

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی عددی جریان دوفازی در میکروکانال

سید یاسر حسینی صدیق

استاد راهنما

دکتر علی عباس نژاد

استاد مشاور

دکتر محسن نظری

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم بہ

خدائی کہ آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دمید.

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که این جانب را در انجام این پایان نامه یاری نموده‌اند به خصوص جناب آقای دکتر علی عباس نژاد و جناب آقای دکتر محسن نظری که همواره از راه‌های و مشاوره‌های آن‌ها بهره‌مند بوده‌ام تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین لازم می‌دانم از همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری کردند و حضورشان آرام‌بخش و جودم بود، تشکر نمایم.

سید یاسر حسینی صدیق

این جانب سید یاسر حسینی صدیق دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل

انرژی

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی عددی جریان دو فازی در میکروکانال تحت راهنمایی دکتر علی عباس نژاد متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا " Shahrood University of Technology " به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تولید قطره در دستگاه‌های میکروسیالی کاربردهای فراوانی در زیست‌شناسی، پزشکی و شیمی دارد. این کاربردهای گسترده، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در این زمینه شده است. به‌طور کلی در دستگاه‌های میکروسیالی سه رژیم عمده برای جدایش قطره مشاهده می‌شود که شامل رژیم فشرده‌گی، رژیم چکه کردن و رژیم جتی می‌شود. در این مطالعه از روش لولست برای ردیابی موقعیت فصل مشترک بین دو فاز و شبیه‌سازی تشکیل و جدایش قطره در یک میکرو کانال از نوع جریان متمرکز شده که در آن دو سیال مخلوط نشدنی در جریان هستند استفاده شده است. اعداد بی‌بعد مهم در این مطالعه، عدد موینگی (Ca)، نسبت لزجت و نسبت نرخ جریان ورودی دو فاز است. در دستگاه‌های میکروسیالی از نوع جریان متمرکز شده کمتر شاهد رژیم جتی بوده و تشکیل و جدایش قطره در این نوع از میکرو کانال‌ها بیشتر در رژیم چکه‌ای و رژیم فشرده‌گی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش رفتار سیالات نیوتنی و سیالات غیرنیوتنی از نوع نازک شونده بر شی در فرآیند جدایش قطره مورد مطالعه قرار گرفتند. علاوه بر این اثر عدد موینگی و نسبت نرخ جریان، نسبت لزجت دو فاز، تغییر فاصله بین کانال تزریق میانی و لبه اریفیس، تغییرات اندازه اریفیس و شاخص توانی n در مدل غیرنیوتنی کاریو بر فرآیند جدایش قطره، اندازه قطره، فاصله بین قطرات، فرکانس تولید قطرات و نیز توزیع فشار بین فازها مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی و عددی موجود، مشخص شده است که نتایج به‌دست‌آمده از دقت و صحت کافی برخوردار است.

نتایج نشان می‌دهند با افزایش عدد موینگی و نسبت نرخ جریان اندازه قطرات تشکیل شده کوچک‌تر می‌شود، البته در اعداد موینگی و نسبت دبی بالای فاز پیوسته، تأثیر افزایش نسبت دبی و عدد موینگی بر اندازه قطرات کم‌تر می‌شود. در اعداد موینگی پایین تأثیر تغییر نسبت دبی بر روی اندازه قطرات بیشتر بوده ولی احتمال جدایش چندپخشی قطرات زیاد می‌شود. جدایش چندپخشی زمانی اتفاق می‌افتد که پس از جدایش قطره اصلی باریکه باقی‌مانده از فاز گسسته در اریفیس به عقب برنگشته و کمی در اریفیس به رشد خود ادامه می‌دهد تا قطرات ثانویه جدا شوند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییر فاصله بین انتهای کانال تزریق میانی و اریفیس (Hf) بر اندازه قطرات بسیار بیشتر از تغییر اندازه اریفیس است. در صورتی که فاز

گسسته غیرنیوتنی باشد در این صورت مقدار شاخص توانی (n) تأثیر بسیاری بر اندازه قطرات خواهد داشت. با کاهش مقدار شاخص توانی اندازه قطرات اصلی کوچک شده و در مقادیر کم شاخص توانی حالت چندپخشی با چندین قطره ثانویه کوچک ایجاد می شود. همچنین با کاهش شاخص توانی در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز به دلیل چندپخشی شدن تشکیل قطرات، تغییرات کوچکی در مرحله آخر جدایش قطره مشاهده می شود.

کلید واژگان: میکروکانال جریان متمرکز شده، روش لولست، سیال غیرنیوتنی، جدایش قطره، عدد موینگی، چندپخشی.

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- رژیم‌های اصلی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروسیالی	۴
۳-۱- انواع دستگاه‌های میکروسیالی	۷
۱-۳-۱- دستگاه‌های T-شکل	۷
۲-۳-۱- دستگاه‌های هم جریان	۸
۳-۳-۱- دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده	۹
۴-۳-۱- میکروکانال‌های اتصال صلیبی و Y-شکل	۱۱
۴-۱- تولید قطرات چند جزئی	۱۲
۵-۱- قطعه قطعه کردن قطره	۱۵
۶-۱- ادغام قطرات	۱۶
۷-۱- مروری بر تحقیقات پیشین	۱۷
۱-۷-۱- تحقیقات آزمایشگاهی	۱۷
۲-۷-۱- تحقیقات عددی	۲۳
۸-۱- معرفی تحقیق حاضر	۳۱
۱-۸-۱- ضرورت انجام تحقیق	۳۳
۲-۸-۱- نوآوری تحقیق	۳۴
۹-۱- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۳۶
۲- فصل دوم: معادلات حاکم و روش حل عددی	۳۷
۱-۲- مقدمه	۳۸
۲-۲- فیزیک مسئله	۳۸
۱-۲-۲- سطح مشترک و کشش سطحی	۳۸
۲-۲-۲- سورفکتانت	۳۹

- ۴۱-۳-۲-۲- زاویه تماس و تر شوندگی سطح.....
- ۴۲-۳-۲- روش‌های ردیابی سطح مشترک.....
- ۴۲-۳-۲- روش‌های تسخیرکننده سطح.....
- ۴۲-۳-۲- روش‌های دنبال کننده سطح.....
- ۴۳-۴-۲- اعداد و پارامترهای بی بعد.....
- ۴۶-۵-۲- رئولوژی پلیمرها.....
- ۴۶-۱-۵-۲- سیال نیوتنی.....
- ۴۷-۲-۵-۲- سیالات غیرنیوتنی.....
- ۴۹-۳-۵-۲- مدل‌های غیرنیوتنی.....
- ۵۱-۶-۲- جریان‌های آرام نیوتنی و غیرنیوتنی.....
- ۵۳-۷-۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی به کمک لولست پایستار.....
- ۵۷-۸-۲- شرایط اولیه و شرایط مرزی.....
- ۵۷-۱-۸-۲- شرایط اولیه.....
- ۵۸-۲-۸-۲- شرایط مرزی.....
- ۵۹-۹-۲- نحوه محاسبه قطر و فاصله بین قطرات.....
- ۳- فصل سوم: فرآیند جدایش قطره از فاز گسسته نیوتنی داخل فاز پیوسته نیوتنی..... ۶۱
- ۶۲-۱-۳- مقدمه.....
- ۶۲-۱-۱-۳- سیالات نیوتنی.....
- ۶۲-۲-۳- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی.....
- ۶۵-۳-۳- شبکه‌بندی و استقلال از شبکه‌بندی.....
- ۶۹-۴-۳- ارزیابی صحت نتایج.....
- ۷۵-۵-۳- تک‌پخشی و چندپخشی.....
- ۷۷-۶-۳- فرآیند جدایش قطره در رژیم چکه‌ای و توزیع فشار بین فازها.....
- ۸۰-۷-۳- فاصله بین قطرات.....
- ۸۲-۸-۳- فرکانس تولید قطرات.....
- ۸۳-۹-۳- تأثیر ابعاد اریفیس.....

۳-۱۰- اثر تغییر فاصله بین انتهای کانال تزریق میانی و ابتدای اریفیس (H_f)..... ۸۳

۳-۱۱- تأثیر کشش سطحی..... ۸۵

۳-۱۲- نتیجه‌گیری..... ۸۶

۴- فصل چهارم: فرآیند جدایش قطره غیرنیوتنی از نوع نازک‌شونده-برشی در فاز پیوسته نیوتنی..... ۸۹

۴-۱- مقدمه..... ۹۰

۴-۱-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان..... ۹۰

۴-۲- شرایط مرزی و خواص رئولوژیکی سیالات استفاده شده..... ۹۱

۴-۳- شبکه‌بندی و استقلال از شبکه‌بندی..... ۹۲

۴-۴- اعتبارسنجی..... ۹۳

۴-۵- اثر شاخص توانی بر اندازه قطرات..... ۹۵

۴-۶- فاصله بین قطرات..... ۱۰۰

۴-۷- اثر شاخص توانی بر توزیع فشار بین فازها..... ۱۰۲

۴-۸- نمودار اثر n بر فرکانس تولید قطرات..... ۱۰۵

۴-۹- نتیجه‌گیری..... ۱۰۶

۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها..... ۱۰۹

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۱۱۰

۵-۲- پیشنهادها..... ۱۱۱

مراجع..... ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: خواص سیالات استفاده شده در بخش نیوتنی..... ۶۴
- جدول ۲-۳: مشخصات شبکه بندی های محاسباتی..... ۶۶
- جدول ۳-۳: قطر بی بعد و میزان خطا نسبت به داده های تجربی در نسبت دبی $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ در شبکه های مختلف..... ۶۷
- جدول ۴-۳: نتایج شبیه سازی در نسبت دبی های مختلف و مقایسه آن ها با نتایج آزمایشگاهی به ازای $\eta d/\eta c = 50$ ۷۱
- جدول ۵-۳: نتایج شبیه سازی در نسبت دبی های مختلف و مقایسه آن ها با نتایج آزمایشگاهی به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ ۷۱
- جدول ۱-۴: خواص سیالات استفاده شده..... ۹۲
- جدول ۲-۴: شبکه بندی استفاده شده در بخش های مختلف..... ۹۲
- جدول ۳-۴: اندازه قطرات در شبکه بندی های مختلف $Qc/Qd = 50$ و $\eta d/\eta cp = 50$ و $n=0.8$ ۹۳
- جدول ۴-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 50$ و $n=1$ ۹۸
- جدول ۵-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 50$ و $n=0.8$ ۹۸
- جدول ۶-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 50$ و $n=0.6$ ۹۹
- جدول ۷-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 50$ و $n=0.4$ ۹۹
- جدول ۸-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 100$ و $n=1$ ۹۹
- جدول ۹-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 100$ و $n=0.8$ ۹۹
- جدول ۱۰-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 100$ و $n=0.6$ ۱۰۰
- جدول ۱۱-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $\eta d/\eta cp = 100$ و $n=0.4$ ۱۰۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: دستگاه‌های میکروسیالی [۲۳, ۲۴]..... ۴
- شکل ۲-۱: شماتیک دستگاه‌های میکروسیالی و رژیم‌های مختلف [۳۲]..... ۵
- شکل ۳-۱: رژیم‌های متداول در میکروکانال‌ها (الف) - رژیم فشرده (ب) - رژیم چکه‌ای (ج) - رژیم جتی [۴۱]..... ۷
- شکل ۴-۱: دستگاه میکروسیالی T-شکل ساده [20, 42]..... ۷
- شکل ۵-۱: دستگاه میکروسیالی T-شکل با دو تغییر ساده متداول [۴۲]..... ۷
- شکل ۶-۱: دستگاه میکروسیالی هم‌جریان [۴۲]..... ۹
- شکل ۷-۱: دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده [۴۲]..... ۱۰
- شکل ۸-۱: دستگاه‌های میکروسیالی با (الف) تر شدن دیواره‌های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز شده با جریان‌های مخالف [۴۲]..... ۱۰
- شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال‌های (الف) اتصال صلیبی (ب) Y-شکل [۴۲]..... ۱۲
- شکل ۱۰-۱: استراتژی‌های میکروسیالی معمول برای تولید قطراتی به صورت روکش‌دار [۴۲]..... ۱۳
- شکل ۱۱-۱: شماتیک تولید قطرات روکش‌دار توسط سری کردن سه میکروکانال اتصال صلیبی [۴۲]..... ۱۴
- شکل ۱۲-۱: شماتیک دستگاه‌های میکروسیالی معمول جهت تولید قطرات چند جزئی [۴۲, ۲۰]..... ۱۴
- شکل ۱۳-۱: تقسیم کردن یک قطره به کمک هندسه T-شکل [۴۲]..... ۱۵
- شکل ۱۴-۱: قرار دادن مانع در مسیر جریان برای تقسیم کردن قطره [۴۲]..... ۱۵
- شکل ۱۵-۱: روش‌های غیرفعال ادغام قطرات [۴۲]..... ۱۶
- شکل ۱۶-۱: طرح سه‌شاخه‌ای ادغام غیرفعال قطرات [۴۲]..... ۱۷
- شکل ۱۷-۱: الگوهای جریان روغن سیلیکون در محلول ویسکو الاستیک PAA به ازای نسبت دبی و عدد وایزنبرگ مختلف..... ۲۲
- شکل ۱۸-۱: تغییرات فشار فازهای گسسته و پیوسته در زمان‌های مختلف. (الف) فرآیند تکامل تغییر شکل قطره (ب) فرآیند تشکیل قطره بدون میدان الکتریکی و با $Ca=0.01307$ و نسبت فاز پیوسته به گسسته برابر با ۸, ۰..... ۲۴
- شکل ۱۹-۱: جدایش قطره در میکروکانال (الف) T-شکل (ب) T-شکل اصلاح‌شده. در $Cac = 0.0292$, $\eta d/\eta c = 1, Qc/Qd = 4$ و زاویه تماس 140° درجه..... ۲۵
- شکل ۲۰-۱: (الف) قطر قطرات نیوتنی تشکیل شده در فاز پیوسته غیرنیوتنی در میکروکانال T-شکل به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی (ب) قطر قطرات غیرنیوتنی تشکیل شده در فاز پیوسته غیرنیوتنی برحسب عدد موینگی در میکروکانال T-شکل به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی..... ۲۹
- شکل ۲۱-۱: تأثیر عدد موینگی و زاویه تماس بر اندازه قطرات در هندسه T-شکل [۳۹]..... ۳۰
- شکل ۲۲-۱: هندسه استفاده‌شده در پژوهش حاضر..... ۳۳
- شکل ۱-۲: فصل مشترک بین دو سیال انحلال‌ناپذیر [۸۰] (الف) نمای میکروسکوپی در اندازه مولکولی از فصل مشترک

- ۳۸.....(ب) قطره آویزان (ج) قطره چسبیده به سطح.....
- شکل ۲-۲: (الف) شماتیک سورفکتانت (ب) سورفکتانت بر روی یک سطح [۸۱]..... ۳۹.....
- شکل ۲-۳: زاویه تماس بین سطح و سیال (الف) سطح آب‌گریز (ب) سطح با زاویه تماس عمودی (ج) سطح آب‌دوست
..... ۴۱.....
- شکل ۲-۴: دو روش کلی تعیین مرز مشترک [۸۳] الف- روش اوپلری ب- روش لاگرانژی..... ۴۳.....
- شکل ۲-۵: تغییرات تنش برشی برحسب نرخ برش برای انواع سیالات مستقل از زمان [۸۴]..... ۴۸.....
- شکل ۲-۶: تغییرات لزجت برای چند نوع سیال [۸۵]..... ۴۹.....
- شکل ۲-۷: پروفیل سرعت برحسب مقادیر شاخص توانی و در میکروکانال [۸۰]..... ۵۱.....
- شکل ۲-۸: مقدار تابع ϕ در قسمت‌های مختلف میکروکانال در حضور قطره..... ۵۴.....
- شکل ۲-۹: شرایط اولیه و شرایط مرزی اعمال شده بر میکروکانال..... ۵۸.....
- شکل ۲-۱۰: مبنای اندازه‌گیری قطر و فاصله بین قطرات..... ۶۰.....
- شکل ۲-۱۱: نمودار پارامتر ϕ در مقطع میانی قطره..... ۶۰.....
- شکل ۳-۱: نمایی از میکروکانال بررسی شده در این پژوهش و قسمت‌های مختلف آن..... ۶۲.....
- شکل ۳-۲: شرایط مرزی اعمال شده بر میکروکانال..... ۶۳.....
- شکل ۳-۳: شبکه‌بندی در ناحیه اریفیس و اطراف آن..... ۶۸.....
- شکل ۳-۴: مقایسه قطر بی‌بعد قطرات در شبکه‌بندی‌های مختلف در نسبت دبی $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۶۹.....
- شکل ۳-۵: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر به ازای دو نسبت لزجت مختلف در نسبت دبی $Qc/Qd = 20$ و $Ca_c = 0.0067$ ، (الف) نتایج پژوهش حاضر (ب) نتایج آزمایشگاهی نای و همکاران [۵۲] (ج) نتایج عددی لی و همکاران [۳۸]..... ۷۰.....
- شکل ۳-۶: بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و دیگر نتایج عددی به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۷۳.....
- شکل ۳-۷: بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و دیگر نتایج عددی به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ ۷۴.....
- شکل ۳-۸: فرآیند جدایش تک‌پخشی قطرات در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ با $ca = 0.02125$ ۷۵.....
- شکل ۳-۹: فرآیند جدایش چندپخشی قطرات در $Qc/Qd = 10$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ با $Ca_c = 0.00425$ ۷۶.....
- شکل ۳-۱۰: جدایش قطره در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۷۷.....
- شکل ۳-۱۱: توزیع فشار بین دو فاز در نسبت دبی $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۷۸.....
- شکل ۳-۱۲: خطوط جریان در میکروکانال به ازای $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۰.....
- شکل ۳-۱۳: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۱.....
- شکل ۳-۱۴: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف و به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ ۸۱.....
- شکل ۳-۱۵: فرکانس تولید قطرات (عدد استروهل) در اعداد موینگی مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۲.....

- شکل ۳-۱۶: فرکانس تولید قطرات (عدد استروهاال) در اعداد موپینگی مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۲
- شکل ۳-۱۷: اثر اندازه اریفیس بر جدایش قطرات در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۳
- شکل ۳-۱۸: اثر اندازه اریفیس بر اندازه قطرات در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۳
- شکل ۳-۱۹: تأثیر تغییر فاصله بین خروجی کانال مرکزی و ابتدای اریفیس بر جدایش قطرات در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۴
- شکل ۳-۲۰: تأثیر تغییر فاصله بین خروجی کانال مرکزی و ابتدای اریفیس بر اندازه قطرات تشکیل شده در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۵
- شکل ۳-۲۱: تأثیر کشش سطحی بر فرآیند تشکیل قطره در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۶
- شکل ۳-۲۲: اندازه قطره در کشش سطحی های مختلف و اعداد موپینگی های معادل در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۶
- شکل ۴-۱: لزجت برشی صفر و بی نهایت برای یک محلول پلیمری با رفتار نازک شونده برشی [۸۴] ۹۱
- شکل ۴-۲: مقایسه اندازه قطرات در نسبت دبی های مختلف بین نتایج نای و همکاران [۵۲] و مدل کاریو با $n=1$ ۹۴
- شکل ۴-۳: مقایسه اندازه قطرات در نسبت دبی های مختلف بین نتایج نای و همکاران [۵۲] و مدل کاریو با $n=1$ ۹۴
- شکل ۴-۴: تأثیر پارامتر توانی بر جدایش قطرات. در همه موارد $Cac = 0.0168$ و $\eta od/\eta cp = 50$ ۹۶
- شکل ۴-۵: فاصله بین قطرات در مقادیر مختلف n و $\eta od/\eta cp = 50$ ۹۷
- شکل ۴-۶: فاصله بین قطرات در مقادیر مختلف n و $\eta od/\eta cp = 100$ ۹۸
- شکل ۴-۷: مقایسه فاصله بین قطرات در شاخص های توانی مختلف و $\eta od/\eta cp = 50$ ۱۰۱
- شکل ۴-۸: مقایسه فاصله بین قطرات در شاخص های توانی مختلف و $\eta od/\eta cp = 100$ ۱۰۲
- شکل ۴-۹: توزیع فشار بین دو فاز در $Qc/Qd = 60$ ، $\eta od/\eta cp = 50$ و $n=1$ ۱۰۳
- شکل ۴-۱۰: توزیع فشار بین دو فاز در $Qc/Qd = 60$ ، $\eta od/\eta cp = 50$ و $n=0.8$ ۱۰۴
- شکل ۴-۱۱: توزیع فشار بین دو فاز در $Qc/Qd = 60$ ، $\eta od/\eta cp = 50$ و $n=0.6$ ۱۰۴
- شکل ۴-۱۲: توزیع فشار بین دو فاز در $Qc/Qd = 60$ ، $\eta od/\eta cp = 50$ و $n=0.4$ ۱۰۵
- شکل ۴-۱۳: فرکانس تولید قطرات در $\eta od/\eta cp = 50$ و شاخص توانی مختلف ۱۰۶
- شکل ۴-۱۴: فرکانس تولید قطرات در $\eta od/\eta cp = 100$ و شاخص توانی مختلف ۱۰۶

فهرست علائم

علائم لاتین

Bo	عدد باند
Ca	عدد موئینگی
D*	قطر بی بعد
f	نیروی حجمی
F	نیرو
h	اندازه المان شبکه
Kn	عدد نادسن
L*	فاصله بی بعد
n _r	بردار نرمال سطح مشترک
P	فشار
P*	فشار بی بعد
Re	عدد رینولدز
t	زمان
t*	زمان بی بعد
u	مؤلفه سرعت در جهت X
v	مؤلفه سرعت در جهت Y
w	مؤلفه سرعت در جهت Z

we

عدد ویر

علائم یونانی

β

طول لغزش

γ

پارامتر مقداردهی اولیه

$\dot{\gamma}$

نرخ برش

δ

تابع دلتای دیراک

ε

ضخامت سطح مشترک

ε_r

لزجت مصنوعی

η

لزجت دینامیکی

η°

لزجت برشی صفر

η^∞

لزجت برشی بی‌نهایت

θ

زاویه تماس

κ

انحنای سطح مشترک

λ

ثابت زمانی در مدل کاریو

ρ

چگالی

σ

کشش سطحی بین دو فاز

τ

تنش برشی

τ_a

زمان مصنوعی

ϕ

تابع لولست

زیرنویس‌ها

cp

فاز پیوسته

dp

فاز گسسته

G

گاز

L

مایع

S

جامد

st

کشش سطحی

۱- فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیق بر روی دستگاه‌هایی میکروسیالی^۱ که در مقیاس میکرو هستند شتاب زیادی گرفته و محققان بسیاری از علوم مختلف به مطالعه آن‌ها پرداخته‌اند [۱]. میکروسیالی یک اصطلاح بوده که برای توصیف رفتار، کنترل و نیز به‌کارگیری سیالات در هندسه‌های محدود به مقیاس کمتر از میلی‌متر استفاده می‌شود. از این فناوری برای اولین بار برای دستگاه‌های تجزیه و آنالیز شیمیایی کوچک شده استفاده شد [۲]. تلفیق روش‌های میکروسیالی تولید قطره می‌تواند منجر به این شود که این دستگاه‌ها در محدوده‌ی وسیعی از زمینه‌های تحقیقاتی مورد استفاده قرار گیرند. میکروسیالی علم و فناوری کنترل رفتار سیالات در میکروکانال‌هایی است که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کمتر از یک میلی‌متر باشد [۳]. از ویژگی‌های شاخص دستگاه‌های میکروسیالی می‌توان به مقیاس طولی کوچک و رژیم جریان آرام^۲ در آن‌ها اشاره کرد [۴]. کاربردهای اولیه و رایج فناوری میکروسیالی شامل رئولوژی^۳ خون و تجزیه و تحلیل شیمیایی است که به دلیل قابلیت دستگاه‌های میکروسیالی در مصرف حجم بسیار کم از نمونه‌ها و مواد، برای آنالیز در زمان کوتاه ارتقاء یافته است [۵، ۶]. پیشرفت سریع در فناوری سازه‌های سیلیکونی که از سال ۱۹۸۰ آغاز شد، توسعه و پیشرفت در دستگاه‌های میکروسیالی بر پایه سیلیکون را ممکن کرده است. این فناوری، دانشی بین‌رشته‌ای است که به سرعت در حال رشد بوده و در دو دهه گذشته در بسیاری از رشته‌ها از فیزیک سیال تا تحقیقات زیست‌پزشکی توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است. همچنین دستگاه‌های میکروسیالی کاربردهای امیدبخشی شامل اکتشافات دارویی، توسعه داروها و نیز ترکیب و اختلاط آن‌ها یافته است [۷، ۸]. روش‌های تولید قطره به سرعت در حال توسعه هستند به‌گونه‌ای که پایه و اساسی قوی و قابل کنترل را برای ایجاد قطره فراهم می‌کنند. این روش‌ها در طیف وسیعی شامل ساخت میکرو ذرات تک‌پخش^۴، افزایش اختلاط، تبلور

^۱ Microfluidic devices

^۲ Laminar

^۳ Rheology

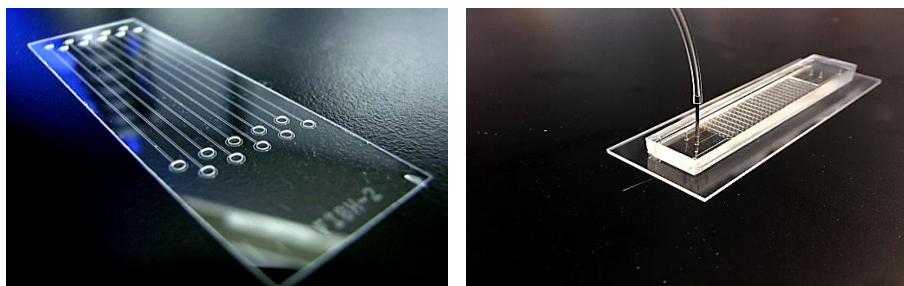
^۴ Monodispersed

پروتئین‌ها، ترکیب نانو ذرات و آنالیز میکروشیمیایی^۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۱۱]. این کاربردهای گسترده، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در این زمینه شده است. قطرات مایع پخش شده در یک سیال مخلوط نشدنی ثانویه به‌ویژه زمانی که اندازه و توزیع اندازه قطرات در مقیاس میکرو و یا نانو باشد سودمند خواهد بود [۱۲]. این دستگاه‌ها این امکان را می‌دهند که بتوان بر روی اندازه‌ی قطره و توزیع آن کنترل داشت [۱۳]. دستگاه‌های میکروسیالی یک روش ساده برای تولید امولسیون‌هایی نزدیک به حالت تک‌پخش و دست یافتن به فرکانس شکل‌گیری بالا در دستگاه‌های مایع چند فاز هستند [۱۴]. از مزایای مهم این دستگاه‌ها می‌توان به هزینه پایین تولید، مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی، کوتاه‌تر بودن زمان آنالیز در، حداقل استفاده از نمونه‌ها و حداقل ضایعات تولیدی از محصولات، افزایش بهره‌وری و اشغال فضای خیلی کم اشاره کرد [۱۵، ۱۶].

