



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

کیوان فلاح<sup>۱</sup>، محمد طبیبی رهنسی<sup>۲\*</sup>

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

۲- استاد، مهندسی هواپیما، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۱۳۶۵۸۶۳۹

### چکیده

در این مقاله، جریان دوفازی مخلوط نشدنی در یک میکروکanal دو بعدی تی - شکل معمولی و اصلاح شده به صورت عددی مطالعه شده است. برای این منظور، از روش شبکه بولتزمن با مدل شبکه - پتانسیل استفاده شده است. دقت مدل موردنظر توسط آزمایش لایاس، زاویه‌ی تماس قطره و فرآیند تشکیل قطره در یک میکروکanal تی شکل 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 پهنه‌ی دو فاز و زاویه‌ی تماس بین قطره و سطح جامد روی پهنه‌ی قطره و فاصله مابین قطرات با جزئیات برای میکروکanal تی شکل معمولی بررسی شده است. همچنین، نتایج شان می‌دهد که با انجام اصلاحی ساده روی یک میکروکanal تی شکل معمولی، تحت شرایط یکسان، میکروکanal تی شکل اصلاح شده قطرات با اندازه‌های کوچکتر و با فاصله مابین قطرات کمتری را نسبت به میکروکanal تی شکل معمولی تولید می‌کند. از طرفی، این تحقیق مشخص می‌کند که جریان‌های چندفازی در تجهیزات میکروکanal حتی به تغییرات کوچک در هندسه کanal به شدت حساس می‌باشدند. همچنین، روش شبکه بولتزمن با مدل شبکه - پتانسیل در شبیه‌سازی تشکیل قطره در میکروکanal ها مناسب می‌باشد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۶ تیر ۱۳۹۵

پذیرش: ۳۱ مرداد ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۸ مهر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

جریان چندفازی

شبکه بولتزمن

مدل شبکه - پتانسیل

میکروکanal

تشکیل قطره

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

Kayvan Fallah<sup>۱</sup>, Mohammad Taeibi Rahni<sup>۲\*</sup>

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

۲- 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.

تشکیل قطره و تحت کنترل در آوردن آن، و توجه به ویژگی‌های قطره از جمله اندازه قطره و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر آنها را در جنگدان می‌کند. از این‌رو، خیلی مهم است که به طور کامل از فرآیند و نحوه تشکیل قطره آگاهی وجود داشته باشد. در تشکیل قطره در میکروکanal، خواص سیال، هندسه میکروکanal و دبی جریان ورودی دوسیال مخلوط نشدنی به عنوان عوامل تعیین‌کننده شناخته می‌شوند. هندسه‌های مختلفی برای تشکیل قطره در میکروکanalها موجود است. این هندسه‌ها عبارتند از: میکروکanal‌های تی -

۱- مقدمه جریان‌های چندفازی از پرکاربردترین موضوعات مورد بررسی در پژوهش‌های دانشگاهی و پژوهش‌های صنعتی می‌باشدند. یکی از چالش‌های مهم در بررسی دینامیک سیالات در مقیاس میکرو، بررسی فرآیند تشکیل قطره در میکروکanal‌ها می‌باشد. این ابزارها، کاربردهای فراوانی در صنایع پلیم، 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

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل انرژی آزاد<sup>7</sup> [21]. مدل شبکه پتانسیل به دلیل سادگی و قابلیت تطابق خوب، پرکاربردترین مدل چند فازی در روش شبکه بولتزمون می‌باشد. و همکاران [22] با استفاده از روش شبکه بولتزمون به شبیه‌سازی جریان چند فازی مخلوط نشدنی در میکروکانال‌های متقطع پرداختند. آن‌ها با مدل بی-جی-کا<sup>8</sup> 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 متقطع با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند که تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان دادند. گوپتا و همکاران [23] با استفاده از روش شبکه بولتزمون تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل در اعداد کاپیلاری پائین و دبی‌های حجمی متفاوت فاز پیوسته و گستته شبیه‌سازی نمودند. یانگیومین و همکاران [24] به شبیه‌سازی دو سیال مخلوط نشدنی در اتصال تی‌شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمون پرداختند و پنج الگوی جریان متفاوت را پیش‌بینی نمودند. ریود و همکاران [25] یک روش شبکه بولتزمون جدید که براساس ترکیب روش رنگی و روش شبکه 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 بولتزمون 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 و تانگ [27] با استفاده از روش شبکه بولتزمون تشکیل قطره غیرنیوتی به عنوان فاز گستته در یک فاز پیوسته را در میکروکانال‌های تی‌شکل و متقطع شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها نشان دادند که روش شبکه بولتزمون، یک روش مناسب برای شبیه‌سازی سیالات غیرنیوتی در میکروکانال‌ها می‌باشد. در تمام مطالعاتی که تاکنون با استفاده از روش شبکه بولتزمون در میکروکانال انجام شده است، نسبت دانسیته دوفاز برابر در نظر گرفته شده است در حالی که در این مقاله نسبت دانسیته بین دوفاز برابر با 100 در نظر گرفته شده است.

