

## شبیه‌سازی عددی فرایند تشکیل قطره درون میکروکانال تی - شکل دوبعدی با استفاده از روش تنظیم سطح

محمد راد، سجاداله رضازاده\*، عبدالرحمن دادوند

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۱/۰۵  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۳/۱۲

### کلمات کلیدی:

فناوری میکروسیالی  
جریان دوفازی  
تشکیل قطره  
روش تنظیم سطح  
میکروکانال تی - شکل

**خلاصه:** در این تحقیق یک شبیه‌سازی عددی بصورت دوبعدی با استفاده از روش تنظیم سطح دوفازی برای بررسی تاثیر نرخ جریان ورودی فاز پیوسته در فرایند تولید میکروقطره انجام شده است. تحلیل فرایند تشکیل میکروقطرات در یک میکروکانال تی - شکل برای جریان دوفازی مایع/مایع امتزاج‌ناپذیر صورت گرفته است. معادلات حاکم بر میدان جریان توسط روش المان محدود گسسته‌سازی و حل شده‌اند. نتایج عددی بدست آمده با داده‌های تجربی موجود در ادبیات فن اعتباردهی شده است، که نشان‌دهنده مطابقت قابل قبولی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که نرخ جریان ورودی فاز پیوسته تاثیر بسزایی بر روی اندازه قطرات تولید شده دارد. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که نمودار فشار در نقطه تلاقی دو کانال عمودی و افقی تعداد قطرات تشکیل شده و مراحل سه‌گانه‌ی تشکیل قطره را نشان می‌دهد. همچنین، بررسی‌ها بیان می‌کنند که اختلاف فشار جلو و پشت قطره و نیروی برشی ناشی از ویسکوزیته دو نیروی موثر در تشکیل قطره می‌باشند که در این بین تاثیر نیروی ناشی از اختلاف فشار دو سمت قطره بیشتر است. نهایتاً این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش مقدار دبی ورودی فاز پیوسته نیروی لازم جهت غلبه بر کشش سطحی نیز افزایش یافته و قطرات بیشتری با اندازه کوچکتر در مدت زمان کمتری تولید می‌شوند.

### ۱- مقدمه

از پدیده‌های مهم در جریان‌های چندفازی است که در بسیاری از پدیده‌های صنعتی و طبیعی دیده می‌شود. این فرایند کاربردهای وسیع و متعددی در داروسازی، میکروراکتورها، لوازم آرایشی، صنایع غذایی و پلیمر، آنالیزهای بیوشیمیایی و آنالیزهای دی ان ای<sup>۱</sup> دارد. کنترل تولید قطرات درون میکروکانال‌ها به عنوان یکی از مورد بحث‌ترین زمینه‌های مطالعه در رابطه با فناوری میکروسیالی، همواره موضوع مطالعه محققان قبلی بوده است [۱-۷].

میکروکانال‌های تی - شکل یکی از مهم‌ترین انواع وسایل مورد استفاده در زمینه مطالعه تشکیل قطره با توجه به شکل هندسی خاص آن‌ها و مزیتشان در کنترل تشکیل قطره به شمار می‌آیند. این میکروکانال‌ها به دلیل سهولت در ساخت و راحتی کار با آن‌ها

در طی سه دهه اخیر، سیستم‌های تحلیل کلی میکرو<sup>۱</sup> بصورت چشمگیری پیشرفت داشته‌اند. این سیستم‌ها دامنه وسیعی از فعالیت‌های میکروسیالی را در زمینه‌های آزمایشگاه روی تراشه<sup>۲</sup>، سنتز نانومواد، بیولوژی، شیمی، دارو رسانی، امولسیون‌ها و صنایع مرتبط فراگرفته است که باعث سرعت بخشیدن به پیشرفت آن‌ها گردیده است. جریان دوفازی مایع- مایع متشکل از دو فاز مایع نامحلول در یکدیگر است که به آن جریان دو مایع امتزاج‌ناپذیر نیز گفته می‌شود. فرایند تشکیل قطره از دو سیال مخلوط‌نشده یکی

1 Micro Total Analysis Systems (micro-TAS)  
2 Lab-On-a-Chip (LOC)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sor.mem@gmail.com



در آزمایشگاه‌ها و همچنین توانایی تولید قطراتی با اندازه یکنواخت و فرکانس تولید دلخواه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۸].

مطالعات متعددی در رابطه با فناوری میکروسیالی مبتنی بر قطره<sup>۱</sup> و بررسی تاثیر پارامترهای مهم بر روی تشکیل قطره [۹-۱۷] صورت گرفته است که در زیر به مهمترین کارهای انجام شده در این زمینه اشاره شده است.

شی و همکارانش [۱۸] تشکیل قطره در میکروکانال تی-شکل و جریان متمرکز با استفاده از روش بولتزمن شبکه‌ای<sup>۲</sup> را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهای مختلفی از جمله نسبت جریان، عدد موئینگی<sup>۳</sup>، هندسه و ویژگی‌های ترشوندگی سطح را مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با توجه به هندسه کانال اصلی، میکروکانال تی-شکل قطرات بیضی شکل تولید می‌کند، درحالی‌که میکروکانال جریان متمرکز قطرات کروی شکل ایجاد می‌نماید. آن‌ها نشان دادند که نسبت عرض کانال اصلی به کانال جانبی در هندسه تی-شکل و عرض خروجی اوریفیس در هندسه جریان متمرکز، نقش مهمی در تعیین شکل، طول و یا قطر قطرات را دارد.

ماستیانی و همکارانش [۱۹] تولید میکروقطره‌های آبی داخل جریان هوای با اینرسی بالا درون یک میکروکانال تی-شکل را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در اعداد موئینگی و رینولدز<sup>۴</sup> مختلف، الگوهای منحصر به فرد رژیم جریان از جمله رژیم فشرده شده<sup>۵</sup>، چکه‌ای<sup>۶</sup>، جتی<sup>۷</sup>، چکه‌ای ناپایدار<sup>۸</sup>، و جتی ناپایدار<sup>۹</sup> و گذار بین آن‌ها را مطالعه کردند. آن‌ها رژیم‌های چکه‌ای ناپایدار، و جتی ناپایدار را به عنوان رژیم‌های جدیدی که قبلاً در سیستم‌های مایع-مایع گزارش نشده بودند معرفی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اندازه قطرات و فرکانس تولید آن‌ها با افزایش اعداد رینولدز و موئینگی افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین تاثیر زاویه تماسی مختلف (۱۲۰ تا ۱۸۰ درجه) روی اندازه قطرات، زمان جداسازی و فرکانس تولید قطره را بررسی کردند.

گارتسکی و همکارانش [۲۰] فرایند تشکیل قطره و حباب درون

- 1 Droplet Based Microfluidic (DBMF)
- 2 Lattice Boltzmann Method (LBM)
- 3 Capillary number (Ca)
- 4 Reynolds number (Re)
- 5 Squeezing
- 6 Dripping
- 7 Jetting
- 8 Unstable dripping
- 9 Unstable jetting

یک میکروکانال تی-شکل را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که فرایند تشکیل قطره در اعداد موئینگی کوچک تحت تاثیر تنش برشی قرار نمی‌گیرد اما افت فشار از عوامل اصلی در شکل‌گیری قطره به حساب می‌آید. آن‌ها همچنین بیان کردند که مکانیزم تشکیل قطره مستقیماً به هندسه‌ای که قطره در آن به وجود می‌آید بستگی دارد. دیمنخ و همکارانش [۲۱] سه رژیم تشکیل قطره: چکه‌ای، جتی و فشرده شده را با استفاده از مطالعه دینامیک تشکیل قطره از سیالات امتزاج‌ناپذیر در یک میکروکانال تی-شکل بصورت عددی بررسی کردند. آن‌ها از مدل میدان‌فازی<sup>۱۰</sup> برای محاسبه حجم قطره، شعاع قطره و فشار استفاده کردند.

مطابق با سه رژیم ارائه توسط دیمنخ و همکارانش [۲۱]، خو و همکارانش [۲۲] تشکیل قطره در یک میکروکانال تی-شکل را از رژیم فشرده شده و چکه‌ای بررسی کردند. آن‌ها همچنین یک عدد موئینگی بهینه برای فاز پیوسته و نرخ جریان ورودی محلی در محل تشکیل قطره را بدست آوردند.

لیو و ژانگ [۲۳] یک مطالعه عددی برای حل دینامیک سطح‌مشارک مایع-مایع با استفاده از روش میدان‌فازی و روش بولتزمن شبکه‌ای را بر روی تشکیل قطره در یک میکروکانال تی-شکل انجام دادند. آن‌ها تاثیر عدد موئینگی، نسبت نرخ جریان و نسبت ویسکوزیته را بررسی کردند.

کارمر و همکارانش [۲۴] تشکیل قطره در یک جریان آرام را بصورت آزمایشگاهی مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که جدایش قطره به دینامیک جریان هر دو فاز پیوسته و پراکنده وابسته است.

سیواسامی و همکارانش [۲۵] اختلاف فشار میان فاز پراکنده و پیوسته در طی فرایند جدایش قطره درون یک میکروکانال تی-شکل را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که کمترین اختلاف فشار در آخرین لحظه‌ی جدایش قطره اتفاق می‌افتد.

لی و همکارانش [۲۶] مکانیزم تشکیل قطره در یک سیستم مایع-مایع امتزاج‌ناپذیر را درون یک میکروکانال تی-شکل بررسی کردند. آن‌ها فشار یک نقطه روی کانال افقی را مطالعه کردند و نشان دادند که فشار و تغییرات آن یک پارامتر بسیار مهم در مکانیزم تشکیل قطره است.

را با استفاده از روش تنظیم سطح<sup>۱۱</sup> بصورت عددی مطالعه کردند. آن‌ها الگوهای مختلف قطره از جمله اسلاگ بلند، کروی کوچک، جریان پایدار و نهایتاً جریان موازی را مشاهده کردند. تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که فشار نقطه اتصال کانال عمودی و افقی در میکروکانال تی-شکل در طی فرایند تشکیل قطره دائماً در حال تغییر است و تغییرات آن بصورت مستقیم و دقیق نشان‌دهنده رژیم جریان می‌باشد.

منظور از آنالیز حساسیت بررسی حساسیت فرایند تشکیل قطره به پارامترهای کنترلی از قبیل نسبت عرض کانال‌های عمودی و افقی، کشش سطحی، زاویه تماسی و ... می‌باشد [۳۲]. گو [۳۳] در رساله دکتری خود به بررسی حساسیت پارامترهایی همچون نرخ جریان ورودی، نسبت ویسکوزیته‌ها و کشش سطحی بر روی رژیم‌های جریان دو فازی فشرده‌شده و جتی پرداخت. گو به این نتیجه رسید که این پارامترها تاثیر مهمی در تعیین رژیم جریان دوفازی دارند.

با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته در زمینه جریان‌های دو فازی داخل میکروکانال‌ها که در بالا نیز به مهم‌ترین آن‌ها اشاره شد؛ مطالعات متعددی بر روی رژیم‌های جریان دو فازی و تاثیر عدد موئینگی، نسبت ویسکوزیته، نسبت جریان، نسبت عرض کانال عمودی به افقی و توزیع فشار و سرعت در نزدیکی محل اتصال کانال عمودی و افقی در این نوع جریان‌های صورت گرفته است. اما در این بین توجه کمی به بررسی نیروهای موثر در رژیم تشکیل قطره شده است. در تحقیق حاضر، جریان دوفازی مایع-مایع درون یک میکروکانال تی-شکل با استفاده از روش تنظیم سطح مطالعه می‌شود که هدف از آن بررسی تاثیر دو نیروی محرک در فرایند تشکیل قطره (یعنی نیروی ناشی از اختلاف فشار دو سمت قطره و نیروی برشی ناشی از گرادیان سرعت) در دبی‌های مختلف فاز پیوسته ورودی می‌باشد.

در این تحقیق پس از ارائه معادلات حاکم، شرایط مرزی مربوطه و هندسه مسئله؛ به بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی و اعتبارسنجی کار عددی حاضر با یک کار تجربی پرداخته خواهد شد. در ادامه، نتایج بدست‌آمده در این تحقیق به تفصیل مورد بحث قرار خواهد گرفت. در بخش آخر نیز، نتیجه‌گیری کلی از مطالعه انجام‌شده و جمع‌بندی حاصل از نتایج بدست‌آمده ارائه خواهد شد. این تحقیق یک تحقیق عددی می‌باشد که به کمک نرم‌افزار تجاری کامسول

یاقودنیتسینا و همکارانش [۲۷] الگوهای جریان دو مایع امتزاج‌ناپذیر در یک میکروکانال مستطیلی تی-شکل را بررسی کردند. آن‌ها در کارشان سه جریان مایع-مایع متفاوت از جمله نفت سفید-آب<sup>۱</sup>، روغن پارافین-آب<sup>۲</sup> و روغن پارافین-روغن کرچک<sup>۳</sup> را مورد مطالعه قرار دادند و الگوهای مختلف جریان مانند جریان موازی، اسلاگ<sup>۴</sup>، پلاگ<sup>۵</sup>، قطره‌پراکنده را برای نرخ جریان ورودی متفاوت مشاهده کردند. آن‌ها همچنین اعداد وبر<sup>۶</sup> و اونسورج<sup>۷</sup> را به عنوان پارامترهای موثر روی الگوهای جریان بررسی نمودند.

