

## بررسی عددی نحوه تشکیل قطره در الگوهای مختلف جریان دوفازی مایع-مایع در میکروکانال‌های متمرکزکن جریان

هادی افسانه

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
hadiafsaneh99@ut.ac.ir

پوریا احمدی\*

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
pahmadi@ut.ac.ir

پدرام حنفی‌زاده

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
hanafizadeh@ut.ac.ir

امیرمحمد ستاری

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران،  
amirmsattari@ut.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه، به صورت عددی به بررسی نحوه تشکیل هر یک از الگوهای جریان دوفازی در جریان‌های دوفاز مایع-مایع در میکروکانال‌های متمرکزکن جریان پرداخته می‌شود. در سیستم‌های دوفاز مایع-مایع، به دلیل تعامل دوفاز غیرقابل امتزاج، الگوهای مختلف جریان اعم از فشرده‌شده، قطره‌ای، جت و رشته‌ای مشاهده می‌شود. بررسی علل تشکیل هر یک از این الگوها برای کاربردهای مختلف پزشکی و صنعتی می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. در این میان، الگوی قطره‌ای به دلیل خواص موردنیاز اعم از یکنواختی ابعادی بالا برای کاربردهای انتقال دارو، بررسی اثر دارو، سنتز، واکنش و اختلاط بسیار مناسب می‌باشد. از سوی دیگر قطره‌های تولید شده در الگوی جت از نظر ابعادی معمولاً نامنظم می‌باشند. عوامل متعددی از جمله، ابعاد میکروکانال‌های فاز گسسته و فاز پیوسته و میکروکانال اصلی، دبی‌های جریان، خواص فیزیکی فازها (لزجت، چگالی و کشش سطحی) و خواص سطح بر روی نحوه تشکیل قطره تأثیر می‌گذارند. پس از بررسی این عوامل در الگوهای مختلف جریان، در ادامه نیز نمودارهای فشار در ورودی میکروکانال‌ها در هر یک از الگوهای فوق بررسی شده است. **واژه‌های کلیدی:** جریان دوفاز مایع-مایع، الگوهای جریان، یکنواختی ابعادی بالا، تغییرات فشار.

## Numerical Investigation of Droplet Formation Mechanism in Various Two-phase Liquid-liquid Flow Regimes in Flow-focusing Microfluidic Devices

H. Afsaneh

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

P. Ahmadi

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

P. Hanafizadeh

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

A. M. Sattari

Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

### Abstract

In this study, the underlying mechanism of the formation of the various two-phase flow patterns in liquid-liquid two-phase flows in flow-focusing microchannels is investigated. In liquid-liquid two-phase systems, due to the interaction of two immiscible phases, different flow patterns, including squeezing, dripping, jetting, and threading are observed. The formation mechanism of the various flow patterns could be conspicuous for different medical and industrial applications. The dripping regime is very suitable for drug delivery, drug screening, synthesis, reaction, and mixing owing to the required properties, including high monodispersity. On the other hand, the droplets produced in the jetting regime are usually polydisperse in size. Numerous factors, including the dimensions of main and side microchannels, flow rates, physical properties of the phases (viscosity, density, and surface tension), and surface properties affect the droplet formation mechanism. After examining these factors in different flow patterns, the pressure diagrams at the inlets of microchannels are investigated.

**Keywords:** Two-phase liquid-liquid flows, Flow regimes, Monodispersity, Pressure diagram.

کاربردی در تحقیقات پایه‌ای علوم مختلف هم‌چون شیمی، زیست‌شناسی و فیزیک کاربرد داشته و به پیشرفت هر چه بیشتر رشته‌هایی هم‌چون زیست فناوری، علم مواد و صنایع غذایی کمک نموده‌اند [۲]. تکنیک میکروسیال، در مقایسه با تکنیک‌های مورد استفاده در گذشته، مزایای بسیاری دارد که سبب برتری آن می‌گردد. از جمله مهم‌ترین این مزایا می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۴-۲]: (۱) حجم کمی از نمونه، شناساگر یا واکنشگر مورد استفاده قرار می‌گیرد که این عمل باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد (۲) نتایج تشخیص یا به‌عبارتی محصولات مولکولی آزمایش در زمان کم‌تری به‌دست می‌آید

### ۱- مقدمه

میکروسیال، به دستگاه‌ها و روش‌هایی اطلاق می‌شود که برای پردازش، کنترل و انتقال جریان سیال (۱ نانولیترا تا ۱۰۰۰ فمتولیترا<sup>۱</sup>) در کانال‌هایی با ابعاد کوچک‌تر از یک میلی‌متر استفاده می‌گردند [۱]. امروزه، تکنیک‌های میکروسیال، به‌صورت گسترده به‌عنوان ابزاری

<sup>1</sup> Femtolitre (10<sup>-15</sup> litre)

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: pahmadi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۱/۲۰

که این به خاطر بالا بودن نسبت‌های سطح به حجم در ابعاد میکرو می‌باشد. در نتیجه، انتقال جرم و انتقال گرما در زمان کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد (۳) کوچک نمودن ابعاد امکان انجام موازی‌سازی سیستم را به محققان می‌دهد (۴) نتایج تشخیص و جداسازی در آزمایش‌های صورت‌گرفته، با دقت و حساسیت بالاتری صورت می‌پذیرد و (۵) میزان تماس فرد آزمایشگر با دستگاه‌ها کاهش پیدا کرده و به همین دلیل، میزان خطا در آزمایش کاهش می‌یابد.

در هنگام پردازش یک سیستم با جریان مایع پیوسته تک‌فاز، مولکول‌های واکنشگرها یا محصولات می‌توانند در تمامی مایعی که کانال را پر می‌کند، پخش شوند. این اثر که به پراکندگی تیلور-آریس [۶،۵] معروف است، سبب ایجاد غلظت‌های پایین و کاهش راندمان واکنش‌های شیمیایی یا ایجاد اثرات منفی بر روی نتایج تشخیص مولکول‌های مواد می‌شود. به همین دلیل، انجام واکنش‌های فوق در ابعاد حتی کوچک‌تر از آن‌چه که در سیستم‌های پیوسته تک‌فاز اتفاق می‌افتد، بسیار مطلوب بوده و راندمان واکنش را افزایش دهد.

