ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2021;21(10):693-705

A Novel Method for Asymmetric Breakup of Non-Newtonian Micro Droplets

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Bedram A.*[1]

How to cite this article
Bedram A. A novel method for asymmetric breakup of non-Newtonian micro droplets. Modares Mechanical Engineering. 2021; 21(10):693-705.

[1]Faculty of Imam Ali, South Khorasan Branch, Technical and Vocational University (TVU), Tabas, Iran

***Correspondence**
Address: Mechanical Engineering, Imam Ali Technical School, Technical and Vocational University, Tabas, Iran.
Phone: -
Fax: -
abedram@tvu.ac.ir

Article History
Received: November 18, 2020
Accepted: May 06, 2021
ePublished: 8 August, 2021

ABSTRACT

In this paper, an asymmetric breakup of non-Newtonian droplet (with power law behavior) in a new geometry (network junction) has been investigated. The geometry can break an initial droplet into six unequal size droplets. The research method is numerical simulation with Volume of Fluid (VOF) algorithm. The numerical results are compared with the results of a benchmark problem and a very good agreement is seen. The results showed that in areas close to the wall, mixing of materials of inside droplet is performed better, which is important in industrial applications of droplet based flows, especially in pharmaceutical and chemical industries. The results showed that the maximum vorticity magnitude in the K1 branch (the lowest output branch in the system) is 26, 44 and 28 % more than the maximum vorticity magnitude of the branches of K2, K3 and K4 (K4 is the highest output branch is in system). Also, maximum effective viscosity in the K1 branch is 27, 29 and 24 % less than the maximum effective viscosity in the K2, K3 and K4 branches, respectively. Therefore, K1 branch has the best performance in mixing of the material of inside droplet among the output branches. It was also revealed that the pressure of inside of droplet (both before and after breakup) is constant along the channel width.

Keywords Droplet, Non-Newtonian fluid, Breakup, Network junction, numerical simulation, VOF

CITATION LINKS

[1] A Novel Method for Controlling Breakup Volume Ratio of Droplets in Micro and Nanofluidic T-Junctions. [2] Understanding Uniform, Fast, and Scalable Buoyancy-Driven Macro-Sized Drop Generations. [3] Viscous resistance in drop coalescence. [4] An integrated droplet-digital microfluidic system ... [5] Dynamics of droplet breakup and formation of satellite droplets in a microfluidic T-junction. [6] Numerical study of the dynamics of a droplet in a T-junction microchannel using OpenFOAM. [7] Breakup of Droplets in Micro and Nanofluidic T-junctions. [8] Hydrodynamic feedback on bubble breakup at a T-junction within an asymmetric loop. [9] Droplet breakup in an asymmetric microfluidic T junction. [10] Numerical investigation of an efficient method for producing unequal-sized droplets ... [11] Analytical relations for long-droplet breakup in asymmetric T junctions. [12] Generation of Newtonian droplets in Newtonian and non-Newtonian carrier flows in micro T-junctions. [13] Numerical studies of shear-thinning droplet formation ... [14] Bubble formation in non-Newtonian fluids in a microfluidic T-junction. [15] CFD analysis of microfluidic droplet formation in non–Newtonian liquid. [16] Droplet breakup driven by shear thinning solutions in a microfluidic T-junction. [17] Generation of Newtonian and non-Newtonian droplets in silicone oil flow by means of a micro cross-junction. [18] Breakup of drops in a microfluidic T junction. [19] Rheological behavior of saudi crude oils. [20] Characterization of Arab Berri Crude Fractionş With Emphasis on Kinematic Viscósity-Temperature Behavior. [21] Adsorption of aliphatic ionic liquids at low waxy crude oil–water interfaces and the effect of brine. [22] Contact angle measurements and wetting behavior of inner surfaces of pipelines ... [23] Droplet formation of H2SO4/alkane system in a T-junction microchannel. [24] Experimental and theoretical studies of liquid sloshing at simulated low gravity. [25] Simplified model for prediction of bubble growth at nucleation site in microchannels. [26] 1H NMR and acoustic response of binary mixtures of an organophosphorous extractant with 1-alkanols. [27] Intermolecular free length and free volume of pure liquids ... [28] Molecular interactions in binary mixtures of tetrahydrofuran with alkanols. [29] Fluid Mechanics 7th Edition.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

روشی جدید برای شکست نامتقارن میکروقطرات غیرنیوتنی

احمد پدرام*
گروه مکانیک، آموزشکده‌ی امام علی (علیه‌السّلام) طبس، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان خراسان جنوبی، ایران

چکیده

در این پژوهش، شکست نامتقارن قطره‌ی با سیال غیرنیوتنی (با رفتار توانی) در یک هندسه جدید (اتصال شبکه‌ای) مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مذکور می‌تواند یک قطره اولیه را به شش قطره با اندازه‌های مختلف تبدیل نماید. روش پژوهش، شبیه‌سازی عددی به روش Volume of Fluid (VOF) است. نتایج عددی با نتایج یک مسئله مبنا مقایسه و تطابق بسیار خوبی مشاهده شده است. نتایج نشان داد که در نواحی نزدیک به دیواره، اختلاط مواد داخل قطره بهتر انجام می‌شود که این موضوع در کاربردهای صنعتی جریان‌های قطره‌ای به ویژه در صنایع داروسازی و شیمیایی، دارای اهمیت است. نتایج نشان داد که بیشترین اندازه‌ی گردابی در شاخه‌ی K1 (پایین‌ترین شاخه‌ی خروجی در سیستم) به ترتیب ۲۶ و ۴۴ و ۲۸ درصد بیشتر از بیشترین اندازه گردابی در شاخه‌های K2 و K3 و K4 است (K4 بالاترین شاخه‌ی خروجی در سیستم است). همچنین بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌ی K1 به ترتیب ۲۷ و ۲۹ و ۲۴ درصد کمتر از بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌های K2، K3 و K4 است. بنابراین بهترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره در شاخه‌های خروجی مربوط به شاخه‌ی K1 است. همچنین مشخص شد که فشار داخل قطره (هم قبل و هم بعد از شکست) در راستای عرض کانال ثابت است.

کلیدواژه‌ها: قطره، سیال غیرنیوتنی، شکست، اتصال شبکه‌ای، حل عددی، VOF

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶
*نویسنده مسئول: abedram@tvu.ac.ir

۱- مقدمه

کاربردهای فراوانی برای فرآیندهای میکروسیالی و به صورت خاص، فرآیندهای قطره‌ای در صنایع داروسازی، شیمیایی، پتروشیمی، نفت و غیره وجود دارد. در فرآیندهای قطره‌ای، یک قطره از یک سیال خاص به سیال پایه دیگری افزوده می‌شود. فرآیندهای ریزسیالی شامل انواع حالات شکست[1]، تولید[2]، ترکیب[3]، اختلاط[4] و کنترل می‌باشد. اتصال T شکل یکی از روش‌های تولید قطرات با تعداد بالاست. در این روش، سیال فرعی (که قرار است به قطره تبدیل شود) را به کانال سیال پایه تزریق می‌کنند. این موضوع باعث تشکیل قطرات سیال فرعی در سیال پایه می‌شود.

روش‌های مختلفی برای تقسیم یک قطره اولیه به دو یا چند قطره کوچک‌تر ارائه شده است. یکی از ساده‌ترین این روش‌ها اتصال T شکل متقارن است[5-7] که تنها یک اندازه مشخص از قطره را تولید می‌کند. در این روش، قطرات از شاخه مرکزی اتصال وارد شده و با رسیدن به مرکز اتصال T شکل، دچار تغییر شکل می‌شوند و درنهایت در شرایط خاصی، دچار شکست شده و به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شوند. در برخی شرایط نیز قطره دچار شکست نشده و وارد یکی از شاخه‌های فرعی اتصال T شکل می‌شود.

اتصال T شکل با شاخه‌های با طول‌های متفاوت می‌تواند از یک قطره اولیه، قطرات غیر هم اندازه ایجاد نماید[8]. در این روش، از اتصال T شکل با دو شاخه با طول‌های غیریکسان استفاده می‌شود که قطره اولیه از طریق شاخه اصلی به مرکز اتصال می‌رسد و در مرکز اتصال دچار تغییر شکل شده و به دو قسمت غیر هم اندازه تقسیم می‌شود. قطره بزرگ‌تر وارد شاخه با طول کمتر و قطره کوچک‌تر وارد شاخه با طول بیش‌تر می‌شود.

روشی دیگر برای تولید قطرات غیر هم اندازه، استفاده از اتصال T شکل با شاخه‌های غیرهم‌عرض است[9]. در روش مذکور، از اتصال T شکل که دو شاخه فرعی آن دارای عرض غیریکسان هستند استفاده می‌شود. قطره در مرکز اتصال دچار تغییر شکل شده و قطره بزرگ‌تر تولید شده وارد شاخه با عرض بیش‌تر می‌شود و دلیل این امر نیز آن است که شاخه با عرض بیش‌تر، مقاومت هیدرودینامیکی کمتری داشته و دبی بیشتری از سیال وارد آن می‌شود لذا قطره بزرگ‌تری نیز وارد این شاخه خواهد شد.

اتصال T شکل همراه با شیر نیز، قطره اولیه را به قطراتی غیر هم اندازه تقسیم می‌کند[10,11]. از مزایای این روش آن است که می‌توان با تنظیم میزان باز بودن شیر، نسبت حجم قطرات تولیدی را تنظیم نمود. البته ایراد این روش نیز این است که ساخت ساز و کار شیر در هندسه مسئله هزینه‌های اضافه‌تری را ایجاد می‌نماید.

تولید قطرات غیرنیوتنی در پژوهش‌هایی بررسی شده است[12-14] و روش‌های مختلفی از جمله استفاده از اتصال T شکل متقارن برای نیل به این هدف ارائه شده است[15,16]. همانطور که قبلاً نیز بیان شد، در روش مذکور قطرات با اندازه‌های یکسان از یک قطره اولیه تولید می‌شود. در برخی پژوهش‌ها نیز تولید قطره غیرنیوتنی در اتصال T شکل ضربدری بررسی شده است[17].

