Journal Of Energy Conversion
Volume: 7, Issue: 4, 2021

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹

یک روش جدید برای کاهش زمان شکست قطرات در میکروکانال T-شکل متقارن

زینب خلیل‌زاده[۱]، کیوان فلاح[۲]*، جواد علی‌نژاد[۳]، یاسر رستمیان [۴]

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
۴- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

دریافت: ۹۹/۰۹/۲۱، بازنگری: ۹۹/۱۲/۱۵، پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۰

چکیده

حرکت قطرات در میکروکانال ها در زمینه های علمی و صنعتی متنوعی مانند مهندسی بیولوژیک، آزمایشگاه روی تراشه، انتقال دارو و کپسول سازی مشاهده می شود. در پژوهش حاضر، فرآیند شکست قطره در میکروکانال T-شکل بوسیله نرم‌افزار متن باز جریس شبیه سازی می شود. به‌منظور اعتبار سنجی نتایج عددی حاضر، نتایج با تحقیقات آزمایشگاهی و عددی محققان پیشین ارزیابی می شوند. مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که شبیه سازی حاضر تطابق خوبی با مطالعات گذشته دارند. اثر حضور یک مانع نیم‌دایره‌ای در اعداد کاپیلاری مختلف (۰۱۹/≥Ca≤006/0) و نسبت طول اولیه بی‌بعد قطره متفاوت (۴ و ۲، ۳ =L^*) روی الگوی جریان و زمان شکست قطره مادر در میکروکانال T-شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد، با یک اصلاح ساده روی هندسه میکروکانال T-شکل متقارن، شکست قطره مادر در مقایسه هندسه T-شکل متقارن معمولی سریعتر اتفاق می‌افتد. برای نمونه، درعدد کاپیلاری ۰/۰۱ برای نسبت بی‌بعد طول اولیه ۳،۲ و۴ با حضور مانع به ترتیب زمان شکست قطره مادر تقریباً۷۵٪، ۴۵٪ و ۳۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش عدد کاپیلاری در هر نسبت بی‌بعد طول اولیه قطره، زمان شکست قطره کاهش می یابد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** keivan.fallah@gmail.com

کلمات کلیدی: حجم سیال، میکرو کانال T-شکل متقارن، شکست قطره، نرم‌افزار متن باز جریس، مدل حجم سیال

۱- مقدمه

مطالعه رفتار سیال در مقیاس میکرو، با نام میکروفلوئیدیک شناخته می‌شود که بررسی نحوه تشکیل، تغییر شکل و تجزیه-پذیری قطره به عنوان یکی از گام‌های اولیه و اساسی در تحلیل جریان‌های دوفازی و کاربردهای پیچیده مهندسی حائز اهمیت است. از ویژگی‌های شاخص دستگاه‌های میکروسیالی می‌توان به مقیاس طولی کوچک و رژیم جریان آرام درآنها اشاره کرد. تولید ریزقطرات در حوزه‌های مختلفی از جمله در صنایع داروسازی، شیمیایی، پتروشیمی، نفت و غیره وجود دارد [۱-۴]. یکی از

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

تحقیقات اصلی و پایه در حوزه میکروفلوئیدیک، مطالعه به منظور ایجاد یک آزمایشگاه روی تراشه[1] جهت یکپارچه‌سازی همه فرآیندهای مورد نیاز برای تکمیل رویدادهای پزشکی، شیمیایی زیستی بوده است [۳]. که اغلب برای تحقیقات و تحلیل‌های بیوشیمیایی، پزشکی و شیمیایی، تجزیه و تحلیل دی‌ان‌ای[2] مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای این‌گونه افزاره‌ها می‌توان به کاهش هزینه‌های ساخت افزاره، نیاز کمتر به وسایل آنالیز، کاهش مصرف واکنشگرها و سرعت عمل بیشتر تراشه اشاره نمود. یکی از مباحث مهم در حوزه میکروفلوئیدیک شکست قطرات با اندازه و فرکانسهای مختلف است، که اصولاً مینیاتورسازی تجهیزات تولیدشده سبب بهبود در فرآیندهای انتقال حرارت، انتقال جرم و انجام واکنشهای شیمیایی می‌شود [۴].

کاربردهای گسترده دستگاههای میکروفلوئیدیک، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در زمینه‌ی تولید و تقسیم کردن قطره[3] شده است [۵-۲۲]. تولید و تقسیم کردن قطره در شبکه‌ها ودستگاه‌های میکروسیالی می تواند به طور فعال[4] و غیرفعال[5] انجام شود. در روش‌های فعال از یک منبع خارجی مانند میدان دمای غیریکنواخت [۵]، میدان مغناطیسی [۶ و ۷] و میدان الکتریکی [۸] برای تأمین انرژی مورد نیاز برای غلبه بر کشش سطحی[6] در فصل مشترک دو سیال استفاده می شود با اعمال میدان‌های خارجی شکست قطره اتفاق می‌افتد. در روش غیرفعال تمرکز روی تغییر خصوصیات سیال و تغییر یا اصلاح هندسه میکروکانال برای شکست قطره می‌باشد [۹-۲۲]. نیسیساکو و همکاران [۹] مطالعه‌ای را در راستای توسعه یک روش معتبر برای کنترل اندازه و فرکانس تشکیل قطرات در کانال T-شکل انجام داده‌اند و نشان دادند که در بررسی آزمایش مورد نظر، کنترل نسبت سرعت، کلیدی جهت به‌دست آوردن یک روش سازگار در تولید قطرات است. لینک و همکاران [۱۰] دو روش غیرفعال برای شکستن قطره های بزرگتر به قطره های کوچکتر در سیستم میکروفلوئیدیک ساده نشان را بیان کردند. الف) شکست قطره در اتصال T-شکل با اندازه بازوهای متفاوت و ب) شکست قطره درمحل اتصال T-شکل با وجود مانع می‌باشد. نتایج نشان داده که شکست قطرات درمحل اتصال T- شکل با وجود مانع برای ساخت قطرات کوچکتر بهتر عمل کرده‌است، و محل قرار گیری مانع نیز در شکست قطره موثر بوده است. تینگ و همکاران [۵] به بررسی شکست قطره مادر در میکروکانال T-شکل متقارن پرداختند. آنها با قرار دادن هیتری در قسمت پایینی کانال فرعی و اعمال میدان حرارتی توانستند قطرات دختر با اندازه‌های مختلف دست یابند. همچنین نشان دادند که در دمای بحرانی قطره دختر به طور کامل وارد شاخه‌ای که میدان حرارتی اعمال شده می‌شود. جولین و همکاران [۱۱] شکست قطرات در میکرو اتصال T-شکل را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. یکی از ویژگی های بارز این پژوهش، بررسی محدوده ی گسترده ای از اعداد مویینگی ($۱۰^{-۴}<Ca<۱۰^{-۱}$) بود. آنها برای اولین بار مشاهده کردند که اگر طول اولیه ی قطره از یک مقدار خاص (به نام طول بحرانی قطره) بیش تر باشد، قطره حتما (و در هر عدد مویینگی) شکسته خواهد شد. فو و همکاران [۱۲] شکست حباب در اتصال T-شکل را به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. در پژوهش آن‌ها به جای ورود قطرات مایع به درون یک مایع، حباب‌های هوا وارد یک سیال شده و شکست حباب‌ها در حین عبور از اتصال در شرایط مختلف بررسی گردید. طول قطره و کم‌ترین ضخامت حباب در حین فرآیند شکست در دبی‌های مختلف سیالات و در لزجت های متفاوت سیال بررسی شد. بدرام و همکاران [۱۳] به مقایسه شکست قطرات غیریکنواخت 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 روش های موثر برای داشتن قطرات غیریکنواخت در میکروکانال T-شکل متقارن، تفاوت در طول کانالهای خروجی می‌باشد. افخمی و همکاران [۱۴] بصورت ۲ بعدی شکست حباب در میکروکانال T-شکل متقارن بررسی نمودند. در پژوهش آن‌ها تاثیر عدد مویینگی ونسبت لزجت بررسی شده و با ارائه‌ی توزیع فشار در شرایط مختلف شکست قطره، نشان دادند تئوری تحلیلی لشانسکی و پیسمن [۱۵] (که فرض شده بود افت فشار صرفاً در اثر افت فشار سیال پیوسته در فیلم نازک است) درست می‌باشد. چن و همکاران [۱۶] با بررسی مکانیزم شکست قطره برای هر دو رژیم چکه کردن و جتی نشان دادند که شکل

[1] Lab On Chip
[2] DNA
[3] Droplet Splitting
[4] Active
[5] Passive
[6] Interfacial Tension

