

## شکست قطرات با اندازه‌های غیرهم‌اندازه در میکروکانال Y-شکل متقارن

ایمان جعفری<sup>۱</sup>، کیوان فلاح<sup>۲\*</sup> و جواد علی نژاد<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۰ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶</p>	<p>سیستم‌های میکروسیالی مبتنی بر قطرات کاربردهای علمی و صنعتی متنوعی مانند مهندسی بیولوژیک، آزمایشگاه روی تراشه، انتقال دارو و کپسول‌سازی مشاهده می‌شود. در مطالعه حاضر، شکست قطرات مادر در یک میکروکانال Y-شکل متقارن تحت میدان الکتریکی به صورت عددی بررسی می‌شود. برای این رویکرد، یک مدل عددی ۲ بعدی بر اساس روش تنظیم سطح توسط نرم‌افزار چند فیزیکی کامسول انجام می‌شود که بر اساس روش عناصر محدود است. برای صحت‌سنجی تحقیق حاضر، نتایج با مقالات قبلی ارزیابی می‌شود. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌های فعلی با مطالعات منتشر شده بسیار مطابقت دارند. دو روش برای اعمال میدان الکتریکی در نظر گرفته شده است: میدان الکتریکی متقارن و میدان الکتریکی نامتقارن. در میدان الکتریکی متقارن مشاهده می‌شود که قطره مادر در مقایسه با مورد بدون میدان الکتریکی در حضور میدان الکتریکی سریعتر می‌شکند. همچنین، قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه‌های مساوی تقسیم می‌شود. برای میدان الکتریکی نامتقارن، نتایج نشان می‌دهد که قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه‌های نابرابر تقسیم می‌شود. علاوه بر این، یک الگوی جریان جدید به نام الگوی ترکیبی برای میدان الکتریکی نامتقارن قطره دیده می‌شود. به اضافه، یک عدد کاپیلاری الکتریکی بحرانی برای هر اندازه طول بی‌بعد قطره وجود دارد که در مقدار بیشتر از آن، قطره نمی‌شکند.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b> جریان دوفازی، میکرو کانال Y-شکل متقارن، شکست قطره، نرم‌افزار کامسول، تنظیم سطح.</p>	

### ۱-مقدمه

دستگاه‌های میکروفلوئیدیک به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان از جمله کاهش هزینه‌های ساخت افزاره، نیاز کمتر به وسایل آنالیز، کاهش مصرف واکنشگرها و سرعت عمل بیشتر تراشه کابردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف از جمله در صنایع داروسازی، شیمیایی، پتروشیمی، مهندسی بیولوژیک، آزمایشگاه روی تراشه، انتقال دارو، کپسول‌سازی و غیره یافته‌اند [۱-۴]. از مباحث مهم در حوزه میکروفلوئیدیک تولید، ادغام و شکست قطرات می‌باشد که برای این منظور از هندسه‌های متفاوتی، مانند اتصال T-شکل، Y-شکل، اتصال هم‌محور، اتصال متقاطع و غیره

برای تشکیل قطرات منفرد در میکروکانال‌ها استفاده می‌شود.

تاکنون تحقیقات فراوانی در زمینه‌ی حرکت قطرات به دلیل کاربردهای گسترده دستگاه‌های میکروفلوئیدیک انجام شده است [۵-۲۰]. لینک و همکاران [۵] دو روش گوناگون برای شکستن قطرات مادر به قطرات دختر را معرفی نمودند. در روش اول، برای شکست قطرات با اندازه‌های غیرهم‌اندازه، از یک اتصال T-شکل با اندازه‌های طول‌های شاخه‌های غیریکسان استفاده نمودند. در روش دوم، یک مانع مربعی را برای شکست قطراتی که در اتصال T-شکل بوجود آمده‌اند، بکار بردند. آنها پی بردند که شکست قطرات در محل اتصال

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: keyvan.fallah@gmail.com

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

عددی فرآیند حرکت و شکست یک قطره ویسکوالاستیک در یک میکروکانال Y-شکل را مطالعه نمودند. آنها دریافتند که اثرات ویسکوالاستیکی قطره سبب می‌شود که شکست قطره نسبت به قطره نیوتنی به تاخیر بیفتد ولی قطره با شتاب بیشتری حرکت می‌کند. وانگ و همکاران [۱۳] بصورت آزمایشگاهی حرکت حباب در اتصال T-شکل متقارن را مطالعه نمودند و نشان دادند که شکست حباب در طی دو مرحله فشردگی و ایجاد گردنی صورت می‌پذیرد. در مرحله فشردگی یک تونل بین نوک حباب و دیواره میکروکانال تشکیل می‌شود که تغییر شکل حباب قبل و بعد از تشکیل تونل متفاوت می‌باشد که به بررسی پارمترهای مهمی چون طول نهایی حباب پرداختند.

در سالهای اخیر روش شبکه بولتزن برای شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت بطور موفق به کار گرفته شده است [۱۴-۱۷]. فلاح و طیبی [۱۶] به کمک شبیه‌سازی به کمک روش شبکه بولتزن روشی مبتنی بر اصلاح هندسه میکروکانال T-شکل بمنظور تولید قطرات با اندازه مشخص پیشنهاد نمودند اما روش آنها مبتنی بر شکست قطرات نیست. در مسائل مربوط به شکست قطرات، یک قطره با طول اولیه وجود دارد که توسط مایعی حمل می‌شود و این قطره بدلیل عبور از محل اتصال به دو یا چند قطره با اندازه‌های برابر یا نابرابر تقسیم می‌کند. قادری و همکاران [۱۷] یک روش جدید برای تولید قطرات فروسیال با اندازه یکسان در میکروکانال هم‌مرکز ارائه نمودند. آنها نشان دادند که با اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت می‌توان قطرات با اندازه دلخواه تولید نمود. عیب این روش این است که مانند روش پیشنهادی فلاح و طیبی [۱۶] مربوط به تولید قطرات می‌باشد و قطرات تولید شده اندازه‌های یکسانی دارند.

ابوطالبی و همکاران [۱۸] بصورت عددی یک راهکار جدید مبنی بر استفاده از میدان مغناطیسی غیریکنواخت در یکی از شاخ‌های میکروکانال بمنظور شکست قطرات فروسیال با اندازه متفاوت در میکروکانال T-شکل متقارن پیشنهاد نمودند. آنها نشان دادند که با استفاده از یک منبع انرژی خارجی به راحتی می‌توان اندازه قطرات شکسته شده را کنترل نمود البته عیب اصلی این روش این است که هزینه‌بر بوده و از طرفی پیچیدگی‌های مربوط به ساخت، استفاده از آنها را با مشکلاتی همراه می‌کند. بدرام و همکاران [۱۹] و کیانی مقدم و همکاران [۲۰] یک روش جدید برای شکست قطرات در میکروکانال T-شکل پیشنهاد نمودند. آنها نشان

T-شکل با وجود مانع برای ساخت قطرات کوچکتر بهتر عمل می‌کند ولی یکی از محدودیت‌های قرار دادن مانع این است که نیار به یک فرآیند جداگانه به منظور جداسازی قطرات با اندازه‌های متفاوت نیاز دارد. تینگ و همکاران [۶] از یک هیتر برای شکست قطرات مادر با اندازه‌های متفاوت در میکروکانال T-شکل متقارن استفاده نمودند. همچنین نشان دادند که در دمای بحرانی قطره دختر به طور کامل وارد شاخه‌ای که میدان حرارتی اعمال شده، می‌شود. عیب عمده این روش این است که از نظر حرارتی محدودیت وجود دارد زیرا دما از یک حدی بیشتر شود، باعث تغییر خواص فیزیکی سیال می‌شود. درمیل و تابلینگ [۷] شکست قطرات در اتصال T-شکل با زاویه دلخواه (در حقیقت اتصال Y-شکل) را بررسی نمودند. در این روش، زمان شکست با کاهش زاویه بین شاخه‌ها، کاهش می‌یابد اما عیب عمده این روش این است که نمی‌توان به نسبت شکست کم دست یافت. لشانسکی و پیسمن [۸] شکست قطرات در اتصال T-شکل متقارن را بصورت تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک تئوری تحلیلی بر مبنای معادلات فیلم نازک برای سیال اصلی که در فضای بین قطره و دیوار بالایی قرار دارند، انجام دادند و روابطی برای کم‌ترین ضخامت فیلم نازک و طول قطره در لحظه‌ای که در کانال پخش شده است، بدست آوردند. جولین و همکاران [۹] شکست قطرات در میکرو اتصال T-شکل را به صورت آزمایشگاهی در محدوده‌ی گسترده‌ای از اعداد کاپیلاری ( $10^{-1} < Ca < 10^{-4}$ ) بررسی نمودند. آنها برای اولین بار گزارش نمودند که اگر طول اولیه‌ی قطره از یک حد معین که آن را طول بحرانی قطره نامیدند، بیش تر شود، قطره در هر عدد کاپیلاری حتما می‌شکند. بدرام و همکاران [۱۰] به مقایسه شکست قطرات با اندازه‌های متفاوت در میکروکانال T-شکل متقارن و نامتقارن پرداختند. طبق بررسی انجام شده هر چه هندسه میکروکانال متقارن تر باشد، افت فشار کاهش می‌یابد. یکی از روش‌های موثر برای داشتن قطرات غیریکنواخت در میکروکانال T-شکل متقارن، تفاوت در طول کانالهای خروجی می‌باشد. افخمی و همکاران [۱۱] تاثیر عدد کاپیلاری و نسبت لزجت در فرآیند شکست حباب در میکروکانال T-شکل متقارن مطالعه نمودند و با ارائه‌ی توزیع فشار در شرایط مختلف شکست قطره، نشان دادند تئوری تحلیلی لشانسکی و پیسمن [۸] درست می‌باشد. وانگ و همکاران [۱۲] بصورت

که در روابط فوق،  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب بیان کننده چگالی، ویسکوزیته، بردار سرعت سیال و فشار هستند. بالانویس  $T$  بیان کننده علامت ترانهاده است.

