر به ائتلاف شده و این پارامتر را باید در کنار عوامل سینتیکی تأثیرگذار بر مساله همچون زمان تماس و انرژی در لحظه برخورد مورد توجه قرار داد. این پارامتر صرفاً به لحاظ ترمودینامیکی و در شرایط ایده آل، به عنوان پیش نیازی برای وقوع ائتلاف از نوع دربرگیری حباب توسط قطره، محسوب می شود. البته در شرایط استاتیک که در آن می توان از نیروهای اینرسی صرف نظر نمود، این فاکتور در صورت زمان تماس کافی می تواند به عنوان تعیین کننده پخش قطره روی حباب در نظر گرفته شود، اما در حالت های دینامیک که نیروهای اینرسی قابل توجه بوده و غیرقابل صرف نظر است، باید عوامل هیدرودینامیکی نظیر انرژی و سرعت برخورد، زاویه برخورد و زمان تماس هم مد نظر قرار گرفته شوند [38, 39, 44].

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

پرواضح است که مطالعه پدیده ائتلاف چه در جریان های دوفازی و چه در جریان های سه فازی، خواه همراه با مواد سطح فعال (یا سورفاکتانت) خواه در غیاب آن ها، بدون در نظر گرفتن نیروهای مولکولی به ویژه نیروهای واندروالس و الکترواستاتیک دولایه ای مطالعه ای ناقص است. اما علی رغم تمامی پیشرفت های صورت گرفته در حوزه های مختلف علم و تکنولوژی، کماکان سیستم و روشی که بتواند تمامی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند برهم کنش و ائتلاف قطرات و حباب ها در مقیاس های مختلف از ابعاد مولکولی گرفته تا مقیاس های بزرگتر میکرومتری و میلی متری را به صورت همزمان در بر گیرد، وجود ندارد. لذا مطالعات این چنینی با تمام محدودیت ها و فرضیات ساده کننده ای که در آن ها استفاده شده نیز می تواند اطلاعات مفید و ارزنده ای به ارمغان آورد.

با توجه به توضیحات فوق و با توجه به اینکه مطالعه جریان های سه فازی همراه با سه سطح مشترک مقوله ای نسبتاً چالش برانگیز