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

قطرات وابسته به اعداد بی‌بعد مویینگی و وبر است. شی وای و همکاران [۱۷] در تحقیق خود به نحوه تولید قطره در میکروکانال T-شکل به صورت عددی با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند. پارامترهای متفاوتی از قبیل نسبت سرعت، عدد مویینگی و هندسه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که تاثیر هندسه شامل نسبت عرض کانال اصلی به کانال فرعی در اتصال T-شکل نقش اساسی را در مشخص نمودن شکل، طول یا اندازه قطره دارد. وانگ و همکاران [۱۸] 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 گردن 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. فلاح و طیبی [۱۹] با استفاده از روش شبکه بولتزمن تشکیل قطره در میکروکانال T-شکل را شبیه‌سازی نمودند. آنها نشان دادند که با یک اصلاح ساده در میکروکانال می‌توان تعداد قطرات تولید شده را افزایش داد و همچنین می‌توان اندازه قطرات را کاهش داد . ابوطالبی و همکاران [۷] یک راهکار جدید برای شکست قطرات فروسیال با اندازه متفاوت در میکروکانال T-شکل متقارن پیشنهاد نمودند. برای این منظور، یک میدان مغناطیسی غیرمتقارن در یکی از کانال‌های فرعی اعمال نمودند و بصورت عددی به بررسی عدد کاپیلاری، طول اولیه قطره و باند مغناطیسی روی الگوی جریان و نسبت حجم قطرات شکسته شده پرداختند. البته این روش هزینه‌بر بوده و از طرفی پیچیدگی‌های مربوط به ساخت، استفاده از آنها را با مشکلاتی همراه می‌کند. سان و همکاران [۲۰]بصورت آزمایشگاهی تغییر شکل و شکست قطرات در میکروکانال T-شکل متقارن را بررسی نمودند. آنها اثر پارامترهای گوناگون از جمله نسبت ویسکوزیته، عدد کاپیلاری فاز پیوسته و طول اولیه قطره روی رژیم جریان و فرآیند حرکت قطره مطالعه نمودند. یوان و همکاران بصورت عددی [۲۱]، تاثیر نرخ جریان سیال ورودی به یک میکروکانال T-شکل را برای تولید ریزقطرات با استفاده از آب و بوتانول مورد تحلیل قرار دادند؛ با افزایش نرخ تزریق جریان سیال، اندازه قطر و فاصله بین قطرات تولیدشده کاهش یافت. با مطالعه شکل‌گیری قطرات توسط لی و همکاران [۲۲]، در انواع مختلف اتصالات T-شکل، با ایجاد تغییراتی در میزان گرانروی سیالات عامل، کشش سطحی و مرطوب بودن دیواره‌ها، مشخص شد که عامل غالب هندسی موثر بر تشکیل قطرات ارتفاع مانع (نه عرض آن) است. جعفری و فلاح [۲۳] با استفاده از نرم‌افزار کامسول به مطالعه عددی حرکت قطره در میکروکانال T-شکل تحت میدان الکتریکی پرداختند. آنها نشان دادند که با افزایش شدت میدان الکتریکی می‌توان زمان شکست قطرات را کاهش داد. البته این کاهش زمان شکست قطرات برای طول اولیه قطره کوچکتر مشهودتر می‌باشد.

با توجه به بررسی های انجام شده توسط نویسندگان، تا کنون اثر وجود مانع نیم‌دایره‌ای در محل اتصال در فرآیند شکست قطره بررسی نشده است. برای این منظور، از کد متن باز جریس[1] و مدل حجم سیال برای شبیه‌سازی دو بعدی حرکت قطره در اتصال T-شکل با وجود مانع استفاده شده است. اثر پارامترهای مختلف از جمله حضور مانع، طول اولیه بی‌بعد قطره و عدد کاپیلاری روی الگوی جریان و زمان شکست قطرات مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- شبیه‌سازی عددی

برای مطالعه عددی حاضر از کد متن باز جریس که بصورت رایگان توسط پاپینت[2] در اختیار علاقه‌مندان قرار داده شده است، استفاده می‌شود و به زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده است. جریس مبتنی بر گسسته‌سازی حجم محدود می‌باشد. از گسسته سازی مرتبه دوم برای زمان و مکان استفاده می‌کند. همچنین بمنظور تعقیب سطح شترک، روش حجم سیال بکار گرفته می‌شود. معادلات بنیادی حاکم بر جریان سیال دربردارنده‌ی دو معادله‌ی اصلی می باشند که به ترتیب برابرند با معادله‌ی پایستاری جرم (۴) و اندازه‌ی حرکت (۲) که برای سیال با چگالی متغیر پایستاری جرم به صورت معادله (۳) ارائه می‌شود. در بیان معادلات از اعداد بی‌بعد حاکم بر مساله استفاده شده است که در رابطه (۱) آورده شده است. معادله (۲) معادلات ناویر-

[1] Gerris
[2] Popinet

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

استوکس که عبارت های کشش سطحی در آن جاگذاری شده است را بیان می‌کند. این معادله شکل ساده سازی شده‌ی کاربرد قانون دوم نیوتن برای المان های سیال می باشد.

$$\mathbf{x}^* = \frac{\mathbf{x}}{\mathrm{w}} \qquad \mu^* = \frac{\mu}{\mu_c} \qquad \mathbf{P}^* = \mathbf{P}\frac{\mathrm{w}}{\rho_0.\mathrm{U}_0^2}$$
$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_c} \qquad u^* = \frac{u}{U_0} \qquad \mathrm{t}^* = t\frac{\mathrm{U}_0}{\mathrm{w}} \qquad (۱)$$

$$\partial_t^*\rho^* + \nabla^*.(\rho^*\boldsymbol{u}^*) = 0 \qquad (۲)$$

$$(\partial_t^*\boldsymbol{u}^* + \boldsymbol{u}^*.\nabla^*\boldsymbol{u}^*) = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re}\nabla^*.D + \frac{1}{Re.ca}k\sigma_s\boldsymbol{n} \qquad (۳)$$

$$\nabla.\boldsymbol{u}^* = 0 \qquad (۴)$$

در معادلات بالا $\boldsymbol{u}$ برابر سرعت سیال، ρ چگالی سیال و D برابر تانسور تغییر شکل $\left(D_{ij} = \left(\partial_i u_j + \partial_j u_i\right)/2\right)$ می‌باشند. تابع توزیع دلتای دیراک δ_s بیان کننده‌ی این امر می باشد که عبارت کشش سطحی بر روی سطح مشترک بین دو فاز متمرکز شده است. σ ضریب کشش سطحی بوده، k و n به ترتیب مشخص کننده‌ی انحنا و بردار عمود بر سطح به سمت بیرون برای سطح مشترک بین دو فاز می باشند [۲۴].

برای جریان دو فاز، تابع کسر حجمی فازها به صورت $c(\mathbf{x},t)$ مشخص شده است که برای تعیین لزجت و چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین تابع فیلتر فضایی (c^*) برای هموارسازی کسر حجمی بین دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از آن، میدان(c^*) با میانگین گیری مقادیر چهارگوشه های میدان c ساخته می شود. این کار توسط درونیابی دوخطی از مقادیر مراکز سلول ها انجام می شود. وقتی که فیلتر فضایی مورد استفاده قرار می گیرد، خواص همراه با سطح مشترک بین دو فاز بر روی سه سلول گسسته سازی شده پخش می شود.

$$\rho^*(c) = c\rho_d^* + (1-c)\rho_c^* \qquad (۵)$$

$$\mu^*(c) = c\mu_d^* + (1-c)\mu_c^* \qquad (۶)$$

که ρ و μ به ترتیب دانسیته و ویسکوزیته سیال می‌باشند [۲۵] و اندیس های c و d به ترتیب مشخص کننده های فازهای پیوسته و گسسته می باشند. با توجه به پیوستگی جرم، معادله جابجایی خالص برای چگالی، با توجه به عبارت کسر حجمی در هر سلول، شکل زیر را به خود می گیرد.

$$\partial_t^* c + \nabla^*.(c\boldsymbol{u}^t) = 0 \qquad (۷)$$

در این روش، سلول های شامل سطح مشترک بین دو فاز، به عنوان سلول های یک ترکیب یکنواخت درنظر گرفته نمی شوند، در حالیکه فازها به صورت جدا از هم با یک مدل VOF تکه ای خطی با توجه به مراجع [۲۶ و ۲۷] تعیین شده اند. در هر سلول محاسباتی، نیروی کشش سطحی، که بر روی سطح مشترک بین دو فاز وارد می شود تعیین کننده ی تعامل بین فازهای مختلف می باشد. برای تولید سطح مشترک بین دو فاز، از یک مدل VOF تکه ای خطی استفاده شده که توسط پاپینت در کد جریس گنجانده شده است. سطح مشترک بین دو فاز به صورت یک خط (در حالت دوبعدی) تعیین می شود که در معادله زیر توصیف شده است [۲۷].