جریانات چند فاز سیالات در دستگاه‌های میکروسیالی را می‌توان به جریان‌های مبتنی بر قطره و جریانات موازی طبقه‌بندی کرد. در دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره شاهد ایجاد قطرات خواهیم بود؛ به‌عنوان مثال در دستگاه‌های با اتصال از نوع X- شکل، Y- شکل و T- شکل و نیز در دستگاه‌های جریان متمرکز، دستگاه‌های هم‌جریان و واحدهای تفکیک یا ادغام قطره [۱۷-۲۰]. در دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر جریان موازی و پیوسته شاهد تشکیل قطره نبوده و می‌توان به‌منظور عملیاتی مانند اختلاط، واکنش، استخراج و جداسازی استفاده کرد. رشد فرآیندهای تولید قطره میکروسیالی در دهه گذشته همراه با افزایش کاربردهای آن می‌تواند مزیت‌هایی در دقت تولید و دست‌کاری قطرات در مقیاس میکرو داشته باشد. به‌عنوان مثال تولید قطرات تک‌پخش می‌تواند الگویی مفید برای تولید میکرو کپسول‌ها و نیز میکرو ذرات تک‌پخش به‌منظور دارورسانی هدفمند مواد مغذی و همچنین برای کپسوله کردن سلول‌های زنده باشد. علاوه بر این، محدوده‌ی حجمی قطرات تک‌پخش که از پیکو لیتر تا نانو لیتر بوده و می‌توانند در میکرو رگ‌های مشخص برای واکنش و اختلاط سریع استفاده شوند [۱۷-۱۹]. دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر

¹ Micro chemical

قطره با توانایی تولید بالا، حوزه‌ای چالش‌برانگیز هستند. یک دستگاه واحد میکروسیالی معمولاً آمولسیون‌هایی در یک توان عملیاتی از ده تا صد میکرو لیتر در دقیقه تولید می‌کند، درحالی‌که توان عملیاتی بیشتری حتی برای کاربردهای دارویی و زیست پزشکی مورد نیاز است [۲۱، ۲۲]. برخی از گروه‌های تحقیقاتی توان عملیاتی دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره را به کمک موازی کردن دستگاه‌های تولید قطره افزایش داده‌اند [۲۱، ۲۲]. دستگاه‌های میکروسیالی یکپارچه حدود دو دهه است که در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شوند. ادغام فناوری‌های نانو ذرات و میکرو واکنش‌گرها فرصت‌های زیادی را برای توسعه دستگاه‌های دارورسانی هوشمند و میکرو واکنش‌گرها به‌منظور توسعه دارو و دیگر ترکیبات بیوشیمیایی ارائه می‌دهد. از این فناوری برای تبلور پروتئین، ژنتیک و سنجش آمینواسید، زیست‌شناسی عصبی، واکنش‌گرهای زیستی، پردازش و سنجش به لحاظ شیمیایی و جنس، کشت سلولی سه‌بعدی و تجزیه و تحلیل تک سلولی استفاده می‌شود. دستگاه‌های میکروسیالی یکپارچه می‌توانند به‌آسانی به مولدهای انرژی خورشیدی، دستگاه‌های سلول سوختی و دستگاه‌هایی که از یک نقطه مراقبت می‌کنند (POC) ^۱ تعمیم یابند [۲۰]. در شکل ۱-۱ نمونه‌هایی از دستگاه‌های میکروسیالی ساخته‌شده با فن لیتوگرافی نرم ^۲ بر روی صفحات سیلیکون نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: دستگاه‌های میکروسیالی [۲۳، ۲۴].

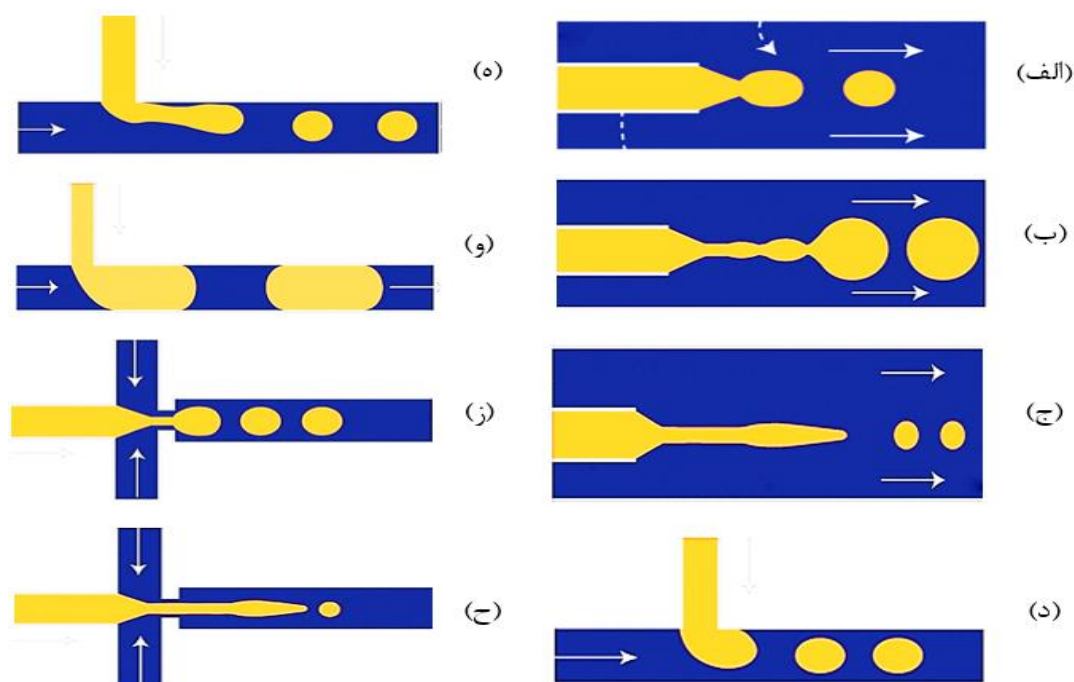
۱-۲- رژیم‌های اصلی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروسیالی

در تحقیقات صورت گرفته، رژیم‌های غالب تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروسیالی عموماً رژیم‌های

^۱ point-of-care

^۲ Soft lithography

چکه‌ای^۱ و جتی^۲ گزارش شده است [۲۵-۲۷]. رژیم فشردگی^۳ بیشتر در اتصال T-شکل و میکروکانال جریان متمرکز شده^۴ گزارش شده است [۲۸-۳۰] (شکل ۱-۲-و). سازوکار تشکیل قطره در هر رژیم متفاوت بوده و تحت تأثیر برهم‌کنش نیروهای مختلف شامل نیروهای بین سطحی^۵، نیروی لزج^۶، اینرسی و گرانشی است [۳۱].



شکل ۱-۲: شماتیک دستگاه‌های میکروسیالی و رژیم‌های مختلف [۳۲].

در رژیم چکه‌ای، نیروی اینرسی قابل چشم‌پوشی بوده و نیروی بین سطحی غالب است (شکل ۱-۲-الف، د، ز). نیروی بین سطحی تمایل دارد قطره‌های در حال شکل‌گیری را به عقب و به سمت روزنه نازل تزریق بکشد. تشکیل قطره زمانی شروع می‌شود که نیروی لزج از نیروی بین سطحی بیشتر شود و قطره‌ها در

^۱ Dripping

^۲ jetting

^۳ squeezing

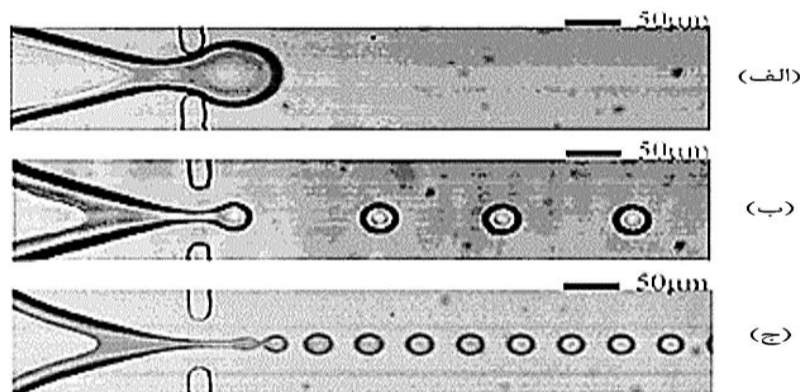
^۴ Flow focusing devices

^۵ Interfacial force

^۶ Viscous force

نزدیکی اریفیس^۱ شکل می‌گیرند [۳۳]. در رژیم جتی یک جت طولانی تشکیل شده و سرانجام این جت در پایین دست اریفیس به شکل قطره گسسته می‌شود (شکل ۱-۲-ب، ج، ه، ح). دو نوع از جت وجود دارد؛ جت باریک و جت عریض. جت باریک زمانی ایجاد می‌شود که نیروی برشی فاز بیرونی غالب بوده و به‌طور فراوانی بزرگ‌تر از نیروی بین سطحی باشد؛ بنابراین یک جت طولانی و نازک از فاز گسسته ایجاد شده که قطراتی کوچک از نوک این جت جدا می‌شود [۳۴، ۳۵]. در رژیم جت عریض از آنجایی که سرعت فاز گسسته به‌طور نسبی بزرگ‌تر از سرعت فاز پیوسته است، لذا اثر اینرسی مهم می‌شود. هنگامی که نیروی اینرسی فاز گسسته از نیروی بین سطحی بزرگ‌تر شود، یک جت پهن شونده به سرعت شروع به شکل‌گیری کرده و در نهایت به قطرات بزرگ گسسته می‌شود.

در رژیم فشردگی، نیروی برشی که توسط فاز پیوسته اعمال می‌شود خیلی کمتر از نیروی بین سطحی بوده و از این رو قطره در حال شکل‌گیری رشد خود را حفظ کرده و تا زمانی که تقریباً تمام کانال اصلی را پر کند به رشد خود ادامه می‌دهد. این کار باعث می‌شود مجرای فاز پیوسته که بین دیواره و سطح مشترک فاز قطره است کوچک شده و باعث افزایش فشار فاز پیوسته در بالادست محل شکل‌گیری قطره شود. با توجه به نیروی فشاری بیش‌ازحد ناشی از فاز پیوسته، فاز گسسته فشرده شده و تا زمانی که به شکل قطره گسسته شود این فشردگی ادامه می‌یابد [۲۹، ۳۶، ۳۷] (شکل ۱-۲-و). به‌طور کلی در امولسیون سازی در میکروکانال‌ها سه رژیم عمده شامل؛ رژیم فشردگی، رژیم چکه‌ای و رژیم جتی وجود دارد [۳۸-۴۰].



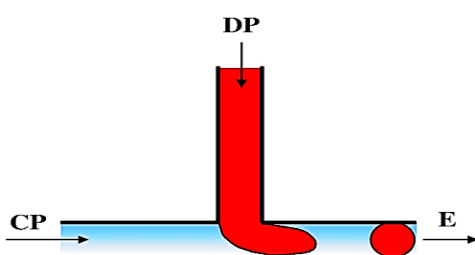
^۱ Orifice

شکل ۳-۱: رژیم‌های متداول در میکروکانال‌ها (الف) - رژیم فشرده‌گی (ب) - رژیم چکه‌ای (ج) - رژیم جتی [۴۱]

۳-۱- انواع دستگاه‌های میکروسیالی

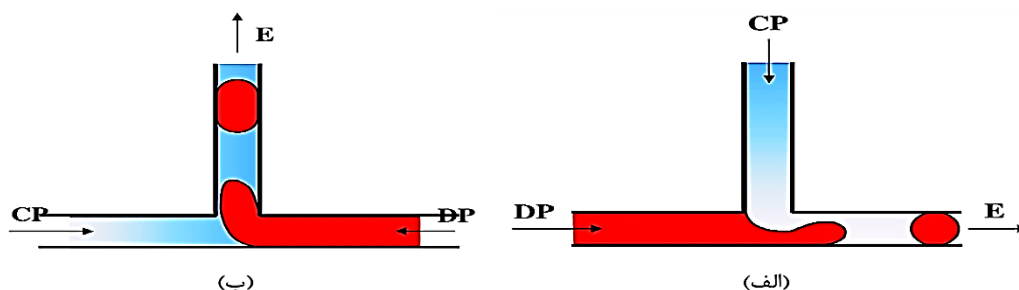
۳-۱-۱- دستگاه‌های T-شکل

میکروکانال‌های T-شکل ساده‌ترین شکل برای تولید قطرات و حباب‌ها هستند. هندسه استاندارد این دستگاه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است و در آن فاز پیوسته از کانال اصلی وارد و فاز پخش شونده نیز از طریق کانال عمودی وارد می‌شود [۴۲].



شکل ۴-۱: دستگاه میکروسیالی T-شکل ساده [20, 42].

ابعاد این میکروکانال‌ها دارای قطر معادلی در حدود ۱ تا ۸۰ میکرومتر بوده و قطرات تولیدی در اندازه‌ای بین ۴ تا ۱۹۰ میکرومتر و با ضریب تغییرات (CV) کمتر از ۵ درصد است [۴۳]. در شکل ۵-۱ برخی تغییرات و تبدیل‌های مختلف اعمالی روی شکل استاندارد میکروکانال T-شکل نشان داده شده است. در شکل ۵-۱-الف فاز گسسته از کانال اصلی افقی به فاز پیوسته وارد شده از کانال عمودی تزریق می‌شود. در شکل ۵-۱-ب فازهای گسسته و پیوسته از دو انتهای کانال اصلی افقی تزریق شده و خروجی آن‌ها از کانال عمودی است [۴۲].



شکل ۵-۱: دستگاه میکروسیالی T-شکل با دو تغییر ساده متداول [۴۲].

سه رژیم متمایز در شکل‌گیری قطره در دستگاه‌های T-شکل شامل رژیم‌های جتی، چکه کردن، فشرده‌گی است. در رژیم فشرده‌گی به دلیل اینکه تنش‌های برشی اعمال شده توسط فاز پیوسته نسبت به

کشش سطحی کوچک هستند، نوک جریان فاز گسسته تقریباً تمام سطح مقطع کانال اصلی را اشغال می‌کند. در نتیجه فاز پیوسته به صورت یک فیلم باریک شده و در فضای بین دیواره‌ی کانال و قطره محدود می‌شود و منجر به افزایش فشار فاز پیوسته در بالادست قطره می‌شود. این اتفاق باعث می‌شود که فاز پیوسته باریکه‌ی حاصل از فاز گسسته را فشرده کرده تا جدایش ایجاد شود. در رژیم فشرده‌گی اندازه قطره تابعی از نسبت نرخ جریان دو فاز بوده و وابستگی فراوانی به کشش سطحی یا لزجت دو سیال ندارد. در رژیم چکه کردن اندازه قطره توسط تعادل بین نیروی پسا که از فاز پیوسته بر قطره بیرون آمده اعمال می‌شود و نیروی کشش سطحی که در برابر کشیدگی باریکه فاز گسسته مقاومت می‌کند تعیین می‌شود. از عدد موینگی^۱ فاز پیوسته $(Ca_c = \frac{\eta_c u_c}{\gamma})$ که η_c و u_c به ترتیب لزجت و سرعت ورودی فاز پیوسته و γ کشش سطحی بین دو فاز هستند) می‌توان برای پیش‌بینی سازوکار حاکم بر تشکیل قطره استفاده کرد؛ اگر $Ca_c < 0.002$ در رژیم فشرده‌گی و اگر $0.3 < Ca_c < 0.01$ در رژیم چکه کردن قرار می‌گیرد. با افزایش بیشتر Ca_c ، نقطه جدایش به تدریج به پایین‌دست حرکت کرده و این امر منجر به یک گذار از رژیم چکه‌ای پایدار به رژیم جتی می‌شود [۴۲].

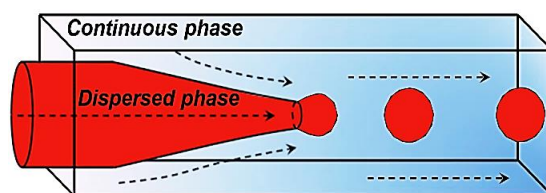
۱-۳-۲- دستگاه‌های هم‌جریان

طراحی و تحقیق بر روی دستگاه‌های هم‌جریان^۲ در جهت افزایش نرخ شکل‌گیری قطره و نیز ایجاد ترکیب‌های پیچیده است. شکل ۱-۶ یک شکل ساده از هندسه هم‌جریان را نشان می‌دهد. فاز پخش شونده از درون موینگی میانی جریان می‌یابد، در حالی که فاز پیوسته از طریق موینگی مربعی بیرونی و هم‌جهت با فاز پخش شونده جریان می‌یابد [۴۲]. در نرخ‌های پایین دو سیال، قطرات کروی از نوک لوله درونی شروع به رشد کرده و تا زمانی که به اندازه‌ای برسند که نیروی پسای لزج اعمال شده توسط فاز پیوسته بیشتر از کشش سطحی شود، این روند ادامه می‌یابد (رژیم چکه کردن). در جریان‌های بالای فاز پیوسته، فاز گسسته باریک‌تر

^۱ capillary

^۲ Co-flow devices

شده و به دلیل ناپایداری رایلی-پلاتیو، در پایین دست جریان به قطرات بیشتر گسسته می شود (رژیم جتی).



شکل ۱-۶: دستگاه میکروسیالی هم جریان [۴۲].

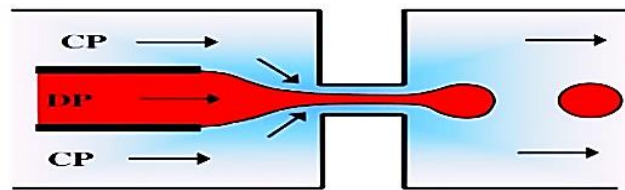
دودسته از گذار از رژیم چکه کردن به رژیم جتی شناسایی شده است. دسته اول با نرخ جریان فاز پیوسته ایجاد می شود؛ با افزایش آن اندازه قطرات در حال شکل گیری در نوک لوله کاهش یافته و یک جت باریک طولانی شکل می گیرد و قطره از انتهای این جت جدا می شود. دسته دوم از گذار بین چکه کردن و جتی با نرخ جریان فاز گسسته ایجاد می شود؛ با افزایش آن قطره در حال ظهور به پایین دست جریان فشرده شده و در نهایت در انتهای جت شکل گرفته قطرات بزرگ جدا می شوند. در رژیم جتی اول تنش برشی اعمال شده از فاز پیوسته به قطره در مقایسه با کشش سطحی بزرگ تر است. در رژیم جتی دوم نیروهای اینرسی فاز گسسته در برابر کشش سطحی بزرگ تر است. در نسبت های خیلی بالا از نرخ جریان، تنش لزج اعمال شده توسط فاز پیوسته آن قدر بزرگ می شود که قطره ی در حال شکل گیری به خود شکل مخروطی گرفته^۱ و یک جت خیلی نازک از نوک تیز آن خارج و به قطرات ریز شکسته شود.

۱-۳-۳- دستگاه های میکروسیالی جریان متمرکز شده

دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده^۲ صفحه ای توسط آن و همکاران توسعه داده شده اند [۴۴]. در شکل ۱-۷ فاز گسسته از طریق کانال میانی و فاز پیوسته نیز از طریق دو کانال کناری تغذیه می شوند و هر دو فاز مجبور هستند از یک اریفیس کوچک که در پایین دست این سه کانال واقع شده عبور کنند.

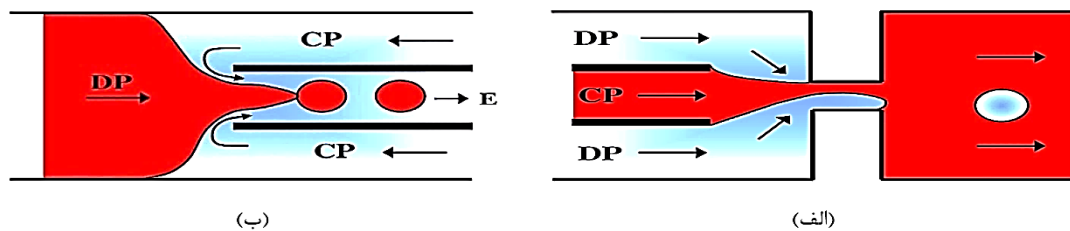
^۱ Taylor cone

^۲ Flow focused devices



شکل ۷-۱: دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده [۴۲].

از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته که در ناحیه اریفیس به صورت یک رشته باریک تغییر شکل یافته است فشار و تنش برشی وارد می شود که در نهایت منجر به شکسته شدن فاز گسسته و جدایش قطره در پایین دست اریفیس می شود. در شکل ۷-۱ مایع کانال میانی دیواره‌های اریفیس را تر نمی کند ولی اگر مایع کانال میانی دیواره‌های اریفیس را تر کند آنگاه مانند شکل ۸-۱-الف قطراتی از سیال کانال‌های بیرونی در پایین دست اریفیس شکل می گیرند [۴۲].



شکل ۸-۱: دستگاه‌های میکروسیالی با (الف) تر شدن دیواره‌های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز شده با جریان‌های مخالف [۴۲].

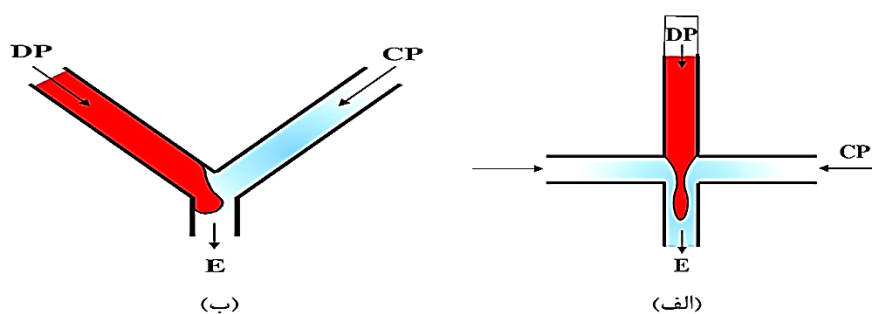
الگوی جریان دیگر در دستگاه‌های جریان متمرکز شده شامل یک جریان در جهت مخالف است که در شکل ۸-۱-ب نشان داده شده است و برخلاف طرح دستگاه هم جریان، در آن دو سیال از دو انتهای کانال یکسان و در جهت مخالف هم تغذیه شده و قطرات تو سطر کانال هم محور دیگر جمع آوری می شوند [۴۲]. از مزیت‌های عمده دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده می توان به توانایی تولید قطراتی با اندازه کوچک‌تر از ابعاد اریفیس در آن‌ها اشاره کرد. این ویژگی بسیار مفید است زیرا برای هر اندازه قطره داده شده، می توان از یک کانال با اندازه اریفیس بزرگ‌تر استفاده کرد ولی در قیاس با این دستگاه‌ها، در دستگاه هم جریان احتمال مسدود شدن اریفیس با ذرات معلق و یا هرگونه باقی مانده به دام افتاده به حداقل می رسد. سه رژیم عمده تولید قطره در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده شامل رژیم‌های فشرده‌گی، چکه‌ای و رژیم جتی هستند [۴۴]. در رژیم فشرده‌گی اندازه قطرات تقریباً برابر یا بزرگ‌تر از اندازه اریفیس بوده و در آن فاز گسسته

بخش قابل توجهی از سطح مقطع اریفیس را اشغال می کند و فاز پیوسته مجبور می شود از شکاف باریک بین دیوار اریفیس و سطح مشترک بین دو فاز جریان یابد. این رژیم در اعداد موینگی پایین ($Ca_c < 0.01$) که در آن نیروی لزج ناشی از فاز پیوسته کوچک است ایجاد می شود [۳۸, ۴۵]. در رژیم چکه کردن، جت فاز گسسته به دلیل تنش های لزج ناشی از فاز پیوسته باریک شده و منجر به این می شود که اندازه های قطرات کمی کوچک تر از اندازه اریفیس شوند. این رژیم در عدد موینگی بالا ($Ca_c > 0.1$) و به خصوص هنگامی که فاز گسسته لزجت بالایی داشته و یا نسبت های جریان بالا باشد، ایجاد می شود [۳۸]. در رژیم جتی، فاز گسسته به شکل یک جت طولانی تا پایین دست اریفیس ادامه یافته و قطرات از انتهای این جت بلند جدا می شوند؛ در نتیجه کنترل بر جدایش قطره کمتر می شود. اندازه قطرات می تواند بزرگ تر از رژیم چکه کردن بوده و بزرگ تر از اندازه اریفیس باشد. میکروکانال های جریان متمرکز به طور معمول دارای کانال های مستطیلی متقارن و دارای ابعادی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند [۴۳].

