



Experimental Investigation of Size Effect on the Bubble-Droplet Coalescence in Water

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ami Ahmadi H.¹ MSc,
Ebadi A.¹ MSc,
Hosseinipour S.M.*¹ PhD

How to cite this article

Ami Ahmadi H, Ebadi A, Hosseinipour S.M. Experimental Investigation of Size Effect on the Bubble-Droplet Coalescence in Water. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(8):2075-2085.

¹Energy Conversion Department, Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Postal Code: 1684613114.
Phone: +98 (21) 774912289
Fax: +98 (21) 772404048
alipour@iust.ac.ir

Article History

Received: July 16, 2019
Accepted: June 7, 2020
ePublished: August 15, 2020

ABSTRACT

Nowadays, the interaction between gas bubbles and oil droplets plays an important role in the efficiency of many industrial processes. Therefore, it is of great importance to study the influencing factors on these processes. So, in the present paper, the effect of droplet and bubble size on the drainage time of the trapped intervening film between droplet and bubble was investigated. Six series of experiments were conducted for various sizes and three characteristic time scales including drainage time, coverage time, and rupture time were measured. Each of these experiments was repeated at least five times. The results showed that the drainage time changed independently of the droplet/bubble size. Moreover, it was observed that due to the nature of the phenomenon, the measured drainage times in each equivalent size are notably scattered, which means that the microscopic interactions in the water film and between bubble-droplet interfaces have significant impacts on the drainage time. Also, in the current experiment, it was found that the volume of the intervening film between droplet and bubble has no vital role in the drainage time of the mediate water film.

Keywords Bubble-Droplet Coalescence; Film Drainage Model; Drainage Time; Bubble; Droplet; Three-Component Flow

CITATION LINKS

[1] Foam-oil interaction in porous media ... [2] Chemical demulsification of oil-in-water emulsion ... [3] Role of bubble-drop interactions and salt addition ... [4] Oil removal from produced water ... [5] Induction and coverage times for crude ... [6] Photographic observations showing ... [7] Performance analysis of a novel compact ... [8] Bubble-bubble interaction in aqueous ... [9] Drop and bubble micro manipulator ... [10] Microfluidic study on the ... [11] Gas/liquid/liquid three-phase flow patterns ... [12] Flow induced coalescence of drops ... [13] Bubble coalescence in pure ... [14] The modelling of coalescence processes ... [15] Effect of insoluble surfactants on drainage ... [16] Coalescence of drops in a turbulent ... [17] Measurement of coalescence frequency ... [18] A literature review on mechanisms ... [19] Bubble coalescence and break-up in air ... [20] Breakage and coalescence of drops in ... [21] A transport equation for the interfacial ... [22] From single drop coalescence to ... [23] Drop coalescence in technical liquid ... [24] Cantilevered-capillary force apparatus for ... [25] Measurement and analysis of forces ... [26] Combined AFM- confocal microscopy ... [27] Homo-and hetero-interactions between ... [28] Inertial dynamics of air bubbles crossing ... [29] Dynamics of a bubble bouncing at ... [30] Nanoemulsions obtained via bubble ... [31] Satellite formation during bubble ... [32] Stabilization of thin liquid films by repulsive ... [33] Four reversible and reconfigurable ... [34] Microfluidic production of multiple ... [35] Liquid encapsulation by binary collisions ... [36] Recent advances in multiple emulsions and ... [37] Three-phase interactions in shear ... [38] Coalescence of two immiscible ... [39] The influence of approach velocity on bubble ... [40] Influence of bubble kinetic energy on its ... [41] Gas attachment of oil droplets for gas flotation ... [42] Bubble colloidal AFM probes formed ... [43] Physics and chemistry of ... [44] The equilibrium shape of interfaces ... [45] Experiments on thermocapillary ... [46] Capillarity at the nanoscale ... [47] Measurements and models of the dispersed ... [48] Dispersed phase interactions in an agitated ...

بررسی تجربی اثر اندازه در ائتلاف قطره- حباب در محیط آبی

حسام آمی احمدی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

عادل عبادی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

سیدمصطفی حسینعلی پور PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده

امروزه در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، برهم کنش حباب‌های گازی و قطرات نفتی نقش به‌سزایی در تعیین راندمان کلی سیستم بازی می‌کند. لذا شناخت پارامترهای اثرگذار بر این فرآیندها حایز اهمیت خواهد بود. از این‌رو، در مقاله حاضر به بررسی نقش اندازه قطره و حباب بر زمان تخلیه فیلم بینابینی به‌دام‌افتاده بین قطره و حباب پرداخته شد. ضمن این مطالعه شش سری آزمایش در شش اندازه مختلف مورد بررسی قرار گرفت و در طی آنها زمان مورد نیاز جهت تخلیه فیلم، زمان پوشش و زمان شکست فیلم که از جمله زمان‌های مشخصه فرآیند ائتلاف هستند، اندازه‌گیری شد. هر کدام از این سری آزمایش‌ها حداقل پنج‌بار تکرار شدند. نتایج حاکی از آن بودند که زمان تخلیه مستقل از اندازه قطره و حباب در حال تغییر است. علاوه بر آن، مشاهده شد که در هر اندازه قطره و حباب، زمان تخلیه ناشی از تکرارهای به‌دست‌آمده دارای پراکندگی‌های بسیار زیادی هستند که البته این پراکندگی‌ها ناشی از طبیعت پدیده مورد نظر بوده است و این بدان معنا است که پدیده‌های میکروسکوپی که در فیلم آب و بین سطوح مشترک قطره- حباب رخ می‌دهند، دارای اثرات بسیار زیادی بر تعیین زمان تخلیه هستند. همچنین ضمن این آزمایش مشخص شد که حجم فیلم به‌دام‌افتاده بین قطره و حباب، تاثیر چندانی بر زمان تخلیه فیلم آب بینابینی نخواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: ائتلاف قطره- حباب، مدل تخلیه فیلم، زمان تخلیه، حباب، قطره، جریان سه‌مولفه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۱۸

نویسنده مسئول: alipour@iust.ac.ir

مقدمه

محلول‌های آبی شامل قطرات و حباب‌ها از جمله جریان‌های چند مولفه/فاز هستند. در مقایسه با جریان‌های دوفاز حضور فاز سوم، موجب افزوده شدن دو سطح مشترک دیگر به مساله می‌شود که همین عامل، باعث پیچیده‌تر شدن و بغرنج‌تر شدن بررسی این دسته از مسایل می‌شود، خصوصاً زمانی که فازهای ثانویه به‌صورت حباب و قطره در فاز اولیه پراکنده شده باشند.

با توجه به نوع سیال پراکنده و فاز بستر، دسته‌بندی‌هایی در زمینه شناسایی این محلول‌ها انجام شده است. 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 به‌نوعی متشکل از 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 این‌رو، برخی از محققان به این‌گونه فیلم‌ها واژه فیلم شبه امولسیونی اطلاق نمودند [1-3].

این دسته از جریان‌ها سه‌فازی در سال‌های اخیر دارای کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف همچون در فلوتاسیون گازی (Gas Flotation) برای جداسازی قطرات نفت از آب همراه در میادین نفتی و نیز تصفیه آب و فاضلاب‌های صنعتی [4-7]، در فرآیند ازدیاد برداشت نفت [1]، مواد غذایی مانند بستنی [8، 9]، سیستم‌های میکروسیالی برای فرآیندهای جداسازی و واکنش‌های شیمیایی [10] هستند. بنابراین رسیدن به فهم بیشتر در مورد پارامترهای اثرگذار بر این دسته از جریان‌ها نقش کلیدی در بهبود دادن و کنترل‌یافتن بر روی این دسته از فرآیندها بازی خواهد کرد.