گودسونتی و آتا [۲۸] با استفاده از روش حجم‌سیال<sup>۸</sup> و بصورت سه‌بعدی تشکیل قطره درون یک میکروکانال تی-شکل را بررسی کردند. آن‌ها تشکیل قطرات سیال نیوتنی در یک سیال غیرنیوتنی را بصورت عددی در سه رژیم جریان مختلف از جمله فشرده شده، چکه‌ای و جتی را مطالعه کردند و تاثیر پارامترهایی چون نرخ جریان فاز پراکنده و پیوسته، کشش سطحی و پارامترهای رئولوژیکی روی مکانیزم تشکیل قطره را تحلیل کردند و به این نتیجه رسیدند که فرکانس تشکیل قطره با افزایش ویسکوزیته موثر و با کاهش حجم قطره افزایش می‌یابد.

فو و همکارانش [۲۹] یک مطالعه آزمایشگاهی روی الگوهای جریان دوفازی سیالات نیوتنی-غیر نیوتنی را درون یک میکروکانال تی-شکل انجام دادند. آن‌ها از سیکلوهگزان<sup>۹</sup> به عنوان فاز پراکنده و کربوکسی متیل سلولز<sup>۱۰</sup> بعنوان فاز پیوسته استفاده کردند و رژیم‌های جریان اسلاگ، قطره، موازی و جتی را مشاهده نمودند.

درکار و همکارانش [۳۰] الگوهای جریان درون یک میکروکانال تی-شکل را بصورت تجربی مطالعه کردند. آن‌ها اثرات قطر کانال، نرخ جریان، ویژگی‌های فیزیکی سیالات و آب‌گریزی دیوارهای کانال را روی الگوهای جریان بررسی کردند و چهار نوع الگوی جریان مختلف از جمله اسلاگ، اسلاگ و قطره، قطره و نهایتاً جریان موازی را مشاهده کردند.

یان و همکارانش [۳۱] تشکیل قطره در یک میکروکانال سه‌بعدی

- 1 Kerosene-water
- 2 Paraffin oil-water
- 3 Castor oil-paraffin oil
- 4 Slug
- 5 Plug
- 6 Weber number (We)
- 7 Ohnesorge number (Oh)
- 8 Volume of Fluid (VOF)
- 9 Cyclohexane
- 10 Carboxyl methyl cellulose

11 Level Set Method (LSM)

جدول ۱. پارامترهای بدون بعد مسئله و تعریف آن‌ها

Table 1. Non-dimensional parameters of the problem and their definition

نام پارامتر	$\omega$	$Q$	$\lambda$	$Ca$	$Re$
تعریف	$\frac{W_1}{W_2}$	$\frac{Q_1}{Q_2}$	$\frac{\mu_1}{\mu_2}$	$\frac{\mu_1 u_1}{\sigma}$	$\frac{\rho u_1 W_1}{\mu}$

مولتی‌فیزیکس<sup>۱</sup> انجام شده است.

$\mu$  (Pa)، لزجت دینامیکی (برحسب Pa.s)،  $F_{st}$  نیروی حجمی نشان‌دهنده کشش سطحی (برحسب N/m<sup>۲</sup>)،  $\phi$  تابع تنظیم سطح (بدون بعد)،  $\gamma$  و  $\varepsilon$  پارامترهای پایدارسازی عددی<sup>۳</sup> هستند.

برای مدل‌سازی سطح مشترک بین دو سیال و حرکت آن با سرعت  $u$  از معادله (۳) که تحت عنوان معادله تنظیم سطح شناخته می‌شود، استفاده شده است [۱]. ترم‌های سمت چپ این معادله حرکت دقیق سطح مشترک بین دو سیال را مشخص می‌کنند؛ در حالی که، ترم‌های سمت راست معادله جهت پایدارسازی عددی<sup>۴</sup> ضروری هستند. پارامتر  $\varepsilon$  بیانگر ضخامت سطح مشترک دو سیال است که در آن مقدار  $\phi$  به تدریج از صفر تا یک تغییر پیدا می‌کند. معمولاً مقدار این پارامتر با اندازه المان‌های شبکه بهینه در مسئله در یک حدود در نظر گرفته می‌شود.  $\gamma$  نیز پارامتر مقدار اولیه‌دهی<sup>۵</sup> است.  $\gamma$  پارامتری جهت پایدارسازی تابع تنظیم سطح بوده و ضروری است که مقدار آن برای مسائل مختلف تغییر پیدا کند. اگر  $\gamma$  یک مقدار خیلی کوچکی داشته باشد، ممکن است ضخامت سطح مشترک ثابت نماند و به دلیل ناپایداری عددی ممکن است سطح مشترک شکل موجی به خود بگیرد. از سوی دیگر، اگر مقدار آن خیلی بزرگ باشد، سطح مشترک بصورت نادرستی حرکت خواهد کرد. نتایج نشان می‌دهد که مناسب‌ترین مقدار برای  $\gamma$  بیشینه مقدار میدان سرعت در مسئله است. در این تحقیق مقادیر  $\gamma$  و  $\varepsilon$  به ترتیب برابر با ۰/۰۶۵ m/s و ۵/۸  $\mu\text{m}$  در نظر گرفته شده‌اند. در نرم‌افزار کامسول مولتی‌فیزیکس  $\phi$  یک تابع پله‌ای هموار است که مقدار آن در یک فاز برابر صفر بوده و در فاز دیگر برابر یک است، بر روی سطح مشترک نیز یک گذار پیوسته از مقدار صفر به یک برای  $\phi$  اتفاق می‌افتد. سطح مشترک دو سیال با مقدار  $\phi = 0.5$  مشخص می‌شود.

۲- پارامترها و مدل‌های محاسباتی

رفتار جریان‌های دوفازی درون میکروکانال تی- شکل به پارامترهای بدون بعدی همچون عدد رینولدز ( $Re$ )، عدد موئینگی ( $Ca$ )، نسبت ویسکوزیته‌ها ( $\lambda$ )، نسبت جریان‌های ورودی ( $Q$ ) و نسبت عرض کانال‌های عمودی و افقی ( $\omega$ ) وابسته است. این پارامترها به همراه نحوه اعمالشان در جدول ۱ آورده شده‌اند. مقدار عدد رینولدز درون میکروکانال‌ها بدلیل غالب بودن نیروی ناشی از ویسکوزیته نسبت به نیروی اینرسی پایین می‌باشد. بعلاوه، عدد موئینگی نیز نسبت نیروی ناشی از ویسکوزیته را به نیروی کشش سطحی نشان می‌دهد.

۲-۱- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله معادلات تراکم‌ناپذیر پیوستگی، ناویر-استوکس و معادله انتقالی تنظیم سطح<sup>۲</sup> می‌باشند که در زیر آورده شده‌اند:

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

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + F_{st} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left[ \varepsilon \nabla \phi - \phi \left( 1 - \phi \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] \quad (3)$$

در معادلات بالا  $\rho$  نشان‌دهنده چگالی (برحسب Kg/m<sup>۳</sup>)،  $\vec{u}$  بردار سرعت (برحسب m/s)،  $t$  زمان (برحسب s)،  $P$  فشار (برحسب

3 Numerical stabilization parameters

4 Numerical stability

5 Reinitialization parameter

1 COMSOL Multiphysics (Version 5.3a)

2 Level Set

چگالی و ویسکوزیته از روابط زیر بدست می آیند:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\varphi \quad (4)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\varphi \quad (5)$$

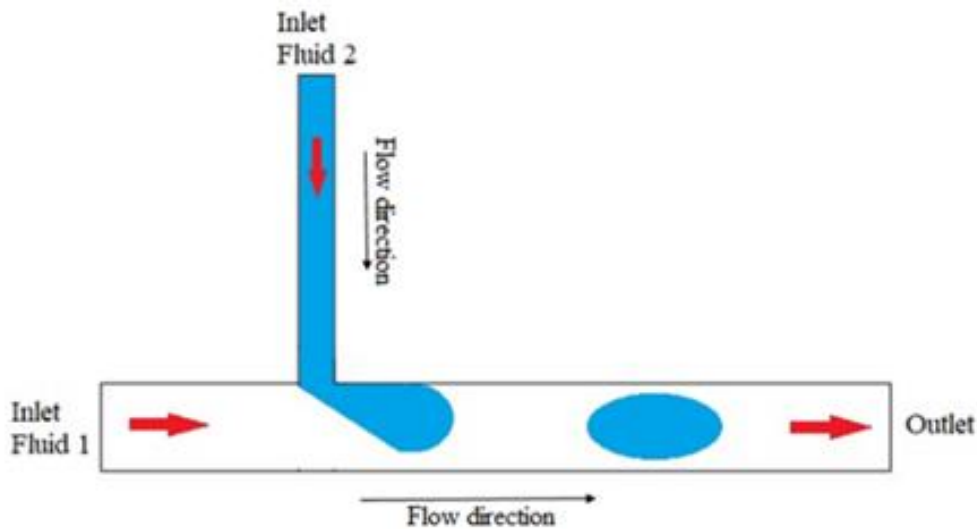
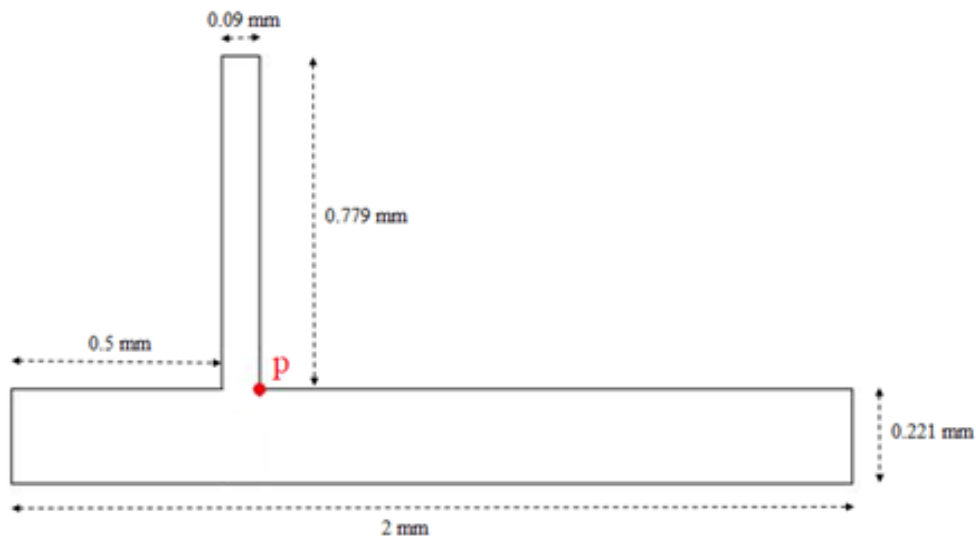
و  $\mu_2$  نیز به ترتیب ویسکوزیته سیال ۱ و سیال ۲ را نشان می دهند.

همچنین مقدار  $F_{st}$  را می توان از طریق معادله (۶) محاسبه کرد  
: [۱]

$$F_{st} = \sigma k(\varphi) n_{\Gamma} \cdot \delta_{sm}(\varphi) \quad (6)$$

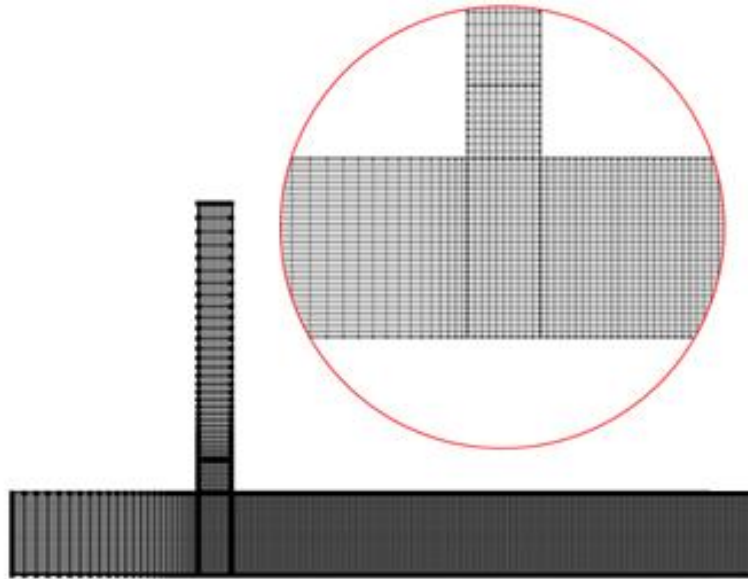
که در آن  $\sigma$  نشان دهنده کشش سطحی (بر حسب N/m)،

که در آن ها  $\rho_1$  و  $\rho_2$  به ترتیب چگالی سیال ۱ و سیال ۲،  $\mu_1$



شکل ۱: هندسه مسئله (الف): شماتیکی از هندسه مسئله و تشکیل قطره، (ب): هندسه استفاده شده به همراه ابعاد آن

**Fig. 1. Problem geometry (a): Schematic of problem geometry and droplet formation, (b): Geometry used with its dimensions**