برای افزایش راندمان سیستم و دستیابی به نتایج قابل اطمینان، سیستم‌های میکروسیال برپایه قطره یا دینامیک حباب (جریان دوفازی یا چندفازی)، به عنوان پلتفرم‌های جایگزین طراحی شدند. جریان دوفاز بر پایه میکروسیال، در اثر تماس دو سیال که غیرقابل انحلال یا به‌صورت جزئی قابل انحلال در یکدیگر هستند، ایجاد می‌شود. جریان گاز-مایع [۸،۷] و مایع-مایع [۹-۱۲] مهم‌ترین جریان‌های دوفاز در سیستم‌های میکروسیال می‌باشند.

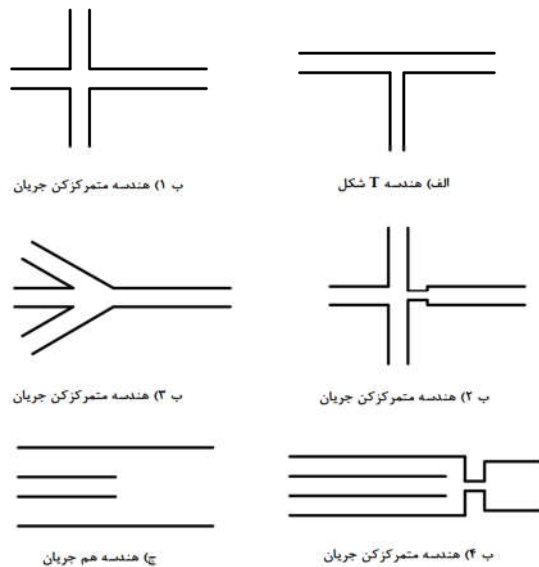
از طرف دیگر، استفاده از قطره مزایای بسیار زیادی را برای محققان برای انجام آزمایشات خود ایجاد می‌نماید. برای نمونه، یکی از مهم‌ترین برتری‌های استفاده از قطره در تکنیک میکروسیال، داشتن کنترل بر روی پراکندگی و اختلاط مواد شیمیایی در هنگام انجام واکنش‌های شیمیایی از طریق محصور نمودن مواد واکنش در قطره می‌باشد، چیزی که در سیستم‌های پیوسته تک‌فاز قابل اجرا نیست [۱۳]. علاوه بر این، در سیستم‌های میکروسیال، حساسیت سیستم به خواص سطح کانال کاهش می‌یابد؛ چرا که تماس مواد با دیواره‌های کانال کاهش یافته و راندمان واکنش‌های شیمیایی افزایش می‌یابد [۱۳].

در حالت کلی، پارامترهای مختلفی رفتار جریان دوفاز را در میکروکانال‌ها مشخص می‌نمایند. خواص سیال از جمله چگالی، لزجت دینامیکی و کشش میان سطحی، هندسه میکروکانال، خواص سطح (زاویه تماس سطح) و دبی جریان پارامترهای اساسی در جریان‌های دوفاز می‌باشند.

هندسه‌ها و ساختارهای میکروسیال، نقشی اساسی در کنترل جریان‌های مایع - مایع و رژیم‌های موجود در آن‌ها دارند. به‌طور کلی، سه ساختار اصلی برای تولید قطره و مشاهده رژیم‌های مختلف جریان در سیستم‌های میکروسیال مورد استفاده قرار می‌گیرد: هندسه T شکل، هندسه متمرکزکن جریان و هندسه هم‌جریان. در شکل ۱ طرحواره هندسه‌های متداول در جریان‌های دوفازی در میکروکانال‌ها قابل مشاهده است.

یکی از هندسه‌های متداول در جریان میکروسیال دوفازی، هندسه متمرکزکن جریان (شکل ۱، ب) می‌باشد که به صورت گسترده برای تشکیل قطره با پراکندگی ابعادی کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به

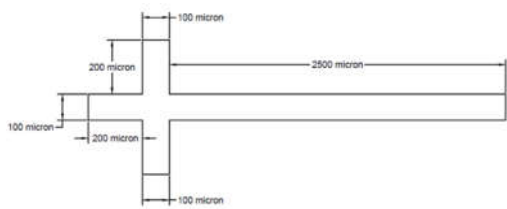
طور معمول، فاز پیوسته از کانال‌های کناری و فاز پراکنده از کانال مرکزی وارد می‌شوند، به طوری که فاز پیوسته در یک کانال هم‌گرا با فاز پراکنده برخورد کرده و سبب فشرده شدن و جدایش قطرات کروی می‌شود. در این هندسه، به سبب محدود شدن فاز پراکنده در نواحی مرکزی کانال اصلی توسط فاز پیوسته، الگوی جریان قطره‌ای، الگوی غالب می‌باشد. بنابراین، قطره‌ها از تنش برشی وارده و همچنین تماس با دیواره‌های کانال در امان می‌مانند که این عامل امکان تأثیرپذیری و از بین رفتن قطره را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.



شکل ۱- هندسه‌های متداول جریان‌های دوفازی در میکروکانال‌ها (الف) هندسه متمرکزکن جریان (ب) هندسه از نوع اتصال T (ب) هندسه هم جریان

در هندسه متمرکزکن جریان، دو رژیم جریان قطره‌ای و جت قابل مشاهده می‌باشد [۱۴]. الگوی قطره‌ای در دبی‌های پایین و الگوی جت در دبی‌های بالا اتفاق می‌افتند. در این روش، قطره‌های بسیار یکنواخت کروی در انتهای کانال همگرا در رژیم جریان قطره‌ای تشکیل می‌شوند. هنگامی که دبی جریان افزایش می‌یابد، فاز پراکنده به پایین دست کانال اصلی نفوذ پیدا کرده و جدایش قطره در انتهای یک رشته که در اثر فرایند گلوبی شدن رشته رخ می‌دهد، صورت می‌پذیرد [۱۵]. تشکیل قطره در این هندسه، می‌تواند توسط دو روش مجزا شامل کنترل دبی فازهای پیوسته و پراکنده و کنترل فشار ورودی دو فاز موردنظر صورت بگیرد [۱۶].