از این‌رو، پژوهشگران زیادی به بررسی جنبه‌های مختلف پایداری فیلم و ائتلاف دو ذره تا به امروز پرداخته‌اند. هر چند که به‌دلیل پیچیدگی موضوع، اکثر این تحقیقات برای حالات دوفازی و یا بررسی حباب/قطره با یک سطح تخت صورت گرفته‌اند. در تحقیقات دوفازی نیز رهیافت‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. گروهی از محققین به‌صورت کیفی و یا کمی به بررسی مراحل مختلف ائتلاف حباب- حباب و یا قطره- قطره از طریق اندازه‌گیری زمان تخلیه و شکست فیلم تحت سرعت نزدیکی ثابت پرداخته‌اند و گروهی دیگر سعی نمودند تا به کمک آنالیز ابعادی میان اعداد بدون بعد مهم درگیر در مساله و ضخامت بحرانی فیلم و زمان تخلیه ارتباطی برقرار کنند [12]. گروهی دیگر از محققان گام را فراتر برده و در راستای مدل‌سازی و فرمولاسیون ائتلاف قدم برداشته‌اند [13-20]. بدین منظور عمدتاً از سه رویکرد مختلف بهره گرفته می‌شود. تئوری اول، مدلی تحت عنوان سرعت نزدیکی بحرانی (Critical Approach Velocity Model) است که توسط لهر و مویس [21] و مبتنی بر روابط تجربی ارائه شده است. مدل دوم که اولین بار توسط هورث [16، 17] 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 [18، 22] [23]. در این مدل بازدهی ائتلاف براساس دو زمان مشخصه تخلیه فیلم و زمان تماس دو ذره سیال تعیین می‌شود. برخی دیگر از محققین نیز به‌صورت پایه‌ای و به‌کمک ابزارآلات دقیقی همچون میکروسکوپ‌های اتمی (Atomic Force Microscopes; AFM)، دستگاه نیروی مویبندی معلق (Cantilevered Capillary Force Apparatus; CCFA) و دستگاه‌های نیروی سطحی (Surface Force Apparatus; SFA)، از ابتدا سعی بر

که برای مایعات با لزجت نسبتاً کم، نرخ افزایش شعاع از رابطه قانون- توانی طبیعت می‌کند و ضریب آن بر پایه برآیند خالص سه کشش بین سطحی تعیین می‌شود. آنها عدد اونزورگ بحرانی برای تشکیل حباب‌های پیرو (Daughter or Satellite Bubbles) در سیستم مورد مطالعه خود را مشخص نمودند.

گرتونی و همکاران^[6]، با ارایه تصاویری از فرآیند پخش و نیز عدم پخش نفت بر 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^[6, 41].

افتخارد/دخواه و /ویه^[5] با استفاده از روش کنترل‌کننده میکرو (Micromanipulator) حباب- قطره، برهم‌کنش بین قطرات نفت خام و حباب‌های هوا را به‌منظور محاسبه زمان‌های القاء و پوشش قطره بر روی حباب، مورد مطالعه قرار دادند. چکبیدی و همکاران^[3]، اخیراً با راه‌اندازی 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^[10] از یک سیستم میکروسیالی برای بررسی اتصال قطرات نفت خام به حباب‌های گازی از طریق پخش شدن و پوشش کامل قطره بر روی حباب استفاده نمودند. آنها نشان دادند که با افزایش میزان غلظت نمک در آب، ائتلاف بهبود می‌یابد. همچنین بالاترین میزان بازدهی اتصال در pHهای پایین یا خنثی به‌دست می‌آید. تمرکز مطالعه آنها بر روی محاسبه بازدهی جداسازی قطرات نفتی از طریق شمارش حباب‌های متصل به قطرات بوده است.

از آنجایی که در بین تمامی مدل‌های ارائه‌شده برای ائتلاف‌های دوفازی، مدل تخلیه فیلم بیشتر از سایر مدل‌ها، فیزیک حاکم بر مساله را مورد توجه قرار می‌دهد، در این مقاله نیز سعی شد تا با مد نظر دادن این مدل، اثرات اندازه حباب‌ها و قطرات بر زمان‌های مشخصه این مدل ضمن ائتلافی که در آن قطره و حباب دارای سرعت اولیه نباشند، مورد بررسی واقع شود و ضمن آن تعیین شود که اندازه حباب‌ها و قطرات چگونه می‌توانند بر زمان تخلیه و در نتیجه بازده ائتلاف در یک سیستم شناورسازی تأثیر بگذارند. علاوه بر این، سعی شد تا برای اولین بار بازه‌ای برای زمان‌های مشخصه تخلیه فیلم، پوشش و شکسته‌شدن فیلم بینابینی ارائه شود.

شرح مساله

مدار آزمایشگاهی

به‌منظور انجام مطالعه مورد نظر، مدار آزمایشگاهی خاصی طراحی و ساخته شد که ضمن آن بتوان ائتلاف ذرات ساکن (برخورد به‌واسطه حرکت بسیار آرام قطره) و هم ذرات در حال حرکت (صعود

شناخت زیرمکانیزم‌های موجود در ائتلاف داشته‌اند^[24-27].

برخلاف ائتلاف دوفازی، برای حالت سه‌فازی ادبیات فن آن چنان غنی نیست، خصوصاً برای حالاتی که در هر دوی سطوح مایع- مایع و مایع- گاز خمیده و یا به‌عبارتی کروی باشند. از طرفی دیگر، بیشتر مطالعات انجام‌شده در این زمینه معطوف به برهم‌کنش‌های دینامیک و عبور یک حباب از سطح میان دو مایع و یا مایع- گاز می‌شود. 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 چندسال اخیر از سوی دیگر، پدیده برهم‌کنش و برخورد دو سطح غیرهمسان درون یک محیط ثالث نیز مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته است^[3, 10, 28-32]. تحقیقات صورت‌گرفته در این زمینه با توجه به کاربردهای مختلف جریان‌های سه‌فازی یا سه‌جزیی همراه با قطرات و حباب‌ها، عمدتاً به سه دسته عبور حباب یا قطره از یک سطح مشترک دوفازی، برخورد و برهم‌کنش دو قطره مایع امتزاج‌ناپذیر درون سیال ثالث^[33-38] و برخورد حباب- قطره درون محلول‌های آبی یا سایر مایعات^[3, 5, 10] تقسیم می‌شوند که در ادامه به برخی از مهم‌ترین مطالعات تجربی انجام‌شده در این حوزه‌ها اشاره می‌شود. کیرکپاتریک و لاکت^[39] 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 (۵ میلی‌متر) برخوردکننده با سطح آزاد آب مقطر را به‌عنوان تابعی از فاصله تشکیل حباب اندازه‌گیری نمودند. چسترز و هافمن^[13] به‌صورت تئوری مکانیزم‌های عبور حباب و یا بازگشت آن از سطح مشترک مایع/گاز را در مایعات خالص بررسی نمودند و مکانیزم دقیق‌تری برای بازگشت حباب از سطح ارایه نمودند. آنها بازگشت و یا ائتلاف حباب با سطح مشترک را به‌عنوان تابعی از رقابت دو فرآیند باریک‌شدن فیلم مایع بین حباب‌ها و افزایش انرژی آزاد سیستم در اثر افزایش مساحت سطح حباب در نظر گرفتند. افزایش انرژی آزاد سیستم در واقع از ائتلاف انرژی جنبشی حباب ناشی می‌شود.

