

## تشکیل قطره در میکرو کانال متقاطع، تحت تاثیر میدان الکتریکی با استفاده از روش شبکه بولتزن

تشکیل قطره، یکی از پدیده‌های مهم در جریان‌های چندفازی است و در بسیاری از پدیده‌های طبیعی و صنعتی دیده می‌شود. همچنین، روش شبکه بولتزن جزء روش‌های کاربردی می‌باشد. در این پژوهش شبیه‌سازی شکل‌گیری قطره بوسیله ی روش شبکه بولتزن 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 لیکلی-دی-الکترونیک استفاده شده است. از مدل‌های مختلف تک‌فاز و دوفاز برای صحت‌سنجی آن بهره گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که اعمال میدان الکتریکی تاثیر مثبتی در تسریع روند شکل‌گیری قطرات دارد، با این کار قطرات کوچکتر با فرکانس بالاتر بدست آمده است که ایده‌آل می‌باشد و بدین ترتیب تشکیل قطره کنترل شده است.

صنم وزیری<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

محمد افتخاری یزدی<sup>۲</sup>

استادیار

آرمن آدامیان<sup>۳</sup>

استادیار

واژه‌های راهنما: تشکیل قطره، روش بولتزن، میدان الکتریکی، میکروکانال 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 می‌رود؛ از جمله در هواشناسی و مطالعات ژئوفیزیک مثل تحقیقات روی برف و تگرگ و ذرات جامد در رودخانه‌ها، 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، سرمایه‌ش تبخیری، اتمیزاسیون، کاویتاسیون و... کاربردهای مختلفی دارند. برای جداسازی مایع از نفت در مخلوط آب - نفت؛ آب جدا شده 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 [۱] 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: ۹۴/۰۷/۰۵، 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 به‌کارگیری 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 می‌باشند. واندرگراف 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 می‌شود و از روی سطح مرطوب کشیده می‌شود و داخل سیال دوم تشکیل قطره صورت می‌گیرد.

در همان سال، زانگ جانفنگ [۴]، یک روش را برای اعمال مدل لتیس بولتزمن به مطالعات الکترو هیدرودینامیک ارائه کرد. طی تحقیقات او، یک سری 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 الکترو هیدرودینامیک‌ها بوده است و کار آن‌ها نشان داد که لتیس بولتزمن، پتانسیل بالایی برای حل مسایل الکترو هیدرودینامیک پیچیده دارد. تازه ترین مشاهدات الکترو هیدرودینامیک به قرن هفدهم برمی‌گردد، 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 باردار شده<sup>۴</sup>، در فاصله ای مشخص از بالای آن قرار گیرد، به شکل یک مخروط، تغییر شکل می‌دهد [۵]. کاربرد الکترو هیدرودینامیک در صنعت بسیار فراوان است؛ مثل پرینتر جت- جوهر<sup>۵</sup>، طراحی الکتروستاتیک<sup>۶</sup>، جوشش<sup>۷</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 می‌شوند که رسانایی<sup>۸</sup> کمتری داشته باشند و زمانی که یک میدان الکتریکی اعمال می‌شود، بار الکتریکی آزاد<sup>۹</sup> فقط می‌تواند در ناحیه سطح مشترک سیال-سیال ظاهر 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 از سیال را در معرض تشکیل قطره قرار داد. در سال (۲۰۱۰) نیز گنگ [۱۳] تشکیل قطره در فرایند 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>1</sup> Richard

<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

مولکولی لتیس بولتزن 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<sup>۱</sup> استفاده کردند. سحگال و همکارانش [۱۴] از روش شبکه بولتزن 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 بولتزن 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- بولتزن دوفازی جهت ارزیابی قانون لاپلاس برای قطرات ساکن به کار رفته است. یو و همکارانش در سال (۲۰۰۷) از روش لتیس بولتزن برای شبیه سازی عددی جریان های گاز- مایع در اعداد 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 شبیه سازی تشکیل و جداسازی قطره بوسیله ی روش شبکه بولتزن و برای میکروکانال متقاطع می باشد که در مقایسه با هندسه های دیگر، کمتر به آن پرداخته شده است و بررسی آن همزمان با اعمال میدان الکتریکی، تاکنون انجام نگرفته است. فاز سنگین از طریق میکروکانال اصلی وارد میدان حل می شود و به تدریج قطره شکل می گیرد. نیروی کشش سطحی و لزجت در تشکیل قطره و اندازه قطره کاملاً تاثیر گذارند. دبی حجمی سیال ورودی و در واقع سرعت اولیه آن باعث غلبه بر نیروهای ویسکوز شده و جدایش رخ می دهد. با جدایش قطره روند تشکیل قطره برای قطره بعد شروع می شود. اعمال میدان الکتریکی تاثیر مثبتی در تسریع روند شکل گیری قطرات دارد.

## ۲- معادلات و روش ها

در روش شبکه بولتزن به جای معادلات ناویر- استوکس، از معادلات بولتزن 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 می باشد که ساختاری مانند روش های جستجوکننده ی مرز<sup>۵</sup> دارد. یک تابع توزیع برای مشخص کردن محل مرز مشترک استفاده می گردد و تابع توزیع دیگر برای محاسبه خواص هیدرودینامیکی می باشد.

با استفاده از ترکیب نیروهای متقابل بین مولکولی، می توان معادله بولتزن را برای سیالات غیرایده آل<sup>۶</sup> بدست آورد. معادله بولتزن را می توان 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

$$\begin{aligned}
 & \bar{f}_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \delta_t, t + \delta_t) - \bar{f}_\alpha(\mathbf{x}, t) \\
 &= -\frac{\bar{f}_\alpha(\mathbf{x}, t) - f_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)}{\tau} - \frac{(2\tau - 1)(\mathbf{e}_a - \mathbf{u}) \cdot \nabla \psi(\phi)}{2\tau RT} \Gamma_\alpha(\mathbf{u}) \delta_t, \\
 & \bar{g}_\alpha(\mathbf{x} + \mathbf{e}_a \delta_t, t + \delta_t) - \bar{g}_\alpha(\mathbf{x}, t) \\
 &= -\frac{\bar{g}_\alpha(\mathbf{x}, t) - g_\alpha^{\text{eq}}(\mathbf{x}, t)}{\tau} + \frac{2\tau - 1}{2\tau} (\mathbf{e}_a - \mathbf{u}) \cdot [\Gamma_\alpha(\mathbf{u})(\mathbf{F}_s + \mathbf{F}) \\
 & \quad - (\Gamma_\alpha(\mathbf{u}) - \Gamma_\alpha(0)) \nabla \psi(\rho)] \delta_t,
 \end{aligned} \tag{1}$$

که در آن  $\tau = \lambda/\delta t$  و فضای سرعت میکروسکوپی به محیطی از سرعت های معین بصورت زیر می باشد:

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

و در حل مقدار  $dx$  را می توان مقدار پایه در نظر گرفت. بنابراین،  $\sqrt{3RT} = c = \frac{dx}{dt}$  یا  $\frac{c^2}{3} = RT = C_s^2$  که در آن  $C_s$  سرعت صوت سیال است. در این رابطه سرعت  $c = (3RT)^{1/2}$  است. و نیز داریم:

$$\begin{aligned}
 f_\alpha^{\text{eq}} &= w_\alpha \phi \left[ 1 + \frac{3\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right], \\
 g_\alpha^{\text{eq}} &= w_\alpha \left[ p + \rho \left( \frac{3\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right) \right].
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 f_\alpha(\mathbf{x}, t) &= w_\alpha f(\mathbf{x}, \mathbf{e}_a, t), & W_0 &= 4/9, \\
 g_\alpha(\mathbf{x}, t) &= w_\alpha g(\mathbf{x}, \mathbf{e}_a, t), & \alpha &= 1, 2, 3, 4, \quad W_\alpha = 1/9, \\
 & & \alpha &= 5, 6, 7, 8, \quad W_\alpha = 1/36.
 \end{aligned} \tag{4}$$

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

$$\Gamma_\alpha(\mathbf{u}) = w_\alpha \left[ 1 + \frac{3\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{9(\mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{u})^2}{2c^4} - \frac{3\mathbf{u}^2}{2c^2} \right]. \tag{5}$$

تابع توزیع  $g$  تنها سرعت و فشار را نتیجه می دهد. برای جریان تراکم ناپذیر دوفازی<sup>۱</sup>، چگالی دور از مرز مشترک دقیقاً مشخص است. 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. مشخصه های ماکروسکوپی از روابط زیر قابل محاسبه اند:

<sup>1</sup> Incompressible Multiphase Flows

<sup>2</sup> Interface

$$\begin{aligned}\phi &= \sum f_{\alpha}^{-}, \\ p &= \sum \bar{g}_{\alpha} - \frac{1}{2} \mathbf{u} \cdot \nabla \psi(\rho) \delta_t, \\ \rho RT \mathbf{u} &= \sum \mathbf{e}_a \bar{g}_{\alpha} + \frac{RT}{2} (\mathbf{F}_s + \mathbf{G}) \delta_t.\end{aligned}\quad (6)$$

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی تاثیر میدان الکتریکی روی قطره با روش LBM از مدل لیکی-دی الکتریک استفاده شده است. میدان الکتریکی  $E$ ، غیرچرخشی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (7)$$

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

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (8)$$

نیروی الکتریکی اعمال شده بر المان سیال در یک دامنه محدود به صورت زیر است [۱۵]:

$$\vec{F} = \int_{\Omega} \left( \rho \vec{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \epsilon \right) dx^3 \quad (9)$$

طبق قانون گووس رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$q_v = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) \quad (10)$$

که نیروی الکتریکی کلی سیستم به صورت زیر است:

$$\vec{F} = -\frac{1}{2} \nabla \epsilon \vec{E}^2 + \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) \vec{E} \quad (11)$$

ترم اول سمت راست معادله، به نیروی دی الکتریک<sup>۲</sup> برمی‌گردد و ترم دوم به نیروی کلمب<sup>۳</sup> اشاره دارد [۱۵]. برای سیالات لیکی-دی الکتریک، معادله حاکم برای میدان الکتریکی به فرم زیر درمی‌آید:

$$\nabla \cdot (\sigma \vec{E}) = 0 \quad (12)$$

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

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (13)$$

در ادامه می‌بایست توسط LBM، پتانسیل  $U$  را حل کنیم، برای این منظور یک تابع توزیع دیگر  $h_{\alpha}$  معرفی می‌شود که به صورت زیر می‌باشد:

<sup>1</sup> Irrotational

<sup>2</sup> Dielectric force

<sup>3</sup> Coulomb force

$$h_{\alpha}(x + e_{\alpha}\delta t, t+\delta t) - h_{\alpha}(x, t) = -\frac{1}{\tau_h} [h_{\alpha}(x, t) - h_{\alpha}^{eq}(x, t)] \quad (14)$$

که در آن  $h_{\alpha}^{eq}(x, t)$  به صورت زیر است:

$$h_{\alpha}^{eq} = \omega_{\alpha} U \quad (15)$$

زمان آسایش<sup>۱</sup> برابر است با [۴]:

$$\tau_h = 3\sigma + 0.5 \quad (16)$$

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

$$U = \sum_{\alpha} h_{\alpha} \quad (17)$$

شرایط مرزی بکار گرفته شده به این شرح است: دیواره‌ها عایق میدان الکتریکی هستند بجز الکترودهای میدان الکتریکی. روی دیواره‌ها شرط عدم لغزش<sup>۲</sup> برقرار است [۱۷]. برای ورودی جریان برای تابع توزیع  $g$  شرط مرزی سرعت برای مرز جریان برقرار می‌باشد [۱۸]. برای خروجی جریان، که مرز باز<sup>۳</sup> می‌باشد؛ 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  $u_d$  مشخص است. در خروجی کانال، فشار ثابت فرض شده است. سرعت روی دیواره‌ها<sup>۴</sup> صفر است. پتانسیل الکتریکی برای الکتروده بالا و پایین به صورت زیر لحاظ شده است:

$$E_0 = \frac{U_{upper\ electrode} - U_{lower\ electrode}}{w_d} \quad (18)$$

$$U_{upper} - U_{lower} = E_0 w_d \quad (19)$$

$$U_{upper} = \frac{E_0 w_d}{2}, U_{lower} = -\frac{E_0 w_d}{2} \quad (20)$$

### ۳- اعتبارسنجی

به دو روش اعتبارسنجی انجام گرفته است؛ در روش اول، برای بررسی 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 ۱۵۰-۱۰۰ در واحد لتیس استفاده شده است. سیلندرهایی با شعاع‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. برای حل از زمان آرامش  $\tau_d = \tau_g = 1$  استفاده شده است که لزجت  $\nu = 0.16667$  را نتیجه می‌دهد.