۱-۳-۴- میکروکانال های اتصال صلیبی و Y-شکل

اتصالات صلیبی^۱ به صورت شکل ۱-۹-الف بوده و در آن ها فاز پیوسته از دو طرف فاز گسسته جریان می یابد. شرایط جریان در اتصالات صلیبی را می توان با عدد وبر فاز گسسته ($we_d = \frac{\rho_d u_d^2 L}{\gamma}$) که در آن u_d و ρ_d به ترتیب چگالی و سرعت فاز گسسته، L قطر کانال و γ کشش سطحی هستند) و عدد موینگی فاز پیوسته توصیف کرد. برای $We_d > 1$ و $Ca_c > 1$ ، فاز گسسته به صورت قطره جدا نمی شود، در حالی که برای We_d و $Ca_c < 1$ ، جدایش فاز گسسته به صورت قطره اتفاق می افتد [۴۲].

^۱ cross junction



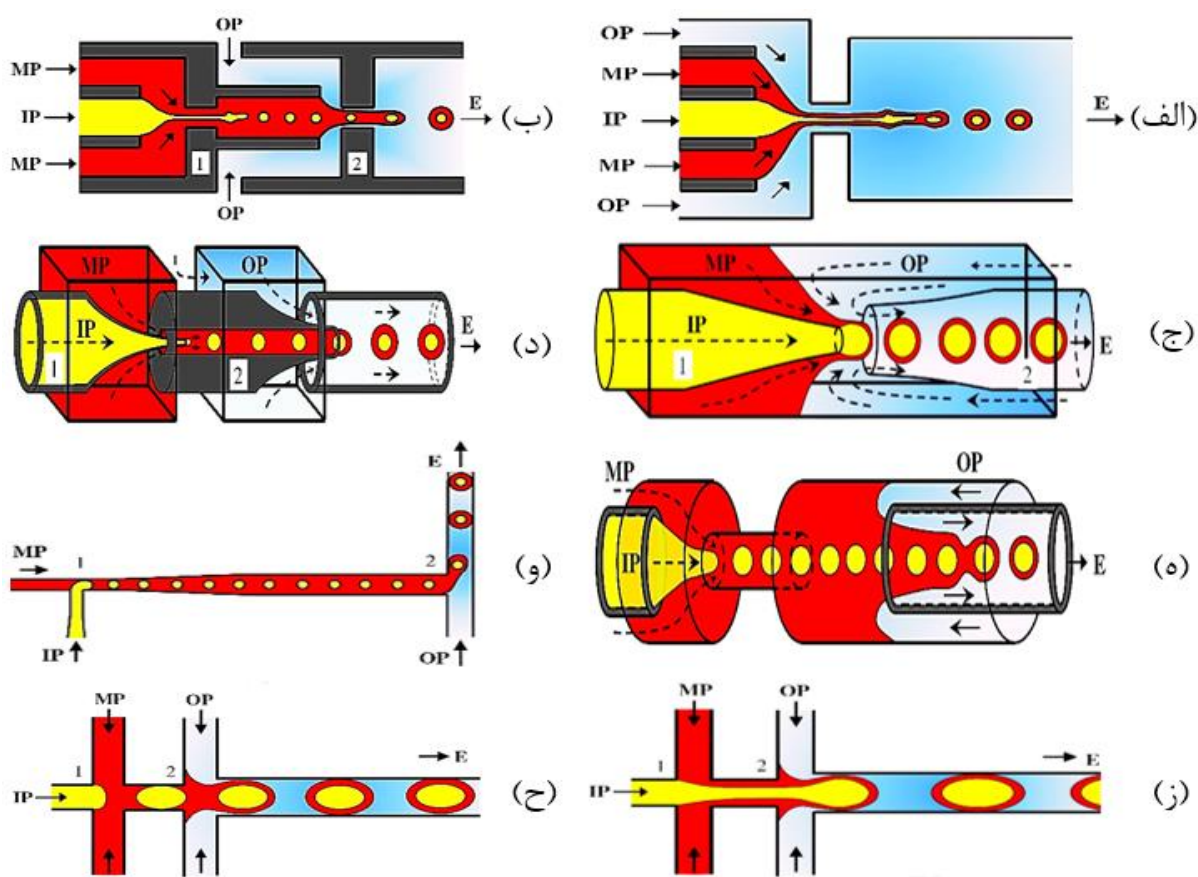
شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال‌های (الف) اتصال صلیبی (ب) Y-شکل [۴۲].

اندازه قطرات تشکیل شده در اتصال Y-شکل مستقل از نرخ جریان و لزجت فاز گسسته بوده که این رفتار با اتصالات T-شکل متفاوت است. در اعداد رینولدز پایین، دو سیال از دو ورودی متفاوت در اتصالات Y-شکل به صورت جریان‌های لایه‌ای (آرام) در پایین دست کانال جریان می‌یابند.

۴-۱- تولید قطرات چند جزئی

توانایی ایجاد قطرات چند جزئی با ساختار درونی تطبیق‌پذیر یکی از مزایای بزرگ فناوری میکروسیالی است. روش‌های میکروسیالی معمول برای تولید قطراتی به صورت روکش‌دار^۱ در شکل ۱۰-۱ نشان داده شده است. این روش‌ها بر پایه یک جدایش تک‌مرحله‌ای از رشته مایع هم‌محور مرکب از دو سیال انحلال‌ناپذیر و یا دو جدایش متوالی قطره در سازنده‌ی قطره هستند. در شکل ۱۰-۱-الف یک جت مرکب از دو سیال انحلال‌ناپذیر گسسته شده و قطرات روکش‌دار در فاز بیرونی شکل می‌گیرند [۴۲].

^۱ core/shell

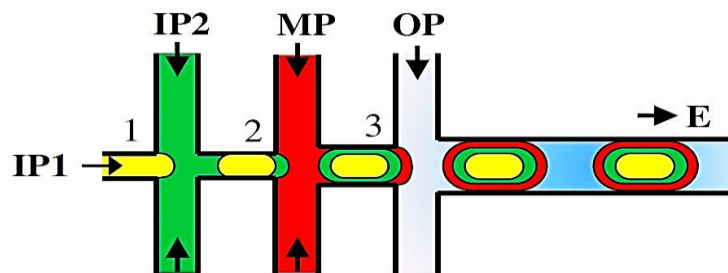


شکل ۱۰-۱: استراتژی‌های میکروسیالی معمول برای تولید قطراتی به صورت روکش دار [۴۲].

در شکل ۱۰-۱-ب قطرات روکش دار با استفاده از دو مولد جریان متمرکز شده متوالی شکل گرفته‌اند. در دستگاه‌های متقارن محوری قطرات روکش دار می‌توانند با ترکیب امولسیون سازی هم‌جریان و جریان سیال در جهت مخالف^۱ و یا استفاده از امولسیون سازی دومرحله‌ای هم‌جریان تولید شوند (شکل ۱۰-۱-ج، د، ه). در دستگاه‌های مویبندی شیشه‌ای متقارن محوری، ضخامت روکش می‌تواند از چند میکرون تا چند ده میکرون باشد و همچنین می‌تواند با تنظیم نسبت نرخ جریان فاز میانی به نرخ جریان فاز داخلی کنترل شود. از هندسه‌های هم‌جریان به صورت شکل ۱۰-۱-د و یا T-شکل متناوب نشان داده شده در شکل ۱۰-۱-و برای تولید امولسیون‌های چند جزئی حاوی تعدادی از قطرات فاز درونی در هر قطره فاز میانی استفاده می‌شود. امولسیون‌های مرتبه بالاتر شامل چهار و یا چندین فاز مایع غیرقابل اختلاط را می‌توان توسط اضافه

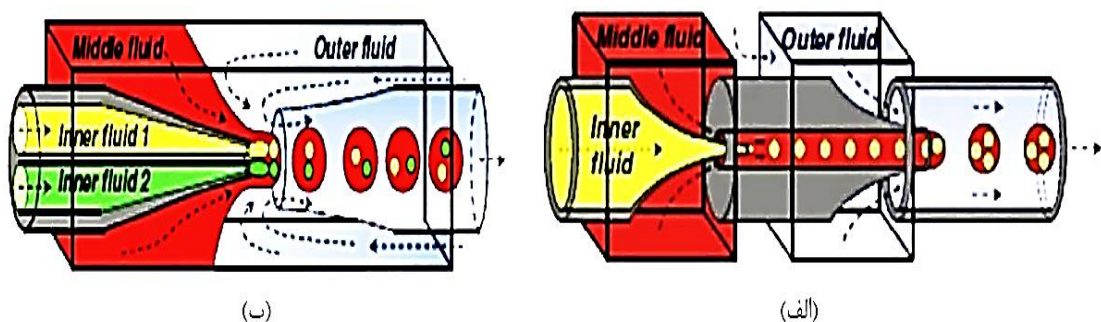
^۱ counter-current flow

کردن چند مرحله متوالی ایجاد کرد. قطرات روکش دار را همچنین می توان با استفاده از اتصال صلیبی شکل صفحه ای پشت سر هم با تر شونده گی متناوب آب دوست و آب گریز و یا اتصال صلیبی شکل غیر صفحه ای با خواص آب گریز مانند شکل ۱-۱۰-۱-ز و شکل ۱-۱۰-۱-ح تولید کرد. تعمیم این قاعده به سه اتصال صلیبی و یا بیشتر که مانند شکل ۱-۱۱ به صورت سری باشند می تواند منجر به تولید امولسیون های مرتبه بالاتر از قبیل امولسیون های سه گانه، چهارگانه و یا پنج گانه شود [۴۲].



شکل ۱-۱۱: شماتیک تولید قطرات روکش دار توسط سری کردن سه میکروکانال اتصال صلیبی [۴۲].

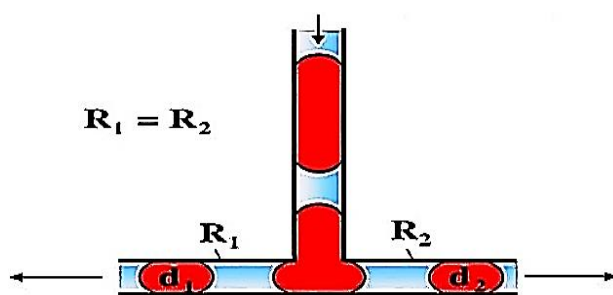
قطرات روکش دار را همچنین می توان با افزایش نرخ های جریان در اتصال اول شکل داد. در شکل ۱-۱۰-۱-ز یک جت از فاز درونی که تا اتصال دوم گسترش یافته و در آنجا توسط لایه ای از فاز میانی احاطه شده و یک جت هم محور ایجاد می شود. اگر نرخ های جریان در اتصال دوم به گونه ای مناسب تنظیم شوند جت هم محور ایجاد شده به صورت قطرات روکش دار جدا می شود. در شکل ۱-۱۲ دستگاه های پیچیده تر میکروسیالی برای تولید قطرات مایع یکنواخت و پیچیده نشان داده شده است. هنگامی که دو موینگی مجزا از هم با دو منبع مجزا از فازهای گسسته متفاوت به صورت یک بخش از هم جریان درون یک بخش جریان متمرکز باشند، امولسیون های چند جزئی تولید شده دارای قطرات داخلی از دو جزء مختلف خواهند بود [۴۲].



شکل ۱-۱۲: شماتیک دستگاه های میکروسیالی معمول جهت تولید قطرات چند جزئی [۲۰، ۴۲].

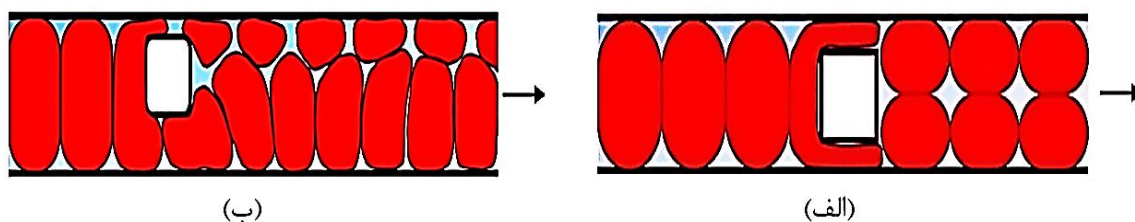
۵-۱- قطعه قطعه کردن قطره

برای تقسیم کردن یک قطره^۱ به دو یا چند قطره فرزند^۲، یک قطره در یک اتصال T-شکل و یا Y-شکل دوشاخه شده جریان می‌یابد و یا از موانعی با اشکال مختلف عبور داده می‌شود. در یک دوشاخه قطره به صورت متقارن و یا نامتقارن بسته به پایداری پایین دست جریان قطعه‌قطعه می‌شود. در شکل ۱۳-۱ نسبت حجم های دو قطره فرزند (V_1/V_2) با معکوس نسبت مقاومت های هیدرودینامیکی دو مجرای جانبی (R_1/R_2) متناسب است. در صورتی که مقاومت های هیدرودینامیکی دو مجرای جانبی برابر باشند و نرخ جریان به اندازه کافی بالا باشد، قطره به دو قسمت مساوی تقسیم خواهد شد [۴۲].



شکل ۱۳-۱: تقسیم کردن یک قطره به کمک هندسه T-شکل [۴۲].

قطرات همچنین می‌توانند با عبور از موانع به دو قسمت تقسیم شوند. در شکل ۱۴-۱ الف هنگامی که جریان حاوی قطره که در آن قطره ابعادی نزدیک به کانال داشته باشد و از یک مانع مربعی که به صورت متقارن در وسط کانال قرار گرفته است عبور می‌کند، هر قطره به دو قطره فرزند یکسان شکسته می‌شود.



شکل ۱۴-۱: قرار دادن مانع در مسیر جریان برای تقسیم کردن قطره [۴۲].

با توجه به شکل ۱۴-۱ ب اگر مانع خارج از محور تقارن باشد، قطرات فرزند با دو اندازه متفاوت شکل

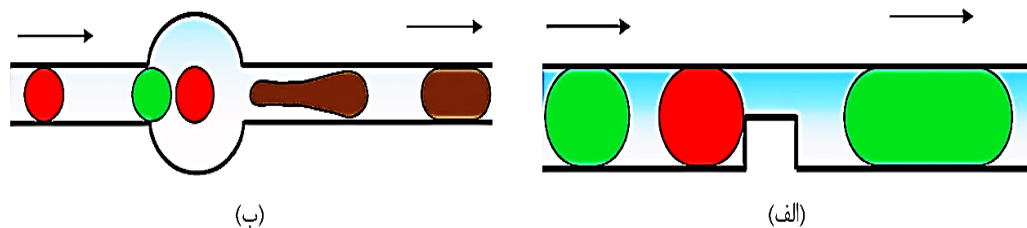
^۱ Droplet splitting

^۲ Daughter droplets

خواهند گرفت. نسبت ابعاد قطرات تولید شده تو سط مانع مطابق با نسبت پهناى مجراها در هر سمت مانع است.

۱-۶- ادغام قطرات

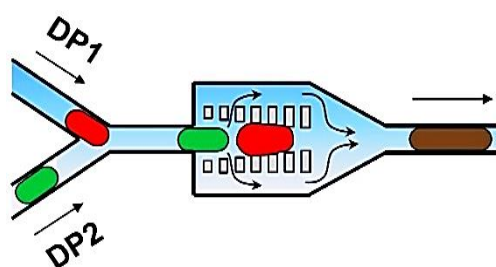
استراتژی‌های میکروسیالی برای ادغام قطره را می‌توان به روش‌های فعال و غیرفعال تقسیم کرد. در روش‌های غیرفعال ناشی از جریان^۱ از هندسه میکروکانال برای تماس برقرار کردن دو قطره در یک میکروکانال استفاده می‌شود. ادغام دو قطره مجاور را می‌توان با به دام انداختن موقت مانند شکل ۱-۱۵-الف یا کم کردن سرعت یک قطره در کانال مانند شکل ۱-۱۵-ب تا زمانی که قطره بعدی برسد و با قطره به دام افتاده ادغام شود انجام داد.



شکل ۱-۱۵: روش‌های غیرفعال ادغام قطرات [۴۲].

در شکل ۱-۱۵-ب قطرات پس از ورود به محفظه انبساط، فاز پیوسته برای تصرف کردن حجم افزایش یافته در اطراف قطرات پخش شده و موجب می‌شود که قطرات با یکدیگر در مرکز محفظه متصل شوند. ادغام قطره ناشی از جریان را با استفاده از یک اتصال سه شاخه‌ای نیز می‌توان ایجاد کرد. همان‌طور که در شکل ۱-۱۶ نشان داده شده، محفظه ادغام توسط دو ردیف از موانع به سه شاخه تقسیم شده است. یک قطره وقتی به کانال ادغام وارد می‌شود در وسط انشعاب میانی متوقف شده و با قطره‌ای که پس از آن ایجاد شده ادغام می‌شود و فاز پیوسته پشت قطرات نیز می‌تواند از فضای بین موانع جریان بیابد.

^۱ Flow-induced



شکل ۱-۱۶: طرح سه شاخه‌ای ادغام غیرفعال قطرات [۴۲].

۷-۱- مروری بر تحقیقات پیشین

۱-۷-۱- تحقیقات آزمایشگاهی

تور سن^۱ و همکاران [۴۶] برای نخستین بار تشکیل قطرات آب در روغن را داخل میکروکانال‌ها مشاهده و نشان دادند که تشکیل قطره به نیروهای تنش برشی و کشش سطحی بین دو سیال بستگی داشته و طول قطره با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته کاهش می‌یابد. علاوه بر این آنا^۲ و همکاران [۱۲] به بررسی جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی در دستگاه‌های جریان متمرکز شده پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که این هندسه قادر است امولسیون‌های تک‌پخش و یا چندپخش را تولید کند. آن‌ها محدوده‌ای از رفتار تشکیل قطره در یک دستگاه میکروسیالی با کانال‌های مستطیلی مقاطع را ارائه و روی تأثیر نسبت جریان فاز مایع بر الگوی تشکیل قطره مطالعاتی را انجام دادند. در آزمایش آن‌ها از آب به عنوان فاز گسسته و از نفت به عنوان فاز پیوسته استفاده شده است. همچنین کوباد^۳ و همکاران [۴۷] به بررسی تشکیل حباب در یک هندسه متقاطع پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که فروپاشی و جدایش حباب حاصل موازنه بین فشار فازهای گاز و مایع بوده و اندازه حباب توسط نسبت نرخ جریان‌های دو فاز قابل پیش‌بینی است.

آنا و همکاران [۴۸] سازوکار تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروسیالی را که در آن جریان‌ها می‌توانند جریان‌های برشی یا جریان‌های کششی باشند مقایسه کردند. هندسه‌های مورد مطالعه از نوع T- شکل و

^۱ Thorsen

^۲ Anna

^۳ Cubaud

جریان متمرکز شده بودند. آن‌ها اندازه قطره را با آزمایش‌های زیاد و با تغییر عدد مویینگی، کسر حجمی و نسبت لزجت مشخص کردند و سه حالت متمایز جدایش وابسته به این سه پارامتر بی‌بعد و نوع جریان را مشاهده کردند. گارتکی^۱ و همکاران [۳۷] به بررسی تولید حباب و قطرات در دستگاه‌های میکروسیالی پرداختند و برای تخمین تقریبی اندازه قطرات در دستگاه جریان متمرکز شده، رابطه (۱-۱) را ارائه کردند:

$$\frac{d}{D_{orif}} = \omega \left(\frac{Q_d}{Q_c} \right)^\varepsilon \quad (1-1)$$

که در آن D_{orif} قطر اریفیس، ω و ε تابع هندسه دستگاه هستند.

گارتکی و همکاران [۳۶] به بررسی تشکیل قطره در یک میکروکانال T- شکل پرداخته و به این نتیجه رسیدند که تشکیل قطره از دو سیال مخلوط نشدنی در اعداد مویینگی پایین به خاطر اختلاف فشار در راستای باریک شدگی قطره است و به عبارتی در اعداد مویینگی بالا نیروی لزجت نیروی حاکم است و قطره‌ها توسط پایداری مویینگی تشکیل می‌شوند. همچنین یو^۲ و همکاران [۴۹] به صورت تجربی و عددی شکل‌گیری حباب در یک میکروکانال متقاطع را در اعداد مویینگی کم و با استفاده از روش بولتزمن و مدل شان و چن بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که تشکیل حباب به خاطر اختلاف فشار دو سیال مخلوط نشدنی است. مالوگی^۳ و همکاران [۵۰] به بررسی فرآیند جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداختند. آن‌ها تولید میکروقطرات آبی در یک دستگاه جریان متمرکز شده حاوی سیالات آب و روغن را با ترکیب الکترودهایی با پوشش عایق که اجازه کنترل پیوسته ترشوندگی آب را می‌دهد مورد بررسی قرار دادند. بر حسب فشار ورودی آب و روغن و پس از اعمال ولتاژ مشخص شد که سه نوع شرایط عملیاتی شامل سطح مشترک پایدار آب و روغن، تولید قطره و تشکیل جت آرام ایجاد می‌شود. آن‌ها بیان کردند که کنترل کامل بر تولید

^۱ Garstecki

^۲ Yu

^۳ Malloggi

قطره در یک محدوده تعریف شده مناسب از فشار ورودی، تر شوندهگی الکتریکی و فشار هیدرو استاتیکی در محل اتصال به دست می‌آید.

تان^۱ و همکاران [۵۱] تشکیل قطرات آب در روغن و روغن در آب را در هندسه میکروکانال متقاطع به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اندازه قطرات با افزایش لزجت سیال پیوسته، کاهش می‌یابد در حالی که با افزایش نرخ جریان سیال گسسته به آرامی افزایش می‌یابد. علاوه بر این نای^۲ و همکاران [۵۲] به تشکیل قطره در هندسه‌های جریان متمرکز شده پرداخته و نتایج مربوط به فرآیند امولسیون سازی در دستگاه‌های میکروسیالی مایع-مایع را در لزجت‌ها و نسبت دبی‌های مختلف ارائه کردند.

ژو^۳ و همکاران [۱۳] به بررسی گذار بین رژیم چکه‌ای و رژیم فشردگی در دستگاه‌های میکروسیالی T- شکل پرداختند. آن‌ها برای قطر قطره در میکروکانال‌های T- شکل و در رژیم چکه‌ای رابطه (۲-۱) را ارائه دادند:

$$\frac{d}{d_i} = \frac{1}{Ca_c} \frac{4wh - \pi d^2}{4wh} \quad (2-1)$$

که در آن Ca_c موینگی فاز پیوسته، d_i ابعاد سطح مقطع میکروکانال، w عرض و h ارتفاع میکروکانال است. آن‌ها همچنین برای محاسبه طول باریکه فاز گسسته در لحظه جدایش در رژیم فشردگی رابطه (۳-۱) را پیشنهاد کردند:

$$\frac{L}{w} = \varepsilon + \frac{\alpha Q_d}{Q_c} \quad (3-1)$$

که ε و α تابع هندسه دستگاه هستند.

^۱ Tan

^۲ Nie

^۳ Xu

لی^۱ و همکاران [۴۱] به بررسی فرآیند جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداختند. آن‌ها آزمایش‌هایی بر د ستگاه جریان متمرکز شده انجام داده و به‌طور سیستماتیک پارامترهای هندسی را تغییر دادند و یک رابطه توانی بین اندازه قطرات و عدد مویینگی پیدا کردند. آن‌ها بر شناخت مقیاس‌های صحیح برای حالت‌های فشردگی و چکه‌ای در فرآیند جدایش قطره متمرکز شدند و با در نظر گرفتن چند نوع مختلف از هندسه‌های جریان متمرکز شده، نشان دادند که جدایش قطره صرفاً به هندسه بالادست و میدان جریان بستگی داشته و به هندسه کانال پایین‌دست اریفیس بستگی ندارد. لیو^۲ و همکاران [30] به بررسی عددی و آزمایشگاهی تشکیل الگوهای جریان دوفازی و تشکیل حباب در میکروکانال اتصال متقاطع پرداختند. آن‌ها برای حل عددی از روش شبکه بولتزمن استفاده کردند. همچنین سیواسامی^۳ و همکاران [۵۳] به‌صورت تجربی و نیز عددی و با کمک روش حجم سیال نمودارهای توزیع فشار فازهای گسسته و پیوسته را در دستگاه‌های میکروسیالی T-شکل ارائه و دریافته‌اند که نمودارهای فشار فاز پیوسته و فاز گسسته تا زمانی که فرآیند تشکیل قطره ادامه یابد، تغییر می‌کند.

راندال ارب^۴ و همکاران [۳۳] به بررسی رژیم چکه‌ای در دستگاه‌های میکروسیالی هم‌جریان و متقارن محوری پرداختند. آن‌ها برای قطر قطره تولیدشده (d) در رژیم چکه‌ای رابطه (۴-۱) را ارائه کردند:

$$\frac{d}{D_{inj}} = -\delta + \sqrt{\delta^2 + 2\delta + \beta^2} \quad (۴-۱)$$

$$\delta = \frac{60(Q_c + Q_d)\eta_c}{\pi D_{inj}^2 \gamma} \quad (۵-۱)$$

که D_{inj} قطر لوله تزریق، Q_c و Q_d نرخ جریان‌های فاز گسسته و فاز پیوسته، η_c لزجت دینامیکی فاز

^۱ Lee

^۲ Liu

^۳ Sivasamy

^۴ Randall M. Erb

پیوسته و γ کشش سطحی بین دو فاز است. β نیز نسبت قطر مجموعه به قطر لوله تزریق است. همچنین تائوتائو^۱ و همکاران [۵۴] دینامیک جدایش و تشکیل قطره در رژیم های چکه ای و جتی و گذار بین این رژیم ها را در دستگاه های جریان متمرکز شده مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن ها مایعات با لزجت بالاتر به عنوان فاز گسسته در سیالات با لزجت پایین تر تزریق شدند. در رژیم جتی، عرض جت پایدار با نسبت لزجت و نسبت نرخ جریان هر دو فاز تحت تأثیر قرار می گیرد و ارتباط بین اندازه قطره و نسبت نرخ جریان هر دو فاز می تواند با رابطه قانون-توانی با توان وابسته به نسبت لزجت هر دو فاز درجه بندی شود. آن ها نشان دادند بیشترین ناپایداری نا پایا به نسبت لزجت هر دو فاز وابسته بوده و تقریباً مستقل از نسبت نرخ جریان هر دو فاز است.