زاولا و همکاران^[40]، تمایل حباب‌ها به بازگشت از سطح مشترک با افزایش انرژی جنبشی را ناشی از افزایش شعاع فیلم مایع بینابینی عنوان نمودند. شعاع‌های بزرگ‌تر بدین معنا است که برای رسیدن فیلم به ضخامت بحرانی شکست مدت‌زمان 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^[31]، با استفاده از یک دوربین سرعت بالا (۶۲۰۰۰۰ 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

آزمایش توسط دستگاه زدو ۱۰۱ (ZU101) ساخت شرکت زلاند تهیه شد. آب تهیه شده توسط این روش دارای هدایت الکتریکی ۰/۵۵ میکروانیه بر سانتی متر است و نشان دهنده دی یونیزه بودن آن است.

همچنین شایان به ذکر است که محفظه آزمایش و نازلها پس از هر بار آزمون توسط استون و آب دی یونیزه مورد شست و شو قرار می گرفتند. تمام آزمونها در دمای ۲۱ درجه سانتی گراد و pH ۷ انجام شده اند. خواص مواد مورد استفاده در آزمایش، در جدول ۱ آورده شده است که در آنها گرانروی توسط دستگاه ویسکواستار (ViscoStar)، هدایت الکتریکی و کشش های بین سطحی توسط دستگاه های جی ال پی ۳۲ (GPL 32) و کی اس وی سیگما ۷۰۱ (KSV Sigma701) اندازه گیری شده اند.

جدول ۱) خواص مواد استفاده شده در آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد

پارامتر	ماده		
	آب	هوا	روغن
کشش بین سطحی (mN/m)	آب	۷۲/۴	۳۷
	هوا	-	۲۰/۷
	روغن	۳۷	-
گرانروی (MPa)	۰/۸۹	۰/۱۸۵	۳۳۷
چگالی (kg/m ³)	۹۹۸	۱/۲	۹۳۴
هدایت الکتریکی (μS/cm)	۰/۵۵	-	۰/۰۳

مطالعه تجربی

تعیین شرایط مرزی سطوح مشترک

در مطالعه فیلم به دام افتاده میان قطره و حباب، تعیین شرایط مرزی در سطوح مشترک عاملی است که در ابتدا باید تعیین شود تا بتوان حل های تحلیلی متناظر با آنها را به کمک تئوری های روان کاری تعیین نمود. لذا سعی شد تا وضعیت سطوح مشترک به لحاظ غیرمتحرک، متحرک و یا نیمه متحرک بودن مشخص شوند. تعیین این امر که سطح مشترک در کدام یک از وضعیت های فوق قرار دارد کار ساده ای نخواهد بود اما یکی از راه هایی که توسط محققین مختلف استفاده شده [22, 42] محاسبه سرعت حد صعود حبابها و قطرات و مقایسه آنها با روابط تحلیلی موجود است. از این روابط تحلیلی می توان به رابطه استوکس برای سطوح غیرمتحرک اشاره کرد:

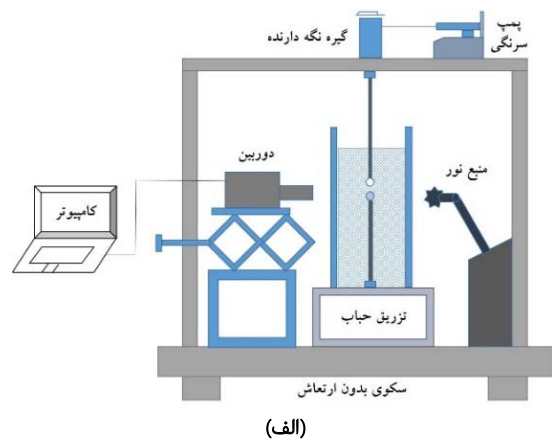
$$U_{St} = (\rho_w - \rho_a)gD^2 / (18\mu) \quad (1)$$

و رابطه هادامارد-ریبزیسکی (Hadamard-Rybczynsky) برای سطوح متحرک استفاده می شود:

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

که در آنها ρ چگالی، D قطر حباب، g شتاب گرانش، μ گرانروی دینامیکی و منظور از زیروندهای a و w به ترتیب هوا و آب هستند. شایان ذکر است که این روابط در محدوده رینولدزهای کوچک معتبر هستند، بنابراین سعی شد تا با کمک نازل بسیار کوچک از جنس کوارتز، حباب هایی بسیار کوچک تولید شوند و

حباب بر اثر نیروی شناوری را رصد نمود. بدین منظور همان طور که در شکل ۱ مشاهده می شود، از محفظه ای از جنس پلکسی گلس به عنوان محفظه آزمایش استفاده شد. در قسمت تحتانی محفظه، نازل تولید حباب قرار داده شد و در بالای آن نازل تولید قطره بر روی جابه جاگر خطی سه محوره (xyz Stage) قرار داده شد. جنس نازل تولید حباب برای ذرات ۱۰۰ میکرومتری، سوزن کپیلاری از جنس کوارتز با قطر ۳ میکرومتر بوده است و برای ذرات حباب با قطرهای بیشتر، الکترودهای با قطر داخلی ۱۰۰ میکرومتر؛ جهت تولید قطرات نیز نازل کوارتز با قطر ۲۰ میکرومتر استفاده شد. همچنین جهت کنترل میزان تزریق نیز از پمپ سرنگی با قابلیت چهار تزریق همزمان استفاده شده است. جهت عکس برداری از دوربین پی سی ا ۱۲۰۰ (PCO 1200) با نرخ ۶۳۸ فریم در ثانیه و لنز ماکرو (بزرگنمایی ۱X) بهره گرفته شد. همچنین جهت نورپردازی مناسب، از یک منبع نوری جریان مستقیم استفاده شده است. نمای کلی مدار در شکل ۱ دیده می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱) الف) شماتیک مدار آزمایشگاهی، ب) نمای نهایی دستگاه

مواد مصرفی

جهت تولید قطرات از روغن سیلیکون CS ۳۵۰ (شرکت کی سی سی؛ کره) استفاده شد. انتخاب روغن سیلیکون به این علت بوده که این ماده در لزجت های متفاوت و چگالی تقریباً ثابت موجود است و این مهم باعث آن می شود که بتوان در آزمایشات بعدی اثرات گرانروی را به تنهایی مورد بررسی قرار داد. آب مورد استفاده در این

