مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 94-102

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی عددی تشکیل قطره دریک میکروکانال، با استفاده از روش شبکه بولتزمن

کیوان فلاح[1]، محمد طیبی رهنی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

2- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی113658639، taeibi@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 تیر 1395

پذیرش: 31 مرداد 1395

ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:

جریان چندفازی

شبکه بولتزمن

مدل شبه- پتانسیل

میکروکانال

تشکیل قطره

چکیده

در این مقاله، جریان دوفازی مخلوط نشدنی در یک میکروکانال دوبعدی تی- شکل معمولی و اصلاح شده به‌صورت عددی مطالعه شده است. برای این منظور، از روش شبکه بولتزمن با مدل شبه- پتانسیل استفاده شده است. دقت مدل موردنظر توسط آزمایش لاپلاس، زاویه‌ی تماس قطره و فرآیند تشکیل قطره در یک میکروکانال تی‌شکل معمولی مورد امتحان قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج مشخص می‌کند که نتایج حاضر توافق خوبی با نتایج عددی و آزمایشگاهی محققان پیشین دارد. در این تحقیق اثر تغییرات پارامترهای گوناگون از جمله عدد کاپیلاری، نسبت دبی، نسبت پهنای دو فاز و زاویه‌ی تماس بین قطره و سطح جامد روی پهنای قطره و فاصله مابین قطرات با جزئیات برای میکروکانال تی‌شکل معمولی بررسی شده است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که با انجام اصلاحی ساده روی یک میکروکانال تی‌شکل معمولی، تحت شرایط یکسان، میکروکانال تی‌شکل اصلاح‌شده قطرات با اندازه‌های کوچکتر و با فاصله مابین قطرات کمتری را نسبت به میکروکانال تی‌شکل معمولی تولید می‌کند. از طرفی، این تحقیق مشخص می‌کند که جریان‌های چندفازی در تجهیزات میکروکانال حتی به تغییرات کوچک در هندسه کانال به شدت حساس می‌باشند. همچنین، روش شبکه بولتزمن با مدل شبه-پتانسیل در شبیه‌سازی تشکیل قطره در میکروکانل‌ها مناسب می‌باشد.

Numerical Simulation of drop Formation in a Microchannel, Using Lattice Boltzmann Method

Kayvan Fallah[1], Mohammad Taeibi Rahni[*2]

1- Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Science and Research Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Aerospace Engineering, Sharif University, Tehran, Iran

*P.O.B. 113658639, Tehran, Iran, taeibi@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 July 2016
Accepted 21 August 2016
Available Online 09 October 2016

Keywords:
Multiphase Flow
Lattice Boltzmann Method
Pseudo Potential Model
Microchannel
Drop Formation

ABSTRACT

In this article, an immiscible two-phase flow in two dimensional ordinary and modified T-junction microchannels is numerically studied. To this approach, the Lattice Boltzmann method with Pseudo-Potential model is used. The accuracy of the present model is examined by the Laplace test, drop contact angle, and drop formation in an ordinary T-junction microchannel. The comparison shows that the present results have good agreement with previous numerical and experimental data. The effects of various parameters including Capillary number, flow rate ratio, width ratio, and drop contact angle on the width of the drop and on the distance between drops for ordinary and modified T-junction microchannels are investigated in detail. The results reveal that by simple modifications to the ordinary T-junction, smaller drops and lower distances between them are generated in the comparison of ordinary T-junction geometry under the same conditions. On the other hand, this study demonstrates that the multiphase flows in micro-devices are very sensitive to even small changes in the channel geometry. It also indicates that Lattice Boltzmann method with Pseudo-Potential model is an effective numerical technique to simulate the generation of drops in microchannels.

1-مقدمه

جریان‌های چندفازی از پرکاربردترین موضوعات مورد بررسی در پژوهش‌های دانشگاهی و پروژه‌های صنعتی می‌باشند. یکی از چالش‌های مهم در بررسی دینامیک سیالات در مقیاس میکرو، بررسی فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال‌ها می‌باشد. این ابزارها، کاربردهای فراوانی در صنایع پلیمر، علوم بیولوژی و بیوشیمی، لوازم آرایشی، تولید غذا و غیره دارند. در فرآیند تشکیل قطره، تشکیل مدام قطره‌های کوچک و با فاصله یکسان نسبت به یکدیگر و سرعت حرکت قطرات تولید شده اهمیت زیادی دارند. به این ترتیب، فرآیند تشکیل قطره و تحت کنترل در آوردن آن، و توجه به ویژگی‌های قطره از جمله اندازه قطره و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر آن‌ها را دوچندان می‌کند. از این‌رو، خیلی مهم است که به طور کامل از فرآیند و نحوه تشکیل قطره آگاهی وجود داشته باشد. در تشکیل قطره در میکروکانال، خواص سیال، هندسه میکروکانال و دبی جریان ورودی دوسیال مخلوط نشدنی به عنوان عوامل تعیین‌کننده شناخته می‌شوند. هندسه‌های مختلفی برای تشکیل قطره در میکروکانال‌ها موجود است. این هندسه‌ها عبارتند از: میکروکانال‌های تی-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

K. Fallah, M. Taeibi Rahni, Numerical Simulation of drop Formation in a Microchannel, Using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 94-102, 2016 (in Persian)

شکل[1]، جریان داخل دو کانال هم‌محور[2] و جریان هندسه متقاطع[3]. در این میان، کاربرد میکروکانال‌های تی‌شکل بدلیل سادگی ساخت آن و ارزانتر بودن بوفور دیده می‌شود.

یکی از نخستین مطالعات در زمینه میکروسیال تی‌شکل به‌وسیله تورسن و همکاران [1] انجام شده است، که امولاسیون بین جریان روغن و آب را مطالعه نمودند. از سویی دیگر، لینک و همکاران [2]، دو روش انفعالی برای شکستن قطرات بزرگ به قطرات کوچک با اندازه‌های قابل کنترل تحت جریان متحرک-فشاری[4] در پیکربندی‌های مختلف را شرح دادند. گویلت و کولین [3] به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی تشکیل قطره در میکروکانال تی-شکل پرداختند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که، متغیرهای فیزیکی از جمله دبی فازهای پیوسته و گسسته، ویسکوزیته سیال، هندسه، فعل و انفعال بین کشش سطحی و نیروی ویسکوز بر روی تشکیل قطره تاثیر می‌گذارد. ژو و همکاران [4]، تشکیل میکروحباب‌های هوا که بوسیله یک فاز آبی احاطه شده است، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته در یک دبی حجمی ثابت برای فازهای پیوسته و گسسته، منجر با تشکیل قطرات با حجم‌های کمتر در اتصال تی‌شکل می‌گردد. زو و همکاران [5] تشکیل قطره در میکرو کانال تی‌شکل را بررسی نمودند. آن‌ها با توجه به مشاهدات خود، براساس عدد کاپیلاری فاز پیوسته الگوی جریان مختلف را طبقه بندی نمودند. اویشی و همکاران [6] مکانیزم تولید حباب را در اتصال تی‌شکل با استفاده از دستگاه سرعت سنج تصویر ذرات میکرو بررسی کرده اند و دریافتند، نسبت سرعت تاثیر به سزایی روی تشکیل حباب دارد. گو و همکاران [7] پیشرفت‌های اخیر در زمینه جریان دوفازی در سیستم‌های میکرو سیالی را راجع به دو فرآیند بنیادین در مورد قطرات شامل تشکیل و ادغام را مورد بازبینی قرار دادند. آن‌ها به مطالعات کارهای انجام شده و پارامترهای تاثیرگذار در سیستم‌های میکروسیالی پرداختند. ژائو و همکاران [8] به‌صورت آزمایشگاهی اثرات فشار بر روی ویژگی‌های هیدرودینامیکی فازهای مایع و گاز در میکروکانال تی‌شکل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نیتروژن و آب زدوده از یون را به‌عنوان سیال مورد تست‌گیری خود انتخاب نمودند. آن‌ها هفت نوع الگوی جریان را برای اتصال تی‌شکل مشاهده نمودند و بر روی ویژگی‌های هر الگو و مکانیزم تشکیل قطرات به تفصیل بحث نمودند. یاماموتو و اوگاتا [9] به‌صورت آزمایشگاهی افت فشار جریان اسلاگ دوفازی آب و هوا در میکروکانال‌های دایروی تی‌شکل و تاثیر تغییر اندازه ابعاد کانال بر روی افت فشار با جزئیات بحث و بررسی نمودند.