پنگ^۲ و همکاران [۵۵] تأثیر غلظت های مختلف سورفکتانت بر فرآیند جدایش قطره و تأثیر آن بر الگوی تشکیل میکرو قطرات و تغییر اندازه قطره را بررسی کردند. آن ها برای فاز گسسته از روغن سویا و برای فاز پیوسته از آب حاوی سورفکتانت Tween20 با غلظت های مختلف استفاده کردند. لو^۳ و همکاران [۵۶] به مطالعه غیرخطی سازوکار جدایش برای تشکیل حباب تیلور در یک دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده با سیالات نیوتنی پرداختند. آن ها به این نتیجه رسیدند که در حین فرآیند فروپاشی غیرخطی تغییرات حداقل شعاع باریکه حباب (r_0) با زمان باقی مانده تا جدایش (τ) می تواند با یک رابطه توانی به صورت $r_0 \propto \tau^\alpha$ بیان شود. اریاگا^۴ و همکاران [۵۷] تولید مداوم قطرات امولسیون دو تایی با ضخامت روکش بسیار نازک (در حدود ۵ در صد شعاع) را گزارش کردند. دستگاه آن ها از جنس PDMS بوده و به طور مداوم امولسیون های تک پخش با روکش های نازک مثلاً یک میکرومتر و به صورت مداوم تولید می کرد. یانگ رن^۵ و همکاران [۵۸]

^۱ Taotao

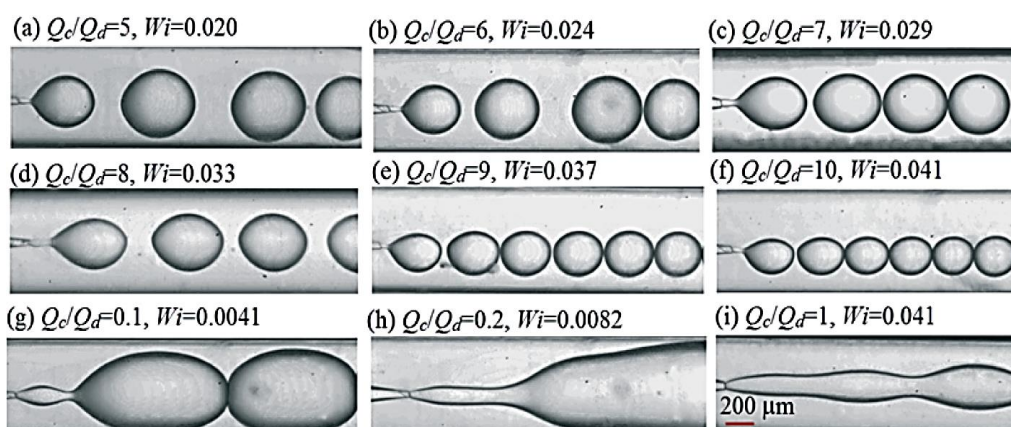
^۲ Peng

^۳ Lu

^۴ Arriaga

^۵ Yong ren

به صورت عددی و آزمایشگاهی به گذار بین رژیم‌های چکه‌ای و جتی و تأثیر اعداد وبر و موینگی بر دینامیک فروپاشی پرداختند. آن‌ها از روغن سیلیکون با خواص نیوتنی به‌عنوان فاز گسسته استفاده کرده و برای فاز پیوسته از محلول‌های؛ پلی‌اتیلن گلیکول^۱ به صورت نیوتنی، کربوکسی متیل سلولز^۲ که یک محلول غیرنیوتنی با رفتار نازک شونده برشی^۳ است و پلی‌اکریل آمید^۴ که یک محلول غیرنیوتنی با رفتار نازک شونده برشی و اثرات الاستیک است استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد در یک عدد وبر ثابت فاز گسسته، با افزایش عدد موینگی فاز پیوسته شاهد کاهش اندازه قطرات تولیدشده خواهیم بود که البته در یک عدد موینگی ثابت، فاز پیوسته غیرنیوتنی از نوع نازک شونده برشی در قیاس با فاز پیوسته نیوتنی قطرات بزرگ‌تری تولید می‌کند.



شکل ۱-۱۷: الگوهای جریان روغن سیلیکون در محلول ویسکو الاستیک PAA به ازای نسبت دبی و عدد وایزنبرگ مختلف.

آن‌ها مطابق شکل ۱-۱۷ به صورت آزمایشگاهی به بررسی رفتار سیالات ویسکو الاستیک به‌عنوان فاز

پیوسته و تأثیر آن بر فاز گسسته نیوتنی پرداخته و درجه تغییر شکل قطرات حاصل را برحسب عدد وایزنبرگ گزارش کردند.

^۱ polyethylene glycol

^۲ Carboxymethyl cellulose

^۳ Shear-thinning

^۴ poly acryl amide

۱-۷-۲- تحقیقات عددی

آنا و همکاران [۴۴] به بررسی دینامیک جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداخته و با کنترل غلظت سورفکتانت و کنترل عدد موینگی و نسبت نرخ جریان های داخلی و خارجی چندین حالت متمایز گسسته شدن قطرات را مشاهده کردند. آنها یک حالت جدایش جدید که رژیم شکل گیری رگه ای^۱ نامیده شد را مشاهده کردند. این رژیم شبیه به جریان قطرات ریز در نوک باریکه فاز گسسته بوده و در آن قطراتی کوچک در محدوده چند میکرومتر یا کوچک تر تولید می شوند. آنها رشد رشته و حداکثر طول آن را به عنوان تابعی از تغییرات جریان و سورفکتانت موجود در محلول مشخص کرده و همچنین دوره جدایش قطره به عنوان تابعی از این متغیرها را نیز مشخص کردند. هوآ^۲ و همکاران [۵۹] به روش عددی و با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل، سازوکار تشکیل قطره را در یک میکروکانال هم محور بررسی کردند. آنها اثرات نرخ جریان فاز پیوسته، لزجت و کشش سطحی را بر سایز قطره در دو رژیم قطره ای و جتی بررسی کردند.

سانگ^۳ و همکاران [۱۴] به صورت عددی و تحلیلی اثرات لزجت فاز پیوسته در جریان های چند فازی حاوی سیال های نیوتنی- نیوتنی، نیوتنی- قانون توانی و نیوتنی- بینگهام بر اندازه و فرکانس تشکیل قطره در میکروکانال T-شکل را بررسی کردند. علاوه بر این کیو^۴ و همکاران [۶۰] تشکیل قطرات روغن در یک فاز پیوسته غیرنیوتنی از نوع نازک شونده برشی را به صورت عددی و به کمک روش حجم سیال بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که رئولوژی سیال پیوسته در فرآیند شکل گیری قطره و اندازه آن تأثیر بسیاری دارد. آنها برای مدل لزجت فاز پیوسته غیرنیوتنی از رابطه قانون توانی استفاده کردند.

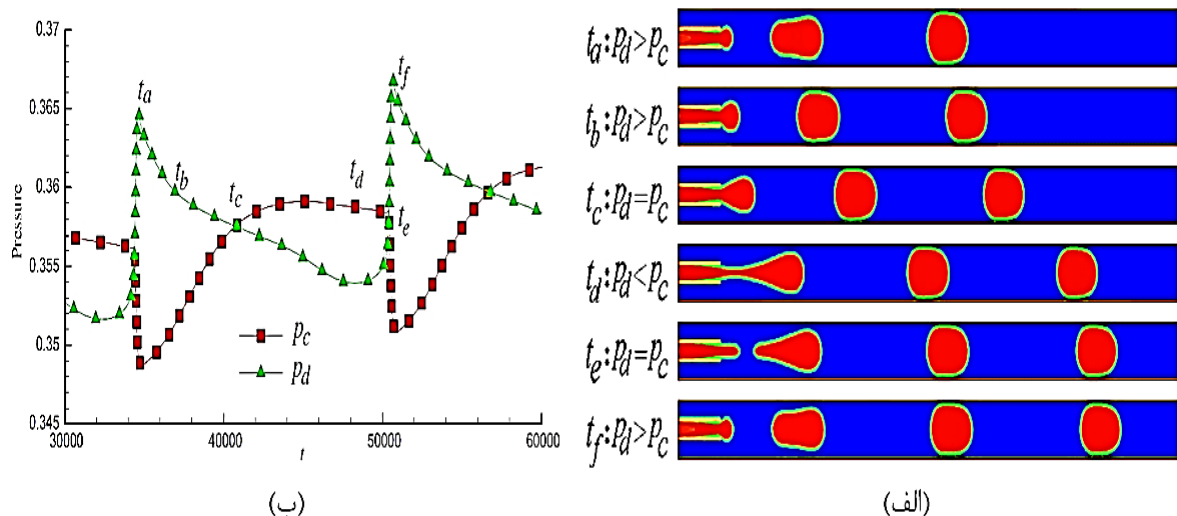
^۱ Thread formation

^۲ Hua

^۳ Sang

^۴ Qiu

برتیر^۱ و همکاران [۶۱] به بررسی دستگاه‌های میکروسایالی جریان متمرکز شده که در پایین دست اریفیس دارای یک نازل هستند پرداختند. آن‌ها رفتار محلول‌های آلژینات با لزجت بالا که توسط فشار تحریک می‌شوند را در دستگاه‌های جریان متمرکز شده بررسی کردند. همچنین چنگ^۲ و همکاران [۶۲] به صورت عددی و به کمک روش شبکه بولتزنم به بررسی تشکیل قطره در یک میکروکانال هم‌محور تحت میدان الکتریکی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که تجزیه و فروپاشی قطره به علت اختلاف فشاری است که بین دو فاز به وجود می‌آید. آن‌ها در شکل ۱-۱۸ تغییرات فشار فازهای گسسته و پیوسته را برحسب زمان ارائه دادند که در آن P_d و P_c به ترتیب فشار فازهای پیوسته و گسسته در مقطع میانی کانال بیرونی و کانال مرکزی است. فاز گسسته از t_a تا t_c شروع به رشد کرده تا اینکه در زمان t_d فرآیند جدایش قطره شکل گرفته و بعد از زمان t_d و t_e قطره جدا می‌شود.



شکل ۱-۱۸: تغییرات فشار فازهای گسسته و پیوسته در زمان‌های مختلف. (الف) فرآیند تکامل تغییر شکل قطره (ب) فرآیند تشکیل قطره بدون میدان الکتریکی و با $Ca=0.01307$ و نسبت فاز پیوسته به گسسته برابر با ۰٫۸

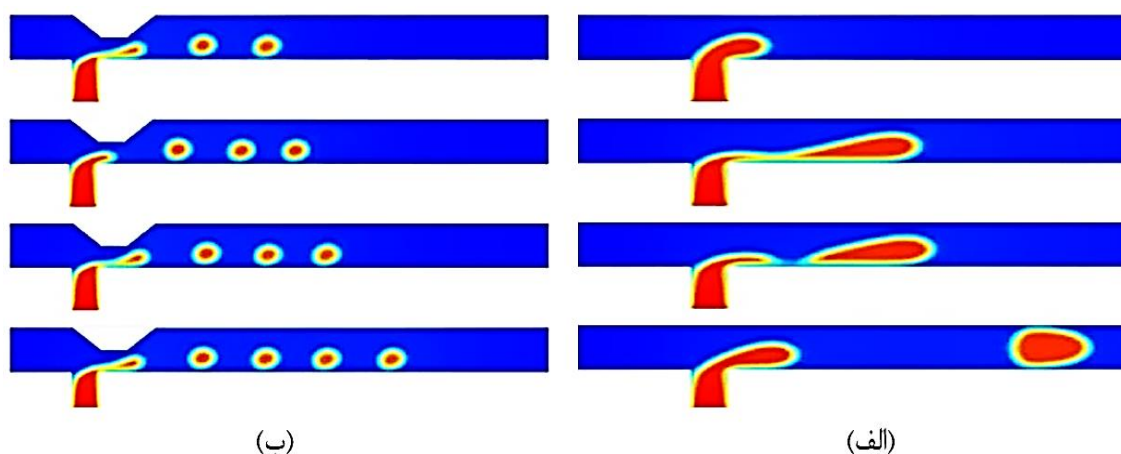
وانگ^۳ و همکاران [۶۳] با استفاده از روش شبکه بولتزنم تأثیر ایجاد تغییرات هندسی کوچک در

^۱ Berthier

^۲ Cheng

^۳ Wang

میکروکانال T-شکل را بررسی کرده و نشان داند در نسبت سرعت کم بین فازها و در شرایط برابر با توجه به شکل ۱-۱۹، در میکروکانال تغییر یافته، قطره‌های کوچک‌تری نسبت به هندسه T-شکل ساده تولید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی وانگ نشان داد جریان چند فاز در میکروکانال‌ها نسبت به تغییرات هندسی کوچک بسیار حساس هستند.



شکل ۱-۱۹: جدایش قطره در میکروکانال (الف) T-شکل (ب) T-شکل اصلاح شده. در $Ca_c = 0.0292$ ، $Q_c/Q_d = 4$ و $\eta_d/\eta_c = 1$ زاویه تماس 140° درجه.

لیو^۱ و همکاران [۶۴] تأثیر عدد موینگی، نسبت لزجت بین دو فاز و نسبت دبی جریان را روی تشکیل قطرات آب در روغن در هندسه‌های متقاطع توسط مدل چند فاز در روش بولتزن بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هندسه کانال نقش مهمی در فرآیند تشکیل قطره دارد همچنین رابطه طول قطره با نسبت نرخ جریان‌های دو فاز یک تابع خطی بوده و با عدد موینگی رابطه‌ای توانی دارد. همچنین، مویلی^۲ و همکاران [۶۵] به بررسی تشکیل قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداخته و یک مدل توانا برای پیش‌بینی مقادیر غلظت و نرخ جریان در حالتی که جریان قطرات ریز در نوک باریکه فاز گسسته ایجاد می‌شود را توسعه دادند. با توجه به اینکه در مشاهدات آزمایشگاهی در این حالت سطح مشترک شکل

^۱ Liu

^۲ Moyle

مخروطی شکل به خود می‌گیرد، فرض شده است که سطح مشترک یک شکل هندسی مخروطی شکل دارد. آن‌ها همچنین در تجزیه و تحلیل گذار به حالت جتی را نیز در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند برقراری تعادل بین سطحی جرم سورفکتانت برای حفظ سطح مشترک مخروطی شکل در این حالت کافی است. نتایج آن‌ها اجازه طراحی کارآمدتر هندسه و انتخاب سورفکتانت مناسب برای حداکثر کردن دامنه شرایطی که در آن جریان قطرات ریز در نوک باریکه فاز گسسته ایجاد می‌شود را می‌دهد.

تانگ^۱ و همکاران [۶۶] تشکیل قطره نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی را در میکروکانال‌های T-شکل و جریان متمرکز شده را با استفاده از روش شبکه بولتزمان مورد بررسی قرار دادند و پارامترهای مختلف شامل نسبت نرخ جریان، عدد موینگی، هندسه و خواص تر شونده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که اندازه و شکل قطرات علاوه بر خواص سیال مانند نسبت نرخ جریان و عدد موینگی به شرایط خارجی جریان مانند هندسه دستگاه و خواص تر شونده دیواره‌ها کانال وابسته است. با افزایش عدد موینگی، نقطه جدایش قطره از گوشه اتصال T-شکل و نیز از اریفیس به پایین دست آن‌ها حرکت می‌کند. آن‌ها گزارش کردند که میکروکانال T-شکل با کانال جانبی عریض قطراتی با طول بزرگ و میکروکانال جریان متمرکز شده با اریفیس عریض نیز به احتمال فراوان قطراتی با قطر بزرگ تولید می‌کنند. همچنین جانان^۲ و همکاران [۶۷] با استفاده از شبکه بولتزمان به بررسی رفتار دینامیکی قطره با نیروی ترموکپیلاری در میکروکانال‌ها پرداختند. کار آن‌ها نشان داد که شبکه بولتزمان یک ابزار شبیه‌سازی برای توسعه دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره است. هندسه مورد مطالعه نیز از نوع T-شکل بود.

چونگ^۳ و همکاران [68] یک روش کنترل اندازه حباب تولید شده در دستگاه جریان متمرکز شده را گزارش کردند. آن‌ها با یک مبدل مافوق صوت جریان آکوستیک را به سطح مشترک بین گاز و مایع القاء

^۱ Tang

^۲ Jonathan

^۳ Chong

کردند. آن‌ها بیان کردند جریان القایی به‌طور زیادی بر روند شکل‌گیری حباب‌های گاز اثر می‌گذارد. سطح مشترک نوسانی به‌صورت یک پمپ عمل کرده و نرخ جریان گاز را به میزان قابل توجهی افزایش داده و قطرات بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. آن‌ها نشان دادند که این روش توانایی بهبود تولید حباب‌های میکروسیالی برای تولید حباب‌های قابل تنظیم را دارد. وونگ^۱ و همکاران [۶۹] به‌صورت عددی اثر پارامترهای رئولوژیکی بر تشکیل قطرات غیرنیوتنی و رفتار نازک شونده بر شی را بررسی کردند. آن‌ها یک میکروکانال T- شکل را با روش ردیابی فصل مشترک لولست موردبررسی قرار داده و از مدل لزجت کاریو-یا سودا برای تعیین لزجت سیال غیرنیوتنی استفاده کردند. آن‌ها به‌صورت مجزا اثر پارامترهای مختلفی مانند نسبت لزجت صفر به لزجت بی‌نهایت (η_0/η_∞) و زمان آسایش (λ) را بر فرآیند تشکیل قطره نشان دادند. علاوه بر این لی^۲ و همکاران [۳۸] به بررسی کنترل جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی با استفاده از یک میدان الکتریکی خارجی در دستگاه‌های میکروسیالی پرداختند. در تحقیق آن‌ها از محلول آبی نیوتنی با سورفکتانت SDS و روغن سیلیکون نیوتنی استفاده شد. آن‌ها اثر میدان الکتریکی استاتیکی خارجی در فرآیند جدایش را با استفاده از روش لولست پایستار که با مدل الکترواستاتیکی همراه شد، موردبررسی قرار دادند. شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که اثر متقابل میدان الکتریکی و بار الکتریکی بر سطح مشترک سیال باعث القای نیروی الکتریکی می‌شود و این نیرو نقش مهمی در کنترل شکل‌گیری قطره دارد. اگر سیستم میکروسیالی با یک میدان الکتریکی با قدرت‌های مختلف به کار گرفته شود، فرآیند جدایش قطره سه رژیم متمایز را تجربه می‌کند. در رژیم اول که در آن ولتاژ الکتریکی پایین اعمال می‌شود، اندازه قطرات تقریباً به‌صورت خطی با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. در رژیم دوم که در آن میدان الکتریکی دارای قدرت متوسط است اندازه قطرات با ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد. در رژیم سوم که در آن ولتاژ اعمالی بسیار زیاد است، اندازه قطرات دوباره با ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند زمانی که لزجت فاز گسسته خیلی بیشتر از فاز پیوسته باشد در

^۱ Wong^۲ Li

این صورت میکروسیالی‌های مبتنی بر قطره فعال؛ که دستگاه‌های میکروسیالی معمول را با محرکه‌های خارجی مانند میدان‌های خارجی DC ترکیب می‌کند توانایی زیادی در کنترل جدایش قطره دارند.

لن^۱ و همکاران [70] به بررسی میکروکانال هم‌محور حاوی جریان دوفازی مایع-مایع به کمک روش لولست پرداخته و دو الگوی جریان چکه‌ای و جتی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها گذار الگوی جریان و تغییرات اندازه قطره به وسیله تغییر سرعت و لزجت دو فاز را بررسی کرده و توزیع فشار و میدان سرعت برای هر دو رژیم جتی و چکه‌ای و نیز تغییرات فشار فاز گسسته در طول شکل‌گیری یک قطره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها تفاوت ذاتی بین رژیم چکه‌ای و رژیم جتی را نشان داد. سیالات مورد استفاده شامل روغن سیلیکون نیوتنی و محلول آبی نیوتنی پلی سولفون (PSF) بودند.

اشرف^۲ و همکاران [۷۱] به ارائه روش دقیق محاسباتی برای ردیابی سطح مشترک بین دو فاز با روش لولست پرداختند. حل معادله با مشتقات جزئی وابسته به زمان معادلات لولست با جایگزینی مشتقات جزئی فضایی با تفاضل مرکزی و با طرح رانگ-کوتا مرتبه دو برای پیشروی زمانی انجام شد. در تحقیق آن‌ها یک الگوریتم با دقت بالا برای حل معادله لولست ارائه شد که این الگوریتم اساساً مبتنی بر تقریب زدن ترم جابجایی با تفاضل مرکزی و استفاده از طرح رانگ-کوتا برای ادوگشن زمان بود.

هرناندز^۳ و همکاران [۷۲] یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده با سیالات نیوتنی و با کانال خروجی هم‌اندازه با اریفیس به منظور تولید قطرات تک‌پخش و در ابعاد میکرو و با قابلیت کنترل بهتر انجام دادند. سه پارامتر هندسی تأثیرگذار که شامل فاصله بین انتهای کانال ورودی فاز گسسته تا ابتدای اریفیس، طول و عرض کانال خروجی هستند، شناسایی شدند. سیالات مورد استفاده شامل روغن سیلیکون نیوتنی در محلول آبی SDS نیوتنی است. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی

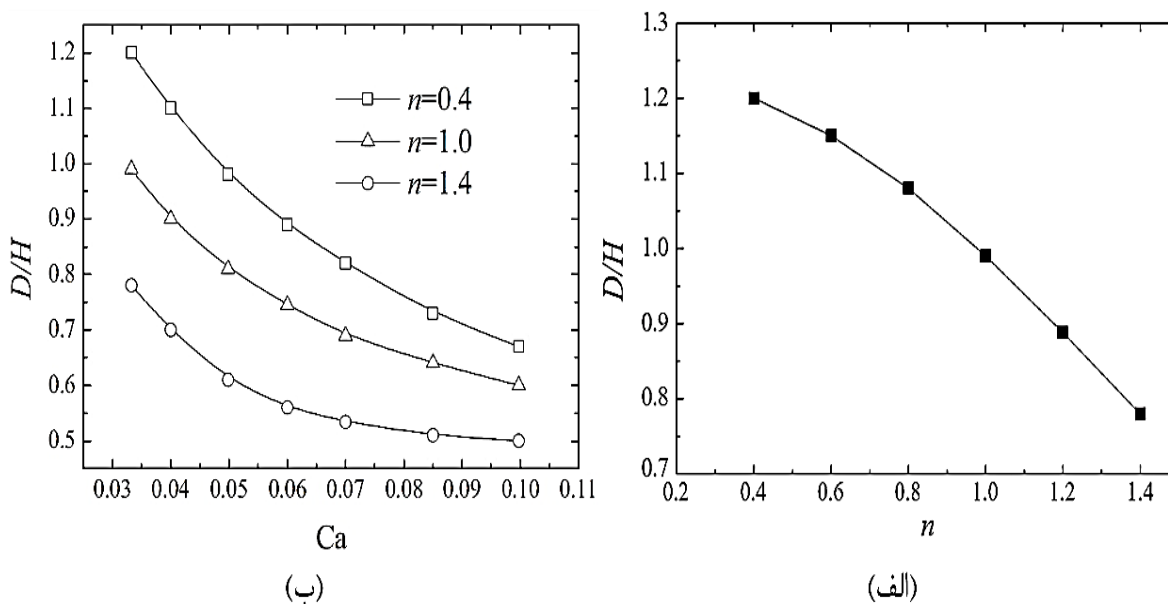
^۱ Lan

^۲ Ashraf

^۳ Hernández

از یک مطالعه پارامتری کامل و شبیه‌سازی المان محدود استخراج شد.

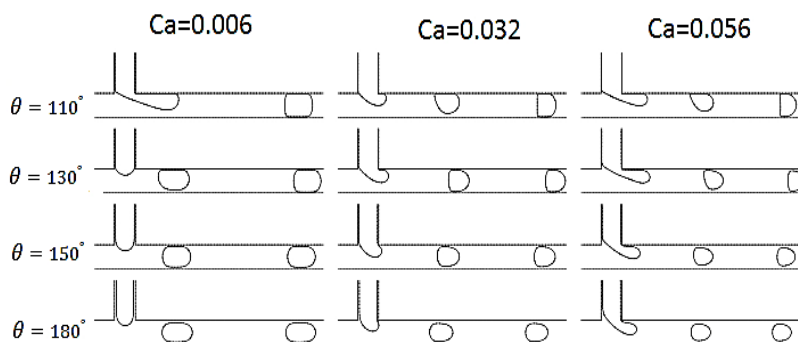
تانگ^۱ و همکاران [40] تشکیل قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی را در یک سیال پیوسته غیرنیوتنی در میکروکانال‌های T-شکل و هندسه متقاطع با استفاده از روش شبکه بولتزن بررسی کردند. آن‌ها تأثیر شاخص توانی غیرنیوتنی (n)، لزجت و کشش سطحی را بر اندازه قطره، فاصله بین قطرات و طول جدایش قطره مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش شاخص توانی غیرنیوتنی در مدل توانی سیال پیوسته، اندازه قطره کاهش یافته و فرکانس تشکیل قطرات افزایش خواهد یافت. در شکل ۱-۲۰، ارتفاع کانال اصلی و D قطر قطرات است. چگالی هر دو فاز برابر $\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$ ، زاویه تماس فاز گسسته با دیواره‌ها 180° درجه، کشش سطحی بین دو فاز $\sigma = 0.045 \text{ N/m}$ ، لزجت سیال نیوتنی $\eta = 0.001 \text{ Pa.s}$ و لزجت سیال غیرنیوتنی $\eta_0 = 0.004 \text{ Pa.s}^n$ است.