$F$  در معادله (۲) معرف نیروهای اعمال شده است که بصورت زیر می باشد:

$$F = F_{\sigma} + F_g + F_e. \quad (4)$$

$F_{\sigma}$ ،  $F_g$  و  $F_e$  به ترتیب معرف نیروی کشش سطحی، نیروی وزن و نیروی الکتریکی وارده بر واحد حجم می باشند. این معادلات برای هر فاز با توجه به مقادیر چگالی و ویسکوزیته حل می شوند، اما برای پیگیری فصل مشترک این رابطه کافی نیست و به معادلات کمی نیاز است. در پژوهش حاضر از روش تنظیم سطح ( $\Phi$ ) برای پیگیری فصل مشترک استفاده شده است که بصورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \Phi) = \lambda \nabla \cdot \left( \epsilon \nabla \Phi - \Phi (1 - \Phi) \frac{\nabla \Phi}{|\nabla \Phi|} \right). \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\lambda$  و  $\epsilon$  پارامترهای تثبیت کننده عددی هستند.  $\lambda$  نشان دهنده پارامتر مقاداردهی اولیه دوباره و  $\epsilon$  تعیین کننده ضخامت سطح مشترک است.

## ۲-۲- معادلات الکترواستاتیک

جریان های الکتریکی پویا در الکترو هیدرودینامیک، بسیار کوچک هستند. از اینرو اثر مغناطیسی تولید شده صرف نظر می شود. در نتیجه، شدت میدان الکتریکی ( $E$ ) غیر چرخشی در نظر گرفته می شود [۲۲]:

$$\nabla \times E = 0. \quad (5)$$

بر اساس ویژگی های الکتریکی دو سیال شامل رسانندگی الکتریکی ( $\sigma$ )<sup>۱</sup> و گذردهی الکتریکی ( $\epsilon$ )<sup>۲</sup>، در جریان های دوفازی که تحت اثر میدان الکتریکی دارند، به سه گروه کلی نارسانا-نارسانا، رسانا-رسانا و نارسانا-رسانا تقسیم بندی می شوند [۲۲]. ماده کاملاً رسانا در طبیعت وجود ندارد اما بعضی از مواد در مقایسه با سایر رسانندگی بالایی دارند. در نتیجه مواد از نظر مقدار رسانندگی الکتریکی از کم به زیاد به سه گروه نارسانا، رسانا و نیمه رسانا و رسانای کامل دسته بندی می شوند [۲۳]. در مسائلی که دو سیال نیمه رسانا هستند، نیروی الکتریکی دارای دو مؤلفه عمود و مماس بر فصل مشترک است. در صورتیکه دو سیال

دادن که با قرار دادن یک شیر در یکی از شاخه های میکروکانال [۱۹] یا قرار دادن شیر در مرکز اتصال و با تغییر زاویه آن [۲۰] می توان قطرات با اندازه گوناگون تولید نمود اما مشکل اساسی این روش ها این است که با تغییر جنس سیالات نیاز به طراحی و ساخت یک میکروکانال جدید می باشد. ما و همکاران [۲۱] شکست قطرات ویسکوز در میکروکانال Y-شکل متقارن را بصورت تجربی مطالعه نمودند و چهار نوع رژیم جریان را مشخص نمودند. همچنین فرآیند شکست قطرات را به سه مرحله فشردگی، گذر و شکست سریع تقسیم بندی نمودند. عیب اصلی این روش این است که برای قطره با حجم زیاد، طول شاخه ها باید افزایش یابد و این هم هزینه ساخت و هم افت فشار سیستم را افزایش می دهد.

در مطالعه حاضر، جزئیات یک روش جدید و ساده بمنظور کنترل زمان شکست و شکست قطره با اندازه های متفاوت مورد مطالعه قرار می گیرد بطوریکه برخی از مشکلات بیان شده را ندارد. در این سیستم، تاثیر میدان الکتریکی متقارن و نامتقارن در فرآیند شکست قطره در میکروکانال Y-شکل متقارن مورد ارزیابی قرار می گیرد. با توجه به بررسی های انجام شده توسط نویسندگان تا کنون مسئله حرکت قطره تحت میدان الکتریکی در میکروکانال Y-شکل مورد بررسی قرار نگرفته است. بمنظور شبیه سازی مسئله حاضر از نرم افزار مولتی فیزیک کامسول مبتنی بر روش تنظیم سطح استفاده می شود. اثر پارامترهای مختلف از جمله طول اولیه بی بعد قطره و عدد کاپیلاری الکتریکی مورد مطالعه قرار می گیرد.

## ۲- معادلات حاکم

برای بررسی عددی مسائل الکترو هیدرودینامیک نیاز به حل معادلات جریان سیال و معادلات الکترواستاتیک می باشد.

### ۲-۱- معادلات جریان

معادله پیوستگی و ناویر-استوکس برای مسئله دوبعدی، ناپایا و تراکم ناپذیر که در این تحقیق در نظر گرفته شده است، به صورت زیر تعریف می شود:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + F. \quad (2)$$

<sup>2</sup> Electrical permittivity

<sup>1</sup> Electrical conductivity

معادلات فوق را می‌توان با در نظر گرفتن فرضیاتی ساده‌تر نمود و آن را حل نمود. برای تشخیص سیال نیمه‌رسانا و نارسانا از دو معیار زمان رهاسازی ویسکوزیته<sup>۳</sup> ( $t^v = \frac{\rho L_{ref}^2}{\mu}$ ) و زمان رهاسازی الکتریکی<sup>۴</sup> ( $t^E = \frac{\epsilon}{\sigma}$ ) استفاده می‌کنند [۲۶]. زمان رهاسازی ویسکوزیته بیانگر زمان لازم برای اثرگذاری نیروهای هیدرودینامیکی است. در طرف مقابل زمان رهاسازی الکتریکی معرف زمان لازم برای حرکت بارهای آزاد تحت میدان الکتریکی و به تعادل رسیدن در سیال می‌باشد. چگالی بار آزاد تحت زمان رهاسازی الکتریکی، در محیط اطراف شروع به محو شدن می‌کنند.

در مسئله پیش رو فرض بر مدل نارسانا کامل<sup>۵</sup> است. هنگامیکه هیچ یک از دو سیال در سیستم دوفاز دارای رسانندگی الکتریکی نباشند ( $\sigma = 0$ ) و همچنین شرط ( $t^E \gg t^v$ ) را ارضا کنند، آنگاه دو ماده نارسانا الکتریکی در نظر گرفته شده و در نتیجه بار الکتریکی آزاد وجود ندارد. این بدان معناست که ویژگی‌های هیدرودینامیکی سیال پیش از اثرگذاری میدان الکتریکی بار سیال عمل می‌کنند. در این مدل به دلیل عدم وجود بار الکتریکی آزاد ( $\rho^e = 0$ )، معادله ۱۳ به صورت معادله لاپلاسین پتانسیل الکتریکی ساده می‌شود [۲۴]:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0. \quad (14)$$

در این حالت نیروی الکتریکی سبب قطبیدگی مولکولها در فصل مشترک می‌شود و تنها شامل ترم اول در معادله ۱۱ می‌باشد:

$$\mathbf{F}^e = -\frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E}. \quad (15)$$

و جهت نیروی الکتریکی برای این مدل عمود بر سطح مشترک می‌باشد. این نیرو تنها زمانی وجود دارد که گرادیان گذردهی الکتریکی وجود داشته باشد.

### ۳- جزئیات شبیه‌سازی عددی حاضر

در تحقیق حاضر، فرآیند شکست قطره در میکروکانال Y-شکل تحت میدان الکتریکی یکنواخت بصورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مطالعه عددی حاضر از نرم‌افزار مولتی فیزیک کامسول استفاده می‌شود.

رسانای کامل یا هر دو نارسانا کامل باشند، نیروی الکتریکی به صورت عمود بر فصل مشترک دو سیال عمل می‌کند [۲۳].