در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمن پتانسیل بالای خود را در شبیه‌سازی جریان در بازه گسترده‌ای از کاربردهای مهندسی از جمله: محیط متخلخل [10]، سیالات غیرنیوتنی [12,11]، میدان مغناطیسی [13]، جریان‌های دوفازی [15,14] و غیره را نشان داده است. این روش یک روش شبه مولکولی براساس مدل‌های معادلات جنبشی در سطح میکرو و مزو می‌باشد که تابع توزیع مجموعه مولکول‌ها را ردیابی می‌کند [17,16]. در مجموع چهار روش عمده برای روش شبکه بولتزمن وجود دارد که می-تواند جریان دوفازی را شبیه‌سازی نمایند. از جمله: مدل کرومودینامیک[5] [18]، شبه پتانسیل (به این روش، شان-چن هم می‌گویند) [19]، مدل‌های بر اساس نیروهای بر هم‌کنش بین مولکولی[6] [20] و مدل انرژی آزاد[7] [21]. مدل شبه‌پتانسیل به‌دلیل سادگی و قابلیت تطابق خوب، پرکاربردترین مدل چند فازی در روش شبکه بولتزمن می‌باشد.

وو و همکاران [22] با استفاده از روش شبکه بولتزمن به شبیه سازی جریان چند فازی مخلوط نشدنی در میکروکانال‌های متقاطع پرداختند. آن‌ها بامدل بی-جی-کا[8] با معرفی نمودن نیروی کشش سطحی براساس روش نیروی سطحی پیوسته بهبود بخشیدند و نتایج حاصل از شبیه‌سازی خود را بر روی تشکیل قطره در میکروکانال‌های متقاطع با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. گوپتا و همکاران [23] با استفاده از روش شبکه بولتزمن تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل در اعداد کاپیلاری پائین و دبی‌های حجمی متفاوت فاز پیوسته و گسسته شبیه سازی نمودند. یانگ‌یومین و همکاران [24] به شبیه‌سازی دو سیال مخلوط نشدنی در اتصال تی‌شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند و پنج الگوی جریان متفاوت را پیش‌بینی نمودند. ریود و همکاران [25] یک روش شبکه بولتزمن جدید که براساس ترکیب روش رنگی و روش شبه پتانسیل می‌باشد، برای شبیه‌سازی جریان‌های دو فازی در میکروکانال‌ها توسعه دادند و روش عددی پیشنهادی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند و تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج عددی یافتند. علیزاده و همکاران [26] با استفاده از روش شبکه بولتزمن مدل تابع مشخصه فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال هم‌محور را شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها سه نوع رژیم جریان: چکه کردن، جتی و حالت انتقال بین این دو رژیم را مشاهده نمودند.شی وتانگ [27] با استفاده از روش شبکه بولتزمن تشکیل قطره غیرنیوتی به‌عنوان فاز گسسته در یک فاز پیوسته را در میکروکانال‌های تی-شکل و متقاطع شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها نشان دادند که روش شبکه بولتزمن، یک روش مناسب برای شبیه‌سازی سیالات غیرنیوتنی در میکروکانال‌ها می‌باشد. در تمام مطالعاتی که تاکنون با استفاده از روش شبکه بولتزمن در میکروکانال انجام شده است، نسبت دانسیته دوفاز برابر در نظر گرفته شده است در حالی‌که در این مقاله نسبت دانسیته بین دوفاز برابر با 100 در نظر گرفته شده است.

در این مقاله نیز از روش شبکه بولتزمن مدل شبه-پتانسیل برای شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل معمولی و اصلاح‌شده در اثر برهم‌کنش دو سیال مخلوط‌نشدنی مورد استفاده قرار گرفته است. دقت مدل موردنظر توسط آزمایش لاپلاس، زاویه‌ی تماس[9] و تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل معمولی مورد امتحان قرار گرفته است. فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل معمولی و اصلاح شده با جزئیات توضیح داده می‌شود. اثرات تغییر عدد کاپیلاری، نسبت دبی، نسبت پهنای دو فاز و زاویه‌ی تماس بین قطره با سطح جامد بر روی طول قطره و فاصله مابین قطرات با جزئیات بررسی می‌شود. نسبت چگالی و نسبت ویسکوزیته ثابت و به ترتیب، 100 و برابر 2 در نظر گرفته شده‌اند.

2-روش عددی

در سال‌های اخیر، روش شبکه بولتزمن به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی میدان جریان پدیدار شده است. در روش شبکه بولتزمن، حرکت سیال توسط مجموعه‌ای از توابع توزیع شرح داده می‌شود. براساس عملگر برخورد ساده و معروف بی-جی-کا [28]، معادله استاندارد شبکه بولتزمن با ترم نیرو را به‌صورت زیر می‌توان بیان

[1] T-Junction
[2] Co-Flowing
[3] Cross-Junction
[4] Pressure Driven-Flow
[5] Chromo-dynamic
[6] Intermolecular Interaction
[7] Free Energy
[8] Bhatnagar–Gross–Krook (BGK)
[9] Contact Angle

نمود:

$$f_i^\sigma(x+e_i\delta t, t+\delta t) = f_i^\sigma(x,t) - \frac{f_i^{\sigma(\mathrm{eq})} - f_i^\sigma}{\tau} + K_i^\sigma(x,t) \quad (1)$$

که $f_i^\sigma(x,t)$ تابع توزیع جزء σ-ام در جهت i-ام با سرعت e_i در مکان x و زمان t می‌باشد. τ^σ زمان آسایش جزء σ-ام است. ویسکوزیته جزء σ-ام توسط رابطه زیر به زمان آسایش جزء σ-ام مرتبط می‌شود:

$$\vartheta^\sigma = (\tau^\sigma - 0.5)/3 \quad (2)$$

f^{eq} تابع توزیع تعادلی می‌باشد که به‌صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود:

$$f_i^{\sigma(\mathrm{eq})} = w_i\rho^\sigma\left[1 + \frac{e_i\cdot u_{\mathrm{eq}}^\sigma}{c_s^2} + \left(\frac{e_i\cdot u_{\mathrm{eq}}^\sigma}{2c_s^4}\right)^2 - \frac{u_{\mathrm{eq}}^\sigma\cdot u_{\mathrm{eq}}^\sigma}{c_s^2}\right] \quad (3)$$

w_i و e_i، به ترتیب، ضرایب وزنی و سرعت میکروسکوپیک هستند. برای مدل دوبعدی و 9 سرعته[1] مقادیر زیر را دارا هستند:

$$\omega_0=4/9, \omega_i=1/9\ (i=1,2,3,4), \omega_i=1/36\ (i=5,6,7,8) \quad (4)$$

$$\begin{cases} e_0 = 0 \\ e_i = [\cos(i-1)\,\pi/2, \sin(i-1)\,\pi/2], i = 1,2,3,4 \\ e_i = \sqrt{2}[\cos(i-1)\,\pi/4, \sin(i-1)\,\pi/4], i = 5,6,7,8 \end{cases} \quad (5)$$

چگالی سیال جزء σ-ام و سرعت سیال جزء σ-ام از رابطه زیر به‌دست می‌آیند [29]:

$$\rho^\sigma = \sum_{i=0}^{8} f_i^\sigma \quad (6)$$

$$\rho^\sigma u^\sigma = \sum_{i=0}^{8} f_i^\sigma e_i \quad (7)$$

بطور کلی، نیروی کلی (F^σ) که بر ذره سیال در جریان چند فازی اعمال می‌شود شامل نیروی سیال-سیال (F_i^σ)، نیروی سیال-جامد (F_s^σ) و غیره می‌باشد، یعنی [29]:

$$F^\sigma = F_{\mathrm{f}}^\sigma + F_{\mathrm{s}}^\sigma \ldots. \quad (8)$$

براساس مدل شبه پتانسیل، نیروی بین‌مولکولی سیال-سیال برای هر جزء به‌صورت زیر تعریف می‌شود [29]:

$$F_{\mathrm{f}}^\sigma(x) = -\psi^\sigma(x)\sum_\sigma G_{\sigma\bar\sigma}\sum_i \omega_i\psi^\sigma(x+e_i\delta t) \quad (9)$$