شکل ۲: شبکه‌بندی هندسه مسئله

Fig. 2. Used mesh

جدول ۲: مقادیر کلی پارامترهای استفاده‌شده

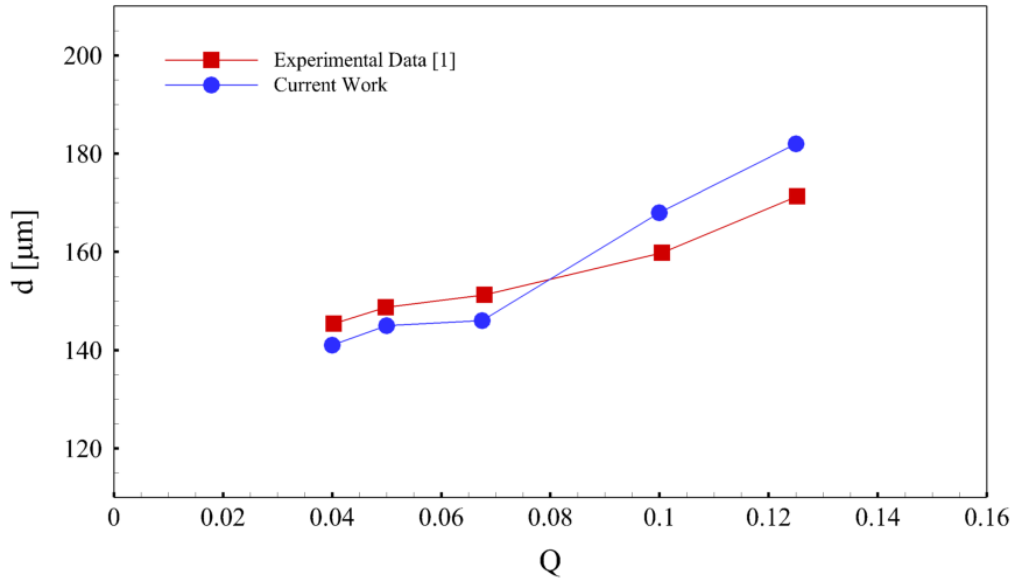
Table 2: Total values of used parameters

واحد	مقدار	کمیت
ml/h	۲	دبی حجمی ورودی سیال ۱ (روغن زیتون)
ml/h	۰/۲	دبی حجمی ورودی سیال ۲ (آب)
Pa.s	۰/۰۶۸	ویسکوزیته دینامیکی سیال ۱ (روغن زیتون)
Pa.s	۰/۰۰۰۹۳	ویسکوزیته دینامیکی سیال ۲ (آب)
kg.m <sup>-3</sup>	۹۰۸/۹	چگالی سیال ۱ (روغن زیتون)
kg.m <sup>-3</sup>	۹۹۸/۲	چگالی سیال ۲ (آب)
N/m	۰/۰۲۰۷۴	کشش سطحی
μm	۷۳۵	عمق کانال
degree	۱۸۰	زاویه تماسی
	بزرگترین طول	
m	کوچکترین المان در شبکه‌بندی	طول لغزش

جدول ۳: تاثیر افزایش تعداد المان‌های شبکه روی قطر موثر قطره

Table 3. The effect of increasing the number of elements on the effective droplet diameter

تعداد سلول‌ها	۵۰۰۰	۸۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۸۰۰۰	۲۸۰۰۰
قطر موثر قطره (میکرومتر)	۱۴۱/۵۹	۱۴۲/۴۸	۱۴۴/۰۶	۱۴۵/۳۱	۱۴۴/۴۹



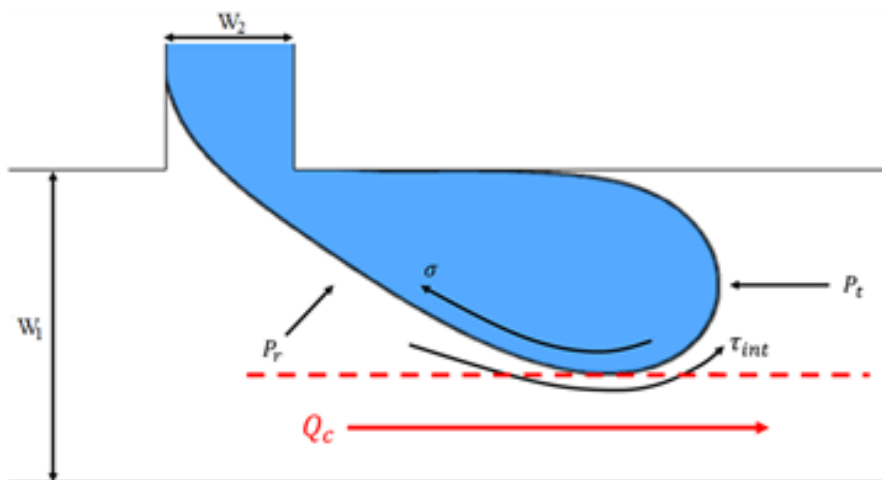
شکل ۳: مقایسه اثر افزایش نسبت دبی‌ها روی قطر موثر قطره

Fig. 3. Effect of increasing the ratio of inlet flow rates on effective droplet diameter

جدول ۴: درصد خطای به وجود آمده برای در نسبت دبی‌های متفاوت

Table 4. Maximum deviation of Q in different inlet flow rates

درصد خطا (%)	Q	Q <sub>2</sub> (ml/h)	Q <sub>1</sub> (ml/h)
۳/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۸	۲
۲/۵۰	۰/۰۵	۰/۱	۲
۳/۵۰	۰/۰۶۷۵	۰/۱۳۵	۲
۵/۱۰	۰/۱	۰/۲	۲
۶/۳۷	۰/۱۲۵	۰/۲۵	۲



شکل ۴: شماتیکی از نیروهای وارد بر یک قطره در حال تشکیل

Fig. 4. Schematic of the forces acting on a forming droplet

### ۲-۲- هندسه مسئله

شکل ۱- الف هندسه استفاده شده در این مطالعه را بصورت شماتیک نشان می‌دهد؛ جزئیات بیشتر هندسه به همراه ابعاد آن در شکل ۱- ب آورده شده است. همانطور که در شکل ۱- الف نشان داده شده است سیال ۱ از طریق کانال افقی و سمت چپ آن وارد کانال شده و سیال ۲ نیز از طریق کانال عمودی وارد کانال می‌شود.

### ۲-۳- شرایط مرزی

در ورودی کانال شرط مرزی جریان ورودی آرام<sup>۱</sup> با دبی حجمی مشخص و بصورت توسعه یافته اعمال شده است. دبی حجمی ورودی فاز پراکنده  $Q_2$  و دبی حجمی ورودی فاز پیوسته  $Q_1$  می‌باشد و نسبت دبی حجمی دو جریان ورودی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$k$  بیانگر انحنای محلی سطح مشترک دو سیال، بردار نرمال بر سطح مشترک و به سمت داخل آن و  $\delta_{sm}$  تابع دلتای دیراک روی سطح مشترک دو سیال می‌باشد.

$$k(\varphi) = -\nabla \cdot n_T \quad (7)$$

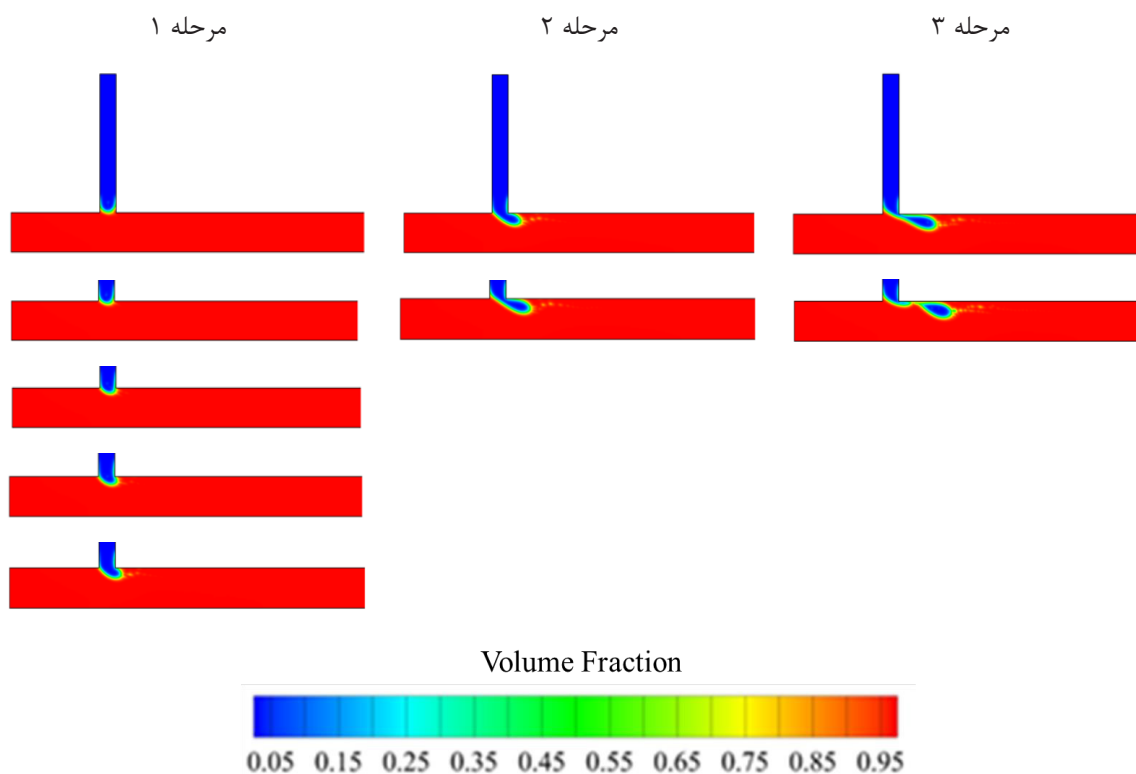
و تابع دلتای دیراک را می‌توان بصورت زیر تخمین زد:

$$\delta_{sm}(\varphi) = 6|\varphi(1-\varphi)| |\nabla \varphi| \quad (8)$$

در تحقیق حاضر، کلیدی‌ترین پارامتر خروجی قطر قطره موثر ( $d$ ) می‌باشد و مقدار آن با انتگرال‌گیری از ناحیه‌ای که در آن  $\varphi > 0.5$  می‌باشد محاسبه می‌شود (معادله (۹)) [۱].

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\Omega} (\varphi > 0.5) d\Omega} \quad (9)$$

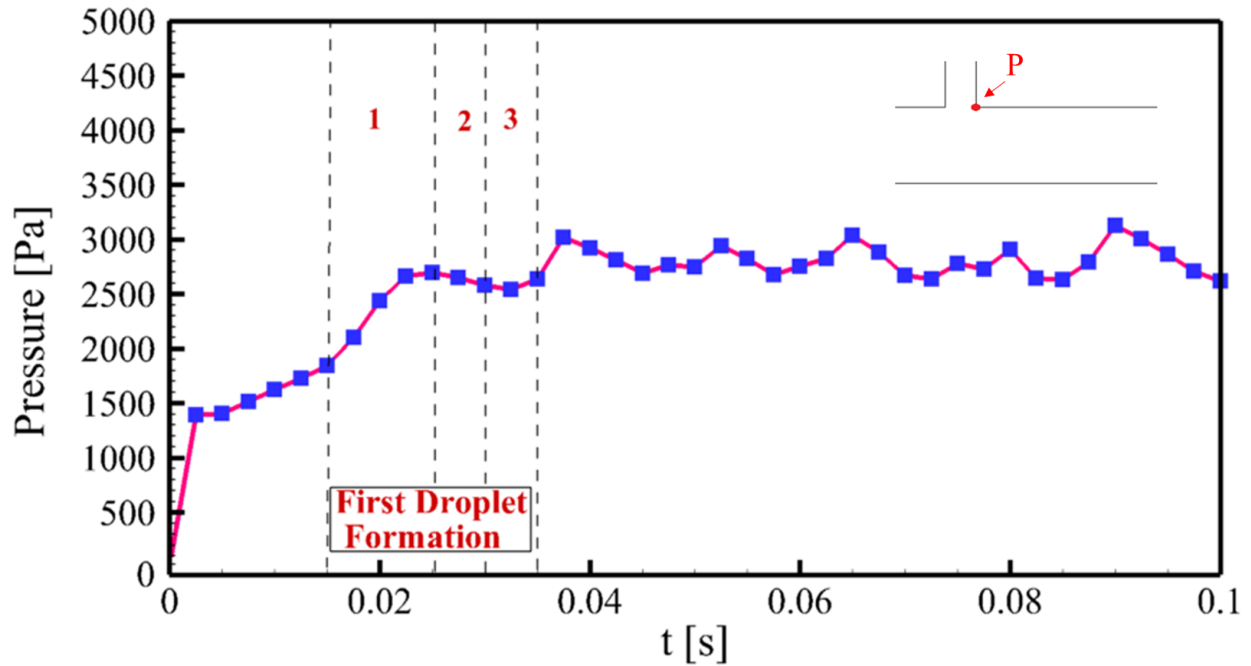
1 1. Laminar inflow



شکل ۵: کانتورهای کسر حجمی مراحل تشکیل قطره؛ مرحله ۱: پر شدن ( $t_0 = 0.015, 0.0175, 0.02, 0.0225$  و  $0.025$  s)، مرحله ۲: گلوبی شدن ( $t_0 = 0.0275$  و  $0.03$  s)، مرحله ۳: جدایش ( $t_0 = 0.0325$  و  $0.035$  s)

Fig. 5. Volume fraction contours of droplet formation stages; Stage 1: filling ( $t=0.015, 0.0175, 0.02, 0.0225$  and  $0.025$  s), stage 2: throating ( $t=0.0275$  and  $0.03$  s), stage 3: separation ( $t=0.0325$  and  $0.035$  s)





شکل ۶: نمودار تغییرات فشار نقطه P با گذشت زمان

Fig. 6. Diagram of pressure variations at point P over time

دقیق تغییرات در قسمت خروجی کانال، یعنی جایی که دو فاز با یکدیگر در تعامل هستند، از مش ریزتری استفاده شده است.

#### ۲-۵- پارامترهای شبیه‌سازی

در جدول ۲ مقادیر کلی متغیرها و پارامترهای استفاده شده در حل مسئله آورده شده است.

