

تشکیل قطره در میکرو کانال متقاطع، تحت تاثیر میدان الکتریکی با استفاده از روش شبکه بولتزمن تشکیل قطره، یکی از پدیدههای مهم در جریانهای چندفازی است و در بسیاری از پدیدههای طبیعی و صنعتی دیده می شود. همچنین، روش شبکه بولتزمن جزء روشهای کاربردی میباشد. در این پژوهش شبیه سازی شکل گیری قطره بوسیله ی روش شبکه بولتزمن و تحت تاثیر میدان الکتریکی برای یک میکروکانال متقاطع انجام شده است و از مدل دوفازی تابع مشخصه و برای اعمال میدان الکتریکی، از مدل لیکی دی-الکتریک استفاده شده است. از مدل های مختلف تکفاز و دوفاز برای صحت سنجی آن بهره گرفته شده است. نتایج نشان میدهد که اعمال میدان الکتریکی تاثیر مثبتی در تسـریع روند شـکل گیری قطرات دارد، با این کار قطرات تشکیل قطره کنترل شده است. آمده است که ایده ال میباشـد و بدین ترتیب

**صنم وزیری'** دانشجوی کارشناسی ارشد **محمد افتخاری یزدی'** استادیار

**آرمن آدامیان<sup>۳</sup>** استادیار

واژه هاى راهنما: تشكيل قطره، روش بولتزمن، ميدان الكتريكي، ميكروكانال متقاطع

## ۱– مقدمه

بررسی و تحلیل جریان دو فازی و چند فازی، یکی از مباحث روز بوده و پراکندگی یک سیال در مایعی مخلوط نشدنی، یک فرایند مهم در بسیاری از پروسههای صنعتی به شمار می رود؛ ازجمله در هواشناسی و مطالعات ژِئوفیزیک مثل تحقیقات روی برف و تگرگ و ذرات جامد در رودخانه ها، در علم ریاضیات و فیزیک کاربردی، در علم مهندسی شیمی مثل تقطیر، جذب، شناورسازی و خشک کردن پاششی، کاتالیزورها و محرکهای شیمیایی، در مطالعات بیولوژیکی مثل جریان ذرات داخل خون و بررسی تغییرات آنها و یا در علم مهندسی مکانیک مثل احتراق، سرمایش تبخیری، اتمیزاسیون، کاویتاسیون و... کاربردهای مختلفی دارند. برای جداسازی مایع از نفت در مخلوط آب – نفت؛ آب جداشده در غالب قطرات و نفت، به عنوان فاز پیوسته لحاظ میشود و این موضوع توجهات زیادی را در تکنولوژی بازیابی نفت به خود جلب کرده است[1]و[۲].

> <sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی sanam.vaziri85@gmail.com <sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی moh.eftekhari yazdi@iauctb.ac.ir <sup>۳</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی arm.adamian@iauctb.ac.ir تاریخ دریافت: ۵۰/۲۰/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۲۳

از اولین کارهای سی-اف-دی صورت گرفته در بحث هیدرودینامیک و تشکیل قطره در سیستمهای مایع- مایع میتوان به تحقیقات ریچارد<sup>۱</sup> و همکارانش (۱۹۹۵) رجوع نمود. در این تحقیقات، یک الگوریتم محاسباتی بر پایه وی- او- اف با به کارگیری شیوه سی- اس- اف<sup>۲</sup> برای وارد نمودن اثر تنش سطحی بین فازها در معادلات ناویر- استوکس تقارن محوری، برای تشکیل و شکست قطرات توسعه داده شده است. کارهای انجام شده در این زمینه و بوسیلهی روش شبکه بولتزمن بسیار محدود می باشند. واندر گراف و همکارانش (۲۰۰۵)، در یک توسعه داده شده است. کارهای انجام شده در این زمینه و بوسیلهی روش شبکه بولتزمن بسیار محدود می باشند. واندر گراف و همکارانش (۲۰۰۵)، در یک زمینه و بوسیلهی روش شبکه بولتزمن بسیار محدود می باشند. واندر گراف و همکارانش (۳) در سال (۲۰۰۵)، در یک تحقیق با روش شبکه بولتزمن، تشکیل قطره را در میکروکانالهای تی- شکل برای فرایند امولسیون و در غشاء بر روی سطح مرطوب، مدلسازی کرد. در این کار سیال از نازل وارد می شود و از روی سطح مرطوب کشیده می می در خشاء می گیرد.

در همان سال، زانگ جانفنگ [۴]، یک روش را برای اعمال مدل لتیس بولتزمن به مطالعات الکترو هیدرودینامیک ارائه کرد. طی تحقیقات او، یکسری شبیهسازیهای تشکیل قطره تحت تاثیر میدان الکتریکی صورت گرفته است و نتایج تطابق خوبی با سایر مطالعات تئوری و آزمایشگاهی دیگر دارد. این اولین مطالعه لتیس بولتزمن روی الکتروهیدرودینامیک ها بوده است و کار آنها نشان داد که لتیس بولتزمن، پتانسیل بالایی برای حل مسایل الکتروهیدرودینامیک پیچیده دارد. تازه ترین مشاهدات الکتروهیدرودینامیک به قرن هفدهم برای حل مسایل الکتروهیدرودینامیک پیچیده دارد. تازه ترین مشاهدات الکتروهیدرودینامیک به قرن هفدهم برمی گردد، که در آن گیلبرت<sup>۳</sup> نشان داد که قطره آب کروی که بر روی یک سطح خشک نشسته است، وقتی که یک کهربای باردارشده<sup>‡</sup>، در فاصله ای مشخص از بالای آن قرار گیرد، به شکل یک مخروط، تغییر شکل می دهد[۵]. کاربرد الکتروهیدرودینامیک در صنعت بسیار فراوان است؛ مثل پرینتر جت جوهر<sup>6</sup> ، طراحی الکتروستاتیک<sup>‡</sup>، جوشش<sup>9</sup> و بیوتکنولوژی [۶] و [۷]. تیلر بود که اولین بار مدل لیکی- دی الکتریک را معرفی کرد [۸] و [۵] و [۹]. در این مدل سیالاتی بررسی می شوند که رسانایی<sup>۸</sup> کمتری داشته باشند و زمانی که یک میدان الکتریکی اعمال می شود، بار الکتریکی آزاد<sup>ه</sup> فقط می تواند در ناحیه سطح مشترک سیال –سیال طاهر شود. این مدل در ایجاد نتایج کیفی و کمی دقیق شناخته شده است[۹] و [۱۰].