$G_{\sigma\bar\sigma}$ نشان دهنده قدرت فعل و انفعال بین‌مولکولی بین اجزای مختلف سیال می‌باشد. ψ، تابع پتانسیل می‌باشد که به چگالی محلی سیال وابسته می‌باشد. در مقالات [31,30،19]، شکل‌های مختلفی برای آن بیان شده است. یان و شافر [31]، بیان نمودند که با انتخاب تابع پتانسیل و معادلات حالت مناسب، می‌توان به نسبت چگالی بالاتر و مقدار سرعت پارازیتی کمتری دست یافت. از این‌رو، تابع پتانسیل به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\psi^\sigma(x) = \sqrt{\frac{2(P_\sigma - C_s^2\rho^\sigma)}{C_0\, G_{\sigma\sigma}}} \quad (10)$$

مقدرا C_0 در رابطه (10) برابر با یک است. در این مقاله، از معادله حالت پنگ-رابینسون[2] استفاده شده است. این معادله حالت به‌صورت زیر تعریف می‌شود[31]:

$$P = \frac{\rho RT}{1-bT} - \frac{a\,\alpha(T)\rho^2}{1+2b\rho - b^2\rho^2} \quad (11)$$

در این رابطه، $a = 0.45724(RT_c)^2/P_c$ و $b = 0.0778RT_c/P_c$ می‌باشند. P_c و T_c، به ترتیب، دمای بحرانی و فشار بحرانی می‌باشند. در این تحقیق مقادیر a، b و R طبق مرجع [31] به ترتیب، 2/49، 2/21 و 1 در نظر گرفته شده‌اند. از این‌رو، مقادیر دمای بحرانی و فشار بحرانی به ترتیب، 0.0729 و 0.0595 به‌دست می‌آید. همچنین $\alpha(T)$ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [31]:

$$\alpha(T) = \left[1 + (0.37464 + 1.5422\omega - 0.26992\omega^2)\left(1-\sqrt{T/T_{\mathrm{C}}}\right)\right]^2 \quad (12)$$

که ω ضریب خروج از مرکزی[3] می‌باشد.

به‌طور مشابه، نیروی فعل و انفعال بین سیال و جامد به‌صورت زیر می‌تواند بیان شود [29]:

$$F_{\mathrm{s}}^\sigma(x) = -\psi^\sigma(x)\sum_\sigma G_{\sigma\mathrm{s}}\omega_i\psi^\sigma(x+e_i\delta t)\, e_i \quad (13)$$

$G_{\sigma\mathrm{s}}$ نشان دهنده قدرت فعل و انفعال بین جامد و سیال می‌باشد که شرایط ترشوندگی[4] سطح جامد را مشخص می‌کند. برای یک سیستم سیال دوجزئی، زمانی‌که $G_{1\mathrm{s}} - G_{2\mathrm{s}} < 0$ باشد، جزء یک به‌عنوان فاز ترشونده و جزء دو به عنوان فاز ترنشونده[5] مدل‌سازی می‌شود. تابع اسکالر $S(x)$، اگر متغیر x در سیال باشد برابر صفر و اگر بر روی سطح جامد باشد برابر یک می‌باشد.

چگونگی به‌کارگیری نیروی کل (معادله (3)) در چارچوب روش شبکه بولتزمن در پایداری و دقت مدل شبه پتانسیل بسیار حائز اهمیت است. سه طرح برای به‌کارگیری نیرو وجود دارد که شامل: طرح نیروی شان-چن [20]، طرح اختلاف دقیق[6][32] و طرح نیروی گو [33] می‌باشد. در این تحقیق از طرح نیروی گو به دلیل برتری که نسبت به طرح نیروی شان-چن دارد، استفاده شده است. در این طرح نیرو، ترم آخر معادله‌ی (1) به‌صورت رابطه (14) محاسبه می‌شود:

$$K_i = \left(1-\frac{1}{2\tau}\right)\omega_i\left(\frac{e_i - u^{\mathrm{eq}}}{C_s^2} + \frac{e_i u^{\mathrm{eq}}}{C_s^4}\right)\cdot F\,\delta t \quad (14)$$

در این طرح نیرو، سرعت واقعی سیال و سرعت تعادلی در یک شکل به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_{\mathrm{P}} = u^{\mathrm{eq}} = u + \frac{1}{2\rho}F\,\delta t \quad (15)$$

3-مدل‌سازی عددی

در "شکل 1" نمایی شماتیک از میکروکانال تی‌شکل معمولی (شکل 1(الف))

[1] D_2Q_9

[2] Peng-Robinson Equation of state
[3] Acentric Factor
[4] Wetting Condition
[5] Non Wetting
[6] Exact Difference

و اصلاح شده (شکل 1(ب)) نشان داده شده است. مقادیر سرعت برای فاز پیوسته در ورودی U_C و برای فاز گسسته U_d مرز در نظر گرفته شده است. شرط مرزی سرعت معلوم برای ورودی‌های کانال و شرط توسعه‌یافتگی برای خروجی به کار می‌رود. سرعت در دیواره‌های بالا و پائین مطابق با شرط عدم لغزش و با روش پرش به عقب[1] مدل شده است.

در میکروکانال‌های تی‌شکل، پارامترهای فیزیکی مهم چگالی (ρ_c و ρ_d)، ویسکوزیته (μ_d و μ_c)، پهنای کانال (W_d و W_c)، سرعت ورودی فازها (U_d و U_C)، کشش سطحی بین دو فاز (γ) و زاویه‌ی تماس می‌باشد. زیرنویس‌های dوc، به‌ترتیب، بیان‌کننده فاز پیوسته و فاز گسسته می‌باشند. با استفاده از آنالیز ابعادی، اعداد بی بعد حاکم عبارتند از: نسبت چگالی ($\rho=\rho_d/\rho_c$)، نسبت ویسکوزیته ($\mu=\mu_d/\mu_c$)، نسبت دبی ($Q=Q_c/Q_d$)، نسبت پهنا ($W=W_d/W_c$)، عدد رینولدز ($Re=\rho_c U_c W_c /\mu_c$)، عدد باند ($Bo = \rho_c\, g\, W_c^2/\sigma$) و عدد کاپیلاری فاز پیوسته ($Ca=\mu_c U_c/ \gamma$) می‌باشد. پارامتر مهم دیگر، زاویه‌ی تماس بین قطره با سطح جامد می‌باشد. همچنین با توجه به اصلاح پیشنهاد شده بر روی میکروکانال تی-شکل، پارامتر طول بی‌بعد فاز گسسته ($\beta=L_d/W_c$) نیز مهم می‌باشد. کوئین و لاول [34] و تایس و همکاران [35]، به‌ترتیب، اثبات نمودند که در میکروکانال‌ها اثر نیروی گرانش و اینرسی در مقایسه با نیروهای کشش سطحی و لزجت ناچیز می‌باشند. بنابراین، عدد باند و عدد رینولدز تاثیر چندانی بر روی فرآیند تشکیل قطره ندارند و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر نمود. عدد کاپیلاری که بیان کننده نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی می‌باشد، مهم‌ترین پارامتر در میکروکانال می‌باشد. در این تحقیق، نسبت چگالی و نسبت ویسکوزیته ثابت و به ترتیب، 100 و برابر 2 در نظر گرفته شده‌اند.

4-بررسی اعتبارسنجی و صحت کد کامپیوتری

از آن‌جا که مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بخش تحلیل جریان‌های چندفازی

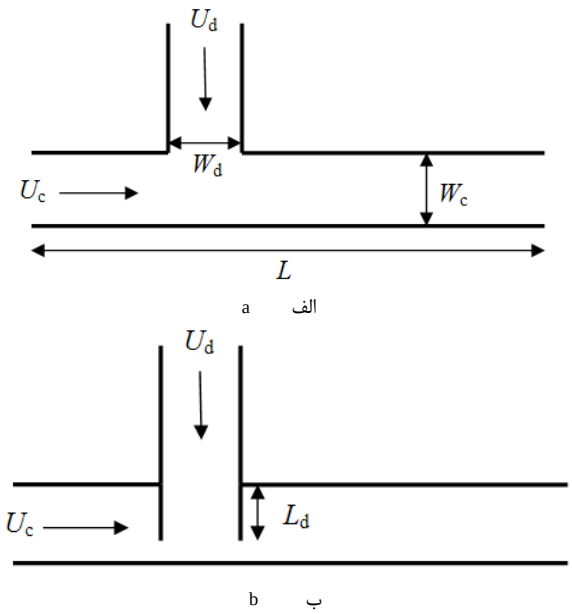

Fig. 1 A schematic illustration of 2D microchannel (a: the ordinary T-shaped and b: the modified T-shape)

شکل 1 نمایی شماتیک از میکروکانال دوبعدی (الف: تی‌شکل معمولی و ب: تی‌شکل اصلاح شده)

[1]Bounce Back

مربوط به دینامیک سطح مشترک بین دو سیال است، اولین گام برای صحت شبیه‌سازی جریان بررسی این موضوع می‌باشد.