#### ۳- نتایج

در این بخش، به ارائه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، اعتبار سنجی شبیه‌سازی حاضر با کار تجربی و ارائه نتایج بدست‌آمده و بحث در مورد آن‌ها پرداخته خواهد شد.

#### ۳-۱- بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، اندازه قطر قطره تشکیل‌شده در میکروکانال برای هندسه موردنظر بر حسب پنج شبکه‌ی مختلف بررسی شده است. با توجه به نتایج جدول ۳ شبکه با تعداد سلول‌های ۱۸۰۰۰ به عنوان شبکه مناسب محاسباتی انتخاب شده است، زیرا با افزایش تعداد سلول‌ها از ۱۸۰۰۰ به ۲۸۰۰۰ اندازه

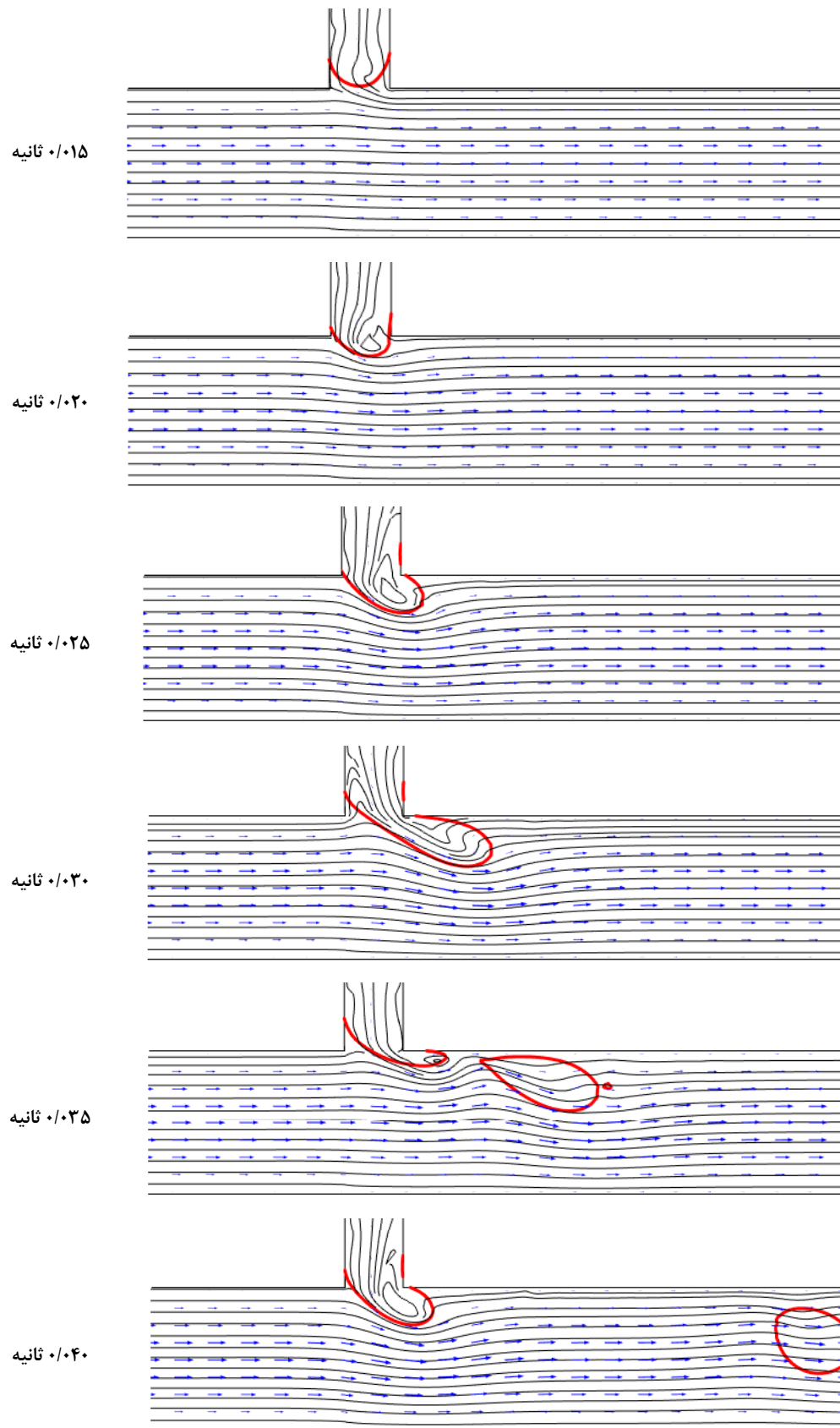
$$Q = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (10)$$

برای خروجی کانال شرط مرزی فشار ثابت در نظر گرفته شده است؛ در واقع، فشار نسبی در خروجی کانال برابر صفر می‌باشد. دیوار کانال‌ها در قسمت ورودی دارای شرط مرزی عدم لغزش<sup>۱</sup> بوده و بر روی سایر دیوارها شرط مرزی دیوار خیس<sup>۲</sup> با زاویه تماس<sup>۳</sup> و طول لغزش<sup>۴</sup> مشخص اعمال شده است.

#### ۲-۴- شبکه عددی

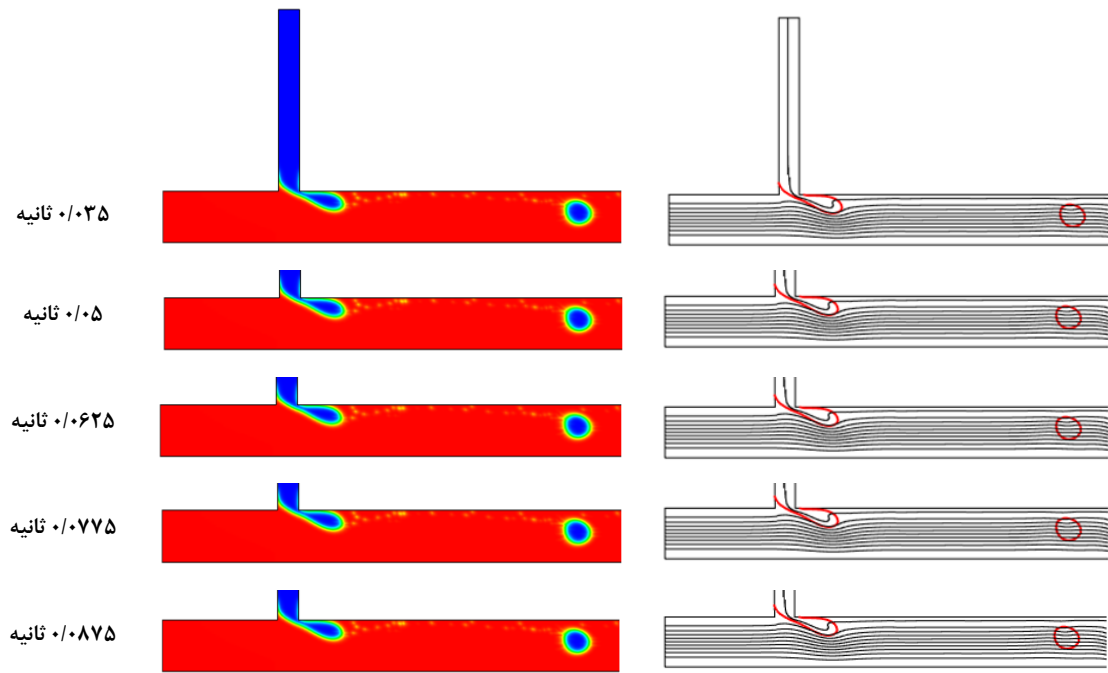
شبکه عددی استفاده شده در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۳-۳ مشخص است از شبکه‌بندی ساختارمند مستطیلی برای مش‌زدن استفاده شده است. در قسمت‌های ورودی هر دو کانال افقی و عمودی، یعنی قسمتی که قطرهای هنوز تشکیل نشده است، از مش درشت‌تری استفاده شده است؛ اما به منظور ثبت

- |   |                  |
|---|------------------|
| 1 | 2. No-slip       |
| 2 | 3. Wetted wall   |
| 3 | 4. Contact angle |
| 4 | 5. Slip length   |



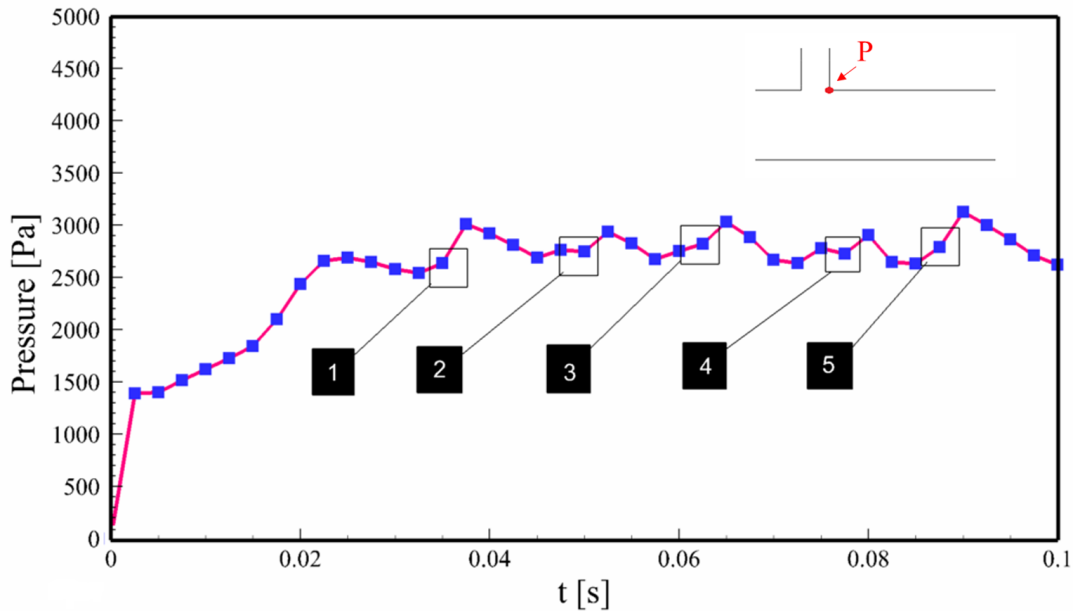
شکل ۷: خطوط جریان به همراه بردارهای سرعت در فرایند تشکیل قطره

Fig. 7. Streamlines along with velocity vectors during the droplet formation process



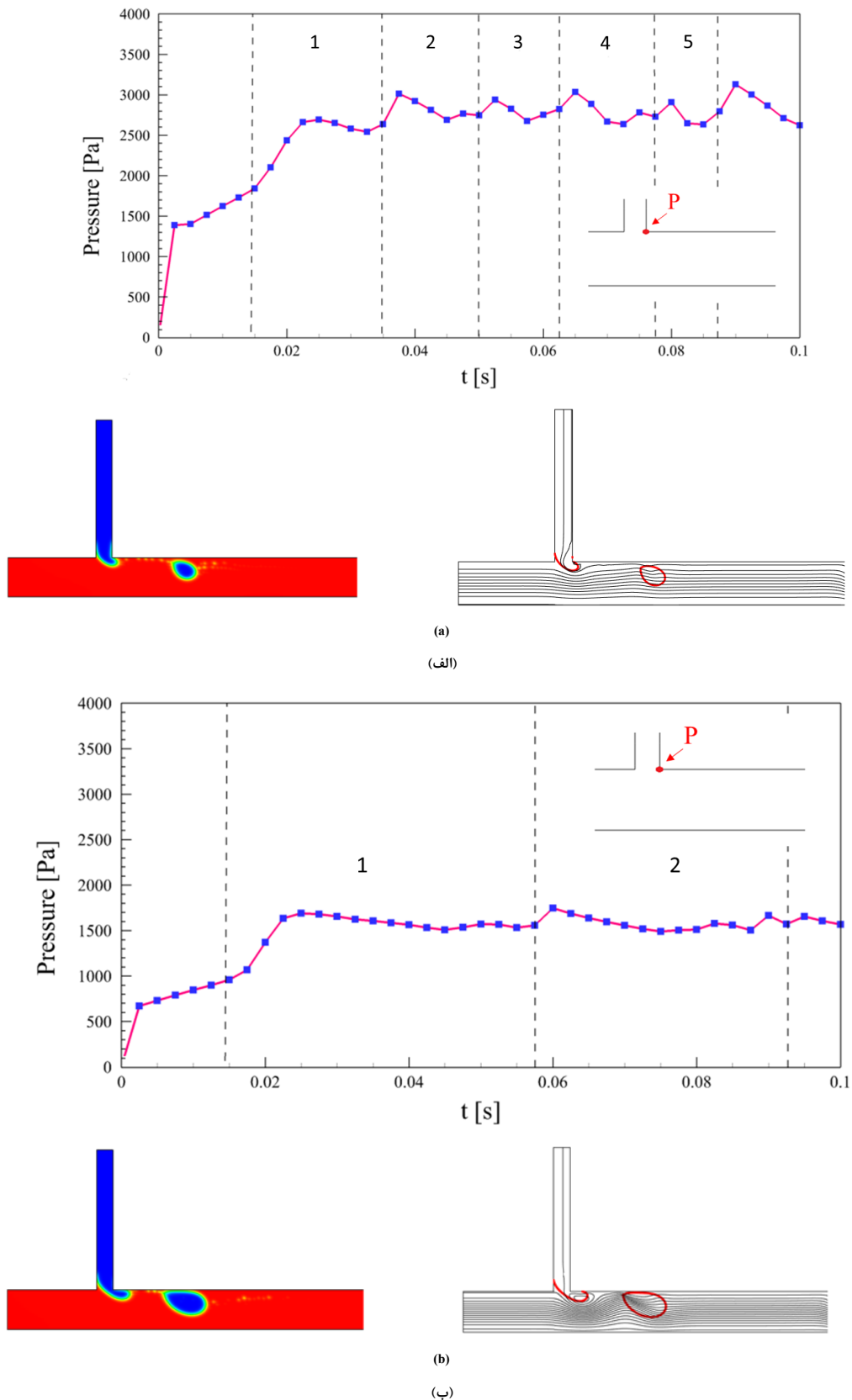
شکل ۸: کانتورهای کسر حجمی و خطوط جریان برای ۵ قطره تشکیل شده زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۴ میلی لیتر بر ساعت می باشد