تراو و همکارانش این تئوری را به یک سطح مشترک قابل نفوذ<sup>۱۰</sup> بسط داده اند و پیش بینی هایشان را با آزمایشات مقایسه نمودهاند[۱۱]. در سال (۲۰۰۷) کینگ زینگ و همکارانش[۱۲] برای اثبات قابلیتهای روش دو فازی در مدلسازی مسایل دو فازی، تشکیل قطره را مدلسازی نمودند. در واقع در این تحقیق کینگ زینگ به راندمان بالای روش خود پرداخته بود و تکهای ازسیال را در معرض تشکیل قطره قرار داد. در سال (۲۰۱۰) نیز گنگ[۱۳] تشکیل قطره در فرآیند امولسیون را تحت تأثیر میدان الکتریکی حاکم بر جریان، با روش شبکه بولتزمن، مدلسازی کرد که در این زمینه جزء بهترین کارهای انجام شده است، او و همکارانش از مدل بین

- <sup>2</sup> Continuum Surface
- <sup>3</sup> Gilbert
- <sup>4</sup> rubbed amber
- <sup>5</sup> ink Jet Printing
- <sup>6</sup> Electrostatic Painting
- <sup>7</sup> Boiling
- <sup>8</sup> Conductivity
- <sup>9</sup> Free charge
- <sup>10</sup> Diffuse Interface

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Richard

مولکولی لتیس بولتزمن برای شبیه سازی تاثیر یک میدان الکتریکی اعمال شده روی فرایند شکل گیری قطره، ناشی از مخلوط شدن جریان غیر قابل حل در میکروکانال دو بعدی با دیواره های تر نشونده استفاده کردند.

سحگال و همکارانش [۱۴] از روش شبکه بولتزمن برای شبیه سازی فیزیک شکست قطره در دو بعد استفاده کردند. این گروه از مدل شان چن در شبکه D2Q9 استفاده نمودند. برارنیا و همکارانش [۱۵]، با استفاده از مدل لتیس بولتزمن به شبیه سازی تغییر شکل و شکست قطره تحت تاثیر نیروهای گرانش و میدان الکتریکی، مدل لتیس بولتزمن به شبیه سازی تغییر شکل و شکست قطره تحت تاثیر نیروهای گرانش و میدان الکتریکی، در یک هندسه ساده پرداختند. در کار آنها مدل لتیس - بولتزمن دوفازی جهت ارزیابی قانون لاپلاس برای قطرات ساکن به کار رفته است. یو و همکارانش در سال (۲۰۰۷) از روش لتیس بولتزمن برای شبیه سازی قانون لاپلاس برای عددی جریان های گران مای گرانش و همکارانش در سال (۲۰۰۷) از روش لتیس بولتزمن برای شبیه سازی عددی جریان های گاز مایع دراعداد مویینگی کوچک در میکروکانال های با شکل متقاطع و همگرا استفاده کرد [۱۶]. آنها تایید کردند شکست حباب توسط اختلاف فشار در دو سیال غیر قابل حل بیشتر می شود.

در این راستا، هدف این پروژه شبیهسازی تشکیل و جداسازی قطره بوسیلهی روش شبکه بولتزمن و برای میکروکانال متقاطع میباشد که در مقایسه با هندسههای دیگر، کمتر به آن پرداخته شده است و بررسی آن همزمان با اعمال میدان الکتریکی، تاکنون انجام نگرفتهاست. فاز سنگین از طریق میکروکانال اصلی وارد میدان حل میشود و به تدریج قطره شکل میگیرد. نیروی کشش سطحی و لزجت در تشکیل قطره و اندازه قطره کاملا تاثیرگذارند. دبی حجمی سیال ورودی و در واقع سرعت اولیه آن باعث غلبه بر نیروهای ویسکوز شده و جدایش رخ میدهد. با جدایش قطره روند تشکیل قطره برای قطره بعد شروع میشود. اعمال میدان الکتریکی تاثیر مثبتی در تسریع روند شکل گیری قطرات دارد.

# ۲- معادلات و روشها

در روش شبکه بولتزمن به جای معادلات ناویر– استوکس، از معادلات بولتزمن استفاده می گردد که این معادلات و این روش بر اساس اصل برخورد ذرات و مدلهای برخورد مانند مدل بی.جی.کی<sup>۲</sup> است. در روش ال– بی– ام<sup>۳</sup> یک تابع توزیع<sup>۴</sup> به عنوان متغیر اصلی معادله است. مدل مورد استفاده در این تحقیق، با دو تابع توزیع میباشد که ساختاری مانند روش های جستجوکننده یمرز<sup>۵</sup> دارد. یک تابع توزیع برای مشخص کردن محل مرز مشترک استفاده می گردد و تابع توزیع دیگر برای محاسبه خواص هیدرودینامیکی میباشد. با استفاده از ترکیب نیروهای متقابل بینمولکولی، میتوان معادله بولتزمن را برای سیالات غیرایدهآل<sup>۶</sup> بدست آورد. معادله بولتزمن را میتوان به صورت زیر نوشت:

<sup>1</sup> non-wetting

- <sup>2</sup>Bhatnagar-Gross-Krook
- <sup>3</sup> LBM
- <sup>4</sup>Distribution Function
- <sup>5</sup> Front Tracking Method
- <sup>6</sup> Non-Ideal Fluids

$$f_{\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_{a}\delta_{t}, t + \delta_{t}) - f_{\alpha}(\mathbf{x}, t)$$

$$= -\frac{\overline{f_{\alpha}}(\mathbf{x}, t) - f_{\alpha}^{eq}(\mathbf{x}, t)}{\tau} - \frac{(2\tau - 1)}{2\tau} \frac{(\mathbf{e}_{a} - \mathbf{u}) \cdot \nabla \psi(\phi)}{RT} \Gamma_{\alpha}(\mathbf{u})\delta_{t},$$

$$\overline{g}_{\alpha}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_{a}\delta_{t}, t + \delta_{t}) - \overline{g}_{\alpha}(\mathbf{x}, t)$$

$$= -\frac{\overline{g}_{\alpha}(\mathbf{x}, t) - g_{\alpha}^{eq}(\mathbf{x}, t)}{\tau} + \frac{2\tau - 1}{2\tau} (\mathbf{e}_{a} - \mathbf{u}) \cdot [\Gamma_{\alpha}(\mathbf{u})(\mathbf{F}_{s} + \mathbf{F}) - (\Gamma_{\alpha}(\mathbf{u}) - \Gamma_{\alpha}(0))\nabla\psi(\rho)]\delta_{t},$$
(1)

