ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

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

# $^{*2}$ کيوان فلاح $^{1}$ ، محمد طيبي رهني

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

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

\* تھران، صندوق پستىtaeibi@sharif.edu ،113658639

چکیدہ	اطلاعات مقاله
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	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 16 تیر 1395 پذیرش: 31 مرداد 1395 ارائه در سایت: 18 مهر 1395
حاصر توافق حوبی با تتایج عددی و ازمایشگاهی محققان پیشین دارد. در این تحقیق اتر تعییرات پارامترهای کوناکون 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	<i>کلید واژگان:</i> جریان چندفازی شبکه بولتزمن مدل شبه- پتانسیل میکروکانال
هندسه کانال به شدت حساس میباشند. همچنین، روش شبکه بولتزمن با مدل شبه-پتانسیل در شبیهسازی تشکیل قطره در میکروکانل.ها مناسب میباشد.	تشكيل قطره

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

### Kayvan Fallah<sup>1</sup>, Mohammad Taeibi Rahni<sup>\*2</sup>

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	Abstract
Original Research Paper Received 06 July 2016 Accepted 21 August 2016 Available Online 09 October 2016	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
Keywords: Multiphase Flow Lattice Boltzmann Method Pseudo Potential Model Microchannel Drop Formation	the present results have good agreement with previous numerical and experimental data. The effect various parameters including Capillary number, flow rate ratio, width ratio, and drop contact angle the width of the drop and on the distance between drops for ordinary and modified T-junc microchannels are investigated in detail. The results reveal that by simple modifications to the ordin T-junction, smaller drops and lower distances between them are generated in the comparison ordinary T-junction geometry under the same conditions. On the other hand, this study demonstrate the multiphase flows in micro-devices are very sensitive to even small changes in the charge geometry. It also indicates that Lattice Boltzmann method with Pseudo-Potential model is an effect numerical technique to simulate the generation of drops in microchannels.

#### 1-مقدمه

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-

جریآنهای 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

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

Please cite this article using:

<sup>1</sup>T-Junction

<sup>2</sup>Co-Flowing

مدل انرژی آزاد [21]. مدل شبه پتانسیل به دلیل سادگی و قابلیت تطابق

جریان چند فازی مخلوط نشدنی در میکروکانالهای متقاطع پرداختند. آنها

بامدل 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 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 تی شکل در اعداد کاپیلاری پائین و دبی های حجمی متفاوت فاز پیوسته و گسسته

شبیه سازی نمودند. یانگیومین و همکاران [24] به شبیهسازی دو سیال

مخلوط نشدنی در اتصال تی شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند و پنچ الگوی جریان متفاوت را پیش بینی نمودند. ریود و همکاران [25] یک

روش شبکه بولتزمن جدید که براساس ترکیب روش رنگی و روش شبه پتانسیل می اشد، برای شبیه سازی جریان های دو فازی در میکروکانال ها

توسعه دادند و روش عددی پیشنهادی خود را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه

وو و همكاران [22] با استفاده از روش شبكه بولتزمن به شبیه سازی

خوب، پرکاربردترین مدل چند فازی در روش شبکه بولتزمن میباشد.

شکل<sup>1</sup>، جریان داخل دو کانال ه<sub>م</sub>محور<sup>2</sup> و جریان هندسه متقاطع<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 تی شکل بهوسیله تورسن و همكاران [1] انجام شده است، كه امولاسيون بين جريان 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 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 می گذارد. 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 تی شکل می گردد. زو و همکاران [5] تشکیل قطره در میکرو کانال تی شکل را بررسی نمودند. آنها با توجه به مشاهدات خود، براساس عدد كاپيلارى فاز پيوسته الگوى جريان مختلف را طبقه بندی نمودند. اویشی و همکاران [6] مکانیزم تولید حباب را در اتصال تی شکل 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] بەصورت آزمایشگاهی اثرات فشار بر روی ویژگیهای هیدرودینامیکی فازهای مایع و گاز در میکروکانال تی شکل را مورد بررسی قرار دادند. آنها نیتروژن و آب زدوده از یون را بهعنوان سیال مورد تست گیری خود انتخاب نمودند. آنها هفت نوع الگوی جریان را برای اتصال تی شکل 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 تی شکل 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 کازبردهای مهندسی از جمله: محیط متخلخل [01]، سیالات غیرنیوتنی [11]، میدان مغناطیسی [13]، جریآنهای 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<sup>5</sup> [18]، شبه پتانسیل (به این روش، شان-چن هم میگویند) [19]، مدلهای بر اساس نیروهای بر همکنش بین مولکولی<sup>6</sup> [02] و