شکل ۱-۲۰: (الف) قطر قطرات نیوتنی تشکیل شده در فاز پیوسته غیرنیوتنی در میکروکانال T-شکل به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی (ب) قطر قطرات غیرنیوتنی تشکیل شده در فاز پیوسته غیرنیوتنی برحسب عدد موینگی در میکروکانال T-شکل به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی.

^۱ Tang

لیو و همکاران [۳۹] گزارش کردند که سطح دیوار کانال نقش مهمی در تولید قطرات بزرگ‌تر با زاویه تماس کوچک‌تر به‌ویژه برای مقادیر کوچک عدد مویینگی ایفا می‌کند. آن‌ها ادعا کردند که افزایش زاویه تماس به بیش از ۱۶۵ درجه تأثیر ناچیزی بر اندازه قطرات در تمامی مقادیر عدد مویینگی دارد.



شکل ۱-۲۱: تأثیر عدد مویینگی و زاویه تماس بر اندازه قطرات در هندسه T-شکل [۳۹].

فنگ^۱ و همکاران [73] به بررسی فرآیند تشکیل قطره در هندسه میکروسیالی جریان متمرکز شده در اعداد مویینگی پایین به روش المان محدود پرداختند. در تحقیق آن‌ها آب به‌عنوان فاز گسسته و روغن به‌عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته شده و اثر نرخ جریان فاز گسسته بر فرآیند شکل‌گیری قطره و سرعت قطره در پایین دست جریان و دوره تناوب فرآیند تشکیل قطره را بررسی شد. همچنین نکوئی^۲ و همکاران [۷۴] به شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی در هندسه میکروسیالی T-شکل پرداختند. آن‌ها به بررسی ارتباط بین حجم قطره با عدد مویینگی ($0.5 < Ca < 0.001$) و نسبت لزجت فاز قطره به فاز پیوسته ($15 < \lambda < 0.01$) پرداخته و دریافته‌اند که برای همه نسبت‌های لزجت بررسی‌شده در پژوهش آن‌ها اندازه قطرات با افزایش عدد مویینگی، کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافته‌اند که در اعداد مویینگی بررسی‌شده توسط آن‌ها، کاهش اندازه قطره در $\lambda < 1$ بیشتر از حالت $\lambda > 1$ است ضمن اینکه اندازه قطرات در حالتی که $\lambda < 1$ باشد چندان تغییری نمی‌کند در حالی که در $\lambda > 1$ اندازه قطرات

^۱ Feng

^۲ Nekouei

افزایش می‌یابد.

وو^۱ و همکاران [۷۵] به بررسی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروسیالی هم‌جریان و جریان متمرکز شده به صورت متقارن محوری پرداخته و تأثیر عدد موینگی بر رژیم‌های تشکیل قطره، اندازه قطره و فرکانس تشکیل قطره را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده، گذار بین رژیم‌های جتی و چکه‌ای در اعداد موینگی کم اتفاق افتاده و قطرات تولیدشده در این هندسه از قطرات تولید شده در دستگاه‌های هم‌جریان کوچک‌تر و دارای توزیع اندازه گسترده و فرکانس بالاتر هستند. آن‌ها دریافتند که تشکیل قطره در هندسه جریان متمرکز شده به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر شعاع اریفیس قرار داشته ولی طول اریفیس تأثیر چندانی بر تشکیل قطره ندارد. علاوه‌براین هنگامی که شعاع اریفیس به اندازه کافی کوچک باشد و یا عدد موینگی بزرگ‌تر از ۰٫۳ باشد، تنها رژیم جتی مشاهده می‌شود.

۸-۱- معرفی تحقیق حاضر

از دستگاه‌های جریان متمرکز شده به دلیل کنترل‌پذیری بالای آن‌ها برای فرآیند امولسیون‌سازی مایع-مایع استفاده می‌شود. امولسیون‌های تولیدشده در هندسه‌های میکروسیالی کاربردهای وسیعی در آنالیزهای زیست‌شیمی و ترکیب مواد پیدا کرده‌اند. کنترل فوق‌العاده بر حجم، یکنواختی و نرخ تولید قطرات و حباب‌ها از ویژگی‌های منحصربه‌فرد رفتار دستگاه‌های میکروسیالی است. سطوح مشترک محدود شده در کانال‌های میکروسیالی رفتار کاملاً متفاوتی از جریان‌های نامحدود دارند. تولید میکروسیالی قطرات و حباب‌ها کاملاً متفاوت با تولید قطرات و حباب‌ها در هندسه‌های نامحدود بوده و تحت تأثیر سطح مشترک است [۴۵]. دستگاه‌های جریان متمرکز شده می‌توانند قطراتی در مقیاس اندازه اریفیس تولید کنند، از این‌رو یکی از مطالعات زیادی روی آن‌ها صورت گرفته است. فرآیند شکل‌گیری قطره تحت تأثیر پارامترهای مختلفی مانند؛ نسبت‌های جریان، لزجت و ابعاد هندسه است. تاکنون مطالعات تجربی زیادی بر فرآیند جدایش قطره در دستگاه‌های جریان متمرکز شده انجام شده است. روند جدایش قطره با توجه به وابستگی آن به پارامترهای متعددی مانند

^۱ wu

نسبت دبی‌ها، لزجت‌ها و پارامترهای هندسی هنوز به‌طور کامل شناخته‌نشده است. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالاتی^۱ یک روش جایگزین برای درک این فرآیند پیچیده ارائه می‌دهد. به‌طور معمول از روش‌های عددی مانند لولست، روش حجم سیال^۲، روش میدان فاز^۳ و روش شبکه بولتزمن^۴ برای تعیین موقعیت فصل مشترک در جریان دوفازی استفاده می‌شود [۷۶]. از روش میدان فاز بیشتر در جریان‌های دوفازی که در آن‌ها حباب تشکیل می‌شود، استفاده می‌شود [۷۷]. در روش حجم سیال^۵ معادله کسر حجمی اعمال شده و چگالی وزنی و لزجت در هر سلول محاسباتی تعیین می‌شود. اگرچه در روش حجم سیال ذاتاً بقای جرم برقرار است، اما در آن فصل مشترک به‌خوبی پیش‌بینی نمی‌شود که این امر باعث عدم دقت در تخمین نیروهای بین سطحی می‌شود [۷۸]. به‌طور کلی روش حجم سیال انحنای شدید را به‌خوبی پیش‌بینی نمی‌کند. برای دستگاه‌های جریان متمرکز شده در ناحیه اریفیس شاهد تغییرات شدید در انحنای فصل مشترک خواهیم بود و هنگامی که از روش حجم سیال استفاده شود، عدم دقت در پیش‌بینی فصل مشترک می‌تواند منجر به خطای زیاد در شبیه‌سازی جدایش قطره شود. از طرفی روش لولست فصل مشترک را توسط یک تابع نرم بیان می‌کند که برای محاسبه انحنای و نیروهای کشش سطحی بسیار مناسب است [۷۹]. از این‌رو در این تحقیق از روش لولست برای شبیه‌سازی فرآیند جدایش قطره در دستگاه‌های جریان متمرکز شده استفاده شده است.

در پژوهش حاضر برای هندسه مسئله، خواص سیالات و نیز دبی‌ها از گزارش‌های نای و همکاران [۵۲] و همچنین [۳۸] استفاده شده و هندسه استفاده شده در شکل ۱-۲۲ نشان داده شده است. فاز پیوسته که یک محلول آبی با لزجت و چگالی نزدیک به آب است از طریق دو کانال کناری به هندسه مسئله تزریق می‌شوند. همچنین روغن سیلیکون که نسبت به محلول آبی دارای لزجت بیشتری است، به‌عنوان فاز گسسته از طریق کانال وسط به هندسه تزریق می‌شود. فاز گسسته بعد از خروج از مجرای خود توسط فاز پیوسته فشرده شده

¹ Computational Fluid Dynamics (CFD)

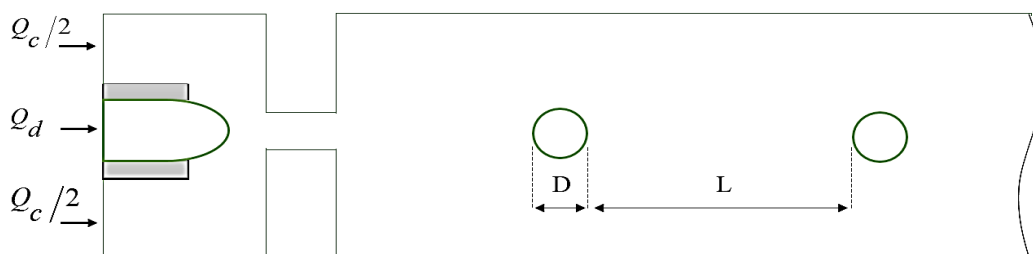
² Volume of fluid (VOF)

³ Phase-filed method

⁴ Lattice-Boltzmann method

⁵ Volume of fluid (VOF)

و پس از عبور از اریفیس، قطرات فاز گسسته تشکیل شده و در کانال عریض واقع در پایین دست اریفیس به حرکت خود ادامه می‌دهند.



شکل ۱-۲۲: هندسه استفاده شده در پژوهش حاضر

در بخش غیرنیوتنی برای فاز پیوسته از محلول آبی نیوتنی سدیم دو دسیل سولفات^۱ با درصد وزنی ۲% SDS که یک محلول نیوتنی حاوی سورفکتانت است و همچنین برای فاز گسسته از دو نوع روغن سیلیکون با لزجت دینامیکی و کشش سطحی مختلف استفاده شد.

۱-۸-۱- ضرورت انجام تحقیق

بررسی رفتار دستگاه‌های چندفازی که شامل سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی هستند با توجه به کاربردهای آنها در تحقیقات پزشکی، صنعتی و زمینه‌های زیست‌شناسی که در آنها اغلب با مایعات غیرنیوتنی زیستی و دارویی مواجه می‌شویم، بسیار مهم است. تحقیق حاضر در زمینه‌ی درک اثر خواص غیرنیوتنی سیالات، شامل سیالات نازک شونده برشی^۲ بر جدایش و تشکیل قطره متمرکز شده است. برخلاف سیالات نیوتنی، سیالات غیرنیوتنی به‌عنوان سیالاتی تعریف می‌شوند که در آنها رابطه‌ی مستقیمی بین تنش برشی و نرخ کرنش وجود ندارد. افزودن پلیمرها و کلونیدها خواص رئولوژیکی^۳ مایعات را به‌طور چشمگیری تغییر می‌دهد که با این رفتار و تغییر خواص در فرآیندهای اکستروژن پلاستیک و پلیمر، داروسازی، لوازم‌آرایی، مواد غذایی و پتروشیمی بسیار مواجه می‌شویم. در جریان‌های آرام، دینامیک قطره توسط نیروهای کشش سطحی

^۱ Sodium Dodecyle Sulphate (SDS)

^۲ Shear thinning

^۳ Rheological properties

و نیروهای لزج^۱ کنترل می شود و رئولوژی سیال در مشخص کردن رفتار سیالات قبل و در زمان شکل گیری قطره مهم است. برای سیالات غیرنیوتنی رسیدن به رژیم چکه ای تک پخش بسیار مشکل است. لزجت کششی^۲ سیالات در برابر نیروهایی که می خواهند قطره ایجاد کنند، مقاومت می کند و این منجر به شکل گیری جت بلندی می شود که بر اثر ناپایداری رایلی-پلاتیو^۳ به قطرات کوچک با اندازه های غیرقابل کنترل شکسته می شود. از مشخصه های سیالات غیرنیوتنی می توان به داشتن رفتار رئولوژیکی پیچیده تر نسبت به سیالات نیوتنی رایج اشاره کرد. با این وجود اطلاعات انتشار شده ی کمی در مورد مطالعه ی تشکیل قطره غیرنیوتنی در فاز پیوسته ی نیوتنی موجود است. علاوه بر این، امولسیون سازی^۴ محلول های غیرنیوتنی در میکروسیالی ها توسط یک روش قابل کنترل دارای دشواری های خاص، شناخته شده و همیشگی است و این محدودکننده ای برای اجرای این فن ها در مواد صنعتی است.

۱-۸-۲- نوآوری تحقیق

هدف عمده ی این پژوهش ارزیابی تشکیل قطره و رفتار آن در میکروکانال ها با استفاده از جریان های نیوتنی و غیرنیوتنی است. این پژوهش شامل بخش های زیر است:

۱. توسعه ی یک مدل شبیه سازی عددی با رویکرد مبتنی بر تسخیرکننده سطح^۵ و بر پایه ی تابع لولست^۶ برای شبیه سازی دینامیک سیالاتی قطرات با خواص نیوتنی و غیرنیوتنی.
۲. اعتبارسنجی مدل عددی ایجاد شده با نتایج آزمایشگاهی و عددی به منظور کسب اطمینان در استفاده از آن. در فرآیند اعتبارسنجی هدف ما بررسی تطابق رفتاری بین مدل عددی تحقیق حاضر و نتایج عددی و

¹ Viscous forces

² Extensional viscosity

³ Rayleigh-Plateau

⁴ Emulsifying

⁵ Interface capturing

⁶ Level set function

آزمایشگاهی انجام شده است.

۳. درک این مطلب که چگونه رفتار سیالات غیرنیوتنی منجر به کنترل شکل‌گیری و انتشار قطرات نیوتنی و غیرنیوتنی در هندسه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده می‌شود. بر این اساس مجموعه‌ای از مطالعات عددی پارامتریک برای بررسی اثر پارامترهای مختلف مانند پارامترهای رئولوژیکی، نرخ جریان، لزجت، کشش سطحی و ترشوندگی سطح بر روی قطر قطره، فرکانس تولید و توزیع فشار در طول فرآیند جدایش قطره انجام خواهد شد.

از نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تاکنون اکثر مطالعات انجام شده در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده به صورت آزمایشگاهی بوده و کمتر به مطالعه عددی روی رفتار آن‌ها پرداخته شده است. ضمن اینکه محققان در مطالعاتی که انجام دادند هنوز به دیدگاه واحدی در این دستگاه‌ها دست نیافتند.
- یافتن تأثیر پارامترهای مؤثر در مسئله به‌طور هم‌زمان با تمرکز بر اعداد بدون بعد معرفی شده. به کمک این اعداد بی‌بعد می‌توان مستقل از نوع مایعات و یا شرایط محیطی، به پیش‌بینی این پدیده‌ها پرداخت.
- در تحقیق حاضر برای اولین بار رفتار سیال غیرنیوتنی از نوع نازک‌شونده برشی در دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده بررسی شده است. در بخش نیوتنی از محلول آبی نیوتنی سدیم دو سیل سولفات با درصد وزنی SDS 2% به‌عنوان سیال فاز پیوسته و از روغن سیلیکون نیوتنی به‌عنوان سیال فاز گسسته استفاده شده است. در بخش غیرنیوتنی نیز از محلول آبی نیوتنی حاوی SDS 2% به‌عنوان سیال فاز پیوسته و از سیال غیرنیوتنی از نوع نازک‌شونده برشی به‌عنوان سیال فاز گسسته استفاده شده است.
- استفاده از روش لولست در بررسی رفتار سیالات غیرنیوتنی انحلال‌ناپذیر در میکروکانال‌های جریان متمرکز شده.

مدل سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار کام سول که یک نرم افزار عددی بر پایه روش المان محدود^۲ است انجام شده است. روش المان محدود بیانگر یک رویکرد عددی است که توسط آن معادلات دیفرانسیل کلی به یک شیوه تقریبی حل می شوند. دامنه هندسی مسئله به واحدهایی کوچک که المان های محدود نامیده می شوند، تقسیم شده و سپس یک تخمین و تقریب بر روی هر سلول اعمال می شود.

۱-۹- مروری بر فصل های پایان نامه

در فصل دوم به بیان فیزیک قطره و عوامل تأثیرگذار بر آن پرداخته شده و معادلات استفاده شده جهت ردیابی فصل مشترک بین دو فاز و معادلات حاکم بر سیال ارائه شده است. در این فصل ضمن اشاره به شرایط مرزی استفاده شده، نحوه اندازه گیری کمیت هایی که در این پژوهش ارائه شده اند نیز توضیح داده شده است.

در فصل سوم ضمن معرفی سیالات استفاده شده در این فصل، فرآیند شبکه بندی و فرآیند استقلال از شبکه بررسی شده و اعتبار سنجی نتایج نیز مورد بررسی قرار می گیرد. در این فصل هر دو فاز سیالات نیوتنی بوده و تأثیر عوامل مختلف بر فرآیند جدایش قطره مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل چهارم جدایش قطرات غیر نیوتنی با رفتار نازک شونده برشی در فاز پیوسته نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته و فرآیند استقلال از شبکه نیز مجدداً مورد بررسی قرار می گیرد. در این فصل اثر مقدار شاخص توانی بر فرآیند جدایش قطره، توزیع فشار بین دو فاز و اندازه قطره بررسی می شود.

در فصل پنجم نیز نتیجه گیری حاصل از این تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه می شود.

¹ Computational Fluid Dynamics

² Finite Element Method

۲- فصل دوم: معادلات حاکم و روش حل عددی

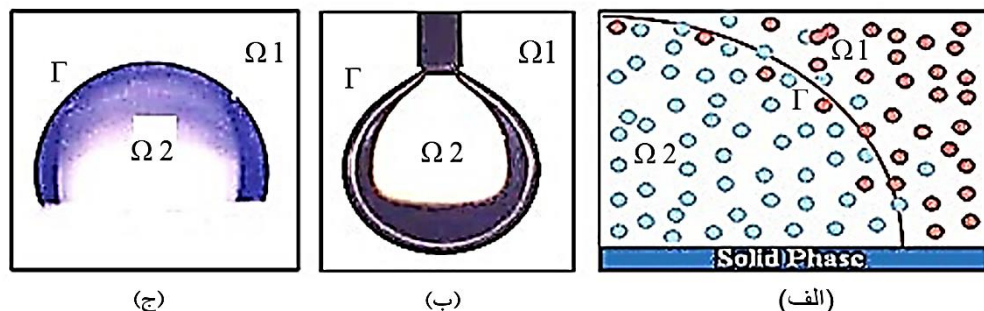
۱-۲-۲-۱- مقدمه

برای درک عمیق تر نقش جدایش قطره در یک دستگاه میکروسیالی، می توان از فیزیک جریان سیال در مقیاس میکرو استفاده کرد؛ بنابراین درک پدیده های فیزیکی که رفتار جریان سیال را در مقیاس میکرو کنترل می کند مهم و ضروری است.

۱-۲-۲-۲- فیزیک مسئله

۱-۲-۲-۱- سطح مشترک و کشش سطحی

با توجه به تأثیر سطح مشترک قطره، کشش سطحی نقش مهمی داشته و باید در فرآیند جدایش قطره در نظر گرفته شود. کشش سطحی ناشی از عدم تعادل جاذبه مولکولی در طول سطح مشترک مایع بوده و به صورت نیرو بر واحد طول (N/m) یا انرژی بر واحد سطح (J/m^2) تعریف می شود. به منظور کاهش انرژی سطح، قطره تمایل به حداقل رساندن سطح فصل مشترک داشته و وقتی سطح قطره یا حباب کروی شود، سطح مشترک به حداقل مقدار خود می رسد. یک سطح مشترک، سطحی است که توسط دو فاز محدود شده باشد. شکل ۱-۲ دیدگاه میکروسکوپی سطح مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر را نشان می دهد.



شکل ۱-۲: فصل مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر [۸۰] (الف) نمای میکروسکوپی در اندازه مولکولی از فصل مشترک (ب) قطره آویزان (ج) قطره چسبیده به سطح

برای تعریف تابع کشش سطحی از یک قطره آویزان شده و یا قطره چسبیده به سطح استفاده می شود. با توجه به وجود اثر کشش سطحی در قطره، فشار داخل قطره همیشه بیشتر از فاز پیوسته است. به طور معمول از معادله یانگ-لاپلاس^۱ برای تعیین اختلاف فشار بین دو سمت یک سطح مشترک بر حسب شعاع انحنا،

^۱ Young-laplace equation

استفاده می شود که مقدار این اختلاف فشار که فشار لاپلاس^۱ نیز نامیده می شود برحسب کشش سطحی به صورت معادله (۱-۲) بیان می شود.

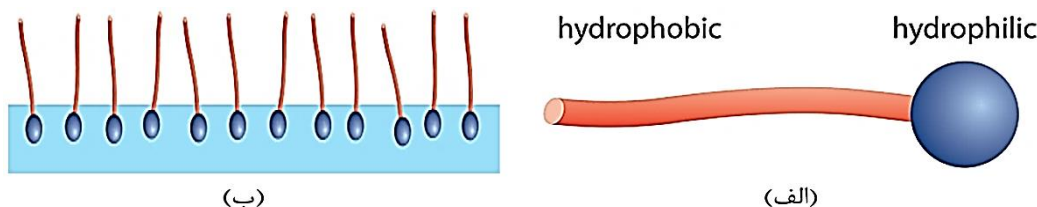
$$\nabla p_L = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1-2)$$

که در اینجا σ کشش سطحی بین دو فاز و R_1 و R_2 دو شعاع انحنای سطح مشترک هستند. در دستگاه های میکرو سیالی، به دلیل اینکه ابعاد استفاده شده کوچک هستند کشش سطحی نه تنها بر نیروی گرانشی بلکه بر دیگر نیروهای فیزیکی مانند نیروهای اینرسی و لزج نیز غالب می شود.

۲-۲-۲- سورفکتانت

۲-۲-۲-۱- اثر افزودن سورفکتانت

سورفکتانت یا عامل فعال کننده سطحی^۲ ترکیب های فعال سطحی بوده که دارای گروه های آب دوست^۳ و گروه های آب گریز^۴ هستند (شکل ۲-۲). سورفکتانت ها به تناسبا ساختار مولکولی در حلال های آلی و آب واکنش داده و باعث کاهش کشش سطحی می شوند.



شکل ۲-۲: (الف) شماتیک سورفکتانت (ب) سورفکتانت بر روی یک سطح [۸۱]

ساختار شیمیایی این مواد اغلب شامل یک مولکول نسبتاً طولانی با یک انتهای آب گریز و انتهای دیگر آب دوست است. در واقع سورفکتانت ها موادی هستند که می توانند انرژی سطحی بین سطوح را به میزان زیادی تغییر دهند. این مواد در بسیاری از صنایع نقش مهمی داشته و به طور وسیعی در فرآیندهای شیمیایی

^۱ Laplace pressure

^۲ Surface active agent

^۳ Hydrophilic

^۴ Hydrophobic

و بیوشیمیایی مانند شوینده‌ها، انعقاد کننده‌ها، امولسیون کننده‌ها، جوهر سازی، کف سازی، جداکننده‌ها، پلیمرها و غیره استفاده می‌شوند. سورفکتانت‌ها وقتی با غلظت کم به یک مایع اضافه می‌شوند، خواص سطحی مایع را تغییر می‌دهند؛ بنابراین مواد فعال کننده سطحی به سری موادی اطلاق می‌شوند که پس از انحلال در آب تمایل به جمع شدن در سطح دارند.

۲-۲-۲-۲- طبقه‌بندی مواد فعال کننده سطحی

مواد فعال کننده سطحی بر اساس ساختمان و طبیعت گروه سر در آن‌ها به دسته‌های مختلف تقسیم می‌شوند. این دسته‌ها شامل:

الف- مواد فعال کننده سطحی آنیونی

دسته‌ای از مواد فعال کننده سطحی هستند که قسمت قطبی مولکول را یک آنیون تشکیل می‌دهد، یعنی گروه سر در آن‌ها دارای بار منفی است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ترکیب سدیم دودسیل سولفات اشاره نمود.

ب- مواد فعال کننده سطحی کاتیونی

دسته‌ای از مواد فعال کننده سطحی هستند که قسمت قطبی مولکول را یک کاتیون تشکیل می‌دهد، یعنی گروه سر در آن‌ها دارای بار مثبت است. نمک‌های سولفونیم و نمک‌های آمین‌ها از این جمله هستند. مشهورترین آن‌ها ستیل تری متیل آمونیوم برومید است.

ج- مواد فعال سطحی غیر یونی

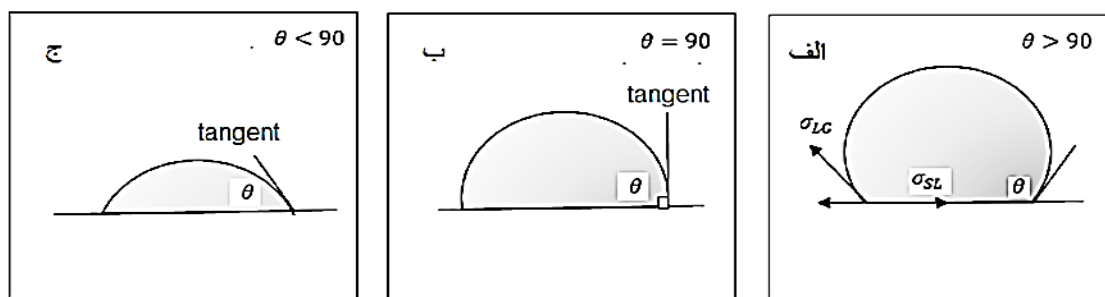
در این مجموعه از سورفاکتانت‌ها، گروه سر فاقد بار الکتریکی بوده و اغلب از مشتقات پلی اکسی اتیلن و پلی پروپیلن تشکیل شده است. تریتون X-100 از متداول‌ترین نوع این سورفاکتانت‌ها است.