در این مقاله نیز از روش شبکه بولتزمون مدل شبکه-پتانسیل برای شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل معمولی و اصلاح شده در اثر برهم‌کنش دو سیال مخلوط نشدنی مورد استفاده قرار گرفته است. دقت مدل موردنظر توسط آزمایش لاپلاس، زاویه‌ی تماس<sup>9</sup> 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 پهناهی 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 بولتزمون به عنوان یک جایگزین مناسب برای روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی میدان جریان پدیدار شده است. در روش شبکه بولتزمون، حرکت سیال توسط مجموعه‌ای از توابع توزیع شرح داده می‌شود. براساس عملکر برحور ساده و معروف بی-جی-کا [28]، معادله استاندارد شبکه بولتزمون با ترم نیرو را به صورت زیر می‌توان بیان

شکل<sup>1</sup>، جریان داخل دو کانال هم‌محور<sup>2</sup> و جریان هندسه متقطع<sup>3</sup>. 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 ترسن 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<sup>4</sup> در پیکربندی‌های مختلف را شرح دادند. گویلت و کولین [3] به صورت آزمایشگاهی به بررسی تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل پرداختند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها نشان داد که، متغیرهای فیزیکی از جمله دبی فازهای پیوسته و گستته، ویسکوزیته سیال، هندسه، فعل و انفعال بین کشش سطحی و نیروی ویسکوز بر روی تشکیل قطره تاثیر می‌گذارد. ژو و همکاران [4]، تشکیل میکروحبای‌های هوا که به‌وسیله 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 گستته، منجر با تشکیل قطرات با حجم‌های کمتر در اتصال تی‌شکل می‌گردد. ژو و همکاران [5] تشکیل قطره در میکروکانال تی‌شکل را بررسی نمودند. آن‌ها با توجه به مشاهدات خود، براساس عدد کاپیلاری فاز پیوسته آزمایشگاهی جریان مختلف را طبقه‌بندی نمودند. اویشی و همکاران [6] مکانیزم تولید حباب را در اتصال تی‌شکل با استفاده از دستگاه سرعت سنج تصویر ذرات میکرو بررسی کردند و دریافتند، نسبت سرعت تاثیر به سازی در سیستم‌های میکرو سیالی در سیستم‌های پارامترهای تاثیرگذار در میکروسیالی پرداختند. ژو 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. ژو و همکاران [8] به صورت 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 به عنوان سیال مورد تست گیری 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] به صورت آزمایشگاهی افت فشار جریان اسلام دوفازی آب و هوا در میکروکانال‌های دایروی تی‌شکل و تاثیر تغییر اندازه ابعاد کanal بر روی افت فشار با جزئیات بحث و بررسی نمودند.

در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمون پتانسیل بالای خود را در شبیه‌سازی جریان در بازه گسترده‌ای از کازبردهای مهندسی از جمله: محیط متخلخل [10]، سیالات غیرنیوتی [11,12]، میدان مغناطیسی [13]، جریان‌های دوفازی [14,15] و غیره را نشان داده است. این روش یک روش شبکه مولکولی براساس مدل‌های معادلات جنبشی در سطح میکرو و مزو می‌باشد که تابع توزیع مجموعه مولکول‌ها را ردیابی می‌کند [16,17]. در مجموع چهار روش عده برای روش شبکه بولتزمون وجود دارد که می‌تواند جریان دوفازی را شبیه‌سازی نمایند. از جمله: مدل کرومودینامیک<sup>5</sup> [18]، شبکه پتانسیل (به این روش، شان-چن هم می‌گویند) [19]، مدل‌های براساس نیروهای بر هم‌کنش بین مولکولی<sup>6</sup> [20] و

<sup>1</sup>T-Junction

<sup>2</sup>Co-Flowing

<sup>3</sup>Cross-Junction

<sup>4</sup>Pressure Driven-Flow

<sup>5</sup>Chromo-dynamic

<sup>6</sup>Intermolecular Interaction

<sup>7</sup>Free Energy  
<sup>8</sup>Bhatnagar-Gross-Krook (BGK)  
<sup>9</sup>Contact Angle

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

مقدار  $C_0$  در رابطه (10) برابر با یک است. در این مقاله، از معادله حالت پنگ-راپینسون<sup>2</sup> استفاده شده است. این معادله حالت به صورت 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،  $b = 0.0778RT_c/P_c$  و  $a = 0.45724(RT_c)^2/P_c$  می‌باشند. و  $T_c$ ، به ترتیب، دمای بحرانی و فشار بحرانی می‌باشند. در این تحقیق مقادیر  $a$  و  $R$  طبق مرجع [31] به ترتیب،  $2/21$  و  $1$  در نظر گرفته شده‌اند. از این‌رو، مقادیر دمای بحرانی و فشار بحرانی به ترتیب،  $0.0729$  و  $0.0595$  به دست می‌آید. همچنین  $\alpha(T)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود [31]:

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

که  $\omega$  ضریب خروج از مرکزی<sup>3</sup> می‌باشد.

به طور مشابه، نیروی فعل و انفعال بین سیال و جامد به صورت زیر می‌تواند بیان شود [29]:

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

نمایش دهنده قدرت فعل و انفعال بین جامد و سیال می‌باشد که شرایط ترشوندگی<sup>4</sup> سطح جامد را مشخص می‌کند. برای یک سیستم سیال دوجزئی، زمانی که  $G_{1s} - G_{2s} < 0$  باشد، جزء یک به عنوان فاز ترشونده و جزء دو به عنوان فاز ترشونده<sup>5</sup> مدل‌سازی می‌شود.تابع اسکالار  $(x)$  اگر متغیر  $x$  در سیال باشد برابر صفر و اگر بر روی سطح جامد باشد برابر یک می‌باشد. چگونگی به کارگیری نیروی کل (معادله (3)) در چارچوب روش شبکه بولتزمن در پایداری و دقت مدل شبه پتانسیل بسیار حائز اهمیت است. سه طرح برای به کارگیری نیرو وجود دارد که شامل: طرح نیروی شان-چن [20]. طرح اختلاف دقیق<sup>6</sup> [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 معادله (1) به صورت رابطه (14) محاسبه می‌شود:

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

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

$$u_p = u^{\text{eq}} = u + \frac{1}{2\rho} F \delta t \quad (15)$$

### 3-مدل‌سازی عددی

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

نمود:

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

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

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

$\vartheta^\sigma$  تابع توزیع تعادلی می‌باشد که به صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود:

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

$w_i$  و  $e_i$  به ترتیب، ضرایب وزنی و سرعت میکروسکوپیک هستند. برای مدل دو بعدی و ۹ سرعته<sup>1</sup> مقادیر زیر را دارا هستند:

$$w_0=4/9, \omega_i=1/9 \quad (i=1, 2, 3, 4), \omega_i=1/36 \quad (i=5, 6, 7, 8) \quad (4)$$

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

چگالی سیال جزء  $\sigma$ -ام و سرعت سیال جزء  $\sigma$ -ام از رابطه زیر به دست 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 ( $F^\sigma$ ) که بر ذره سیال در جریان چند فازی اعمال می‌شود شامل نیروی سیال-سیال ( $F_f^\sigma$ )، نیروی سیال-جامد ( $F_s^\sigma$ ) و غیره می‌باشد، یعنی [29]:

$$F^\sigma = F_f^\sigma + F_s^\sigma \dots \quad (8)$$

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

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

نمایش دهنده قدرت فعل و انفعال بین‌مولکولی بین اجزای مختلف سیال می‌باشد. ۱/۴ 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 به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$D_2 Q_9$$

<sup>2</sup>Peng-Robinson Equation of state

<sup>3</sup>Acentric Factor

<sup>4</sup>Wetting Condition

<sup>5</sup>Non Wetting

<sup>6</sup>Exact Difference

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

#### 4-1-قانون لابلس

قانون لابلس 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 دو بعدی 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 دو بعدی) بر اثر نیروهای کشش سطحی برقرار می‌باشد.

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

در رابطه فوق  $\gamma$  ضریب کشش سطحی و  $R$  شعاع قطره است. برای شبیه‌سازی این مسئله از میدان شبکه  $200 \times 200$  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 اندازه‌های مختلف شعاع قطره به صورت تابعی از معکوس شعاع نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود قانون لابلس ارضاء می‌گردد و شبیه‌سازی تغییر خطی تغییر نماید.

#### 4-2-زاویه 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 زاویه تماس، می‌توان از معادله یانگ به صورت رابطه (17) استفاده نمود [36].

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

$\sigma_{s1}$  و  $\sigma_{s2}$  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  $G_{1s}$ ,  $G_{12}$  و  $G_{2s}$  ارائه نمودند:

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

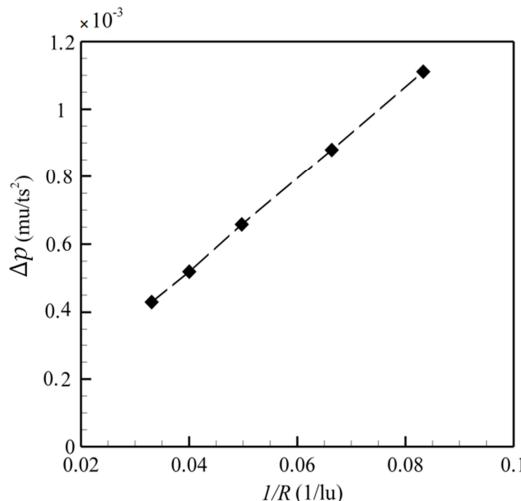


Fig. 2 Laplace test

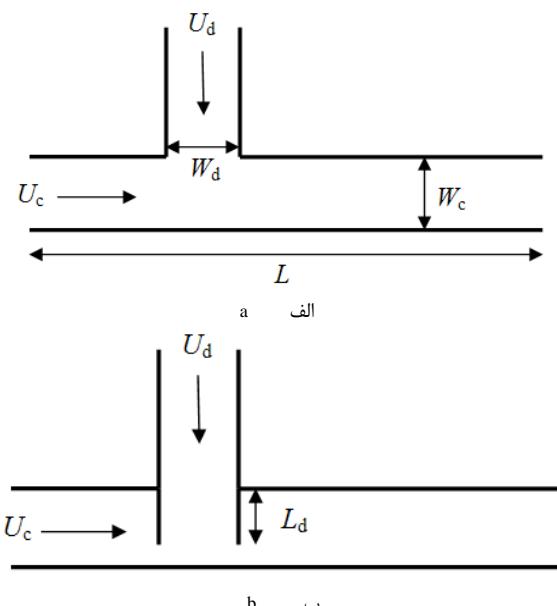
شکل 2 آزمایش لابلس

و اصلاح شده (شکل 1(b)) نشان داده شده است. مقادیر سرعت برای فاز پیوسته در ورودی  $U_c$  و برای فاز گیسته  $U_d$  مرز در نظر گرفته شده است. شرط مرزی سرعت معلوم برای ورودی‌های کانال و شرط توسعه یافته‌یگی برای خروجی به کار می‌رود. سرعت در دیواره‌های بالا و پائین مطابق با شرط عدم لغزش و با روش پرشن به عقب<sup>1</sup> مدل شده است.