که در آن  $\lambda/\delta t$  و فضای سرعت میکروسکوپیک به محیطی از سرعت های معین بصورت زیر میباشد:

$$\mathbf{e}_{\alpha} = \begin{cases} \mathbf{0}, & \alpha = 0, \\ (\cos[(\alpha - 1)\pi/2], \sin[(\alpha - 1)\pi/2])c, & \alpha = 1, 2, 3, 4, \\ \sqrt{2}(\cos[(\alpha - 5)\pi/2 + \pi/4], \sin[(\alpha - 5)\pi/2 + \pi/4])c, & \alpha = 5, 6, 7, 8, \end{cases}$$
(7)

و در حل مقدار dx را میتوان مقدار پایه در نظر گرفت. بنابراین، RT =  $C_s^2 = \frac{C^2}{3}$  یا  $\sqrt[3]{3}RT = c = C_s^2 = \frac{C^2}{3}$  که در ان  $\frac{dx}{dt}$  ان  $C_s$  است. و نیز داریم: ان  $C_s$ 

$$f_{\alpha}^{\text{eq}} = w_{\alpha}\phi \left[1 + \frac{3\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c^{2}} + \frac{9(\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^{2}}{2c^{4}} - \frac{3\mathbf{u}^{2}}{2c^{2}}\right],$$

$$g_{\alpha}^{\text{eq}} = w_{\alpha} \left[p + \rho \left(\frac{3\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c^{2}} + \frac{9(\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^{2}}{2c^{4}} - \frac{3\mathbf{u}^{2}}{2c^{2}}\right)\right].$$
(7)

که در آن، 
$$\delta t$$
 گام زمانی است و  $\Gamma_{\alpha}(\mathbf{u}) = \Gamma_{\alpha}(\mathbf{u})$  بصورت زیر معرفی می شود:  

$$\Gamma_{\alpha}(\mathbf{u}) = w_{\alpha} \left[ 1 + \frac{3\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u}}{c^{2}} + \frac{9(\mathbf{e}_{\alpha} \cdot \mathbf{u})^{2}}{2c^{4}} - \frac{3\mathbf{u}^{2}}{2c^{2}} \right].$$
(۵)

تابع توزیع g تنها سرعت و فشرار را نتیجه میدهد. برای جریان تراکم ناپذیر دوفازی<sup>۱</sup>، چگالی دور از مرز مشترک دقیقا مشخص ا ست. تنها کار باقی مانده ردیابی مرز مشترک<sup>۲</sup> و در واقع ردیابی اختلاف چگالی دو فاز است تا مرز مشترک ضخامت کمتری داشته باشد. مشخصههای ماکروسکوپیک از روابط زیر قابل محاسبهاند:

<sup>2</sup> Interface

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Incompressible Multiphase Flows

Archive of SID

:[10]

$$\phi = \sum f_{\alpha},$$

$$p = \sum \overline{g}_{\alpha} - \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla \psi(\rho) \delta_{t},$$

$$\rho RT \mathbf{u} = \sum \mathbf{e}_{\alpha} \overline{g}_{\alpha} + \frac{RT}{2} (\mathbf{F}_{s} + \mathbf{G}) \delta_{t}.$$
(8)

که به ما این اجازه را میدهد که میدان الکتریکی را با پتانسیل الکتریکی برابر در نظر بگیریم:

$$\vec{E} = -\nabla \phi \tag{(\lambda)}$$

نيروى الكتريكى اعمال شده بر المان سيال در يک دامنه محدود به صورت زير است
$$ec{F}=\int\limits_{\Omega}(
hoec{E}-rac{1}{2}E^2
ablaarepsilon)dx^3$$
 (٩)

طبق قانون گووس رابطهی زیر برقرار است:
$$q_v = \nabla. (\varepsilon \vec{E})$$
 (۱۰)

که نیروی الکتریکی کلی سیستم به صورت زیر است:  

$$\vec{F} = -\frac{1}{2} \nabla \varepsilon \vec{E}^2 + \nabla . (\varepsilon \vec{E}) \vec{E})$$
(۱۱)

و نیروی الکتریکی اعمالی روی سیال میتواند توسط رابطه (۱۱) بدست میآید. میدان الکتریکی  $ec{E}$  در معادله بالا از رابطه زیر بدست میآید:

$$\vec{E} = -\nabla U \tag{11}$$

در ادامه می ایست توسط LBM، پتانسیل U را حل کنیم، برای این منظور یک تابع توزیع دیگر  $h_{lpha}$  معرفی می شود که به صورت زیر می اشد:

<sup>1</sup> Irrotational

<sup>3</sup> Coulomb force

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Dielectric force

$$h_{\alpha}(x + e_{\alpha}\delta t, t+\delta t) - h_{\alpha}(x, t) = -\frac{1}{\tau_{h}} \left[ h_{\alpha}(x, t) - h_{\alpha}^{eq}(x, t) \right]$$
(14)

که در آن 
$$h_{\alpha}^{eq}(x,t)$$
 به صورت زیر است:  
 $h_{\alpha}^{eq} = \omega_{\alpha} U$ 
(۱۵)
(۱۵)
(۱۵)
(۱۵)
 $\tau_{h} = 3\sigma + 0.5$ 
(۱۶)

سپس پتانسیل U نیز به صورت زیر میباشد[۱۵]:

۳- اعتبار سنجی

$$\mathbf{U} = \sum_{\alpha} h_{\alpha} \tag{1Y}$$

شرایط مرزی بکار گرفته شده به این شرح است: دیوارهها عایق میدان الکتریکی هستند بجز الکترودهای میدان الکتریکی. روی دیوارهها شرط عدم لغزش<sup>7</sup> برقرار است[۱۷]. برای ورودی جریان برای تابع توزیع g شرط مرزی سرعت برای مرز جریان برقرار میبا شد[۱۸]. برای خروجی جریان، که مرز باز<sup>۳</sup> میبا شد؛ شرط مرزی برون یابی هم برای تابع توزیع f و هم g برقرار است[۱۸]. در ورودی کانال (x=0) سرعت ورودی فاز پیوسته و پراکنده، به صورت  $u_c$  و  $u_c$  مشخص است. در خروجی کانال، فشار ثابت فرض شده است. سرعت روی دیواره مان مرزی دروی دیواره مان مرزی برون یابی هم برای تابع توزیع f و هم g برقرار است[۱۸]. در ورودی کانال (x=0) سرعت ورودی فاز پیوسته و پراکنده، به صورت  $u_c$  و  $u_c$ 

$$E_0 = \frac{U_{upper \ electrode} - U_{lower \ electrod}}{W_d} \tag{1A}$$

$$U_{upper} - U_{lower} = E_0 w_d \tag{19}$$

$$U_{upper} = \frac{E_0 w_d}{2}, U_{lower} = -\frac{E_0 w_d}{2}$$
 (7.)