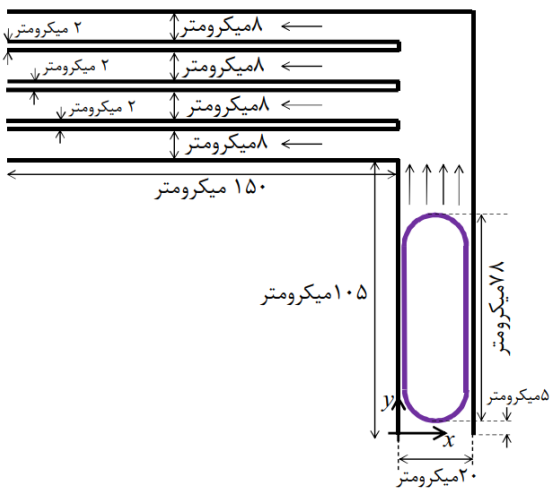
در پژوهش پیش رو، یک روش جدید برای تولید قطرات با اندازه‌های غیریکسان از یک قطره غیرنیوتنی اولیه ارائه شده است. وجه تمایز و نوآوری مقاله‌ی حاضر نسبت به پژوهش‌های قبل، این دو مورد است: ۱- در پژوهش‌های قبل، شکست قطره «غیرنیوتنی» به قطرات با اندازه‌های غیریکسان بررسی نشده است که در این مقاله، این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. ۲- در عمده پژوهش‌های قبل که شکست نامتقارن قطرات «نیوتنی» را بررسی نموده‌اند، قطره اولیه به «دو» قطره غیرهم‌اندازه تقسیم می‌شود. اما در مقاله‌ی پیش رو، با معرفی یک روش جدید، از شکست قطره «غیرنیوتنی» اولیه، «شش» قطره با اندازه متفاوت تولید می‌شود. در این پژوهش، سیال قطره به صورت سیال غیرنیوتنی در نظر گرفته شده است. روش پژوهش، شبیه‌سازی عددی به روش VOF به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت می‌باشد. به منظور بررسی صحت روش پژوهش، نتایج عددی این پژوهش با

نتایج یک پژوهش مبنا[18] مقایسه و تطابق بسیار خوبی مشاهده شده است (پژوهش مبنای ذکر شده، به روش حل تحلیلی بوده و در تعداد بسیار زیادی از مقالات حوزه‌ی شکست و تولید قطرات به عنوان پژوهش مبنا به منظور بررسی صحت نتایج مقالات استفاده شده است). همچنین در پژوهش پیش رو سعی شده است تا مناطقی از سیستم که بهترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره را دارند شناسایی شود زیرا این مورد (اختلاط مواد داخل قطره) در صنایع داروسازی و شیمیایی کاربرد دارد.

۲- مشخصات هندسی

در شکل ۱ هندسه مسئله که از این پس آن را اتصال شبکه‌ای می‌نامیم، نشان داده شده است. جریان سیال پیوسته نیوتنی (به همراه قطرات غیرنیوتنی) از شاخه عمودی وارد سیستم شده و از چهار شاخه افقی خارج می‌شود. عرض شاخه عمودی ۲۰ میکرومتر و عرض هر یک از شاخه‌های افقی برابر با ۸ میکرومتر است. طول قطره ورودی به سیستم (فاصله لبه‌ی جلو و انتهایی قطره) برابر با ۷۸ میکرومتر است. ابتدا و انتهای قطره نیز نیم‌دایره‌هایی به شعاع ۹ میکرومتر است. شرط مرزی ورودی سیستم سرعت ثابت و شرط مرزی در خروجی‌های سیستم (شاخه‌های افقی) فشار ثابت می‌باشد. سرعت سیال در ورود به سیستم ۱ m/s است. طول شاخه ورودی ۱۰۵ میکرومتر و طول شاخه‌های فرعی ۱۵۰ میکرومتر است. قطره به صورت سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (Power law) در نظر گرفته شده است که در رفتار توانی، ارتباط تنش برشی با گرادیان سرعت به صورت رابطه $\tau_{ij} = k(\partial u_i / \partial x_j)^n$ می‌باشد.

در پژوهش حاضر، قطره به صورت یک سیال نفتی با شاخص سازگاری (Consistency index) برابر با k=۰/۱ و شاخص رفتار (Flow behavior index) برابر با n=۰/۸۵ و چگالی ρ=۸۴۰ kg/m³ در نظر گرفته شده است که مقادیر k، n و ρ از مراجع[19] و[20] اقتباس شده است.



شکل ۱) هندسه‌ی معرفی شده در پژوهش حاضر برای شکست قطره‌ی غیرنیوتنی به قطرات با اندازه‌های غیریکسان

سیال پیوسته نیز آب با چگالی ρ=1000 kg/m³ و لزجت μ=0.001 Pa.s می‌باشد. کشش سطحی بین دو سیال σ =0.034 N/m می‌باشد[21] و زاویه تماس نیز ۱۵۰ درجه در نظر گرفته شده است[22].

به منظور بررسی اثرات جاذبه در مسئله، ابتدا به معرفی عدد باند می‌پردازیم. عدد باند که نسبت نیروهای جاذبه به نیروهای کشش سطحی است، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Bo = \frac{\Delta\rho g d^2}{\sigma} \qquad (۱)$$

که Bo عدد باند، Δρ اختلاف چگالی دو سیال، g شتاب جاذبه، d عرض کانال و σ کشش سطحی بین دو سیال است. اگر عدد باند کمتر از ۱ باشد، می‌توان از اثرات جاذبه صرف‌نظر نمود[23,24]. حال اگر مقادیر چگالی دو سیال، کشش سطحی و عرض کانال در این مقاله را (که در بالا بیان شد)، در رابطه‌ی ۱ قرار دهیم، خواهیم داشت $Bo = 1.85\times10^{-5}$. لذا می‌توان از اثرات جاذبه صرف‌نظر نمود. بنابراین در شبیه‌سازی عددی این پژوهش نیز، اثرات جاذبه در نظر گرفته نشده است.

حال به محاسبه عدد نادسن برای هر دو سیال قطره و سیال پیوسته می‌پردازیم. همانطور که می‌دانیم، عدد نادسن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$kn = \frac{\lambda}{l} \qquad (۲)$$

که λ پویش آزاد (Mean free path) مولکول‌های سیال و l طول مشخصه است. اگر عدد نادسن کمتر از ۰/۰۱ باشد، معادلات ناویراستوکس با شرط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها برقرار می‌باشد. اگر عدد نادسن بین ۰/۰۱ و ۰/۱ باشد، معادلات ناویراستوکس برقرار بوده اما شرط مرزی «لغزش» حاکم خواهد بود. اگر عدد نادسن بالاتر از ۰/۱ باشد، معادلات ناویراستوکش حاکم نبوده و باید از روش‌های دیگر مانند دینامیک مولکولی به تحلیل جریان سیال پرداخت.

در پژوهش حاضر، سیال پیوسته، آب مایع می‌باشد که پویش آزاد مولکول‌های آب مایع تقریباً برابر با $\lambda_{water} = 5\times10^{-9} m$ است[10]. از طرفی اگر طول مشخصه‌ی هندسه مقاله حاضر را، عرض کانال ورودی (یعنی ۲۰ میکرومتر) در نظر بگیریم، عدد نادسن برای آب به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$kn_{water} = \frac{\lambda_{water}}{l} = \frac{5\times10^{-9}}{20\times10^{-6}} = 2.5\times10^{-4} \qquad (۳)$$

حال به محاسبه عدد نادسن برای سیال قطره می‌پردازیم. برای مایعات، پویش آزاد تقریباً برابر با فاصله بین مولکولی (Intermolecular length) است[25]. از طرفی طبق نتایج منتشر شده در مقالات علمی[26-28] فاصله بین مولکولی در سیالات

مختلف نفتی کمتر از $1.5\times10^{-10}m$ است. بنابراین عدد نادسن قطره نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$kn_{droplet}=\frac{\lambda_{droplet}}{l}=\frac{1.5\times10^{-10}}{20\times10^{-6}}=7.5\times10^{-6} \qquad (٤)$$

بنابراین، طبق رابطه‌ی ۳ و ۴، عدد نادسن سیال پیوسته و عدد نادسن قطره در مقاله حاضر، به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از ۰/۰۱ است. لذا در این پژوهش می‌توان از معادلات ناویراستوکس به همراه شرط مرزی عدم لغزش در دیواره‌ها استفاده نمود.

۳- شبیه‌سازی عددی:

جریان تراکم‌ناپذیر بوده و معادلات پیوستگی و مومنتوم به صورت زیر برقرار است[29]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \qquad \rho\left(\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)=\rho g_i-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \qquad (٥)$$

که u_i بردار سرعت و τ_{ij} تانسور تنش در سیال است. برای سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی، تانسور تنش به صورت زیر با گرادیان‌های سرعت ارتباط دارد:

$$\tau_{ij}=\eta\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right); \qquad \eta=k\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)^{n-1} \qquad (٦)$$

که η لزجت مؤثر (Effective viscosity)، k شاخص سازگاری (Consistency index) و n شاخص رفتار (Flow behavior index) سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی می‌باشد. شبیه‌سازی عددی این پژوهش به کمک نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۵ (Ansys Fluent 15) انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی عددی جریان دو فاز، از روش VOF استفاده شده است. در روش VOF چگالی و لزجت سیال از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho=\rho_c\phi+\rho_d(1-\phi) \qquad (٧)$$

$$\mu=\mu_c\phi+\mu_d(1-\phi) \qquad (٨)$$

که زیرنویس c مربوط به سیال پیوسته (سیال حامل قطرات)، زیرنویس d مربوط به قطره و ϕ کسر حجمی سیال پیوسته در هر سلول محاسباتی است. در هر سلول محاسباتی $0\le\phi\le1$ است. برای محل دقیق مرز داریم ϕ=۰/۵ که به روش تکه‌ای خطی (Piecewise linear interface reconstruction method) به دست می‌آید. کمیت ϕ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}+u_i\cdot\frac{\partial\phi}{\partial x_i}=0 \qquad (٩)$$

شرط همگرایی حل، کوچک‌تر بودن تمام باقیمانده‌ها (Residuals) از 1×10^{-4} می‌باشد که باقیمانده‌ها نیز از رابطه زیر به دست می‌آیند.