در میکروکانال‌های تی‌شکل، پارامترهای فیزیکی مهم چگالی ( $\rho_d$  و  $\rho_c$ )، ویسکوزیته ( $\mu_d$  و  $\mu_c$ )، پهنای کانال ( $W_c$ ) و ( $W_d$ )، سرعت ورودی فازها ( $U_c$  و  $U_d$ )، کشش سطحی بین دو فاز ( $\gamma$ ) و زاویه تماس می‌باشد. زیرنویس‌های  $(\omega_d)$  به ترتیب، بیان‌کننده فاز پیوسته و فاز گیسته می‌باشند. با استفاده از آنالیز ابعادی، اعداد بی بعد حاکم عبارتند از: نسبت چگالی ( $\rho_d/\rho_c$ )، نسبت ویسکوزیته ( $\mu_d/\mu_c$ )، نسبت دبی ( $Q_d/Q_c$ )، نسبت پهنا ( $W_d/W_c$ )، 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 ( $Ca = \mu_c U_d / \gamma$ ) می‌باشد. پارامتر طول بی بعد فاز گیسته تماس بین قطره با سطح جامد می‌باشد. همچنین با توجه به اصلاح پیشنهاد شده بر روی میکروکانال تی‌شکل، پارامتر طول بی بعد فاز گیسته  $(\beta = L_d/W_c)$  نیز مهم می‌باشد. کوئین و لاول [34] و تایس و همکاران [35]، به ترتیب، 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.

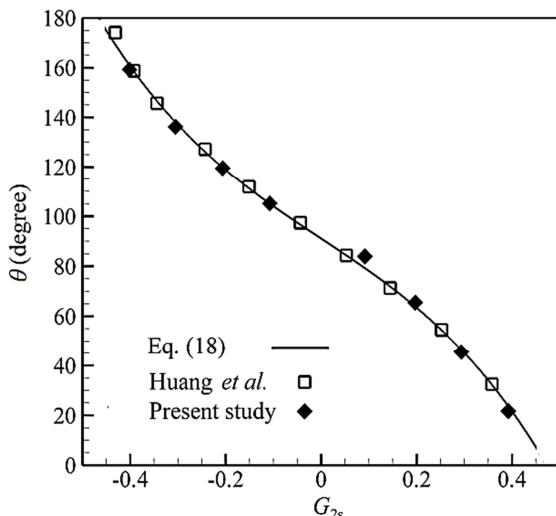
#### 4-بررسی اعتبارسنجی و صحت کد کامپیوتوری

از آن‌جا که مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بخش تحلیل جریان‌های چندفازی

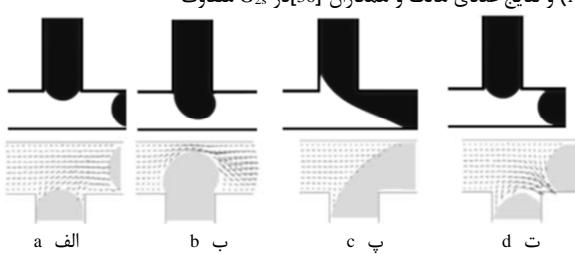


شکل 1 نمایی شماتیک از میکروکانال دو بعدی (الف: تی‌شکل معمولی و ب: تی‌شکل اصلاح شده)

<sup>1</sup>Bounce Back



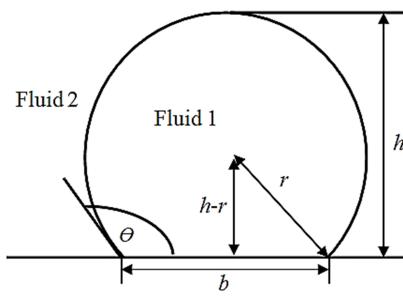
شکل 5 مقایسه زوایای تماس حاصل از نتایج شبیه‌سازی حاضر با رابطه تحلیلی (18) و نتایج عددی هانگ و همکاران [36] در  $G_{2s}$  مختلف



شکل 6 مقایسه بین نتایج عدد حاضر (دیف بالا) با نتایج آزمایشگاهی ون استجن و همکاران [37] (دیف پائین)

اصلی نفوذ پیدا می‌کند. در این حالت، چون نیروی درگ اصطکاکی ناشی از تنفس برشی به اندازه کافی قوی نیست تا بر نیروی کشش سطحی غلبه کند، فاز گسته تمام عرض کانال را اشغال نموده و مانع حرکت فاز پیوسته می‌شود و فشار وارد بر پشت فاز گسته افزایش می‌یابد. در نتیجه اختلاف فشار بین پشت و جلوی فاز گسته، فاز گسته شروع به بزرگ شدن می‌نماید و به پائین دست جریان کشیده می‌شود. گردن<sup>1</sup> فاز گسته باریکتر می‌شود. در نهایت نیروی فشاری بر نیروی کشش سطحی غلبه می‌کند و قطره از لبه تیز قسمت تی شکل جدا می‌شود. به این نوع رژیم جریان، در اصطلاح، رژیم جریان فشرده‌گی<sup>2</sup> می‌گویند.

شکل 7 "تأثیر عدد کاپیلاری بر روی رژیم جریان برای نسبت دبی<sup>3</sup> نسبت پهنا 0.5 و زوایه تماس<sup>0</sup> 170 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل 7 مشخص است، سه نوع رژیم جریان آرام<sup>3</sup> (شکل 7 (الف)), فواره‌ای<sup>4</sup> (شکل 7 (ب)) و فشرده‌گی (شکل 7 (پ)) مشاهده می‌شود. به طور کلی در فرآیند تغییر شکل قطره و تشکیل قطره، سه نیرو عبارتند از: نیروی کشش سطحی، نیروی درگ اصطکاکی و نیروی فشاری تأثیرگذار می‌باشند. در رژیم جریان آرام، نیروی کشش سطحی زیاد بوده به طوری که نیروی درگ اصطکاکی و نیروی فشاری نمی‌توانند بر آن غلبه کنند. از این‌رو، شکست قطره اتفاق نمی‌افتد و



شکل 3 زاویه تماس

برای محاسبه زاویه تماس مابین قطره و سطح جامد، قطره‌ای به صورت نیم‌دایره با قطر 25 واحد شبکه بولتزمن را در داخل دامنه محاسباتی (بالا و پائین، دیوار و سمت چپ و راست، پریویدیک) به ابعاد 80×80 بر روی دیوار پائینی قرار می‌دهیم. با تغییر دادن مقادیر قدرت فل و انفعال بین جامد و سیال ( $G_{1s}$ ) و بعد از 30000 گام زمانی که میدان به حالت پایا رسید، می‌توان زاویه تماس را با استفاده از پارامترهای هندسی مسئله و جایگذاری در معادله (19) [32] محاسبه نمود.