داده شوند و این زمان‌های مشخصه پس از ائتلاف قطره- حباب توسط پردازش تصویر محاسبه شوند. در این مرحله به‌عنوان اولین فاکتور سعی شد تا تأثیر اندازه قطره و حباب بر این زمان‌های مشخصه بررسی شوند و علاوه بر آن، محدوده‌ای برای این زمان‌های مشخصه به‌عنوان اولین مقادیر گزارش شده، یافت شود. جهت بررسی این پارامتر، به‌عنوان معیاری از اندازه، قطر معادلی با تأثیر از قطر معادل تعریف شده در حالات دوفازی در نظر گرفته شد تا نتایج حاصله در مسیر نتایج ارایه شده در ادبیات فن باشد و در ادامه تأثیر این قطر معادل بر زمان تخلیه فیلم بینابینی و همچنین زمان پوشش بررسی شد. قطر معادل یادشده از فرمول ارایه شده در معادله ۳ به دست می‌آید:

$$R_{eq} = \frac{2 R_d R_b}{R_d + R_b} \quad (۳)$$

در این دست از مطالعات، عموماً پارامتری به نام ضریب پخش (Spreading Coefficient) تعریف می‌شود که فرم کلی آن مطابق رابطه ۴ است:

$$S_j = \sigma_{jk} - (\sigma_{ij} + \sigma_{ik}) \quad (۴)$$

که در آن ijk فازهای سیال هستند و منظور از σ_{ij} کشش سطحی میان سطح i و j است. حال که پخش شدن قطره روغنی بر روی حباب مد نظر است، این رابطه به شکل رابطه ۵ در می‌آید:

$$S_{oil} = \sigma_{water/air} - (\sigma_{oil/water} + \sigma_{oil/air}) = 72.4 - (37 + 20.4) > 0 \quad (۵)$$

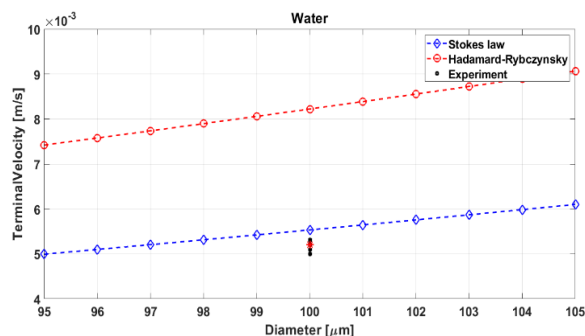
که مثبت بودن S_{oil} به منزله امکان پخش قطره روغنی بر روی حباب است. حال در این قسمت از آزمایش، چون ضریب پخش روغن بر روی هوا مقداری مثبت است و از طرفی، قطره و حباب مد نظر در کنار هم، زمان کافی را برای در مجاورت بودن هم دارا هستند، از ابتدا انتظار بر این بود که تمامی آزمایش‌ها منجر به ائتلاف موفق شوند که این امر در تمام آزمایش‌ها مشاهده شد، بنابراین در این سری آزمایشات بر خلاف آزمون‌های دینامیک، نیازی به تعریف پارامتری همچون بازده ائتلاف نیست.

نحوه تولید قطرات و حباب‌ها بدین صورت بوده که ابتدا حباب با قطر مد نظر بر روی نازل فلزی تولید شده و پس از آن قطره روغنی با سرعت کمی توسط پمپ سرنگی شروع به رشد می‌کند تا قطره نیز به قطر مورد نظر برسد، سپس به کمک جابه‌جاگر خطی، به آرامی قطره در تماس با حباب قرار داده می‌شود؛ از این لحظه به بعد برهم‌کنش قطره-حباب شروع می‌شود و در واقع این نقطه شروع اندازه‌گیری‌های زمان‌های مشخصه خواهد بود.

در نهایت به‌منظور بررسی اثر قطر معادل بر زمان تخلیه فیلم، شش سری آزمایش انجام شد که در هر سری از آزمایشات، هر آزمایش حداقل پنج‌بار تکرار شد و زمان تخلیه و پوشش حاصل از هر آزمایش، اندازه‌گیری شد. داده‌های اندازه‌گیری شده شامل میانگین داده‌ها و انحراف معیار آنها در جدول ۲ گزارش شده‌اند.

در صورتی که بخواهیم اطلاعات حاصل از این جدول را به‌صورت نمودار نشان دهیم، به نمودارهای ۲ و ۳ خواهیم رسید که در آنها اورب‌ار نشان‌دهنده انحراف معیار بدون بایاس است:

سرعت حد صعود آنها پس از ثابت شدن اندازه‌گیری شود و با سرعت حد حاصل از روابط ذکر شده مقایسه شوند. نمودار ۱ سرعت حد صعود حباب‌های هوا در بازه قطرهای ۹۵ تا ۱۰۵ میکرومتر را نشان می‌دهد.



نمودار ۱) سرعت حد صعود حباب‌های هوا در بازه ۹۵ تا ۱۰۵ میکرومتر

همان طور که مشخص است، سرعت حد به دست آمده در قطر ۱۰۰ میکرومتر با مقدار میانگین ۰/۰۵۲ متر بر ثانیه نسبت به سرعت حد استوکس که ۰/۰۵۵ است، با خطای ۶٪ کمتر از آن است که این به معنای غیرمتحرک بودن شرط مرزی حباب- آب است. شرط مرزی روغن- آب نیز به دلیل نسبت گرانروی بالای روغن نسبت به آب از نوع غیرمتحرک خواهد بود. لازم به توضیح است که همان گونه که برخی محققین^[42]، نیز عنوان نموده‌اند در عمل دست‌یابی به سطح مشترک کاملاً متحرک امری بسیار مشکل است، چرا که وجود کوچک‌ترین ناخالصی و یا مواد سطح فعال در مایع می‌تواند منتهی به سطح نیمه‌متحرک و یا کاملاً غیرمتحرک شود.

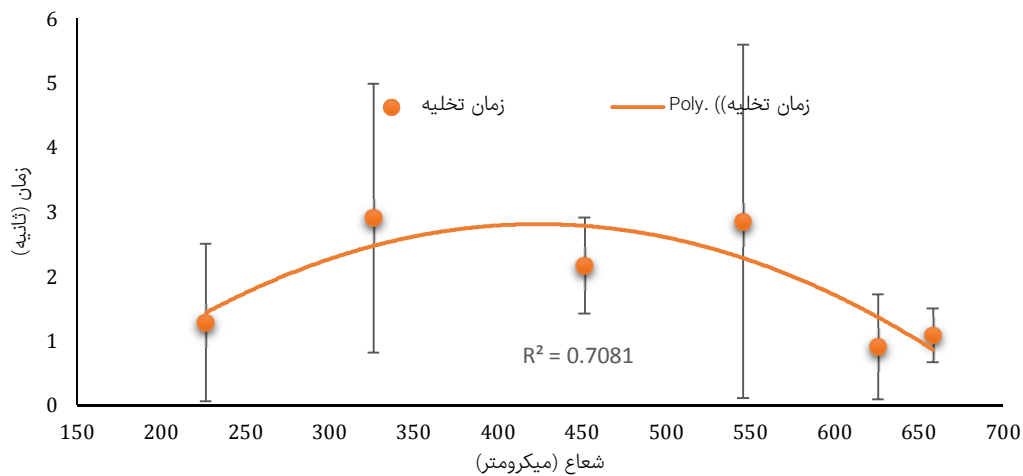
نتایج آزمایش

همان گونه که اشاره شد، در بین تمامی مدل‌های ارایه شده برای ائتلاف‌های دوفازی، مدل تخلیه فیلم بیشتر از سایر مدل‌ها، فیزیک حاکم بر مساله را مورد توجه قرار می‌دهد. لذا تلاش شد تا رویه شناخت ائتلاف قطره- حباب نیز با توجه به این مدل پی گرفته شود و ضمن این کار، به شناسایی زیرمکانیزم‌های موجود در فرآیند ائتلاف پرداخته شود. مطابق این مدل، از جمله زمان‌های مشخصه موجود در فرآیند ائتلاف، زمان تخلیه فیلم، زمان شکسته شدن فیلم و زمان دربرگیری حباب توسط روغن است. منظور از زمان تخلیه مدت‌زمان مورد نیاز برای خالی شدن فیلم مایع به‌دام افتاده بین قطره و حباب و رسیدن ضخامت فیلم به حد بحرانی شکسته شدن است، و منظور از زمان شکست، مدت‌زمان مورد نیاز از لحظه شکسته شدن فیلم تا لحظه ائتلاف قطره و حباب به‌صورت محلی است و منظور از زمان دربرگیری، مدت‌زمانی است که پس از ائتلاف محلی طول می‌کشد تا قطره و حباب به ائتلاف کامل دست بیابند. از این‌رو، در یک ائتلاف موفق دانستن این سه زمان مشخصه، به معلوم شدن مساله می‌انجامد، لذا سعی بر آن شد تا یک قطره روغنی و یک حباب گازی در مجاورت هم تشکیل