$$\boldsymbol{m}.\boldsymbol{x} = \alpha \qquad (۸)$$

در معادله‌ی بالا، $\boldsymbol{m}$ بردار نرمال محلی عمود بر سطح مشترک بین دو فاز و $\boldsymbol{x}$ برابر بردار مکان می باشند. با داشتن $\boldsymbol{m}$ و کسر حجمی محلی c و α به صورت منحصر به فرد و با تضمین اینکه حجم سیال شامل شده درون سلول و قرار گرفته زیر سطح برابر

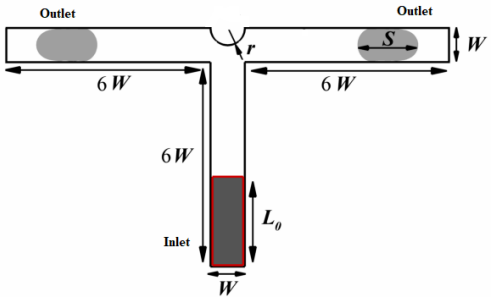
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

با c است، مشخص می شود. در اینجا $\boldsymbol{x}$ بردار مکان است. این حجم به صورت نسبتاً ساده ای قابل محاسبه است، به صورت در نظر گرفتن راه های مختلفی که یک سلول مربعی می تواند توسط یک خط قطع شود که منجر به همسان شدن توابع خطی یا درجه دوم برای تابع α می شود. این روش در مراجع [۲۶] به خوبی شرح داده شده است.

۳- هندسه مورد بررسی و استقلال حل از شبکه

شکل ۱ نمایی شماتیک از هندسه مورد بررسی را می‌دهد که دارای یک ورودی به طول $6W$ و دو خروجی به طول $6W$ می‌باشد. فاز گسسته (قطره) با طول اولیه (L_0) از سمت پایین واقع در شاخه اصلی میکروکانال به عرض W توسط فاز پیوسته که در ورودی به میکروکانال اصلی تزریق می‌شود، حرکت می‌کند و به یک مانع نیم‌دایره‌ای به شعاع $r=W/2$ در محل اتصال برخورد می‌کند و پس از شکست از زیرشاخه‌ها خارج می‌شود. در ورودی شرط مرزی سرعت معلوم، در خروجی شرط مرزی خروجی و شرط مرزی عدم لغزش برای جداره‌های میکروکانال در نظر گرفته شده است. جزییات مربوط به خصوصیات فیزیکی فاز پیوسته و گسسته در جدول۱ بیان شده است.



شکل ۱- نمایی شماتیک از میکروکانال دو بعدی T-شکل با مانع.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی سیالات.

سیالات	چگالی (kg/m^3)	لزجت (Pa. s)	کشش سطحی (N/m)
آب	۹۹۸/۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴۵
کریزون	۷۸۰	۰/۰۰۱۱۵	

اعداد بی بعد حاکم بر مسئله در معادله‌ی (۹) نشان داده شده است:

$$Ca=\mu_c \times u_c/\sigma,\ L^*=L_0/W,\ R^*=r/W,\ \vartheta \qquad (۹)$$

که به ترتیب نشان دهنده عدد کاپیلاری، طول اولیه بی‌بعد قطره، شعاع بی‌بعد دایره و زاویه تماس می‌باشند. لازم به ذکر است که در تحقیق حاضر زاویه تماس تقریبا ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شده است. همچنین، زمان بی‌بعد بصورت $t^* = \frac{t_0\, u_c}{w}$ تعریف می‌شود.

شبیه سازی‌های عددی جریان‌های چندفازی، نیازمند شبکه‌هایی به اندازه‌ی کافی کوچک برای حل نمودن الگوهای جریان می‌باشد. معاوضه بین دقت عددی و هزینه شبیه‌سازی، از هر دو دید، علم بنیادی و کاربردهای عملی، یک مسئله ی بسیار مهم می باشند. یک الگوریتم پالایش شبکه تطبیقی[۱] (AMR) بر روی شبکه‌های منظم، به صورت استاتیکی و دینامیکی پالایش شده برای تحلیل جزئیات فیزیک جریان، در نواحی مرزهای بین سطوح فازها و سطح منحنی، مورد استفاده قرار گرفته است [۲۷].

[۱] Adaptive Mesh Refinement (AMR)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

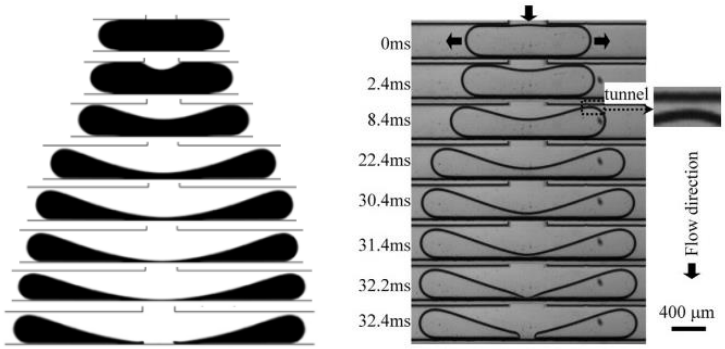
جریس با استفاده از روش AMR و شبکه‌ی چهارتایی/هشت‌تایی توانایی ریز/درشت نمودن شبکه به صورت سازمان یافته، در نزدیکی مرزهای جامد، مکان خاصی از هندسه، فاصله‌ی بین فازها و انحنای سطح مشترک بین دو فاز را دارد. در شکل ۲ نوعی از مش‌بندی در این تحقیق با جزئیات نشان داده شده است. با انجام شبیه‌سازی بر اساس تکنیک AMR، سه سطح پالایش[1] به ترتیب ۸، ۹ و ۱۰ مورد استفاده قرار گرفت که زمان شکست قطره تغییراتی در حدود ۱۱ و ۴ درصد به ترتیب برای سطح پالایش مش بین سطح ۸-۹ و ۹-۱۰ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که زمان شبیه‌سازی برای هر یک افزایش افزایش دقت توصیف رفتار جریان در کنار افزایش مدت زمان اجرای برنامه، سطح پالایش ۹ به‌عنوان حالت انتخاب شده است.



شکل ۲- گسسته سازی هندسه توسط روش AMR: الف) با ۷ سطح پالایش انحنا و ب) با ۹ سطح پالایش برای مرز جامد منحنی.

۴- نتایج

شکل ۳ نتایج کیفی حاصل از شبیه‌سازی حاضر در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۱۸] در زمینه سیر تکاملی شکست قطره در میکروکانال T-شکل متقارن را نشان می‌دهد. به منظور اعتبارسنجی، ابعاد هندسی و فازها مشابه پژوهش آنها در نظر گرفته شده است. همچنین اعداد بی‌بعد در مرتبه مشابه می‌باشند. همان طور که از شکل پیداست، نتایج شبیه سازی بصورت کیفی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- مقایسه بین نتایج عددی حاضر (سمت چپ) با نتایج آزمایشگاهی وانگ و همکاران [۱۸] (سمت راست) در زمینه سیر تکاملی شکست قطره در میکروکانال T-شکل متقارن.

در پژوهش برستون [۲۸] رابطه سرعت قطره کشیده شده که در داخل کانال حرکت می‌کند، توسط رابطه زیر بیان شده است:

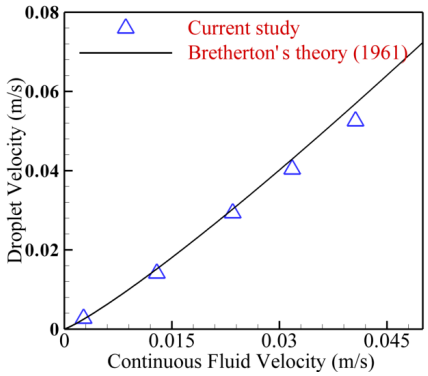
$$U = \overline{U}\left(1 + 1.29\left(\frac{\mu_c\, u_c}{\gamma}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \qquad (۱۰)$$

مقایسه نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج تحلیلی برستون [۲۸] 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.