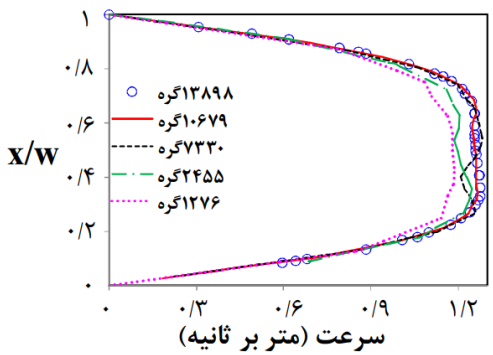
$$R_X=\frac{\sum_{P=1}^{N}\left|\sum_{nb}a_{nb}X_{nb}+\Phi-a_PX_P\right|}{\sum_{P=1}^{N}a_PX_P} \qquad (١٠)$$

که X یک متغیر عمومی در سلول P و N تعداد کل سلول‌ها در دامنه، nb سلول‌های همسایه سلول P و Φ قسمت ثابت جمله‌ی منبع ($S=S_c+S_pX$) و شرایط مرزی می‌باشد.

هندسه مسئله در نرم‌افزار گمبیت ساخته و با سلول‌های مثلثی شبکه‌بندی شده است. سپس هندسه شبکه‌بندی شده وارد نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۱۵ شده و اندازه شبکه در نزدیک دیواره‌ها تقویت می‌شود. مشخصات اولیه‌ی جریان و سیالات (مطابق توضیحات ارائه شده در بخش مشخصات هندسی)، در نرم‌افزار ثبت شده و گسسته‌سازی معادلات مومنتوم به روش بادسوی مرتبه دوم (Second Order Upwind) و ارتباط معادلات فشار و سرعت توسط الگوریتم سیمپلسی (SIMPLEC) برقرار می‌گردد. سپس محل اولیه قطره تعریف می‌گردد (مکان اولیه‌ی قطره در شکل ۱ نشان داده شده است که سلول‌های محاسباتی موجود در این مکان، به صورت سیال قطره و سایر سلول‌ها به صورت سیال پیوسته تعریف می‌گردد). سرانجام با تعیین گام زمانی، حل عددی شروع شده و با رسیدن مقادیر باقیمانده‌ها به ۰/۰۰۰۱ حل عددی در هر گام زمانی، خاتمه می‌یابد.

برای بررسی استقلال حل از شبکه، حالتی که قطره در کانال ورودی قرار دارد (که در شکل ۱ نیز چنین مشاهده می‌شود) در نظر گرفته شده است. در این حالت، توزیع سرعت در مقطع افقی $y=95\times10^{-6}m$ را در اندازه‌های مختلف از شبکه، بررسی و مقایسه گردیده است. نتایج در شکل ۲ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، نتایج مربوط به شبکه با ۱۰۶۷۹ گره و شبکه‌ی با ۱۳۸۹۸ گره تقریباً با یکدیگر یکسان است. لذا می‌توان شبکه‌ی با ۱۰۶۷۹ گره را برای انجام شبیه‌سازی عددی و استخراج نتایج انتخاب نمود. در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی عددی با نتایج پژوهش مبنای لشانسکی[18] مقایسه شده است. قبل از پرداختن به مقایسه نتایج تحلیلی لشانسکی و پژوهش حاضر، ذکر این نکته لازم است که هر قطره با یک طول خاص، اگر وارد یک اتصال T شکل شود، با رسیدن به مرکز اتصال، یا دچار شکست می‌شود یا بدون شکست از اتصال عبور می‌کند.

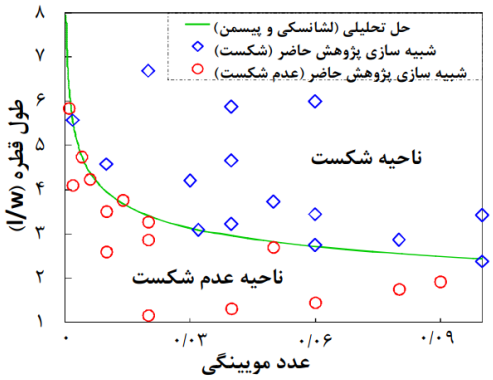


شکل ۲) استقلال حل از شبکه برای حالتی که قطره در کانال ورودی قرار دارد که شکل ۱ نیز چنین حالتی را نشان می‌دهد (توزیع سرعت مربوط به مقطع افقی $y=95\times10^{-6}m$ است).

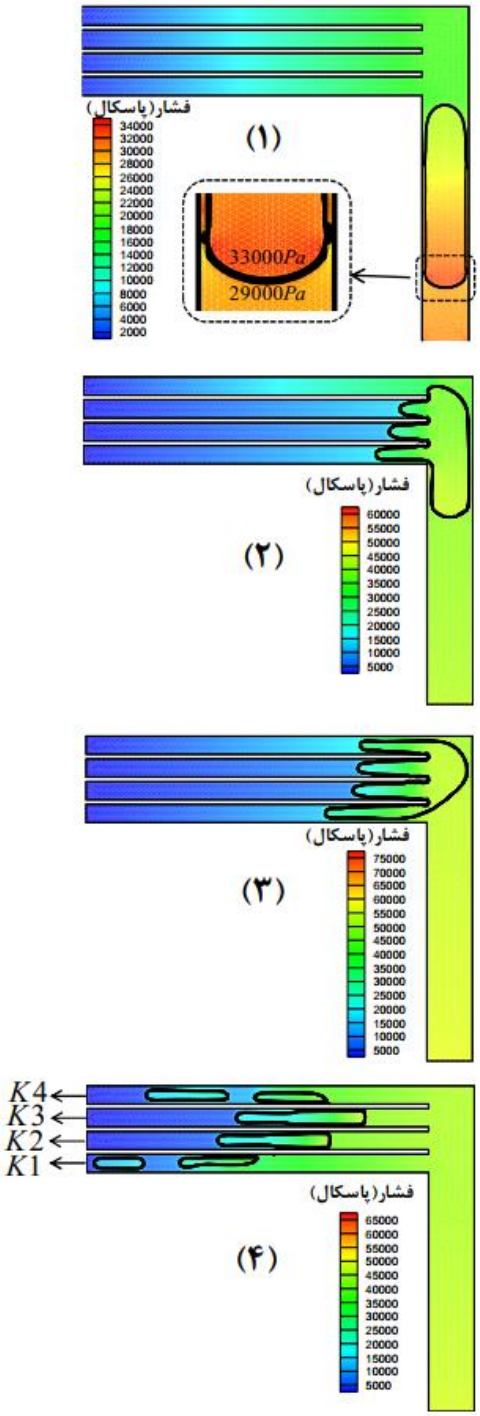
لذا در پژوهش‌های مربوط به شکست قطرات، نموداری رسم می‌کنند که محور افقی آن، عدد مویینگی (Capillary number: $Ca=\mu_c U_{in}/\sigma$) و محور عمودی آن، طول قطره است. سپس قطره‌ای با طول خاص و عدد مویینگی مشخص، شبیه‌سازی می‌شود. اگر قطره دچار شکست شد، در نمودار مذکور، نقطه‌ای (متناظر با همان طول و عدد مویینگی قطره) رسم نموده و به عنوان نقطه شکست علامت می‌زنند. به همین ترتیب شبیه‌سازی‌های متعددی با قطرات با طول‌ها و اعداد مویینگی مختلف انجام شده و نتایج به صورت نقاطی در نمودار مشخص می‌شود. در نهایت دو ناحیه در نمودار پیدا می‌شود. یکی ناحیه شکست و دیگری ناحیه عدم شکست. لشانسکی رابطه تحلیلی ارائه نمود که مرز بین این دو ناحیه را نشان می‌دهد. این رابطه در شکل ۳ به صورت یک خط کامل نشان داده شده است. از طرفی نتایج شبیه‌سازی پژوش حاضر نیز به صورت نقاطی دیده می‌شود. طبق شکل ۳، مرز بین ناحیه‌ی شکست و عدم شکست حاصل از شبیه‌سازی این پژوهش، تطابق بسیار خوبی با خط مربوط به نتایج لشانسکی دارد.

۴- نتایج و بحث:

در این بخش به ارائه نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی می‌پردازیم. شکل ٤ فرآیند شکست قطره در اتصال شبکه‌ای همراه با کانتور فشار را نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر ۱ از شکل ٤ مشاهده می‌شود، فشار درون قطره در قسمت انتهایی آن بیشتر از فشار سیال بیرون قطره است به صورتی که فشار داخل قطره در حدود ۳۳۰۰۰ پاسکال و فشار بیرون قطره در حدود ۳۰۰۰۰ پاسکال است. دلیل این امر آن است که انتهای قطره حالت نیم دایره دارد و به دلیل وجود کشش سطحی بین سیال قطره و سیال پیوسته، فشار سیال داخل قطره بیشتر از فشار محیط اطراف (یعنی همان سیال پیوسته) خواهد بود. در تصویر ۲ از شکل ٤ مشاهده می‌شود که قطره به مرکز اتصال رسیده و وارد شاخه‌های فرعی نیز شده است.



شکل ۳) مقایسه‌ی رابطه‌ی تحلیلی لشانسکی[18] با نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر. همانطور که مشاهده می‌شود، مرز بین ناحیه‌ی شکست و عدم شکست که از شبیه‌سازی این پژوهش حاصل شده است، منطبق بر نتایج تحلیلی لشانسکی می‌باشد.