بولتزمن، یک روش مناسب برای شبیه سازی سیالات غیرنیوتنی در میکروکانال ها می باشد. 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 حالی که 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 تی شکل معمولی و اصلاح شده در اثر برهمکنش دو سیال مخلوطنشدنی مورد استفاده قرار گرفته است. دقت مدل موردنظر توسط آزمایش لاپلاس، زاویه ی تماس<sup>9</sup> و تشکیل قطره در میکروکانال تی شکل معمولی مورد امتحان قرار گرفته است. فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال تی شکل معمولی و اصلاح شده با جزئیات توضیح داده می مود. اثرات تغییر عدد کاپیلاری، نسبت دبی، نسبت پهنای دو فاز و زاویه ی تماس بین قطره با سطح جامد بر روی طول قطره و فاصله مابین قطرات با جزئیات بررسی می شود. 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 شبیه سازی میدان جریان پدیدار شده است. در روش شبکه بولتزمن، حرکت سیال توسط مجموعهای از توابع توزیع شرح داده می شود. براساس عملگر برخورد ساده و معروف بی -جی -کا [28]، معادله استاندارد شبکه بولتزمن با ترم نیرو را به صورت زیر می توان بیان

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.44.5

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Cross-Junction <sup>4</sup> Pressure Driven-Flow

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Chromo-dynamic <sup>6</sup> Intermolecular Interaction

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Free Energy

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Bhatnagar–Gross–Krook (BGK)

<sup>9</sup> Contact Angle

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

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

 $\alpha(T) = [1 + (0.37464 + 1.5422\omega)]$ 

 $F_{s}^{\sigma}(\boldsymbol{x}) = -\psi^{\sigma}(\boldsymbol{x}) \sum G_{\sigma s} \omega_{i} \psi^{\sigma}(\boldsymbol{x} + e_{i} \delta t) e_{i}$ 

 $K_{i} = \left(\mathbf{1} - \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}\tau}\right) \omega_{i} \left(\frac{e_{i} - u^{\text{eq}}}{C_{c}^{2}} + \frac{e_{i}u^{\text{eq}}}{C_{c}^{4}}\right) \cdot F \ \delta t$ 

مقدرا  $C_0$  در رابطه (10) برابر با یک است. در این مقاله، از معادله حالت پنگ-رابینسون<sup>2</sup> استفاده شده است. این معادله حالت بهصورت زیر تعریف می-

در این رابطه، b = 0.0778RTc/Pc و a = 0.45724(RTc)<sup>2</sup>/Pc میباشند. Pc میباشند. و آر به ترتیب، دمای بحرانی و فشار بحرانی میباشند. در این تحقیق مقادیر

a، d و R طبق مرجع [31] به ترتيب، 2/49، 2/21 و 1 در نظر گرفته شدهاند. از b ،a

اینرو، مقادیر دمای بحرانی و فشار بحرانی به ترتیب، 0.0729 و 0.0595

بهدست می آید. همچنین (۵۲ به صورت زیر محاسبه می شود [31]:

که w ضریب خروج از مرکزی<sup>3</sup> میباشد.