تانسور تنش الکتریکی یا تانسور تنش ماکسول ( $\boldsymbol{\tau}^e$ ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\boldsymbol{\tau}^e = \epsilon \mathbf{E} \mathbf{E} - \frac{1}{2} \epsilon \left\{ 1 - \frac{\rho}{\epsilon} \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \right) \right\} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{I}. \quad (10)$$

که در آن،  $\mathbf{I}$  تانسور یکه می‌باشد. با اعمال عملگر دیورژانس نیروی حجمی الکتریکی بدست می‌آید:

$$\mathbf{F}^e = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}^e = -\frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \nabla \mathbf{E} + \rho^e \mathbf{E} + \nabla \cdot \left( \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \frac{\partial \epsilon}{\partial \rho} \rho \right). \quad (11)$$

$\rho^e$  معرف بارهای الکتریکی آزاد است. جمله اول سمت راست این معادله، بیانگر نیروی دی الکتریک می‌باشد که ناشی از غیرهمگن بودن اندازه گذردهی دو سیال می‌باشد. این نیرو در جهت عمود بر فصل مشترک دو سیال و به سمت سیال با گذردهی کمتر اعمال می‌شود [۵۳]. جمله دوم سمت راست معادله فوق، بیانگر نیروی کولمب است و عامل بوجود آمدن آن تاثیر میدان الکتریکی روی بارهای الکتریکی آزاد است. بارهای الکتریکی آزاد در سطح مشترک دو فاز جمع می‌شوند و باعث ایجاد نیروی مماسی الکتریکی می‌شود [۲۴]. ترم آخر در معادله ۱۱ معرف نیروی چگالی الکتروستریکشن<sup>۱</sup> می‌باشد که ناشی از تغییر خواص سیال نسبت به چگالی ماده است. برای سیال تراکم‌ناپذیر از این ترم صرف نظر می‌شود.

به منظور محاسبه نیروی الکتریکی ابتدا بایستی توزیع شدت میدان الکتریکی و در صورت نیاز مقادیر بارهای الکتریکی آزاد تعیین شوند. قانون گاوس<sup>۲</sup> که توزیع پتانسیل الکتریکی ( $V$ ) را به چگالی بار مرتبط می‌کند، به صورت زیر است:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho^e. \quad (12)$$

که در آن  $\mathbf{D}$  بیانگر جابه جایی الکتریکی می‌باشد. در این معادله، می‌توان شدت میدان الکتریکی را به وسیله توزیع پتانسیل الکتریکی  $\mathbf{E} = -\nabla V$  جایگزین نمود.

معادله بقای بار الکتریکی [۲۵] بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho^e}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \rho^e = -\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E}). \quad (13)$$

<sup>4</sup> Electric Relaxation Time

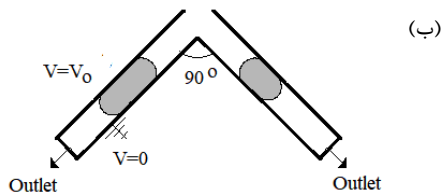
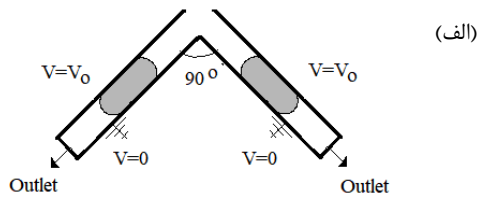
<sup>5</sup> Perfect Dielectric

<sup>1</sup> Electrostriction Force

<sup>2</sup> Gauss Law

<sup>3</sup> Viscosity Relaxation Time

میکروکانال (متقارن) و میدان الکتریکی فقط به زیرشاخه سمت چپ (نامتقارن) اعمال می‌شوند، را نشان می‌دهند.



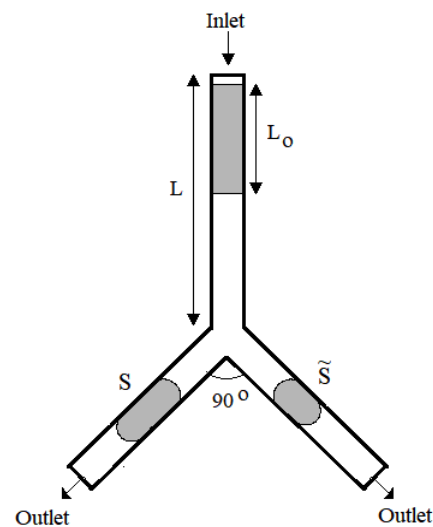
شکل ۲- دو حالت اعمال میدان الکتریکی در میکروکانال Y-شکل: (الف) اعمال میدان الکتریکی به هر دو شاخه فرعی (متقارن) و (ب) اعمال میدان الکتریکی به شاخه سمت چپ (نامتقارن).

در مسئله حاضر، پارامترهای فیزیکی مهم از جمله دانسیته ( $\rho_c$  و  $\rho_d$ )، ویسکوزیته ( $\mu_c$  و  $\mu_d$ ) طول اولیه قطره ( $L_0$ )، کشش سطحی بین دو فاز ( $\gamma$ )، پهنای کانال ( $w$ )، شدت میدان الکتریکی ( $E_0$ ) و ضریب نفوذ الکتریکی فاز گسسته و پیوسته ( $\epsilon_c$  و  $\epsilon_d$ ) می‌باشند. با استفاده از آنالیز ابعادی اعداد بی بعد حاکم عبارتند از: نسبت چگالی ( $\rho^* = \frac{\rho_d}{\rho_c}$ )، نسبت ویسکوزیته ( $\mu^* = \frac{\mu_d}{\mu_c}$ )، نسبت نفوذ الکتریکی ( $\epsilon^* = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_c}$ )، طول اولیه بی بعد قطره ( $L^* = L_0/w$ )، عدد کاپیلاری ( $Ca = \mu_d U_d / \gamma$ ) و عدد کاپیلاری الکتریکی ( $Ca_e = \frac{\epsilon_c E_0^2 R}{\gamma}$ ) می‌باشند. عدد کاپیلاری بیان کننده نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی می‌باشد و عدد کاپیلاری الکتریکی معرف نسبت نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی است. با توجه به اینکه خواص سیالات (جدول ۱) ثابت می‌باشند، نسبت چگالی، نسبت ویسکوزیته و نسبت نفوذ الکتریکی ثابت می‌باشند. پارامتر مهم دیگر، زاویه تماس بین قطره با سطح جامد می‌باشد. شایان ذکر است که در تحقیق حاضر، مقدار زاویه تماس ثابت و تقریباً نزدیک ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است.

#### ۴- بحث و ارائه نتایج

در این بخش، ابتدا نتایج عددی حاضر با نتایج محققان پیشین مقایسه می‌شود. سپس استقلال حل از شبکه بررسی می‌شود. در ادامه نتایج مربوط به شکست قطرات در

مسئله ناپایا و دوبعدی و سیالات نیوتنی، غیرقابل تراکم و ضریب نفوذ الکتریکی ثابت در نظر گرفته می‌شود. از روش تنظیم سطح به منظور مطالعه عددی مسئله حاضر استفاده می‌شود. در شکل (۴-۱) نمایی شماتیک از میکروکانال Y-شکل متقارن نشان داده شده است. فاز گسسته (قطره) با طول اولیه ( $L_0$ ) و سرعت  $U_d$  توسط فاز پیوسته با سرعت مشخص  $U_c$  ( $U_c = U_d$ ) به داخل میکروکانال به پهنای ۱۰۰ میکرومتر که شامل فاز پیوسته می‌باشد، حرکت می‌کند. طول کانال ورودی برابر  $0.18 \text{ mm}$  و طول هر یک از شاخه‌های فرعی برابر  $0.17 \text{ mm}$  می‌باشند. شرط مرزی سرعت معلوم برای ورودی و شرط مرزی برونابی برای خروجی‌ها به کار می‌رود. سرعت در دیواره‌های میکروکانال با شرط عدم لغزش مدل شده است.



شکل ۱- نمایی شماتیک از هندسه شکست قطره در میکروکانال Y-شکل.

جزئیات مربوط به خصوصیات فیزیکی فاز پیوسته و گسسته در جدول ۱ بیان شده است.  $\epsilon_0$  معرف ضریب نفوذ الکتریکی خلاء می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی سیالات.