Fig. 8. Volume fraction contour and streamlines for 5 formed droplets when the inlet flow rate of the continuous phase is 4 ml/h



شکل ۹: تغییرات فشار نقطه P زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۴ میلی لیتر بر ساعت می باشد

Fig. 9. Variation of point P pressure when the continuous phase inlet flow rate is 4 ml/h

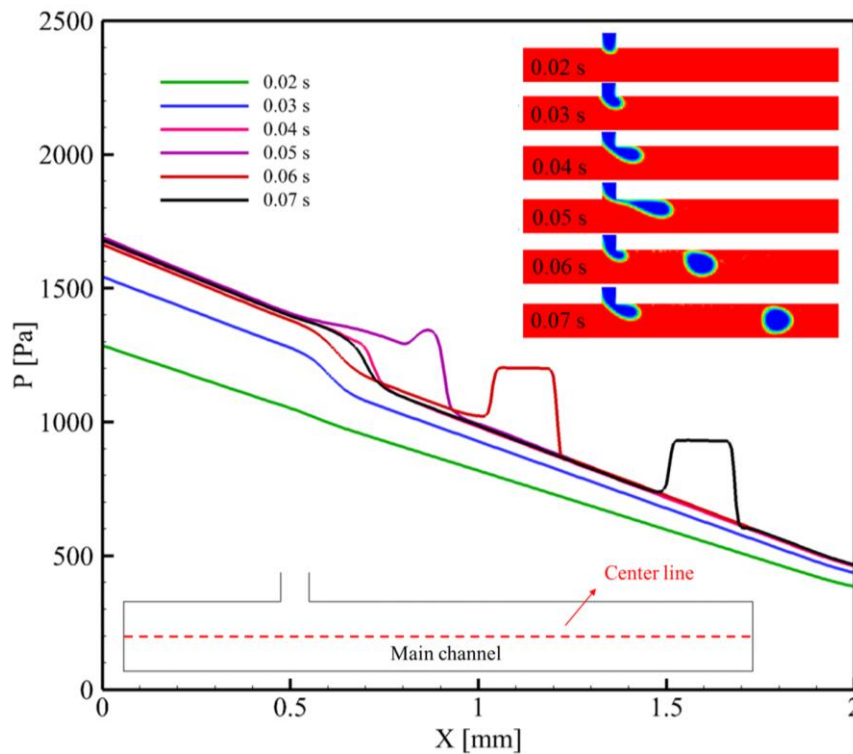


شکل ۱۰: تاثیر دبی ورودی فاز پیوسته بر تعداد قطرات تشکیل شده و نمودار فشار نقطه P: (الف): دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۴ میلی لیتر بر ساعت، (ب): دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۲ میلی لیتر بر ساعت و (ج): دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۱ میلی لیتر بر ساعت

**Fig 10. Influence of continuous phase inlet flow rate on the number of formed droplets and pressure diagram at point P: inlet flow rate of continuous phase is equal to (a): 4, (b): 2 and (c): 1 ml/h**

جدول ۵: تاثیر دبی ورودی فاز پیوسته بر روی تعداد قطرات تشکیل شده، قطر موثر قطره و زمان تشکیل اولین قطره  
**Table 5. Effect of continuous phase inlet flow rate on number of formed droplets, effective droplet diameter and time of first droplet formation**

زمان تشکیل اولین قطره از لحظه شروع (ثانیه)	قطر موثر قطره (میلی متر)	تعداد قطرات تشکیل شده در مدت ۰/۱ ثانیه	$Q_1$ (میلی لیتر بر ساعت)
۰/۱	۰/۲۲	۱	۱
۰/۰۵۷۵	۰/۱۸	۲	۲
۰/۰۳۷۵	۰/۱۰	۵	۴



شکل ۱۱: وزیع فشار بر روی خط مرکزی کانال اصلی طی فرایند تشکیل قطره

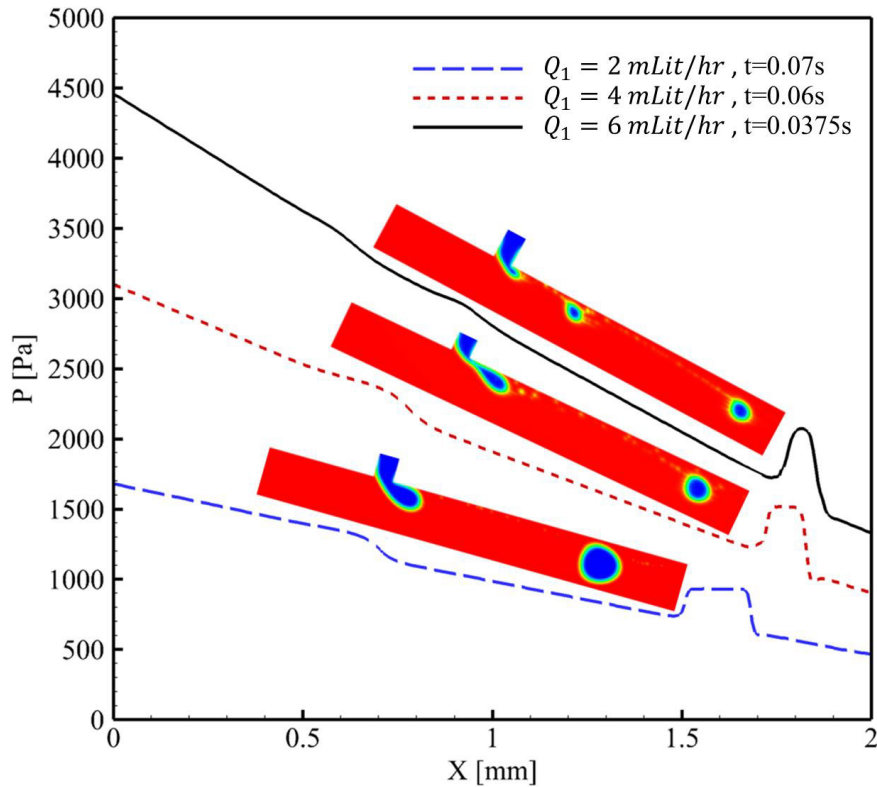
**Fig. 11. Pressure distribution on the central line of the main channel during the droplet formation process**

در یک میکروکانال تی-شکل که توسط وونگ و همکارانش [۱] ارائه شده بود، بررسی گردید. مقدار دبی‌های ورودی و نسبت آن‌ها برای ۵ حل مختلف در جدول ۴ آورده شده است. با تغییر دبی فاز پراکنده و ثابت نگه داشتن سایر شرایط برای حل مسئله، نتایج بدست آمده برای اندازه قطر قطره مقایسه شده است (شکل ۴). همانطور که در شکل ۴ مشخص است تطابق قابل قبولی بین نتایج بدست آمده وجود دارد. شکل ۴ نشان می‌دهد که با افزایش  $Q$  قطر قطره افزایش می‌یابد.

قطر قطره تقریباً ۰/۳ میکرومتر اختلاف پیدا می‌کند که مقدار ناچیزی است. لذا به منظور زیادنشدن حجم محاسباتی و کاهش زمان حل از شبکه با تعداد سلول‌های مذکور استفاده شده است.

### ۳-۲- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی نتایج ارائه شده و مقایسه با کارهای گذشته، تاثیر نسبت دبی حجمی جریان‌های ورودی ( $Q$ ) بر روی اندازه قطر



شکل ۱۲: توزیع فشار بر روی خط مرکزی کانال اصلی برای دبی‌های ورودی فاز پیوسته مختلف

Fig. 12. Distribution of pressure on the central line of the main channel for the different continuous phase inlet flow rates

چکه‌ای)، جتی و موازی اشاره کرد.

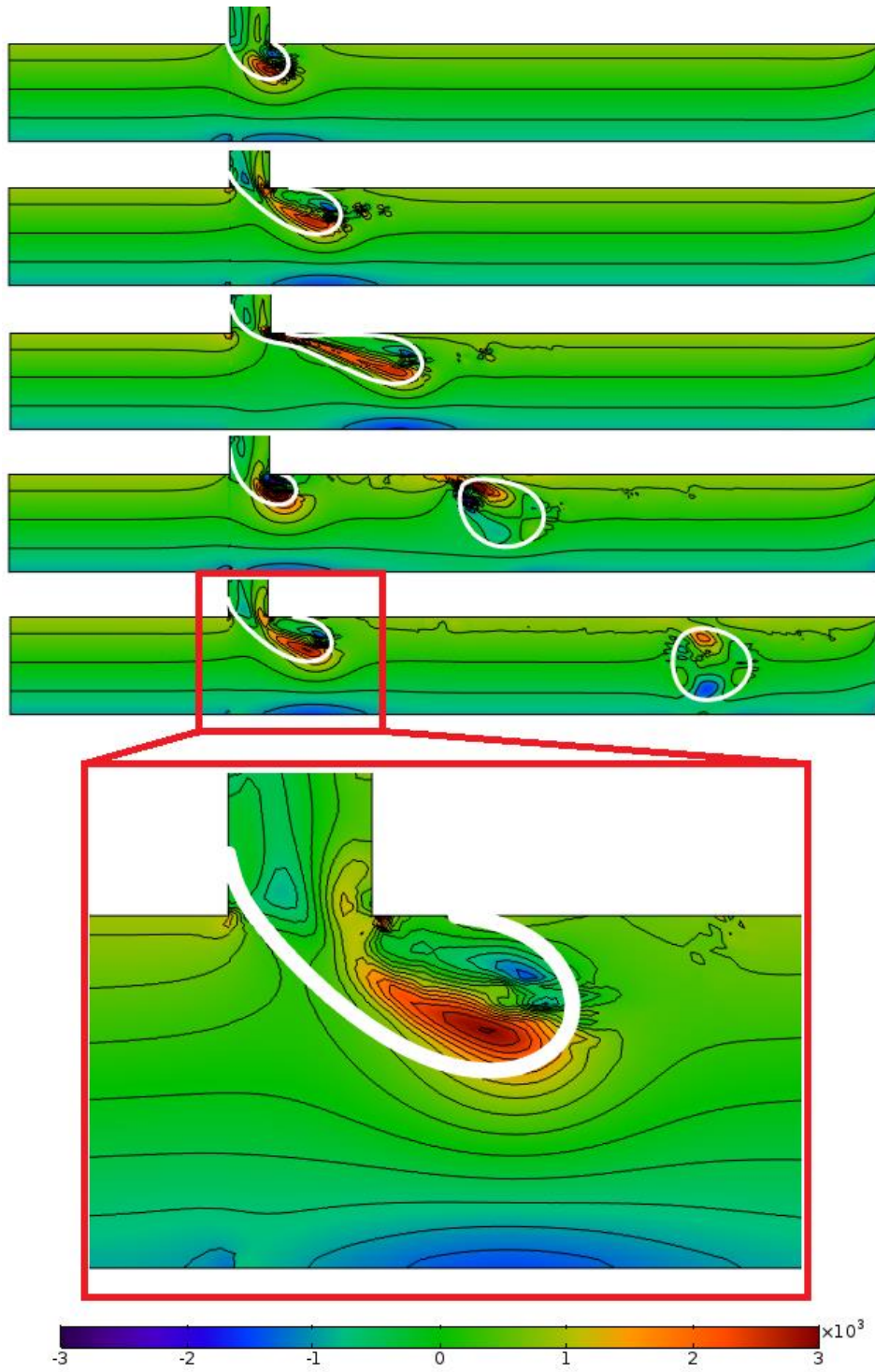
برای تولید قطرات، فرایند تولید برای تمامی رژیم‌ها از جمله فشرده‌شده، چکه‌ای و جتی مشابه هم می‌باشد. ابتدا قسمت نوک فاز پراکنده وارد کانال اصلی می‌شود و این قسمت در تعادل بین نیروهای کشش سطحی ( $\sigma$ )، نیروی برشی ( $\tau_{int}$ ) و فشار هیدرواستاتیکی بین دو سمت قطره ( $P_r - P_l$ ) درون فاز پیوسته رشد می‌کند. وقتی که قطره به سمت پایین دست جریان به میزان مشخصی حرکت کرد، سطح مشترک کمانی شکل رو به بیرون فاز پراکنده رفته‌رفته با گلوبی شدن به سمت داخل آن جدا شده و قطره تشکیل می‌شود. در طی فرایند تشکیل قطره، نیروی کشش سطحی تنها نیروی مقاوم در برابر تغییر شکل سطح مشترک تحت این شرایط می‌باشد. سطح مشترک کمانی شکل قبل از ورود به کانال اصلی را در نظر بگیرید، با رشد سطح مشترک فشار لاپلاس نیز بدلیل فشار محور بودن فاز پیوسته و پراکنده بصورت متناوب می‌باشد. فشار لاپلاس از رابطه (۱۱) بدست می‌آید که در آن  $2/h$  و  $2/W_2$  شعاع‌های انحنای

### ۳-۳- تشکیل قطره

درون میکروکانال تی- شکل فاز پراکنده بصورت المان‌های جدا شده توسط فاز پیوسته امتزاج‌ناپذیر درمی‌آید. این فرایند یک مکانیزم پیچیده‌ای می‌باشد که در آن نیروهای کشش سطحی<sup>۱</sup>، برش ویسکوز<sup>۲</sup> و اختلاف فشار جلو و پشت قطره<sup>۳</sup> نقش دارند. شماتیک نیروهای موثر در تشکیل در شکل ۴ نشان داده شده است. این نیروها به ویژگی دو سیال (ویسکوزیته و ویژگی سطح)، هندسه کانال (عرض و عمق کانال) و شرایط جریان (نرخ و سرعت جریان) بستگی دارند.