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

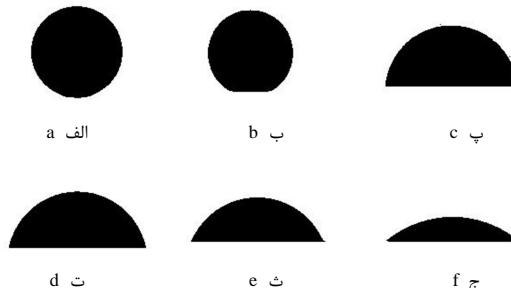
در این رابطه مقدار  $r=h/2+b^2/8h$  می‌باشد.

"شکل 4" 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 تثویری و عددی همخوانی خوبی دارند.

## 5-نتایج و بحث

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

"شکل 6" مقایسه بین نتایج عددی حاضر با کار آزمایشگاهی ون استجن و همکاران [37] در فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی شکل را نشان می‌دهد. 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 گسته در داخل کانال



شکل 4 زاویه تماس‌های مختلف (الف:  $\theta = 170^\circ$ , ب:  $\theta = 150^\circ$ , س:  $\theta = 120^\circ$ , د:  $\theta = 90^\circ$ , پ:  $\theta = 60^\circ$  و ج:  $\theta = 30^\circ$ )

(ث:  $\theta = 90^\circ$ , د:  $\theta = 60^\circ$  و ج:  $\theta = 30^\circ$ )

<sup>1</sup> Neck

<sup>2</sup> Squeezing

<sup>3</sup> Laminar

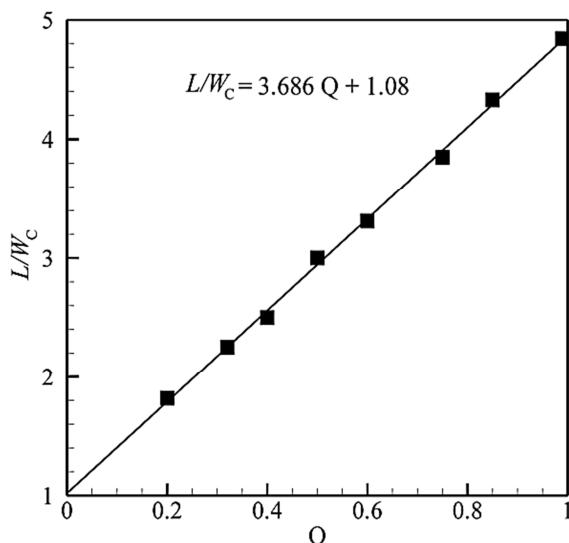
<sup>4</sup> Jetting

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

$$\frac{L}{W_c} = \varepsilon + \alpha Q \quad (20)$$

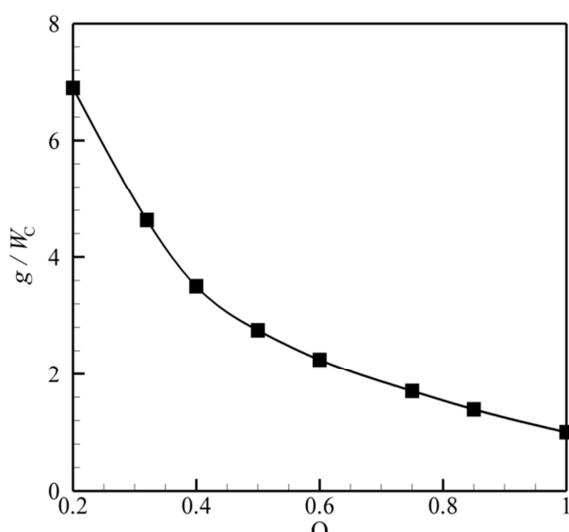
$\varepsilon$  و  $\alpha$  مقادیر ثابتی هستند که به هندسه میکروکانال وابسته می‌باشند و از برآش منحنی به دست می‌آیند. "شکل 9" تغییرات طول قطره شکل گرفته به پهنای کانال بر حسب نسبت دبی برای شرایط در نظر گرفته در "شکل 7" را نشان می‌دهد. مقادیر  $\alpha$  و  $\varepsilon$  به ترتیب، 3.686 و 1.08 به دست می‌آیند.

"شکل 10" نسبت دبی در رژیم جریان فشردگی برای برای شرایط در نظر گرفته در "شکل 8" را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش دبی، فاصله بین قطرات کاهش می‌یابد.