<sup>1</sup> Relaxation time

<sup>2</sup> Non-slip

<sup>3</sup> Open boundary

<sup>4</sup> Non-wetting wall

<sup>5</sup> Laplace

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

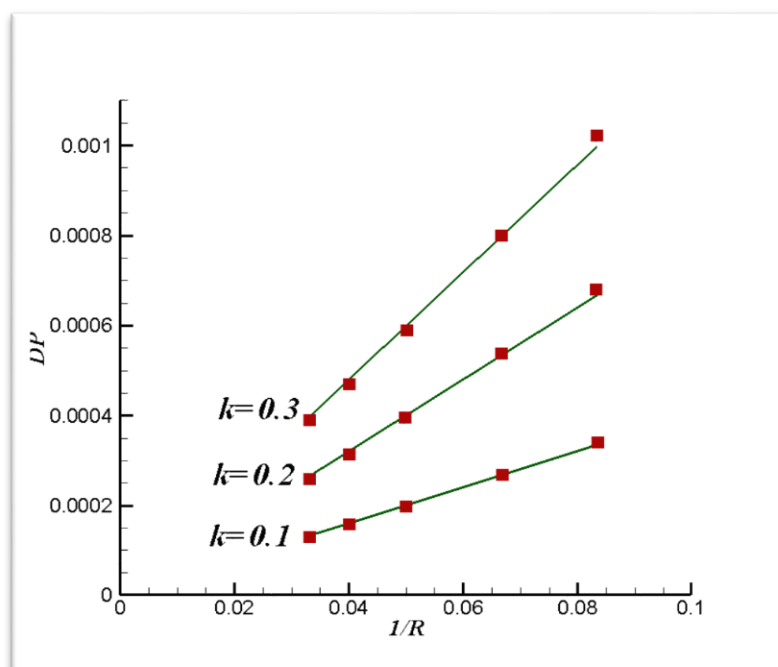
$$\Delta p = p_{in} - p_{out} = \frac{2\sigma}{R} \quad (21)$$

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:

$$\sigma = k \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 dz, \quad (22)$$

که در آن، در رابطه بالا  $z$  راستای عمود بر مرز مشترک می‌باشد. قابل مشاهده است که نتایج در مقایسه با نتایج تحلیلی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

روش دوم، تشکیل قطره با دو قطره ثابت است. زمانی که دو قطره سیال با سرعت ناچیز به یکدیگر نزدیک می‌شوند، نیروهای وندروالس<sup>۱</sup> باعث نیروی کشش بین دو قطره شده و پل سیال<sup>۲</sup> بین دو قطره تشکیل می‌گردد. پل سیال به آرامی بوسیله نیروی کشش سطحی بزرگتر می‌شود. این روند ادامه دارد تا زمانی که دو قطره یکی شده و سطح مقطع حداقل را نتیجه می‌دهند (شکل (۳)).



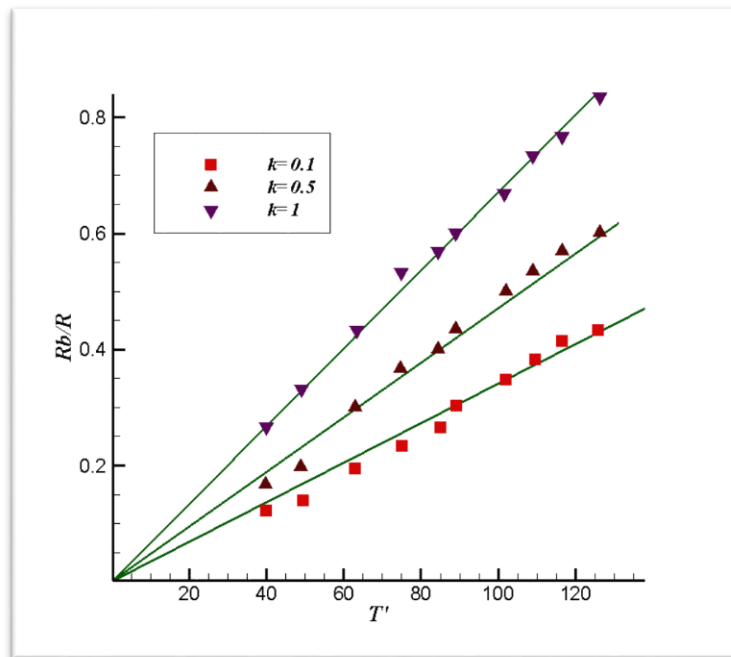
شکل ۱- اعتبارسنجی قانون لاپلاس برای یک سیلندر سیال ( $\rho_g = 0.1, \rho_d = 0.1, \tau = 1$ ).

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

<sup>2</sup> Liquid Bridge

برای شبیه سازی این مدل فیزیکی از میدان شبکه (لتیس)  $100 \times 100$  استفاده شده است که در این حل عددی گام مکانی و زمانی برابر واحد  $\delta_t = \delta_x = 1$ ،  $\tau = 1$  و شعاع هر قطره معادل  $R=12$  می باشد 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 برشی ( $k=0.1, k=0.5, k=1$ ) استفاده می شود. در ابتدا دو قطره هم اندازه در کنار یکدیگر قرار گرفته اند (بدون تلاقی و فاصله 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.

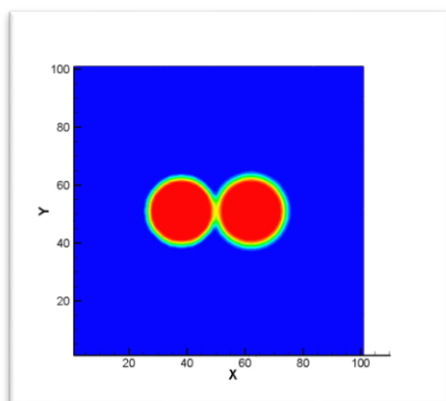
گرادیان جرم<sup>۱</sup> در هر نقطه منجر به اعمال نیروی وندروالس شده و این نیرو دلیل شروع روند یکی شدن دو قطره می باشد. دو قطره به آرامی به یک قطره ترکیبی تبدیل می شوند. دو قطره بعد از ۴۵۰۰۰ گام زمانی کاملاً یک قطره جدید تشکیل داده اند.



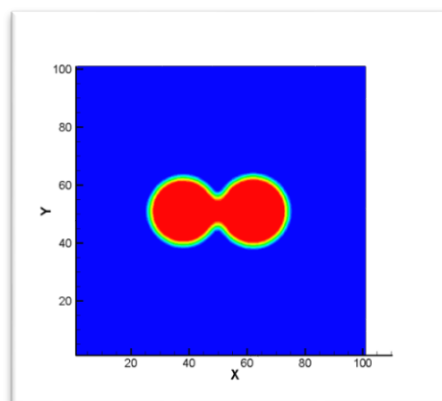
**شکل ۲-** رشد شعاع پل رابط بر حسب جذر زمان برای مقادیر متفاوت تنش سطحی (خطوط راست نشان دهنده حل تحلیلی ایگز می باشد).