بررسی‌های وارد و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۰۵ نشان داد که تشکیل قطره در این هندسه‌ها، می‌تواند توسط دو روش مجزا شامل کنترل دبی فازهای پیوسته و پراکنده و کنترل فشار ورودی دو فاز موردنظر صورت بگیرد. در روش اول، ابعاد قطره با افزایش دبی فاز پراکنده (حدود ۱۰ برابر) به صورت جزئی افزایش می‌یابد، در حالی که سرعت تشکیل قطره با افزایش دبی فاز پراکنده به صورت تقریباً خطی، افزایش پیدا می‌کند. در روش دوم، ابعاد قطره‌ها با افزایش فشار فاز



شکل ۲- هندسه متمرکزکن جریان

جدول ۱- پارامترهای متغیر در مطالعه حاضر

لزجت $\mu$ (mPa.s)	کشش میان سطحی $\sigma$ (mN/m)	دبی حجمی $Q$ (mL/h)
۱ - ۲۰	۱ - ۵۰	۰/۱۵ - ۳

### ۳-۲- معادلات حاکم بر جریان‌های دوفازی

تغییر شکل و جدایش قطره در جریان‌های مایع - مایع پدیدهای حیاتی در حین تولید قطره در میکروکانال‌ها می‌باشد. برای تشخیص ساختار پیچیده و بررسی سیر تکاملی سطوح میان دو مایع، از روش توده حجمی سیال بهره گرفته شده است. در روش توده حجمی سیال، پارامتر  $\alpha$  کسر حجمی سیال را در یک سلول مورد محاسبه نشان می‌دهد. در هر سلول، کسر حجمی دو سیال طبق رابطه زیر به یکدیگر مربوط می‌شوند:

$$\alpha_c + \alpha_d = 1 \quad (1)$$

جایی که زیروندهای  $c$  و  $d$  به ترتیب بیانگر فاز پیوسته و پراکنده می‌باشند. علاوه بر این، از رابطه زیر برای محاسبه سیر تکاملی سطوح میانی دوفاز استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial \alpha_c}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha_c = 0 \quad (2)$$

جایی که  $\alpha_c = 1$  بیانگر دربرگرفتنی کامل سلول موردنظر توسط فاز پیوسته بوده و  $\alpha_c = 0$  بیانگر دربرگرفتنی کامل سلول موردنظر توسط فاز پراکنده می‌باشد. علاوه بر این،  $0 < \alpha_c < 1$  بیانگر وجود سطوح مایع - مایع است. در هر سلول محاسباتی، پس از محاسبه  $\alpha_c$ ،  $\alpha_d$  از رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد. جریان دوفازی فوق یک جریان تراکم‌ناپذیر نیوتنی می‌باشد که معادلات پیوستگی و مومنوم حاکم بر آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{U} + \nabla^T \mathbf{U})] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_s \quad (4)$$

جایی که  $\mathbf{U}$  بردار سرعت سیال ( $m/s$ )،  $\mu$  لزجت دینامیکی ( $Pa \cdot s$ )،  $\rho$  چگالی ( $kg/m^3$ )، فشار  $p$  ( $Pa$ )،  $\mathbf{g}$  شتاب گرانش ( $m/s^2$ ) و  $\mathbf{F}_s$  نیروی کشش میان سطحی می‌باشد.  $\rho$  و  $\mu$  به ترتیب بیانگر چگالی و لزجت میانگین می‌باشند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\rho = \alpha_c \rho_c + (1 - \alpha_c) \rho_d \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_c \mu_c + (1 - \alpha_c) \mu_d \quad (6)$$

کشش میان سطحی به صورت یک نیروی سطحی (جمله چشمه)

پراکنده (کم تر از دو برابر) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. در این حالت دو فشار بحرانی وجود دارد. هنگامی که فشار از اولین فشار بحرانی بزرگ‌تر باشد، قطره‌ها شروع به شکل‌گیری کرده و اندازه آن‌ها با افزایش فشار، ثابت می‌ماند. در فشارهای بالاتر از فشار بحرانی دوم، با افزایش فشار، سرعت تشکیل قطره به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد [۱۶]. علاوه بر این، مشاهدات ژو و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۰۶ حاکی از آن است که دو الگوی قطره‌ای و جت در این ساختارها مشاهده می‌شود. الگوی قطره‌ای در دبی‌های پایین و الگوی جت در دبی‌های بالا تشکیل می‌شوند.

از بررسی ادبیات برمی‌آید که ۵ پارامتر ورودی، نقشی اساسی را در تعیین رفتار جریان دوفازی مایع - مایع در میکروکانال‌های با هندسه متمرکزکن جریان ایفا می‌نمایند. این پارامترها عبارتند از: لزجت دینامیکی فاز پیوسته و پراکنده، کشش میان سطحی میان فاز پیوسته و پراکنده و دبی فازهای پیوسته و پراکنده. از آن‌جا که هندسه متمرکزکن جریان، هندسه‌ای جدیدتر می‌باشد، در این مطالعه نیز نحوه تشکیل قطره در این هندسه مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مطالعه، به کمک نرم‌افزار Ansys Fluent ۱۹/۲، فرایند تشکیل قطره در یک میکروکانال متمرکزکن جریان شبیه‌سازی شده است.

### ۲- شبیه‌سازی عددی

مبنای شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر، استفاده از نرم‌افزارهای تجاری نظیر Ansys Fluent که بر اساس تکنیک توده حجمی سیال و COMSOL که بر اساس تکنیک Level set و میدان فازی عمل می‌نمایند، می‌باشد. در این بخش توضیح مختصری در رابطه با معادلات حاکم بر روش توده سیال و نحوه حل این معادلات در نرم‌افزار فوق ارائه می‌شود.

#### ۲-۱- ناحیه محاسباتی

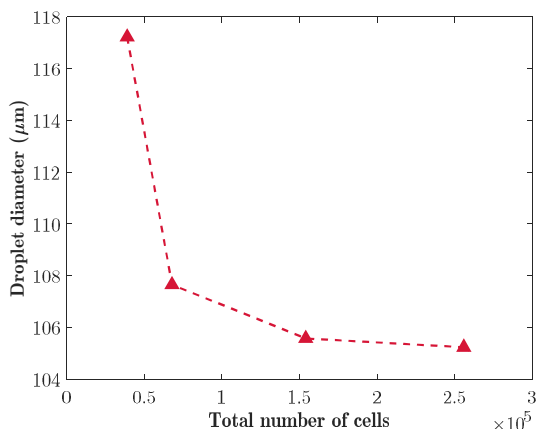
در این مطالعه، یک میکروکانال متمرکزکن جریان متقاطع مطابق شکل ۲ انتخاب شده است. عرض میکروکانال اصلی و میکروکانال‌های کناری برابر ۱۰۰ میکرومتر می‌باشد. ارتفاع کانال نیز برابر ۱۰۰ میکرومتر انتخاب شده است. طول ورودی میکروکانال‌ها طوری انتخاب شده است که پس از طی بخشی از آن، جریان گسترش‌یافته گردد. طول میکروکانال اصلی در بخش خروجی نیز برابر ۲۵۰۰ میکرومتر می‌باشد.