4-1-قانون لاپلاس

قانون لاپلاس بیان می‌کند که در غیاب اثرات نیروهای جاذبه و لزجتی و در حضور اثرات کشش سطحی و اختلاف فشار، اگر شکل یک ذره سیال، از دایره در حالت دوبعدی منحرف شود، در حالت نهایی شکل آن باید دوباره به دایره تبدیل می‌شود و رابطه تحلیلی زیر، برای اختلاف فشار بین درون و بیرون یک قطره (در حالت دوبعدی) بر اثر نیروهای کشش سطحی برقرار می‌باشد.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{R} \qquad (16)$$

در رابطه فوق γ ضریب کشش سطحی و R شعاع قطره است. برای شبیه‌سازی این مسئله از میدان شبکه 200×200 استفاده شده است و شرط مرزی پریودیک در چهار طرف دامنه محاسباتی اعمال شده است. "شکل 2" اختلاف فشار بین داخل قطره و خارج آن را برای اندازه های مختلف شعاع قطره به‌صورت تابعی از معکوس شعاع نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود قانون لاپلاس ارضا می‌گردد و شیب خط به‌صورت خطی تغییر می‌نماید.

4-2- زاویه‌ی تماس

زمانی که یک قطره مخلوط‌نشدنی در تماس با یک سطح جامد قرار می‌گیرد، آن‌گاه میان سیال ترشونده، سیال ترنشونده و سطح جامد خط تماسی ایجاد می‌شود (شکل 3). برای تخمین زاویه‌ی تماس، می‌توان از معادله یانگ به‌صورت رابطه (17) استفاده نمود [36].

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\sigma_{12}} \qquad (17)$$

σ_{s1}، σ_{s2} و σ_{12} به ترتیب کشش میان سیال یک با سطح جامد، کشش میان سیال دو با سطح جامد و مقدار کشش سطحی میان سیال یک و سیال دو می‌باشد.

هانگ و همکاران [36] رابطه تحلیلی (18) را براساس G_{12}، G_{1s} و G_{2s} ارائه نمودند:

$$\cos\theta = \frac{G_{2s} - G_{1s}}{G_{12}\,\frac{\rho_2-\rho_1}{2}} \qquad (18)$$

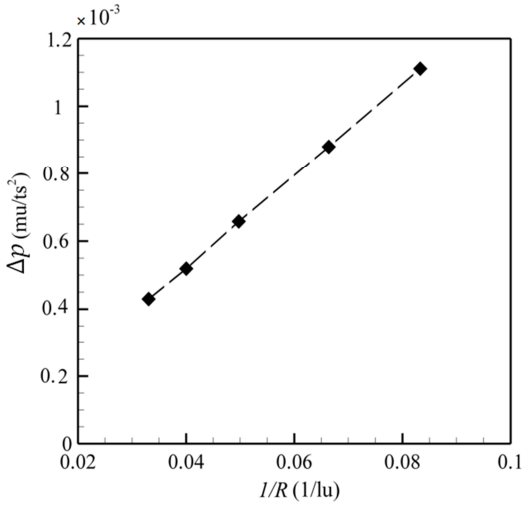

Fig. 2 Laplace test

شکل 2 آزمایش لاپلاس

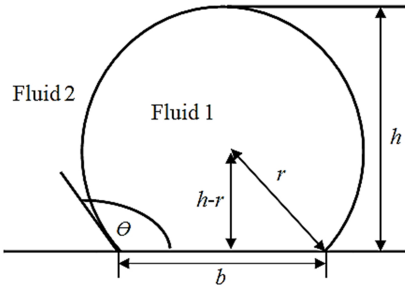

Fig. 3 Contact angle

شکل 3 زاویه‌ی تماس

برای محاسبه زاویه‌ی تماس مابین قطره و سطح جامد، قطره‌ای به‌صورت نیم-دایره با قطر 25 واحد شبکه بولتزمن را در داخل دامنه محاسباتی (بالا و پائین، دیوار و سمت چپ و راست، پریودیک) به ابعاد 80×250 بر روی دیوار پائینی قرار می‌دهیم. با تغییر دادن مقادیر قدرت فعل و انفعال بین جامد و سیال ($G_{\sigma s}$) و بعد از 30000 گام زمانی که میدان به حالت پایا رسید، می‌توان زاویه‌ی تماس را با استفاده از پارامترهای هندسی مسئله و جای‌گذاری در معادله (19) [32]، محاسبه نمود.

$$\theta = \pi - \arctan\left[\frac{b}{2(r-h)}\right] \qquad (19)$$

در این رابطه مقدار $r=h/2+b^2/8h$ می‌باشد.

"شکل 4" نتایج حاصل از شبیه‌سازی زاویه‌ی تماس را نشان می‌دهد.

"شکل 5" مقایسه زوایای تماس حاصل از نتایج شبیه‌سازی حاضر با رابطه تحلیلی (18) و نتایج عددی هانگ و همکاران [36] را نشان می‌دهد. با تغییر مقادیر G_{1s} و G_{2s} می‌توان به زوایای تماس مختلف دست یافت. در این تحقیق، برای سادگی از فرض $G_{2s}=-G_{1s}$ استفاده می‌شود. همان‌طور که می‌بینیم مقادیر تئوری و عددی هم‌خوانی خوبی دارند.

5-نتایج و بحث

در این قسمت با استفاده از روش شبکه بولتزمن فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

"شکل 6" مقایسه بین نتایج عددی حاضر با کار آزمایشگاهی ون‌استجن و همکاران [37] در فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل را نشان می-دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، تطابق خوبی بین نتایج عددی حاضر با کار آزمایشگاهی وجود دارد. در ابتدا، دو سیال مخلوط نشدنی، یک سطح مشترک در محل اتصال کانال تشکیل می‌دهند. فاز گسسته در داخل کانال

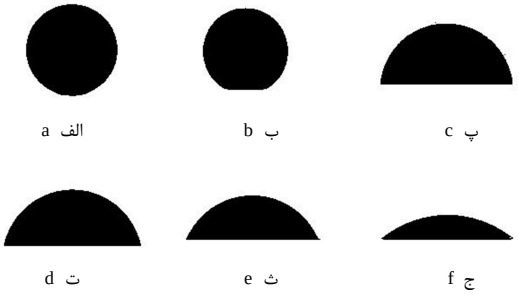

Fig. 4 Different contact angle (a:θ =170^0, b:θ =150^0, c:θ =120^0, d: θ =90^0, e: θ =60^0 and f: θ =30^0)

شکل 4 زاویه‌ی تماس‌های مختلف (الف: θ = 170^0، ب: θ = 150^0، پ: θ = 120^0، ت: θ = 90^0، ث: θ = 60^0 و ج: θ = 30^0)

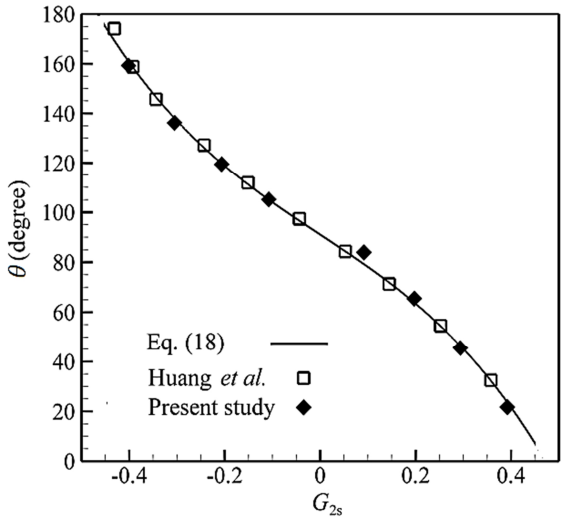

Fig. 5 Comparison of contact angles between present result with Eq. (18) and numerical result of Huang *et al* [36] at different G_{2s}.