<sup>1</sup> Mass Gradient

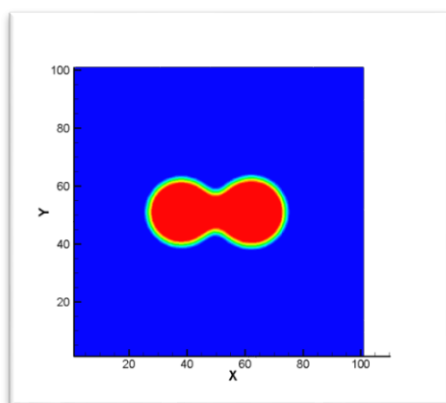




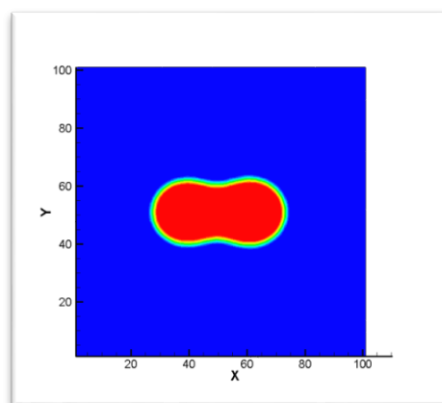
T=0



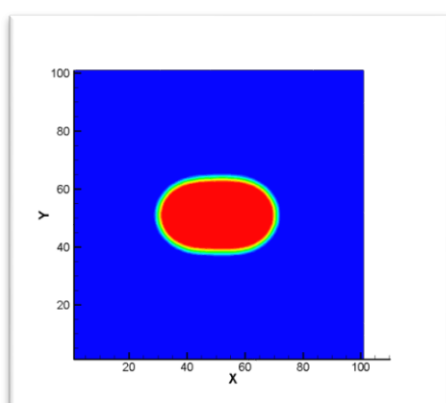
T=2,500



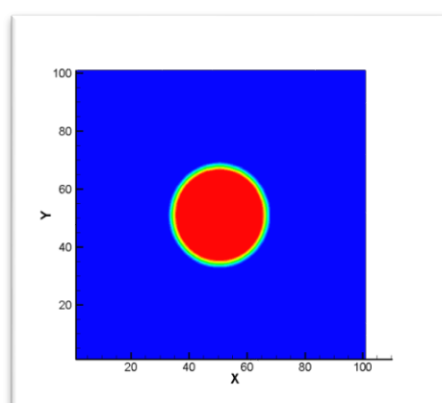
T=70,000



T=14,400



T=25,000



T=45,000

شکل ۳- یکی شدن دو قطره ثابت در طی زمان ( $k = 1, \tau = 1$ )

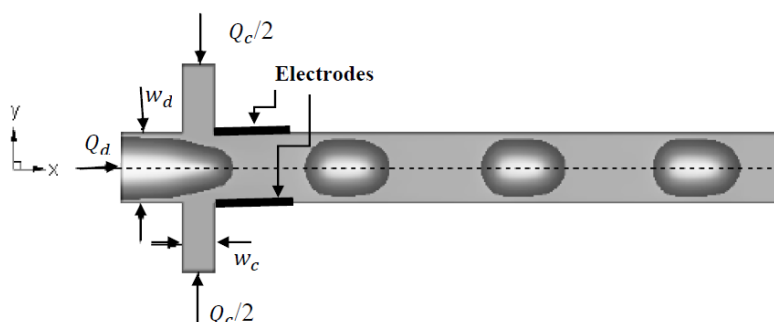
ایگزرها<sup>۱</sup> و همکارانش (۱۹۹۹) فیزیک یکی شدن دو قطره ثابت توسط نیروی تنش سطحی را به صورت تحلیلی و عددی (با حل معادله استوکس) مورد بررسی قرار دادند. ایگزرها پیش‌بینی کرد که رشد قطر پل رابط بین دو قطره به صورت تابع توانی<sup>۲</sup> با زمان رابطه دارد.

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 ایگزرها (خط راست در نمودار) مطابقت دارد. این نتایج برای رینولدزهای پایین (بر طبق تعریف ایگزرها رینولدز از مرتبه (۱) و بالاتر) صادق می‌باشند.

با تغییر تنش سطحی رابطه خطی بین شعاع پل رابط و جذر زمان مشکلی پیدا نمی‌کند و تنها روند تشکیل قطره واحد تسریع می‌یابد. این تسریع تشکیل قطره واحد با رابطه ایگزرها 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 می‌تواند تحت تاثیر خطای اندازه‌گیری (شعاع پل رابط از روی کانتور چگالی) ایجاد شده باشد. رابطه ایگزرها برای رشد پل رابط برای شرایط  $R_b/R \leq 0.35$  ارائه شده است که این می‌تواند دلیل دیگری برای اختلاف نتایج باشد. بنابراین برای  $R_b/R \geq 0.35$  نتایج از دقت لازم برخوردار نمی‌باشند.

#### ۴- توضیح مساله

نمای شماتیک میکروکانال متقاطع مورد استفاده در این پژوهش را در شکل (۴) مشاهده می‌کنید. میکروکانال شامل یک کانال اصلی با عرض  $w_c = 200 \mu m$  و دو کانال جانبی با عرض یکسان و مشابه  $w_a = 100 \mu m$  می‌باشد. همانطور که در این شکل نمایان است فاز پراکنده (آب) از کانال اصلی وارد می‌شود و فاز پیوسته (روغن) به کانال‌های فرعی (بالا و پایین) تزریق می‌شود.



شکل ۴- نمای شماتیک میکروکانال متقاطع مورد استفاده در این پژوهش

<sup>1</sup> Eggers

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

جهت بررسی نیروهای مختلف در فرایند تشکیل قطره از اعداد بی بعد شامل تنش سطحی، ویسکوزیته و دانسیته، مانند رینولدز، موینگی<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 شده است. تعریف این پارامترها و نیز زمان بی بعد  $t$  و مقادیر لحاظ شده در کد به شرح زیر است [۴]:

$$Ca = \frac{U_c \eta_c}{\gamma} \quad (23)$$

$$\eta_c = \nu \rho_c \quad (24)$$

$$Re = \frac{U_d D}{\nu} \quad (25)$$

$$Q = \frac{Q_d}{Q_c} \quad (26)$$

$$t = T \left( \frac{u_c}{w_c} \right) \quad (27)$$

سایز قطرات تشکیل شده در میکروکانال پیرو تئوری پی باکینگهام<sup>۴</sup> می تواند توسط چهار عدد بی بعد تعریف شود:

$$d = f \left( Ca, Re, Q, \frac{\eta_d}{\eta_c} \right) \quad (28)$$

## ۵- نتایج

تحلیل نتایج در دو بخش با حضور میدان الکتریکی و بدون آن انجام گرفته است. در قسمت اول، بطور مختصر روند تشکیل قطره بدون حضور میدان الکتریکی را بررسی خواهیم کرد و نتایج حاصل در غالب کانتورهایی نشان داده شده است.