 $-0.26992\omega^2)(1-\sqrt{T/T_c})]^2$ 

بهطور مشابه، نیروی فعل و انفعال بین سیال و جامد بهصورت زیر میتواند

نشان دهنده قدرت فعل و انفعال بین جامد و سیال میباشد که شرایط  $G_{\sigma s}$ 

ترشوندگی<sup>4</sup> سطح جامد را مشخص میکند. برای یک سیستم سیال دوجزئی، زمانی که  $\mathbf{0} > G_{1s} - G_{2s}$  باشد، جزء یک بهعنوان فاز ترشونده و جزء دو به عنوان فاز ترنشونده<sup>5</sup> 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 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 دقيق<sup>6</sup>[32] و طرح نيروى گو [33] مىباشد. در اين تحقيق از

طرح نيروى گو به دليل برترى كه نسبت به طرح نيروى شان-چن دارد،

استفاده شده است. در این طرح نیرو، ترم آخر معادلهی (1) به صورت رابطه

در این طرح نیرو، سرعت واقعی سیال و سرعت تعادلی در یک شکل بهصورت

در "شكل 1" نمايي شماتيك از ميكروكانال تي شكل معمولي (شكل 1 (الف))

نمود:

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

(10)

شود[31]:

(11)

(12)

(13)

بيان شود [29]:

(14) محاسبه می شود:

زير بيان مىشود:

3-مدلسازی عددی

(14)

(15)

که f<sup>a</sup>(x,t) تابع توزیع جزء σ-ام در جهت i-ام با سرعت e، در مکان x و زمان t میباشد. <sup>σ</sup> زمان آسایش جزء σ-ام است. ویسکوزیته جزء σ-ام توسط رابطه زیر به زمان آسایش جزء σ-ام مرتبط میشود:

$$\vartheta^{\sigma} = (\tau^{\sigma} - 0.5)/3 \tag{2}$$

تابع توزيع تعادلي ميباشد كه بهصورت رابطه (3) محاسبه مي شود:  $f^{eq}$ 

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

<sub>w</sub>i و <sub>i</sub>e، به ترتیب، ضرایب وزنی و سرعت میکروسکوپیک هستند. برای مدل دوبعدی و 9 سرعته<sup>1</sup> مقادیر زیر را دارا هستند:

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

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

$$\rho^{\sigma} = \sum_{i=0}^{8} f_i^{\sigma} \tag{6}$$

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

بطور کلی، نیروی کلی ( $F^{\sigma}$ ) که بر ذره سیال در جریان چند فازی اعمال می-شود شامل نیروی سیال-سیال ( $F_{f}^{\sigma}$ )، نیروی سیال-جامد ( $F_{s}^{\sigma}$ ) و غیره می-باشد، یعنی [29]:

$$F^{\sigma} = F_{\rm f}^{\sigma} + F_{\rm s}^{\sigma} \dots$$
(8)

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

$$F_{\rm f}^{\sigma}(\mathbf{x}) = -\psi^{\sigma}(\mathbf{x}) \sum_{\sigma} G_{\sigma\bar{\sigma}} \sum_{i} \omega_{i} \psi^{\sigma}(\mathbf{x} + e_{i} \delta t)$$
(9)

 $G_{\sigma\bar{\sigma}}$  نشان دهنده قدرت فعل و انفعال بینمولکولی بین اجزای مختلف سیال میباشد.  $\psi$ ، 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:

 $u_{\rm P} = u^{\rm eq} = u + \frac{1}{20}F \,\delta t$ 

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.44.5

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-06

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Peng-Robinson Equation of state

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Acentric Factor <sup>4</sup> Wetting Condition

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Non Wetting

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Exact Difference

و اصلاح شده (شکل 1(ب)) نشان داده شده است. مقادیر سرعت برای فاز . پیوسته در ورودی  $U_{
m c}$  و برای فاز گسسته  $U_{
m d}$  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<sup>1</sup> مدل شده است.