به دو روش اعتبار سنجی انجام گرفته است؛ در روش اول، برای برر سی دقت برنامه در اندازه گیری ضخامت مرز مشترک بین دو سیال از رابطه لاپلاس<sup>۵</sup> برای یک سیلندر سیال در حالت تعادلی در میدان حل با شبکه مرز مشترک بین دو سیال از رابطه لاپلاس<sup>۵</sup> برای یک سیلندر سیال در حالت تعادلی در میدان اخل با شبکه مرز مشترک بین دو سیال از رابطه لاپلاس<sup>۵</sup> برای یک سیلندر سیال در حالت تعادلی در میدان دل با شبکه مرز مشترک بین دو سیال از رابطه لاپلاس<sup>۵</sup> برای یک سیلندر سیال در حالت تعادلی در میدان دل با شبکه مرز مشترک بین دو سیال از رابطه لاپلاس<sup>۵</sup> برای یک سیلندر سیال در حالت تعادلی در میدان دل با شبکه ۱۰۰–۱۰ در واحد لتیس استفاده شده است. سیلندرهایی با شعاعهای مختلف مورد برر سی قرار گرفته اند. برای حل از زمان آرامش  $\tau_a = \tau_g = 1$  استفاده شده است که لزجت 0.16667 و را نتیجه می دهد.

- <sup>2</sup> Non-slip
- <sup>3</sup> Open boundary
- <sup>4</sup> Non-wetting wall
- <sup>5</sup> Laplace

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Relaxation time

در حالت پایدار سیلندر سیال با مقطع کاملا دایره شکل تشکیل شده است و اختلاف فشار داخل و خارج دایره محاسبه می شود. بر طبق قانون لاپلاس، اختلاف فشار در راستای عمود بر مرز مشترک با تنش سطحی به شکل زیر رابطه دارد:

$$\Delta p = p_{\rm in} - p_{\rm out} = \frac{2\sigma}{R} \tag{71}$$

نتایج عددی در شکل (۱) برای سه مقدار متفاوت پارامتر تنش سطحی k نشان داده شده اند که پارامتر تنش سطحی با رابطه زیر با ضریب تنش سطحی رابطه دارد:

$$\sigma = k \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)^2 dz,$$
(17)

که در آن، در رابطه بالا z را ستای عمود بر مرز مشترک میبا شد. قابل مشاهده است که نتایج در مقایسه با نتایج تحلیلی از دقت قابل قبولی برخوردار میباشند.

روش دوم، تشکیل قطره با دو قطره ثابت ا ست. زمانی که دو قطره سیال با سرعت ناچیز به یکدیگر نزدیک می می وندروالس ا باعث نیروی کشش بین دو قطره شده و پل سیال ۲ بین دو قطره تشکیل می گردد. پل سیال به آرامی بوسیله نیروی کشش سطحی بزرگتر می شود. این روند ادامه دارد تا زمانی که دو قطره یکی شده و سطح مقطع حداقل را نتیجه می دهند (شکل (۳)).



$$\left( 
ho_{g}=0.1, 
ho_{d}=0.1, au=1 
ight)$$
 اعتبارسنجی قانون لاپلاس برای یک سیلندر سیال ا

<sup>1</sup> Van der Waals Force

<sup>2</sup> Liquid Bridge

برای شبیه سازی این مدل فیزیکی از میدان شبکه (لتیس) ۱۰۰× ۱۰۰ استفاده شده است که در این حل عددی گام مکانی و زمانی برابر واحد  $1 = \delta_x = \delta_x = 1$  و شعاع هر قطره معادل R=12 میبا شد که دو قطره با این شعاع در ابتدا در کنار یکدیگر قرار می گیرند. برای بررسی تاثیر تنش برشی بر روی روند یکی شدن، از مقادیر متفاوت برای ضریب تنش بر شی (k=0.1, k=0.5, k=1) استفاده می شود. در ابتدا دو قطره شدن، از مقادیر متفاوت برای ضریب تنش بر شی (k=0.1, k=0.5, k=1) استفاده می شود. در ابتدا دو قطره معادان از مقادیر متفاوت برای ضریب تنش بر شی (k=0.1, k=0.5, k=1) استفاده می شود. در ابتدا دو قطره معادان از مقادیر متفاوت برای ضریب تنش بر شی (k=0.1, k=0.5, k=1) استفاده می شود. در ابتدا دو قطره می اندازه در کنار یکدیگر قرار گرفتهاند (بدون تلاقی و فا صله بین دو قطره صفر لتیس است) و با گذر زمان پل رابط بین دو قطره به آرامی تحت تاثیر نیروی تنش سطحی رشد می کند و در راستای بدست آوردن کمترین سطح، به یک قطره دایره شکل تبدیل می گردد.

گرادیان جرم<sup>۱</sup> در هر نقطه منجر به اعمال نیروی وندروالس شده و این نیرو دلیل شروع روند یکی شدن دو قطره میباشد. دو قطره بعد از ۴۵۰۰۰ گام زمانی کام می افسان می قطره جدید تشکیل دادهاند.



**شکل۲**- رشد شعاع پل رابط بر حسب جذر زمان برای مقادیر متفاوت تنش سطحی (خطوط راست نشان دهنده حل تحلیلی ایگرز میباشد.)

<sup>1</sup> Mass Gradient









T=70,000

T=14,400



 $(k = 1, \tau = 1)$  شکل $\mathbf{T}$  \_ یکی شدن دو قطرہ ثابت در طی زمان

تشکیل قطره در میکرو کانال متقاطع، تحت تاثیر میدان الکتریکی ...

ایگرز<sup>۱</sup> و همکارانش (۱۹۹۹) فیزیک یکی شدن دو قطره ثابت توسط نیروی تنش سطحی را به صورت تحلیلی و عددی (با حل معادله استوکس) مورد بررسی قرار دادند. ایگرز پیشبینی کرد که رشد قطر پل رابط بین دو قطره به صورت تابع توانی<sup>۲</sup> با زمان رابطه دارد.

در شکل (۲) رشد شعاع پل رابط بین دو قطره  $R_b/R$  بر حسب جذر زمان  $t^{1/2}$  (گام زمانی) برای ضرایب تنش سطحی متفاوت رسم شده است. R شعاع اولیه دو قطره بوده است. نمودار منطبق شده بر روی نتایج خطی بودن رشد پل رابط را نشان میدهد که با حل تحلیلی ایگرز (خط راست در نمودار) مطابقت دارد. این نتایج برای رینولدزهای پایین (بر طبق تعریف ایگرز رینولدز از مرتبه (۱) و بالاتر) صادق میباشند.