### ۵-۱- فرایند تشکیل قطره بدون حضور میدان الکتریکی

فرایند تشکیل قطره بطور کلی دارای سه مرحله می باشد که در شکل (۵) نشان داده شده است: الف- انبساط<sup>۵</sup>، ب- باریک شدگی و فرایند اختناق قطره<sup>۶</sup>، ج- شکل گیری نهایی<sup>۷</sup>

<sup>1</sup> Capillary number

<sup>2</sup>  $Q_d$

<sup>3</sup>  $Q_c$

<sup>4</sup> Buckingham's Pi theorem

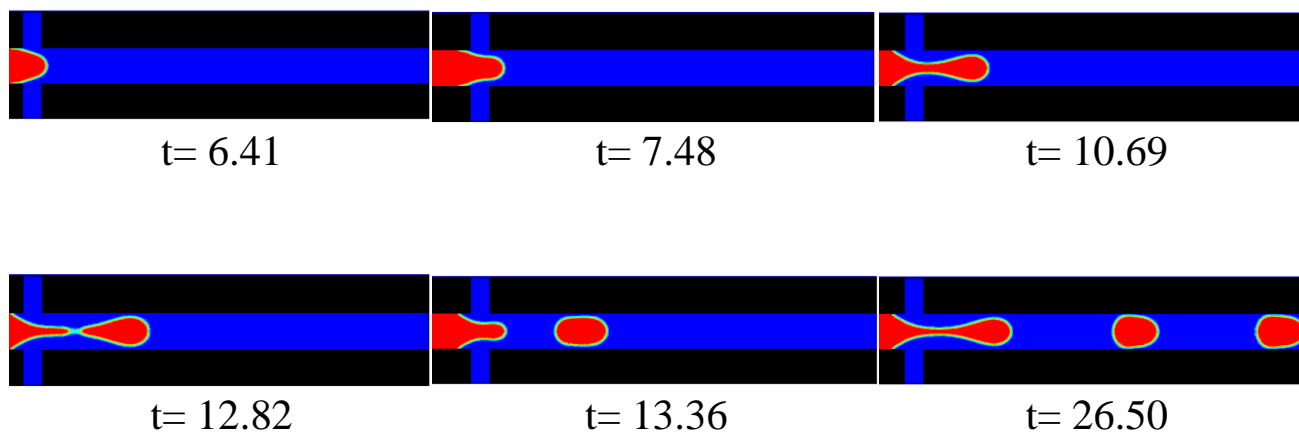
<sup>5</sup> Expansion

<sup>6</sup> Necking

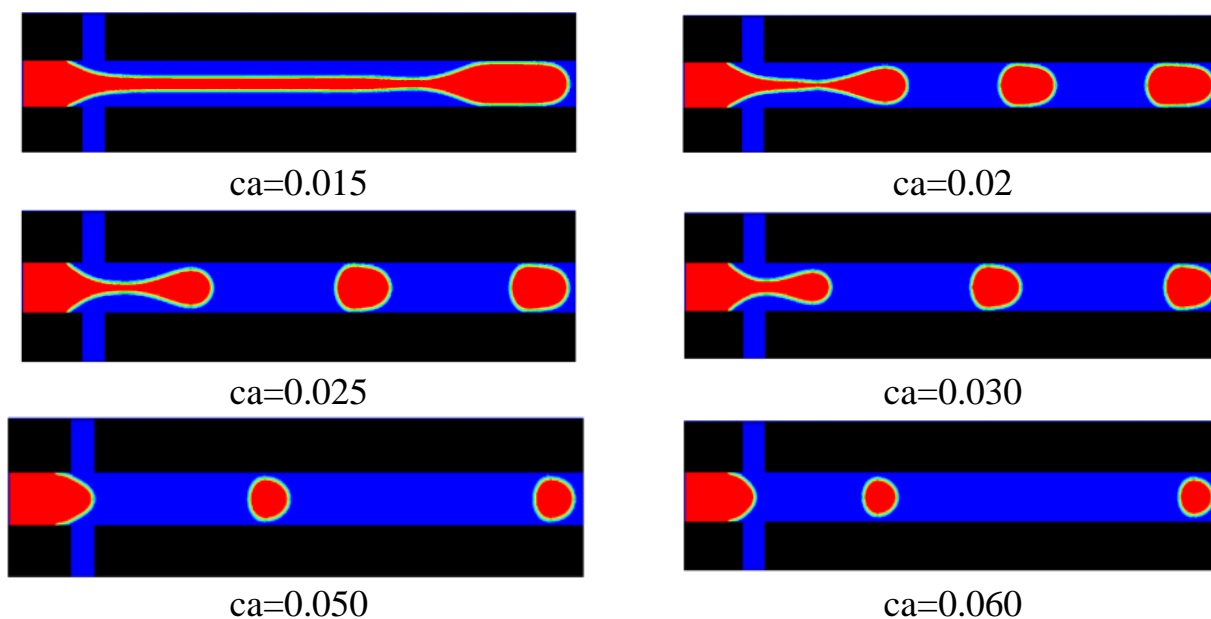
<sup>7</sup> Figuration

## ۵-۱-۱- تاثیر عدد مویینگی

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 می‌شود. 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  $Ca=0.025$  همچنان دو قطره داریم که قطره سوم که در  $Ca=0.02$  آستانه تشکیل قرار داشت، در ناحیه گلوگاه به جای نزدیک شدن به آستانه جدایش در حال عقب نشینی به سمت سیال پیوسته است. در واقع می‌توان گفت که در اعداد مویینگی پایین، با افزایش مویینگی تعداد قطره‌ها نسبتاً رو به افزایش است، اما از  $Ca=0.02$  به بعد با افزایش عدد مویینگی فاصله بین قطرات بیشتر و بیشتر می‌شود و روند تشکیل قطره رو به کند شدن می‌رود. در واقع در عدد مویینگی بزرگتر، فاصله بین دو قطره همسایه افزایش می‌یابد. همانطور که در نتایج پژوهش گارستکی و همکارانش [۱۹] آمده است و در شکل (۶) نیز مشهود است، می‌توان گفت که تشکیل قطره در اعداد مویینگی پایین، بدلیل وجود اختلاف فشار در ناحیه گلوگاه قطره است، اما با افزایش عدد مویینگی، با کمک نیروهای ویسکوز بر تنش سطحی غالب می‌آید و قطره تشکیل می‌شود.



شکل ۵- فرایند تشکیل قطره در شرایط عدم وجود میدان الکتریکی با در نظر گرفتن  $Re=0.085$ ,  $Ca=0.025$



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

همچنین چنانچه از مقایسه  $Ca=0.07$  با اعداد مویینگی کوچکتر مشاهده می‌شود، 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 در واقع افزایش کشش سطحی جدایش را به تعویق انداخته است. همچنین مشهود است که نیروی بین ذرات بیشتر شده و در ناحیه گلوبی افزایش داشته است و در نتیجه اندازه قطره تشکیل شده نیز افزایش یافته است. نتیجتاً 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 تأثیراتی بوجود می‌آید.