در میکروکانالهای تی شکل، پارامترهای فیزیکی مهم چگالی (او مر)، ویسکوزیته ( $\mu_{
m c}$  و  $\mu_{
m d}$ )، پهنای کانال ( $W_{
m c}$  و  $W_{
m d}$ )، سرعت ورودی فازها ( $U_{
m c}$  و کشش سطحی بین دو فاز  $(\gamma)$  و زاویهی تماس میباشد. زیرنویسهای  $(U_{\rm C}$ dgc، بهترتیب، بیانکننده فاز پیوسته و فاز گسسته میباشند. با استفاده از آنالیز ابعادی، اعداد بی بعد حاکم عبارتند از: نسبت چگالی ( $ho = 
ho_d / 
ho_c$ )، نسبت  $(W=W_d/W_c)$ ، نسبت  $(Q=Q_c/Q_d)$ ، نسبت  $(\mu=\mu_d/\mu_c)$ ، نسبت  $(\mu=\mu_d/\mu_c)$ عدد رینولدز ( $\operatorname{Re}=\rho_{c}U_{c}W_{c}/\mu_{c}$ ) عدد باند ( $\operatorname{Re}=\rho_{c}U_{c}W_{c}/\mu_{c}$ ) عدد عدد کاپیلاری فاز پیوسته (Ca= $\mu_c U_c / \gamma$ ) میباشد. پارامتر مهم دیگر، زاویهی تماس بین قطره با سطح جامد می باشد. همچنین با توجه به اصلاح پیشنهاد شده بر روی میکروکانال تی-شکل، پارامتر طول بیبعد فاز گسسته [35] نیز مهم میباشد. کوئین و لاول [34] و تایس و همکاران  $(\beta = L_d/W_c)$ 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 Tshaped and b: the modified T-shape)

شکل 1 نمایی شماتیک از میکروکانال دوبعدی (الف: تی شکل معمولی و ب: تی شکل اصلاح شدہ)

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

#### 4-1-قانون لايلاس

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 می شود و رابطه تحلیلی زیر، برای اختلاف فشار بین درون و بیرون یک قطره (در حالت دوبعدی) بر اثر نیروهای کشش سطحی برقرار می باشد.

$$\Delta P = \frac{\gamma}{R} \tag{16}$$

در رابطه فوق  $\gamma$  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 مىنمايد.

#### 4-2- زاویهی تماس

زمانی که یک قطره مخلوطنشدنی در تماس با یک سطح جامد قرار می گیرد، آن گاه میان سیال ترشونده، سیال ترنشونده و سطح جامد خط تماسی ایجاد می شود (شکل 3). برای تخمین زاویهی تماس، می توان از معادله یانگ بهصورت رابطه (17) استفاده نمود [36].

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\sigma_{12}} \tag{17}$$

و  $\sigma_{
m s2}$  و  $\sigma_{
m s2}$  به ترتیب کشش میان سیال یک با سطح جامد، کشش میان  $\sigma_{
m s2}$  ، $\sigma_{
m s1}$ سیال دو با سطح جامد و مقدار کشش سطحی میان سیال یک و سیال دو مىباشد.

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



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Bounce Back



**شکل 3** زاویهی تماس

برای محاسبه زاویه یتماس مابین قطره و سطح جامد، قطرهای به صورت 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 می دهیم. با تغییر دادن مقادیر قدرت فعل و انفعال بین جامد و سیال ( $G_{cs}$ ) و بعد از 30000 گام زمانی که میدان به حالت پایا رسید، می توان زاویه یتماس را با استفاده از پارامترهای هندسی مسئله و جای گذاری در معادله (19) [32]، محاسبه نمود.

$$\theta = \pi - \arctan\left[\frac{b}{2(r-h)}\right]$$
(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 می دهد. با تغییر مقادیر  $G_{1s}$  و  $G_{2s}$  میتوان به زوایای تماس مختلف دست یافت. در این تحقیق، برای سادگی از فرض  $G_{1s} = G_{2s}$  استفاده می شود. همان طور که می بینیم مقادیر تئوری و عددی هم خوانی خوبی دارند.