- 20- Liao Y, Lucas D. A literature review on mechanisms and models for the coalescence process of fluid particles. *Chemical Engineering Science*. 2010;65(10):2851-2864.
- 21- Prince MJ, Blanch HW. Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns. *AIChE Journal*. 1990;36(10):1485-1499.
- 22- Sovova H. Breakage and coalescence of drops in a batch stirred vessel-II comparison of model and experiments. *Chemical Engineering Science*. 1981;36(9):1567-1573.
- 23- Lehr F, Mewes D. A transport equation for the interfacial area density applied to bubble columns. *Chemical Engineering Science*. 2001;56(3):1159-1166.
- 24- Kamp J, Kraume M. From single drop coalescence to droplet swarms-scale-up considering the influence of collision velocity and drop size on coalescence probability. *Chemical Engineering Science*. 2016;156:162-177.
- 25- Kamp J, Villwock J, Kraume M. Drop coalescence in technical liquid/liquid applications: A review on experimental techniques and modeling approaches. *Reviews in Chemical Engineering*. 2017;33(1):1-47.
- 26- Neeson MJ, Tabor RF, Grieser F, Dagastine RR, Chan DYC. Compound sessile drops. *Soft Matter*. 2012;8(43):11042-11050.
- 27- Tabor RF, Wu Ch, Lockie H, Manica R, Chan DYC, Grieser F, et al. Homo-and hetero-interactions between air bubbles and oil droplets measured by atomic force microscopy. *Soft Matter*. 2011;7(19):8977-8983.
- 28- Bonhomme R, Magnaudet J, Duval F, Piar B. Inertial dynamics of air bubbles crossing a horizontal fluid-fluid interface. *Journal of Fluid Mechanics*. 2012;707:405-443.
- 29- Chakibi H, Hénaut I, Salonen A, Langevin D, Argillier JF. Role of bubble-drop interactions and salt addition in flotation performance. *Energy & Fuels*. 2018;32(3):4049-4056.
- 30- Feng J, Muradoglu M, Kim H, Ault JT, Stone HA. Dynamics of a bubble bouncing at a liquid/liquid/gas interface. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;807:324-352.
- 31- Feng J, Roché M, Vigolo D, Arnaudov LN, Stoyanov SD, Gurkov TD, et al. Nanoemulsions obtained via bubble-bursting at a compound interface. *Nature Physics*. 2014;10(8):606-612.
- 32- Li EQ, Al-Otaibi SA, Vakarelski IU, Thoroddsen ST. Satellite formation during bubble transition through an interface between immiscible liquids. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014;744:R1.
- 33- Li EQ, Vakarelski IU, Chan DYC, Thoroddsen ST. Stabilization of thin liquid films by repulsive van der Waals force. *Langmuir*. 2014;30(18):5162-5169.
- 34- Ge XH, Geng YH, Zhang QC, Shao M, Chen J, Luo GS, et al. Four reversible and reconfigurable structures for three-phase emulsions: Extended morphologies and applications. *Scientific Reports*. 2017;7:42738.
- 35- Lee TY, Choi TM, Shim TS, Frijns RAM, Kim SH. Microfluidic production of multiple emulsions and functional microcapsules. *Lab on a Chip*. 2016;16(18):3415-3440.
- 36- Planchette C, Lorenceau E, Brenn G. Liquid encapsulation by binary collisions of immiscible liquid drops. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2010;365(1-3):89-94.
- 37- Silva BFB, Rodríguez-Abreu C, Vilanova N. Recent advances in multiple emulsions and their application as templates. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2016;25:98-108.
- 38- Torza S, Mason SG. Three-phase interactions in shear removal from produced water during laboratory-and pilot-scale gas flotation: The influence of interfacial adsorption and induction times. *Energy & Fuels*. 2015;29(11):7734-7740.
- 3- Eftekhardadkhah M, Øye G. Induction and coverage times for crude oil droplets spreading on air bubbles. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(24):14154-14160.
- 4- Grattoni C, Moosai R, Dawe RA. Photographic observations showing spreading and non-spreading of oil on gas bubbles of relevance to gas flotation for oily wastewater cleanup. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003;214(1-3):151-155.
- 5- Hayatdavoudi A, Howdeshell M, Godeaux E, Pednekar N, Dhumal V. Performance analysis of a novel compact flotation unit. *Journal of Energy Resources Technology*. 2011;133(1):013101.
- 6- Won JY, Krägel J, Gochev G, Ulaganathan V, Javadi A, Makievski AV, et al. Bubble-bubble interaction in aqueous  $\beta$ -Lactoglobulin solutions. *Food Hydrocolloids*. 2014;34:15-21.
- 7- Won JY, Krägel J, Makievski AV, Javadi A, Gochev G, Loglio G, et al. Drop and bubble micro manipulator (DBMM)-a unique tool for mimicking processes in foams and emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014;441:807-814.
- 8- Dudek M, Øye G. Microfluidic study on the attachment of crude oil droplets to gas bubbles. *Energy & Fuels*. 2018;32(10):10513-10521.
- 9- Wang K, Qin K, Lu Y, Luo G, Wang T. Gas/liquid/liquid three-phase flow patterns and bubble/droplet size laws in a double T-junction microchannel. *AIChE Journal*. 2015;61(5):1722-1734.
- 10- Ata S. Coalescence of bubbles covered by particles. *Langmuir*. 2008;24(12):6085-6091.
- 11- Ata S, Pugh RJ, Jameson GJ. The influence of interfacial ageing and temperature on the coalescence of oil droplets in water. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011;374(1-3):96-101.
- 12- Leal LG. Flow induced coalescence of drops in a viscous fluid. *Physics of Fluids*. 2004;16(6):1833-1851.
- 13- Janssen PJA, Anderson PD. Modeling film drainage and coalescence of drops in a viscous fluid. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2011;296(3-4):238-248.
- 14- Frostad JM, Collins MC, Leal LG. Direct measurement of the interaction of model food emulsion droplets adhering by arrested coalescence. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2014;441:459-465.
- 15- Chesters AK, Hofman G. Bubble coalescence in pure liquids. In: Van Wijngaarden L, editor. *Mechanics and physics of bubbles in liquids*. Dordrecht: Springer; 1982. pp. 353-361.
- 16- Chesters AK. The modelling of coalescence processes in fluid-liquid dispersions: A review of current understanding. *Chemical Engineering Research and Design*. 1991;69(A4):259-270.
- 17- Chesters AK, Bazhlekov IB. Effect of insoluble surfactants on drainage and rupture of a film between drops interacting under a constant force. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2000;230(2):229-243.
- 18- Howarth WJ. Coalescence of drops in a turbulent flow field. *Chemical Engineering Science*. 1964;19(1):33-38.
- 19- Howarth WJ. Measurement of coalescence frequency in an agitated tank. *AIChE Journal*. 1967;13(5):1007-1013.

- 42- Moosai R, Dawe RA. Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup. *Separation and Purification Technology*. 2003;33(3):303-314.
- 43- Vakarelski IU, Lee J, Dagastine RR, Chan DYC, Stevens GW, Grieser F. Bubble colloidal AFM probes formed from ultrasonically generated bubbles. *Langmuir*. 2008;24(3):603-605.
- 44- Zhang Y, Shitta A, Meredith JC, Behrens SH. Bubble meets droplet: Particle-assisted reconfiguration of wetting morphologies in colloidal multiphase systems. *Small*. 2016;12(24):3309-3319.
- and electrical fields. *Journal of Colloid and Interface Science*. 1970;33(1):67-83.
- 39- Torza S, Mason SG. Coalescence of two immiscible liquid drops. *Science*. 1969;163(3869):813-814.
- 40- Kirkpatrick RD, Lockett MJ. The influence of approach velocity on bubble coalescence. *Chemical Engineering Science*. 1974;29(12):2363-2373.
- 41- Zawala J, Krasowska M, Dabros T, Malysa K. Influence of bubble kinetic energy on its bouncing during collisions with various interfaces. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2007;85(5):669-678.