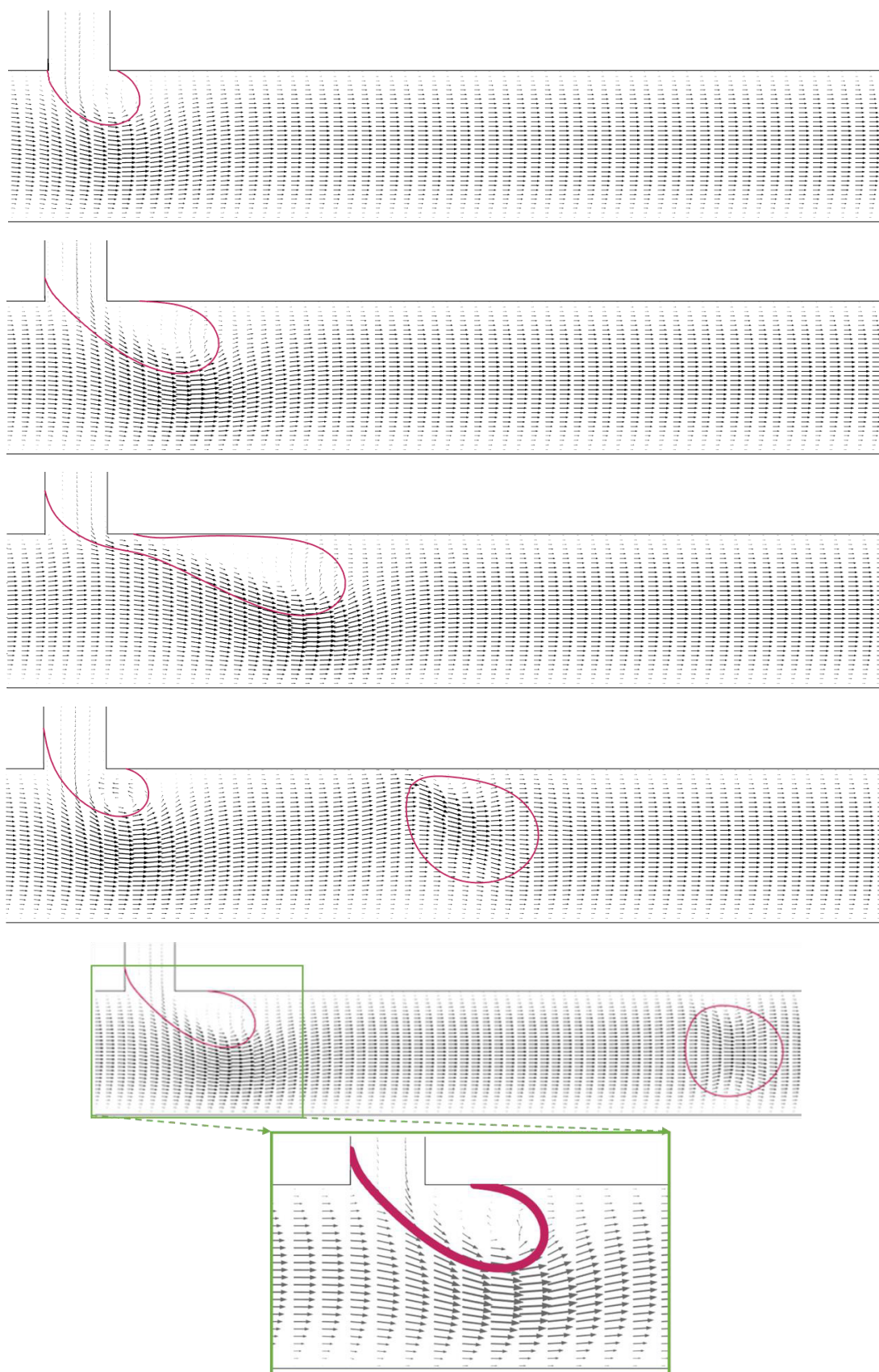
جریان‌های دوفازی بر مبنای ساختار سطح مشترک به چندین گروه اصلی که به هر یک از آن‌ها رژیم جریان یا الگوی جریان گفته می‌شود تقسیم می‌شود. از جمله رژیم‌های تشکیل قطره در جریان دوفازی می‌توان به رژیم‌های اسلاگ (یا فشرده‌شده)، قطره (یا

- 1 Interfacial tension
- 2 Viscous shearing
- 3 Pressure drop between the tip and the rear of the droplet



شکل ۱۳: کانتور توزیع گردابه درون کانال اصلی  
Fig. 13. Vorticity contours inside the main channel

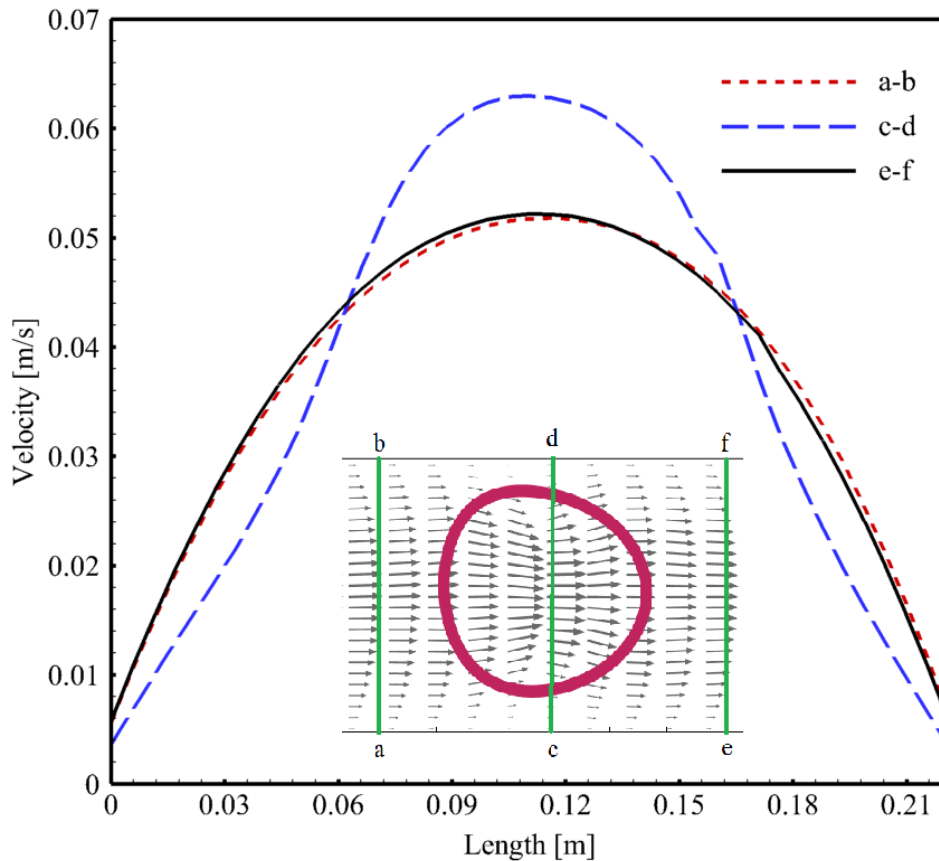




شکل ۱۴: توزیع بردارهای سرعت اطراف و داخل قطره در مقطعی برش یافته از کانال اصلی

Fig. 14. Distribution of velocity vectors around and inside the droplet at a cross section of the main channel





شکل ۱۵: روفیل سرعت بر روی سه مقطع قبل، بعد و روی قطره در کانال اصلی

**Fig. 15. Velocity profile on the three sections including before, after and on the droplet in the main channel**

را پشت سر می‌گذارد. این سه مرحله عبارتند از: ۱- پرشدن<sup>۱</sup>، ۲- گلوبی‌شدن<sup>۲</sup> و ۳- جدایش<sup>۳</sup>. در مرحله اول فاز پراکنده از طریق کانال عمودی وارد کانال افقی شده و شروع به رشد کردن می‌کند. در مرحله دوم فاز پراکنده با رشد درون کانال اصلی رفته‌رفته از یک نقطه شروع به باریک شدن می‌کند. در نهایت، در آخرین مرحله فاز پراکنده از نقطه گلوبی‌شدن جدا شده و قطره تشکیل می‌شود. پس از تشکیل هر قطره، قطره بعدی نیز همین مراحل را برای تشکیل شدن طی می‌کند. شکل ۵ مراحل تشکیل برای زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر با ۴ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد را نشان می‌دهد.

نقطه P در محل اتصال دو کانال عمودی و افقی به یکدیگر، یک نقطه بحرانی در تحلیل فرایند تشکیل قطره به سبب رسیدن دو

سطح مشترک می‌باشند؛ در اینجا  $W_2$  عرض کانال عمودی و  $h$  نیز عمق کانال در حالت سه بعدی می‌باشد. هنگام تشکیل قطره بایستی به این فشار موئینگی ( $P_{cap}$ ) غلبه شود.

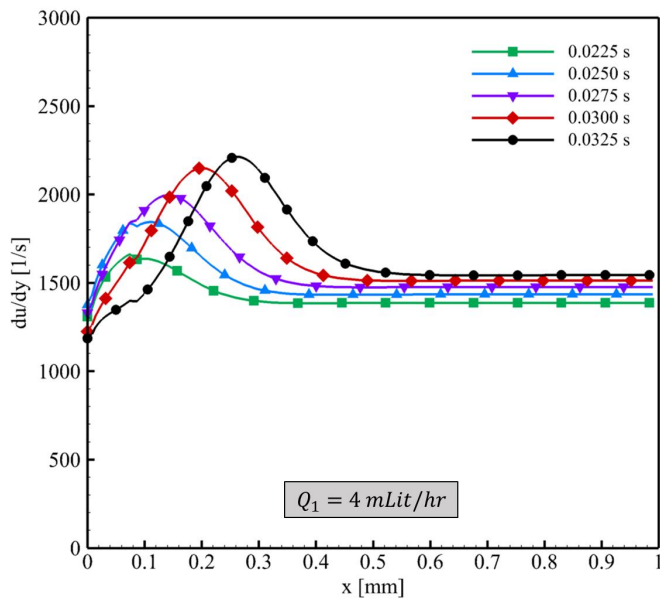
$$P_{cap} = \sigma \left( \frac{2}{W_2} + \frac{2}{h} \right) \quad (11)$$

با توجه به مطالب گفته‌شده، بررسی فشار و سرعت در هر دو فاز و همچنین گرادیان سرعت امری ضروری می‌باشد که در این بخش به آن پرداخته خواهد شد.

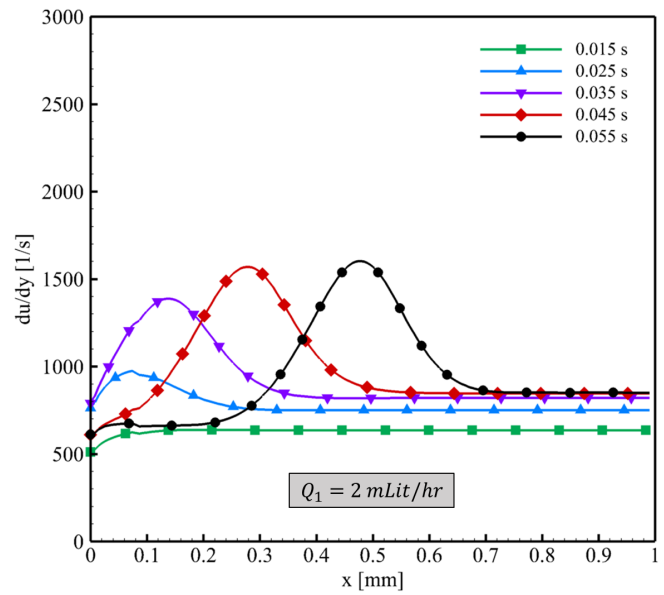
### ۱-۳-۳- مراحل تشکیل قطره

هر قطره برای به‌وجودآمدن داخل یک میکروکانال سه مرحله

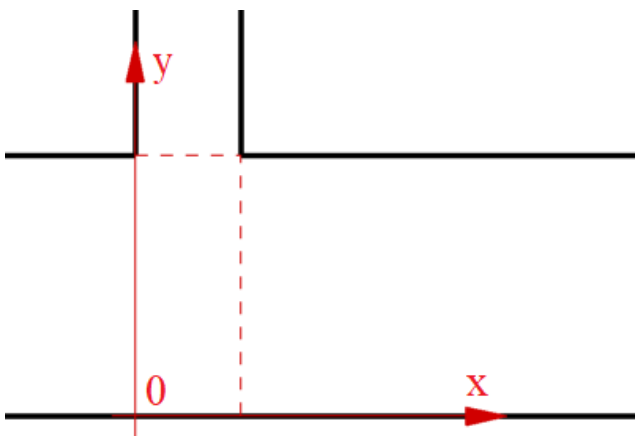
- 1 Filling
- 2 Necking
- 3 Detachment



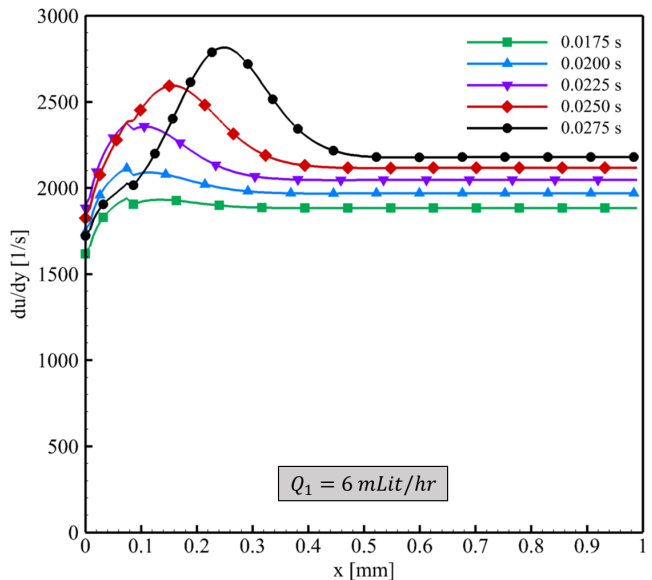
(ب)  
(ب)