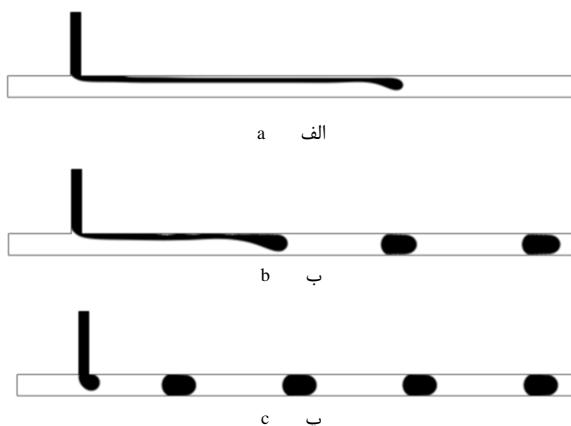
شکل 9 نormalized length of droplets versus the flow rate ratio at a fixed  $Ca = 0.00054$

Ca=0.00054



شکل 10 نormalized distance between droplets versus the flow rate ratio at a fixed  $Ca = 0.00054$

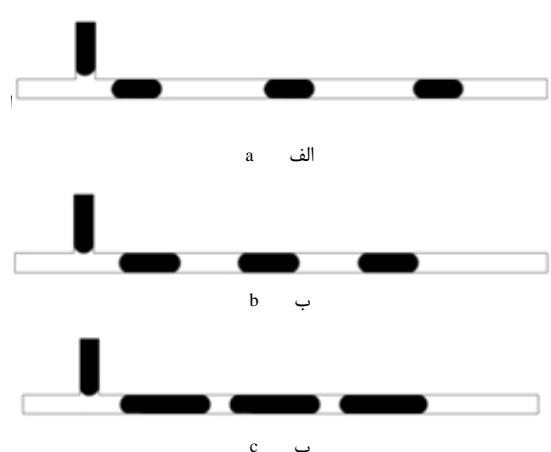
Ca=0.00054



شکل 7 تاثیر عدد کاپیلاری بر روی رژیم جریان برای نسبت دبی ۳ نسبت پهنا ۰.۵ و زاویه تماس  $170^0$  (الف:  $Ca=0.089$  و پ:  $Ca=0.0163$  و  $Ca=0.0054$ )

فاز گسسته با ضخامت کمتر از فاز پیوسته و موازی با کانال اصلی حرکت می‌کند. در رژیم جریان فواره‌ای، نیروی درگ اصطکاکی نقش اساسی را بازی می‌کند و از نیروی فشاری، در مقایسه با نیروهای کشش سطحی می‌توان صرف نظر نمود. در این رژیم، جدایش قطره در پائین دست اتصال تی شکل اتفاق می‌افتد. در رژیم جریان فشردگی، نیروی فشاری نقش اساسی را ایفا می‌کند. شکست قطرات در محل اتصال تی شکل افقی می‌افتد. قسمت جلویی فار گسسته کل کانال اصلی در محل اتصال را مسدود می‌کند و مانع حرکت فاز پیوسته می‌شود. فاز گسسته به فاز گسسته شدن 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، زاویه تماس  $170^0$  و نسبت پهنا 1 انجام شده است. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، با افزایش نسبت دبی، اندازه قطرات افزایش می‌یابد در حالی که فاصله بین قطرات تشکیل شده، کاهش می‌یابد.



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

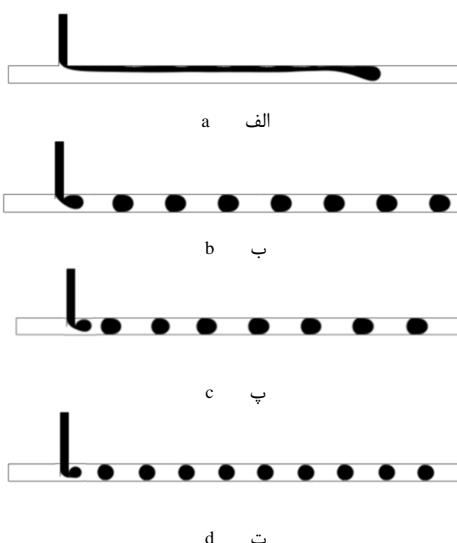
شکل 8 تاثیر دبی در رژیم فشردگی برای عدد کاپیلاری 0.00054، زاویه تماس  $170^0$  و نسبت پهنا 1 (الف:  $Q=0.32$ ، ب:  $Q=0.5$  و پ:  $Q=1$ )

عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3.2 و نسبت پهنه‌ای 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°  
(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  $170^\circ$  را نشان می‌دهد. همان‌طور که در "شکل 13" می-بینیم 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 میکروکانال‌های تی-  
شکل معمولی و اصلاح شده برای عدد کاپیلاری ۰.۰۰۵، نسبت دبی ۳، نسبت  
پهنای ۰.۵ و زاویه تماس<sup>۰</sup> ۱۷۰ را نشان می‌دهد. در "شکل 14" برای  
میکروکانال تی-شکل معمولی رژیم جریان از نوع فشردگی می‌باشد. با افزایش  
 $\beta$  اندازه قطرات کاهش می‌یابد بهطوری که برای حالت  $\beta=0.75$  (شکل  
۱۴(ت)). رژیم جریان به رژیم چکه کردن تغییر می‌یابد. در واقع، برای  
قطرات تشکیل شده بهصورت دایره بوده و هیچ تماسی با جدار کانال  
اصلی ندارند. در صنایع شیمیایی در سیاری از موارد نیاز است تا یک سیال  
خورنده (از قبیل انواع اسیدها) را از طریق کانال‌ها انتقال دهیم، از آن جا که  
در سیاری از بخش‌های صنعتی لوله‌های فلزی مورد استفاده قرار می‌گیرند،  
سیالات خورنده باعث خوردگی لوله می‌شوند، لذا به فرآیندی نیاز است تا  
سیال خورنده در طی انتقال از طریق کانال‌ها جدا شوند: تماس دادن نکند.