#### ۲-۲- خواص سیال

در این مطالعه، چگالی فازهای گسسته و پیوسته برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و زاویه تماس سطح (میزان ترشوندگی دیواره) برابر ۱۳۵ درجه می‌باشد. ویسکوزیته دینامیکی و دبی‌های جریان نیز پارامترهای متغیر در این مطالعه انتخاب شده‌اند. که در بازه مشخصی تغییر می‌یابند.

جدول ۳- اطلاعات شبکه

اندازه شبکه (میکرومتر)	تعداد سلول	قطر معادل قطره (میکرومتر)	مقدار خطا (%)
۱۰	۳۸۸۴۱	۱۱۷/۲۳	۱۱/۳۹
۸	۶۷۷۶۹	۱۰۷/۶۶	۲/۳۰
۶	۱۵۴۰۳۷	۱۰۵/۵۸	۰/۳۲
۵	۲۵۶۰۰۰	۱۰۵/۲۴	-



شکل ۳- قطر معادل قطره بر حسب تعداد سلولها در مطالعه شبکه

همانگونه که از جدول ۳ و شکل ۳ مشخص است، شبکه ۶ میکرون، در مقایسه با شبکه‌های درشت‌تر، مقدار خطای کوچک‌تری دارد. علاوه بر این، با توجه به این که شبکه ۶ میکرون در مقایسه با شبکه ۵ میکرون، قطر قطره را به خوبی پیش‌بینی کرده و زمان محاسبات کم‌تری نیز دارد، مش ۶ میکرون به عنوان شبکه نهایی انتخاب می‌گردد.

#### ۲-۵- اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی روش عددی مورد استفاده در این مطالعه، نتایج کار تجربی چن و همکاران [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق شکل ۴، در مطالعه تجربی، یک میکروکانال با هندسه متمرکزکن جریان متقاطع با سطح مقطع مربعی شکل به عرض ۱۰۰ میکرومتر و ارتفاع ۵۳ میکرومتر مورد استفاده واقع شده است. در این مطالعه، مخلوط گلیسرول با ۱۰ درصد نسبت حجمی آب به عنوان فاز گسسته و روغن سیلیکون به عنوان فاز پیوسته انتخاب شده است. مشخصات فیزیکی هر یک از فازها اعم از لزجت دینامیکی، چگالی و کشش بین سطحی و دبی آن‌ها در جدول ۵ آمده است.

در شکل ۴، فرایند تشکیل قطره در حل عددی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است. مطابق آن، از نظر کیفی، نتایج حل عددی از دقت خوبی برخوردار بوده و به خوبی می‌تواند نتایج مطالعه تجربی را پیش‌بینی نماید.

در عبارت  $F_s$  ظاهر می‌شود که توسط روش نیروی سطحی پیوسته<sup>۱</sup> به صورت زیر مدل‌سازی می‌شود [۱۷]:

$$F_s = \sigma \frac{2\rho\kappa}{\rho_c + \rho_d} \nabla\alpha_c \quad (7)$$

جایی که  $\sigma$  کشش میان‌سطحی ( $N/m$ ) و  $\kappa$  انحنای سطح می‌باشد که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\kappa = \nabla \cdot \hat{n} = \frac{1}{|n|} \left[ \left( \frac{n}{|n|} \right) \cdot |n| - (\nabla \cdot n) \right] \quad (8)$$

که در آن

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|}, n = \nabla\alpha_c \quad (9)$$

زمانی که سطوح مایع - مایع با سطح داخلی دیواره کانال تماس پیدا می‌کند، اثر چسبندگی دیواره باید در نظر گرفته شود. نرمال سطح سلول‌های محیط محاسباتی در دیواره، به کمک پارامتر زاویه تماس میان سطوح مایع - مایع با دیواره مشخص می‌شود که با متغیر  $\theta_w$  نشان داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos\theta + \hat{t}_w \sin\theta \quad (10)$$

جایی که  $\hat{n}_w$  و  $\hat{t}_w$  به ترتیب بردارهای یکه نرمال و مماس دیواره می‌باشند.

#### ۲-۴- انتخاب اندازه شبکه مناسب

برای انتخاب اندازه شبکه و تعداد سلول‌های با انتخاب یک شبکه درشت، شبیه‌سازی صورت گرفته و سپس شبکه موردنظر ریزتر می‌شود. در هر مرحله قطر معادل قطره ( $d_{eff}$ ) که از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود، به عنوان معیار همگرایی محاسبه شده و با مقادیر شبکه‌های قبلی مقایسه می‌گردد. در صورت دستیابی به مقدار خطای کوچک‌تر از ۱ درصد، شبکه فوق به عنوان شبکه نهایی انتخاب می‌گردد.

$$d_{eff} = \left( \frac{6 \times Volume}{\pi} \right)^{1/3} \quad (11)$$

در جدول ۲، تمامی ورودی‌های متغیر مورد استفاده در مطالعه فوق، قابل مشاهده است. چگالی و زاویه تماس سطح نیز مطابق قبل، ثابت می‌باشند.

در این مطالعه از یک شبکه که در تمامی نواحی میکروکانال یکنواخت می‌باشد، استفاده شده است. در جدول ۳ خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به شبکه‌های مورد استفاده به همراه اندازه قطره آمده است.