شکل 5 مقایسه زوایای تماس حاصل از نتایج شبیه‌سازی حاضر با رابطه تحلیلی (18) و نتایج عددی هانگ و همکاران [36]در G_{2s} متفاوت

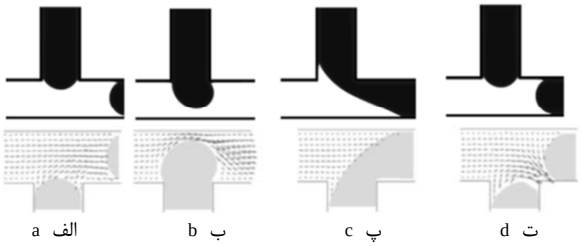

Fig. 6 Comparison between present numerical results with experimental result of van Steijn and *et al*. [37] (bottom row)

شکل 6 مقایسه بین نتاج عدد حاضر (ردیف بالا) با نتایج آزمایشگاهی ون‌استجن و همکاران [37] (ردیف پائین)

اصلی نفوذ پیدا می‌کند. در این حالت، چون نیروی درگ اصطکاکی ناشی از تنش برشی به اندازه کافی قوی نیست تا بر نیروی کشش سطحی غلبه کند، فاز گسسته تمام عرض کانال را اشغال نموده و مانع حرکت فاز پیوسته می‌شود و فشار وارد بر پشت فاز گسسته افزایش می‌یابد. در نتیجه اختلاف فشار بین پشت و جلوی فاز گسسته، فاز گسسته شروع به بزرگ شدن می نماید و به پائین دست جریان کشیده می‌شود. گردن[1] فاز گسسته باریک‌تر می‌شود. در نهایت نیروی فشاری بر نیروی کشش سطحی غلبه می‌کند و قطره از لبه‌ی تیز قسمت تی‌شکل جدا می‌شود. به این نوع رژیم جریان، در اصطلاح، رژیم جریان فشردگی[2] می‌گویند.

"شکل 7" تاثیر عدد کاپیلاری بر روی رژیم جریان برای نسبت دبی 3، نسبت پهنا 0.5 و زاویه‌ی تماس 170^0 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، سه نوع رژیم جریان آرام[3] (شکل 7 (الف))، فواره‌ای[4] (شکل 7 (ب)) و فشردگی (شکل 7 (پ)) مشاهده می‌شود. به‌طور کلی در فرآیند تغییر شکل قطره و تشکیل قطره، سه نیرو عبارتند از: نیروی کشش سطحی، نیروی درگ اصطکاکی و نیروی فشاری تاثیرگذار می‌باشند. در رژیم جریان آرام، نیروی کشش سطحی زیاد بوده به‌طوری‌که نیروی درگ اصطکاکی و نیروی فشاری نمی‌توانند بر آن غلبه کنند. از این‌رو، شکست قطره اتفاق نمی‌افتد و

[1] Neck
[2] Squeezing
[3] Laminar
[4] Jetting

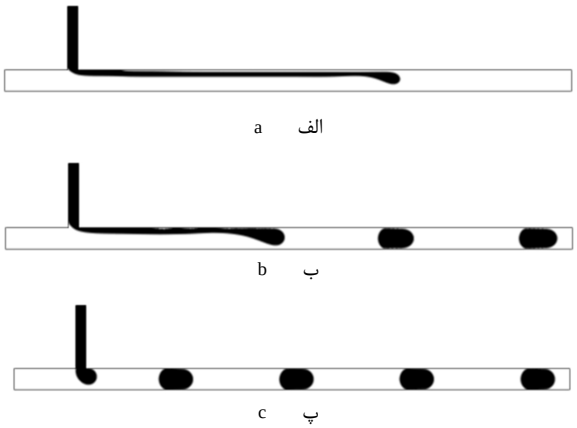

Fig. 7 Effect of Caon the flow regime for Q=3, W=0.5 and θ =170^0 (a: Ca=0.089, b: Ca=0.0163 and c: Ca=0.0054)

شکل 7 تاثیر عدد کاپیلاری بر روی رژیم جریان برای نسبت دبی 3، نسبت پهنا 0.5 و زاویه‌ی تماس 170^0 (الف: Ca=0.089 ، ب: Ca=0.0163 و پ:Ca=0.0054)

فاز گسسته با ضخامت کمتر از فاز پیوسته و موازی با کانال اصلی حرکت می کند. در رژیم جریان فواره‌ای، نیروی درگ اصطکاکی نقش اساسی را بازی می‌کند و از نیروی فشاری، در مقایسه با نیروهای کشش سطحی می‌توان صرف‌نظر نمود. در این رژیم، جدایش قطره در پائین دست اتصال تی‌شکل اتفاق می‌افتد. در رژیم جریان فشردگی، نیروی فشاری نقش اساسی را ایفا می‌کند. شکست قطرات در محل اتصال تی‌شکل اتفاق می‌افتد. قسمت جلویی فار گسسته کل کانال اصلی در محل اتصال را مسدود می‌کند و مانع حرکت فاز پیوسته می‌شود. فاز پیوسته به فاز گسسته فشار وارد کرده و در نهایت باعث شکسته شدن فاز گسسته می‌شود. این نوع رژیم جریان، در اعداد کاپیلاری کوچک از مرتبه 10^{-3} اتفاق می‌افتد.

"شکل 8" اثر تغییر نسبت دبی بر روی تشکیل قطره در رژیم جریان فشردگی را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها برای عدد کاپیلاری 0.00054، زاویه‌ی تماس 170^0 و نسبت پهنا 1 انجام شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت دبی، اندازه قطرات افزایش می‌یابد درحالی‌که فاصله بین قطرات تشکیل شده، کاهش می‌یابد.

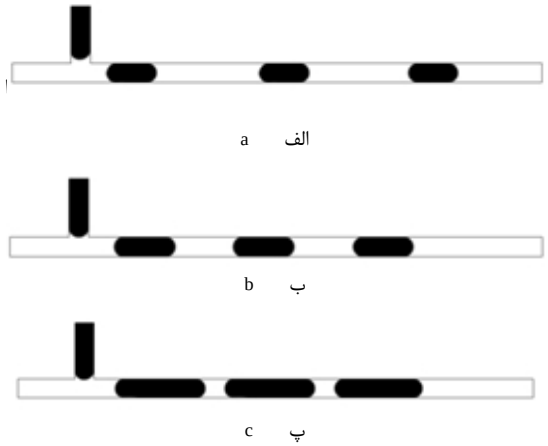

Fig. 8 Effect of Q in the squeezing regime with Ca=0.00054, θ =170^0 and W=l (a: Q=0.32, b: Q=0.5 and c: Q=1)

شکل 8 تاثیر دبی در رژیم جریان فشردگی برای عدد کاپیلاری 0.00054، زاویه‌ی تماس 170^0 و نسبت پهنا 1 (الف: Q=0.32، ب: Q=0.5و پ: Q=1)

گاراستاکی و همکاران [38] بیان نمودند که در رژیم جریان فشردگی رابطه زیر بین طول قطره (L)، نسبت دبی و پهنای کانال برقرار است:

$$\frac{L}{W_c} = \varepsilon + \alpha Q \tag{20}$$

ε و α مقادیر ثابتی هستند که به هندسه میکروکانال وابسته می‌باشند و از برازش منحنی به‌دست می‌آیند. "شکل 9" تغییرات طول قطره شکل گرفته به پهنای کانال برحسب نسبت دبی برای شرایط در نظر گرفته در "شکل 7" را نشان می‌دهد. مقادیر α و ε به ترتیب، 3.686 و 1.08 به‌دست می‌آیند.

"شکل 10" نسبت بی بعد فاصله بین قطرات (g) به پهنای کانال اصلی برحسب نسبت دبی در رژیم جریان فشردگی برای برای شرایط در نظر گرفته در "شکل 8" را نشان می دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دبی، فاصله بین قطرات کاهش می‌یابد.