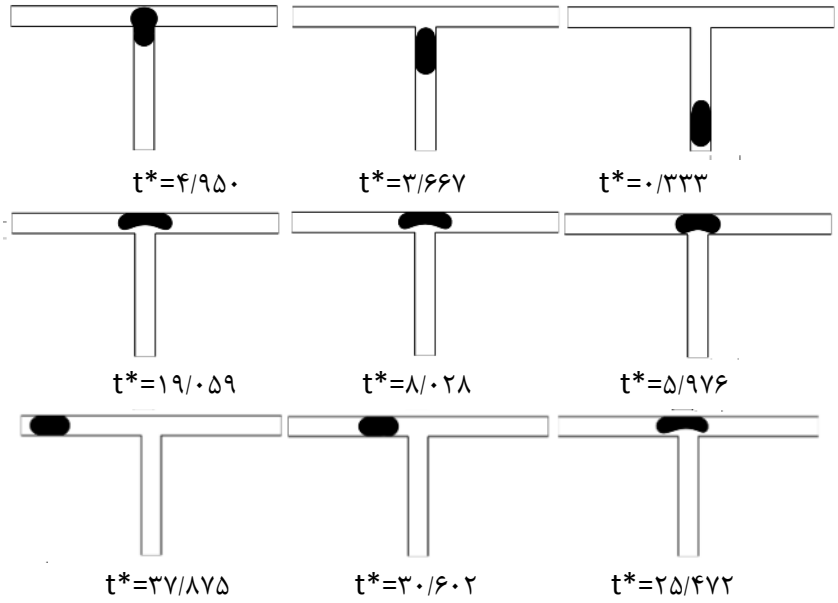
[1] Three-level Refinements

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]



شکل ۴-نمودار نتایج شبیه‌سازی عددی پژوهش حاضر و حل تحلیلی برستون [۲۷].



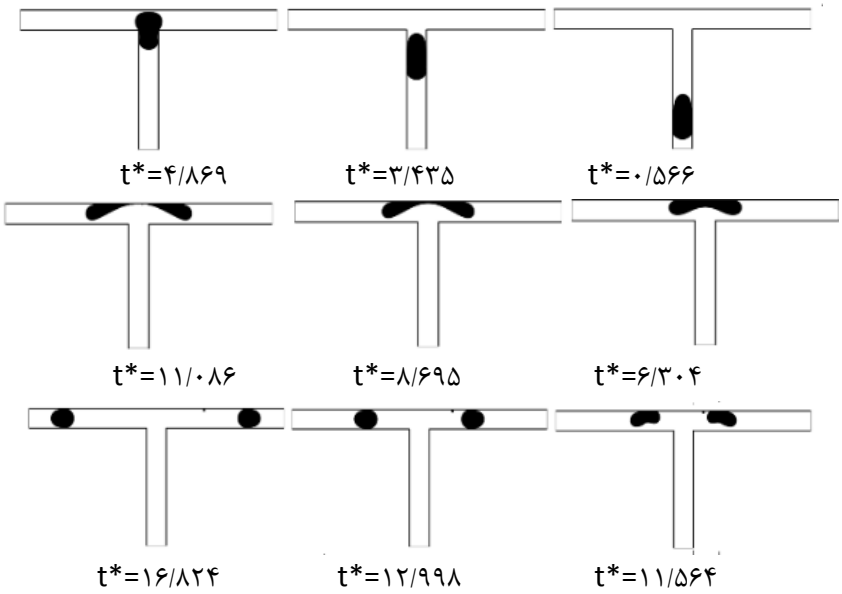
شکل ۵- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن در Ca=۰/۰۰۹ ، R*=۰/۵ و L*=۲.

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن بدون مانع به ترتیب برای Ca=۰/۰۰۹ و L*=۲، Ca=۰/۰۱۶ و L*=۲ و Ca=۰/۰۱۶ و L*=۴ را نشان می‌دهند. سه نوع رژیم عدم شکست قطره (شکل ۵)، شکست قطره با تونل (در شکل ۶ در زمان t*=۸/۶۹۵ مشاهده می‌شود که بین دیواره و سطح بالایی قطره، فضایی وجود دارد که به آن تونل گفته می‌شود) و شکست قطره بدون تونل (شکل ۷) مشاهده می‌شود. لشانسکی و پیسمن [۱۵] نیز چنین نتیجه‌ای را گزارش نموده‌اند. برای رژیم عدم شکست قطره (شکل ۵)، مشاهده می‌شود که تا قبل از اینکه قطره در اتصال پخش شود (t*=۸/۰۲۸)، قطره به میزان قابل ملاحظه‌ای حرکت و تغییر شکل دارد. زمانیکه قطره شروع به پخش‌شدن در اتصال می‌کند و بدون شکست به یک سمت کانال حرکت می‌کند (t*=۲۵/۴۷۲) مدت زمان زیادی طول می‌کشد. در واقع، قطره زمان قابل توجه‌ای به دلیل تقارن موجود در هندسه، ساکن باقی می‌ماند و در نهایت به آرامی به یک سمت حرکت می‌کند. در فرآیند شکست قطره سکون قطره معنی ندارد یعنی هنگامی که قطره به اتصال می‌رسد و در آن پخش می شود، به طور دائم تغییر شکل داده و نازک می‌شود. البته، در هنگام پخش شدن قطره در اتصال، تغییر شکل قطره کمی کند صورت می‌گیرد. همچنین، در برخی حالات (اعداد مویینگی پایین) ممکن است سرعت تغییر شکل کم باشد ولی قطره به حالت سکون نخواهد رسید. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ در می‌یابیم که در یک عدد کاپیلاری ثابت، با افزایش طول اولیه‌ی قطره، رژیم جریان از حالت عدم شکست به حالت شکست با تونل تغییر می‌کند.

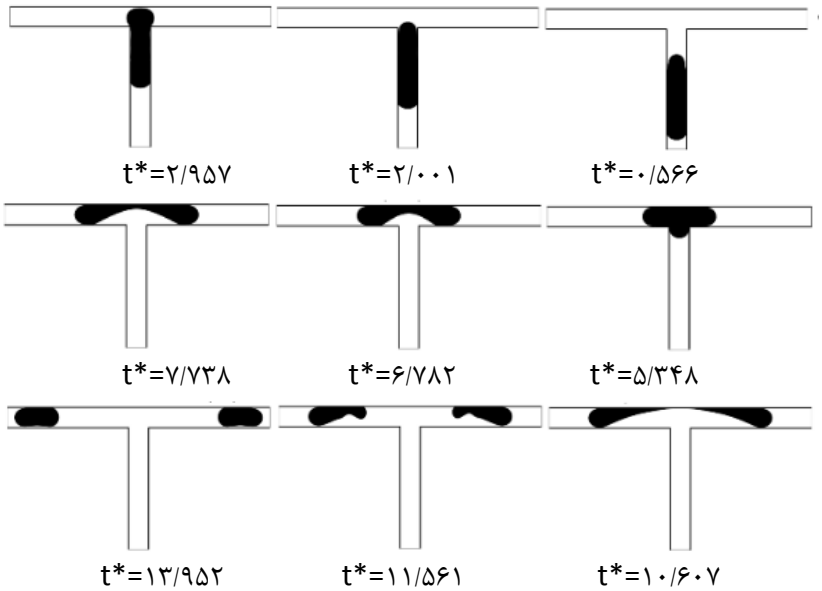
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

با مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ در می‌یابیم که با افزایش عدد مویینگی در طول اولیه ی قطره ثابت، رژیم جریان تغییر می‌یابد. از طرفی فرآیند حرکت و تغییر شکل قطره و شکست آن برای حالتی که شکست قطره با تونل می‌باشد نسبت به حالتی که شکست قطره بدون تونل می‌باشد، سریعتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۶- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن در Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۲.



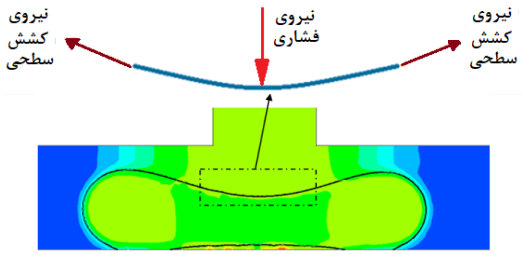
شکل ۷- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن در Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۴.