جدول ۲- پارامترهای ورودی مسئله در مطالعه شبکه

کشش میان‌سطحی $\sigma$ (mN/m)	لزجت $\mu$ (mPa.s)	سرعت ورودی $u$ (m/s)	فاز
۱۸/۵۵۸	۷/۸۰۸۳	۰/۰۲۸۲۲۹	پیوسته
	۷/۸۰۸۳	۰/۰۲۸۲۲۹	گسسته

<sup>1</sup> Continuum surface force (CSF) scheme

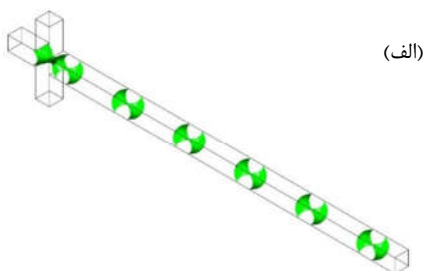
جدول ۴- پارامترهای ورودی مسئله در اعتبارسنجی نتایج

فاز	دبی ورودی ( $\mu\text{l}/\text{min}$ )	چگالی $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	لزجت $\mu$ ( $\text{mPa}\cdot\text{s}$ )	کشش میان سطحی $\sigma$ ( $\text{mN}/\text{m}$ )	زاویه تماس $\theta_w$
پیوسته	۳/۷۴	۹۷۱	۹/۹۶	۳۷/۱	۱۵۵
گسسته	۲/۸۷	۱۲۳۲	۱/۳۷		

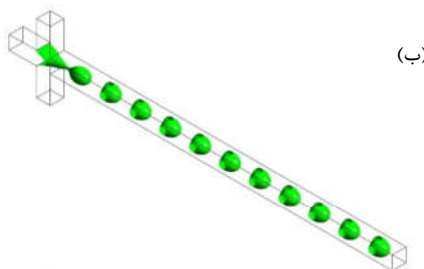
### ۳- نتایج

#### ۱-۳- الگوهای جریان

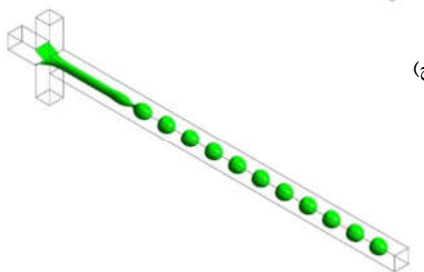
در شکل ۵، الگوهای جریان ایجاد شده در میکروکانال موردنظر قابل مشاهده است. این الگوها شامل فشرده شده (شکل ۵، الف)، قطره‌ای (شکل ۵، ب)، جت (شکل ۵، ج) و رشته‌ای (شکل ۵، د) می‌باشند. هر یک از الگوهای فوق وابسته به ۵ پارامتر ورودی مسئله بوده و به دلایل مختلفی که در ادامه بحث خواهد شد، تشکیل می‌شوند. برای مشاهده سطوح میان دوفاز موردنظر، مقدار کسر حجمی باید برابر ۰/۵ باشد که در واقع این مقدار، بیانگر محل تماس دو فاز موردنظر می‌باشد.



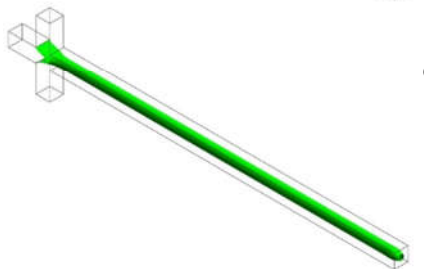
(الف)



(ب)



(ج)

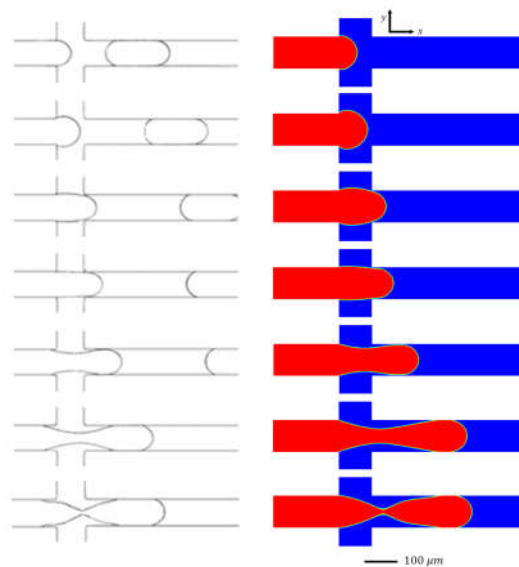


(د)

شکل ۵- الگوهای جریان مشاهده شده در میکروکانال (الف) فشرده شده (ب) قطره‌ای (ج) جت (د) رشته‌ای

#### ۲-۳- تشکیل الگوهای جریان: الگوی فشرده شده

در شکل ۶، روند تشکیل قطره در الگوی فشرده شده نشان داده



نتایج تجربی چن و همکاران [۱۸]

نتایج حل عددی در صفحه X-Y

#### شکل ۴- فرایند تشکیل قطره در حل عددی و نتایج تجربی مرجع

[۱۸] در یک میکروکانال متمرکزکن جریان متقاطع

از نظر کمی نیز، اندازه قطر قطره در حل عددی با مطالعه تجربی فوق مورد مقایسه قرار گرفته است. قطر قطره در مطالعه تجربی حدود ۱۴۵ میکرون اندازه‌گیری شده است. قطر قطره مشابه در حل عددی نیز حدود ۱۲۰ میکرون می‌باشد که میزان خطا در این مقایسه حدود ۱۷ درصد می‌باشد که مقدار قابل قبولی است. عوامل متعددی می‌تواند منجر به ایجاد خطای فوق گردد.

از آنجا که در واقعیت در آزمایش‌های تجربی، دبی تنظیمی ورودی به صورت دقیق برابر با دبی موجود در داخل کانال‌ها نمی‌باشد، این عامل سبب اختلاف در نتایج در مقایسه با حل عددی می‌گردد؛ چراکه در حل عددی دبی تنظیمی (یا سرعت) ورودی به صورت دقیق برابر با دبی (یا سرعت) موجود در کانال‌ها می‌باشد. به همین دلیل در واقعیت به دبی ورودی (یا سرعت ورودی) دبی ظاهری (یا سرعت ظاهری) نیز گفته می‌شود. از آنجا که در مقاله کار تجربی چن و همکاران [۱۸]، زاویه تماس سطح گزارش نشده است، با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف و مقایسه نتایج هر یک با نتایج کار تجربی، زاویه تماس سطح ۱۵۵ درجه انتخاب شده است. به همین دلیل، این عامل نیز به خودی خود، سبب ایجاد خطا می‌گردد.