## ۵-۲- تحلیل و بررسی نتایج با وجود میدان الکتریکی

در این قسمت تأثیر میدان الکتریکی بر تشکیل قطره را در شدت میدان‌های مختلف  $E_0$  مشاهده خواهیم کرد. فاصله بین دو الکترود به اندازه عرض کانال اصلی می‌باشد، و داریم:

$$E_0 = \frac{U_{upper electrode} - U_{lower electrode}}{W_d} \quad (22)$$

که  $U$  پتانسیل اعمالی و  $W$  عرض کانال می‌باشد. فرض ما اینست که سیال غیر قابل تراکم<sup>۱</sup> می‌باشد و در اینجا نسبت ضریب گذردهی مختلف در نظر گرفته شده است و تأثیرات آن روی تشکیل قطره در غالب کانتورهای

<sup>1</sup> Incompressible

قابل تحلیل و مشاهده می‌باشد. در اینجا منظور از  $\epsilon_c$  ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> فاز پیوسته و  $\epsilon_d$  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 در شرایط 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 باردار کردن ذره ندارد. در حقیقت همه ذرات، در حضور میدان الکتریکی، فعالیت دی-الکتروفورسیس<sup>۴</sup> از خود 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 الکتروود قرار دارند، باردار شده و تحت میدان الکتریکی به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت می‌کنند و بدین ترتیب این نیرو تاحدی جایگزین نیروی کشش سطحی و لزجت شده و قطره به سمت الکتروودها کشیده می‌شود.

بار الکتروستاتیک از توزیع بارهای مثبت و منفی در فصل مشترک جامد و مایع ناشی می‌شود. بار الکتروستاتیک روی سطح ذره معادل مجموع بار یون‌های مخالف در داخل قشر نازک مایع در اطراف سطح ذره می‌باشد که مجموعاً لایه مضاعف الکتریکی را شکل می‌دهند. این موضوع باعث می‌شود که ناحیه کشیدگی<sup>۶</sup> قطره کوتاه‌تر شود و بدین ترتیب قطره زودتر جدا شود. بنابراین می‌توان گفت که با اعمال میدان الکتریکی، فرایند تشکیل قطره سریع‌تر رخ می‌دهد. در حقیقت با کشیده شدن قطره به سمت الکتروودها فشار پشت قطره افزایش یافته و فشار در ناحیه جلو کمتر می‌شود که باعث کاهش طول گلوگاه و جدا شدن قطره شده و روند تشکیل قطره را تسریع می‌بخشد و بدین ترتیب تعداد قطرات نیز افزایش می‌یابد. در این بین پارامترهای دیگری از جمله عدد مویبینگ نیز نقش مهمی دارند که در ادامه به تحلیل و بررسی آن‌ها می‌پردازیم.

<sup>1</sup> Permittivity

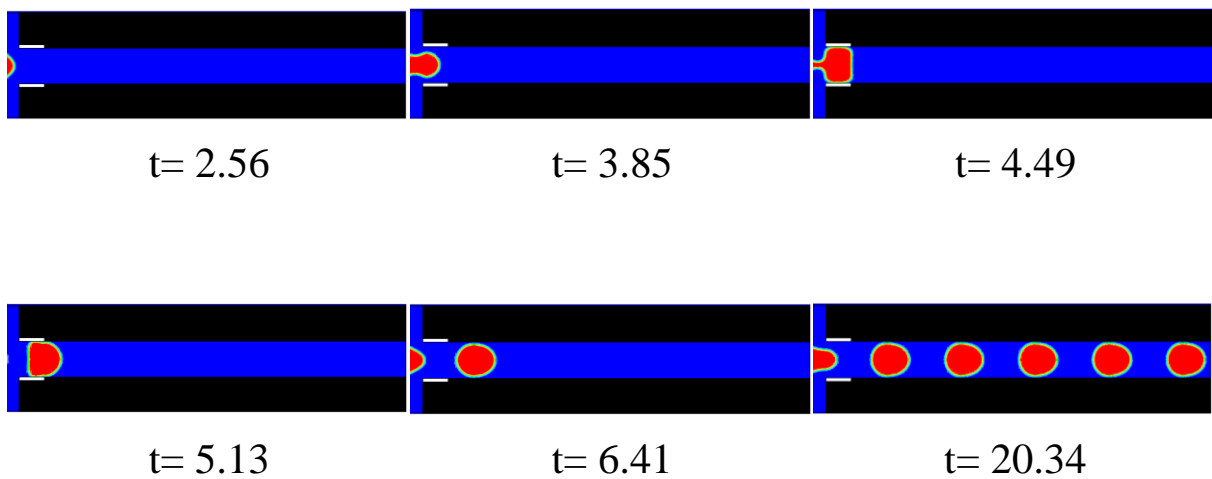
<sup>2</sup> Di electrophoresis forces

<sup>3</sup> Di electrophoresis forces

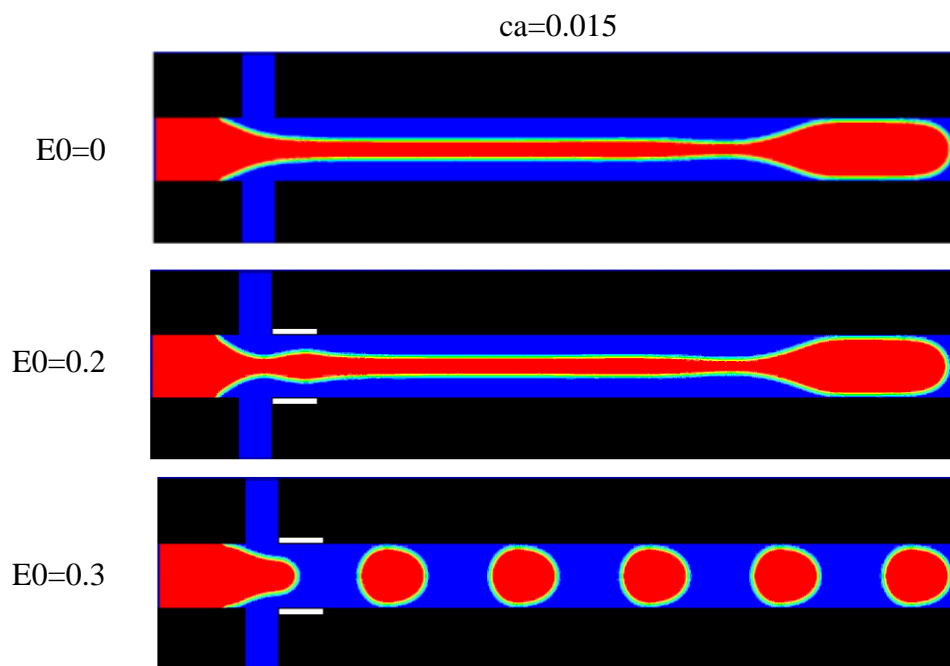
<sup>4</sup> Di electrophoretic activity