#### 5-نتايج 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 تی شکل را نشان می-دهد. همان طور 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  $(a:\theta = 170^{\circ}, b:\theta = 150^{\circ}, c:\theta = 120^{\circ}, d: \theta = 90^{\circ}, e: \theta = 60^{\circ}$  and f:  $\theta = 30^{\circ}$ )

 $\theta = (100^{\circ} + 100^{\circ})$  شکل 4 زاویهی تماسهای مختلف (الف:  $\theta = 170^{\circ} + 0^{\circ}$  ب:  $\theta = 150^{\circ} + 0^{\circ}$  (الف:  $\theta = 100^{\circ} + 0^{\circ}$ )  $\theta = 60^{\circ}$ .  $\theta = 90^{\circ}$ 



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 شبیه سازی 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 می کند. 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<sup>1</sup> فاز گسسته باریکتر میشود. در نهایت نیروی فشاری بر نیروی کشش سطحی غلبه می کند و قطره از لبهی تیز قسمت تی شکل جدا می شود. به این نوع رژیم جریان، در اصطلاح، رژیم جریان فشردگی<sup>2</sup> می گویند.

"شکل 7" تاثیر عدد کاپیلاری بر روی رژیم جریان برای نسبت دبی 3، نسبت پهنا 0.5 و زاویهی تماس<sup>1</sup>700 را نشان میدهد. همانطور که از شکل مشخص است، سه نوع رژیم جریان آرام<sup>3</sup> (شکل 7 (الف))، فوارهای<sup>4</sup> (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 نمی توانند بر آن غلبه کنند. از اینرو، شکست قطره اتفاق نمی افتد و

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Neck <sup>2</sup> Squeezing

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Laminar

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Jetting



Fig. 7 Effect of Caon the flow regime for Q=3, W=0.5 and  $\theta = 170^{\circ}$  (a: Ca=0.089, b: Ca=0.0163 and c: Ca=0.0054)

**شكل 7** تاثير عدد كاپيلارى بر روى رژيم جريان براى نسبت دبى 3، نسبت پهنا 0.5 و زاويەي تماس 170<sup>0</sup> (الف: Ca=0.089 ، ب: Ca=0.016 و پ: Ca=0.005)

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 <sup>10</sup>

"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<sup>0</sup> 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<sup>0</sup> 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  $^{00}$  10 و نسبت پهنا 1 (الف: 20.2-Q) ب: 30.2-Q و پ: 1(Q)

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

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

 $s \in \alpha$  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  $\alpha \in s$  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



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. شبیه سازی ها در عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3 و زاویه ی تماس 170<sup>0</sup> برای چهار نسبت پهنای 0.5، 1، 1.5 و 2 انجام شده است. مشاهده می شود که پهنای کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آن ها اثر می گذارد. در واقع با افزایش نسبت پهنا، اندازه قطرات و فاصله مابین آن ها افزایش می یابد در حالی که تعداد قطرات تولید شده کاهش می یابد.

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<sup>0</sup> 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 0.054، سبت (w=2, secold second secold second secold second secon



**Fig. 12** The droplet formation at 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 قطرہ در چھار زاویہ ی تماس متفاوت بین قطرہ با سطح جامد برای عدد کاپیلاری 0.0054 نسبت دبی 3.2 و نسبت پھنا 1 (الف:  $\theta = 90^{0} = \theta$ ، ب:  $\theta = 120^{0} = \theta_{0}$  ب:  $0.0054 = \theta_{0}$ 

عدد کاپیلاری 0.0054، نسبت دبی 3.2 و نسبت پهنای 1 را نشان می دهد. همان طور که از شکل پیداست، با افزایش زاویه یتماس، اندازه قطرات کاهش ولی فاصله بین قطرات افزایش می یابد. همچنین، در زاویه یتماس <sup>000</sup> (شکل 12(الف)) برخلاف زوایای تماس دیگر، تشکیل قطره در محل اتصال صورت نمی گیرد و شکست قطره کمی جلوتر و در قسمت بعد از اتصال صورت می گیرد.