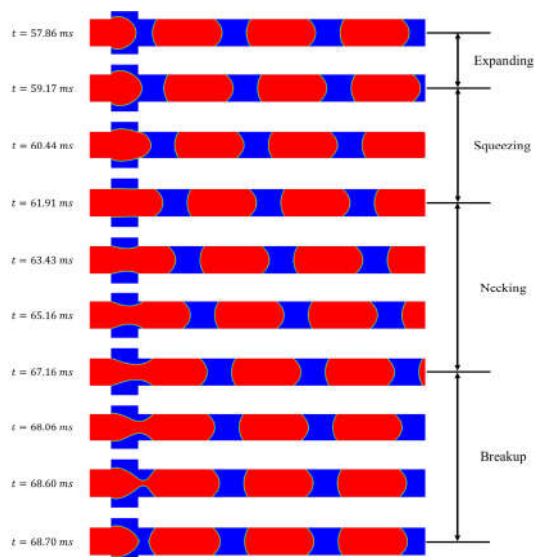
### ۳-۴- تشکیل الگوهای جریان: الگوی جت

در این حالت، درگ فشاری و برشی وارد از سمت فاز پیوسته به فاز پراکنده یا نیروی اینرسی فاز پراکنده سبب تشکیل رشته‌ای از فاز پراکنده می‌گردد که تا پایین دست کانال اصلی گسترش یافته و در نهایت به دلیل ناپایداری ریلی-پلاتو<sup>۵</sup> به قطرات کوچک تر تقسیم می‌شود. در شکل ۸، روند تشکیل قطره در الگوی جت قابل مشاهده است. در این الگو نیز پس از جدایش قطره، نوک رشته فاز گسسته موجود، شروع به رشد در کانال اصلی می‌کند (مرحله رشد). سپس در اثر ناپایداری ریلی-پلاتو و تعامل نیروهای مختلف، عرض آن در نوک شروع به گلوبی شدن نموده (مرحله گلوبی) و در نهایت منجر به جدایش قطره می‌شود (مرحله جدایش). به طور کلی، مراحل تشکیل قطره در الگوی جت به صورت زیر است:

- مرحله رشد
- مرحله گلوبی
- مرحله جدایش

### ۳-۵- تشکیل الگوهای جریان: الگوی رشته‌ای

رژیم جریان رشته‌ای در دبی‌های پایین فاز پیوسته و دبی‌های متوسط و بالای فاز پراکنده اتفاق می‌افتد. در این رژیم، یک رشته پایدار از فاز پراکنده در کانال اصلی تشکیل می‌شود، به طوری که فاز پیوسته توانایی جدایش قطره را حتی در پایین دست جریان ندارد. در شکل ۹، رشته پایدار تشکیل شده نشان داده شده است.



شکل ۶- روند تشکیل قطره در الگوی فشرده شده

شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، زمان تشکیل هر قطره نسبتاً طولانی می‌باشد (حدود ۱۱ میلی‌ثانیه). در این الگوی جریان، جدایش پلاگ در اثر افزایش فشار در جریان فاز پیوسته که ناشی از مسدود نمودن میکروکانال خروجی می‌باشد، صورت می‌گیرد. برای تشکیل قطره، در ابتدا فاز گسسته با گذشت زمان، پهن شده (مرحله پهن‌شدگی) و در نهایت پلاگ فوق سبب مسدود شدن تقاطع می‌شود (مرحله انسداد) و جریان فاز پیوسته را محدود می‌نماید. این عمل سبب افزایش فشار در فاز پیوسته شده و منجر به فشرده شدن گلولی پلاگ توسط فاز پیوسته و نازک شدن تدریجی آن می‌گردد (مرحله گلوبی). با گذشت زمان، گلوبی فوق، به یک فیلم بسیار نازک تبدیل شده و قطره مورد نظر جدا می‌شود (مرحله جدایش). به طور معمول، طول پلاگ تشکیل شده از عرض کانال اصلی بیشتر می‌باشد. در کانال اصلی، فیلمی از فاز پیوسته سبب عدم تماس پلاگ به دیواره کانال می‌شود. لازم به ذکر است که الگوی جریان فشرده، در دبی‌های پایین فاز پیوسته و پراکنده اتفاق می‌افتد. به طور کلی مراحل تشکیل قطره به صورت زیر خلاصه می‌شود:

- مرحله پهن‌شدگی<sup>۱</sup>
- مرحله انسداد<sup>۲</sup>
- مرحله گلوبی<sup>۳</sup>
- مرحله جدایش<sup>۴</sup>

### ۳-۳- تشکیل الگوهای جریان: الگوی قطره‌ای

در شکل ۷، روند تشکیل قطره در الگوی قطره‌ای قابل مشاهده است. رژیم جریان قطره‌ای در دبی‌های متوسط و بالای فاز پیوسته و دبی‌های پایین و متوسط فاز پراکنده اتفاق می‌افتد. علت تشکیل قطره در این الگو به دلیل تعامل نیروهای کشش میان سطحی و تنش‌های ویسکوز می‌باشد. علت دقیق تشکیل قطره وابسته به شرایط جریان می‌باشد که سبب غلبه یکی از آن‌ها بر دیگری می‌گردد. در حالت کلی، در این الگو، قطره در حال تشکیل، به طور جزئی سبب مسدود شدن تقاطع می‌شود. یعنی در این الگوی جریان، مرحله‌ای به نام پهن‌شدگی وجود ندارد. بدین صورت که در ابتدا قطره شروع به رشد کرده (مرحله رشد) و با ورود به کانال اصلی و عرض آن توسط فاز پیوسته به تدریج کاهش می‌یابد تا گلوبی اتفاق بیافتد (مرحله گلوبی). با گذشت زمان، با ایجاد نیرو از طرف فاز پیوسته و تعامل نیروهای مختلف، قطره جدا شده (مرحله جدایش) و چرخه بعدی شروع می‌شود. به طور معمول، اندازه قطره از عرض کانال کوچک تر می‌باشد. در حالت کلی، در الگوی قطره‌ای، مراحل تشکیل قطره به شکل زیر است:

- مرحله رشد
- مرحله گلوبی
- مرحله جدایش

<sup>1</sup> Expanding

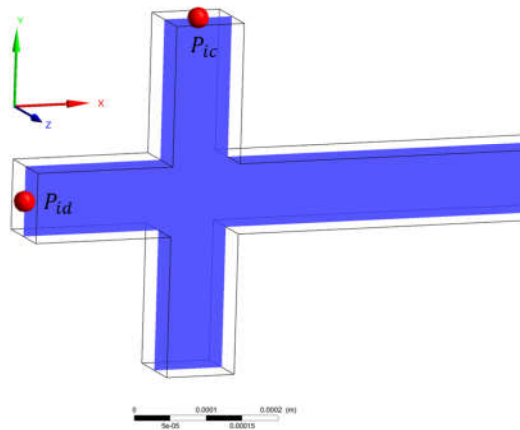
<sup>2</sup> Blocking

<sup>3</sup> Necking

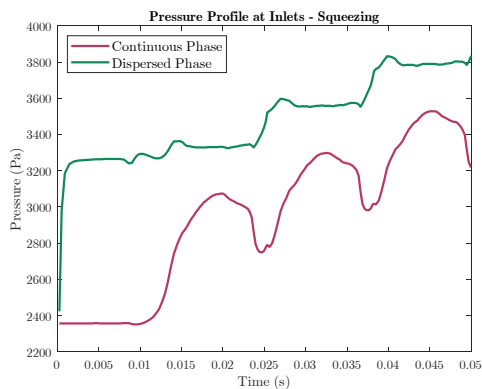
<sup>4</sup> Pinch-off

<sup>5</sup> Rayleigh-Plateau instability

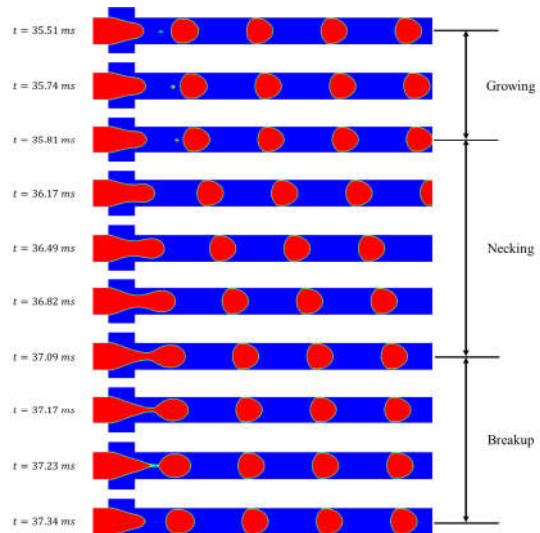
قطره‌ای و جت رسم شده‌اند. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب بیانگر تغییرات فشار در الگوهای فشرده‌شده و قطره‌ای می‌باشند. هنگامی که فاز گسسته وارد تقاطع شده و به طور جزئی کانال اصلی را مسدود می‌نماید، فشار در نقطه  $P_{ic}$  افزایش یافته و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. در الگوی فشرده‌شده، نقطه بیشینه، زمانی است که فاز گسسته به طور کامل کانال اصلی را مسدود می‌نماید، در حالی که این نقطه بیشینه در الگوی قطره‌ای، زمانی است که فاز گسسته بخش زیادی از عرض کانال اصلی را دربر می‌گیرد. با گلولی شدن فاز گسسته و تشکیل قطره، فشار این نقطه کاهش می‌یابد. فشار در ورودی فاز گسسته نیز با مسدود شدن کانال اصلی افزایش پیدا می‌کند و به یک مقدار بیشینه می‌رسد. به طور مشابه، با تشکیل قطره، فشار در این نقطه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مدت زمان تشکیل قطره در هر چرخه در الگوی قطره‌ای کم‌تر از الگوی فشرده‌شده می‌باشد. در شکل ۱۳ نیز تغییرات فشار در نقاط فوق برای الگوی جت ترسیم شده است که بیانگر تغییرات تدریجی فشار بوده و مدت زمان تشکیل قطره بسیار کم می‌باشد.



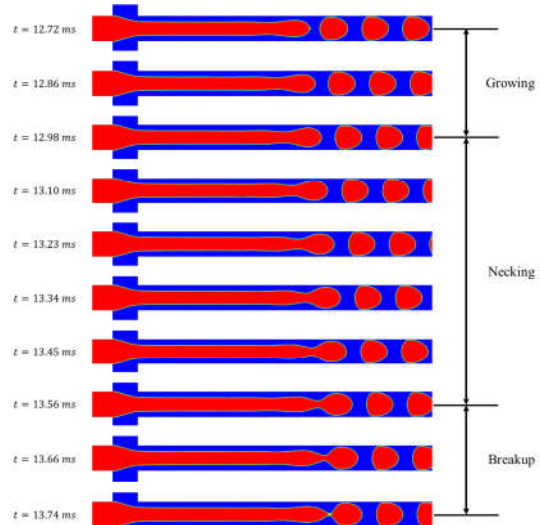
شکل ۱۰- نقاط مورد نظر برای رسم پروفیل فشار بر روی صفحه XY



شکل ۱۱- تغییرات فشار در نقاط  $P_{id}$  و  $P_{ic}$  در الگوی فشرده‌شده



شکل ۷- روند تشکیل قطره در الگوی قطره‌ای



شکل ۸- روند تشکیل قطره در الگوی جت



شکل ۹- الگوی رشته‌ای در شرایط پایا

### ۳-۶- نمودار فشار در ورودی کانال‌ها

یکی از مکان‌های مناسب برای بررسی تغییرات فشار، ورودی میکروکانال‌های فاز گسسته و پیوسته می‌باشد. به همین منظور، نقاط  $P_{id}$  و  $P_{ic}$  به ترتیب در ورودی‌های کانال فاز پیوسته و فاز گسسته بر روی صفحه XY انتخاب می‌گردند (شکل ۱۰).

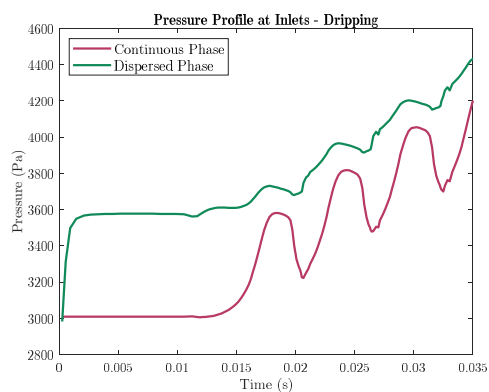
همانند بخش قبل، نمودار تغییرات فشار در الگوهای فشرده‌شده،