(الف)  
(الف)



(ع)  
(ع)



(ج)  
(ج)

شکل ۱۶: توزیع گرادیان سرعت بر روی دیواره پایینی کانال اصلی وقتی دبی ورودی فاز پیوسته مختلف: (الف): ۲ میلی لیتر بر ساعت، (ب): ۴ میلی لیتر بر ساعت و (ج): ۶ میلی لیتر بر ساعت می باشد. (د): دستگاه مختصات

Fig. 16. Distribution of velocity gradient on the lower wall of the main channel for different continuous phase inlet flow rates: (a): 2, (b): 4 and (c): 6 ml/h. (e): coordinate system

قطره زمانی را که دبی ورودی فاز پیوسته برابر با ۴ میلی لیتر بر ساعت می باشد نشان می دهد. همانطور که در شکل ۶ مشخص است، فشار بصورت متناوب با زمان تغییر پیدا می کند. مراحل سه گانه ی فرایند تشکیل قطره را می توان در نمودار فشار برحسب زمان نیز مشاهده

فاز پیوسته و پراکنده در آن نقطه به هم می باشد. تغییرات فشار در نقطه P می تواند بصورت دقیق رژیم جریان دوفازی را مشخص کند. همچنین، می توان سه مرحله تشکیل قطره را با نمودار فشار در نقطه P مرتبط دانست. شکل ۶ فشار نقطه P در کل زمان فرایند تشکیل

۱۰ در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰ و جدول ۵ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش دبی ورودی فاز پیوسته تعداد قطرات بیشتری با قطر موثر کوچکتر و در زمان کوتاه‌تری تولید می‌شوند.

### ۳-۳-۵- بررسی تغییرات فشار بر روی خط مرکزی کانال اصلی

شکل ۱۱ توزیع فشار بر روی خط مرکزی کانال افقی را از زمان ۰/۲ تا ۰/۷ ثانیه وقتی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۲ میلی‌لیتر بر ساعت است نشان می‌دهد. ورود فاز پراکنده به داخل کانال افقی باعث برهم‌زدن فشار در این کانال می‌شود. در زمان ۰/۲ ثانیه وقتی که قطره با خط مرکزی فاصله دارد هنوز تأثیری بر توزیع فشار روی این خط نداشته و فشار بصورت خطی در طول کانال کاهش می‌یابد. با گذشت زمان و نزدیک شدن قطره به مرکز کانال افقی نمودار فشار دچار انحراف می‌شود. از زمان ۰/۲ تا ۰/۴ ثانیه نمودار فشار به اعداد بالاتری منتقل می‌شود زیرا با ورود فاز پراکنده به داخل کانال اصلی مسیر عبور جریان برای فاز پیوسته باریک‌تر شده و فاز پراکنده به عنوان یک مانع در جهت جریان فاز پیوسته عمل می‌کند و باعث تجمع فشار در بالادست جریان می‌شود. همواره یک افت فشار در دو سمت قطره به دلیل فشار لاپلاس وجود دارد و محلی که نمودار فشار در آن نوسانی می‌شود همان محل حضور قطره را نشان می‌دهد که با گذشت زمان و حرکت قطره به سمت پایین دست جریان محل این نوسان روی نمودار فشار نیز تغییر می‌کند.

شکل ۱۲ نیز توزیع فشار بر روی خط مرکزی کانال اصلی را برای سه مقدار دبی ورودی مختلف فاز پیوسته نشان می‌دهد. با مقایسه این سه حالت این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش دبی ورودی فاز پیوسته شیب نمودار فشار و به تبع آن اختلاف فشار دو طرف کانال اصلی بیشتر می‌شود؛ همچنین، کل نمودار به مقادیر بزرگتری انتقال می‌یابد. همانطور که قبلاً هم بحث شد، با کاهش مقدار دبی ورودی فاز پیوسته در رژیم تشکیل قطره، قطرات بزرگتر با تعداد کمتری تشکیل می‌شوند. بعلاوه، سرعت حرکت قطرات به سمت پایین دست جریان کمتر خواهد بود. این موضوع را می‌توان با توجه به اختلاف فشار دو سمت قطره توجیه کرد. در واقع، هرچقدر اختلاف فشار دو سمت قطره بیشتر باشد نیروی لازم جهت جدایش و حرکت قطره بیشتر بوده و در نتیجه قطرات بیشتری با سرعت بالا تشکیل می‌شوند.

کرد. در مرحله اول که شروع این فرایند را مشخص می‌کند، فشار نقطه P با زمان افزایش می‌یابد. در مرحله دوم نیز بعد از رسیدن فشار به بیشترین مقدار خود، فشار بطور تدریجی کاهش پیدا می‌کند. نهایتاً، در مرحله سوم نمودار فشار تقریباً ثابت می‌ماند.

### ۳-۳-۲- خطوط جریان

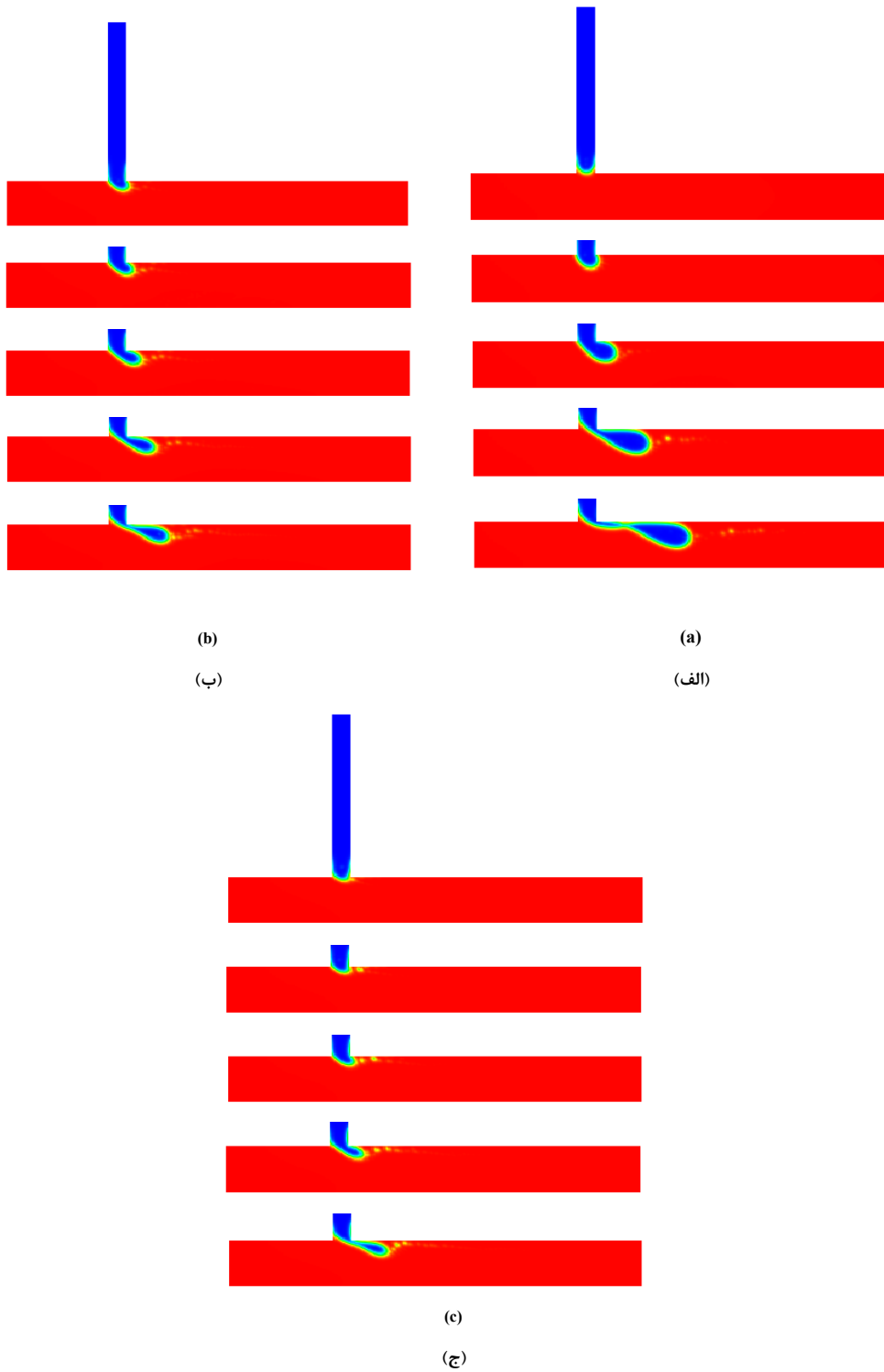
خطوط جریان به همراه بردارهای سرعت به منظور نمایش توسعه فاز پراکنده در میکروکانال و رشد قطره برای زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر با ۴ میلی‌لیتر بر ساعت می‌باشد در شکل ۷ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، یک جریان گردشی نزدیک سطح مشترک و درون قطره در هنگام تولید قطره به دلیل تنش برشی ایجاد شده توسط فاز پیوسته به وجود می‌آید. با ورود فاز پراکنده درون کانال اصلی و حرکت آن به سمت پایین دست جریان این ناحیه رشد پیدا می‌کند. نهایتاً، با جدایش قطره و انتقال توسط فاز پیوسته، جریان اولیه تغییر کرده و ناحیه گردشی از بین می‌رود.

### ۳-۳-۳- بررسی تغییر فشار نقطه P در یک دبی ورودی فاز پیوسته ثابت

زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر با مقدار ثابت ۴ میلی‌لیتر بر ساعت باشد و نیز با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترهای معرفی شده، ۵ قطره درون میکروکانال تشکیل می‌شود. کانتور کسرحجمی دو فاز پیوسته و پراکنده به همراه خطوط جریان برای ۵ قطره تشکیل شده در زمان‌های تشکیل در شکل ۸ آورده شده است. برای هر یک از قطرات تشکیل شده کانتور کسرحجمی و خطوط جریان یکسانی دیده می‌شود اما مدت زمان تشکیل دو قطره‌ی متوالی یکسان نیست. مفهوم این موضوع اینست که قطراتی یکنواخت با فرکانس‌های تشکیل متفاوت تولید می‌شوند. برای درک بهتر این موضوع، تغییرات فشار نقطه P در شکل ۹ آورده شده است. نقاط ۱ تا ۵ تعداد قطرات تشکیل شده را نشان می‌دهند.

### ۳-۳-۴- بررسی تأثیر تغییر دبی ورودی فاز پیوسته

شکل ۱۰ کانتور کسرحجمی دو فاز پیوسته و پراکنده و خطوط جریان در زمان تشکیل اولین قطره به همراه نمودار تغییرات فشار در نقطه P را برای دبی‌های ورودی فاز پیوسته مختلف (۱، ۲ و ۴ میلی‌لیتر بر ساعت) نشان می‌دهد. اطلاعات کمی مربوط به شکل



شکل ۱۷: کانتور کسر حجمی برای دبی ورودی فاز پیوسته مختلف:  
 (الف): ۲ میلی لیتر بر ساعت ( $t=0t/015, 0/025, 0/035, 0/045$  و  $0/055$  s)،  
 (ب): ۴ میلی لیتر بر ساعت ( $t=0t/0225, 0/025, 0/0275, 0/03$  و  $0/0325$  s) و  
 (ج): ۶ میلی لیتر بر ساعت ( $t=0t/0175, 0/02, 0/0225, 0/025$  و  $0/0275$  s) می باشد.

**Fig. 17. Volume fraction contour for different inlet flow rates of continuous phase**  
 (a): 2 ml/h ( $t=0.015, 0.025, 0.035, 0.045$  and  $0.055$  s),  
 (b): 4 ml/h ( $t=0.0225, 0.025, 0.0275, 0.03, 0.0325$  s) and  
 (c): 6 ml/h ( $t=0.0175, 0.02, 0.0225, 0.025, 0.0275$  s).

جدول ۶: مقایسه اختلاف فشار دو سمت قطره با تنش برشی در دبی ورودی فاز پیوسته مختلف

Table 6. Comparison of the pressure difference between the two sides of the droplet with shear tension at different inlet flow rates of the continuous phase

تنش برشی (پاسکال)	اختلاف فشار دو سمت قطره (پاسکال)	$Q_1$ (میلی لیتر بر ساعت)
۱/۴۴۱	۱۳۴	۲
۲/۰۴۶	۲۴۹	۴
۲/۶۰۰	۲۵۵	۶

۱۵ نتیجه می‌شود که وجود قطره باعث تغییر در پروفیل سرعت مقطع کانال اصلی می‌شود. قبل و بعد از محل حضور قطره درون کانال اصلی پروفیل سرعت همانطور که انتظار می‌رفت شکل سهموی و تقریباً یکسانی دارد؛ اما در مقطعی که از وسط قطره عبور می‌کند پروفیل سرعت جمع شده و نقطه اوج آن به مقادیر بزرگتری انتقال می‌یابد.