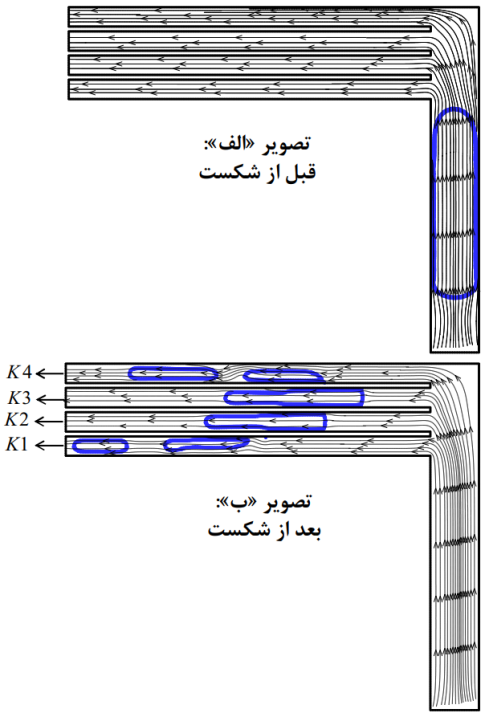


شکل ۴) فرآیند شکست قطره در اتصال شبکه‌ای (به همراه کانتور فشار). قطره با رسیدن به مرکز اتصال، دچار تغییر شکل شده و نهایتاً به شش قطره با اندازه‌های متفاوت تقسیم می‌شود.

در این موقعیت، می‌توان فشار سیال در داخل قطره را یکنواخت در نظر گرفت زیرا قطره، کشیدگی اولیه (تصویر ۱) را ندارد و هرچه قطره از حالت کشیدگی فاصله گرفته و به حالت دایره نزدیک شود، فشار داخل آن یکنواخت‌تر خواهد شد. در تصویر ۳ از شکل ٤، قطره به مراحل انتهایی شکست رسیده و قسمت بیشتر قطره وارد شاخه‌های K۱ تا K٤ شده است. همانطور که در تصویر ۳ از شکل ٤ مشاهده می‌شود، قسمتی از قطره که وارد شاخه فرعی K۱ شده

است، از قطره اولیه جدا شده است. در تصویر ٤ از شکل ٤ فرآیند شکست پایان یافته و شش قطره با اندازه‌های مختلف ایجاد شده است. همانطور که در تصویر مذکور مشاهده می‌شود، در قطره‌هایی که در شاخه‌های K۲ و K۳ قرار دارند فشار داخل قطره غیریکنواخت بوده و در قطره‌های ایجاد شده در شاخه‌های K۱ و K٤ به دلیل کوچک بودن قطره، فشار داخل قطرات یکنواخت است.

در شکل ۵، خطوط جریان قبل و بعد از شکست قطره ارائه شده است. طبق تصویر «الف»، در حالت قبل از شکست، جریان در اطراف قطره در کانال ورودی (یعنی همان کانال عمودی که قطره در آن قرار دارد) کاملاً در راستای لوله است و جریانی در عرض لوله وجود ندارد. به عبارت دیگر اگر در تصویر «الف» به خطوط جریان داخل قطره دقت کنیم متوجه می‌شویم که خطوط جریان کاملاً در راستای لوله بوده و لذا جریانی در راستای عرض لوله نداریم. این نکته در تحلیل نمودار فشار سیال که بعد از این ارائه خواهد شد نقش مهمی دارد. همچنین در تصویر«ب» خطوط جریان در اطراف تمام قطرات تولید شده، افقی (در راستای کانال) است اما در قطره سمت راست از شاخه‌های K۱ و K٤، جریان ضعیفی نیز در راستای عمودی (یعنی در راستای عرض کانال) وجود دارد. دلیل این امر آن است که دو قطره مذکور تمام فضای کانال را پُر نکرده‌اند و تمایل دارند تغییر شکل پیدا نموده و تمام فضای کانال را پُر کنند، لذا مرز این قطرات باید به دیواره نزدیک شود. بنابراین یک جریان عمودی اندک ایجاد در محل این قطرات خواهد شد. این نکته نیز در تحلیل نمودار «توزیع سرعت در حالت پس از شکست» که در قسمت‌های بعد ارائه خواهد شد، کاربرد مهمی دارد.



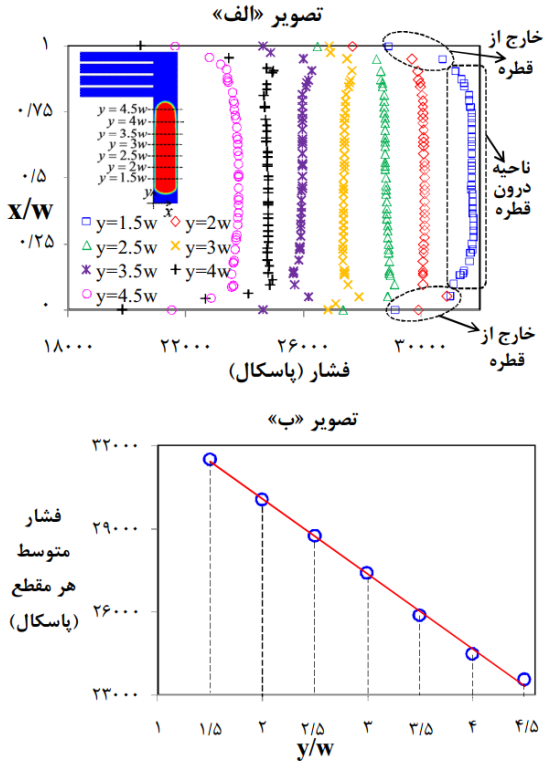
شکل ۵) خطوط جریان قبل و بعد از شکست قطره. مرز قطره با خط آبی رنگ نشان داده شده است.

در شکل «٦-الف» نمودار فشار سیال در عرض کانال و در هفت مقطع مختلف از قطره، قبل از شکست قطره نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، برای هر یک از منحنی‌ها، توزیع فشار را می‌توان به دو ناحیه تقسیم نمود. یک ناحیه در وسط (که بزرگترین ناحیه نیز می‌باشد) که فشار در این ناحیه ثابت است و این ناحیه را «ناحیه فشار ثابت» می‌نامیم.

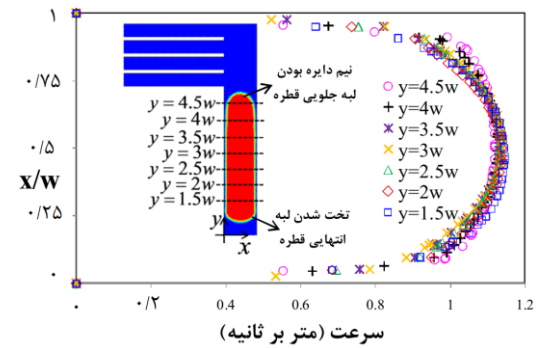
ناحیه دیگر در بالا و پایین ناحیه فشار ثابت قرار دارد که فشار آن متغیر است و این ناحیه را «فشار متغیر» می‌نامیم. این دو ناحیه در شکل «٦-الف» نیز برای منحنی y=1.5w با خط‌چین مشخص شده‌اند. دلیل رفتار متفاوت این دو ناحیه به این صورت قابل بیان است که ناحیه فشار ثابت معادل با فضای داخل قطره است. در فضای داخل قطره، جریان در راستای طول لوله حرکت می‌کند و جریانی در راستای عرض لوله نداریم (این مورد، در شکل ۵-الف مشاهده می‌شود). پس طبق معادله مومنتوم (رابطه‌ی ۵)، گرادیان فشار نیز وجود نخواهد داشت و لذا فشار ثابت است. ناحیه «فشار متغیر» در خارج از قطره قرار دارد و لذا سیال پیوسته در این ناحیه وجود دارد. از طرفی فشار سیال درون قطره به دلیل اثرات کشش سطحی بیش‌تر از فشار بیرون قطره است (که رابطه‌ی $\Delta P = \sigma / r$ نیز اختلاف فشار داخل و بیرون یک قطره را نشان می‌دهد). بنابراین فشار در ناحیه «فشار متغیر» کمتر از فشار ثابت داخل قطره است. شکل «٦-ب» مقادیر فشار متوسط هر یک از مقاطع نشان داده شده در شکل «٦-الف» را ارائه می‌دهد. هفت دایره آبی رنگ نشان داده شده در تصویر «ب»، نشان‌دهنده هفت مقطعی است که توزیع فشار آن در تصویر الف ارائه گردیده است.

بنابراین طبق شکل «٦-ب» فشار متوسط سیال در مقاطع عرضی کانال ورودی، به صورت خطی در طول کانال کاهش می‌یابد که با توجه به نیوتنی بودن سیال پیوسته و با توجه به اینکه جریان آرام است این موضوع قابل پیش‌بینی است. بنابراین در کانال ورودی، فشار متوسط سیال از ۳۱٤۸۸ پاسکال (در مقطع y=1.5w) تا ۲۳۵۳۷ پاسکال (در مقطع y=4.5w) به صورت خطی کاهش می‌یابد.

در شکل ۷ نمودار اندازه سرعت سیال در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، توزیع سرعت سیال به صورت سهمی است. دلیل این امر آن است که جریان در داخل کانال ورودی آرام است (عدد رینولدز در حدود ۲۰ است) و می‌دانیم که در جریان آرام، توزیع سرعت سهموی است. جریان سیال پیوسته در کانال، با اعمال یک نیروی هیدرودینامیکی به انتهای قطره، باعث می‌شود انتهای قطره از حالت نیم‌دایره فاصله گرفته و به شکل تخت نزدیک شود که این موضوع در نیمه پایین قطره در شکل نیز نشان داده شده است.



شکل ۶) تصویر «الف»: نمودار فشار سیال در عرض کانال در هفت مقطع مختلف، قبل از شکست قطره. مبدأ مختصات، موقعیت قطره و مقاطع انتخابی در داخل شکل نشان داده شده است. w عرض کانال ورودی است. تصویر «ب»: فشار متوسط هر یک از مقاطع نشان داده شده در تصویر «الف». هفت دایره‌ی آبی رنگ نشان داده شده در تصویر «ب»، نشان‌دهنده‌ی هفت مقطعی است که توزیع فشار آن در تصویر الف ارائه گردیده است.