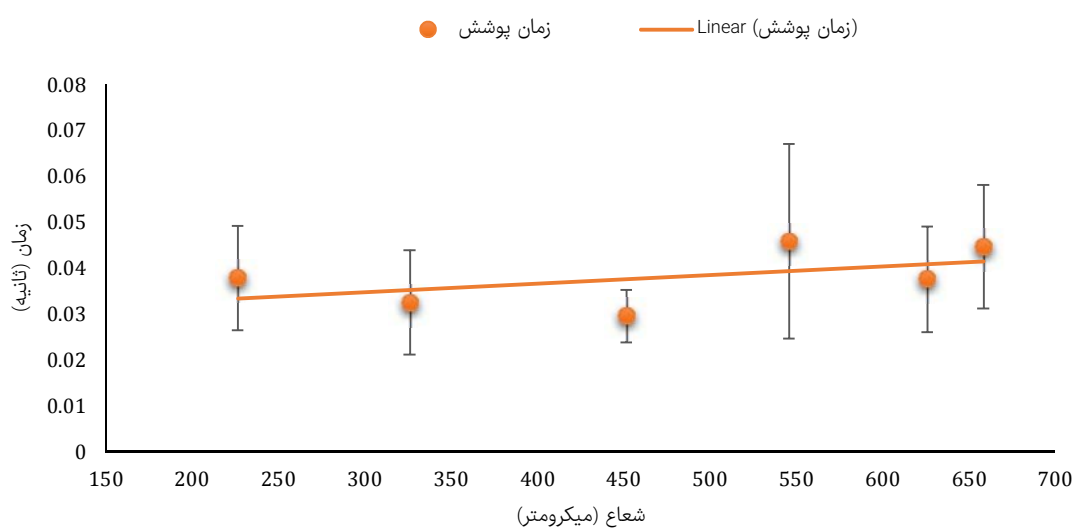
شکل‌های ۲ و ۳ شامل تصاویری از لحظات مختلف ائتلاف یک قطره روغنی و یک حباب گازی هستند که به‌عنوان دو نمونه از ائتلاف در مقیاس‌های متفاوت (شکل ۲ کوچک و شکل ۳ بزرگ‌تر) در این سری از آزمایش‌ها آورده شده‌اند.

جدول ۲) نتایج حاصل از اندازه‌گیری زمان‌های تخلیه و پوشش قطره بر روی حباب، در ائتلاف قطره-حباب

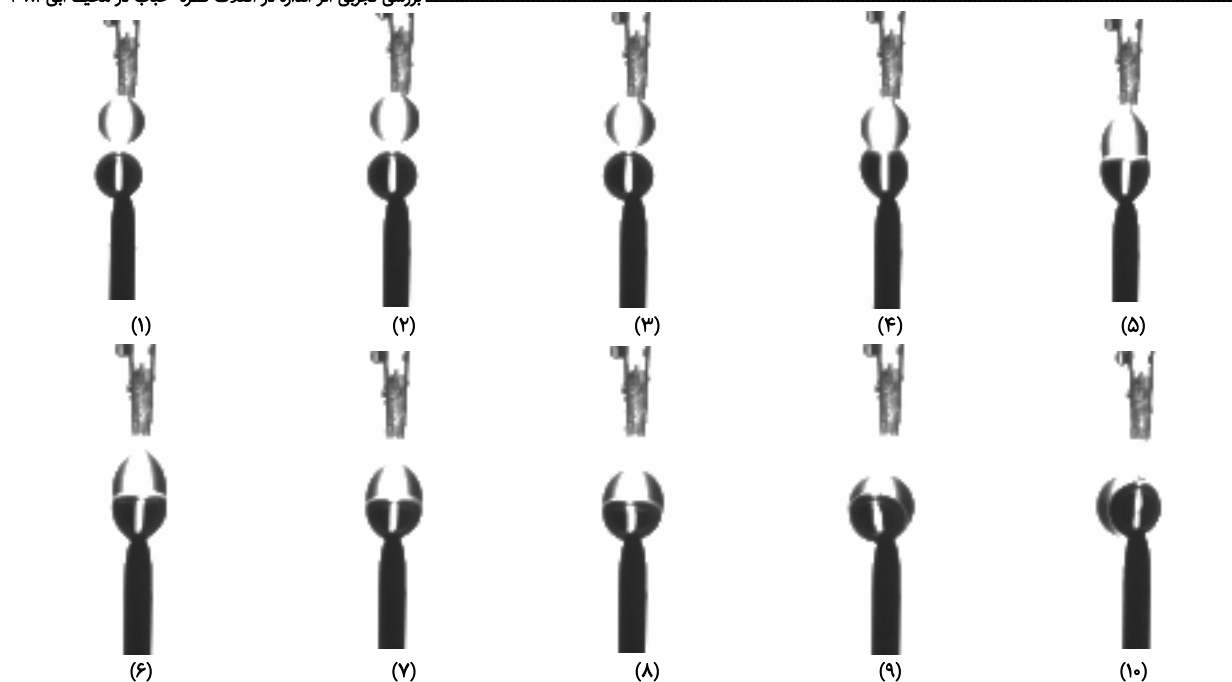
ردیف						پارامتر
۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۷۶۷	۶۵۳/۴۸	۵۷۱/۵۳	۴۴۱/۵۲	۳۲۱/۵۲	۲۳۱/۷	شعاع حباب (μm)
۱۷	۱۸/۷	۷/۱۵	۲۹/۵	۱۹/۸	۱۸/۶۵	انحراف معیار بدون بایاس شعاع حباب (μm)
۵۷۶/۹	۶۰۰/۷	۵۲۲/۴	۴۶۲/۲۴	۹۳۳/۰	۲۲۱/۶	شعاع قطره (μm)
۸/۹	۱۰/۰۱	۹/۴۵	۱۵/۰۴	۱۲/۶	۹/۳	انحراف معیار بدون بایاس شعاع قطره (μm)
۶۵۸/۵۴	۶۲۵/۹۸	۵۴۵/۸۵	۴۵۱/۶۴	۳۲۶/۱۴	۲۲۶/۵۳	R_{eq}
۱/۰۹	۰/۹۱	۲/۸۵	۲/۱۷	۲/۹	۱/۲۹	زمان تخلیه (S)
۰/۴۲	۰/۸۱	۲/۷۴	۰/۷۴	۲/۰۹	۱/۲۲	انحراف معیار زمان تخلیه (S)
۰/۰۴۵	۰/۰۳۸	۰/۰۴۶	۰/۰۴۶	۰/۰۳۲۵	۰/۰۳۹	زمان پوشش یافتن قطره (S)
۰/۰۱۳	۰/۰۱۱	۰/۰۲۱	۰/۰۲۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵۹	انحراف معیار زمان پوشش (S)