بمنظور تفسیر شکست یا عدم شکست قطره، در شکل ۸ یک المان کوچک از سطح بالایی قطره نشان داده شده است. دو نیرو بر المان بالای قطره وارد می‌شود: ۱- نیروی فشاری که از سیال پیوسته که در بالای قطره وجود وارد می‌شود و ۲- نیروی کشش سطحی که المان را به دو طرف می‌کشد. نیروی فشاری تمایل دارد ضخامت مرکز قطره را کاهش دهد (به عبارت دیگر، شعاع انحنای بالای قطره را کاهش دهد) و نیروی کشش سطحی نیز تمایل دارد ضخامت قطره را افزایش دهد (به عبارت دیگر،

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

شعاع انحنای بالای قطره را افزایش دهد). اگر نیروی فشاری بر نیروی کشش سطحی غلبه نماید، شعاع انحنای قطره به مرور زمان کاهش می‌یابد تا این که ضخامت مرکز قطره آن‌قدر نازک می‌شود که قطره شکسته می‌شود. اما اگر نیروی کشش سطحی بر نیروی فشاری غلبه داشته باشد، شعاع انحنای قطره از یک مقدار خاص کمتر نمی‌شود و قطره در یک شعاع انحنای خاص در حالت سکون باقی می‌ماند. پس از مدتی قطره به سمت یکی از شاخه‌ها حرکت خواهد نمود و تمام قطره وارد آن شاخه می‌گردد. میزان فشاری که پشت قطره وجود دارد بستگی به سرعت سیال پیوسته در آن جا دارد و از آنجا که سرعت سیال پیوسته به صورت مستقیم با عدد کاپیلاری در ارتباط است، پس می توان گفته میزان فشاری که در پشت قطره وجود دارد به عدد کاپیلاری بستگی دارد. از طرفی در تعریف عدد کاپیلاری، نیروهای کشش سطحی در مخرج کسر وجود دارند. پس می‌توان گفت عدد کاپیلاری معیاری است از نسبت نیروی فشاری در بالای قطره (که در حقیقت همان نیروی اینرسی است) به نیروی کشش سطحی. پس می‌توان دریافت که اگر عدد مویینگی افزایش یابد قطره به وضعیت شکست نزدیک‌تر می‌شود و برعکس با کاهش عدد مویینگی احتمال شکست قطره کاهش می‌یابد.



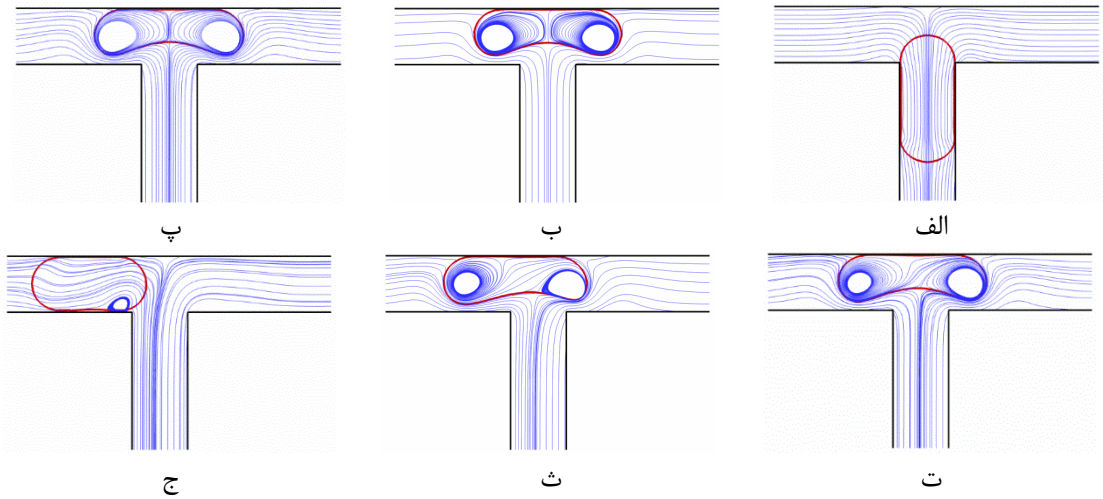
شکل ۸- المان کوچک از سطح بالایی قطره.

شناخت الگوی جریان در حالت‌های مختلف حرکت قطره، یکی از پر اهمیت ترین مواردی است که در بحث مطالعات حرکت قطرات وجود دارد. شناسایی الگوی جریان کمک شایانی به شناخت وضعیت اختلاط درون قطره در شرایط مختلف می نماید. لذا در هر مسئله، با بررسی الگوی جریان باید مشخص گردد که در چه شرایطی اختلاط درون قطره افزایش می‌یابد، زیرا استفاده از این حالت‌ها کمک به سزایی به افزایش اختلاط واکنش دهنده های شیمیایی (به خصوص مواد خورنده) می‌نماید. در هر حال با شناخت مناطقی که اختلاط در آن ها پیشینه است می توان ضمن بردن قطرات به آن وضعیت ها و بهره بردن از اختلاط بالا، از وضعیت هایی که اختلاط داخل قطرات محدود است، دوری نمود تا هزینه ی اضافی جلوگیری گردد.

در شکل ۹ نمودار خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای حالتیکه قطره نمی‌شکند (Ca=۰/۰۰۷ و L*=۲)، را نشان می‌دهد. هنگامی که قطره به اتصال نرسیده است (شکل ۹-الف) به صورت خطوط تقریباً مستقیم هستند. مسلماً این وضعیت نمی‌تواند کمک شایانی به افزایش اختلاط درون قطره نماید. همان طور که در شکل ۹-ب و شکل ۹-پ دیده می‌شود، دو گردابه‌ای بسیار بزرگ که هر یک تقریباً نیمی از حجم کلی قطره را به خود اختصاص داده در درون قطره تشکیل شده است. این دو گردابه باعث ایجاد یک اختلاط بسیار زیاد در درون قطره می‌شود. در حقیقت در مواردی که نیاز است، با دو یا چند واکنش‌گر خورنده با یکدیگر ترکیب شده و پس از اختلاط، شکسته یا به مکان خاصی منتقل شوند، می‌توان از فرایند زیر استفاده نمود. در شکل ۹-ت قطره کمی به شاخه‌ی سمت چپ نزدیک تر شده است. با مقایسه‌ی این تصویر با شکل ۹-پ می توان دریافت که گردابه‌ای چپ و راست هر دو کوچک تر، و جریان از سمت گردابه‌ای راست به گردابه‌ی چپ هم بیشتر شده‌است. بطوریکه در ادامه همانطور که از شکل ۹-پ پیداست، گردابه سمت راست کوچک‌تر از گردابه سمت چپ می‌شود تا در نهایت قطره به سمت چپ میکروکانال حرکت می‌کند و در نهایت گردابه‌ها ناپدید می‌شوند و فقط یک گردابه کوچک در قسمت پائینی پشت قطره تشکیل می‌شود.

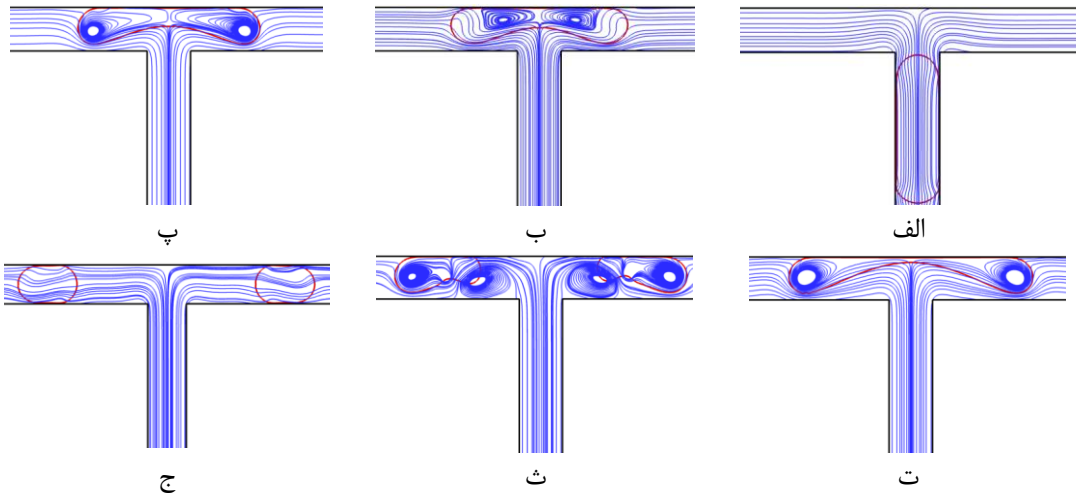
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]



شکل ۹- نمودار خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای عدم شکست قطره در اتصال T-شکل متقارن (Ca=۰/۰۰۷ و L*=۲).