<sup>5</sup> Medium and particles' electrical properties

<sup>6</sup> Necking



شکل ۷- فرایند تشکیل قطره با اعمال میدان الکتریکی و با احتساب  $E_0=0.3$



شکل ۸- تاثیر تغییرات میدان الکتریکی  $E_0$  در عدد مویبگی ۰,۰۱۵

### ۵-۲-۲- بررسی تاثیر شدت میدان الکتریکی در عدد مویبگی ثابت

یک قطره سیال که ذاتا کرووی شکل است، بخاطر تنش سطحی اش، هنگامی که تحت تاثیر یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی قرار می گیرد، تغییر شکل می دهد و تغییر شکل آن بستگی به مشخصات الکتریکی<sup>۱</sup> یا مغناطیسی<sup>۲</sup> قطره<sup>۳</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

با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها از جمله:

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

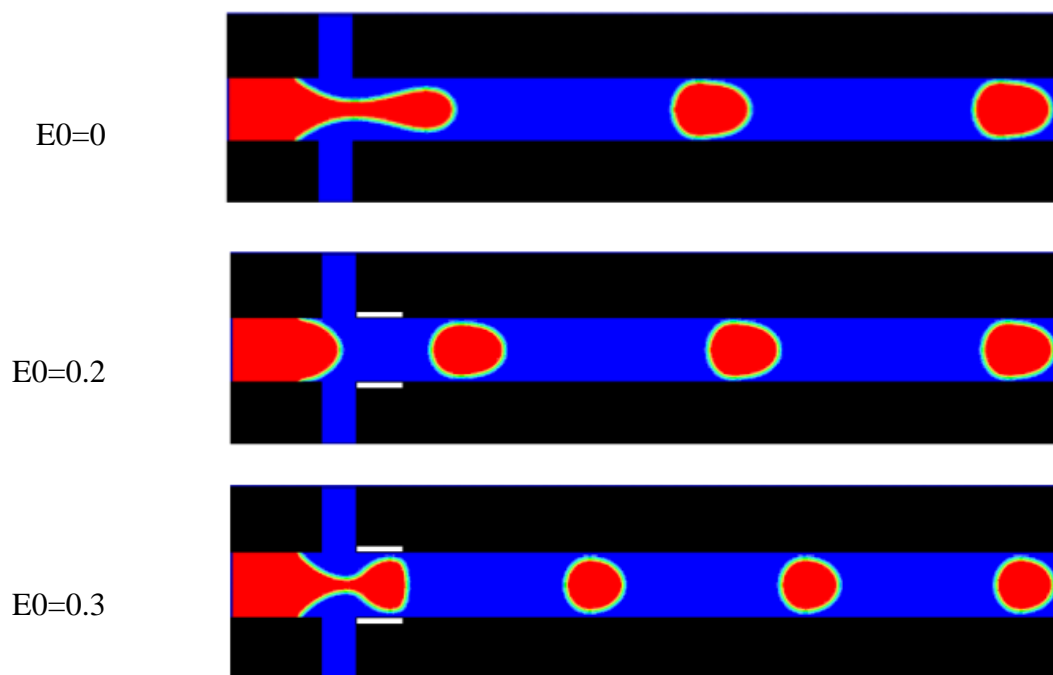
روند تغییرات شدت میدان الکتریکی  $E_0$  را بررسی می‌کنیم.

در شکل (۸) تشکیل قطره را در  $Ca=0.015$  و در شرایط عدم حضور میدان ( $E_0 = 0$ ) و نیز در  $E_0 = 0.2$  و  $E_0 = 0.3$  را می‌توان مشاهده و مقایسه کرد. مشهود است که با اعمال میدان الکتریکی در  $E_0 = 0.2$  قطره به سمت میدان کشیده شده است ولی تعداد قطره‌ها همچنان تغییری نکرده است که نشان از عدم تاثیر میدان در این شدت میدان الکتریکی دارد. با افزایش بیشتر میدان یعنی در  $Ca=0.015$  و  $E_0 = 0.3$  قطره کاملاً تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار گرفته است و تعداد قطرات به وضوح 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 کاملاً تحت تاثیر میدان الکتریکی قرار گرفته است و تعداد قطرات به وضوح افزایش یافته است. با افزایش میدان، به وضوح ملاحظه می‌شود که ناحیه گلوگاه نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و قطره الکترودها را لمس کرده است و شکل آن کاملاً از حالت کروی شکل خارج شده است و ناحیه گلویی نسبت به حالتی که میدان الکتریکی وجود ندارد، بسیار کوچکتر است و در نتیجه فشار پشت قطره بیشتر و فشار، در جلو قطره کمتر می‌شود و مقاومت سیال در برابر نیروهای الکتروفورسیس کاهش یافته و با غلبه بر نیروی لزجت سیال فاز پراکنده، نیروهای جاذبه مولکولی و تنش سطحی قطره، در نهایت جدایش رخ می‌دهد و قطره تشکیل می‌شود، همچنین مشاهده می‌شود که سایز آن‌ها کاهش یافته است. اما در مقایسه با اعداد موینگی کمتر، تعداد قطرات تشکیل شده کمتر می‌باشد.



$$Ca=0.03$$



شکل ۹- تاثیر تغییرات میدان الکتریکی  $E_0$  در عدد مویینگی ۰,۰۳

بعلاوه روند تاثیرگذاری میدان بر تسریع تشکیل قطره نیز کندتر شده است و تعداد قطرات نسبت به اعداد مویینگی کوچکتر کاهش یافته است. با این حال، همچنان مشاهده می‌شود 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  $E_0 = 0$  و  $Ca = 0.03$  با  $E_0 = 0.3$  و  $Ca = 0.03$  ملاحظه می‌شود، تعداد قطرها همچنان با وجود 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 می‌شود.