د- مواد فعال کننده سطحی دوخصلتی

در این نوع مواد، بخش قطبی مولکول شامل هر دو بار الکتریکی مثبت و منفی است. این مواد در اکثر حلال‌های آبی نامحلول بوده و دارای خاصیت جذب بر روی سطوح باردار می‌باشند. بسته به pH محلول می‌توانند به‌عنوان معرف‌هایی با سطح فعال آنیونی، کاتیونی یا غیر یونی عمل نمایند.

۲-۳-۲- زاویه تماس و تر شوندگی سطح

همان‌طور که در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، زاویه تماس^۱ (θ) به لحاظ تئوری زاویه‌ای است که یک قطره در سه مرز فاز که در آن سطح مشترک مایع-مایع یا گاز-مایع با یک سطح جامد باهم تلاقی می‌کنند، ایجاد می‌کند.



شکل ۳-۲: زاویه تماس بین سطح و سیال (الف) سطح آب‌گریز (ب) سطح با زاویه تماس عمودی (ج) سطح آب‌دوست
معادله یانگ که ابتدا توسط یانگ و در سال ۱۸۰۵ پیشنهاد شد، ارتباط بین زاویه تماس با کشش سطحی گاز-مایع، گاز-جامد و جامد-مایع که در تعادل با یکدیگر هستند را به‌صورت معادله (۲-۲) بیان می‌کند:

$$\sigma_{LG} \cos \theta = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} \quad (2-2)$$

که در آن σ_{LG} کشش سطحی گاز-مایع، σ_{SG} کشش سطحی گاز-جامد، σ_{SL} کشش سطحی مایع-جامد و همچنین θ زاویه تماس است. با توجه به شکل ۳-۲ در صورتی که سطح مشترک بین دو فاز با سطح زاویه‌ای کمتر از ۹۰ درجه داشته باشد در این صورت سطح را آب‌دوست^۲ و اگر این زاویه بیشتر از ۹۰ درجه باشد،

^۱ Contact angle

^۲ Hydrophilic

سطح را آب‌گریز^۱ می‌نامند.

۳-۲- روش‌های ردیابی سطح مشترک

اصولاً روش‌هایی که برای ردیابی سطح مشترک مورد استفاده قرار می‌گیرند به دو نوع عمده زیر تقسیم

می‌شوند:

۱-۳-۲- روش‌های تسخیرکننده سطح

روش‌های تسخیرکننده سطح^۲ دارای ماهیت اویلری بوده و در آن‌ها شبکه حل ثابت در نظر گرفته می‌شود. برای کل ناحیه، یک دستگاه معادلات اعمال شده و سطح مشترک نیز جزء ناحیه حل خواهد بود. در معادلات ممنوم برای ناحیه‌ای که سطح مشترک وجود دارد، نیروی کشش سطحی وارد می‌شود. در این روش‌ها، سطح مشترک متحرک خواهد بود و برای تعیین موقعیت سطح مشترک روش‌های مختلفی وجود دارد. اساس اکثر روش‌ها استفاده از دو تابع است؛ تابع فاصله که در روش لولاست استفاده می‌شود و دیگری تابع کسر حجمی F یا تابع مشخص‌کننده فاز^۳ که در آن برای هر فاز سیال یک مقدار تعیین می‌شود و معمولاً برای یک‌فاز مقدار ۱ و برای فاز دیگر مقدار صفر دارد [۸۲].

۲-۳-۲- روش‌های دنبال‌کننده سطح

روش‌های دنبال‌کننده سطح^۴ ماهیت لاگرانژی داشته و شبکه حل در آن‌ها متحرک در نظر گرفته شده و برای هر سیال یک شبکه در نظر گرفته می‌شود و سطح مشترک، مرز بین دو ناحیه حل خواهد بود. در این حالت، مرز شبکه روی سطح مشترک بوده و با در نظر گرفتن چند نقطه روی سطح مشترک و ردیابی این نقاط، سطح مشترک ردیابی و موقعیت جدید دو شبکه مشخص می‌شود. در مسائلی که در آن‌ها گرادیان‌های شدید سرعت ایجاد شود، شکل جریان پیچیده شده و باعث به وجود آمدن خطا در روش‌های لاگرانژی

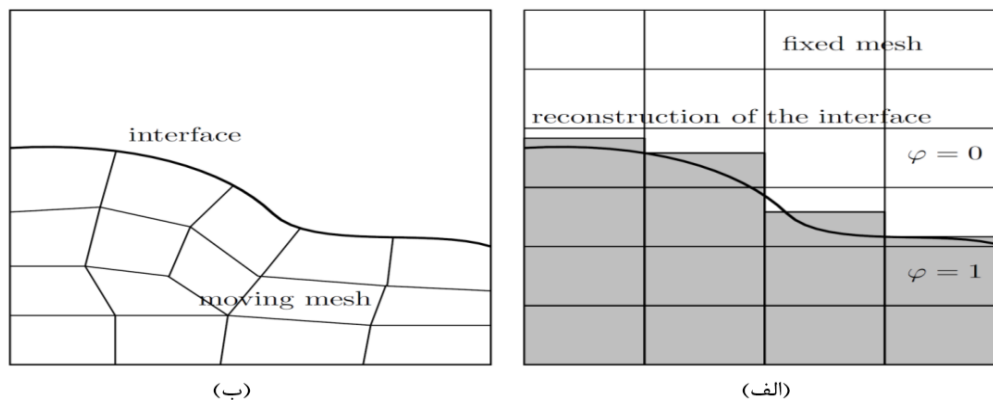
^۱ Hydrophobic

^۲ Capturing Methods

^۳ Indicator Phase Function

^۴ Tracking Methods

می شود؛ بنابراین در حالی که هندسه سطوح پیچیده بوده و یا پدیده‌هایی نظیر شکست^۱ و یا پیوستن^۲ دو سطح روی دهد، استفاده از این روش‌ها با مشکلاتی روبرو خواهد شد [۸۲].



شکل ۲-۴: دو روش کلی تعیین مرز مشترک [۸۳] الف- روش اوپلری ب- روش لاگرانژی.

۲-۴- اعداد و پارامترهای بی بعد

اغلب پدیده‌هایی که در طبیعت و در علم مکانیک سیالات با آن‌ها مواجه می‌شویم به متغیرهای زیادی وابسته هستند و این وابستگی باعث می‌شود تجزیه و تحلیل این پدیده‌ها دشوار شود. به کمک آنالیز ابعادی^۳ می‌توان به جای بررسی مجزای پارامترها و تأثیرات آن‌ها، اعداد بی‌بعد حاکم بر مسئله را شناسایی و در تجزیه و تحلیل مسئله از آن‌ها بهره برد. آنالیز ابعادی در مکانیک از اهمیت کلیدی برخوردار است و در آن از میان تعدادی نیرو که در مقیاس‌های مختلف در میکروکانال به جریان سیال اعمال می‌شوند، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین آن‌ها در برابر دیگر آثار را مورد بررسی و قضاوت قرار می‌دهند. اعداد بی‌بعد^۴ بیان‌کننده نسبت این اثرهای فیزیکی بوده و نشان‌دهنده اهمیت نسبی نیروها و انرژی‌ها است که می‌تواند راهی برای ساده‌سازی مسائل پیچیده باشد. رفتار میکروقطرات در جریان چند فاز به نیروهای مختلفی مانند نیروهای لزج، نیروی اینرسی، گرانش، کشش سطحی، فشار و غیره بستگی دارد. تأثیر نسبی آن‌ها بر جریان را می‌توان با پارامترهای بی‌بعد زیر شرح داد:

^۱ Break Up

^۲ Coalescence

^۳ Dimensional Analysis

^۴ Dimensionless Numbers

عدد رینولدز^۱: این عدد بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج بوده و از آن برای بیان نوع رژیم جریان استفاده می شود. نیروهای اینرسی با وجود اینکه اثرات خاصی بر میکرو قطرات با سرعت بالا و یا در زمان گسسته شدن آنها دارد، اما در بیشتر موارد می توان آن را نادیده گرفت.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (3-2)$$

عدد وبر^۲: این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی را بیان می کند. در میکروکانالها این عدد معمولاً خیلی کوچک بوده و بنابراین کشش سطحی اثر برجسته‌ای روی جریان دارد.

$$We = \frac{\rho u^2 L}{\sigma} \quad (4-2)$$

عدد باند^۳: این عدد نسبت عدد گرانش به کشش سطحی را بیان می کند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$Bo = \frac{\Delta \rho g L^2}{\sigma} \quad (5-2)$$

که در آن $\Delta \rho$ اختلاف چگالی جرمی بین دو سیال است. در ابعاد میکرو به دلیل کوچک بودن ابعاد میکروکانال $Bo \ll 1$ بوده و اثر گرانش قابل صرف نظر کردن است.

عدد موینگی^۴: عدد موینگی نسبت نیروهای لزج به کشش سطحی است. در موینگی های پایین کشش سطحی عاملی مهم بوده و باعث تولید پایدار قطرات می شود. در مقابل نیروی لزج نقش مهمی داشته و منجر به تغییر شکل بزرگ قطرات و شکل نامتقارن آن می شود. این عدد به صورت رابطه (۶-۲) تعریف می شود و در آن u_c سرعت فاز پیوسته است.

^۱ Reynolds number

^۲ Weber number

^۳ Bond number

^۴ Capillary number

$$Ca_c = \frac{We_c}{Re_c} = \frac{\eta_c u_c}{\sigma} \quad (۶-۲)$$

عدد نادسن^۱: این عدد که بیان کننده مقیاس طولی میکروسکوپی^۲ به ماکروسکوپی^۳ بوده و به صورت زیر

تعریف می شود:

$$Kn = \frac{\beta}{n} \quad (۷-۲)$$

عدد نادسن نسبت متوسط فاصله آزاد بین مولکول های سیال به مقیاس طول فیزیکی است.

از دیگر کمیت های بی بعد تأثیرگذار در مسئله می توان به نسبت دبی بین دو فاز ($\varphi = \frac{Q_c}{Q_d}$) و همچنین

نسبت لزجت بین آن ها ($\lambda = \frac{\eta_d}{\eta_c}$) اشاره کرد که در این جا اندیس d نشان دهنده فاز گسسته^۴ و اندیس c

بیانگر فاز پیوسته است. در این تحقیق پارامترهای زمان، فشار، قطر قطره، فاصله بین قطرات و فرکانس تولید

قطرات توسط روابط زیر بی بعد شده اند:

$$u_c = \frac{Q_c}{A_{orif}} = \frac{Q_c}{W_4 h} \quad (۸-۲)$$

$$t^* = \frac{tu_c}{W_4} \quad (۹-۲)$$

$$P^* = \frac{p}{\rho_c u_c^2} \quad (۱۰-۲)$$

$$D^* = \frac{D}{W_4} \quad (۱۱-۲)$$

$$L^* = \frac{L}{W_4} \quad (۱۲-۲)$$

^۱ Knudsen number

^۲ Microscopic

^۳ Macroscopic

^۴ Dispersed phase

$$T = \frac{\Delta t}{N} \quad (۱۳-۲)$$

$$St = \frac{W}{TU_d} \quad (۱۴-۲)$$

که در این جا U_d سرعت فاز گسسته در ورودی کانال تزریق میانی، N تعداد قطرات تشکیل شده به ازای زمان Δt و T دوره تناوب تشکیل قطرات است. با توجه به تعاریف فوق می توان دریافت که اعداد وبر، رینولدز و باند در جریان میکرو قطره کوچک هستند. علاوه بر این پارامترهای تأثیرگذار بسیاری مانند محدودیت های دیواره میکروکانال و ترشوندگی دیواره ها و نسبت ابعاد هندسی میکروکانال اثرات مهمی بر جریان چند فازی حاوی قطره دارند. در ضمن اعمال میدان های نیروی خارجی مانند میدان های الکتریکی، حرارتی، آکوستیک و غیره باعث می شود که برای توصیف اثر آنها نیاز به مشخص کردن اهمیت نسبی نیروهای اعمالی و کشش سطحی باشد.

۲-۵- رئولوژی پلیمرها

رئولوژی علمی است که به تغییر شکل مواد و جریان حرکت سیال گفته می شود و در آن با تغییر شکل^۱ و نیرو مواجه هستیم. مطالعه رئولوژیکی مواد پلیمری چند هدف عمده دارد که یکی از آنها به دست آوردن یک معادله بین نیروی اعمال شده و تغییر شکل ایجاد شده در مواد است که به این معادله «معادله حالت رئولوژیکی» و یا «معادله ساختاری»^۲ می گویند. هدف دوم از مطالعه رئولوژیکی مواد پلیمری به دست آوردن تأثیر عواملی نظیر دما، فشار، وزن مولکولی و ساختار مواد بر خواص رئولوژیکی نظیر لزجت است.

۲-۵-۱- سیال نیوتنی

سیال نیوتنی، ماده ای است که در آن تنش برشی بدون وجود تنش تسلیم (صفر بودن تنش برشی در نرخ برش صفر) تنها تابعی خطی از نرخ برش است. ساده ترین معادله قانونمند، معادله لزج نیوتن به صورت

¹ Deformation

² Constitutive Equation

رابطه (۱۵-۲) است. موادی که از این معادله پیروی نکنند مواد غیر نیوتنی نامیده می‌شوند [۸۴].

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (15-2)$$

۲-۵-۲- سیالات غیر نیوتنی

سیالات غیر نیوتنی عموماً به سه گروه عمده زیر تقسیم می‌شوند [۸۴]:

الف- سیالات نیوتنی مستقل از زمان^۱

ب- سیالات نیوتنی تابع زمان^۲

ج- سیالات ویسکوالاستیک^۳

سیالات نیوتنی مستقل از زمان

سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان سیالاتی هستند که در آن‌ها تنش برشی تنها تابعی غیر خطی از نرخ برش است. این دسته از سیالات در شکل ۲-۵ نشان داده شده است که به دو گروه مواد دارای تنش تسلیم^۴ و مواد فاقد تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. در موادی که دارای تنش تسلیم هستند شرط جریان یافتن ماده، رسیدن تنش به حد مشخصی برای شروع حرکت آن است. علت این رفتار فیزیکی معمولاً به ساختمان سه‌بعدی ماده نسبت داده می‌شود. ساختمان این مواد قادر است که تنش برشی کمتر از حد تسلیم را بدون ایجاد جریان تحمل نماید ولی پس از آن، ساختمان داخلی شکسته شده و ماده اجازه حرکت برشی را پیدا می‌کند. تصور می‌شود که ساختمان داخلی ماده پس از کاهش تنش به مقدار کمتر از تسلیم دوباره ترمیم می‌شود. معروف‌ترین این دسته از مواد، پلاستیک بینگهام است. نمونه‌هایی از سیالات دارای تنش تسلیم عبارت‌اند از:

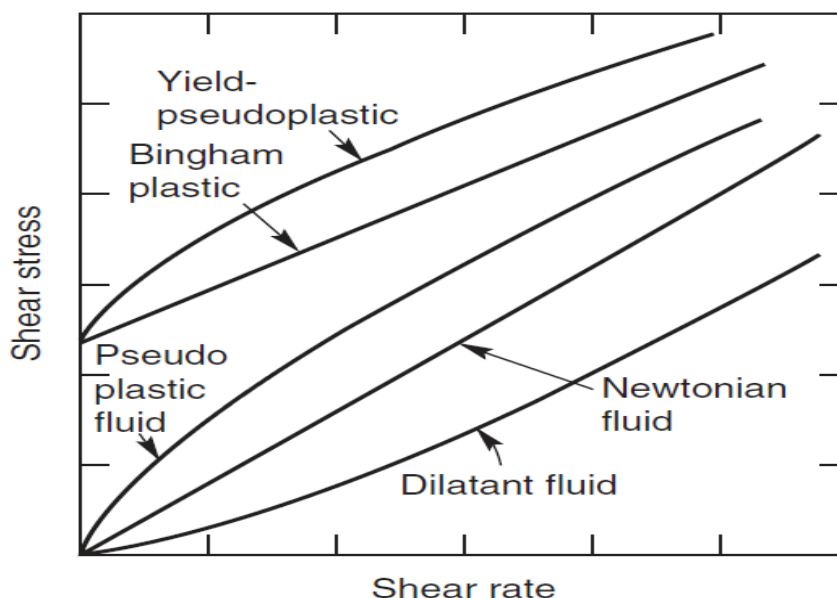
^۱ Time-independent fluids

^۲ Time-independent fluids

^۳ Viscoelastic

^۴ Yield Stress

برخی پلاستیک‌های مذاب، گل حفاری چاه نفت، مخلوط آب و شن، شکلات مایع، کرم‌های طبی، خمیردندان و گریس‌ها [۸۴].



شکل ۲-۵: تغییرات تنش برشی بر حسب نرخ برش برای انواع سیالات مستقل از زمان [۸۴]

سیالات فاقد تنش تسلیم به سیالات شبه پلاستیک^۱ (نازک شونده برشی^۲) و سیالات ویسکوپلاستیک (دایلاتانت^۳ یا ضخیم شونده برشی^۴) تقسیم می‌شود. این سیالات به صورت سیالات نیوتنی تعمیم یافته نیز نامیده می‌شوند. سیالات شبه پلاستیک عموماً در بسیاری از مواد با وزن مولکولی بالا، بسیاری از سوسپانسیون‌های دارای غلظت متوسط، چسب‌ها، مایونز، بعضی مرکب‌های چاپ و رنگ‌ها یافت می‌شوند.

در سیالات دایلاتانت با افزایش شدت برش، لزجت سیال افزایش می‌یابد. در این سیالات چنانچه از مدل قانون توانی به عنوان قانون پایه برای آن‌ها استفاده شود، در این صورت n مقداری بزرگ‌تر از یک خواهد بود. در شکل ۲-۶ تغییرات لزجت بر حسب نرخ برش برای سیالات نیوتنی، شبه پلاستیک و ویسکوپلاستیک

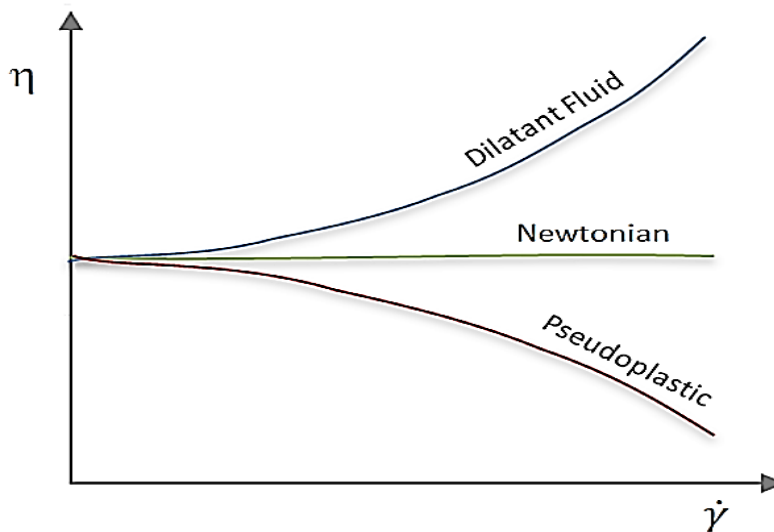
^۱ Pseudo plastic

^۲ Shear-thinning

^۳ Dilatant

^۴ Shear-thickening

نمایش داده شده است.



شکل ۲-۶: تغییرات لزجت برای چند نوع سیال [۸۵]

۲-۵-۳- مدل‌های غیرنیوتنی

در بخش سیالات نیوتنی ذکر شد که در سیالات نیوتنی، تنش برشی تنها تابعی از نرخ برش است. بر این اساس سیال غیرنیوتنی را می‌توان به سادگی به صورت سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف نمود. در سیال نیوتنی تراکم ناپذیر، رابطه تنش برشی و نرخ برش توسط معادله (۲-۱۶) بیان می‌شود [۸۴]:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (۲-۱۶)$$

در این رابطه η لزجت سیال و $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. برای سیال نیوتنی لزجت در دما و فشار ثابت، مقداری ثابت دارد. برای سیالاتی که در آنها لزجت به نرخ برش وابسته است، این معادله اصلاح شده و به صورت رابطه‌ای برای سیال نیوتنی تعمیم یافته به صورت معادله (۲-۱۷) که در آن η تابعی از نرخ برش $\dot{\gamma}$ است، تبدیل می‌شود [۸۴]:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (۲-۱۷)$$

تاکنون مدل‌های زیادی برای مدل سازی لزجت این مواد ارائه شده است، اما پرکاربردترین و ساده‌ترین

مدل حاکم بر آن‌ها مدل توانی^۱ به صورت معادله (۱۸-۲) است که در آن تنش برشی تابعی از توان n نرخ برش است [۸۴].

$$\eta = K \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (18-2)$$

در رابطه (۱۸-۲)، n شاخص پاور-لو و k ضریبی با واحد $Pa \cdot s^n$ است. از اشکالات این مدل، پیش‌بینی لزجت صفر در نرخ برش بی‌نهایت برای سیالات شبه پلاستیک است. از میان مدل‌های دیگری که این مشکل را برطرف می‌کنند می‌توان به مدل کراس، مدل کاریو اشاره نمود. در سیالات شبه پلاستیک، لزجت در نرخ‌های برش کوچک و بسیار زیاد تقریباً خطی است. شیب منحنی تنش در برابر نرخ کرنش در شدت‌های برش زیاد، به لزجت در برش بی‌نهایت و در شدت‌های برش کم به لزجت در برش صفر موسوم است. در این مطالعه، از مدل کاریو برای نشان دادن رفتار باریک شونده‌گی سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. این مدل تطابق بسیار خوبی با گسترده وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی که در آن‌ها لزجت با نرخ برش تغییر می‌کند، دارد. رابطه کاریو-یا سودا به صورت رابطه (۱۹-۲) نمایش داده می‌شود. در رابطه کاریو-یا سودا اگر مقدار $a=2$ لحاظ شود، بیانگر مدل کاریو خواهد بود [۸۴]:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left\{ 1 + \left(\lambda \dot{\gamma} \right)^a \right\}^{\frac{n-1}{a}} \quad (19-2)$$

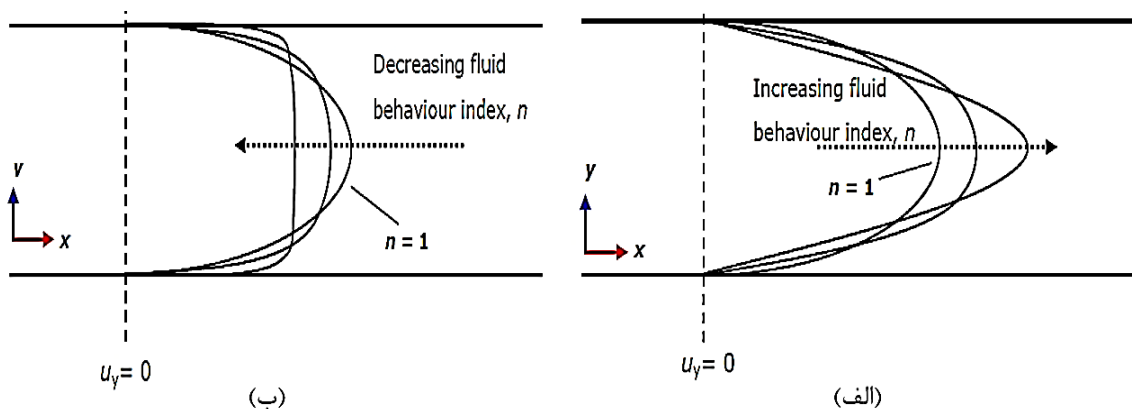
در این معادله η_0 لزجت در نرخ برش صفر، η_{∞} لزجت در نرخ برش نهایی، λ ثابت زمانی و n شاخص توانی است که شیب نمودار تغییرات $\eta(\dot{\gamma})$ را نشان می‌دهد. در این رابطه، a پارامتر بی‌بعدی است که انتقال از ناحیه‌ی نرخ برش صفر به ناحیه توانی را نشان می‌دهد. برای بسیاری از محلول‌های پلیمری، این معادله به ازای $\eta_{\infty} = 0$ و $a=2$ تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

^۱ Power-Law

در این تحقیق برای بخش غیرنیوتنی از مدل تنش شناخته شده‌ی کاریو استفاده شده است. این مدل رفتار لزجت سیال غیرنیوتنی از نوع نازک‌شونده برشی را به خوبی بیان می‌کند. این مدل با جایگزینی نرخ برش در معادله ساختاری (رابطه بین تنش و نرخ کرنش) برای سیال نیوتنی توسط رابطه (۲۰-۲) تعمیم یافته است:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[4 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 4 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]} \quad (20-2)$$

شکل ۷-۲ نشان‌دهنده پروفیل سرعت در سیالات نیوتنی و سیالات غیرنیوتنی است. در میکروکانال‌ها، لزجت ظاهری سیالات نازک‌شونده برشی با افزایش نرخ برش کاهش می‌یابد. علاوه بر این در آن‌ها پروفیل سرعت با کاهش n به‌طور فزاینده‌ای تخت‌تر می‌شود. این نشان می‌دهد که پروفیل سرعت سیالات ضخیم‌شونده برشی با افزایش n نوک‌تیزتر شده و نیز تغییرات سرعت^۱ بزرگ‌تری در سراسر دامنه جریان خواهند داشت.



شکل ۷-۲: پروفیل سرعت برحسب مقادیر شاخص توانی و در میکروکانال [۸۰].