شکل ۱۰ نمودار خطوط جریان برای رژیم شکست قطره با تونل (Ca=۰/۰۰۷ و L*=۳) را نمایش می‌دهد. قبل از رسیدن قطره به اتصال گردابه‌ای تشکیل نمی‌شود. طبق تصویرشکل ۱۰-ب، هنگامی که قطره در حال تغییر شکل در مرکز اتصال است دو گردابه متقارن در داخل قطره شکل می‌گیرد و با تغییر شکل قطره بزرگتر می‌شوند و به سمت شاخه‌های چپ و راست میکروکانال متمایل می‌شوند (شکل ۱۰-پ). همانگونه که در شکل ۱۰-ث پیداست، بعد از شکست قطره دو گردابه در پشت قطره نیز تشکیل می‌گردد. د ادامه نیز گردابه‌های داخل و پشت قطره ناپدید می‌شوند (شکل ۱۰-ج)

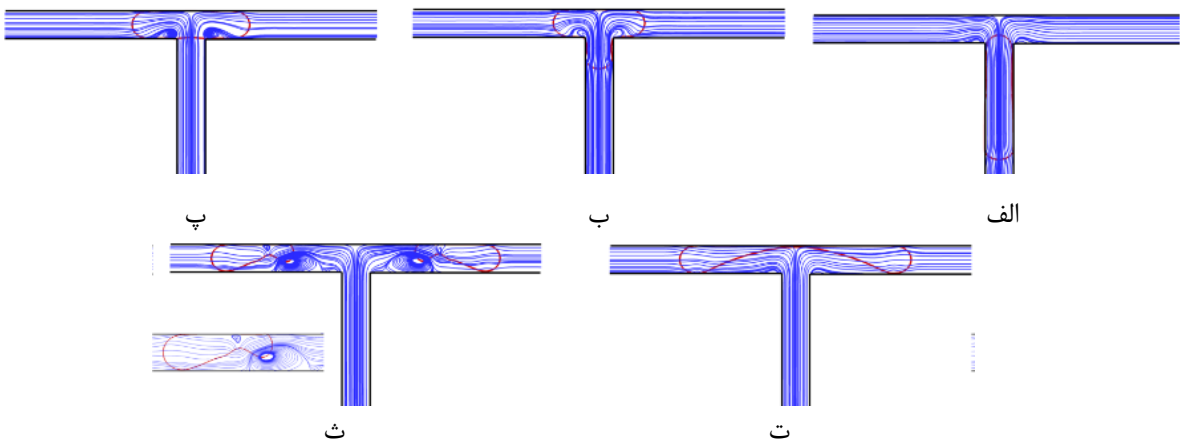


شکل ۱۰- نمودار خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای شکست قطره با تونل در اتصال T-شکل متقارن (Ca=۰/۰۰۷ و L*=۳).

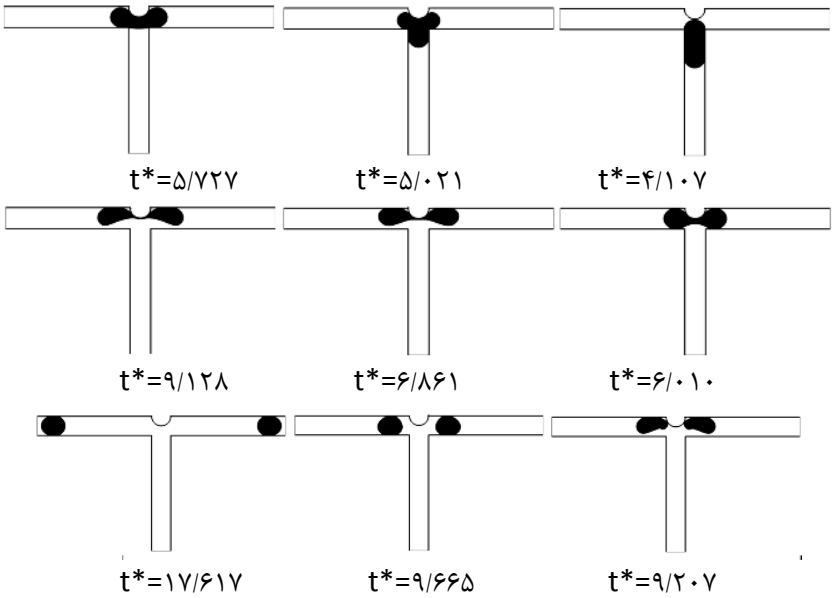
در شکل ۱۱ نمودار خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای شکست قطره بدون تونل را نشان می‌دهد (Ca=۰/۰۱۳ و L*=۴). همان طور که در تصویر شکل ۱۱-الف مشاهده می نمایید هنگامی که قطره به اتصال نرسیده است به صورت خطوط تقریباً مستقیم هستند. در تصویر بعد (شکل ۱۱-ب) نیز قطره در اتصال جلو رفته و پخش می شود ولی گردابه‌ای در داخل آن تشکیل نمی شود. فقط در شکل ۱۱-پ دو گردابه در داخل قطره تشکیل شده‌اند. نکته‌ی جالب توجه در مورد حرکت قطره در این حالت این است که حتی در حالتی که قطره در اتصال کاملاً پخش شده است (شکل ۱۱-ت)، گردابه‌ای در داخل قطره تشکیل نگردیده است. همچنین پس از شکست قطره (شکل ۱۱-ث) گردابه‌ی در عقب قطره به وجود آمده است که نمای بزرگ شده آن نیز نمایش داده شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]



شکل ۱۱- نمودار خطوط جریان در زمان‌های مختلف برای شکست قطره بدون تونل در اتصال T-شکل متقارن (Ca=۰/۰۱۳ و L*=۴).



شکل ۱۲- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع در Ca=۰/۰۰۹، R*=۰/۵ و L*=۴.

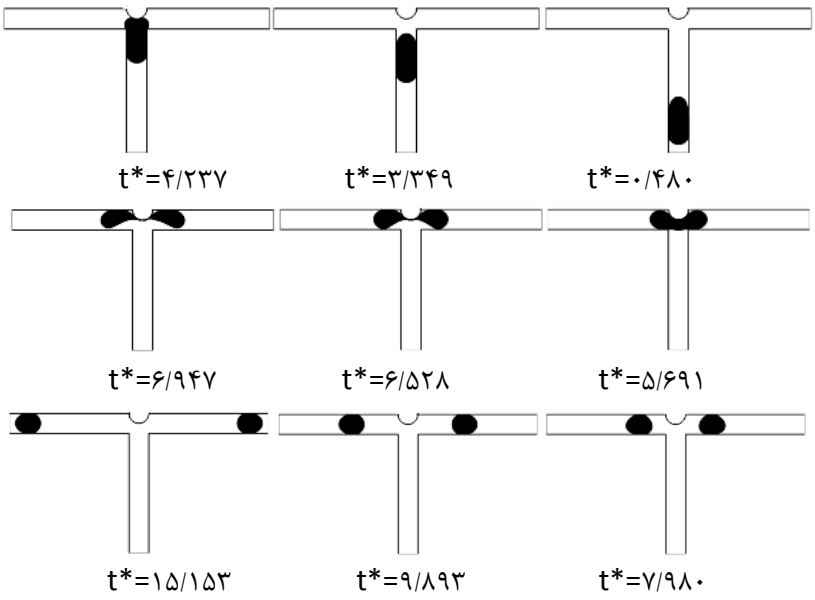
شکل ۱۲ حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع برای Ca=۰/۰۰۹، R*=۰/۵ و L*=۲ را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل ۵ و ۱۲ در می‌یابیم که در شرایط مشابه حضور مانع باعث تغییر رژیم جریان از حالت بدون شکست به رژیم شکست قطره با تونل می‌گردد. همانطور که از شکل ۱۲ پیداست، رژیم جریان را می‌توان به سه مرحله گسترش یافتگی، فشردگی و خروج تقسیم‌بندی نمود. قبل از ورود قطره به شاخه‌های میکروکانال، قطره تحت تاثیر نیروی محرک خارجی قطره در راستای جریان حرکت می‌کند. وقتیکه سطح جلویی قطره به مانع می‌رسد (t*=۴/۱۰۷)، تمام فضای موجود در محل اتصال را بطور کامل می‌پوشاند و مرحله گسترش یافتگی شروع می‌شود. در مراحل اولیه گسترش قطره، سطح جلویی قطره بطور مستقیم به مانع فشار وارد می‌کند. بعد از آن، سطح قطره در داخل شاخه‌های کانال رشد یافته و قطره در داخل شاخه‌ها کشیده می‌شود. تا زمانیکه انتهای قطره از کانال اصلی خارج گردد (t*=۵/۷۲۷)، شاخه‌های کانال همواره توسط قطره مسدود می‌باشند. از این رو، بخش میانی قطره توسط فاز پیوسته فشرده می‌شود که نشان دهنده آن است که فرآیند شکست قطره وارد مرحله فشردگی می‌شود. در این مرحله، ناحیه گردنی قطره با گذشت زمان به دلیل اعمال فشار فاز پیوسته، باریک‌تر می‌شود و در ادمه با ایجاد

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

تونل فاز پیوسته مسیری را برای حرکت به پائین دست شاخه‌های میکروکانال می‌یابد و این سبب می‌شود قطره در داخل شاخه‌های میکروکانال کشیده شده و به سمت پائین دست شاخه‌های میکروکانال هل داده شود و ناحیه گردنی آنقدر باریک شده که سرانجام قطره می‌شکند و دو قطره کوچکتر تولید می‌شود که نشان دهنده شروع مرحله خروج می‌باشد. در این مرحله، قطرات تولید شده بدلیل نیروی کشش سطحی و دیوارهای میکروکانال به سرعت از شکل‌های نامنظم به قطرات بیضوی شکل تغییر شکل می‌دهند و به سمت خروجی میکروکانال حرکت می‌کنند.