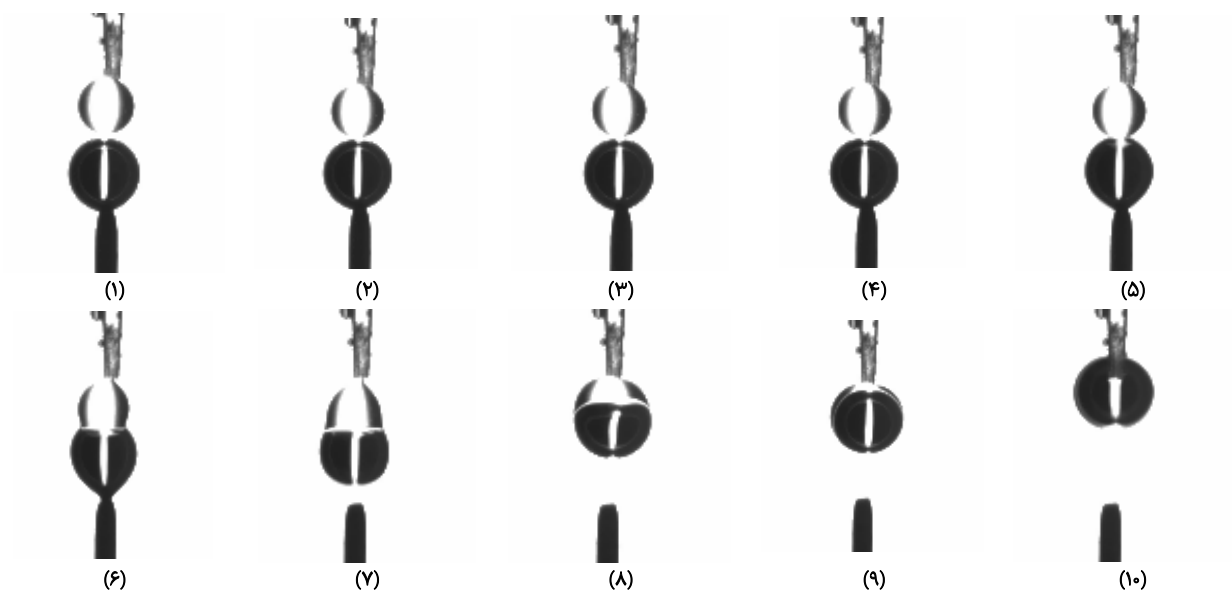
نمودار ۲) تغییرات زمان تخلیه برحسب شعاع معادل و خط برازش شده بر آن



نمودار ۳) منحنی مدت زمان پخش قطره روغنی برحسب قطر معادل و خط برازش شده بر روی آن



شکل ۲ نمونه‌ای از بررسی ائتلاف در حالت استاتیک



شکل ۳ نمونه‌ای از بررسی ائتلاف در حالت استاتیک

برای این کار همان طور که از جدول ۲ برمی‌آید، شش سری آزمایش در قطره‌های مختلف در نظر گرفته شد و قطره و حباب در هر یک از این قطرها با پراکندگی و انحراف معیار کمتر از ۱۰٪ بازتولید شدند، سپس زمان تخلیه و پوشش در هر تکرار اندازه‌گیری شد. در نمودار ۳ می‌توان به کمک یک سهمی و با شاخص ارتباط ۰/۷ سهمی بر این داده‌ها برازش نمود، اما به دلیل کم بودن نقاط و زیاد بودن انحراف معیار در آنها، چنین کاری مبنای علمی نخواهد داشت. در این نمودار همان طور که مشاهده می‌شود، روند یک‌نوازی در این اندازه‌گیری‌ها مشاهده نمی‌شود و در واقع تغییرات زمان تخلیه به گونه‌ای مستقل از اندازه دیده می‌شود.

بحث

همان طور که در بخش‌های قبلی ذکر شد، در این کار شش دسته آزمایش با هدف ارزیابی میزان اثرگذاری اندازه قطره و حباب بر زمان تخلیه فیلم در ائتلاف سه‌فازی انجام شد. پارامتر مستقل اصلی، قطر معادل در نظر گرفته شد. این پارامتر از ترکیب اندازه حباب و قطره به دست می‌آید و با توجه به رابطه یانگ-لاپلاس اثبات می‌شود که در برخوردی که دو ذره هم‌اندازه نیستند، می‌توان از این قطر به عنوان قطر معادل استفاده نمود [43, 44]، حال در حالت سه‌فازی نیز از این طول مشخصه استفاده شد تا تأثیر این اندازه مشخصه احتمالی بر ائتلاف مورد مطالعه قرار گیرد.

علاوه بر مقدار متوسط داده‌ها که روند یک‌نواپی نداشته‌اند، میزان پراکندگی داده‌ها نیز دارای روند مشخصی نیستند و این مورد بدان معنا است که نوسانات و ناپایداری‌ها نیز تابعیت چندانی از قطر معادل نخواهند داشت. البته نکته قابل توجه آن است که این نتیجه‌گیری صرفاً در این مقدار از اندازه‌گیری‌ها برقرار است و به هیچ عنوان نباید آن را به اندازه‌های کوچک‌تر و یا بزرگ‌تر تعمیم داد. تبعیت نکردن زمان تخلیه از اندازه را می‌توان طبق تفاسیر زیر توجیه نمود.

به‌طور کلی وقتی صحبت از زمان تخلیه می‌شود دو عامل اثرگذار حجم به‌دام‌افتاده و سرعت تخلیه فیلم به‌دام‌افتاده بر آن دیده می‌شود. سرعت تخلیه فیلم در اشل ماکروسکوپی صرفاً تابع خواص سینماتیکی محیط و شرایط مرزی است که در آزمون‌های فعلی یکسان است و در اشل میکروسکوپی می‌تواند تابع نیروهای محلی و نقطه‌ای سطحی و یا تابع جریان‌های محلی نیز باشد که ناگزیراً می‌تواند از آزمایشی به آزمایشی دیگر متفاوت شود. از جمله این عوامل میکروسکوپی می‌توان به اثرات مارانگونی، نیروهای الکتریکی دولایه‌ای و واندروالس اشاره نمود. بنابراین به لحاظ تئوری تغییراتی در اشل میکروسکوپی می‌تواند موجب تغییراتی در سرعت تخلیه فیلم شود که البته میزان اثرگذاری آن باید مورد بحث قرار گیرد. حجم به‌دام‌افتاده نیز عاملی است که به لحاظ تئوری می‌تواند زمان تخلیه را تحت تأثیر قرار دهد، حجم‌های بیشتر مستلزم زمان بیشتر و حجم‌های کمتر مستلزم زمان کمتری خواهند بود. چیزی که در نگاه اول به ذهن می‌رسد آن است که عاملی چون حجم به‌دام‌افتاده اثری مهم‌تر از سایر اثرات خواهد داشت و اثری همچون وجود ناپایداری‌های میکروسکوپی که موجب تغییر سرعت تخلیه می‌شوند، اثراتی به مراتب کمتر خواهند داشت. لیکن با توجه به نتایج آزمایش فعلی، عکس این مطلب صادق خواهد بود. از آنجایی که سطح تماس قطره و حباب تابعی از اندازه است، لذا حجم فیلم به‌دام‌افتاده در بین قطره-حباب نیز تابعی از اندازه است. بنابراین در صورتی که حجم به‌دام‌افتاده دارای اثراتی قابل توجه در مقایسه با سایر اثرات میکروسکوپی موجود در مساله باشد، باید نتایج حاصل از آزمایشات روند یک‌نواپی را نشان دهند که این فرض در تناقض با نتایج به‌دست‌آمده است، لذا اثر گذاری حجم به‌دام‌افتاده در زمان تخلیه بسیار ناچیز است. همچنین در این مرحله می‌توان به زمان شکست فیلم و پوشش نیز اشاره داشت، در واقع این طور به نظر می‌رسد که حجم اصلی آب به‌دام‌افتاده در بین قطره و حباب در مقیاس زمانی بسیار کوچک‌تری نسبت به زمان تخلیه اصلی، تخلیه می‌شود که به آن زمان شکست فیلم گفته می‌شود. بنابراین حجم به‌دام‌افتاده فیلم ابداً اثرگذاری خاصی در تعیین زمان تخلیه نخواهد داشت و بالعکس این اثرات میکروسکوپی موجود در فرآیند است که اثرات اصلی را در تعیین زمان تخلیه برعهده خواهند داشت. عامل اصلی در انحراف معیارهای بسیار بزرگ دیده‌شده در نمودارها و اندازه‌گیری‌های زمان تخلیه نیز وجود