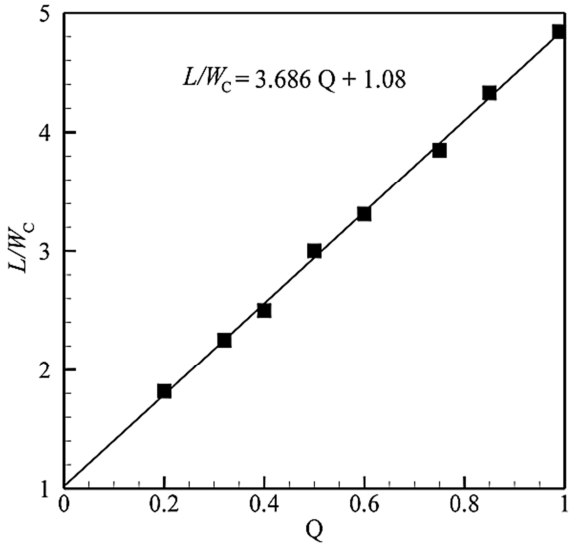

Fig. 9 Normalized length of droplets versus the flow rate ratio at a fixed Ca = 0.00054

شکل 9 اندازه بی‌بعد قطرات برحسب نسبت دبی در Ca=0.00054

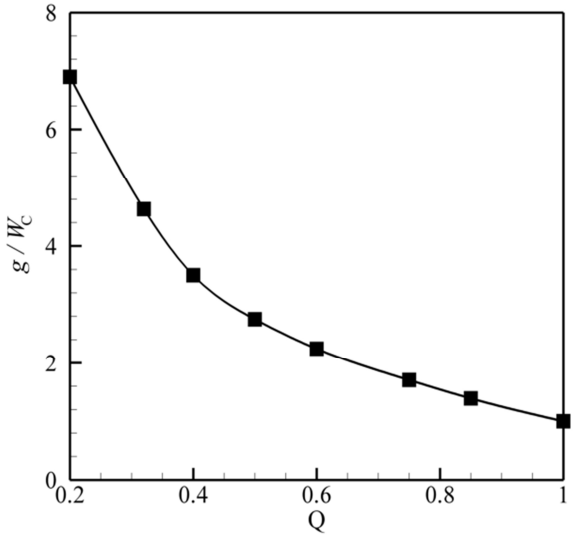

Fig. 10 Normalized distance between droplets versus the flow rate ratio at a fixed Ca = 0.00054

شکل 10 اندازه بی‌بعد فصله بین قطرات برحسب نسبت دبی در Ca=0.00054

"شکل 11" اثر تغییر نسبت پهنا بر روی اندازه قطرات تشکیل شده را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها در عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3 و زاویه‌ی تماس 170^0 برای چهار نسبت پهنای 0.5، 1، 1.5 و 2 انجام شده است. مشاهده می‌شود که پهنای کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آن‌ها اثر می‌گذارد. در واقع با افزایش نسبت پهنا، اندازه قطرات و فاصله مابین آن‌ها افزایش می‌یابد در حالی‌که تعداد قطرات تولید شده کاهش می‌یابد.

زاویه‌ی تماس مابین قطره و سطح جامد، نقش مهمی را در فرآیند تشکیل قطره به‌خصوص در اعداد کاپیلاری کوچک ایفا می‌کند. "شکل 12" تشکیل قطره در چهار زاویه‌ی تماس متفاوت بین قطره با سطح جامد برای

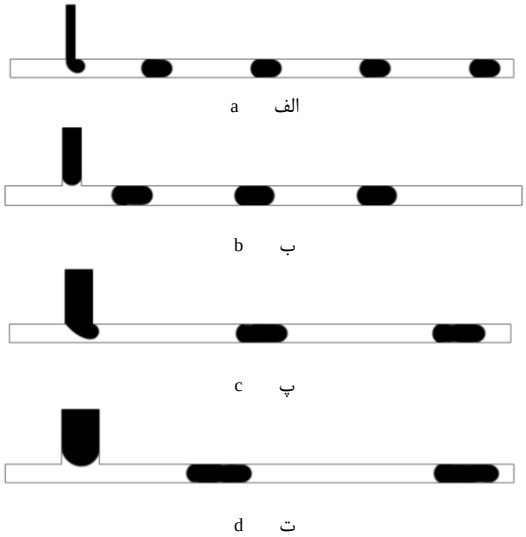

Fig. 11 The droplet formation at Ca=0.0054, Q=3 and θ =170^0 for four different width ratios (a: W=0.5, b: W=1, c: W=1.5 and d: W=2)

شکل 11 تشکیل قطره برای چهار نسبت پهنا مختلف در عددکاپیلاری 0.0054، سبت دبی 3 و زاویه‌ی تماس 170^0(الف: W=0.5، ب: W=1، پ: W=1.5 و د: W=2)

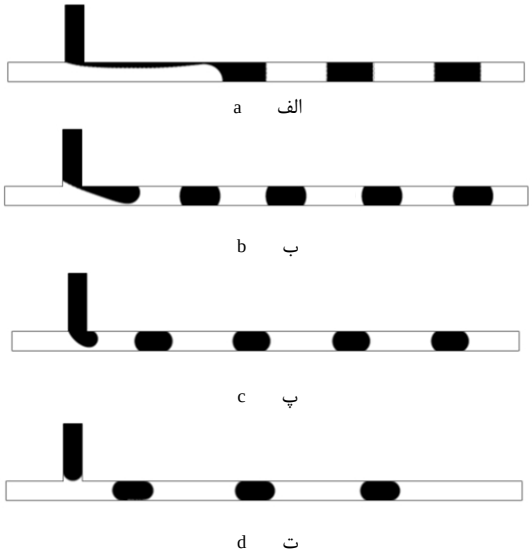

Fig. 12 The droplet formation at Ca=0.0054, Q=3.2 and W=1 for four different width ratios (a: θ = 90^0, b: θ = 120^0, c: θ = 150^0 and d: θ =170^0)

شکل 12 تشکیل قطره در چهار زاویه‌ی تماس متفاوت بین قطره با سطح جامد برای عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3.2 و نسبت پهنا 1 (الف: θ = 90^0، ب: θ = 120^0، پ: θ = 150^0و ت: θ = 170^0)

عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3.2 و نسبت پهنای 1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، با افزایش زاویه‌ی تماس، اندازه قطرات کاهش ولی فاصله بین قطرات افزایش می‌یابد. همچنین، در زاویه‌ی تماس 90^0 (شکل 12(الف)) برخلاف زوایای تماس دیگر، تشکیل قطره در محل اتصال صورت نمی‌گیرد و شکست قطره کمی جلوتر و در قسمت بعد از اتصال صورت می‌گیرد.

"شکل 13" الگوی جریان تشکیل قطره در میکروکانال‌های تی‌شکل معمولی و اصلاح شده برای عدد کاپیلاری 0.0084، نسبت دبی 2، نسبت پهنا 0.5 و زاویه‌ی تماس 170^0 را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 13" می‌بینیم برای میکروکانال معمولی رژیم جریان، از نوع آرام می‌باشد (شکل 12 (الف)) ولی با اصلاح پیشنهاد شده رژیم جریان به فشردگی (شکل 13 (ب) و شکل 13 (پ)) و سپس چکه‌کردن (شکل 13 (ت)) تغییر می‌یابد.

همچنین "شکل 14" الگوی جریان تشکیل قطره در میکروکاناال‌های تی-شکل معمولی و اصلاح شده برای عدد کاپیلاری 0.005، نسبت دبی 3، نسبت پهنا 0.5 و زاویه‌ی تماس 170^0 را نشان می‌دهد. در "شکل 14" برای میکروکانال تی‌شکل معمولی رژیم جریان از نوع فشردگی می‌باشد. با افزایش β اندازه قطرات کاهش می‌یابد به‌طوری‌که برای حالت β=0.75 (شکل 14(ت))، رژیم جریان به رژیم چکه کردن تغییر می‌یابد. در واقع، برای β=0.75 قطرات تشکیل شده به‌صورت دایره بوده و هیچ تماسی با جدار کانال اصلی ندارند. در صنایع شیمیایی در بسیاری از موارد نیاز است تا یک سیال خورنده (از قبیل انواع اسیدها) را از طریق کانال ها انتقال دهیم، از آن‌جا که در بسیاری از بخش‌های صنعتی لوله های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند، سیالات خورنده باعث خوردگی لوله می‌شوند، لذا به فرآیندی نیاز است تا سیال خورنده در طی انتقال از طریق کانال، با جداره نیز تماس پیدا نکند.