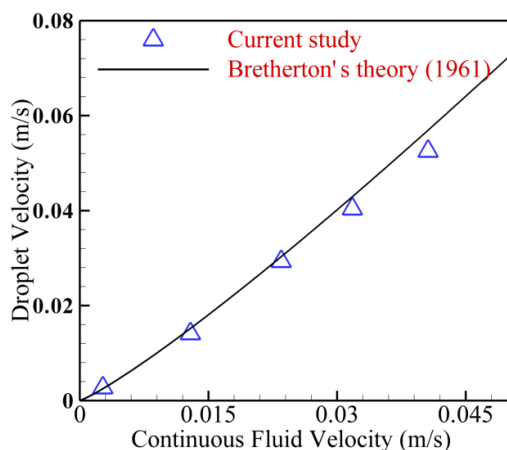
سیالات	فاز گسسته	فاز پیوسته
چگالی ( $kg/m^3$ )	۱۰۰۰	۹۳۰
لزجت (mPa. s)	۱	۱۰
ضریب نفوذ الکتریکی نسبی	$78/5 \epsilon_0$	$2/8 \epsilon_0$
کشش سطحی (N/m)	۰/۰۰۳۳	

شکل (۲) دو حالت ایجاد میدان الکتریکی در میکروکانال Y-شکل را نشان می‌دهد. در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب حالتیکه میدان الکتریکی به هر زیرشاخه

که در داخل کانال حرکت می‌کند، توسط رابطه زیر بیان شده است:

$$U = \bar{U} \left( 1 + 1.29 \left( \frac{\mu_c u_c}{\gamma} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \quad (16)$$

مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تحلیلی برستون [۲۷] که برای اعداد کاپیلاری کوچک صادق است در شکل (۴) نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست، نتایج عدد حاضر تطابق خوبی با حل تحلیلی دارند.



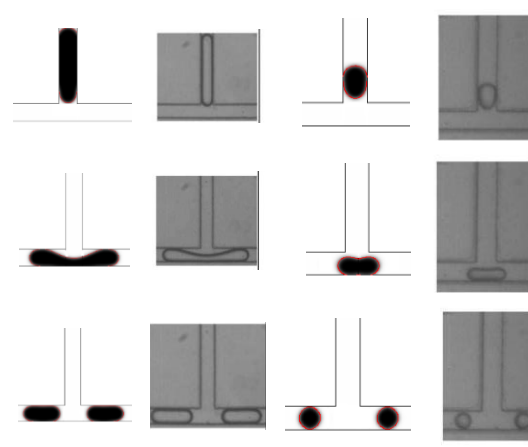
شکل ۴- مقایسه نتایج حاضر با حل تحلیلی برستون [۲۷].

بمنظور اعتبارسنجی کوپل میدان الکتریکی با میدان جریان، تغییر شکل قطره تحت میدان الکتریکی با نتایج عددی شروود [۲۸] و لین و همکاران [۲۹] مقایسه و در شکل (۵) نشان داده شده است. تغییر شکل بی‌بعد قطره بصورت  $D^* = \frac{a-b}{a+b}$  (در آن  $a$  و  $b$  به ترتیب بیان‌کننده تغییر طول قطره در جهت محور اصلی و محور فرعی هستند) تعریف می‌شود. همانطور که از شکل (۵) پیداست، نتایج تطابق نسبتاً خوبی با نتایج عددی و تحلیلی نشان می‌دهند. مطابق این شکل، با افزایش کاپیلاری الکتریکی (شدت میدان الکتریکی)، تغییر شکل قطره افزایش می‌یابد که علت آن را می‌توان در تقویت میدان الکتریکی به ازای سطوح بالاتری از پتانسیل الکتریکی جستجو نمود. در این حالت، شدت بالاتر میدان الکتریکی ضمن قطبیت بیشتر قطره سبب اعمال سطوح بالاتری از نیروی الکتریکی بر قطره می‌شود که به افزایش میزان تغییر شکل قطره منجر می‌شود.

شبیه‌سازی‌های عددی جریان‌های چندفازی، نیازمند شبکه‌هایی به اندازه‌ی کافی کوچک برای حل نمودن الگوهای جریان می‌باشد.

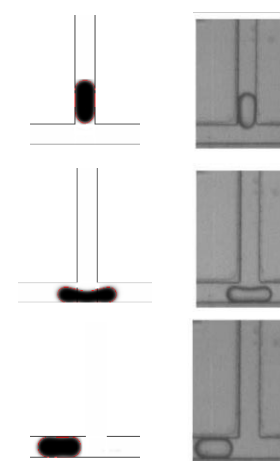
میکروکانال Y-شکل متقارن تحت میدان الکتریکی ارائه می‌شود.

شکل (۳) نتایج کیفی حاصل از شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی جولین و همکاران [۹] در زمینه سیر تکاملی شکست قطره در میکروکانال T-شکل متقارن (Y-شکل با زاویه  $180^\circ$ ) را نشان می‌دهد. به منظور اعتبارسنجی، ابعاد هندسی و فازها مشابه پژوهش آنها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، سه نوع الگوی جریان عدم شکست، شکست با تونل و شکست بدون تونل که توسط جولین و همکاران [۹] گزارش شد، در مطالعه حاضر نیز مشاهده شد. نتایج شبیه‌سازی بصورت کیفی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکست بدون تونل

شکست با تونل

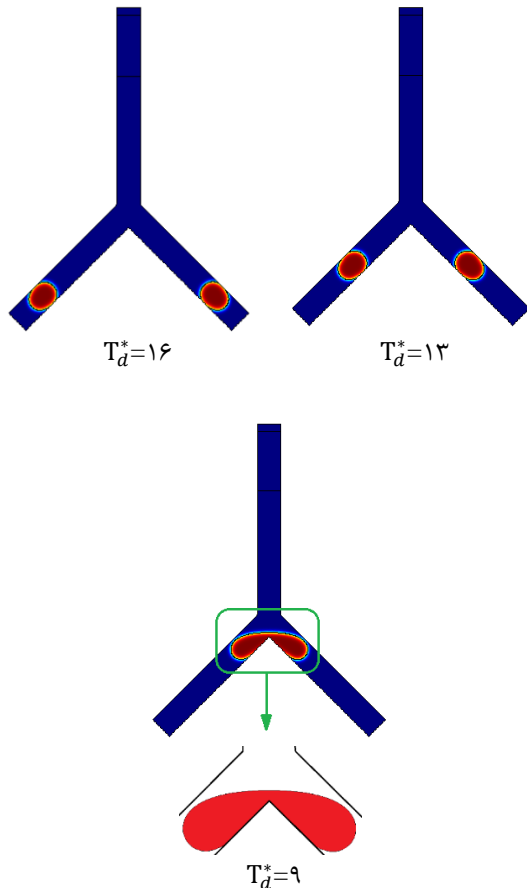


عدم شکست

شکل ۳- مقایسه بین نتایج عددی حاضر (سمت چپ) با نتایج آزمایشگاهی جولین و همکاران (راست) [۹].

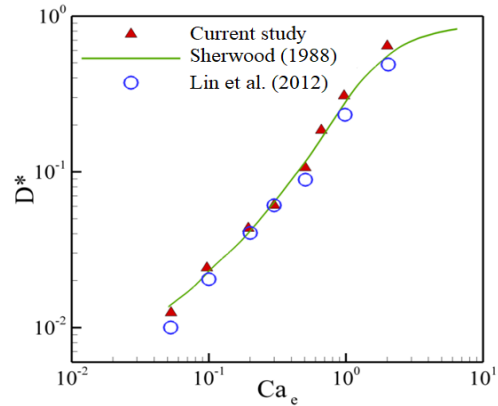
در پژوهش برستون [۲۷] رابطه سرعت قطره کشیده شده

بالایی قطره و دیوار زیرشاخه، فضایی وجود دارد که به آن تونل می‌گویند. از اینرو، این رژیم جریان راه رژیم جریان شکست قطره با تونل می‌نامند. همانطور که از شکل پیداست، هنگامی که قطره به اتصال می‌رسد و در آن پخش می‌شود، به طور دائم تغییر شکل داده و نازک می‌شود.



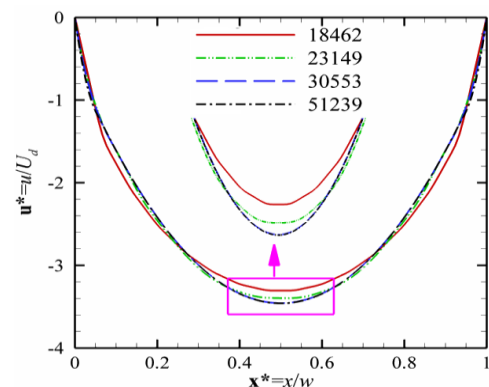
شکل ۷- سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=2/5$  و  $Ca=0.268$  در حالت بدون میدان الکتریکی.

البته در برخی حالات (اعداد مویبگی پایین) ممکن است سرعت تغییر شکل کم باشد ولی قطره به حالت سکون نخواهد رسید. تا اینکه در نهایت، قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه برابر می‌شکند و از دو سمت میکروکانال خارج می‌گردند. بطور کلی در غیاب میدان الکتریکی، سه نیروی کشش سطحی، نیروی برشی و نیروی فشاری در فرآیند تغییر شکل قطره موثر هستند. نیروی کشش سطحی تمایل دارد که از شکست قطره ممانعت کند در حالیکه نیروی‌های برشی و فشاری تمایل به شکستن قطره دارند. در رژیم شکست قطره با تونل نیروی برشی نقش اساسی را ایفا می‌کند و از نیروی فشاری در مقایسه با کشش سطحی می‌توان صرف نظر نمود. در واقع به دلیل ایجاد تونل، سیال



شکل ۵- نمودار مقایسه تغییر شکل قطره بر حسب عدد کاپیلاری الکتریکی نتایج حاضر با نتایج شرود [۲۸] و لین و همکاران [۲۹].