## ۵- نمادها

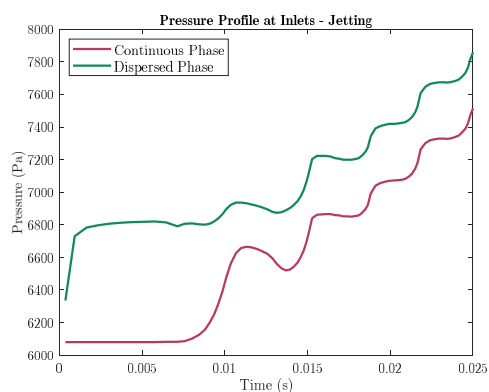
دبی حجمی (mL/h)	Q
سرعت ظاهری (m/s)	u
فشار (Pa)	p
کشش سطحی (mN/m)	$\sigma$
لزجت دینامیکی (mPa.s)	$\mu$
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$
زاویه تماس سطح (درجه)	$\theta_w$
نسبت حجمی	$\alpha$
نیروی کشش سطحی ( $\text{N/m}^3$ )	$F_s$
انحنای سطح (m)	$\kappa$
گرانث ( $\text{m/s}^2$ )	g

## ۶- مراجع

- [1] Stone H. A., Stroock A. D., and Ajdari A., Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 36, No. 1, PP. 381-411, 2004.
- [2] Whitesides G. M., The origins and the future of microfluidics. *Nature*, Vol. 442, No. July, 2006.
- [3] Manz A., Harrison D. J., Verpoorte E. M. J., Fettingner J. C., Paulus A., Lüdi H., and Widmer H. M., Planar chips technology for miniaturization and integration of separation techniques into monitoring systems. Capillary electrophoresis on a chip. *J. Chromatogr. A*, Vol. 593, No. 1-2, PP. 253-258, 1992.
- [4] Gu H., Duits M. H. G., and Mugele F., Droplets formation and merging in two-phase flow microfluidics. *Int. J. Mol. Sci.*, Vol. 12, No. 4, PP. 2572-2597, 2011.
- [5] Taylor G., Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, Vol. 219, No. 1137, PP. 186-203, 1953.
- [6] Aris R., On the dispersion of a solute in a fluid flowing through a tube. *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, Vol. 235, No. 1200, PP. 67-77, 1956.
- [7] Fu T., Ma Y., Funfschilling D., and Li H. Z., Bubble formation and breakup mechanism in a microfluidic flow-focusing device. *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 64, No. 10, PP. 2392-2400, 2009.
- [8] Tan J., Li S. W., Wang K., and Luo G. S., Gas-liquid flow in T-junction microfluidic devices with a new perpendicular rupturing flow route. *Chem. Eng. J.*, Vol. 146, No. 3, PP. 428-433, 2009.
- [9] Van Der Graaf S., Steegmans M. L. J., Van Der Sman R. G. M., Schroën C. G. P. H., and Boom R. M., Droplet formation in a T-shaped microchannel junction: A model system for membrane emulsification. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, Vol. 266, No. 1-3, PP. 106-116, 2005.
- [10] Garstecki P., Fuerstman M. J., Stone H. A., and Whitesides G. M., Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction - Scaling and mechanism of break-up. *Lab Chip*, Vol. 6, No. 3, PP. 437-446, 2006.
- [11] Christopher G. F. and Anna S. L., Microfluidic methods for generating continuous droplet streams, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 19, 2007.
- [12] The S. Y., Lin R., Hung L. H., and Lee A. P., Droplet microfluidics. *Lab Chip*, Vol. 8, No. 2, PP. 198-220, 2008.



شکل ۱۲- تغییرات فشار در نقاط  $P_{id}$  و  $P_{ic}$  در الگوی قطره‌ای



شکل ۱۳- تغییرات فشار در نقاط  $P_{id}$  و  $P_{ic}$  در الگوی جت

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی نحوه تشکیل هر یک از الگوهای جریان در جریان‌های دوفازی مایع-مایع در میکروکانال‌های متمرکزکن جریان پرداخته شد. این الگوها طبق شرایط خاصی می‌توانند در میکروکانال‌ها مشاهده شوند. چهار الگوی فشرده‌شده، قطره‌ای، جت و رشته‌ای به عنوان الگوهای غالب در این مطالعه مشاهده گردیدند. عوامل متعددی بر روی فیزیک الگوهای موردنظر تأثیر می‌گذارند که عبارتند از: ابعاد میکروکانال‌های فاز پیوسته، گسسته و اصلی، خواص فیزیکی فازهای مورد استفاده (لزجت دینامیکی، چگالی و کشش میان سطحی)، دبی‌های جریان و خواص سطح (میزان ترشوندگی دیواره توسط دوفاز موردنظر).

برای جامعیت مطالعه فوق، تمامی پارامترهای ورودی مسئله اعم از سرعت فاز پیوسته و گسسته، ویسکوزیته دینامیکی آن‌ها و کشش سطحی میان فازها، به عنوان پنج پارامتر متغیر در یک میکروکانال با ابعاد مشخص انتخاب شدند.

پس از بررسی نحوه تشکیل هر یک از الگوهای مختلف در صفحه XY (صفحه مرکزی کانال)، نمودار فشار در ورودی کانال‌های فاز پیوسته و گسسته نیز رسم گردیدند. این نمودارها به خوبی تفاوت میان هر یک از الگوهای فوق را مشخص می‌نمایند. حال آن‌که تعبیه یک سنسور در این ناحیه می‌تواند امری تقریباً غیرممکن باشد.



- [13] Baroud C. N., Gallaire F., and Dangla R., Dynamics of microfluidic droplets. *Lab Chip*, Vol. 10, No. 16, PP. 2032–2045, 2010.
- [14] Zhou C., Yue P., and Feng J. J., Formation of simple and compound drops in microfluidic devices. *Phys. Fluids*, Vol. 18, No. 9, 2006.
- [15] Fu T., Wu Y., Ma Y., and Li H. Z., Droplet formation and breakup dynamics in microfluidic flow-focusing devices: From dripping to jetting. *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 84, PP. 207–217, 2012.
- [16] Ward T., Faivre M., Abkarian M., and Stone H. A., Microfluidic flow focusing Drop size and scaling in pressure versus flow-rate-driven pumping. *Electrophoresis*, Vol. 26, No. 19, PP. 3716–3724, 2005.
- [17] Brackbill J. U., Kothe D. B., and Zemach C., A continuum method for modeling surface tension. *J. Comput. Phys.*, Vol. 100, No. 2, PP. 335–354, 1992.
- [18] Chen X., Glawdel T., Cui N., and Ren C. L., Model of droplet generation in flow focusing generators operating in the squeezing regime. *Microfluid. Nanofluidics*, Vol. 18, No. 5–6, PP. 1341–1353, 2015.