"شکل 15 (الف) و 15 (ب)" به‌ترتیب، اندازه بی‌بعد قطرات تولید شده برحسب طول بی‌بعد فاز گسسته و فاصله بی‌بعد مابین قطرات تولید شده برحسب طول بی‌بعد فاز گسسته برای پارامترهای بی‌بعد در نظر گرفته شده در "شکل 14" را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که اندازه قطرات تولید شده

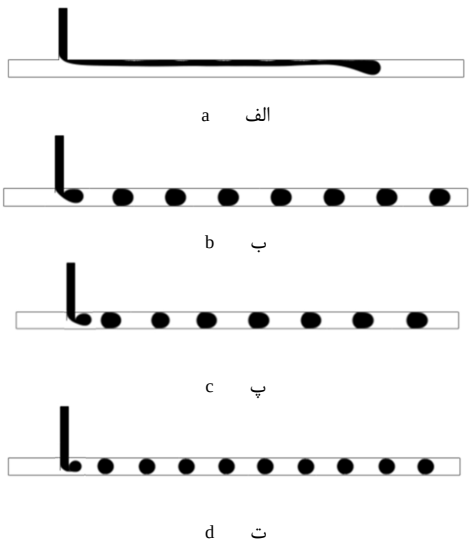

Fig. 13 Flow pattern in ordinary T-channel and modifiedT-channelsat Ca=0.00814 ,Q=2 ,W=0.5andθ = 170^0 (a: β =0, b:β = 0.25 , β = 0.5 andβ = 0.75)

شکل13 الگوی جریان در میکروکانال‌های معمولی و اصلاح‌شده در Ca=0.00814، Q=2، W=0.5 و θ = 170^0 (الف: β =0، ب: β = 0.25، پ: β = 0.5 و ت: β = 0.75)

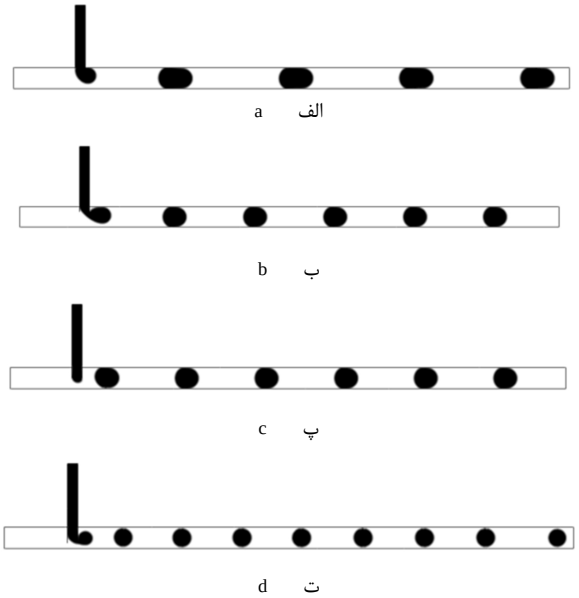

Fig. 14 Flow pattern in ordinary T-channel and modified T-channels at Ca=0.005 ,Q=3 ,W=0.5andθ = 170^0(a: β =0, b:β = 0.25 , c: β = 0.5 and d:β = 0.75)

شکل 14 الگوی جریان در میکروکانال‌های معمولی و اصلاح‌شده در Ca=0.005، Q=3، W=0.5 و θ = 170^0 (الف: β =0، ب: β = 0.25، پ: β = 0.5 و ت: β = 0.75)

و فاصله بی‌بعد مابین قطرات تولید شده در میکروکانال تی‌شکل معمولی بزرگتر از سایر موارد می‌باشد، که مشخص می‌کند نیروی برشی اعمال شده به فاز گسسته از بقیه موارد کمتر می‌باشد. با افزایش طول بی‌بعد فاز گسسته، نیروی برشی وارد بر فاز گسسته بیشتر شده و قطرات ریزتر با فواصل کمتر تولید می‌شود. در بعضی از صنایع داروسازی نیاز است که ذراتی با اندازه های کوچک و یکسان و به تعداد زیاد تولید شوند. از شکل مشخص است که برای β=0.5 اندازه قطره تقریبا برابر پهنای کانال می‌باشد و برای β=0.75 اندازه قطره حتی از پهنای کانال اصلی کمتر می‌باشد. این شکل‌ها، بوضوح نشان می‌دهند که بهترین حالت طراحی برای تولید قطرات با اندازه های کوچک و یکسان و به تعداد زیاد، حالت β=0.75 می‌باشد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش شبکه بولتزمن با مدل شبه-پتانسیل برای شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره در یک میکروکانال دوبعدی تی-شکل معمولی و اصلاح شده استفاده شده است. اعتبار کد موردنظر با دو تست دوفازی معروف آزمایش لاپلاس و زاویه‌ی تماس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی تشکیل قطره در میکروکانال تی-شکل معمولی با نتایج آزمایشگاهی به‌طور کیفی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج بیانگر این مطلب است که مدل عددی مورد استفاده به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتارجریان در این‌گونه کانال‌ها می‌باشد. اثر تغییر عدد کاپیلاری، نسبت دبی، نسبت پهنای دو فاز و زاویه‌ی تماس بین قطره با سطح جامد بر روی طول قطره و فاصله مابین قطرات در میکروکانال تی-شکل معمولی با جزئیات مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر استخراج شده‌اند:

- با تغییر عدد کاپیلاری سه نوع رژیم جریان آرام، فواره‌ای و فشردگی مشاهده شد،

-در رژیم جریان فشردگی و در یک عدد کاپیلاری ثابت، با افزایش نسبت دبی، اندازه قطرات افزایش و فاصله بین تشکیل قطرات کاهش می‌یابد،

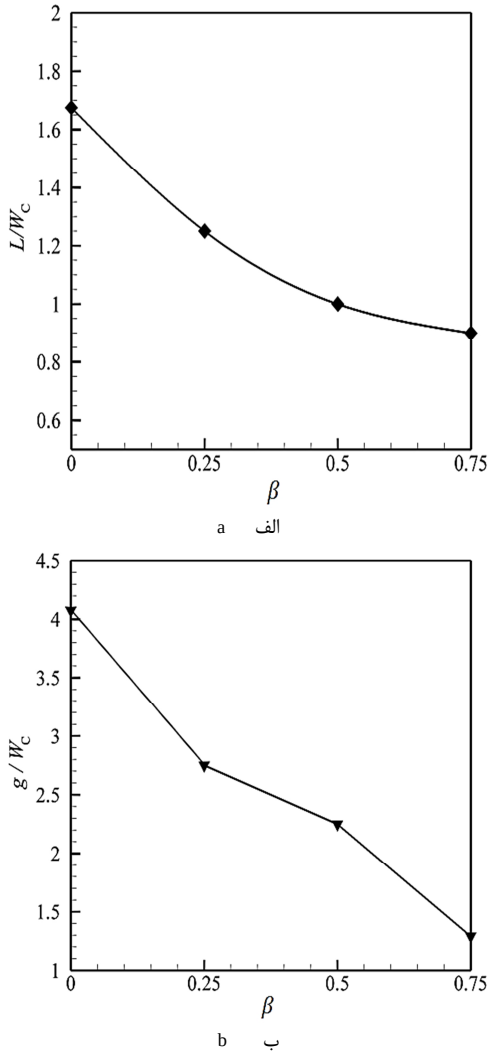

Fig. 15 a: Normalized length of droplets versus β and b: Normalized distance between droplets of droplets versus β

شکل 15 الف: اندازه بی‌بعد قطرات تولید شده برحسب طول بی‌بعد فاز گسسته و ب: فاصله بی‌بعد مابین قطرات تولید شده برحسب طول بی‌بعد فاز گسسته

- پهنای کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آن‌ها اثر می‌گذارد. در واقع با افزایش نسبت پهنا، اندازه قطرات و فاصله مابین آن‌ها افزایش می‌یابد در حالی‌که تعداد قطرات تولید شده کاهش می‌یابد،

- در رژیم جریان فشردگی و در عدد کاپیلاری و دبی ثابت، با افزایش زاویه‌ی تماس، اندازه قطرات کاهش ولی فاصله بین قطرات افزایش می‌یابد.