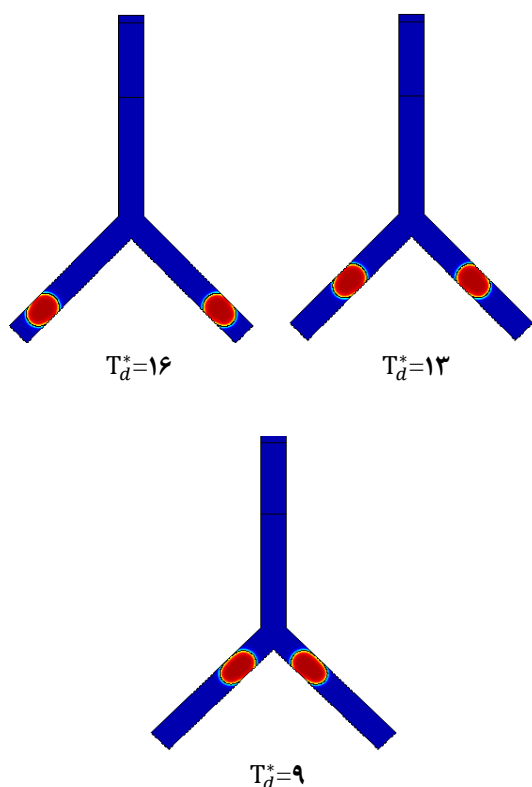
معاوضه بین دقت عددی و هزینه شبیه‌سازی، از هر دو دید، علم بنیادی و کاربردهای عملی، یک مسئله بسیار مهم می‌باشند. در مسئله حاضر یک مش مثلثی بی‌سازمان برای مش‌بندی دامنه محاسباتی مود استفاده قرار می‌گیرد. به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، در شکل (۶) برای چهار شبکه محاسباتی ۱۸۴۶۲، ۲۳۱۴۹، ۳۰۵۵۳ و ۵۱۲۳۹ پروفیل سرعت در راستای  $y$  برای زمان  $T_d^*=6$  ( $T_d^*=6$ ) از  $\frac{(t-t_0)U_d}{w}$  که  $t_0$  زمان اولیه می‌باشد) به فاصله  $y=2/5w$  از محل اتصال با هم مقایسه شده است. همانطور که از شکل پیداست، نتایج مربوط به شبکه‌ی با ۳۰۵۵۳ گره و شبکه‌ی با ۵۱۲۳۹ گره تقریباً با یکدیگر یکسان است لذا می‌توان شبکه‌ی با ۳۰۵۵۳ گره را برای انجام شبیه‌سازی عددی و استخراج نتایج انتخاب نمود.



شکل ۶- استقلال حل از شبکه: پروفیل بی‌بعد سرعت بر حسب مکان بی‌بعد در راستای  $x$ . در زمان  $T_d^*=6$  به فاصله  $y=2/5w$ .

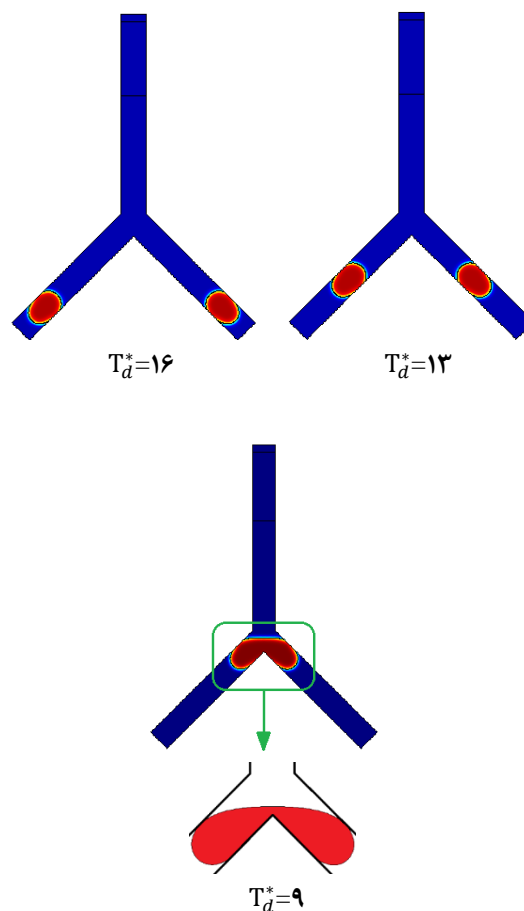
شکل (۷) سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=2/5$  و  $Ca=0.268$  در حالت بدون میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. همانطور که در  $T_d^*=9$  مشاهده می‌شود، بین سطح

شکل (۹) سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0268$  برای میدان الکتریکی متقارن (۸) در  $(Ca_e=0/0156)$  را نشان می‌دهد. با مقایسه با شکل (۸) در می‌یابیم، اعمال میدان الکتریکی به هر دو شاخه سبب می‌شود که شکست قطره نسبت به حالت بدون میدان الکتریکی سریعتر اتفاق بیفتد. همانطور که بیان شد، در غیاب میدان الکتریکی، سه نیروی مختلفی که بر قطره در طول فرآیند حرکت قطره وارد می‌شوند و کنش این نیروها منجر به شکست یا عدم شکست قطره می‌شوند، عبارتند از: نیروی تنش برشی  $(F_T)$ ، نیروی کشش سطحی  $(F_\sigma)$  و نیروی فشاری  $(F_p)$ . حرکت و شکست قطره، حاصل برهمکنش این نیروها در موقعیت‌های مختلف می‌باشد. نیروی فشاری و نیروی برشی تمایل دارند ضخامت مرکز قطره را کاهش دهد و نیروی کشش سطحی نیز تمایل دارد ضخامت قطره را افزایش دهد و مانع از شکست قطره شود. اعمال میدان الکتریکی باعث ایجاد نیروی الکتریکی می‌شود که برای میدان الکتریکی متقارن به عنوان یک نیروی کمکی به شکست قطره کمک می‌کند و سبب می‌شود که قطره سریعتر بشکند.



شکل ۹- سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0268$  برای میدان الکتریکی متقارن  $(Ca_e=0/0156)$ .

پیوسته با سرعت زیادی از روی سطح قطره عبور می‌کند که باعث ایجاد اختلاف سرعت در سطح بالا و پائین قطره می‌شود و در نتیجه باعث ایجاد تنش برشی و اعمال نیروی برشی بیشتر می‌شود و باعث شکست قطره می‌شود. شکل (۸) سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0268$  در حالت بدون میدان الکتریکی را نشان می‌دهد. برخلاف شکل (۷) که در آن در هنگام پخش شدن قطره در اتصال، تونل تشکیل می‌شد، در این شکل مشاهده می‌شود که در هنگام پخش شدن قطره در کانال، تونل تشکیل نشده است  $(T_d^*=9)$ . این فرآیند را شکست قطره بدون تونل گویند. همانطور که از شکل پیداست، قطره مادر به دو قسمت مساوی تقسیم می‌شود. در این رژیم، بدلیل اینکه قطره مسیر حرکت فاز پیوسته را مسدود می‌کند، اختلاف فشار بین قسمت جلو و عقب قطره افزایش می‌یابد. در نتیجه نیروی فشاری نقش اساسی را در فرآیند شکست قطره بازی می‌کند و نیروی برشی قابل صرف نظر کردن است.

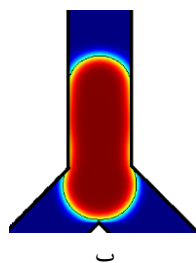
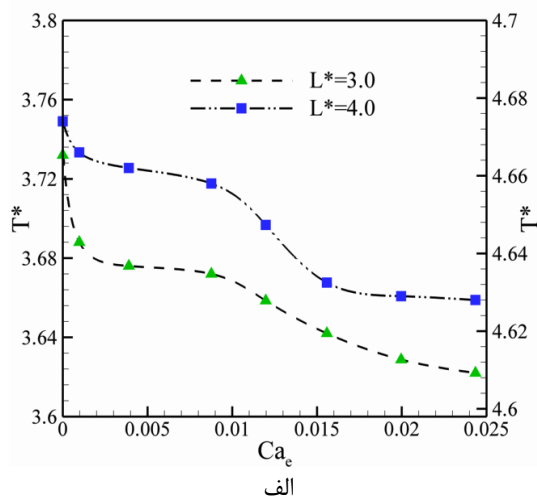


شکل ۸- سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0268$  در حالت بدون میدان الکتریکی.