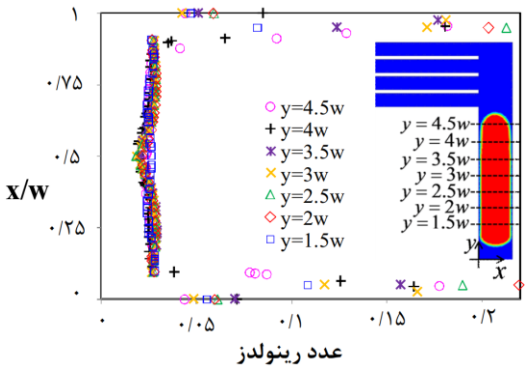
شکل ۷) نمودار اندازه‌ی سرعت سیال در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره. مبدأ مختصات، موقعیت قطره و مقاطع انتخابی در داخل شکل نشان داده شده است. w عرض کانال ورودی است.

هر چه سرعت سیال پیوسته در کانال ورودی بیشتر باشد، لبه انتهایی قطره بیشتر از حالت نیم‌دایره‌ای فاصله گرفته و به حالت تخت نزدیک می‌شود. لبه جلویی قطره با این مسئله مواجه نیست و همانطور که در شکل نیز مشاهده می‌شود حالت نیم‌دایره‌ای به خود گرفته است.

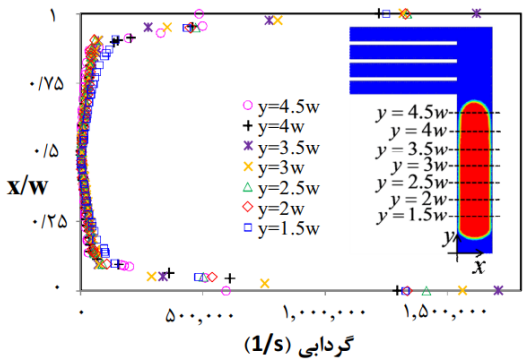
در پژوهش‌های قبل در رابطه با حرکت قطرات، حل‌های تحلیلی متعددی برای فرآیندهای شکست قطره ارائه گردیده است که بسیاری از آن‌ها بر پایه اعداد رینولدز پایین، انجام شده است[11,18]. سؤالی که اینجا مطرح می‌شود این است که آیا در هندسه پیشنهاد شده در این پژوهش، می‌توان از حل‌های تحلیلی استفاده نمود؟ برای پاسخ به این سؤال باید عدد رینولدز در جریان سیال در اتصال شبکه‌ای بررسی شود. شکل ۸ نمودار عدد رینولدز موضعی در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره را نشان می‌دهد. عدد رینولدز موضعی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Re}_l = \frac{\rho V d}{\eta}; \qquad d = \sqrt{A} \qquad (۱۱)$$

که ρ چگالی سیال، V اندازه سرعت سیال، A مساحت سلول محاسباتی مربوطه و η لزجت مؤثر می‌باشد. این نمودار نشان می‌دهد که عدد رینولدز موضعی در تمام حالات کمتر از ۰/۲۵ است. همچنین عدد رینولدز متوسط جریان سیال پیوسته در عرض کانال ورودی (با توجه به داده های بیان شده در بخش ۲ مقاله)، برابر با ۲۰ است. لذا می‌توان از حل‌های تحلیلی با فرض عدد رینولدز پایین برای هندسه پیشنهاد شده در این پژوهش استفاده نمود. در شکل ۹ نمودار اندازه گردابی (vorticity) در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره ارائه شده است.



شکل ۸) نمودار عدد رینولدز موضعی در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره. مبدأ مختصات، موقعیت قطره و مقاطع انتخابی در داخل شکل نشان داده شده است. w عرض کانال ورودی است.



شکل ۹) نمودار اندازه‌ی گردابی در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره. مبدأ مختصات، موقعیت قطره و مقاطع انتخابی در داخل شکل نشان داده شده است. w عرض کانال ورودی است.

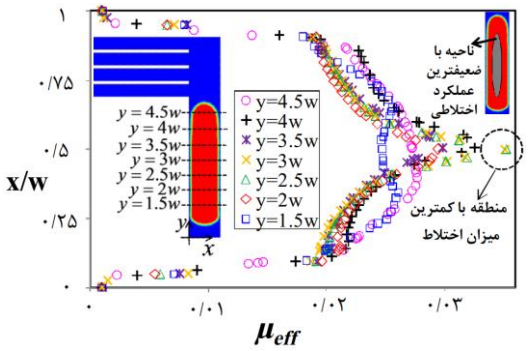
با افزایش گرادیان سرعت در داخل قطره، میزان گردابی نیز بیشتر شده، لذا اختلاط داخل قطره افزایش می‌یابد که این پدیده در کاربردهای صنعتی مانند صنایع داروسازی و شیمیایی مطلوب است. در مناطق نزدیک به دیواره که تغییرات سرعت نیز شدیدتر است، گردابی بیشتر است و لذا در این مناطق، اختلاط مواد داخل قطره افزایش می‌یابد که این موضوع در شکل ۹ دیده می‌شود. طبق شکل، گردابی (و گرادیان سرعت) در نواحی نزدیک به مرکز کانال (x=0.5) تقریباً برابر با صفر است لذا در این نواحی میزان اختلاط مواد داخل قطره به کمترین میزان خود می‌رسد. لذا در هنگام تشکیل قطره، باید سعی شود تا حد امکان مواد تزریق شده به داخل قطره، به مرز قطره نزدیک و از نواحی مرکزی کانال دور باشند. با دقت در شکل ۹ در می‌یابیم که بیشترین میزان گردابی در منحنی y=3.5w رخ می‌دهد و مقدار آن برابر با $1.71\times10^{6}s^{-1}$ است. بیشترین اندازه گردابی در منحنی‌های y=3w و y=2.5w نیز به ترتیب برابر با $1.56\times10^{6}s^{-1}$ و $1.41\times10^{6}s^{-1}$ است.

در شکل ۱۰ لزجت مؤثر در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره ارائه شده است. رابطه لزجت مؤثر به صورت زیر است:

$$\eta = k\left(\partial u_i/\partial x_j\right)^{n-1} \xrightarrow{n=0.85} \eta = k\left(\partial u_i/\partial x_j\right)^{-0.15} = \frac{k}{\left(\partial u_i/\partial x_j\right)^{0.15}} \qquad (۱۲)$$

بنابراین با افزایش گرادیان سرعت، لزجت مؤثر باید کاهش پیدا کند. حال طبق شکل ۷ بیشترین مقدار گرادیان سرعت در نواحی نزدیک به دیواره و کمترین مقدار گرادیان سرعت در وسط کانال اتفاق می‌افتد.

پس لزجت مؤثر نیز باید در وسط کانال به بیشترین مقدار و در دیواره‌ها به کمترین مقدار خود برسد که این موضوع در شکل ۱۰ دیده می‌شود. لزجت مؤثر تمام مقاطع (از y=1.5w تا y=4.5w) کمتر از ۰/۰۳۵ Pa.s است. طبق شکل ۱۰، بیشترین لزجت مؤثر (که طبق رابطه‌ی ۱۲ معادل با کمترین گرادیان سرعت بوده و در نتیجه ضعیفترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره را دارد) مربوط به منحنی‌های y=2.5w و y=3w و در محل x=0.5w می‌باشد که این منطقه، دقیقاً همان ناحیه مرکزی قطره است و در شکل ۱۰ نیز با دایره خط‌چین نشان داده شده است.



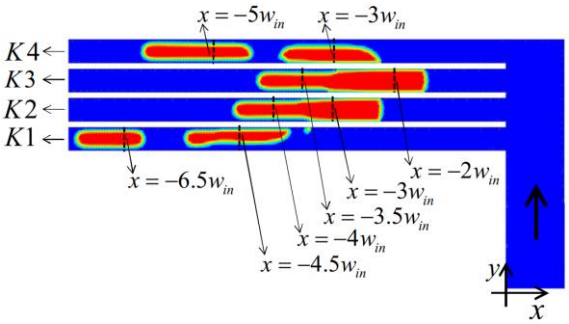
شکل ۱۰) نمودار لزجت مؤثر در مقاطع مختلف عرض کانال، قبل از شکست قطره. مبدأ مختصات، موقعیت قطره و مقاطع انتخابی در داخل شکل نشان داده شده است. w عرض کانال ورودی است.

لذا ضعیف‌ترین منطقه داخل قطره از نظر کیفیت اختلاط مواد داخل قطره، ناحیه مرکزی قطره می‌باشد؛ بنابراین در کاربردهای صنعتی که نیاز به اختلاط مواد داخل قطره است، باید تا حد امکان از تزریق مواد واکنش‌دهنده در این محل خودداری نمود. از این پس، نتایج مربوط به حالت پس از شکست قطره ارائه می‌گردد. شکل ۱۱ وضعیت قطره پس از شکست و مقاطع انتخاب شده برای ارائه نتایج را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود چهار خروجی سیستم، با نمادهای K۱ تا K٤ نامگذاری شده‌اند. مبدأ مختصات مطابق شکل ۱۱ یعنی در گوشه سمت چپ مرز ورودی سیستم در نظر گرفته شده است.