شکل ۱۳ حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع برای Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۲ را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های ۶ و ۱۳ دو تفاوت اساسی در شرایط مشابه مشاهده می‌شود: ۱- حضور مانع باعث تغییر رژیم جریان از حالت شکست با تونل به رژیم شکست قطره بدون تونل می‌گردد و ۲- در حضور مانع شکست قطره زودتر اتفاق می‌افتد. زمان بی‌بعد شکست قطره بصورت $t^*_{breakup} = \frac{(t_b - t_0)U_c}{w}$ تعریف می‌شود. t_b زمانی است که قطره می‌شکند و t_0 زمانی است که قطره برای به سطح مانع برخورد می‌کند (شکل ۱۴). شکست قطره در حضور مانع زودتر اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد حضور مانع باعث می‌شود که شکست قطره در زمان کمتری اتفاق بیفتد. در این حالت نیز رژیم جریان را می‌توان به سه مرحله گسترش یافتگی، فشردگی و خروج تقسیم‌بندی نمود. هنگامیکه سطح جلویی قطره که تمام کانال اصلی را پوشانده است به زیرشاخه‌ها می‌رسد، فرآیند شکست قطره وارد مرحله گسترش یافتگی می‌شود.



شکل ۱۳- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع در Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۲.



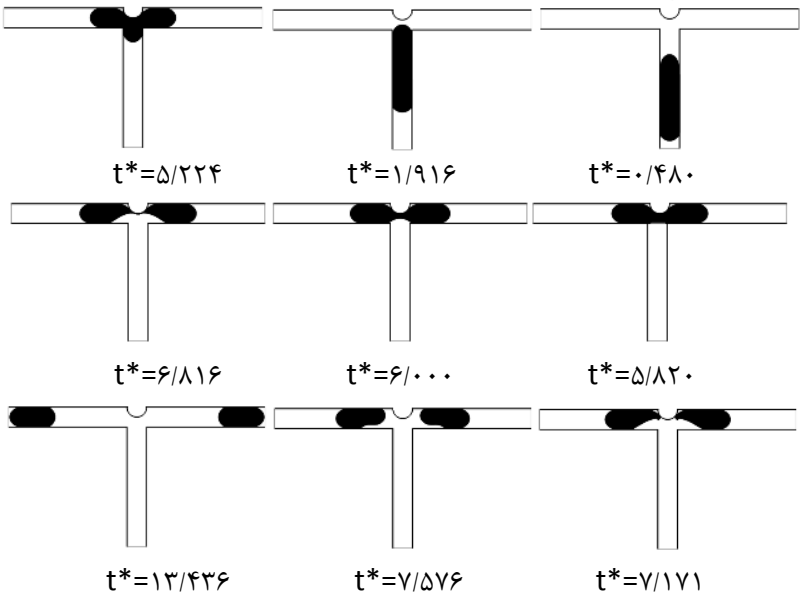
شکل ۱۴- تعریف زمان شکست قطره: الف) قطره با سطح مانع تماس می‌یابد (t_0) و ب) زمانیکه قطره می‌شکند (t_b)

در مراحل اولیه گسترش یافتگی، سطح جلویی قطره تا زمانیکه قطره به مانع برخورد نکرده است جهت جریان بدون تغییر باقی می‌ماند. در ادامه سطح کناری قطره در دو سمت زیرشاخه‌ها کشیده می‌شود. تا زمانیکه قسمت عقبی قطره کانال اصلی را

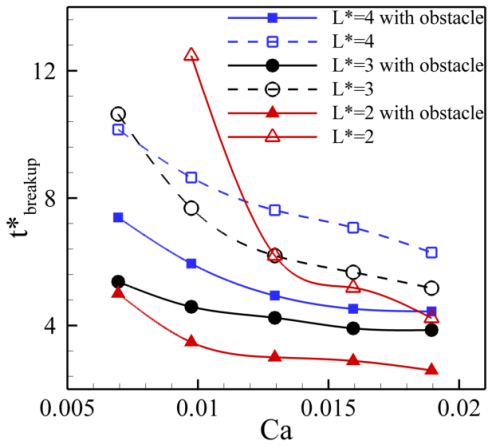
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

ترک نکرده است، زیرشاخه‌ها بطور کامل توسط قطره مسدود می‌گردند. از اینرو، مسیر حرکت فاز پیوسته مسدود می‌شود و چون نمی‌تواند به حرکت خود ادامه دهد به بخش میانی پشت قطره فشار وارد می‌کند. بدلیل اینکه هیچ مایعی از فاز پیوسته مابین سطح قطره و دیوارهای کانال قرار ندارد، تقریبا هیچ نیروی برشی بر سطح قطره اعمال نمی‌شود. از اینرو، قطره تحت سلطه کشش سطحی قرار می‌گیرد. با گذشت زمان، ضخامت ناحیه گردنی قطره کاهش یافته تا در نهایت قطره شکسته شده و دوتا قطره کوچکتر که زیرشاخه‌ها را مسدود می‌کند، تبدیل می‌شود و وارد مرحله خروج می‌گردد.

شکل ۱۵ حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع برای Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۴ را نشان می‌دهد. در این حالت نیز می‌توان رژیم جریان شامل سه مرحله گسترش یافتگی، فشردگی و خروج تقسیم‌بندی نمود. با مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۵ در می‌یابیم، مشاهده می‌شود شکست قطره سریعتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۵- تصاویر حرکت قطره در اتصال T-شکل متقارن با مانع در Ca=۰/۰۱۶، R*=۰/۵ و L*=۴.



شکل ۱۶- نمودار زمان شکست قطره بر حسب عدد کاپیلاری برای حالت بدون مانع و با مانع در نسبت بی‌بعد اولیه مختلف.

در شکل ۱۶ نمودار زمان بی‌بعد شکست قطره بر حسب عدد کاپیلاری برای اتصال T-شکل متقارن بدون مانع و با مانع برای نسبت‌های طول اولیه بی‌بعد ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در هر حالت با حضور مانع زمان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

شکست قطره کاهش می‌یابد چون در حضور مانع مسیر کانال برای عبور قطره مسدود شده و مرحله فشردگی در زمان کمتری اتفاق می‌افتد. تاثیر حضور مانع در کاهش زمان شکست قطرات در نسبت طول اولیه بی‌بعد کوچک بیشتر می‌باشد. برای نمونه، زمان بی‌بعد شکست قطره درعدد کاپیلاری ۰/۰۱ با حضور مانع، برای نسبت بی‌بعد طول اولیه ۳،۲ و۴ به ترتیب تقریباً۷۵٪، ۴۵٪ و ۳۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین، در هر نسبت طول اولیه بی‌بعد با افزایش عدد کاپیلاری زمان شکست قطره کاهش می‌یابد. در واقع، عدد کاپیلاری بیان کننده نیروی لزجت به نیروی کشش سطحی می‌باشد. در نتیجه، با افزایش عدد کاپیلاری، نیروی کشش سطحی کم شده و قطره زودتر می‌شکند.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرآیند شکست قطره را در اتصال T-شکل متقارن بصورت دوبعدی شبیه سازی شده است. بعد از اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از شبکه، به بررسی الگوهای مختلف جریان پرداخته شد و سه نوع رژیم جریان بدون شکست، شکست با تونل و شکست بدون تونل مشاهده شد. در ادامه، تاثیر حضور مانع روی الگوی جریان و زمان بی‌بعد شکست قطرات مورد ارزیابی قرا گرفت. نتایج نشان می‌دهد که حضور مانع در اعداد کاپیلاری کوچک و نسبت طول اولیه بی‌بعد باعث تغییر رژیم جریان از حالت بدون شکست به رژیم شکست می‌شود. همچنین، مشاهده می‌شود که حضور مانع باعث کاهش زمان بی‌بعد شکست قطرات می‌شود. بطوریکه زمان بی‌بعد شکست قطرات درعدد کاپیلاری ۰/۰۱ برای نسبت بی‌بعد طول اولیه ۳،۲ و۴ با حضور مانع به ترتیب تقریباً ۷۵٪، ۴۵٪ و ۳۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین، در هر نسبت اولیه بی‌بعد طول اولیه قطره با افزایش عدد کاپیلاری، زمان بی‌بعد شکست قطرات کاهش می‌یابد. این کاهش زمان بی‌بعد شکست قطرات درحالتیکه مانع وجود ندارد، مشهودتر است.