۲-۶- جریان‌های آرام نیوتنی و غیرنیوتنی

معادلات حاکم بیان‌کننده بقای جرم و بقای اندازه حرکت جریان سیال با فرض شرایط؛ حالت ناپایا، خواص

^۱ Velocity gradients

ثابت سیال و جریان آرام در معادلات زیر ارائه شده است

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (21-2)$$

معادله بقای اندازه حرکت:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (22-2)$$

معادلات (21-2) و (22-2) بیانگر رابطه کلی حرکت سیال می‌باشند. اگر در معادله (22-2) رابطه تنش

برشی مربوط به سیال غیرنیوتنی جایگزین شود، در این صورت معادله حرکت مربوط به جریان غیرنیوتنی به

دست می‌آید و اگر رابطه تنش برشی مربوط به سیال نیوتنی جایگزین شود در این صورت معادله حرکت

سیال نیوتنی به دست می‌آید. معادله ناویر-استوکس یا به بیان دیگر معادله بقای اندازه حرکت، معادله‌ای با

مشتقات جزئی و غیرخطی بوده که جریان سیال نیوتنی در یک کانال را بیان می‌کند و به صورت معادله

(23-2) بیان می‌شود:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 u + f \quad (23-2)$$

که در آن u سرعت متوسط جریان، t زمان، ρ و η به ترتیب چگالی و لزجت دینامیکی سیال، p فشار و

f نیروی حجمی^۱ است که به کل المان وارد می‌شود.

اکثر سیالات از خود رفتار غیرنیوتنی نشان می‌دهند، بدین معنی که در آن‌ها یک رابطه غیرخطی بین

تنش برشی و نرخ برش وجود دارد و یا اینکه در آن‌ها منحنی بین تنش و نرخ کرنش از مبدأ عبور نمی‌کند.

^۱ Body force

در این سیالات لزجت ظاهری^۱ به صورت زیر است [۸۴]:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2-24)$$

۲-۷- مدل سازی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی به کمک لولست پایستار

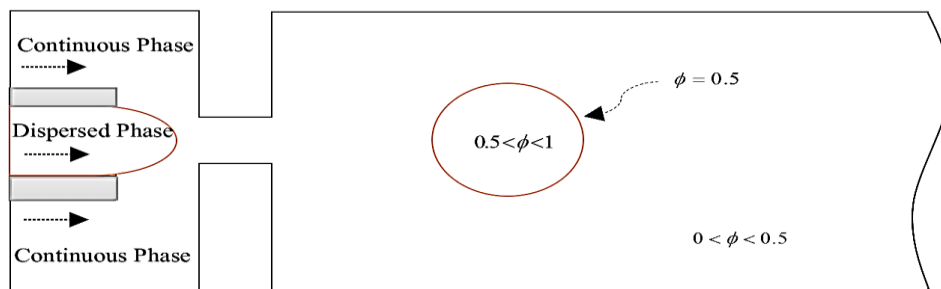
روش لولست^۲ ابتدا در سال ۱۹۸۸ توسط اوشر و ستین^۳ توسعه داده شد [۷۹]. این روش یک تکنیک عددی است که با حرکت سطوح سیال سروکار دارد. این روش به ویژه برای مسائلی که در آن موقعیت سطح حاصله در طول فرآیند تغییر می یابد و همچنین در مسائلی که در آن زوایای و گوشه های نوک تیز وجود دارد به کار می رود. ایده اصلی در این روش، در نظر گرفتن یک تابع اسکالر پیوسته و نرم^۴ به نام ϕ است. در مطالعه حاضر، برای ردیابی فصل مشترک بین دو فاز از روش لولست پایستار که توسط اولسون و کریز ارائه شده و دارای دقت مرتبه بالا و بقای جرم خوبی است استفاده شده است [۷۹]. از این رویکرد برای توصیف سطح مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر که به طور ضمنی توسط کانتور $\phi = 0.5$ در تابع لولست تعریف شده است، استفاده می شود، برای مثال، $\phi(x, t)$ که در آن x نشان دهنده مختصات یک نقطه درون فضا در زمان t است. این تابع توسط مقادیری بر روی یک شبکه اوپلری داده می شود. با استفاده از این روش عددی پایستار، مساحت ناحیه محدود شده با سطح مشترک $\phi = 0.5$ یعنی $A_{\phi=0.5}$ را می توان دقیقاً با $A_{\phi=0.5} = \int_{\Omega} \phi dx$ محاسبه کرد [۷۹]. شکل ۲-۸ مدل میکرو سیالی جریان متمرکز شده استفاده شده در این شبیه سازی با ردیابی موقعیت سطح مشترک قطره را نشان می دهد. کانال اصلی حاوی فاز پیوسته بوده و فاز پیوسته از کانال های کناری تزریق می شود ($\phi = 0$) و فاز گسسته ($\phi = 1$) از کانال میانی تزریق می شود.

^۱ Apparent viscosity

^۲ Conservative Level-Set Method

^۳ Osher and Sethian

^۴ Smooth



شکل ۸-۲: مقدار تابع ϕ در قسمت‌های مختلف میکروکانال در حضور قطره

هنگامی که سطح مشترک توسط میدان سرعت بیرونی داده شده جابجا شود، $u = (u_x, u_y)$ ، تغییر شکل

تابع لولست متناظر با حرکت سطح مشترک توسط معادله جابجایی یا انتقال زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = 0 \quad (25-2)$$

معادله انتقال تنها نیاز است که به صورت محلی در نزدیکی سطح مشترک حل شود. اگر جریان تراکم ناپذیر

باشد برای میدان سرعت خواهیم داشت $\nabla \cdot u = 0$ و معادله انتقال می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u \phi) = 0 \quad (26-2)$$

معادله فوق بیان گر یک معادله پیوستگی برای تابع لولست است. به منظور ثابت نگه داشتن ضخامت

سطح مشترک در شبیه سازی عددی، یک فشرده سازی مصنوعی به صورت معادله (۲۷-۲) اضافه و اجرا

می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau_a} + \nabla \cdot f(\phi) = 0 \quad (27-2)$$

که در آن τ_a بیانگر زمان تصنعی و f شار فشاری هستند. این شار فشاری تصنعی در ناحیه $0 < \phi < 1$ و

در جهت نرمال سطح مشترک اعمال می‌شود. شار فشاری تصنعی در جهت نرمال فصل مشترک به صورت زیر

تعریف می‌شود:

$$f(\phi) = \phi(1-\phi)n_r = \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (28-2)$$

برای جلوگیری از ناپیوستگی در سطح مشترک، معادله (۲۸-۲) با اضافه کردن یک مقدار کمی لزجت یا دیفیوژن به صورت معادله (۲۹-۲) اصلاح می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau_a} + \nabla \cdot f(\phi) = \varepsilon_r \nabla^2 \phi \quad (29-2)$$

که در آن ε_r لزجت مصنوعی است. معادله (۲۶-۲) و معادله (۲۹-۲) می توانند به صورت یک معادله با زمان مصنوعی تنظیم شده‌ی معادل با زمان واقعی ترکیب شوند؛ بنابراین معادله به دست آمده به صورت زیر اصلاح می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u\phi) = \varepsilon_r \nabla^2 \phi - \nabla \cdot f(\phi) \quad (30-2)$$

ترم لاپلاسیان نشان داده شده در معادله فوق نوعی ترم دیفیوژن مصنوعی است که سعی در بزرگ کردن عرض سطح مشترک دارد و هنگامی که دارای یک ضخامت ε_r است، این دو ترم در تعادل هستند و ضخامت سطح مشترک را ثابت نگه می دارند. معادله (۳۰-۲) می تواند در فرم پایستار زیر تعریف شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \left(u\phi + \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon_r \nabla \phi \right) = 0 \quad (31-2)$$

برای حفظ تابع لولست، یک روند "مقداردهی اولیه دوباره"^۱ برای تقریب و تخمین معادله لولست مورد نیاز است؛ بنابراین یک روش لولست مقداردهی اولیه دوباره شده و پایستار برای توصیف و انتقال سطح سیال استفاده شده است. معادله (۳۲-۲) بیانگر جابجایی^۲ تابع لولست مقداردهی اولیه دوباره شده است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left[\varepsilon_r \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (32-2)$$

که در آن γ و ε_r پارامترهای تثبیت کننده عددی هستند. γ نشان دهنده پارامتر مقداردهی اولیه

^۱ Reinitialization

^۲ Convection

دوباره و ε_p تعیین کننده ضخامت سطح مشترک است. مقدار \mathcal{V} نزدیک به حداکثر سرعت موجود در مسئله پیشنهاد شده است [۸۶]. ε_p نشان دهنده ضخامت سطح مشترک بوده و برابر بیشینه اندازه شبکه در زیر دامنه و در مجاور سطح مشترک فرض می شود. معادله (۲-۳۲) با معادلات حاکم که شامل معادله تراکم ناپذیر ناویر-استوکس به صورت معادله (۲-۳۳) و معادله پیوستگی (معادله (۲-۳۴)) برای ادوکتشن^۱ تابع لولاست (ϕ) ، کوپل می شود.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla \cdot \eta(\nabla u + (\nabla u)^T) + F_{st} \quad (۲-۳۳)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۲-۳۴)$$

که در آن ρ نشان دهنده چگالی، η لزجت دینامیکی، p فشار است. به طور طبیعی معادله ناویر-استوکس برای کنترل حرکت سیستم چند فازی بر روی یک شبکه ثابت شده حل می شود و چگالی و لزجت دینامیکی سیال نیز در طول سطح مشترک و به کمک روابط زیر به دست می آید:

$$\rho(x, t) = \rho_c + (\rho_c - \rho_d)\phi \quad (۲-۳۵)$$

$$\eta(x, t) = \eta_c + (\eta_c - \eta_d)\phi \quad (۲-۳۶)$$

که در آن ρ_c و ρ_d نشان دهنده چگالی فازهای پیوسته و گسسته، همچنین η_c و η_d به ترتیب نشان دهنده لزجت دینامیکی فازهای پیوسته و گسسته هستند. در شبیه سازی جریان دوفازی، بردار نرمال سطح مشترک و انحنای سطح مشترک دو کمیتی هستند که برای اعمال اثر کشش سطحی مورد نیاز است. بردار نرمال سطح مشترک و انحنای سطح مشترک را می توان از معادلات زیر محاسبه کرد:

$$n_r = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (۲-۳۷)$$

^۱ Advection

$$K = \nabla \cdot n_r \quad (38-2)$$

که در آن n_r بردار یکه نرمال در سطح مشترک قطره و K انحناى سطحى موضعی است. همچنین نیروی کشش سطحی (F_{st}) اعمال شده بر روی سطح مشترک بین دو فاز توسط معادله (39-2) محاسبه می شود [79]:

$$F_{st} = \sigma K n_r \delta \quad (39-2)$$

که در آن σ نشان دهنده کشش سطحی و δ تابع دلتای دیراک نرم^۱ متمرکز شده در سطح مشترک بین دو سیال است که توسط معادله (40-2) تقریب زده می شود:

$$\delta = 6|\nabla\phi| |\phi(1-\phi)| \quad (40-2)$$

در این تحقیق مدل سازی دینامیک سیالاتی^۲ و شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار کامسول که یک طرح عددی بر پایه روش المان محدود است انجام شده است. روش المان محدود ابتدا درگیر گسسته سازی حوزه مکانی با استفاده از یک شبکه شده و هنگامی که این گسسته سازی فیزیکی دامنه جریان کامل شد، تخمین و تقریب برای متغیرهای وابسته مطرح شده و برای دامنه های کوچک فضا و زمان حل می شوند [87].

۲-۸- شرایط اولیه و شرایط مرزی

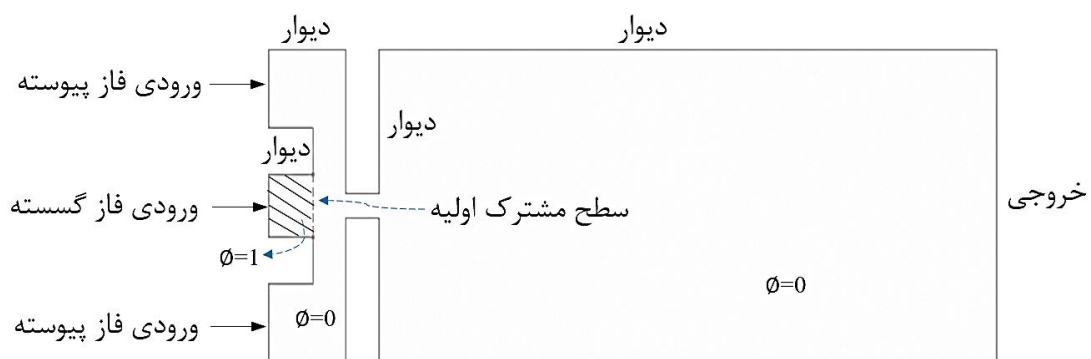
۲-۸-۱- شرایط اولیه:

با توجه به شکل ۲-۹ شرایط اولیه و مرزی به کاررفته در این تحقیق جهت حل معادلات حاکم بر مسئله به این شرح است. در لحظه $t=0$ کانال تزریق میانی به طور کامل حاوی سیال فاز گسسته ($\phi=1$) بوده و باقی دامنه محاسباتی شامل کانال های تزریق کناری، اریفیس و کانال واقع در پایین دست اریفیس حاوی فاز پیوسته

^۱ Smoth

^۲ Computational fluid dynamics

($\varnothing=0$) در نظر گرفته شده است. مرز مشترک اولیه بین دو فاز نیز در لحظه $t=0$ در انتهای کانال تزریق میانی و به کمک خط چین در شکل ۹-۲ نشان داده شده است. علاوه بر این جریان تراکم ناپذیر و هم‌دما فرض شده و از نیروی گرانش به دلیل کوچک بودن عدد باند صرف نظر شده است. همچنین از تغییرات خواص فیزیکی از جمله چگالی، لزجت و کشش سطحی صرف نظر شده و فرض شده است که کشش سطحی موجود در مرز مشترک میان دو فاز، مقداری ثابت بوده و با زمان تغییر نمی‌کند.



شکل ۹-۲: شرایط اولیه و شرایط مرزی اعمال شده بر میکروکانال

۲-۸-۲- شرایط مرزی:

ورودی‌های جریان: در مرزهای ورودی هر دو فاز، جریان با سرعت یکنواخت وارد می‌شود. از آنجایی که مرز ورودی کانال تزریق میانی همیشه حاوی سیال فاز گسسته است لذا در این مرز مقدار کسر حجمی سیال گسسته برابر با یک در نظر گرفته شده است. همچنین از آنجایی که مرز ورودی کانال‌های تزریق کناری همیشه حاوی سیال فاز پیوسته است لذا در این مرز مقدار کسر حجمی سیال گسسته برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

دیواره‌های میکروکانال: در دیواره‌های میکروکانال شرط عدم لغزش^۱ روی دیواره و شرط دیواره تر شونده^۲ با مقدار زاویه تماس 145° درجه بین سطح مشترک و دیواره‌ها اعمال شده است. این شرط مرزی در

^۱ No slip

^۲ Wetted wall

مسائلی که در آنها امکان برخورد سطح مشترک بین دو سیال با دیواره‌ها وجود داشته باشد، مناسب است. اگر این شرط مرزی استفاده شود، در آن صورت سطح مشترک بین دو سیال می‌تواند در طول دیواره‌ها و روی آنها حرکت کند.

خروجی جریان: در خروجی هندسه شرط فشار خروجی نسبی صفر بدون تنش لزج اعمال شده است.

۹-۲- نحوه محاسبه قطر و فاصله بین قطرات

اگر فرض کنیم به صورت دوبعدی یک قطره مجزا داشته باشیم در آن صورت می‌توان با توجه به اینکه در فاز گسسته $\phi > 0.5$ است، مساحت قطره را به کمک انتگرال زیر به دست آورد:

$$A_{\phi=0.5} = \int_{\Omega} \phi dx \quad (41-2)$$

و در این صورت می‌توان قطر قطره را به کمک رابطه زیر به دست آورد:

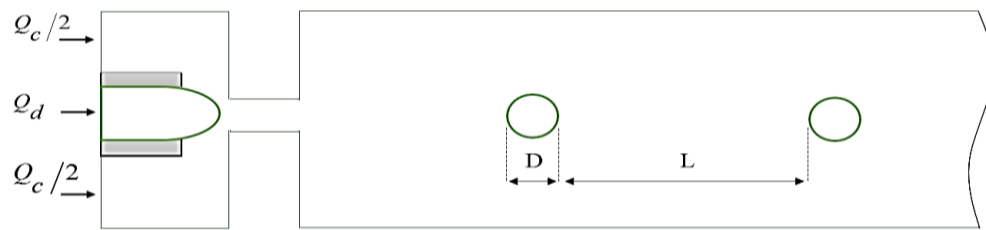
$$D = 2\sqrt{\frac{A_{\phi=0.5}}{\pi}} \quad (42-2)$$

در نتیجه قطر مؤثر قطره توسط رابطه (۴۳-۲) به دست می‌آید. در واقع قطر زیر، قطر یک قطره کروی است که حجمی معادل با قطره تشکیل شده در نتایج تجربی دارد.

$$d_{eff} = 2\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\Omega} (\phi > 0.5) d\Omega} \quad (43-2)$$

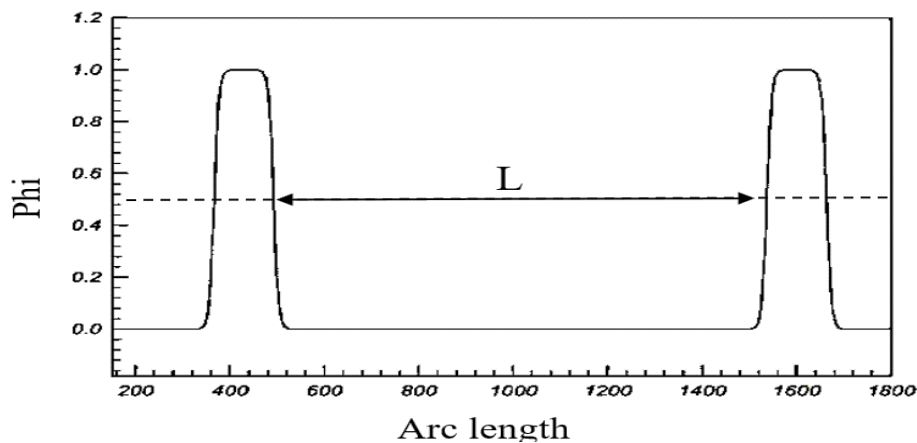
برای اندازه‌گیری فاصله بین دو قطره متوالی تشکیل شده (شکل ۱۰-۲) می‌توان نمودار توزیع پارامتر \emptyset

در کانال واقع در پایین دست اریفیس را استخراج کرده که در آن صورت این توزیع به صورت شکل ۱۱-۲ خواهد بود.



شکل ۲-۱۰: مبنای اندازه‌گیری قطر و فاصله بین قطرات.

شکل ۲-۱۱ نحوه توزیع پارامتر Φ در پایین دست کانال و در محدوده‌ای که دو قطره ایجاد شده را نشان می‌دهد. در بازه‌هایی که مقدار Φ برابر صفر است فقط فاز پیوسته وجود دارد و در بازه‌هایی که مقدار Φ برابر با مقدار ۱ است در آنجا فقط شاهد فاز گسسته خواهیم بود. در محدوده‌ای که مقدار Φ به نرمی بین ۰ تا ۱ تغییر می‌کند در واقع ناحیه‌ای است که شاهد مرز بین دو فاز هستیم. در مطالعات انجام شده عموماً مرز بین دو فاز را جایی در نظر می‌گیرند که مقدار Φ برابر با ۰,۵ است. لذا برای تعیین فاصله بین قطرات می‌توان نقاطی که در آن‌ها مقدار Φ برابر با ۰,۵ است را یافته و به صورت نشان داده شده در شکل ۲-۱۱ فاصله قطرات را تعیین کرد. این روند را برای تعیین اندازه قطره نیز می‌توان انجام داد.



شکل ۲-۱۱: نمودار پارامتر Φ در مقطع میانی قطره

۳- فصل سوم: فرآیند جدایش قطره از فاز گسسته نیوتنی

داخل فاز پیوسته نیوتنی

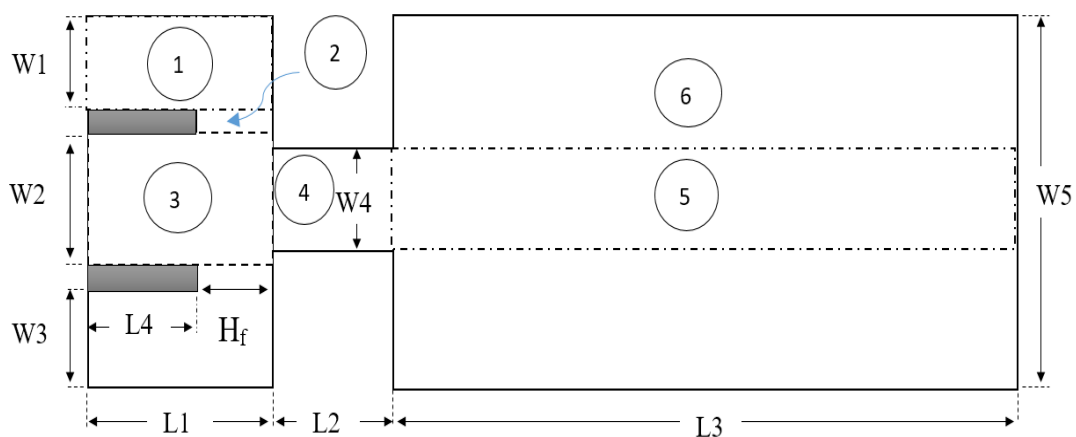
۳-۱- مقدمه

۳-۱-۱- سیالات نیوتنی

سیال نیوتنی ماده‌ای است که فاقد تنش تسلیم باشد و تنش برشی در آن به صورت خطی با نرخ برش تغییر کند. در این سیالات، نسبت تنش برشی به نرخ برش مقدار ثابتی است که این مقدار ثابت، لزجت نامیده می‌شود. چنانچه سیالی یکی از شرایط سیال نیوتنی را نداشته باشد سیال غیرنیوتنی نامیده می‌شود.

۳-۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

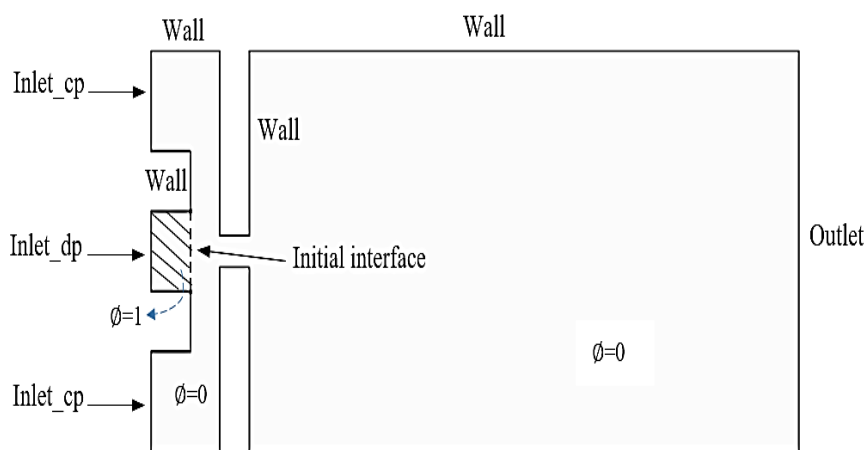
دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده در این پژوهش در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. در این شبیه سازی عرض کانال‌های ورودی فاز پیوسته ($W1$ و $W3$) برابر با $250\mu\text{m}$ و نیز عرض کانال ورودی فاز گسسته ($W2$) برابر با $200\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. عرض اریفیس ($W4$) برابر با $80\mu\text{m}$ و عرض کانال واقع در پایین دست اریفیس نیز ($W5$) برابر با $1000\mu\text{m}$ است.



شکل ۱-۳: نمایی از میکروکانال بررسی شده در این پژوهش و قسمت‌های مختلف آن.

فاصله انتهای کانال تزریق فاز گسسته از ابتدای اریفیس (H_f) برابر با $150\mu\text{m}$ ، طول کانال بیرونی واقع در بالادست اریفیس (L_1) برابر با $350\mu\text{m}$ ، طول اریفیس (L_2) برابر با $150\mu\text{m}$ ، همچنین طول کانال واقع در پایین دست اریفیس (L_3) برابر با $2800\mu\text{m}$ بوده و عمق تمامی میکروکانال‌ها برابر با $86\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. همچنین شرایط مرزی مسئله در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در لحظه $t=0$ کانال تزریق میانی به‌طور کامل توسط سیال فاز گسسته پر شده ($\phi=1$) و باقی دامنه محاسباتی شامل کانال‌های تزریق کناری،

اریفیس و کانال واقع در پایین دست اریفیس به طور کامل توسط فاز پیوسته ($\phi=0$) پر شده است. مرز مشترک اولیه بین دو فاز در لحظه $t=0$ که در این تحقیق در نظر گرفته شد نیز در انتهای کانال تزریق میانی و به کمک خط چین در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. در این تحقیق فرض شده جریان تراکم ناپذیر و هم‌دما است و از نیروی گرانش به دلیل کوچک بودن عدد باند صرف نظر شده است. همچنین از تغییرات خواص فیزیکی از جمله چگالی، لزجت و کشش سطحی، صرف نظر شده است. در این تحقیق فرض شده است که کشش سطحی موجود در مرز مشترک میان دو فاز، مقداری ثابت بوده و با زمان تغییر نمی‌کند.