بر حسب طول بی بعد فاز گستته و فاصله بی بعد مابین قطرات تولید شده در "شکل 14" را نشان می دهد. ملاحظه می شود که اندازه قطرات تولید شده بر حسب طول بی بعد فاز گستته برای پارامترهای بی بعد در نظر گرفته شده

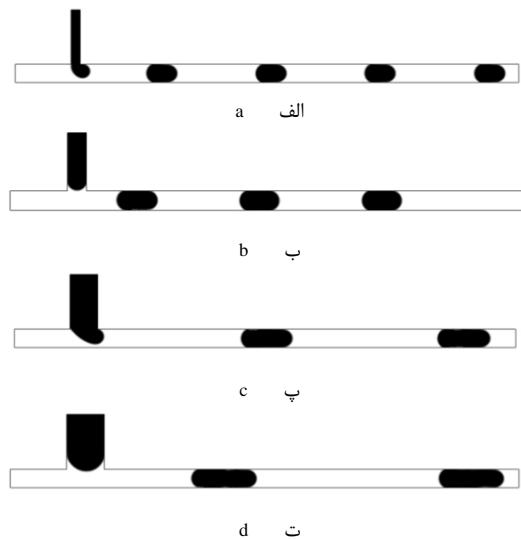


**Fig. 13** Flow pattern in ordinary T-channel and modifiedT-channelsat  $Ca=0.00814$ ,  $Q=2$ ,  $W=0.5$  and  $\theta = 170^{\circ}$  (a:  $\beta = 0$ , b:  $\beta = 0.25$ ,  $\beta = 0.5$  and  $\beta = 0.75$ )

شكل 13 الگوی جریان در میکروکانال‌های معمولی و اصلاح شده در 14،  $Ca = 0.00814$ ،  $\theta = 170^\circ$ ،  $W = 0.5$ ،  $Q = 2$ ،  $\beta = 0.25$ ،  $\beta_p = 0.5$  و  $\beta_t = 0.75$  (الف:  $\beta = \beta_p$ ، ب:  $\beta = \beta_t$ )

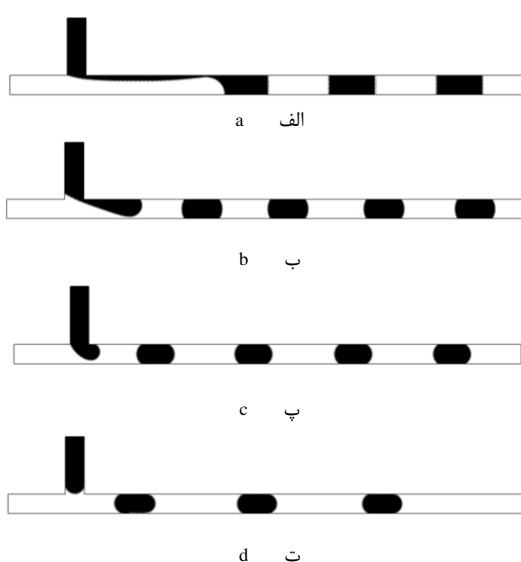
"شکل 11" اثر تغییر نسبت پهنا بر روی اندازه قطرات تشکیل شده را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها در عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3 و زاویه‌ی تماس<sup>0</sup> 170 برای چهار نسبت پهناهای 0.5، 1، 1.5 و 2 انجام شده است. مشاهده می‌شود که پهناهی کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آن‌ها اثر می‌گذارد. در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

زاویه‌ی تماس مابین قطره و سطح جامد، نقش مهمی را در فرآیند تشکیل قطره به خصوص 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  $\text{Ca}=0.0054$ ,  $Q=3$  and  $\theta = 170^\circ$  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 عدد کاپیلاری 0.0054، سمت راست و امیدهای تماس  $W_1=0.5$ ,  $W_2=1$ ,  $W_3=1.5$ ,  $W_4=2$  (الف:  $\theta=0^\circ$ )



**Fig. 12** The droplet formation at  $\text{Ca}=0.0054$ ,  $Q=3.2$  and  $W=1$  for four different width ratios (a:  $\theta = 90^\circ$ , b:  $\theta = 120^\circ$ , c:  $\theta = 150^\circ$  and d:  $\theta = 170^\circ$ )

**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:  $\theta = 90^\circ$ ، ب:  $\theta = 120^\circ$ ، گ:  $\theta = 150^\circ$ ، د:  $\theta = 170^\circ$ )

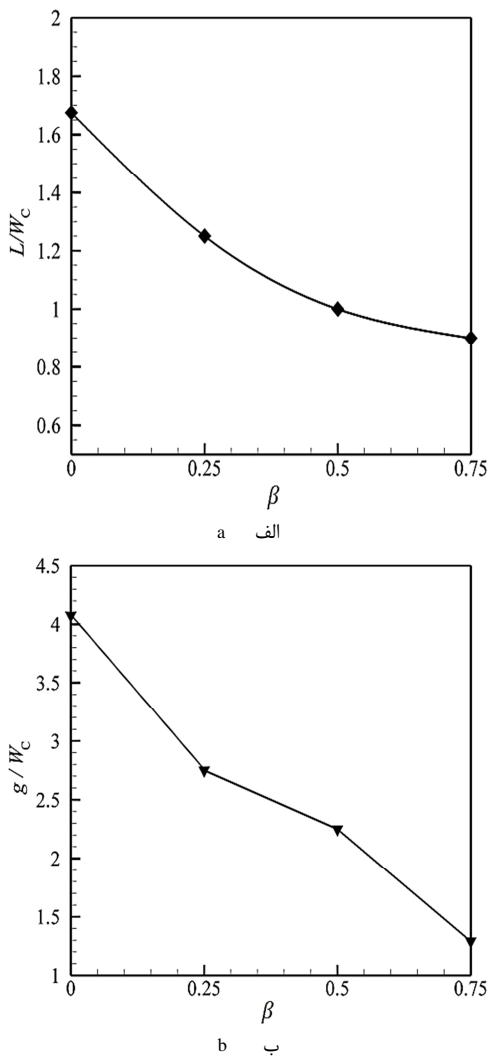


Fig. 15 a: Normalized length of droplets versus  $\beta$  and b: Normalized distance between droplets of droplets versus  $\beta$