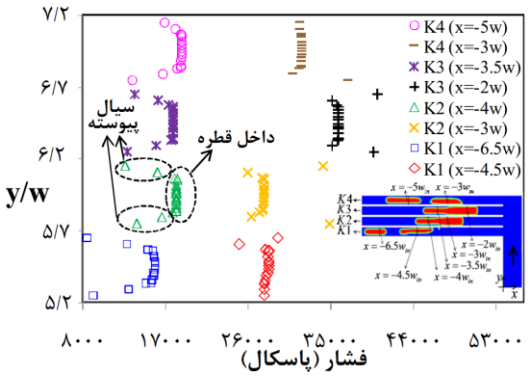
در شکل ۱۲ نمودار فشار سیال در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره مشاهده می‌شود. طبق شکل، فشار سیال در راستای عرض کانال ثابت است که دلیل آن، نبود جریان در راستای عرض کانال است و طبق معادله مومنتوم (رابطه‌ی ۵) اگر در راستای عرض کانال جریانی نباشد، گرادیان فشار نیز نخواهیم داشت و فشار ثابت خواهد بود. طبق شکل، فشار سیال در هر یک منحنی‌ها، در نواحی نزدیک به دیواره، متفاوت از فشار سیال در نقاط میانی کانال است. به عنوان مثال در شکل ۱۲، در منحنی (x=-4w K۲) که با مثلث‌های سبز رنگ نشان داده شده است، سه ناحیه مشخص شده است. ناحیه وسط که فشار سیال ثابت است که این ناحیه همان فضای درون قطره است که ثابت بودن فشار نیز به همان دلیلی بود که در بالا بیان شد. دو ناحیه در بالا و پایین وجود دارد که فشار کمتری دارند که این دو ناحیه فضایی است که توسط سیال پیوسته اشغال شده است و در واقع خارج از قطره است. دلیل فشار پایین‌تر در این دو ناحیه، این است که کشش سطحی بین دو سیال باعث می‌شود فشار داخل قطره از فشار سیال بیرون آن بیشتر شود. در سایر منحنی‌ها نیز همین الگو مشاهده می‌شود یعنی یک ناحیه فشار ثابت در وسط و دو ناحیه با فشار متفاوت در بالا و پایین.

در شکل ۱۳ نمودار اندازه سرعت سیال در عرض کانال در چند مقطع مختلف پس از شکست قطره نشان داده شده است. طبق شکل، توزیع سرعت سیال به دلیل آرام بودن جریان، تقریباً به صورت سهموی است. با دقت در این شکل می‌توان یک الگوی جدید برای تغییر شکل قطره شناسایی نمود که در ادامه توضیح داده می‌شود. در منحنی‌های K٤(x=-3w) و K۱(x=-4.5w) که به ترتیب با خطتیره قهوه‌ای و لوزی قرمز رنگ نشان داده شده‌اند، توزیع سرعت از حالت سهموی خارج شده و با توزیع سرعت در بقیه منحنی‌ها تفاوت دارد. از طرف دیگر با دقت در شکل ۱۱ مشخص می‌شود که در قطره سمت راست از کانال K٤ (که متناظر با x=-3w است) و قطره سمت راست از کانال K۱ (که متناظر با x=-4.5w است) بین قطره و دیواره، لایه‌ای از سیال پیوسته وجود دارد. این لایه سیال در حین فرآیند شکست قطره ایجاد می‌شود. به دلیل اثرات کشش سطحی بین قطره و سیال پیوسته و به دلیل اینکه طول قطره چند برابر عرض

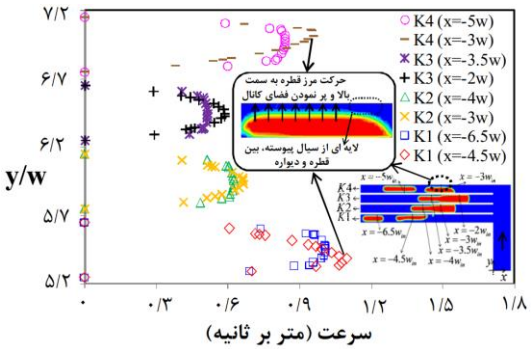
کانال است، قطره تمایل دارد تغییر شکل نموده و تمام عرض کانال را پُر نماید (در اصل، قطره تمایل دارد خود را به شکل دایره‌ای برساند ولی به خاطر وجود دیواره، شکل دایره‌ای ایجاد نشده بنابراین قطره، تمام عرض کانال را اشغال می‌کند). لذا مرز قطره به سمت دیواره حرکت می‌کند. این حالت باعث ایجاد یک جریان ضعیف در راستای عرض کانال می‌شود. این الگوی تغییر شکل قطره را «الگوی پر شدن فضای کانال» می‌نامیم که تصویر آن نیز در کادر مستطیلی در داخل شکل ۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱) مقاطع انتخاب شده برای ارائه‌ی نتایج مربوط به حالت پس از شکست قطره



شکل ۱۲) نمودار فشار سیال در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره. مبدأ مختصات، مقاطع انتخاب شده و تصویر قطره پس از شکست، در داخل شکل (و در شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. w عرض کانال ورودی است.



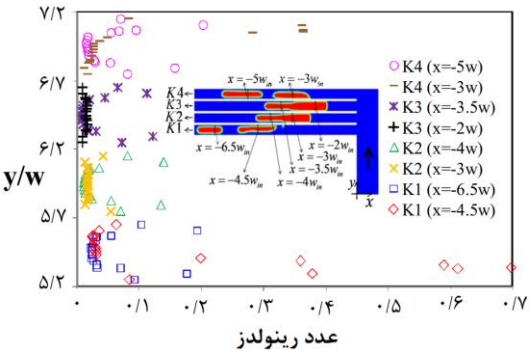
شکل ۱۳) نمودار اندازه‌ی سرعت سیال در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره. مبدأ مختصات، مقاطع انتخاب شده و تصویر قطره پس از شکست، در داخل شکل (و در شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. w عرض کانال ورودی است.

بنابراین با مقایسه‌ی قطره راست و قطره چپ از شاخه‌ی K٤ (در شکل ۱۱) در می‌یابیم که مؤلفه‌های سرعت افقی در هر دو قطره به دلیل قانون پیوستگی برابر است ولی قطره راست به دلیل «الگوی پر شدن فضای کانال» یک مؤلفه سرعت در راستای عرض کانال نیز دارد. لذا اندازه سرعت در قطره‌ی راست بیشتر خواهد شد که این موضوع در شکل ۱۳ نیز به روشنی برای منحنی‌های K٤(x=-3w) و K۱(x=-4.5w) مشاهده می‌شود.

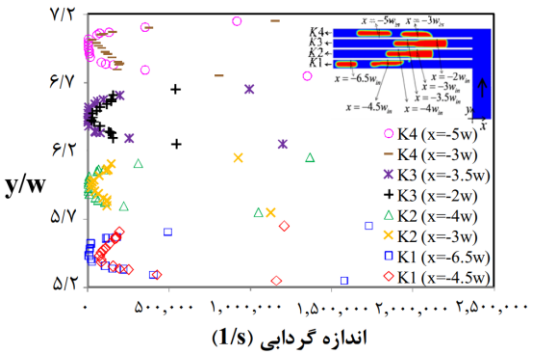
در شکل ١٤ نمودار عدد رینولدز موضعی در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره ارائه شده است. تعریف عدد رینولدز موضعی در رابطه ۱۱ بیان شد. در هر یک از شاخه‌های خروجی K۱ تا K٤، عدد رینولدز موضعی در طول شاخه تقریباً ثابت است که دلیل آن ثابت بودن سرعت در طول لوله (به دلیل قانون پیوستگی) است. طبق شکل، عدد رینولدز موضعی در تمام مناطق کمتر از ۱ است لذا همانند حالت قبل از شکست، استفاده از حل‌های تحلیلی با فرض عدد رینولدز پایین، برای هندسه این پژوهش، قابل انجام است. در شکل ۱۵ نمودار اندازه گردابی در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره ارائه شده است. همان‌طور که می‌دانیم کمیت گردابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{\zeta} = \nabla \times \vec{V} \qquad (۱۳)$$

لذا با افزایش گرادیان‌های سرعت، گردابی افزایش می‌یابد. حال با توجه به توزیع سرعت بیان شده در شکل ۱۳، درمی‌یابیم که گرادیان سرعت در نواحی نزدیک به دیواره بیشترین مقدار خود را دارد. لذا طبق رابطه ۱۳، بیشترین مقدار گردابی باید در نواحی نزدیک به دیواره اتفاق بیفتد که همین موضوع در تمام منحنی‌های شکل ۱۵ نیز دیده می‌شود. طبق شکل ۱۵ توزیع گردابی در طول هر شاخه تغییر چندانی نمی‌کند. لذا مجموعاً مناطق نزدیک به دیواره بهترین عملکرد در افزایش اختلاط مواد داخل قطره را دارند که این موضوع در کاربردهای صنعتی جریان‌های قطره‌ای دارای اهمیت است. کمترین اندازه گردابی برای شاخه‌های K۱، K۲، K۳ و K٤ به ترتیب برابر با ۷۸۳۱ s^{-1} و ۲۱۳۳ s^{-1} و ۱٤۹٤ s^{-1} و ۲۸۵۷ s^{-1} است.



شکل ۱۴) نمودار عدد رینولدز موضعی در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره. مبدأ مختصات، مقاطع انتخاب شده و تصویر قطره پس از شکست، در داخل شکل (و در شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. w عرض کانال ورودی است.

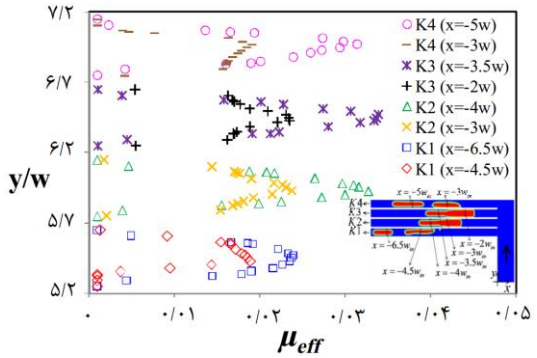


شکل ۱۵) نمودار اندازه‌ی گردابی در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره. مبدأ مختصات، مقاطع انتخاب شده و تصویر قطره پس از شکست، در داخل شکل (و در شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. w عرض کانال ورودی است.