### ۵-۲-۳- بررسی تاثیر تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی و میزان رسانایی بر تشکیل قطره

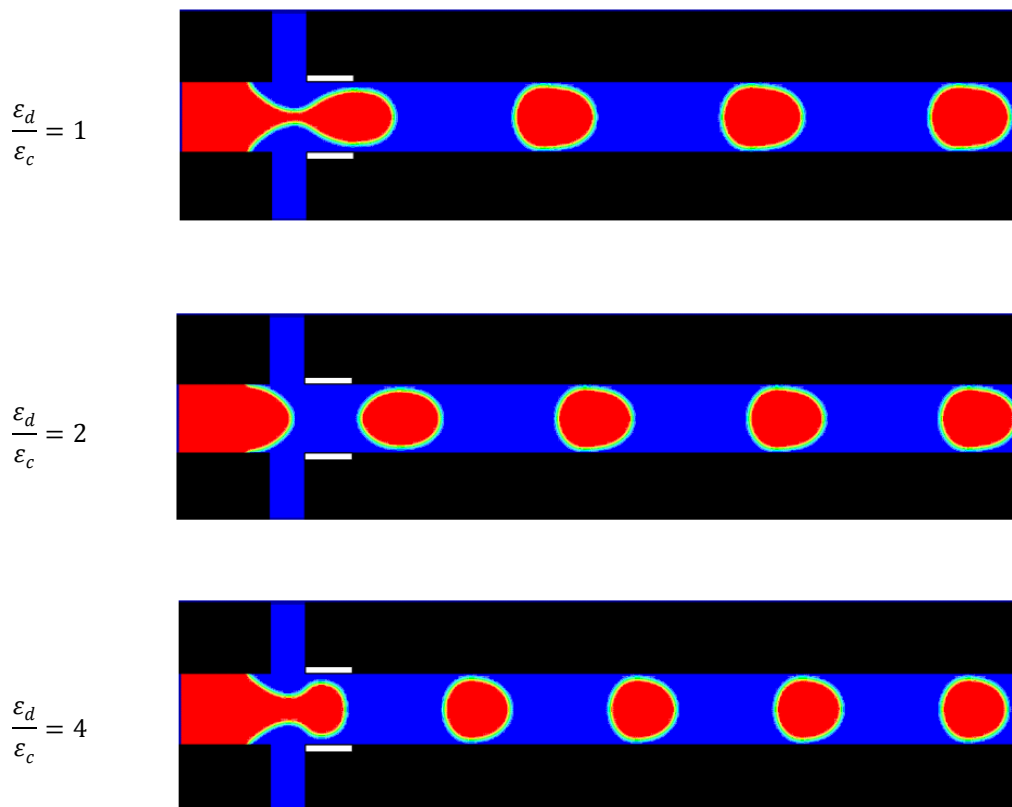
شکل (۱۰) و (۱۱) تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی<sup>۱</sup> و نیز رسانایی<sup>۲</sup> را فرض  $Re=0.085$  نشان می‌دهد. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد زمانی که ضریب گذردهی الکتریکی افزایش می‌یابد، سایز قطره کاهش پیدا می‌کند. و همچنین در شکل (۱۰) با مقایسه کانتور  $\frac{\epsilon_d}{\epsilon_c} = 1$  با کانتور  $\frac{\epsilon_d}{\epsilon_c} = 4$  مشاهده می‌شود 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 فشار بیشتر بر روی گلوبی قطره می شود.

<sup>1</sup> Permittivity

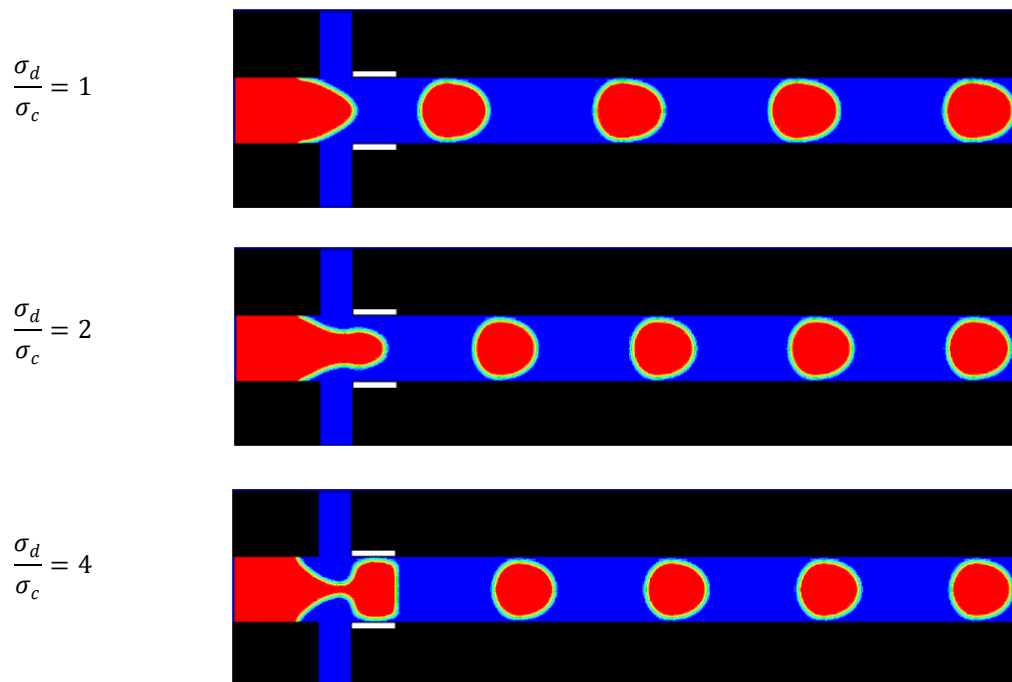
<sup>2</sup> Conductivity

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 پیوسته 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. در نهایت 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.



شکل ۱۰- تاثیر  $\epsilon_d$  با فرض:  $Re=0.085$ ,  $\frac{\sigma_d}{\sigma_c} = 5$ ,  $E_0 = 0.3$ ,  $Ca = 0.02$



شکل ۱۱- تاثیر  $\sigma_d$  با فرض:  $Re=0.085$ ,  $\frac{\sigma_d}{\sigma_c} = 5$ ,  $E_0 = 0.3$ ,  $Ca = 0.02$

## 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., Steegmans, 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).

## فهرست نمادهای انگلیسی

- $C_s$  : سرعت صوت سیال  
 $g$  : تابع توزیع  
 $f$  : تابع توزیع  
 $E$  : میدان الکتریکی  
 $F$  : نیروی الکتریکی اعمال شده بر المان سیال  
 $U$  : پتانسیل  
 $u_d$  : سرعت ورودی فاز پراکنده  
 $u_c$  : سرعت ورودی فاز پیوسته  
 $\Delta p$  : اختلاف فشار  
 $R$  : شعاع قطره  
 $k$  : پارامتر تنش سطحی  
 $t$  : زمان بی بعد  
 $w_c$  : عرض کانال اصلی  
 $w_d$  : کانال جانبی  
 $Re$  : رینولدز  
 $Ca$  : عدد موینگی  
 $Q_c$  : دبی حجمی ورودی برای سیال فاز پیوسته  
 $Q_d$  : دبی حجمی ورودی برای سیال فاز پراکنده  
 $\delta_t$  : گام زمانی  
 $\delta_x$  : گام مکانی  
 $\rho$  : چگالی  
 $\sigma$  : تنش سطحی  
 $\tau_h$  : زمان آسایش  
 $\nu$  : 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.