#### ۳-۳-۸- گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره اصلی

همانطور که قبلاً هم بحث شد، در تولید هر قطره سه نیروی بسیار مهم نقش دارند. نیروی کشش سطحی، نیروی برش ویسکوز و نیروی ناشی از اختلاف فشار جلو و پشت قطره. تنش برشی طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (12)$$

که در آن  $\tau_{xy}$  تنش برشی در راستای  $x$  [Pa]،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی [Pa.s] و  $du/dy$  گرادیان سرعت مولفه  $x$  نسبت به راستای عمود بر محور کانال [1/s] می‌باشد. توزیع گرادیان سرعت روی دیواره پایینی کانال اصلی جایی که قطره در آن ناحیه تشکیل می‌شود (شکل ۱۶-د) در زمان‌های مختلف برای سه دبی ورودی فاز پیوسته ۲، ۴ و ۶ میلی لیتر بر ساعت در شکل ۱۶ آورده شده است. برای درک بهتر موضوع، کانتورهای کسر حجمی دو فاز پیوسته و پراکنده مرتبط با نمودارهای آورده شده در شکل ۱۶ در قالب شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶ با گذشت زمان گرادیان سرعت بر روی دیوار در هر سه حالت روند افزایشی و کاهشی دارد.

#### ۳-۳-۶- کانتورهای گردابه و بردارهای سرعت

برای فاز پراکنده همواره یک حرکت گردشی به دلیل وجود سطح مشترک و اصطکاک بین دو فاز در این ناحیه (نیروی برشی) وجود خواهد داشت. همچنین، در چنین میکروکانال‌هایی نیروی چسبندگی دیوارهای کانال اصلی از دو سمت بالا و پایین قطره سبب ایجاد حرکت گردشی درون آن می‌شود. شکل ۱۳ کانتورهای گردابه و شکل ۱۴ بردارهای سرعت را درون کانال اصلی زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر ۲ میلی لیتر بر ساعت می‌باشد برای تشکیل یک قطره نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳ مشخص است که، با ورود فاز پراکنده به داخل کانال اصلی دو گردابه که در خلاف جهت هم در نزدیکی سطح مشترک بین دو سیال در حال گردش هستند درون قطره تشکیل می‌شوند. با کشیده شدن قطره در درون کانال اصلی این دو گردابه شکل نامتقارن دارند که با تشکیل قطره و حرکت آن به سمت پایین دست جریان شکل متقارنی به خود می‌گیرند.

در مورد شکل ۱۴ نیز این موضوع قابل مشاهده است که، با رشد قطره درون کانال اصلی سطح مقطع عبور جریان فاز پیوسته کوچکتر شده و این امر باعث افزایش موضعی سرعت فاز پیوسته اطراف قطره هنگام تشکیل آن می‌شود. با مقایسه دو شکل ۱۳ و ۱۴ می‌توان این نتیجه را گرفت که، گرادیان سرعت اطراف قطره (نیروی برشی) باعث ایجاد جریان گردشی درون آن می‌گردد.

#### ۳-۳-۷- پروفیل سرعت بر روی مقطع کانال اصلی

شکل ۱۵ پروفیل سرعت را بر روی سه مقطع از کانال اصلی قبل از قطره، روی قطره و بعد از قطره زمانی که دبی ورودی فاز پیوسته برابر با ۲ میلی لیتر بر ساعت می‌باشد نشان می‌دهد. با توجه به شکل

نیروی برشی می‌شود.

۵- تاثیر نیروی برشی کمتر از نیروی ناشی از اختلاف فشار دو سمت قطره در فرایند تولید قطره می‌باشد.

### مراجع

- [1] V.-L. Wong, K. Loizou, P.-L. Lau, R.S. Graham, B.N. Hewakandamby, Numerical studies of shear-thinning droplet formation in a microfluidic T-junction using two-phase level-SET method, *Chemical Engineering Science*, 173-157 (2017) 174.
- [2] B. Pulvirenti, B. Rostami, G. Puccetti, G. Morini, Determination of droplet contours in liquid-liquid flows within microchannels, in: *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2015, pp. 012028.
- [3] G. Christopher, J. Bergstein, N. End, M. Poon, C. Nguyen, S.L. Anna, Coalescence and splitting of confined droplets at microfluidic junctions, *Lab on a Chip*, -1102 (2009) (8)9 1109.
- [4] A. Günther, M. Jhunjhunwala, M. Thalmann, M.A. Schmidt, K.F. Jensen, Micromixing of miscible liquids in segmented gas-liquid flow, *Langmuir*, -1547 (2005) (4)21 1555.
- [5] A.D. Griffiths, D.S. Tawfik, Miniaturising the laboratory in emulsion droplets, *Trends in biotechnology*, (2006) (9)24 402-395.
- [6] R.N. Dean Jr, A. Luque, Applications of microelectromechanical systems in industrial processes and services, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 925-913 (2009) (4)56.
- [7] D. Haller, P. Woias, N. Kockmann, Simulation and experimental investigation of pressure loss and heat transfer in microchannel networks containing bends and T-junctions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2689-2678 (2009) (12-11)52.
- [8] Y. Ba, H. Liu, J. Sun, R. Zheng, Three dimensional simulations of droplet formation in symmetric and asymmetric T-junctions using the color-gradient lattice Boltzmann model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 947-931 (2015) 90.
- [9] T.B. Jones, M. Gunji, M. Washizu, M. Feldman, Dielectrophoretic liquid actuation and nanodroplet

این افزایش و کاهش ناشی از حضور فاز پراکنده داخل کانال اصلی می‌باشد و هنگامی که فاز پراکنده به طور کامل وارد کانال اصلی شده و قطره در حال جدایش و تشکیل می‌باشد (شکل ۱۷) مقدار گرادیان سرعت به بیشترین مقدار خود می‌رسد. با مقایسه سه حالت نشان داده شده در شکل ۱۶ این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش دبی ورودی فاز پیوسته مقدار کلی گرادیان سرعت نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نیروی برشی وارد بر قطره با گرادیان سرعت مرتبط می‌باشد، با افزایش گرادیان سرعت نیروی برشی بزرگتر می‌شود. نیروی برشی به همراه اختلاف فشار دو سمت قطره بر کشش سطحی بین دو سیال غلبه کرده و باعث تولید قطره می‌شود. البته مقدار نیروی برشی در مقایسه با نیروی ناشی از اختلاف فشار دو سمت قطره ناچیز می‌باشد (جدول ۶). با توجه به جدول ۶ مشخص می‌باشد که با افزایش دبی ورودی فاز پیوسته مقدار تنش برشی روی دیواره و اختلاف فشار دو سمت قطره نیز افزایش می‌یابد. در دبی ورودی فاز پیوسته یکسان، مقدار اختلاف فشار دو سمت قطره در مقایسه با تنش برشی بیشتر است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش تنظیم سطح دو فازی برای شبیه‌سازی فرایند تشکیل قطره در یک میکروکانال تی-شکل (شامل دو سیال امتزاج‌ناپذیر) استفاده شده است. تاثیر دبی ورودی فاز پیوسته بر اندازه قطرات، فشار و گرادیان سرعت درون کانال اصلی مورد بررسی قرار گرفته است.

در رابطه با مهم‌ترین نتایج بدست‌آمده از حل عددی حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- با افزایش دبی ورودی فاز پیوسته قطرات بیشتری با اندازه کوچک‌تر در مدت زمان کمتری تولید می‌شوند.
- ۲- تعداد قطرات تشکیل‌شده و مراحل سه‌گانه‌ی تشکیل قطره با استفاده از نمودار فشار در نقطه تلاقی دو کانال عمودی و افقی به خوبی قابل استخراج می‌باشد.
- ۳- افزایش دبی ورودی فاز پیوسته باعث تغییر نمودار فشار در نقطه تلاقی دو کانال عمودی و افقی می‌گردد.
- ۴- افزایش دبی ورودی فاز پیوسته باعث افزایش دو نیروی موثر در تولید قطره یعنی نیروی ناشی از اختلاف فشار دو سمت قطره و

- [19] M. Mastiani, B. Mosavati, M.M. Kim, Numerical simulation of high inertial liquid-in-gas droplet in a T-junction microchannel, *RSC advances*, (2017) (77)7 48525-48512.
- [20] P. Garstecki, M.J. Fuerstman, H.A. Stone, G.M. Whitesides, Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up, *Lab on a Chip*, 446-437 (2006) (3)6.
- [21] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse, H.A. Stone, Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction, *journal of fluid mechanics*, (2008) 595 161-141.
- [22] J.H. Xu, S. Li, J. Tan, G. Luo, Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping, *Microfluidics and Nanofluidics*, 717-711 (2008) (6)5.
- [23] H. Liu, Y. Zhang, Droplet formation in microfluidic cross-junctions, *Physics of Fluids*, 082101 (2011) (8)23.
- [24] C. Cramer, P. Fischer, E.J. Windhab, Drop formation in a co-flowing ambient fluid, *Chemical Engineering Science*, 3058-3045 (2004) (15)59.
- [25] J. Sivasamy, Y.C. Chim, T.-N. Wong, N.-T. Nguyen, L. Yobas, Reliable addition of reagents into microfluidic droplets, *Microfluidics and Nanofluidics*, -409 (2010) (3)8 416.
- [26] X.-B. Li, F.-C. Li, J.-C. Yang, H. Kinoshita, M. Oishi, M. Oshima, Study on the mechanism of droplet formation in T-junction microchannel, *Chemical engineering science*, 351-340 (2012) (1)69.
- [27] A.A. Yagodnitsyna, A.V. Kovalev, A.V. Bilsky, Flow patterns of immiscible liquid-liquid flow in a rectangular microchannel with T-junction, *Chemical Engineering Journal*, 554-547 (2016) 303.
- [28] S.G. Sontti, A. Atta, CFD analysis of microfluidic droplet formation in non-Newtonian liquid, *Chemical Engineering Journal*, 261-245 (2017) 330.
- [29] T. Fu, L. Wei, C. Zhu, Y. Ma, Flow patterns of liquid-liquid two-phase flow in non-Newtonian fluids in rectangular microchannels, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 120-114 (2015) 91.
- formation, *Journal of applied Physics*, -1441 (2001) (2)89 1448.
- [10] S.H. Tan, B. Semin, J.-C. Baret, Microfluidic flow-focusing in ac electric fields, *Lab on a Chip*, (2014) (6)14 1106-1099.
- [11] J. Wang, Y. Li, X. Wang, J. Wang, H. Tian, P. Zhao, Y. Tian, Y. Gu, L. Wang, C. Wang, Droplet microfluidics for the production of microparticles and nanoparticles, *Micromachines*, 22 (2017) (1)8.
- [12] I.-L. Ngo, S. Woo Joo, C. Byon, Effects of junction angle and viscosity ratio on droplet formation in microfluidic cross-junction, *Journal of Fluids Engineering*, (5)138 2016)).
- [13] A. Gupta, R. Kumar, Effect of geometry on droplet formation in the squeezing regime in a microfluidic T-junction, *Microfluidics and Nanofluidics*, (2010) (6)8 812-799.
- [14] G.F. Christopher, N.N. Noharuddin, J.A. Taylor, S.L. Anna, Experimental observations of the squeezing-to-dripping transition in T-shaped microfluidic junctions, *Physical Review E*, 036317 (2008) (3)78.
- [15] S. Van der Graaf, T. Nisisako, C. Schroën, R. Van Der Sman, R. Boom, Lattice Boltzmann simulations of droplet formation in a T-shaped microchannel, *Langmuir*, (9)22 4152-4144 (2006).
- [16] T. Kawakatsu, Y. Kikuchi, M. Nakajima, Regular-sized cell creation in microchannel emulsification by visual microprocessing method, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 321-317 (1997) (3)74.
- [17] P. Tirandazi, C.H. Hidrovo, Generation of uniform liquid droplets in a microfluidic chip using a high-speed gaseous microflow, in: *ASME 14 2016th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels* collocated with the ASME 2016 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2016.
- [18] Y. Shi, G. Tang, H. Xia, Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in T-junction and flow focusing devices, *Computers & Fluids*, 163-155 (2014) 90.



- droplet formation around pins of different geometry for the design of a compact falling-droplet absorber, *Heat and Mass Transfer*, 3616-3599 (2018) (12)54.
- [33] Z. Gu, Experimental and Theoretical Study of Droplet Formation at a T-junction with Xanthan Gum Solutions, (2013).
- [30] M. Darekar, K.K. Singh, S. Mukhopadhyay, K.T. Shenoy, Liquid-liquid two-phase flow patterns in Y-junction microchannels, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 12226-12215 (2017) (42)56.
- [31] Y. Yan, D. Guo, S. Wen, Numerical simulation of junction point pressure during droplet formation in a microfluidic T-junction, *Chemical engineering science*, -591 (2012) 84 601.
- [32] F. Cola, A. Romagnoli, J. Hey, Experimental study on the

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Raad, S. Rezazadeh, A. Dadvand. Numerical simulation of droplet formation in a T-shape microchannel using two-phase level-set method. Numerical simulation of droplet formation in a T-shape microchannel using two-phase level-set method. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 1815-1838.*

DOI: [10.22060/mej.2020.17314.6572](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17314.6572)