با تغییر تنش سطحی رابطه خطی بین شعاع پل رابط و جذر زمان مشکلی پیدا نمی *ک*ند و تنها روند تشکیل قطره واحد تسریع می یابد. این تسریع تشکیل قطره واحد با رابطه ایگرز مطابقت دارد و تنش سطحی بالاتر شیب نمودار (سرعت یکی شدن) را بالا برده است. نتایج بدست آمده با خط انطباقی در نقاطی اختلاف دارند. این اختلاف می تواند تحت تاثیر خطای اندازه گیری (شعاع پل رابط از روی کانتور چگالی) ایجاد شده باشد. رابطه ایگرز برای رشد پل رابط برای شرایط 50.0  $R_b/R$  ارائه شده است که این می تواند دلیل دیگری برای اختلاف برای اختلاف در نقاطی اندازه گیری (شعاع پل رابط از روی کانتور چگالی) ایجاد شده باشد. رابطه ایگرز برای رشد پل رابط برای شرایط 50.0  $R_b/R$  ارائه شده است که این می تواند دلیل دیگری برای اختلاف نتایج باشد. نتایج باز دقت لازم برخوردار نمی باشند.

۴- توضیح مساله
 نمای شماتیک میکروکانال متقاطع مورد استفاده در این پژوهش را در شکل(۴) مشاهده می کنید. میکروکانال
 نمای شماتیک میکروکانال متقاطع مورد استفاده در این پژوهش را در شکل(۴) مشاهده می کنید. میکروکانال
 شامل یک کانال اصلی با عرض μm و 200 μ
 و دو کانال جانبی با عرض یکسان و مشابه μ
 می با شد. همانطور که در این شکل نمایان است فاز پراکنده (آب) از کانال اصلی وارد می شود و فاز پیو سته
 (روغن) به کانال های فرعی (بالا و پایین) تزریق می شود.



**شکل ۴** – نمای شماتیک میکروکانال متقاطع مورد استفاده در این پژوهش

<sup>1</sup> Eggers

<sup>2</sup> Power-law Relation

جهت برر سی نیروهای مختلف در فرایند تشکیل قطره از اعداد بی بعد شامل تنش سطحی، ویسکوزیته و دانسیته، مانند رینولدز، مویینگی<sup>۱</sup> و نیز دبی حجمی ورودی برای سیال فاز پراکنده<sup>۲</sup> و پیوسته<sup>۳</sup> استفاده می شود. نتایج به شکل کانتورهایی نمایش داده شدها ست. تعریف این پارامترها و نیز زمان بیبعد شده t و مقادیر لحاظ شده در کد به شرح زیر است[۴]:

$$Ca = \frac{U_c \eta_c}{\gamma} \tag{(YT)}$$

$$\eta_c = \nu \, \rho_c \tag{(Yf)}$$

$$Re = \frac{U_d D}{v} \tag{7a}$$

$$Q = \frac{Q_d}{Q_c}$$
(79)

$$t = T\left(\frac{u_c}{w_c}\right) \tag{YY}$$

سایز قطرات تشکیل شده در میکروکانال پیرو تئوری پی باکینگهام<sup>۴</sup> میتواند تو سط چهار عدد بیبعد تعریف شود:

d=f (Ca, Re, Q, 
$$\frac{\eta_d}{\eta_c}$$
) (YA)

### ۵- نتایج

تحلیل نتایج در دو بخش با حضور میدان الکتریکی و بدون آن انجام گرفتهاست. در قسمت اول، بطور مختصر روند تشکیل قطره بدون حضور میدان الکتریکی را برر سی خواهیم کرد و نتایج حا صل در غالب کانتورهایی نشان داده شده است.

- $^{2}$   $Q_{d}$
- $^{3}$  Q<sub>c</sub>
- <sup>4</sup> Buckingham's Pi theorem
- <sup>5</sup> Expansion
- <sup>6</sup> Necking
- <sup>7</sup> Figuration

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Capillary number

شکل(۶) نمای تشکیل قطره را برای Re=0.085، و با ثابت لحاظ کردن ویسکوزیته و تنش سطحی را نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود در Ca=0.015 قطره اول هنوز در مرحله باریک شدگی قرار دارد و ناحیه گلوگاه بسیار کشیده شده است و این نشان از قوی بودن کشش سطحی قطره و ضعیف بودن نیروهای ویسکوز نسبت به کشش سطحی دارد که منجر به بلند شدن ناحیه گلوگاه و کند شدن روند تشکیل قطره می شود. در Ca=0.017 یک قطره تشکیل شده است و در Ca=0.02 دو قطره، و انتظار میرود که با افزایش عدد مویینگی همچنان تعداد قطرات بیشتر شود، اما همانطور که دیده میشود در 20.05 میچنان دو قطره داریم که قطره سوم که در Ca=0.02 آستانه تشکیل قرار داشت، در ناحیه گلوگاه به جای نزدیک شدن به آ ستانه جدایش در حال عقب نشینی به سمت سیال پیو سته است. در واقع میتوان گفت که در اعداد مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطرهها نسبتا رو به افزایش است، اما از 20.0 عدد مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطرهها نسبتا رو به افزایش است، اما از 20.0 مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطرهها نسبتا رو به افزایش است، اما از 20.0 مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطره ها نسبتا رو به افزایش است، اما از 20.0 مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطره همسایه افزایش است، اما از 20.0 مویینگی پایین، بدلیل وجود اختلاف فشار در ناحیه گلوگاه قطره رو به کند شدن میرود. اعراد مویینگی پایین، بدلیل وجود اختلاف فشار در ناحیه گلوگاه قطره است، اما با افزایش عدد مویینگی با





شکل۵- فرایند تشکیل قطره در شرایط عدم وجود میدان الکتریکی با در نظر گرفتن Re=0.085, Ca=0.025

سال هجدهم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۵



شکل ۶- بررسی تغییرات عدد مویینگی در شرایط عدم وجود میدان الکتریکی با در نظر گرفتنRe=0.085

همچنین چنانچه از مقایسه Ca=0.07 با اعداد مویینگی کوچکتر مشاهده می شود، اندازه قطرات با افزایش عدد مویینگی، به وضوح کاهش پیدا کرده است.