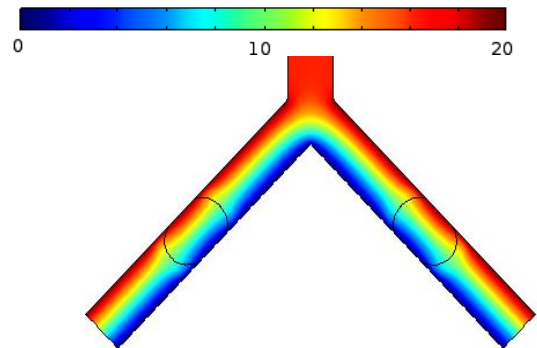
می‌باشد، میدان الکتریکی قوی‌تری در داخل قطره ایجاد می‌شود که منجر به گرادیان الکتریکی در سطح مشترک قطره می‌گردد. این امر باعث نیروی الکتریکی می‌شود که در سطح قطره ایجاد می‌شود. جهت نیروی الکتریکی به وسیله گرادیان گذردهی (معادله ۱۵ را ملاحظه کنید) مشخص می‌شود. با توجه به اینکه  $\epsilon_a$  بزرگتر از  $\epsilon_c$  می‌باشد، جهت نیروی الکتریکی از داخل قطره به سمت بیرون قطره می‌باشد.

به منظور بررسی اثر تغییر شدت میدان الکتریکی روی فرآیند شکست قطره برای میدان الکتریکی متقارن، زمان شکست قطره به عنوان تابعی از عدد کپیلاری الکتریکی برای  $Ca=0.0268$  و دو طول اولیه بی‌بعد مختلف ۳ و ۴ در شکل (۱۱-الف) نمایش داده شده است. زمان شکست (همانگونه که در شکل (۱۱-ب) نشان داده شده است) به صورت اختلاف زمانی که قطره به طور کامل شکسته می‌شود ( $t_b$ ) و زمانی که قطره به دیواره های محل تقاطع میکروکانال Y-شکل برخورد می‌کند ( $t_i$ )، تعریف می‌شود

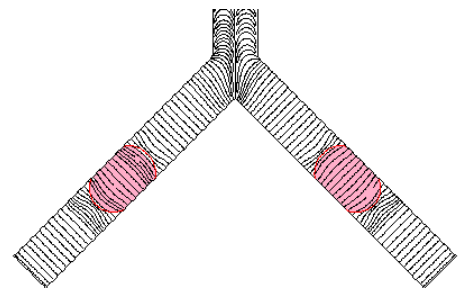
$$(T^* = \frac{(t_b - t_i) U_d}{w})$$


شکل ۱۱- الف) زمان بی‌بعد شکست برحسب عدد کاپیلاری الکتریکی برای  $Ca=0.0268$  و ب) تعریف زمان اولیه برای محاسبه زمان شکست  $t_i$  (زمانی است که قطره مادر به سطح پائینی میکروکانال می‌رسد).

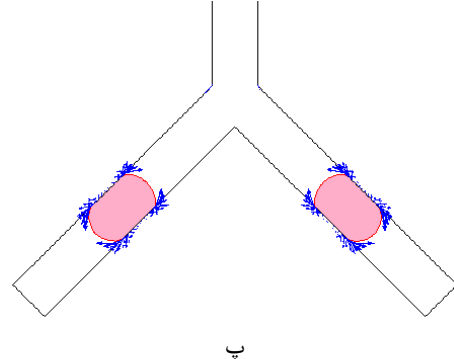
به منظور توضیح بهتر تاثیر نیروی الکتریکی، در شکل (۱۰) خطوط پتانسیل الکتریکی، خطوط میدان الکتریکی و توزیع نیروی الکتریکی برای  $L^*=3/0$ ،  $Ca=0.0268$  و  $Ca_e=0.0156$  ( $V=20$  Volt) رسم شده است.



الف



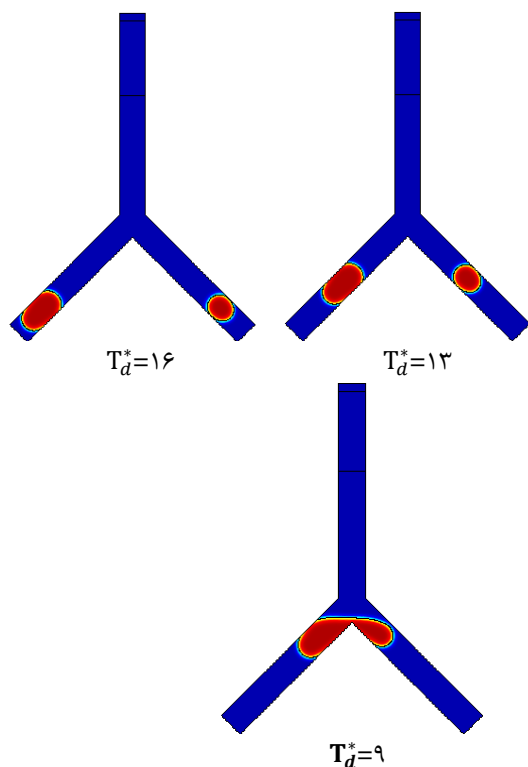
ب



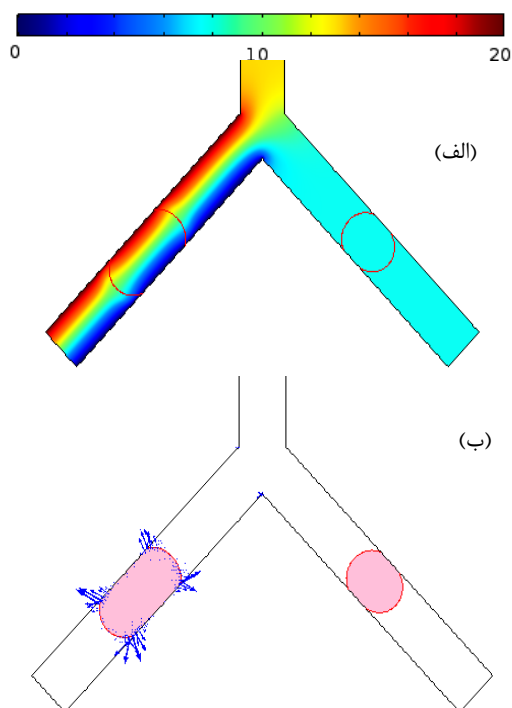
شکل ۱۰- خطوط پتانسیل الکتریکی (الف)، خطوط میدان الکتریکی (ب) و توزیع نیروی الکتریکی (پ) برای  $V=20$  Volt در  $Ca_e=0.0156$  و  $Ca=0.0268, L^*=3/0$ .

همانطور که دیده می‌شود، توزیع محلی خطوط پتانسیل و میدان الکتریکی در حضور قطره در نتیجه تغییر ثابت دی الکتریک تغییر می‌کند. همچنین مشخص است که خطوط پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی دور از قطره و در داخل قطره ثابت هستند و غیر همگن بودن خطوط میدان الکتریکی روی سطح مشترک قطره منجر به توزیع غیر یکنواخت نیروی الکتریکی در سطح مشترک می‌شود و از آنجائیکه میدان الکتریکی در ماده با گذردهی بیشتر، قویتر

چپ میکروکانال بزرگتر از اندازه قطره دختر سمت راست میکروکانال گردد.



شکل ۱۲- سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0.268$  برای میدان الکتریکی نامتقارن ( $Ca_e=0/0.156$ ).



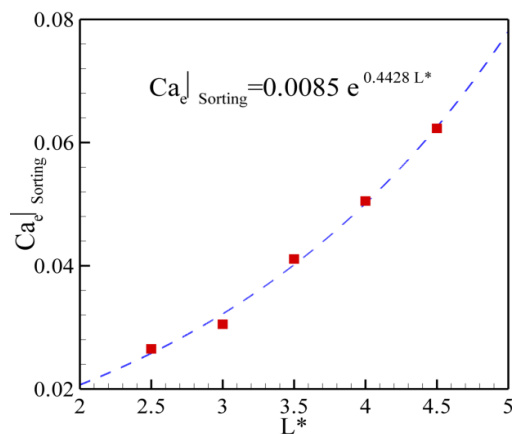
شکل ۱۳- خطوط پتانسیل الکتریکی (الف) و توزیع نیروی الکتریکی (ب) برای  $L^*=3/0$ ،  $Ca=0/0.268$  و  $Ca_e=0/0.156$  در  $V=20$  Volt برای میدان الکتریکی نامتقارن.

همانطور که مشاهده می‌شود به طور کلی زمان شکست قطره وقتی که عدد کاپیلاری الکتریکی افزایش می‌یابد، کم می‌شود. عدد کاپیلاری الکتریکی معرف نیروی الکتریکی به نیروی کشش سطحی است. با توجه به اینکه نیروی الکتریکی بر خلاف نیروی کشش سطحی به شکست قطره کمک می‌کند و با افزایش شدت کاپیلاری الکتریکی مقدار نیروی الکتریکی وارده به سطح مشترک قطره بیشتر می‌گردد و قطره سریعتر می‌شکند.