"شكل 13" الگوی جریان تشكیل قطره در میكروكانالهای تی شكل معمولی و اصلاح شده برای عدد كاپیلاری 0.0084، نسبت دبی 2، نسبت پهنا 0.5 و زاویهی تماس 170<sup>0</sup> را نشان میدهد. همان طور كه در "شكل 13" می-بینیم برای میكروكانال معمولی رژیم جریان، از نوع آرام میباشد (شكل 12 (الف)) ولی با اصلاح پیشنهاد شده رژیم جریان به فشردگی (شكل 13 (ب) و شكل 13 (پ)) و سپس چكهكردن (شكل 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<sup>0</sup> را نشان میدهد. در "شکل 14" برای میکروکانال تیشکل معمولی رژیم جریان از نوع فشردگی میباشد. با افزایش  $\beta$  اندازه قطرات کاهش مییابد بهطوریکه برای حالت 7.50 $\beta$  (شکل 14(ت))، رژیم جریان به رژیم چکه کردن تغییر مییابد. در واقع، برای 5.50 $\beta$  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 (ز 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

"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 می شود که اندازه قطرات تولید شده



**Fig. 13** Flow pattern in ordinary T-channel and modifiedT-channelsatt Ca=0.00814 ,Q=2 ,W=0.5and $\theta$  = **170**<sup>0</sup> (a:  $\beta$  =0, b: $\beta$  = **0.25** ,  $\beta$  = **0.5** and $\beta$  = **0.75**)

**شکل1** الگوی جریان در میکروکانالهای معمولی و اصلاحشده در Ca=0.00814، Q=2، e= **0.75** و θ **= 170** (الف: β = **0.**2، پ: **5.9** م و ت: β = **0.75**.





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

شکل 14 الگوی جریان در میکروکانالهای معمولی و اصلاحشده در Ca=0.005، Ca=3، Ca=0.005 و Ca=0.005 و W=0.5 (β = 0.75 و T = 4 و T = 4 (β = 0.75 ) و W=0.5 (β = 0.75 ) و W=0.5 (β = 0.75 ) و Ca=0.75 (β = 0.75 ) (β

و فاصله بیبعد مابین قطرات تولید شده در میکروکانال تی شکل 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 0.5 = 3 اندازه قطره تقریبا برابر پهنای کانال میباشد و برای 7.05 هادازه 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 0.75 = 3

#### 6- نتیجه گیری

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 این گونه 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 می یابد،



Fig. 15 a: Normalized length of droplets versus β and b:Normalized distance between droplets of droplets versus β $\boldsymbol{\mu}$  $\boldsymbol{\mu}$ <

- پهنای کانال به شدت بر روی اندازه قطرات و فاصله مابین آنها اثر می گذارد. در واقع با افزایش نسبت پهنا، اندازه قطرات و فاصله مابین آنها افزایش می یابد در حالی که تعداد قطرات تولید شده کاهش می یابد، - در رژیم جریان فشردگی و در عدد کاپیلاری و دبی ثابت، با افزایش زاویه ی تماس، اندازه قطرات کاهش ولی فاصله بین قطرات افزایش می یابد. در ادامه، با انجام اصلاحی ساده بر روی میکروکانال تی - شکل معمولی نشان داده شد که تحت شرایط یکسان، میکروکانال تی - شکل معمولی نشان اندازههای کوچکتر، با فاصله مابین قطرات کمتر و تعداد بیشتر را نسبت به میکروکانال تی شکل معمولی تولید می کنند. نتایج حاضر، رویکرد جدیدی در طراحی و بهینه سازی تجهیزات میکرو را نشان می دهد.

#### 7- مراجع

- 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.

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 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,
- [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 multicomponent 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.

- [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 intjunction 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 Persian, فارسي)
- [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) (فارسى) (19) (in Persian)
- [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...)
- [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. 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 Persian, فارس)
- [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

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-06