همچنین با توجه به رابطه معکوس کشش سطحی و عدد مویینگی میتوان گفت که چنانچه نیروی کشش سطحی قویتر شود، شکل قطره تشکیل شده در حین ورود کاملتر است. برای کشش سطحی بالاتر درواقع افزایش کشش سطحی جدایش را به تعویق انداخته است. همچنین مشهود است که نیروی بین ذرات بیشتر شده و در ناحیه گلویی افزایش داشته است و در نتیجه اندازه قطره تشکیل شده نیز افزایش یافته است. نتیجتا اینکه با تغییر نیروی کشش سطحی در واقع نیروی بین ذرات در فاز یکسان تغییر میکند و در نتیجه بر روی روند تغییر و جدایش قطره و سایز آن تاثیراتی بوجود میآید.

**۵–۲– تحلیل و بررسی نتایج با وجود میدان الکتریکی** در این قسمت تاثیر میدان الکتریکی بر تشکیل قطره را در شدت میدانهای مختلف E<sub>0</sub> مشاهده خواهیم کرد. فاصله بین دو الکترود به اندازه عرض کانال اصلی میباشد، و داریم:

$$E_0 = \frac{U_{upper \ electrode} - U_{lower \ electrod}}{W_d} \tag{(77)}$$

که U پتانسیل اعمالی و W عرض کانال میباشد. فرض ما اینست که سیال غیر قابل تراکم ٔ میباشد و در اینجا نسبت ضریب گذردهی مختلف درنظر گرفته شده است و تاثیرات آن روی تشکیل قطره در غالب کانتورهایی

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Incompressible

تشکیل قطره در میکرو کانال متقاطع، تحت تاثیر میدان الکتریکی ...

قابل تحلیل و مشاهده میباشد. در اینجا منظور از *E*<sub>c</sub> ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> فاز پیوسته و *E*<sub>d</sub> ضریب گذردهی الکتریکی فاز پراکنده میباشد. به محض قرار گرفتن قطره بین الکترودها، قطره در امتداد مسیر میدان الکتریکی کشیده میشود که این موضوع، به دلیل وجود نیروهای دی– الکتروفورسیس <sup>۲</sup>است.

## ۵-۲-۱- فرایند تشکیل قطره با حضور میدان الکتریکی

شکل(۷) فرایند تشکیل قطره را درشرایط حضور میدان الکتریکی در زمانهای مختلف نشان میدهد. همانطور که در شکلها دیده میشود، به محض قرار گرفتن قطره بین الکترودها، قطره در امتداد مسیر میدان الکتریکی کشیده میشود که این موضوع، به دلیل وجود نیروهای دی- الکتروفورسیس<sup>۳</sup> است.

دی- الکتروفورسیس، پدیدهای است که در آن یک نیرو روی یک ذره دی- الکتریک که تحت تاثیر میدان الکتریکی است، اعمال میشود. این نیرو نیاز به باردارکردن ذره ندارد. در حقیقت همه ذرات، در حضور میدان الکتریکی، فعالیت دی- الکتروفورتیک<sup>۴</sup> ازخود نشان میدهند. اگرچه که قدرت این نیروها بشدت وابسته به خصوصیات الکتریکی ذرات و وسایل<sup>۵</sup>، شکل و سایز ذرات و نیز فرکانس میدان الکتریکی دارد. بدین ترتیب در الکتروفورز سطح ذرات سیال که بین دو الکترود قرار دارند، باردار شده و تحت میدان الکتریکی به سمت الکترود با بار مخالف حرکت میکنند و بدین ترتیب این نیرو تاحدی جایگزین نیروی کشش سطحی و لزجت شده و قطره به سمت الکترودها کشیده میشود.

بار الکتروستاتیک از توزیع بارهای مثبت و منفی در فصل مشتر ک جامد و مایع ناشی می شود. بار الکتروستاتیک روی سطح ذره معادل مجموع بار یون های مخالف در داخل قشر ناز ک مایع در اطراف سطح ذره می باشد که مجموعا لایه مضاعف الکتریکی را شکل می دهند. این موضوع باعث می شود که ناحیه کشیدگی<sup>2</sup> قطره کوتاه تر شود و بدین ترتیب قطره زودتر جدا شود. بنابراین می توان گفت که با اعمال میدان الکتریکی، فرایند تشکیل قطره سریع تر رخ می دهد. در حقیقت با کشیده شدن قطره به سمت الکترودها فشار پشت قطره افزایش یافته و فشار در ناحیه جلو کمتر می شود که باعث می شود که با اعمال میدان الکتریکی، فرایند تشکیل و فشار در ناحیه جلو کمتر می شود که باعث کاهش طول گلوگاه و جدا شدن قطره شده و روند تشکیل قطره را تسریع می بخشد و بدین ترتیب تعداد قطرات نیز افزایش می یابد. در این بین پارامترهای دیگری از جمله عدد مویینگی نیز نقش مهمی دارند که در ادامه به تحلیل و بررسی آن ها می پردازیم.

- <sup>2</sup> Di electrophoresis forces
- <sup>3</sup> Di electrophoresis forces
- <sup>4</sup> Di electrophoretic activity
- <sup>5</sup> Medium and particles' electrical properties
- <sup>6</sup> Necking

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Permittivity

سال هجدهم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۵









**شکل**۸- تاثیر تغییرات میدان الکتریکی E<sub>0</sub> در عدد مویینگی ۰٫۰۱۵

۵-۲-۲-بررسی تاثیر شدت میدان الکتریکی در عدد مویینگی ثابت

یک قطره سیال که ذاتا کروی شکل است، بخاطر تنش سطحیاش، هنگامی که تحت تاثیر یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی قرار می گیرد، تغییر شکل میدهد وتغییر شکل آن بستگی به مشخصات الکتریکی<sup>۱</sup> یا مغناطیسی قطره<sup>۲</sup> و نیز میزان هدایت و رسانایی<sup>۳</sup> قطره و سیال اطراف آن دارد.

- <sup>1</sup> Permittivity
- <sup>2</sup> Permeability
- <sup>3</sup> Conductivity

تشکیل قطره در میکرو کانال متقاطع، تحت تاثیر میدان الکتریکی ...