همین اثرات میکروسکوپی موجود در طبیعت فرآیند است. در واقع این پراکندگی‌ها ناشی از ماهیت پدیده است که تقریباً به‌طور آماری در حال تغییر است، زیرا با آنکه در انجام آزمایش سعی بر ثابت نگه‌داشتن پارامترهای ماکروسکوپی می‌شود، اما در این پدیده پارامترهایی در مقیاس‌های میکروسکوپی وجود دارند که در تخلیه فیلم نازک نهایی بسیار موثر خواهند بود. از جمله پدیده‌های موثر می‌توان به پدیده‌های ناپایداری مارانگونی اشاره کرد. این پدیده در دو دسته اصلی ناپایداری مارانگونی-کانوکشن و ناپایداری ترموکیپیلاری-کانوکشن دسته‌بندی می‌شود [45، 46]. دسته نخست مربوط به زمانی است که گرادیان دمای محلی در راستای عمود بر سطح مشترک وجود داشته باشد. در این حالت برای ایجاد جریان ثانویه، گرادیان دما می‌بایست از حداقلی که بتواند بر اثرات گرانروی غلبه کند بیشتر باشد، پس در آزمایش فعلی می‌توان از این مورد صرف نظر کرد. اما مورد دوم مربوط به حالتی است که گرادیان‌های محلی در موازات سطح مشترک وجود دارند. در این حالت حتی گرادیان‌های دمایی بسیار جزئی ناشی از نور محیط می‌تواند منجر به ایجاد جریان شود که در گرادیان‌های کوچک منجر به جریان‌های یک‌بعدی و دوبعدی و در گرادیان‌های بالاتر منجر به جریان‌های سه‌بعدی می‌شوند. حال که موضوع بحث فیلم باریکی از مرتبه چندصدانومتر مطرح است، یقیناً جریان‌های یک‌بعدی نیز اثرات قابل توجهی در راستای تخلیه فیلم و زمان مربوط به این فرآیند خواهند گذارد. بنابراین یکی از عوامل ایجاد پراکندگی در زمان‌های ثبت شده تخلیه فیلم، ناشی از اثرات ناپایداری ترموکیپیلاری-کانوکشن است. از جمله اثرات دیگر می‌توان به اثرات مارانگونی ناشی از وجود گرادیان‌های گرمی، موج‌ها و اغتشاشات کیپیلاری و لرزش‌های ناخواسته در میدان اشاره کرد. در این مدار آزمایشگاهی سعی شد تا با استفاده از ایزولاتورهای سوربوتان میزان لغزش‌های ناخواسته به حداقل برسد ولی همچنان این اثرات وجود خواهند داشت. بنابراین این گونه به‌نظر می‌رسد که در این پدیده پارامترهایی همانند گرادیان‌های محلی، اثرات بسیار بیشتری نسبت به اندازه قطره و حباب و حجم فیلم به‌دام‌افتاده خواهند داشت و در بحث مدل‌سازی‌های عددی نیز باید این امر را مد نظر قرار داد.

همچنین در ادبیات فن در حالت دوفازی، در مدل تخلیه فیلم، روابطی وجود دارند که بازه ائتلاف را به دو مقیاس زمانی، زمان تخلیه و زمان تماس مرتبط می‌سازند. این روابط در ابتدا با فرض گسترده‌بودن زمان تخلیه و زمان تماس و پیروی از تابع توزیع نرمال توسط راس [47] به‌دست آمده بودند و پس از آن توسط کولانگلو [48] و با فرض ثابت‌بودن زمان تخلیه ساده‌سازی شدند، اما نتایج حاصل از آزمایشات فعلی حاکی از آن است که فرض غیرگسترده‌بودن زمان تخلیه، حداقل در حالت سه‌فازی، مگر در حالاتی بسیار کنترل‌شده خصوصاً در شرایطی از قبیل سیستم‌های فلوتاسیون واقعی، قابل دست‌یابی نخواهد بود. چنین پراکندگی‌هایی در زمان تخلیه فیلم در برخی کارهای دیگر نیز

میکروسکوپی از قبیل اثرات مارانگونی و نیروهای بین مولکولی و اندروالس و الکتریکی دولایه‌ای هستند که با اعمال تغییرات در مقیاس میکروسکوپی موجب تغییرات مهم در زمان تخلیه می‌شوند.

۵- زمان تخلیه در مقایسه با زمان‌های مشخصه شکست فیلم و پوشش، دارای مقداری قابل توجهی است و می‌توان از زمان شکست فیلم در مقابل تخلیه فیلم صرف نظر نمود. به این معنا که در مدل تخلیه فیلم در حالت دینامیک و در یک ائتلاف موفق، صرفاً نیاز است تا زمان برخورد از زمان تخلیه بیشتر شود.

تشکر و قدردانی: از کمک‌های مالی و امکانات در اختیار گذاشته شده توسط آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: حسام آمی‌احمدی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ عادل عبادی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۵٪)؛ سیدمصطفی حسینعلی‌پور (نویسنده سوم)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی (۳۰٪).

منابع مالی: توسط آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست دانشکده مکانیک دانشگاه علم و صنعت ایران تأمین شده 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- Nikolov AD, Randie M, Shetty CS, Wasan DT. Chemical demulsification of oil-in-water emulsion using air-flotation: the importance of film thickness stability. *Chemical Engineering Communications*. 1996;152-153(1):337-350.
- 3- 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.
- 4- Eftekhardakhah M, Aanesen SV, Rabe K, Øye G. Oil 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.
- 5- Eftekhardakhah M, Øye GJE. Induction and coverage times for crude oil droplets spreading on air bubbles. *Environmental Science & Technology*. 2013;47(24):14154-14160.
- 6- 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.
- 7- 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.

گزارش شده است [5, 32].