فهرست علائم

c	تابع کسر حجمی فازها	t^*	زمان بی‌بعد
c^*	تابع فیلتر فضایی	W	پهنای میکروکانال
Ca	عدد کاپیلاری	$\boldsymbol{x}$	بردار مکان
D	برابر تانسور تغییر شکل	$\mathbf{x}^*$	مکان بی‌بعد
$\boldsymbol{u}$	بردار سرعت سیال	**علائم یونانی**	
u^*	سرعت بی‌بعد،	ρ	چگالی سیال
k	انحنا سطح	ρ^*	چگالی بی‌بعد
L_0	طول اولیه قطره	μ	ویسکوزیته سیال
P^*	طول اولیه بی‌بعد	μ^*	ویسکوزیته بی‌بعد
$\boldsymbol{m}$	بردار نرمال محلی عمود بر سطح مشترک بین دو فاز	δ_s	تابع توزیع دلتای دیراک
n	بردار عمود بر سطح	σ	ضریب کشش سطحی
p	فشار سیال	θ	زاویه تماس
P^*	فشار بی‌بعد	**اندیس‌ها**	
r	شعاع نیم‌دایره	c	اندیس فاز پیوسته
t	زمان	d	اندیس فاز گسسته

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

مراجع

[1] Khoo, B.L., Grenci, G., Lim, Y.B., Lee, S.C., Han, J., and Lim, C.T., Expansion of patient-derived circulating tumor cells from liquid biopsies using a CTC microfluidic culture device, Nature protocols, Vol. 13, pages 34-58, (2018).

[2] Li, W., Zhang, L., Ge, X., Xu, B., Zhang, W., Qu, L., and Weitz, D. A. (2018). Microfluidic fabrication of microparticles for biomedical applications. Chemical Society Reviews, 47(15), 5646-5683.

[3] Ahmadi, F., Samlali, K., Vo, P.Q.N., Shih, S.C.C. (2019), An integrated droplet-digital microfluidic system for on-demand droplet creation mixing incubation and sorting, Lab on a Chip, 19, 524-535.

[4] Vajdi, M., Moghanlou, F. S., Niari, E. R., Asl, M. S., and Shokouhimehr, M. (2020). Heat transfer and pressure drop in a ZrB2 microchannel heat sink: a numerical approach. Ceramics International, 46(2), 1730-1735.

[5] Ting, T. H., Yap, Y. F., Nguyen, N. T., Wong, T. N., Chai, J. C. K., and Yobas, L., (2006), Thermally Mediated Breakup of Drops in Microchannels, Appl. Phys. Lett., 89(23), p. 234101.

[6] Ghaderi, A., Kayhani, M. H., Nazari, M., & Fallah, K. (2018). Drop formation of ferrofluid at co-flowing microcahnnel under uniform magnetic field. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 67, 87-96.

[7] Aboutalebi, M., Bijarchi, M. A., Shafii, M. B., & Hannani, S. K. (2018). Numerical investigation on splitting of ferrofluid microdroplets in T-junctions using an asymmetric magnetic field with proposed correlation. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 447, 139-149.

[8] Li, Y., Jain, M., Ma, Y., & Nandakumar, K. (2015). Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device. Soft Matter, 11(19), 3884-3899.

[9] Nisisako, T., Torii, T., & Higuchi, T. (2002). Droplet formation in a microchannel network. Lab on a Chip, 2(1), 24-26.

[10] Link, D. R., Anna, S. L., Weitz, D. A., & Stone, H. A. (2004). Geometrically mediated breakup of drops in microfluidic devices. Physical review letters, 92(5), 054503. [8] Li, Y., Jain, M., Ma, Y., & Nandakumar, K. (2015). Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device. Soft Matter, 11(19), 3884-3899.

[11] Jullien, M. C., Tsang Mui Ching, M. J., Cohen, C., Menetrier, L., & Tabeling, P. (2009). Droplet breakup in microfluidic T-junctions at small capillary numbers. Physics of Fluids, 21(7), 072001. [8] Li, Y., Jain, M., Ma, Y., & Nandakumar, K. (2015). Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device. Soft Matter, 11(19), 3884-3899.

[12] Fu, T., Ma, Y., Funfschilling, D., & Li, H. Z. (2011). Dynamics of bubble breakup in a microfluidic T-junction divergence. Chemical Engineering Science, 66(18), 4184-4195.

[13] Bedram, A., & Moosavi, A. (2011). Droplet breakup in an asymmetric microfluidic T junction. The European Physical Journal E, 34(8), 1-8

[14] Afkhami, S., Leshansky, A. M., & Renardy, Y. (2011). Numerical investigation of elongated drops in a microfluidic T-junction. Physics of Fluids, 23(2), 022002.

[15] Leshansky, A. M., & Pismen, L. M. (2009). Breakup of drops in a microfluidic T junction. Physics of Fluids, 21(2), 023303..

[16] Chen, Y., Wu, L., & Zhang, C. (2013). Emulsion droplet formation in coflowing liquid streams. Physical Review E, 87(1), 013002.

[17]] Shi, Y., Tang, G. H., & Xia, H. H. (2014). Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in T-junction and flow focusing devices. Computers & Fluids, 90, 155-163.

[18] Wang, X., Zhu, C., Wu, Y., Fu, T., & Ma, Y. (2015). Dynamics of bubble breakup with partly obstruction in a microfluidic T-junction. Chemical Engineering Science, 132, 128-138.

[19] Fallah, K., & Rahni, M. T. (2017). Lattice Boltzmann simulation of drop formation in T-junction microchannel. Journal of Molecular Liquids, 240, 723-732.

[20] Sun, X., Zhu, C., Fu, T., Ma, Y., & Li, H. Z. (2018). Dynamics of droplet breakup and formation of satellite droplets in a microfluidic T-junction. Chemical Engineering Science, 188, 158-169.

[21] Qian, J. Y., Chen, M. R., Wu, Z., Jin, Z. J., & Sunden, B. (2019). Effects of a Dynamic Injection Flow Rate on Slug Generation in a Cross-Junction Square Microchannel. Processes, 7(10), 765.

[22] Li, X., He, L., He, Y., Gu, H., & Liu, M. (2019). Numerical study of droplet formation in the ordinary and modified T-junctions. Physics of Fluids, 31(8), 082101.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

[23] Jafari, I and Fallah, K. (2020), Drop breakup in a symmetric T-junction microchannel under electric field, Microfluidics and Nanofluidics, 24 (94).
[24] Popinet, S. (2009). An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows. Journal of Computational Physics, 228(16), 5838-5866.
[25] Chen, X., & Yang, V. (2014). Thickness-based adaptive mesh refinement methods for multi-phase flow simulations with thin regions. Journal of Computational Physics, 269, 22-39.
[26] Popinet, S. (2003). Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries. Journal of Computational Physics, 190(2), 572-600.
[27] Chen, X., Ma, D., Yang, V., & Popinet, S. (2013). High-fidelity simulations of impinging jet atomization. Atomization and sprays, 23(12).
[28] Bretherton, F. P. (1961). The motion of long bubbles in tubes. Journal of Fluid Mechanics, 10(2), 166-188.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]

چکیده انگلیسی:

A Novel Method for Decreasing Breakup Time of Droplet in Symmetric T-junction Microchannel

Zeinab Khalilzadeh, Keivan Fallah*, Javad Alinejad, Yaser Rostamian

Department of mechanical engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.

Received: December 2020, Accepted: March 2021

Abstract

Droplet motion in microchannels is observed in versatile industrial and scientific applications, such as biological engineering, drug delivery, and encapsulation. In current investigation, breakup of mother droplet in a T-junction microchannel is simulated using the Gerris open-source software. To validate current simulation, results are appraised by the published literatures. The comparison depicts that the current results are in good agreement with previous studies. The effect of the presence of a semi-circular obstacle on the flow pattern and the breakup time of mother droplet is investigated for different Capillary numbers ($0.006 \leq Ca \leq 0.019$) and the non-dimensional initial length of droplet ($L^*=2$, 3, and 4). The results reveal that by simple modifications on the symmetry T-junction, the mother droplet splits faster in the comparison of the ordinary symmetry T-junction geometry under the same conditions. For instance, the breakup time of mother droplet at $Ca=0.01$ for $L^*=2$, 3, and 4 approximately decreases 75%, 45%, and 32% in the presence of obstacle, respectively. Furthermore, the breakup time of the drop decreases by increasing the Capillary number.

Key words: Microfluidics; Symmetric T-junction microchannel; Gerris open-source software; Volume of fluid method.

*corresponding author: Keivan.fallah@gmail.com

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-07]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.4.3.6]