با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها از جمله:

*Re*=0.085, 
$$\varepsilon_c/\varepsilon_d$$
= 0.01,  $\varepsilon_d$ = 0.2,  $\sigma_c/\sigma_d$ = 0.2

روند تغییرات شدت میدان الکتریکی  $E_0$  را بررسی می کنیم. در شکل (۸) تشکیل قطره را در Ca=0.015 و در شرایط عدم حضور میدان (0 =  $E_0$ ) و نیز در 0.2 =  $E_0$  و  $C_0 = 0.3$  و نیز در 0.2  $E_0 = 0.3$  و در شرایط عدم حضور میدان الکتریکی در 0.2  $E_0 = 6$  قطره را سمت میدان کرده ا ست که نشان از عدم تاثیر به سمت میدان کر شیده شده ا ست ولی تعداد قطرهها همچنان تغییری نکرده ا ست که نشان از عدم تاثیر میدان در این شـدت میدان الکتریکی دارد. با افزایش بیشـتر میدان یعنی در 0.015 و 0.3 و  $E_0 = 6$  قطره کاملا تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار گرفته اسـت و تعداد قطرات بهوضـوح افزایش یافته و میتوان دید که نسبت به حالتی که شدت میدان صفر بوده است، قطرات با فواصل کمتر و سریعتر تشکیل شدهاند.

شکل (۹) روند تغییرات شدت میدان الکتریکی را در Ca=0.03 را نشان میدهد. مشهود است که با افزایش میدان یعنی در  $E_0 = 0.3$  قطره کاملا تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار گرفته است و تعداد قطرات بهوضوح افزایش یافته است. با افزایش میدان، به وضوح ملاحظه می شود که ناحیه گلوگاه نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و قطره الکترودها را لمس کرده است و شکل آن کاملا از حالت کروی شکل خارج شده است و ناحیه گلویی نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و قطره الکترودها را لمس کرده است و شکل آن کاملا از حالت کروی شکل خارج شده است و ناحیه گلویی نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و قطره الکترودها را لمس کرده است و شکل آن کاملا از حالت نوی شکل خارج شده است و ناحیه گلویی نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و فشار، در جلو قطره کمتر میشود و مقاومت سیال در برابر نیروهای الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی لزجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و نیروهای الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی لزجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و تنش سطحی قطره، در نهایت جدایش را می شود که میدان الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی لزجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و نیروهای الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی لزجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و نیروهای الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی کرجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و نیروهای الکتروفور سیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی کرجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و نیش ماطحی قطره، در نهایت جدایش رخ میدهد و قطره تشکیل می شود، همچنین م شاهده می شود که سایز آنها کاهش یافته است. اما در مقایسه با اعداد مویینگی کمتر، تعداد قطرات تشکیل شده کمتر می باشد.





بعلاوه روند تاثیر گذاری میدان بر تسریع تشکیل قطره نیز کندتر شده است و تعداد قطرات نسبت به اعداد مویینگی کوچک تر کاهش یافته است. با این حال، همچنان مشاهده می شود که در  $E_0 = 0.2, 0.3$  میدان الکتریکی تاثیر خود را بر روی کشیده شدن و غلبه بر نیروهای لزجت گذاشته است. همانطور که از مقایسه حالت 20.0 = 0.2 میدان الکتریکی تاثیر خود را بر روی کشیده شدن و غلبه بر نیروهای لزجت گذاشته است. همانطور که از مقایسه حالت 20.0 = 0.2 و Ca = 0.02, 0.3 میدان مشاهده می شود که در 20.0 = 0.2 میدان الکتریکی تاثیر خود را بر روی کشیده شدن و غلبه بر نیروهای لزجت گذاشته است. همانطور که از مقایسه حالت 20.0 = 0.2 و Ca = 0.03, 0.0 ملاحظه می شود، تعداد قطره همچنان باوجود افزایش عدد مویینگی، از دو قطره به چهار قطره افزایش یافته است که این روند در سایر اشکال نیز برای مقایسه وجود و عدم وجود میدان نیز دیده می شود.

 $\Delta - Y - Y - y$  بررسی تاثیر تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> و نیز رسانایی<sup>۲</sup> را فرض Re=0.085 نشان می دهد. شکل(۱۰) و (۱۱) تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> و نیز رسانایی<sup>۲</sup> را فرض Re=0.085 نشان می دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد زمانی که ضریب گذردهی الکتریکی افزایش می یابد، سایز قطره کاهش پیدا می کند. و همچنین در شکل (۱۰) با مقایسه کانتور  $1 = \frac{b^3}{c_c}$  با کانتور  $4 = \frac{b^3}{c_c}$  مشاهده می شود که تعداد قطرات افزایش یافته و فاصله بین دو قطره همسایه نیز کمتر شده است که این موضوع به این دلیل است که در حقیقت، فاصله بین قطره های نمودار شده و دیواره ی اصلی کانال تحت تاثیر میدان الکتریکی در طول فرایند شکل گیری قطره، کاهش می یابد و به طور موثری موجب مسدود کردن فاز پیوسته می شود. وجود این قطره در نقش مانع، اختلاف فشار را در طول سطح مشترک قطره افزایش می دهد، که منجر به تاثیرات

<sup>1</sup> Permittivity

<sup>2</sup> Conductivity

برای یک نسبت سرعت ثابت فاز پیوسته به فاز پراکنده، در آنجا مقادیر بحرانی از شدت میدان جریان وجود دارد که با آن قطره شروع به تماس با سطوح الکترودها می کند. همانطور که پیش تر شرح داده شد، در مقادیر بحرانی از شدت انرژی الکتریکی، سایز قطره ناگهان کاهش می یابد و فرکانس تشکیل قطره افزایش می یابد. در شدت میدان الکتریکی بالا، وقتی که نیروهای الکتریکی به میدان جریان غالب می شوند، تغییر شکل قطره مستقل از سرعت فاز پیو سته است. همین روند در خصوص شکل (۱۱) نیز صادق است. چون با افزایش رسانایی سیال فاز پراکنده، میزان کشیده شدن قطره به سمت الکترودها بیشتر می شود و همین موضوع باعث افزایش اختلاف فشار در سطح مشترک قطره می شود.

در واقع در شکل (۱۰) افزایش ضریب گذردهی الکتریکی و در شکل (۱۱) افزایش رسانایی سیال سنگین، منجر به ایجاد تغییرات ذکر شده در روند شکل گیری قطره می گردد. در نهایت می توان گفت که همانطور که نتایج شبیه سازی نشان داد، یک میدان الکتریکی می تواند برای کنترل سایز قطره و فرکانس شکل گیری قطره موثر باشد. درنهایت بعنوان نتیجه گیری نهایی می توان گفت که نتایج نشان می دهد که اعمال میدان الکتریکی تاثیر مثبتی در تسریع روند شکل گیری قطرات دارد، با این کار قطرات کوچکتر با فرکانس بالاتر بدست آمده است که ایده ال می باشد و بدین ترتیب تشکیل قطره کنترل شده است.