شکل (۱۲) سیر تکاملی حرکت قطره برای  $L^*=3/0$  و  $Ca=0/0.268$  برای میدان الکتریکی نامتقارن ( $Ca_e=0/0.156$ ) را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۲) در زمان  $T_d^*=9$  ملاحظه می‌شود که برای حالت‌های بدون میدان الکتریکی و میدان الکتریکی متقارن، رژیم جریان شکست با تونل و بدون تونل مشاهده می‌شود ولی در حالتیکه میدان بصورت نامتقارن اعمال می‌شود، در شاخه چپ که میدان الکتریکی وارد می‌شود، تونل مشاهده نمی‌گردد ولی در شاخه سمت راست تونل مشاهده می‌شود. در واقع در این حالت یک رژیم جریان جدید مشاهده می‌شود که این رژیم جریان را رژیم جریان ترکیبی نامگذاری می‌شود. که در سمت راست که تونل تشکیل می‌شود، نیروی برشی ترم غالب است درحالیکه در سمت چپ که تونل مشاهده نمی‌شود نیروی فشاری غالب می‌باشد و با توجه به اینکه میدان الکتریکی به شاخه سمت چپ فقط اعمال می‌شود، قطره بیشتر به سمت چپ کشیده می‌شود در نتیجه، برخلاف حالت بدون میدان الکتریکی (شکل ۸) و میدان الکتریکی متقارن (شکل ۹) که قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه مساوی تقسیم می‌شود، در این حالت قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه‌های غیرهم اندازه می‌شکند.

به منظور فهم بهتر این پدیده، در شکل (۱۳) توزیع خطوط پتانسیل و نیروی الکتریکی مربوط به حالت در نظر گرفته شده در شکل (۱۲) رسم شده است. زمانیکه قطره مادر به محل اتصال زیرشاخه‌ها می‌رسد، به دلیل اینکه میدان الکتریکی فقط در شاخه چپ میکروکانال اعمال می‌شود، به نیمه سمت چپ قطره نیروی الکتریکی وارد می‌شود در حالیکه به نیمه سمت راست قطره موجود در شاخه راست میکروکانال نیروی الکتریکی وارد نمی‌شود و سبب می‌شود قسمت بیشتری از قطره به سمت چپ میکروکانال وارد شود، در نتیجه اندازه قطره دختر شکسته شده در سمت

هدایت می‌نامیم و با نماد  $Ca_e|_{Sorting}$  نشان می‌دهیم)، قطره مادر نمی‌شکند و از سمت چپ کانال هدایت<sup>۱</sup> می‌شود. شکل (۱۵) تغییرات عدد کاپیلاری الکتریکی هدایت بر حسب طول اولیه بی‌بعد برای  $Ca=0/0.268$  را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل پیداست، با افزایش  $L^*$  مقدار  $Ca_e|_{Sorting}$  نیز افزایش می‌یابد. همانطور که در نمودار نشان داده شده است، می‌توان نحوه تغییرات را با استفاده از تابع نمایی بصورت  $Ca_e|_{Sorting} = a e^{b L^*}$  تقریب زد که در آن  $a$  و  $b$  به ترتیب برابر  $0/0.085$  و  $0/4428$  می‌باشند.



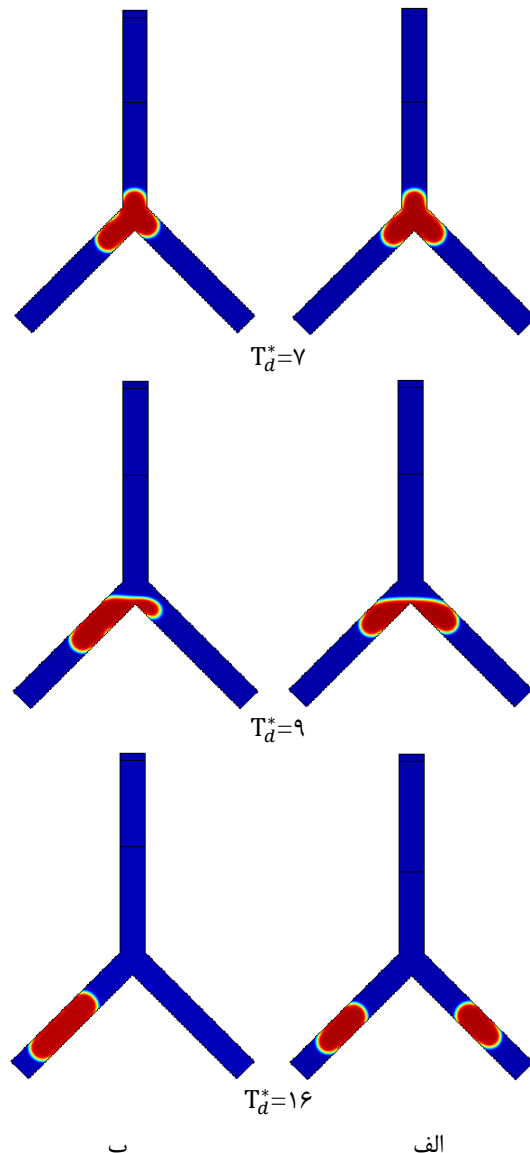
شکل ۱۵- تغییرات عدد کاپیلاری الکتریکی هدایت بر حسب طول اولیه بی‌بعد برای  $Ca=0/0.268$ .

در شکل (۱۶) نسبت شکست<sup>۲</sup> ( $S^*$ ) بر حسب کاپیلاری الکتریکی برای دو نسبت طولی اولیه بی‌بعد قطره ۳ و ۴ ارائه شده است. نسبت شکست بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$S^* = \frac{\bar{S}}{S} = \frac{\text{سطح قطره در سمت راست}}{\text{سطح قطره در سمت چپ}} \quad (13)$$

که  $\bar{S}$  و  $S$  به ترتیب نشان دهنده سطح قطره در شاخه سمت راست و سطح قطره در شاخه چپ می‌باشند (شکل ۱ توجه شود). زمانیکه میدان الکتریکی اعمال نمی‌شود یا میدان الکتریکی بصورت متقارن اعمال می‌شود، چون شکست بصورت متقارن اتفاق می‌افتد، سطح دو قطره دختر در شاخه‌ها برابر است و  $S^*$  برابر یک می‌باشد. زمانیکه قطره فقط از شاخه سمت چپ خارج شود، مقدار  $S^*$  برابر صفر می‌شود. بنابراین  $S^*$  بین صفر تا یک تغییر می‌کند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش عدد کاپیلاری الکتریکی، نسبت شکست کاهش می‌یابد. نکته قابل ذکر دیگر این است که در روش پیشنهادی جدید با تنظیم

شکل (۱۴-الف) و (۱۴-ب) سیر تکاملی شکست قطره مادر برای  $L^*=32/5$  و  $Ca=0/0.268$  برای میدان الکتریکی نامتقارن به ترتیب برای  $Ca_e=0/0.39$  و  $Ca_e=0/0.3516$  در زمان‌های مشابه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- تاثیر تغییر کاپیلاری الکتریکی برای  $L^*=32/5$  و  $Ca=0/0.268$  در زمان‌های مختلف برای میدان نامتقارن: الف)  $Ca_e=0/0.39$  و ب)  $Ca_e=0/0.3516$ .

با مقایسه شکل‌های (۱۲) و (۱۴-الف) در می‌یابیم که با افزایش کاپیلاری الکتریکی (شدت میدان الکتریکی)، اندازه قطره در سمتی که میدان اعمال شده است، بزرگتر و در سمتی که میدان اعمال نمی‌شود، کوچکتر می‌شود. همچنین همانطور که از شکل (۱۴-ب) پیداست، بعد از یک عدد کاپیلاری مشخص (که از این پس آن را عدد کاپیلاری

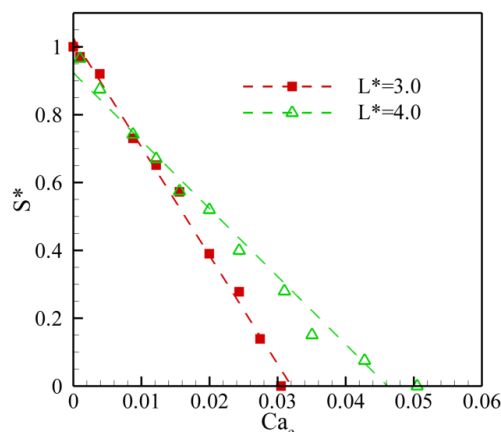
<sup>2</sup> Splitting Ratio

<sup>1</sup> Sorting

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند شکست قطره در اتصال Y-شکل متقارن تحت میدان الکتریکی بصورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. برای این منظور از نرم‌افزار کامسول مدل تنظیم سطح استفاده می‌شود. دو حالت برای اعمال میدان الکتریکی در نظر گرفته شد: میدان الکتریکی متقارن و میدان الکتریکی نامتقارن. برای میدان الکتریکی متقارن که قطره مادر به دو اندازه مساوی تقسیم می‌شوند، مشاهده شد که با افزایش عدد کاپیلاری الکتریکی، شکست قطره سریعتر اتفاق می‌افتد. نتایج میدان الکتریکی نامتقارن نشان داد که قطره مادر به دو قطره دختر با اندازه متفاوت می‌تواند شکسته شود و با تغییر شدت میدان الکتریکی می‌توان به قطرات با اندازه‌های گوناگون ایجاد نمود. علاوه بر این در این حالت، یک رژیم جدید که رژیم جریان ترکیبی نامگذاری شد، مشاهده گردید. همچنین نتایج نشان داد، اگر میدان الکتریکی اعمالی به یک سمت میکروکانال از یک حدی بیشتر شود (که عدد کاپیلاری الکتریکی هدایت نامگذاری شد)، قطره دیگر نمی‌شکند و قطره از سمتی شاخه‌ای که میدان الکتریکی اعمال می‌شود، خارج می‌شود. با افزایش طول اولیه بی‌بعد قطره، عدد کاپیلاری هدایت افزایش می‌یابد.