همان طور که ذکر شد، چهار زمان مشخصه حضور دارند. زمان تخلیه، زمان برخورد، زمان پوشش و زمان شکست که تاکنون در مورد زمان تخلیه بحث‌هایی صورت گرفت.

اگر خواسته شود که پیرامون سایر زمان‌های مشخصه در این آزمایش‌ها توضیحاتی داده شود، باید گفت که از میان این زمان‌های مشخصه، زمان برخورد به دلیل بررسی آزمایش‌ها در حالت استاتیک، بی‌نهایت خواهد بود و در این آزمایشات محاسبه نمی‌شوند. اما دو زمان مشخصه دیگر شامل شکست فیلم و پوشش، کماکان حضور خواهند داشت. از این بین، با بررسی‌های صورت‌گرفته مشخص شد که شکست فیلم همواره در بین دو فریم متوالی در عکس‌برداری قرار گرفته است، بنابراین می‌توان اذعان نمود که زمان شکست فیلم در این آزمایش‌ها همواره کمتر از زمان بین دو فریم است (کمتر از ۱/۵ میلی ثانیه).

در این شش سری آزمایشات همراه با تکرار، زمان پوشش نیز به دست آمده است که هدف از محاسبه آن مقایسه با زمان تخلیه بوده است. همان طور که از نمودار ۳ و جدول ۲ مشخص است، این زمان مشخصه در بازه ۲۰ تا ۷۰ میلی‌ثانیه بوده است که در مقایسه با زمان تخلیه که در طیف ۷٪ تا ۵/۶٪ ثانیه قرار دارد، بسیار کوچک‌تر بوده است. در واقع این طور به نظر می‌رسد که از بین تمامی سه زمان مشخصه تخلیه فیلم، شکست فیلم و پوشش، زمان تخلیه بیشترین مقدار را دارا خواهد بود و سایر زمان‌های مشخصه خصوصاً زمان شکست فیلم در مقابل آن قابل صرف نظر هستند.

نتیجه‌گیری

شش سری آزمایش در اندازه‌های مختلف قطره- حباب و هر سری آزمایش با حداقل پنج تکرار انجام گرفت تا در نهایت بتوان تأثیر اندازه را بر زمان مشخصه تخلیه مشاهده نمود. در نهایت چندین نتیجه از این بررسی مشخص شد که مهم‌ترین آنها مطابق زیر است:

- ۱- زمان تخلیه فیلم بینابینی تابعیت مشخصی از اندازه قطره و حباب نخواهد داشت.
- ۲- اندازه‌گیری‌ها در هر اندازه نشان می‌دهند که با وجود ثابت ماندن تمامی پارامترهای ماکروسکوپی، زمان‌های به دست آمده از تکرارهای مختلف بسیار متفاوت خواهند بود، پس به طور کلی زمان تخلیه خاصیتی است که شدیداً تابع خواص میکروسکوپی موجود در فیزیک مساله است و به طور آماری در هر نقطه تغییر می‌کند.
- ۳- زمان تخلیه به طور کلی خاصیتی پراکنده و نه متمرکز خواهد بود و این مهم خصوصاً در ارایه روابط تحلیلی در محاسبه زمان تخلیه باید لحاظ شود.
- ۴- حجم به دام افتاده در بین قطره و حباب اثر بسیار ناچیزی در زمان تخلیه فیلم بینابینی خواهد داشت و این اثرات

- oil droplets: Absolute separations and forces in nanofilms. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2011;2(9):961-965.
- 27- Tabor RF, Wu C, 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- 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.
- 30- 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.
- 31- 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.
- 32- 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.
- 33- 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.
- 34- Lee TY, Choi TM, Shim TS, Frijns RAM, Kim SH. Microfluidic production of multiple emulsions and functional microcapsules. *Physical Chemistry and Soft Matter*. 2016;16(18):3415-3440.
- 35- 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.
- 36- 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.
- 37- Torza S, Mason SG. Three-phase interactions in shear and electrical field. *Current Journal of Colloid and Interface Science*. 1970;33(1):67-83.
- 38- Torza S, Mason SG. Coalescence of two immiscible liquid drops. *Science*. 1969;163(3869):813-814.
- 39- Kirkpatrick RD, Lockett MJ. The influence of approach velocity on bubble coalescence. *Chemical Engineering Science*. 1974;29(12):2363-2373.
- 40- 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.
- 41- 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.
- 42- 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.
- 43- Butt HJ, Graf K, Kappl M. *Physics and chemistry of interfaces*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2013.
- 44- Princen HM. The equilibrium shape of interfaces, drops, and bubbles. Rigid and deformable particles at interfaces. *Surface and Colloid Science*. 1969;2:1-84.
- 45- Schatz MF, Neitzel GP. Experiments on thermocapillary instabilities. *Annual Review of Fluid*
- 8- Won JY, Krägel J, Gochev G, Ulaganathan V, Javadi A, Makievski AV, et al. Bubble-bubble interaction in aqueous β -Lactoglobulin solutions. *Food Hydrocolloids*. 2014;34:15-21.
- 9- 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.
- 10- Dudek M, Øye GJE. Microfluidic study on the attachment of crude oil droplets to gas bubbles. *Energy & Fuels*. 2018;32(10):10513-10521.
- 11- 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.
- 12- Leal LG. Flow induced coalescence of drops in a viscous fluid. *Physics of Fluids*. 2004;16(6):1833-1851.
- 13- Chesters AK, Hofman G. Bubble coalescence in pure liquids. *Applied Scientific Research*. 1982;38:353-361.
- 14- Chesters AK. The modelling of coalescence processes in fluid-liquid dispersions: A review of current understanding. *Chemical Engineering Research & Design*. 1991;69:259-270.
- 15- 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.
- 16- Howarth WJ. Coalescence of drops in a turbulent flow field. *Chemical Engineering Science*. 1964;19(1):33-38.
- 17- Howarth WJ. Measurement of coalescence frequency in an agitated tank. *AIChE Journal*. 1967;13(5):1007-1013.
- 18- 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.
- 19- Prince MJ, Blanch HW. Bubble coalescence and break-up in air-sparged bubble columns. *AIChE Journal*. 1990;36(10):1485-1499.
- 20- 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.
- 21- Lehr F, Mewes D. A transport equation for the interfacial area density applied to bubble columns. *Chemical Engineering Science*. 2001;56(3):1159-1166.
- 22- 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.
- 23- 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.
- 24- Frostad JM, Collins MC, Leal LG. Cantilevered-capillary force apparatus for measuring multiphase fluid interactions. *Langmuir*. 2013;29(15):4715-4725.
- 25- Tabor RF, Grieser F, Dagastine RR, Chan DYC. Measurement and analysis of forces in bubble and droplet systems using AFM. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2012;371(1):1-14.
- 26- Tabor RF, Lockie H, Mair D, Manica R, Chan DYC, Grieser F, et al. Combined AFM- confocal microscopy of

phase mixing process [dissertation]. Ann Arbor: University Microfilms; 1971.
48- Coualoglou CA. Dispersed phase interactions in an agitated flow vessel [dissertation]. Ann Arbor: University Microfilms; 1976.

Mechanics. 2001;33(1):93-127.

46- Van Honschoten JW, Brunets N, Tas NR. Capillarity at the nanoscale. Chemical Society Reviews. 2010;39(3):1096-1114.

47- Ross SL. Measurements and models of the dispersed