Re=0.085 , 
$$\frac{\sigma_d}{\sigma_c} = 5$$
,  $E_0 = 0.3$ ,  $Ca = 0.02$  با فرض:  $\varepsilon_d$  با فرض:  $\varepsilon_d - 1$ 



Re=0.085 ,  $rac{\sigma_d}{\sigma_c}=$  5,  ${
m E}_0=$  0.3, Ca = 0.02 : شکل ۱۱ – تاثیر  $\sigma_d$  با فرض $\sigma_d$  با فرض

مراجع

- [1] Jones, T. B., "Electromechanics of Particles", Cambridge University Press, (2005).
- [2] Eow, J.S., and Ghadiri, M., "Electrostatic Enhancement of Coalescence of Water Droplets in Oil", Chemical Engineering Journal, Vol. 85, No. 2, pp. 357-368, (2002).
- [3] Van der Graaf, S., Steegmams, M.L.J., Vander Sman, R.G.M., Schroen, C.G.P.H., and Boom, R.M., "Droplet formation in a T-shaped Microchannel Junction: a Model System for Membrane Emulsification", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 266, No. 1, pp. 106-116, (2005)
- [4] Zhang, J., and Kwok, D.Y., "A 2D Lattice Boltzmann Study on Electrohydrodynamic Drop Deformation with the Leaky Dielectric Theory", Journal of Computational Physics, Vol. 206, No. 1, pp. 150-161, (2005).
- [5] Taylor, G., "Studies in Electrohydrodynamics. I. The Circulation Produced in a Drop by Electrical Field", Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 291, No. 1, pp. 159-166, (1966).
- [6] Castellanos, A., and Gonzalez, A., "Nonlinear Electrohydrodynamics of Free Surfaces", Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 513, No. 3, pp. 334-343, (1998).

- [7] Ha, J.W., and Yang, S.M., "Electrohydrodynamics and Electrorotation of a Drop with Fluid Less Conductive than that of the Ambient Fluid", Physics of Fluids, Vol. 12, No. 4, pp. 764-772, (2000).
- [8] Melcher, J., and Taylor, G., "Electrohydrodynamics: a Review of the Role of Interfacial Shear Stresses", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 1, No. 1, pp. 111-146, (1969).
- [9] Saville, D.A., "Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher Leaky Dielectric Model", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 29, No. 1, pp. 27-64, January (1997).
- [10] Lee, S., Im, D., and Kang, I., "Circulating Flows Inside a Drop under Time-periodic Nonuniform Electric Fields", Physics of Fluids, Vol. 12, No. 8, pp. 1899-1910 ,(2000).
- [11] Trau, M., Sankaran, S., Saville, D.A., and Aksay, I.A., "Electric-field-induced Pattern Formation in Colloidal Dispersions Nature", Vol. 374, No. 6, pp. 437-439, (1995).
- [12] Xing, X.Q., Butler, D.L., Ng, S.H., Wang, Z., Danyluk, S., and Yang, C., "Simulation of Droplet Formation and Coalescence using Lattice Boltzmann-based Single-phase Model", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 311, No. 2, pp. 609-618, (2007).
- [13] Gong, S., Cheng, P., and Quan, X., "Lattice Boltzmann Simulation of Droplet Formation in Microchannels under an Electric Field", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, No. 25, pp. 5863-5870, (2010).
- [14] Yang, Z.L., Palm, B., and Sehgal, B., "Numerical Simulation of Bubbly Two-phase Flow in a Narrow Channel", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, No. 3, pp. 631-639, (2002).
- [15] Bararnia, H., and Ganji, D.D., "Breakup and Deformation of a Falling Droplet under High Voltage Electric Field", Advanced Powder Technology, Vol. 24, No. 6, pp. 992-998, (2013).
- [16] Yu, Z., Hemminger, O., and Fan, L.S., "Experiment and Lattice Boltzmann Simulation of Two-phase Gas–liquid Flows in Microchannels", Chemical Engineering Science, Vol. 62, No. 24, pp. 717-718, (2007).
- [17] Inamuro, T., Yoshino, M., and Ogino, F., "A Non-slip Boundary Condition for Lattice Boltzmann Simulations", Physics of Fluids, Vol. 7, No. 12, pp. 2928-2930, (1995).
- [18] Zou, Q., and He, X., "On Pressure and Velocity Boundary Conditions for the Lattice Boltzmann BGK Model", Physics of Fluids, Vol. 9, No. 6, pp. 1591-1598, (1997).
- [19] Garstecki, P., Fuerstman, M.J., Stone, H.A., and Whitesides, G.M., "Formation of Droplets and Bubbles in a Microfluidic T-junction Scaling and Mechanism of Break-up", Lab on a Chip, DOI: 10.1039/b510841a, Vol. 6, No. 3, pp. 437-446, (2006).

$$u_c$$
 : سرعت ورودی فاز پیوسته $\Delta p$   
  $\Delta p$  : اختلاف فشار  
  $R$  : شعاع قطره  
  $R$  : بعاع قطره  
  $R$  : پارامتر تنش سطحی  
  $t$  : زمان بی بعد  
  $W_c$   
  $W_c$   
  $W_c$   
  $W_d$   
  $W_t$  :  $V_{cd}$   
  $W_d$   
  $P$  : حبی حجمی ورودی برای سیال فاز پراکنده  
  $Q_c$   
  $P$  : دبی حجمی ورودی برای سیال فاز پراکنده  
  $Q_c$   
  $S_t$   
  $\delta_t$   
  $\delta_x$   
  $\sigma$  : تنش سطحی  
  $T_h$ 

پراکنده

www.SID.ir

۷ : لزجت

#### Abstract

The phenomena of formation and detachment of droplets are one of fundamental issues in studying two-phase flows and have been seen in lots of natural phenomenon and processes, such as spraying processes, ink jet printing, emulsion, etc. Between different numerical methods, the lattice Boltzmann method (LBM) has been developed in to an alternative and promising numerical scheme for simulating multi-component fluid flows. In this project, formation and detachment of droplets were simulated, using LBM and particularly index function model. Results were validated using two-phase flows methods. After code validation, the formation and detachment of droplets in a cross-junction micro channel and under the electric field effects were studied. To survey different effects on this phenomenon, dimensionless numbers were studied.

Finally, the effect of variation of permittivity, conductivity and capillary number for droplets were studied under different situations. Results show that the electric force have a positive effect in expedition of droplet formation, and also index function model proved its very useful abilities. We have smaller drops with high frequency which shows that we can control the droplet formation.