میدان الکتریکی به نسبت شکست دلخواه می‌توان دست یافت در حالیکه در سایر روش‌های پیشنهادی محدودیت‌هایی وجود دارد و نمی‌توان به هر اندازه‌ای دست یافت. به عنوان مثال در یک اتصال T-شکل با شیر کنترلی (بدرام و همکاران [۱۷]) و اتصال T-شکل با هیتر (تینگ و همکاران [۶]) حداقل نسبت حجم تجزیه قابل دسترسی است به ترتیب حدود ۰/۴۸ و ۰/۳ می‌باشد. بنابراین در روش‌های موجود، برای تولید قطرات کوچک سیستم‌های متوالی باید مورد استفاده قرار گیرد که هزینه ساخت سیستم‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۶- تغییرات عدد کاپیلاری الکتریکی هدایت بر حسب طول اولیه بی‌بعد در میکروکانال Y-شکل برای  $Ca_e = 0.0268$ .

### مراجع

- [1] B. Khoo, G. Grenzi, Y. Lim, S. Lee, J. Han, and C. Lim, "Expansion of Patient-derived Circulating Tumor Cells from Liquid Biopsies Using a CTC Microfluidic Culture Device", *Nature protocols*, Vol. 13, December 2018, pp. 34-58.
- [۲] محمد مهدی قدیری، سید علی حسینی، سید عباس سادات سکاکی، علی رجب‌پور، "بررسی پارامترهای موثر در به دام اندازی ذرات به کمک جریان‌های ثانویه در میکروکانال‌های با مقطع مستطیلی متغیر"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۹، شماره ۶۵، تابستان ۱۴۰۰، پذیرفته شده.
- [3] F. Ahmadi, K. Samlali, P. Vo, and S. Shih, "An Integrated Droplet-digital Microfluidic System for On-demand Droplet Creation Mixing Incubation and Sorting", *Lab on a Chip*, Vol. 19, No. 3, Jan 2019, pp. 524-535.
- [4] M. Vajdi, F. Moghanlou, E. Niari, M. Shahedi Asl, and M. Shokouhimehr, "Heat Transfer and Pressure Drop in a ZrB<sub>2</sub> Microchannel Heat Sink: a Numerical Approach", *Ceramics International*, Vol. 46, No. 2, February 2020, pp. 1730-1735.
- [5] D. Link, S. Anna, D. Weitz, and H. Stone A, "Geometrically Mediated Breakup of Drops in Microfluidic Devices", *Physical Review Letters*, Vol. 92, No. 5, February 2004, pp. 054503.
- [6] T.H. Ting, Y.F. Yap, N.T. Nguyen, T.N. Wong, J.C.K. Chai, and L. Yobas, "Thermally Mediated Breakup of Drops in Microchannels", *Applied Physics Letters*, Vol. 89, No. 23, December 2006, pp. 234101.
- [7] L.M. Deremble, and P. Tabeling, "Droplet Breakup in Microfluidic Junctions of Arbitrary Angles", *Physical Review E*, Vol. 74, September 2006, pp. 035303.
- [8] A.M. Leshansky, and L.M. Pismen, "Breakup of Drops in a Microfluidic T junction", *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 2, February 2009, 023303.

- [9] M.C. Jullien, M.J. Tsang, C. Cohen, L. Menetrier, and P. Tabeling, "Droplet Breakup in Microfluidic T-junctions at Small Capillary Numbers", *Physics of Fluids*, Vol. 21, No. 7, July 2009, pp. 072001.
- [10] A. Bedram and A., Moosavi "Droplet Breakup in an Asymmetric Microfluidic T junction", *The European Physical Journal E*, Vol. 34, No. 8, August 2011, pp. 1-8.
- [11] S. Afkhami, A.M. Leshansky, and Y. Renardy, "Numerical Investigation of Elongated Drops in a Microfluidic T-junction", *Physics of Fluids*, Vol. 23, No. 2, February 2011, pp. 022002.
- [12] Y. Wang, M. Do-Quang, and G. Amberg, "Viscoelastic Droplet Dynamics in a Y-shaped Capillary Channel", *Physics of Fluids*, Vol. 28, March 2016, pp. 033103.
- [13] X. Wang, C. Zhu, Y. Wu, T., Fu, and Y. Ma "Dynamics of Bubble Breakup with Partly Obstruction in a Microfluidic T-junction", *Chemical Engineering Science*, Vol. 132, August 2015, pp. 128-138.
- [۱۴] مرضیه بابایی ربیعی و شهرام طالبی، "بررسی عددی تأثیرپذیری افت فشار از نحوه آرایش فیبرها در فیلترهای هوا با استفاده از روش شبکه بولتزمن"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۴، شماره ۴۷، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۲۶۷-۲۷۸.
- [۱۵] محمد تقیلو، جلال قاسمی و محمد نوروزی، "استفاده از محیط متخلخل برای بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری در کانال و تحلیل عددی آن به روش بولتزمن شبکه‌ی"، *نشریه مدل‌سازی در مهندسی*، دوره ۱۷، شماره ۵۸، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۲۸۱-۳۹.
- [16] K. Fallah, and M.T.Rahni, "Lattice Boltzmann Simulation of Drop Formation in T-junction Microchannel", *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 240, May 2017, pp. 723-732.
- [17] A. Ghaderi, M.H. Kayhani, M. Nazari, and K. Fallah, "Drop Formation of Ferrofluid at Co-flowing Microchannel under Uniform Magnetic Field", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. Vol. 67, February 2018, pp. 87-96.
- [18] Aboutalebi M, Bijarchi MA, Shafii MB. and Hannani, SK., "Numerical Investigation on Splitting of Ferrofluid Microdroplets in T-junctions Using an Asymmetric Magnetic Field with Proposed Correlation", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 447, No. 1, February 2018, pp. 139-149.
- [19] A. Bedram, A.E. Darabi, A. Moosavi, S.K. Hannani, "Numerical Investigation of an Efficient Method (T-Junction with Valve) for Producing Unequal-sized Droplets in Micro-and Nano-Fluidic Systems", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 137, No. 3, March 2015, pp. 031202.
- [20] A. Kiani Moqadam, A. Bedram, and M.H. Hamed, "A Novel Method (T-Junction with a Tilted Slot) for Controlling Breakup Volume Ratio of Droplets in Micro and Nanofluidic T-Junctions", *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 5, pp. 1255-1265.
- [21] D. Ma, D. Liang, Ch. Zhu, T. Fu, Y. Ma, X. Yuan, and H. Li, "The Breakup Dynamics and Mechanism of Viscous Droplets in Y-shaped Microchannels", *Chemical Engineering Science*, Vol. 231, No. 15, February 2021, 116300.
- [22] G. Tomar, D. Gerlach, G. Biswas, N. Alleborn, A. Sharma, F. Durst, S.W.J. Welch and A. Delgado, "Two-phase Electrohydrodynamic Simulations Using a Volume-of-fluid Approach", *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, No. 2, December 2007, pp. 1267-1285.
- [23] D. Saville "Electrohydrodynamics: the Taylor-Melcher Leaky Dielectric Model. *Annual Review of Fluid Mechanics*", Vol. 29, No. 1, 1997, pp. 27-64.
- [24] J. Hua, L.K. Lim, and C.-H. Wang, "Numerical simulation of deformation/motion of a drop suspended in viscous liquids under influence of steady electric fields", *Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 11, 2008, pp. 113302.
- [25] I. Roghair, M. Musterd, D. van den Ende, C. Kleijn, M. Kreutzer and F. Mugele, "A numerical technique to simulate display pixels based on electrowetting", *Microfluid Nanofluid*, Vol. 19, April 2015, pp. 465-482.
- [27] Wehking, J., "Electrohydrodynamic Manipulation of Liquid Droplet Emulsions in a Microfluidic Channel". 2013.
- [27] F.P. Bretherton, "The Motion of Long Bubbles in Tubes", *Journal of Fluid Mechanics*", Vol. 10, No. 2, March 1961, pp. 166-188.
- [28] D. Sherwood, "Breakup of Fluid Droplets in Electric and Magnetic Fields", *Journal of fluid mechanics*, Vol. 188, April 1988, pp. 133-146.
- [29] Y. Lin, P. Skjetne, and A. Carlson, "A Phase Field Model for Multiphase Electro-hydrodynamic Flow", *International journal of multiphase flow*", Vol. 45, October 2012, pp. 1-11.