شکل 15 الف: اندازه بی بعد قطرات تولید شده برحسب طول بی بعد فاز گستته و ب: اندازه بی بعد مابین قطرات تولید شده برحسب طول بی بعد فاز گستته

- پهنهای کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آنها اثر می‌گذارد. در واقع با افزایش نسبت پهنهای، اندازه قطرات و فاصله مابین آنها افزایش می‌یابد در حالی که تعداد قطرات تولید شده کاهش می‌یابد، - در رژیم جریان فشرده‌گی و در عدد کاپیلاری و دی تاب، 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 تی-شکل اصلاح شده، قطرات با اندازه‌های کوچکتر، با فاصله مابین قطرات کمتر و تعداد بیشتر را نسبت به میکروکانال تی-شکل معمولی تولید می‌کند. 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.

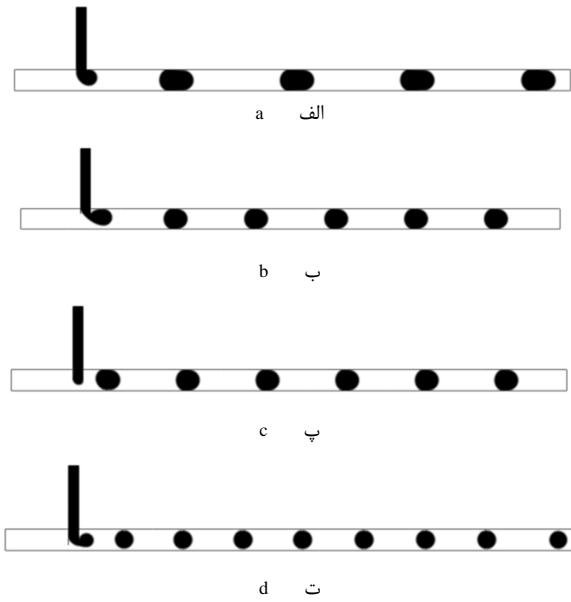


Fig. 14 Flow pattern in ordinary T-channel and modified T-channels at  $Ca=0.005$ ,  $Q=3$ ,  $W=0.5$  and  $\theta = 170^\circ$ : (a:  $\beta = 0$ , b:  $\beta = 0.25$ , c:  $\beta = 0.5$  and d:  $\beta = 0.75$ )

شکل 14 الگوی جریان در میکروکانال‌های معمولی و اصلاح شده در  $Q=3$ ,  $Ca=0.005$ ,  $\theta = 170^\circ$  (الف:  $\beta = 0$ , ب:  $\beta = 0.25$ , پ:  $\beta = 0.5$  و ت:  $\beta = 0.75$ ,  $W=0.5$ )

و فاصله بی بعد مابین قطرات تولید شده در میکروکانال تی-شکل معمولی بزرگ‌تر از سایر موارد می‌باشد، که مشخص می‌کند نیروی برشی اعمال شده به فاز گستته از بقیه موارد کمتر می‌باشد. با افزایش طول بی بعد فاز گستته، نیروی برشی وارد بر فاز گستته بیشتر شده و قطرات ریزتر با فواصل کمتر تولید می‌شود. در بعضی از صنایع داروسازی نیاز است که ذراتی با اندازه‌های کوچک و یکسان و به تعداد زیاد تولید شوند. از شکل مشخص است که برای  $\beta=0.5$  اندازه قطره تقریباً برابر پهنهای کانال می‌باشد و برای  $\beta=0.75$  اندازه قطره حتی از پهنهای کانال اصلی کمتر می‌باشد. این شکل‌ها، بوضوح نشان می‌دهند که بهترین حالت طراحی برای تولید قطرات با اندازه‌های کوچک و یکسان و به تعداد زیاد، حالت  $\beta=0.75$  می‌باشد.

## 6- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش شبکه بولتمن با مدل شبیه‌سازی-پتانسیل برای شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطره در یک میکروکانال دو بعدی تی-شکل معمولی و اصلاح شده استفاده شده است. اعتبار کد موردنظر با دو تست دوفازی معروف آزمایش لایپلاس و زاویه‌ی تماس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی تشکیل قطره در میکروکانال تی-شکل معمولی با نتایج آزمایشگاهی بهطور کیفی موردنیاز مقایسه قرار گرفته و نتایج بیانگر این مطلب است که مدل عددی مورد استفاده به خوبی قادر به پیش‌بینی رفتار جریان در این گونه کانال‌ها می‌باشد. اثر تغییر عدد کاپیلاری، نسبت دبی، نسبت پهنهای دو فاز و زاویه‌ی تماس بین قطره با سطح حامد 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 فشرده‌شده، مشاهده شد،
- در رژیم جریان فشرده‌گی و در یک عدد کاپیلاری ثابت، با افزایش نسبت دبی، اندازه قطرات افزایش و فاصله بین تشکیل قطرات کاهش می‌یابد،

- 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 of geometry on droplet formation in the squeezing regime in a microfluidic T-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 Persian) (فارسی)
- [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,  $\mu$ -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.
- [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 inter-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, *Chemical 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 Persian) (فارسی)
- [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 Persian) (فارسی)
- [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 Persian) (فارسی)
- [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 Persian) (فارسی)
- [15]S. M. Khatoonabadi, M. Ashrafihaadeh, 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 Persian) (فارسی)
- [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