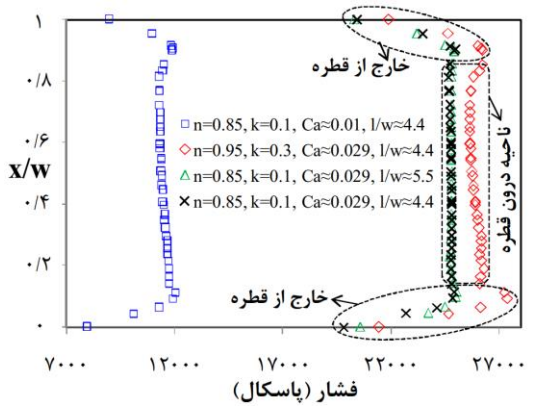
همچنین بیشترین اندازه گردابی برای شاخه‌های K۱، K۲، K۳ و K٤ به ترتیب برابر با $1.73\times10^{6}s^{-1}$ و $1.37\times10^{6}s^{-1}$ و $1.2\times10^{6}s^{-1}$ و $1.35\times10^{6}s^{-1}$ است. لذا بیشترین اندازه‌ی گردابی در شاخه K۱ به ترتیب ۲٦ و ٤٤ و ۲۸ درصد بیشتر از بیشترین اندازه گردابی در شاخه‌های K۲ و K۳ و K٤ است. لذا بهترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره مربوط به شاخه K۱ می‌باشد.

در شکل ۱٦ لزجت مؤثر در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره ارائه شده است. طبق رابطه ۱۲، با افزایش گرادیان سرعت، لزجت مؤثر باید کاهش پیدا کند. بنابراین لزجت مؤثر باید در وسط کانال (که کمترین گرادیان سرعت وجود دارد) به بیشترین مقدار و در نزدیک دیواره‌ها (که بیشترین گرادیان سرعت را دارند) به کمترین مقدار خود برسد که این موضوع برای تمام منحنی‌ها در شکل ۱٦ دیده می‌شود. طبق تعریف لزجت مؤثر (رابطه‌ی ۱۱۲)، افزایش لزجت مؤثر نشان‌دهنده کاهش گرادیان سرعت و در نتیجه کاهش عملکرد اختلاط مواد داخل قطره است. از طرفی، طبق شکل ۱٦، بیشترین لزجت مؤثر برای شاخه‌های K۱، K۲، K۳ و K٤ به ترتیب برابر با ۰/۰۲۳۹ Pa.s و ۰/۰۳۲۷ Pa.s و ۰/۰۳۳۹ Pa.s و ۰/۰۳۱٤ است. به عبارت دیگر بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌ی K۱ به ترتیب ۲۷ و ۲۹ و ۲٤ درصد کمتر از بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌های K۲، K۳ و K٤ است. لذا شاخه‌ی K۱ که لزجت مؤثر آن کمتر از سایر شاخه‌هاست، بهترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره را دارد.

در شکل ۱۷ نمودار فشار سیال در دو عدد مویینگی مختلف (۰/۰۱ و ۰/۰۲۹) و در دو طول اولیه متفاوت از قطره (طول اولیه ٤/٤ برابر عرض کانال ورودی و ۵/۵ برابر عرض کانال ورودی) و در دو سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (سیال با n=۰/۰۸۵ و k=۰/۱ و سیال با n=۰/۹۵ و k=۰/۳) نشان داده شده است. داده‌ها در لحظه قبل از شکست که قطره در کانال ورودی قرار دارد و در مقطع y=4w استخراج شده است (موقعیت مقطع y=4w در شکل ۷ قابل مشاهده است).



شکل ۱٦) نمودار لزجت مؤثر در مقاطع مختلف عرض کانال، بعد از شکست قطره. مبدأ مختصات، مقاطع انتخاب شده و تصویر قطره پس از شکست، در داخل شکل (و در شکل ۱۱) مشاهده می‌شود. w عرض کانال ورودی است.

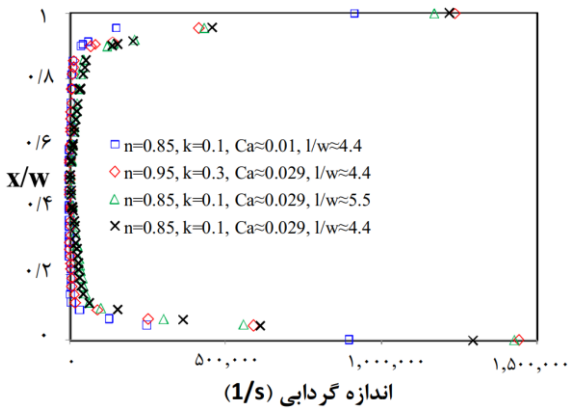


شکل ۱۷) نمودار فشار سیال در اعداد مویینگی مختلف، طول‌های اولیه‌ی متفاوت از قطره و دو نوع سیال غیرنیوتنی. داده‌ها مربوط به مقطع y=4w در زمان قبل از شکست قطره می‌باشد. کمیت l نشان‌دهنده‌ی طول اولیه‌ی قطره و Ca نشان‌دهنده‌ی عدد مویینگی و k و n شاخص‌های قانون توانی در سیال غیرنیوتنی $\tau_{ij}=k(\partial u_i/\partial x_j)^n$ هستند. مقطع y=4w در شکل ۷ نشان داده شده است (w عرض کانال ورودی است).

در شکل ۱۷، حالتی که طول اولیه قطره l/w=٤/٤ و Ca=۰/۰۲۹ و سیال غیرنیوتنی با n=۰/۸۵ و k=۰/۱ است به عنوان حالت مرجع در نظر گرفته می‌شود (این حالت با نشانگر ضربدر سیاه رنگ در شکل ۱۷ دیده می‌شود) و بقیه حالت‌هایی که در شکل نشان داده شده است، با این حالت مرجع مقایسه می‌شود. با مقایسه بقیه حالت‌های موجود در منحنی با این حالت مرجع، می‌توان اثر تغییر کمیت‌های «عدد مویینگی»، «طول اولیه‌ی قطره» و «نوع سیال غیرنیوتنی» بر الگوی جریان را مشاهده نمود. طبق شکل ۱۷، الگوی کلی تغییر فشار در تمام حالات بیان شده تقریباً یکسان است؛ به عبارت دیگر فشار سیال در نواحی مرکزی کانال، بیشتر از فشار سیال در نزدیک دیواره است که دلیل آن این است که در نزدیک دیواره، لایه نازکی از سیال پیوسته قرار دارد و به دلیل اثرات کشش سطحی، فشار در داخل قطره (یعنی نواحی مرکزی کانال) بیشتر از فشار در خارج از قطره (یعنی در نواحی نزدیک به دیواره)

است. همچنین فشار در سیال غیرنیوتنی با n=۰/۹۵ و k=۰/۳ نزدیک به ۵ درصد بیشتر از فشار در سیال غیرنیوتنی با n=۰/۸۵ و k=۰/۱ است. طبق نمودار، تغییر طول اولیه قطره تغییری در فشار سیال ایجاد نمی‌کند به همین دلیل مشاهده می‌شود که منحنی با طول l/w=٤/٤ و l/w=٥/٥ دارای فشار یکسانی هستند. همچنین کاهش عدد مویینگی منجر به کاهش فشار سیال می‌شود به صورتی که در منحنی عدد مویینگی ۰/۰۱ فشار سیال در نواحی مرکزی کانال در حدود ۱۲۰۰۰ پاسکال است در حالی که در عدد مویینگی ۰/۰۲۹ فشار نزدیک به ۲۵۰۰۰ پاسکال می‌باشد که دلیل این موضوع این است که در حالت Ca=۰/۰۱ سرعت سیال در ورود به سیستم در حدود یک سوم سرعت ورودی در حالت Ca=۰/۰۲۹ است (در واقع تغییر عدد مویینگی با تغییر سرعت سیال در ورود به سیستم ایجاد شده است).

در شکل ۱۸ نمودار اندازه گردابی در اعداد مویینگی ۰/۰۱ و ۰/۰۲۹ و در دو طول اولیه متفاوت از قطره (*l/w*=٤/٤ و *l/w*=٥/٥) و در دو سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی (سیال با n=۰/۸۵ و k=۰/۱ و سیال با n=۰/۹۵ و k=۰/۳) در لحظه قبل از شکست، و در مقطع y=4w نشان داده شده است (موقعیت قطره و مقطع y=4w در شکل ۷ قابل مشاهده است).طبق شکل ۱۸، در اعداد مویینگی مختلف و در طول‌های متفاوت از قطره و در سیالات غیرنیوتنی مختلف، بیشترین میزان گردابی در نزدیک دیواره و کمترین میزان آن در مرکز کانال رخ می‌دهد که این موضوع با توجه به توزیع سهموی سرعت و بیشینه بودن سرعت در مرکز کانال، قابل توجیه است، زیرا در نزدیک دیواره، گرادیان‌های سرعت بیش‌تر و لذا گردابی بیشتر است و در مرکز کانال، گرادیان‌های سرعت و لذا اندازه‌ی گردابی کمتر خواهد بود.



شکل ۱۸) نمودار اندازه‌ی گردابی در اعداد مویینگی مختلف، طول‌های اولیه‌ی متفاوت از قطره و دو نوع سیال غیرنیوتنی. داده‌ها مربوط به مقطع y=4w در زمان قبل از شکست قطره می‌باشد. کمیت *l* نشان‌دهنده‌ی طول اولیه‌ی قطره و Ca نشان‌دهنده‌ی عدد مویینگی و k و n شاخص‌های قانون توانی در سیال غیرنیوتنی $\tau_{ij} = k(\partial u_i / \partial x_j)^n$ هستند. مقطع y=4w در شکل ۷ نشان داده شده است (w عرض کانال ورودی است).

همچنین اندازه‌ی گردابی در قطره با طول l/w=٤/٤ تقریباً با اندازه گردابی در قطره‌ی با طول l/w=٥/٥ یکسان است، بنابراین تغییر طول قطره تأثیر ناچیزی بر اندازه‌ی گردابی دارد. همچنین طبق شکل، با افزایش عدد مویینگی، اندازه گردابی افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر در هر یک از نقاط موجود در مقطع y=4w، اندازه گردابی منحنی Ca=۰/۰۲۹ بیش‌تر از اندازه گردابی منحنی Ca=۰/۰۱ است که با توجه به اینکه در حالت Ca=۰/۰۱ سرعت ورودی به سیستم (U_{in}) کمتر و در حدود یک سوم حالت Ca=۰/۰۲۹ است، می‌توان گفت که کاهش سرعت متوسط کانال منجر به کاهش گرادیان‌های سرعت و لذا کاهش اندازه گردابی نیز شده است.