در ادامه، با انجام اصلاحی ساده بر روی میکروکانال تی-شکل معمولی نشان داده شد که تحت شرایط یکسان، میکروکانال تی‌شکل اصلاح‌شده، قطرات با اندازه‌های کوچکتر، با فاصله مابین قطرات کمتر و تعداد بیشتر را نسبت به میکروکانال تی‌شکل معمولی تولید می‌کنند. نتایج حاضر، رویکرد جدیدی در طراحی و بهینه‌سازی تجهیزات میکرو را نشان می‌دهد.

7- مراجع

[1] T.Thorsen, R. W. Roberts, F. H. .Arnold, S. R. Quake, Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-generating Microfluidic Device, *Physic Review Letters*, Vol. 86, No. 18, pp. 4163–4166, 2001.

[2] D. R. Link, S. L. Anna, D. A. Weitz, H. A. Stone, Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices, *Physic Review Letter*, Vol. 92, No. 5, 2004.

[3] P. Guillot, A. Colin, Stability of Parallel Flows in a Microchannel after a T-junction, *Physic Review E*, Vol. 72, pp. 066301, 2005.
[4] J. H. Xu, S. W. Li, G. G. Chen,G. S .Luo, Formation of monodisperse microbubbles in a microfluidic device, *American Institute of Chemical Engineers*, Vol. 52, pp. 2254-2259, 2006.
[5] J. Xu, , S.W. Li, G. Luo, Correlations of droplet formation int-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, No. 6, pp. 711–717, 2008.
[6] M. Oishi, H. Kinoshita,T. Fujii, M. Oshima, Measurement of three dimensional flow structure of droplet formation mechanism in T-Shaped junction using phase-locked confocal micro-PIV, *14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences*, Groningen, Netherlands, October 3 - 7, 2010.
[7] H. Gu, H. G. Duits,F. Mugele, Droplets Formation and Merging in Two-Phase Flow Microfluidics, *International Journal of molecular sciences*, Vol. 12, No. 4, pp. 2572-2597, 2011.
[8] Y. Zhao, G. Chen, C. Ye,Q. Yuan, Gas–liquid two-phase flow in microchannel at elevated pressure, *Chememical Engineering Science*, Vol. 87, No. 4, pp. 122–132, 2013.
[9] K. Yamamoto, S. Ogata, Drag reduction of slug flows in microchannels by modifying the size of T-junctions, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 62, No. 5, pp. 67–72, 2014.
[10]M. Taghilou, M. H. Raahimian, Simulation of 2D droplet penetration in porous media using Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 43-56, 2013. (in Persianفارسی)
[11]K. Fallah, M. Khayat, M. H. Borghei, A. Ghaderi, E. Fattahi, Multiple-relaxation-time lattice Boltzmann simulation of non-Newtonian flows past a rotating circular cylinder, J Non-*Newtonian Fluid Mech*, Vol. 177, No. 178, pp. 1–14, 2012.
[12]M. H. Sedaghat, M. M. Shahmardan, M. Nazari, M. Norouzi, Immersed boundary-lattice Boltzmann method for modeling non-Newtonian flow around curved boundaries, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 146–156, 2014. (in Persianفارسی)
[13]A. Rahmati, H. Khorasanizadeh, M. Arabyarmohammadi, Application of Lattice Boltzmann Methodfor Simulating MGD in a Microchannel under Magnetic Field Effects, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 99, No. 9, pp. 1–11, 2016. (in Persianفارسی)
[14]E. Sattari, M. A. Delavar, E. Fattahi,K. Sedighi, Investigation of twobubble coalescence with large density differences with Lattice Boltzmann Method, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 93–100, 2014. (in Persianفارسی)
[15]S. M. Khatoonabadi, M. Ashrafizaadeh, Simulation of droplet impact on a thin liquid film using the pseudo-potential multiphase model, *ModaresMechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 8–16, 2016. (in Persianفارسی)
[16]S. Succi, *The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond*, pp. 179-190, Oxford University Press, 2001.
[17]S. Chen, G. D.Doolen, Lattice Boltzmann method for fluid flows, *Journal of Annual Review Fluid Mechanic*, Vol. 30, No. 10, pp. 329–364, 1998.
[18]A. K.Gunstensen,D. H. Rothman, S. Zaleski,G. Zanetti, Lattice Boltzmann model of immiscible fluids, *Physic Review A*, Vol. 43, pp. 4320-4330, 1991.
[19]X. Shan, H. Chen, Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components, *Physic Review E*, Vol. 47, pp. 1815-1819, 1993.
[20]X. He, X.Shan,G. D.Doolen, Discrete Boltzmann equation model for non-ideal gases, *Physic Review E*, Vol. 57, No. 1, R13, 1998.
[21]M. R. Swift, W. R. Osborn,J. M. Yeomans, Lattice Boltzmann simulation of nonideal fluids, *Physic Review Letter*, Vol. 75, pp. 830-840, 1995.
[22]L. Wu, M. Tsutahara,L. S. Kim, M. Ha, Three-dimensional Lattice Boltzmann simulations of droplet formation in a cross-junction microchannel, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 34, No. 9, pp. 852–864, 2008.
[23]A. Gupta,R. Kumar, Effect ofgeometry on droplet formation in the squeezing regime in a microfluidicT-junction, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 8, No. 6, pp. 799–812, 2010.
[24]Y. Y. Mei, Y. Chao, J. Yi,J. Ameya, S. Y. Chun, X. Long, Numerical simulation of immiscible liquid-liquid flow in microchannels using Lattice Boltzmann method, *Science China Chemistry*, Vol. 54, No. 1, pp. 224-256, 2011.
[25]A. Riaud, K. Wang, G. Luo, A combined Lattice-Boltzmann method for the simulation of two-phase flows in microchannel, *Journal of Chemical Engineering Science*, Vol. 99, No. 9, pp. 238–249, 2013.
[26]M. Alizadeh,M. T. Rahni,M. E.Yazdi, Numerical investigation of emulsion process in microchannels, using index-function Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 13–22, 2015. (in Persianفارسی)
[27]Y. Shi, G. H. Tang, Lattice Boltzmann Simulation of Droplet Formation in Non-Newtonian Fluids, *Communications in Computational Physics*,Vol. 17, No. 4, pp 1056–1072, 2015.
[28]P. L. Bhatnagar, E. P. Gross, M. Krook, A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems, *Physic Review*,Vol. 94, No. 3, pp. 511–525, 1954.
[29]J. Bao, L. Schaefer, Lattice Boltzmann equation model for multi-component multi-phase flow with high density ratios, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 4, pp. 1860–1871, 2013.
[30]X. Shan,H. Chen, Simulation of nonideal gases and liquid-gas phase transitions by the Lattice Boltzmann equation, *Physical Review E*, Vol. 49, pp. 2941-2948, 1994.
[31]P. Yuan,L. Schaefer, Equations of state in a Lattice Boltzmann model, *Physic of Fluids*, Vol.18, pp. 42-53, 2006.
[32]S. Schmieschek, J. Harting, Contact angle determination in multicomponent Lattice Boltzmann simulations, *Communications in Computational Physics*, Vol. 9, No. 5, pp. 1165-1178, 2011.
[33]Z. Guo,C. Zheng, B. Shi, Discrete Lattice effects on the forcing term in the Lattice Boltzmann method, *Review E*, Vol. 65, pp. 46-58, 2002.
[34]J. D. Tice, H. Song , A. D. Lyon, R. F. Ismagilov, Formation of droplets and mixing in multiphase microfluidics at low values of the reynolds and the capillary numbers, *Langmuir*, Vol. 19, No. 22, pp. 9127–9133, 2003.
[35]J. Eggers,J. Lister,H. A. Stone, Coalescence of liquid drops, *Journal of Fluid Mechanic*,Vol. 401, No. 3, pp.293, 1999.
[36]H. Huang, D. T. Thorne, M. G. Schaap,M. C. Sukop, Proposed approximation for contact angles in shan-and-chen-type multicomponent multiphase Lattice Boltzmann models, *Physic Review E*, Vol. 76, pp. 66-77, 2007.
[37]V. van Steijn, M. T. Kreutzer, Ch. R. Kleijn, **μ**-PIV study of the formation of segmented flowin microfluidic T-junctions, *Chemical Engineering Science*,Vol. 62, No. 24, 7505–7514, 2007.
[38]P. Garstecki, M. J. Fuerstman, H. A. Stone, G. M. Whitesides, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up, *Lab Chip*, Vol. 6, No. 3, pp.437–66, 2006.