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، به بررسی شکست قطره غیرنیوتنی در اتصال شبکه‌ای پرداخته شد. هندسه مذکور می‌تواند شش قطره با اندازه‌های غیریکسان از قطره اولیه تولید نماید. نوآوری این پژوهش نسبت به پژوهش‌های قبل، شکست قطره‌ی «غیرنیوتنی» به قطرات با اندازه‌های غیریکسان و تولید «شش قطره جدید» با اندازه‌های غیریکسان از یک قطره اولیه می‌باشد. روش پژوهش، شبیه‌سازی عددی به کمک الگوریتم VOF نرم‌افزار انسیس فلوئنت بود. نتایج عددی این پژوهش با نتایج یک مسئله مبنا مقایسه و تطابق بسیار خوبی مشاهده شد. نتایج نشان داد که با کاهش طول قطرات تولید شده، فشار داخل قطره یکنواخت‌تر می‌شود. همچنین مشخص شد که قبل از شکست و در حالتی که قطره در شاخه ورودی قرار دارد، فشار متوسط سیال از ۳۱٤۸۸ پاسکال (در مقطع y=1.5w) تا ۲۳۵۳۷ پاسکال (در مقطع y=4.5w) به صورت خطی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، فشار داخل قطره در راستای عرض کانال ثابت و فشار بیرون قطره به دلیل اثرات کشش سطحی، کمتر از فشار داخل قطره است. در هندسه پیشنهادی این پژوهش، عدد رینولدز کمتر از ۲۰ بوده و لذا می‌توان از حل‌های تحلیلی با فرض عدد رینولدز پایین برای این هندسه نیز استفاده نمود. نتایج نشان داد که بیشترین اندازه گردابی در شاخه‌ی K۱ به ترتیب ۲٦ و ٤٤ و ۲۸ درصد بیشتر از بیشترین اندازه گردابی در شاخه‌های K۲ و K۳ و K٤ است. همچنین بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌ی K۱ به ترتیب ۲۷ و ۲۹ و ۲٤ درصد کمتر از بیشترین لزجت مؤثر در شاخه‌های K۲، K۳ و K٤ است. بنابراین شاخه‌ی K۱ که بیشترین اندازه گردابی و کمترین لزجت مؤثر را در بین سایر شاخه‌ها دارد، بهترین عملکرد در اختلاط مواد داخل قطره را ارائه می‌کند. این موضوع در کاربردهای صنعتی جریان‌های قطره‌ای به ویژه در صنایع داروسازی، دارای اهمیت است. همچنین نتایج نشان داد که تغییر طول اولیه قطره، تغییری در فشار سیال ایجاد نمی‌کند.

فهرست علائم:

x: مؤلفه‌ی افقی مکان

y: مؤلفه‌ی عمودی مکان

w: عرض کانال ورودی به سیستم

η: لزجت مؤثر سیال غیرنیوتنی (تعریف شده در رابطه‌ی ٦)

ζ: گردابی (Vorticity)

k: شاخص سازگاری سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی $\tau_{ij} = k(\partial u_i / \partial x_j)^n$

n: شاخص رفتار سیال غیرنیوتنی با رفتار توانی $\tau_{ij} = k(\partial u_i / \partial x_j)^n$

K۱ تا K٤: نامگذاری شاخه‌های فرعی سیستم (شکل ۱۱)

ρ: چگالی سیال

g: شتاب جاذبه

p: فشار سیال

μC: لزجت سیال پیوسته

Uin: سرعت سیال در ورود به سیستم

σ: کشش سطحی بین سیال پیوسته و قطره

Bo: عدد باند

d: عرض کانال

Δρ: اختلاف چگالی دو سیال

تأییدیه‌های اخلاقی: نویسنده متعهد می‌شود محتویات علمی حاصل پژوهش وی بوده و نتایج ارائه شده در مجله‌ی دیگری چاپ نشده است یا در حال داوری نیست.

تعارض منافع: هیچگونه تعارض منافعی با سازمان‌ها و اشخاص وجود ندارد و این مقاله صرفاً کار پژوهشی نویسنده می‌باشد.

سهم نویسندگان: احمد بِدرام (پژوهشگر اصلی و نویسنده‌ی مقاله)
درصد مشارکت: ۱۰۰٪

منابع مالی: این مقاله حامی مالی نداشته است و کلیه هزینه‌ها توسط نویسنده تأمین گردیده است.

منابع

1- Moqadam AK, Bedram A, Hamedi MH. A Novel Method (T-Junction with a Tilted Slat) for Controlling Breakup Volume Ratio of Droplets in Micro and Nanofluidic T-Junctions. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2018;11(5).

2- Jung Y, Do T, Choi US, Choi S. Understanding Uniform, Fast, and Scalable Buoyancy-Driven Macro-Sized Drop Generations. Langmuir. 2019;35(4):990-9.

3- Rahman MM, Lee W, Iyer A, Williams SJ. Viscous resistance in drop coalescence. Physics of Fluids. 2019;31(1):012104.

4- Ahmadi F, Samlali K, Vo PQ, Shih SC. An integrated droplet-digital microfluidic system for on-demand droplet creation, mixing, incubation, and sorting. Lab on a Chip. 2019;19(3):524-35.

5- Sun X, Zhu C, Fu T, Ma Y, Li HZ. Dynamics of droplet breakup and formation of satellite droplets in a microfluidic T-junction. Chemical Engineering Science. 2018;188:158-69.

6- Mora AE. Numerical study of the dynamics of a droplet in a T-junction microchannel using OpenFOAM. Chemical Engineering Science. 2019;196:514-26.

7- Bedram A, Moosavi A. Breakup of Droplets in Micro and Nanofluidic T-junctions. InApplied Mechanics and Materials 2012;110:3673-3678.

8- Fu T, Ma Y, Li HZ. Hydrodynamic feedback on bubble breakup at a T-junction within an asymmetric loop. AIChE Journal. 2014;60(5):1920-9.

9- Bedram A, Moosavi A. Droplet breakup in an asymmetric microfluidic T junction. The European Physical Journal E. 2011;34(8):1-8.

10- Bedram A, Darabi AE, Moosavi A, Hannani SK. Numerical investigation of an efficient method (T-junction with valve) for producing unequal-sized droplets in micro-and nano-fluidic systems. Journal of Fluids Engineering. 2015;137(3).

11- Bedram A, Moosavi A, Hannani SK. Analytical relations for long-droplet breakup in asymmetric T junctions. Physical Review E. 2015;91(5):053012.

12- Rostami B, Morini GL. Generation of Newtonian droplets in Newtonian and non-Newtonian carrier flows in micro T-junctions under opposed-flow configuration. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2020;281:104297.

13- Wong VL, Loizou K, Lau PL, Graham RS, Hewakandamby BN. Numerical studies of shear-thinning droplet formation in a microfluidic T-junction using two-phase level-SET method. Chemical Engineering Science. 2017;174:157-73.

14- Fu T, Ma Y, Funfschilling D, Li HZ. Bubble formation in non-Newtonian fluids in a microfluidic T-junction. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2011;50(4):438-42.

15- Sontti SG, Atta A. CFD analysis of microfluidic droplet formation in non–Newtonian liquid. Chemical Engineering Journal. 2017;330:245-61.

16- Chiarello E, Gupta A, Mistura G, Sbragaglia M, Pierno M. Droplet breakup driven by shear thinning solutions in a microfluidic T-junction. Physical Review Fluids. 2017;2(12):123602.

17- Rostami B, Morini GL. Generation of Newtonian and non-Newtonian droplets in silicone oil flow by means of a micro cross-junction. International Journal of Multiphase Flow. 2018;105:202-16.

18- Leshansky AM, Pismen LM. Breakup of drops in a microfluidic T junction. Physics of Fluids. 2009;21(2):023303.

19- Hemeida AM. Rheological behavior of saudi crude oils. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 1990;2(1):181-93.

20- Beg SA, Amin MB, Hussain I. CHARACTERIZATION OF ARAB BERRI (EXTRA LIGHT) CRUDE FRACTIONS WITH EMPHASIS ON KINEMATIC VISCÓSITY-TEMPERATURE BEHAVIOR. Fuel science & technology international. 1988;6(3):291-308.

21- Sakthivel S, Velusamy S, Gardas RL, Sangwai JS. Adsorption of aliphatic ionic liquids at low waxy crude

oil–water interfaces and the effect of brine. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2015;468:62-75.
22- dos Santos RG, Mohamed RS, Bannwart AC, Loh W. Contact angle measurements and wetting behavior of inner surfaces of pipelines exposed to heavy crude oil and water. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2006;51(1-2):9-16.
23- Li L, Zhang J, Wang K, Xu J, Luo G. Droplet formation of H2SO4/alkane system in a T-junction microchannel: Gravity effect. AIChE Journal.;62(12):4564-73.
24- Dodge FT, Garza LR. Experimental and theoretical studies of liquid sloshing at simulated low gravity. 1967;555-562.
25- Kadam ST, Baghel K, Kumar R. Simplified model for prediction of bubble growth at nucleation site in microchannels. Journal of heat transfer. 2014;136(6).
26- Dalai B, Dash SK, Singh SK, Swain BB. 1H NMR and acoustic response of binary mixtures of an organophosphorous extractant with 1-alkanols (C1–C4, C8). Journal of Molecular Liquids. 2015;208:151-9.
27-Pandey JD, Sanguri V, Yadav MK, Singh A. Intermolecular free length and free volume of pure liquids at varying temperatures and pressures. Indian Journal of Chemistry -Section A (IJC-A). 2008;47A(07):1020-1025
28-Ali A, Nain AK, Sharma VK, Ahmad S. Molecular interactions in binary mixtures of tetrahydrofuran with alkanols (C 6, C 8, C 10): an ultrasonic and volumetric study. Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP). 2004;42(09):666-673.
29-White FM. Fluid Mechanics 7th Edition in SI units