شکل ۲-۳: شرایط مرزی اعمال شده بر میکروکانال

در مرزهای ورودی هر دو فاز جریان با سرعت یکنواخت وارد می‌شود. از آنجایی که مرز ورودی کانال تزریق میانی همیشه حاوی سیال فاز گسسته است لذا در این مرز مقدار کسر حجمی سیال گسسته برابر با یک در نظر گرفته شد. همچنین از آنجایی که مرز ورودی کانال‌های تزریق کناری همیشه حاوی سیال فاز پیوسته است، در این مرز نیز مقدار کسر حجمی سیال فاز گسسته برابر با صفر در نظر گرفته شده است. در دیواره‌های میکروکانال شرط دیواره تر شونده^۱ با زاویه تماس برابر با مقدار 145° درجه و مقدار β برابر با اندازه المان شبکه ($\beta = h$) اعمال شد. در خروجی هندسه نیز شرط فشار خروجی نسبی صفر بدون تنش لزج اعمال شد. فاز پیوسته یک محلول آبی با لزجت و چگالی نزدیک به آب هست که از طریق دو کانال کناری به

^۱ Wetted wall

هندسه مسئله تزریق می شود. در شبیه سازی انجام شده برای فاز پیوسته از محلول آبی نیوتنی سدیم دو دسیل سولفات^۱ با درصد وزنی SDS 2% که یک محلول حاوی سورفکتانت است استفاده شد. همچنین برای فاز گسسته از دو نوع روغن سیلیکون با لزجت دینامیکی و کشش سطحی مختلف مطابق با جدول ۱-۳ استفاده شده است [۵۲].

جدول ۱-۳: خواص سیالات استفاده شده در بخش نیوتنی

سیالات	چگالی (kg/m^3)	لزجت دینامیکی (Pa.s)	کشش سطحی بین دو فاز (N/m)
روغن سیلیکون	۹۶۰	۰,۰۵	۰,۰۰۴۸
روغن سیلیکون	۹۶۰	۰,۱	۰,۰۰۳۸
SDS 2% (محلول آبی)	۱۰۰۰	۰,۰۰۱	-

روغن سیلیکون که نسبت به محلول آبی دارای لزجت خیلی بیشتری است، به عنوان فاز گسسته از طریق کانال میانی به هندسه تزریق می شود و بعد از خروج از کانال میانی توسط فاز پیوسته فشرده شده و پس از عبور از اریفیس، قطرات فاز گسسته تشکیل شده و در کانال عریض واقع در پایین دست اریفیس به حرکت خود ادامه می دهند. در این تحقیق مسئله به صورت دوبعدی و توسط نرم افزار تجاری کام سول مدل شده است. در ورودی کانال ها سرعت های متوسط اعمال شده که این سرعت ها از دبی فازها در کار آزمایشگاهی محاسبه شده اند. به طور مثال برای فاز گسسته سرعت متوسط $6.460 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ معادل با دبی ثابت $Q_d = 0.04 \text{ ml/h}$ در کار آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است در حالی که برای فاز پیوسته سرعت های متوسط مختلفی معادل با Q_c مختلف در کار آزمایشگاهی اعمال شده است (برای مثال سرعت متوسط $1.293 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ معادل با دبی ثابت $Q_c = 50Q_d$ در کار آزمایشگاهی).

^۱ Sodium Dodecyle Sulphate (SDS)

۳-۳- شبکه‌بندی و استقلال از شبکه‌بندی

اولین قدم در حل مناسب معادلات، شبکه‌بندی دامنه محاسباتی است. در دینامیک سیالات محاسباتی عموماً دو نوع شبکه‌بندی شامل شبکه‌بندی با ساختار و شبکه‌بندی بی ساختار وجود دارد. انتخاب هر یک از این شبکه‌بندی‌ها تابع هندسه و شرایط مسئله بوده و دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند. عموماً در شبکه‌بندی‌های با ساختار، ساختار اطلاعاتی در شبکه واضح بوده و همسایگی‌ها در آن مشخص و قانونمند است. در این نوع شبکه‌بندی‌ها حجم محاسبات کمتر شده و حجم ذخیره‌سازی اطلاعات در هنگام حل معادلات کاهش می‌یابد. در شبکه‌بندی بی ساختار همسایگی‌ها مشخص و قانونمند نیست از این رو این شبکه‌بندی نیازمند حجم بالای ذخیره‌سازی اطلاعات برای حل معادلات است. عموماً استفاده از شبکه‌بندی با ساختار در هندسه‌های پیچیده مشکل بوده و با دشواری‌های فراوانی همراه است. لذا اغلب در هندسه‌های ساده که در آن ایجاد شبکه‌بندی با ساختار راحت‌تر است سعی می‌شود از این نوع شبکه‌بندی استفاده شود. در هندسه‌های پیچیده در صورت عدم امکان ایجاد شبکه‌بندی با ساختار، از شبکه‌بندی بی ساختار استفاده می‌کنند.

در این تحقیق از یک شبکه‌بندی مربعی ثابت و با ساختار که در آن شبکه‌بندی با فصل مشترک بین دو فاز حرکت نمی‌کند، استفاده شده است. به‌طور کلی کوچک کردن سلول‌های شبکه از یک سو سبب دقیق‌تر شدن حل عددی می‌گردد و از سوی دیگر هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. در شبکه‌بندی ایجادشده نواحی اریفیس و همچنین ناحیه میانی کانال قرارگرفته در پایین دست اریفیس و ناحیه بین کانال تزریق میانی و اریفیس که در آن‌ها قطرات تشکیل شده و حرکت می‌کنند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا در این ناحیه‌ها به‌منظور دست یافتن به جواب دقیق‌تر و کاهش حجم و زمان محاسبات، شبکه‌بندی را ریزتر کرده و در دیگر نواحی که از اهمیت کمتری برخوردار هستند شبکه‌بندی درشت‌تری ایجاد شد. در جدول ۳-۲ تعداد سلول‌های بخش‌های مختلف که در شکل ۳-۱ نشان داده شد، برای هر یک از شبکه‌بندی‌ها ارائه شده است.

جدول ۲-۳: مشخصات شبکه بندی های محاسباتی

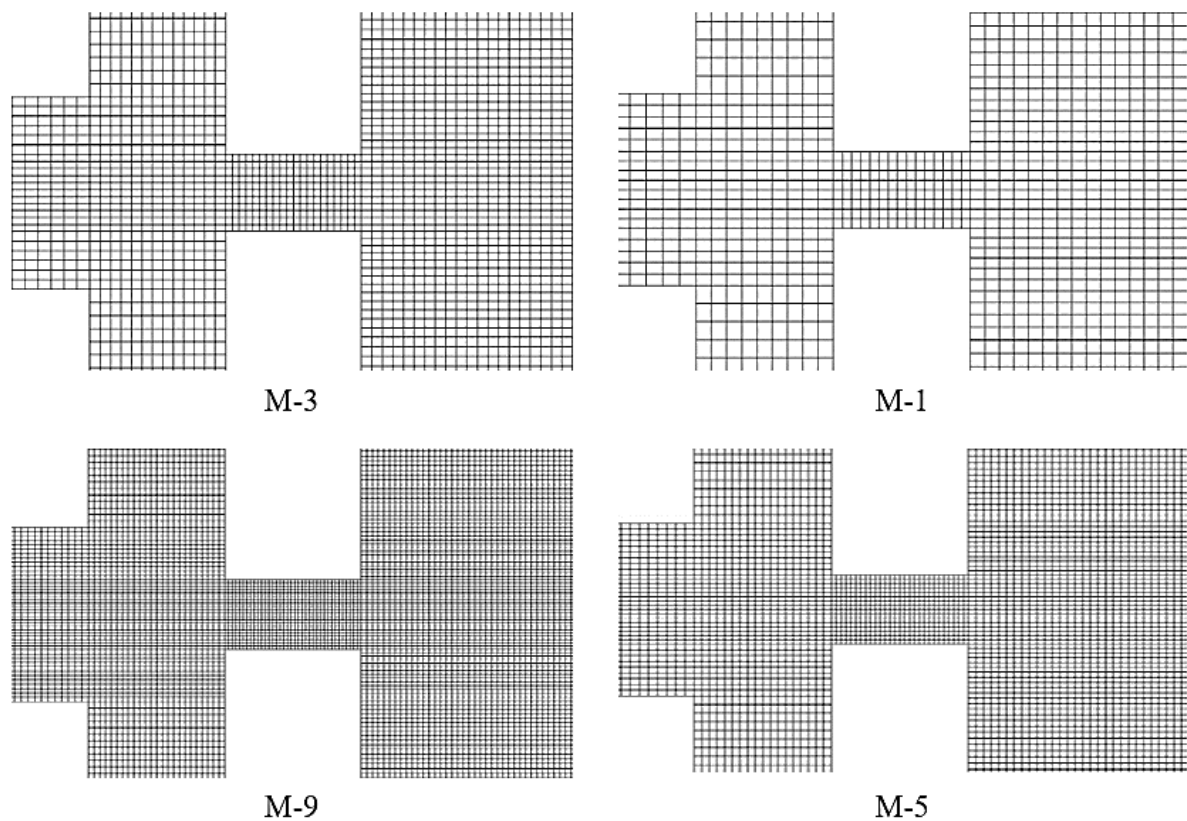
نوع شبکه	تعداد سلول ها در ناحیه ۱	تعداد سلول ها در ناحیه ۲	تعداد سلول ها در ناحیه ۳	تعداد سلول ها در ناحیه ۴	تعداد سلول ها در ناحیه ۵	تعداد سلول ها در ناحیه ۶	تعداد کل سلول ها
M-1	۲۰۴	۷۲	۳۶۰	۱۲۰	۱۴۱۶	۶۱۹۵	۱۴۸۳۸
M-2	۲۸۰	۹۹	۵۲۸	۱۸۰	۲۱۰۰	۸۸۲۰	۲۱۲۰۶
M-3	۳۸۴	۱۴۳	۶۲۱	۲۲۰	۲۶۴۰	۱۱۵۲۰	۲۷۵۷۵
M-4	۵۰۴	۱۹۵	۹۲۸	۲۹۹	۳۶۴۰	۱۵۶۸۰	۳۷۶۲۵
M-5	۷۲۶	۲۷۰	۱۲۹۲	۴۴۸	۵۳۷۶	۲۲۵۱۲	۵۴۱۳۴
M-6	۸۸۸	۳۴۰	۱۵۹۶	۵۵۸	۶۷۱۴	۲۷۶۰۲	۶۶۵۲۸
M-7	۱۰۱۴	۳۷۸	۱۸۴۵	۶۲۷	۷۵۰۵	۳۱۲۰۵	۷۵۱۷۱
M-8	۱۱۷۶	۴۳۷	۲۰۱۶	۷۰۰	۸۴۰۰	۳۵۲۸۰	۸۴۹۰۲
M-9	۱۲۷۶	۴۸۰	۲۲۹۵	۷۷۷	۹۴۰۸	۳۹۸۷۲	۹۵۷۳۶
M-10	۱۴۵۷	۵۴۶	۲۶۹۵	۹۲۰	۱۱۰۴۰	۴۶۰۸۰	۱۱۰۸۲۱
M-11	۲۰۳۵	۷۵۰	۳۵۹۱	۱۲۶۹	۱۵۱۲۰	۶۲۷۲۰	۱۵۰۹۹۰

در جدول ۳-۳ قطر بی بعد و میزان خطای نسبی نتایج عددی حاصل از تحقیق حاضر نسبت به داده‌های تجربی در شبکه‌بندی‌های مختلف آمده است.

جدول ۳-۳: قطر بی بعد و میزان خطا نسبت به داده‌های تجربی در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ در شبکه‌های مختلف

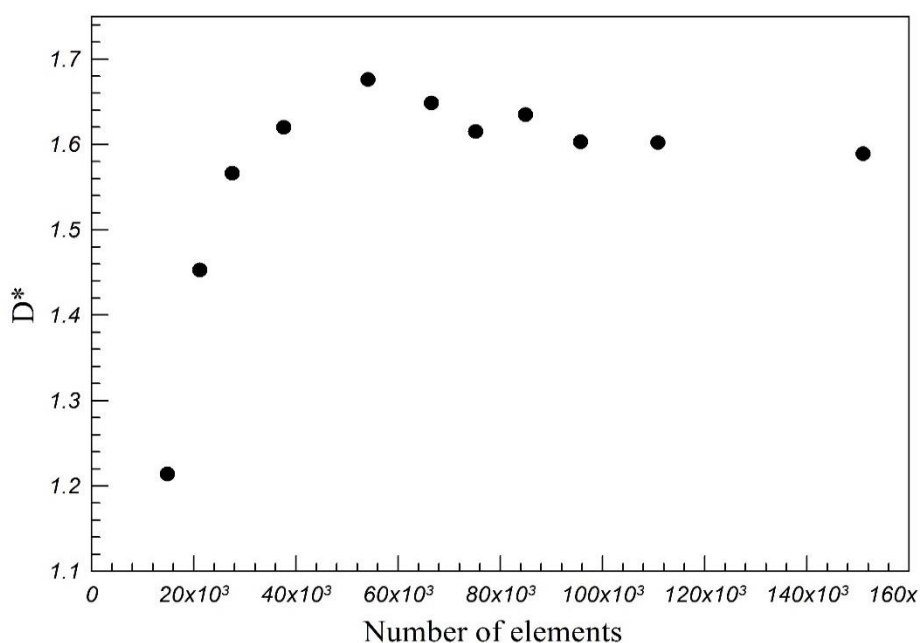
شبکه	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8	M-9	M-10	M-11
تعداد سلول	۱۴۸۳۸	۲۱۲۰۶	۲۷۵۷۵	۳۷۶۲۵	۵۴۱۳۴	۶۶۵۲۸	۷۵۱۷۱	۸۴۹۰۲	۹۵۷۳۶	۱۱۰۸۲۱	۱۵۰۹۹۰
D* تحقیق حاضر	۱,۲۱۴	۱,۴۵۳	۱,۵۶۶	۱,۶۲۰	۱,۶۷۶	۱,۶۴۸	۱,۶۱۵	۱,۶۳۵	۱,۶۰۳	۱,۶۰۲	۱,۵۸۹
خطا نسبت به نتایج تجربی [۵۲]	٪۲۶	۱۱٪	۴,۱٪	۰,۸٪	۲,۶٪	۰,۹٪	۱,۱٪	۰,۱٪	۱,۸۳٪	۱,۸۹٪	۲,۶۹٪

همان طور که در جدول ۳-۳ مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد سلول‌ها تغییرات اندازه قطره‌ها در شبکه‌بندی‌های ریزتر کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد سلول خطای نسبی نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی نیز کاهش می‌یابد، به طوری که در شبکه M-5 و شبکه‌های ریزتر از آن خطای ناچیزی نسبت به نتایج تجربی دیده می‌شود. در شکل ۳-۳ شبکه‌بندی صورت گرفته در ناحیه اریفیس و اطراف آن برای شبکه‌بندی‌های ذکر شده بزرگ‌نمایی شده است. به دلیل اینکه در ناحیه اریفیس و اطراف آن شاهد تغییرات شدید در انحنای سطح مشترک بین دو فاز خواهیم بود و این ناحیه و شبکه‌بندی آن در نتایج بسیار تأثیرگذار است، لذا این ناحیه دارای شبکه‌بندی ریزتری نسبت به دیگر ناحیه‌ها است.



شکل ۳-۳: شبکه‌بندی در ناحیه اریفیس و اطراف آن

در شکل ۳-۴ اندازه قطرات تشکیل شده در شبکه‌بندی‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، اندازه قطرات در شبکه M-9 تفاوت کمی با شبکه M-10 و شبکه M-11 دارد. بدیهی است، افزایش تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی، سبب افزایش دقت حل عددی و کاهش خطای کل محاسبات می‌گردد؛ ولی باید توجه داشت که این امر سبب افزایش شدید زمان و حجم محاسبات نیز می‌شود. با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول ۳-۳ و شکل ۳-۴، به این نتیجه خواهیم رسید که می‌توان با تقریب خوبی از شبکه M-9 برای استخراج نتایج استفاده نمود. لازم به ذکر است کلیه نتایج ارائه‌شده در بخش نیوتنی این تحقیق با استفاده از شبکه M-9 حاصل شده است.

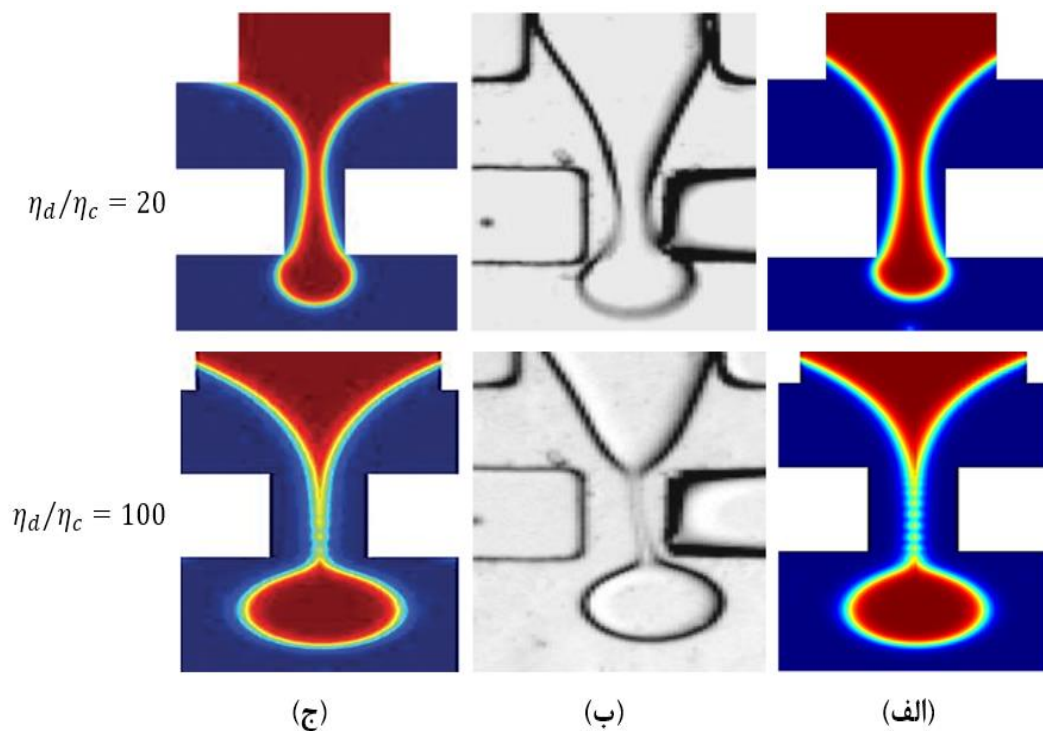


شکل ۳-۴: مقایسه قطر بی‌بعد قطرات در شبکه‌بندی‌های مختلف در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۴- ارزیابی صحت نتایج

در این بخش به منظور صحت سنجی دقت روش عددی استفاده شده، نتایج به دست آمده از روش عددی این پژوهش با نتایج تجربی نای و همکاران [۵۲] و همچنین نتایج عددی لی و همکاران [۳۸] مقایسه شد. در این تحقیق دبی فاز گسسته ثابت و برابر $Q_d = 0.04 \text{ ml/h}$ در نظر گرفته شده است در حالی که دبی فاز پیوسته دارای مقادیر مختلفی است و جدایش قطره در دو نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ و $\eta_d/\eta_c = 100$ مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج نای و همکاران [۵۲] مقادیر کوچک Ca_c نشان‌دهنده این است که سازوکار جدایش عمدتاً تحت رژیم فشردگی و یا تحت رژیم چکه کردن روی می‌دهد. نای و همکاران همچنین به این نکته اشاره کرده‌اند که نسبت لزجت بین دو فاز نقش مهمی در تعیین الگوی جدایش دارد. در شکل ۳-۵ تصویری از فرآیند تشکیل قطره در لزجت‌های مختلف فاز قطره در $\eta_d/\eta_c = 20$ و $\eta_d/\eta_c = 100$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d = 20$ نشان داده شده است. در این شکل عدد موینگی فاز پیوسته برابر با $Ca_c = 0.0067$ است. در شکل ۳-۵ نتایج تجربی حاصل از پژوهش نای و همکاران [۵۲] و همچنین نتایج عددی حاصل از پژوهش لی و همکاران [۳۸] در کنار نتایج حاصل از پژوهش عددی حاضر در کنار هم قرار گرفته است و همان‌طور که مشاهده می‌شود به لحاظ کیفی تطابق خوبی بین نتایج عددی تحقیق حاضر و نتایج تجربی و عددی ذکر شده

وجود دارد.



شکل ۳-۵: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر به ازای دو نسبت لزجت مختلف در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 20$ و $Cac=0.0067$. (الف) نتایج پژوهش حاضر (ب) نتایج آزمایشگاهی نای و همکاران [۵۲] (ج) نتایج عددی لی و همکاران [۳۸].

جدول ۳-۵ قطر بی بعد قطرات حاصل از شبیه سازی برحسب نسبت دبی های مختلف و به ازای $\eta_d/\eta_c = 50$ و $\eta_d/\eta_c = 100$ ارائه شده است. همچنین خطای نسبی نسبت به نتایج تجربی و عددی نیز که در این جداول ارائه شده است نشان می دهد نتایج تحقیق حاضر به لحاظ کمی مطابقت خوبی با نتایج تجربی دارد. در نتایج عددی و در نسبت دبی های ۱۰ و ۲۰ چندپخشی^۱ قطرات مشاهده شد که این حالت در نتایج تجربی نای [۵۲] و نتایج عددی لی [۳۸] نیز گزارش شده است. این حالت زمانی اتفاق می افتد که پس از جدایش قطره اصلی، دنباله فاز گسسته که در اریفیس حضور دارد به عقب باز نمی گردد و در ناحیه اریفیس باقی مانده و شکل باریک به خود می گیرد. این باریکه ی فاز گسسته در نهایت شکسته شده و چندین قطره با

^۱ Poly dispersity

اندازه‌های کوچک‌تر از قطره اصلی ایجاد می‌شود.

جدول ۳-۴: نتایج شبیه‌سازی در نسبت دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی به ازای $\eta_d/\eta_c = 50$

خطای نسبی نسبت به نتایج عددی	خطای نسبی نسبت به نتایج تجربی	D* (نتایج عددی) [۳۸]	D* (نتایج تجربی) [۵۲]	D* (مطالعه حاضر)	نسبت دبی
%۴,۶	%۲,۸	۲,۰۳۰	۱,۸۸۵	۱,۹۳۷	۱۰
-	-	-	-	۰,۸۳۷	
%۳,۸	%۴,۸	۱,۶۶۹	۱,۶۵۳	۱,۷۳۲	۲۰
%۴,۵	-	۰,۶۴۷	-	۰,۶۱۸	
%۹	%۱,۸	۱,۷۶۱	۱,۶۳۳	۱,۶۰۳	۵۰
-	%۲	-	۱,۶۱۶	۱,۵۸۴	۶۰
-	%۲,۷	-	۱,۶۰۳	۱,۵۵۹	۸۰
%۴,۹	%۲	۱,۶۲۶	۱,۵۸۱	۱,۵۴۶	۱۰۰

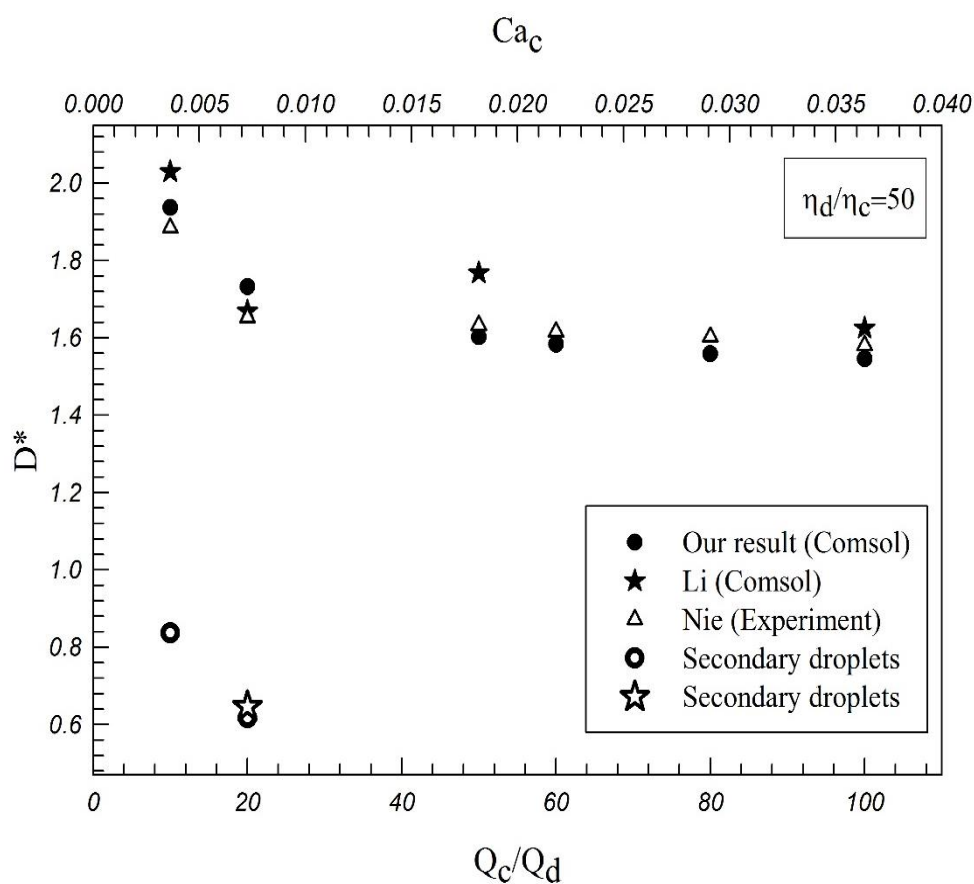
جدول ۳-۵: نتایج شبیه‌سازی در نسبت دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی به ازای نسبت

لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$

خطای نسبی نسبت به نتایج عددی	خطای نسبی نسبت به نتایج تجربی	D* (نتایج عددی) [۳۸]	D* (نتایج تجربی) [۵۲]	D* (مطالعه حاضر)	نسبت دبی
%۲,۴	%۷,۳	۱,۹۴۶	۱,۷۷۰	۱,۹۰۰	۱۰
%۱۰,۷	%۳۳	۰,۹۸۱	۱,۳۱۵	۰,۸۷۶	
-	-	-	-	۰,۷۹۵	
%۵,۶	%۸,۹	۱,۷۷۶	۱,۷۲۳	۱,۸۷۶	۲۰

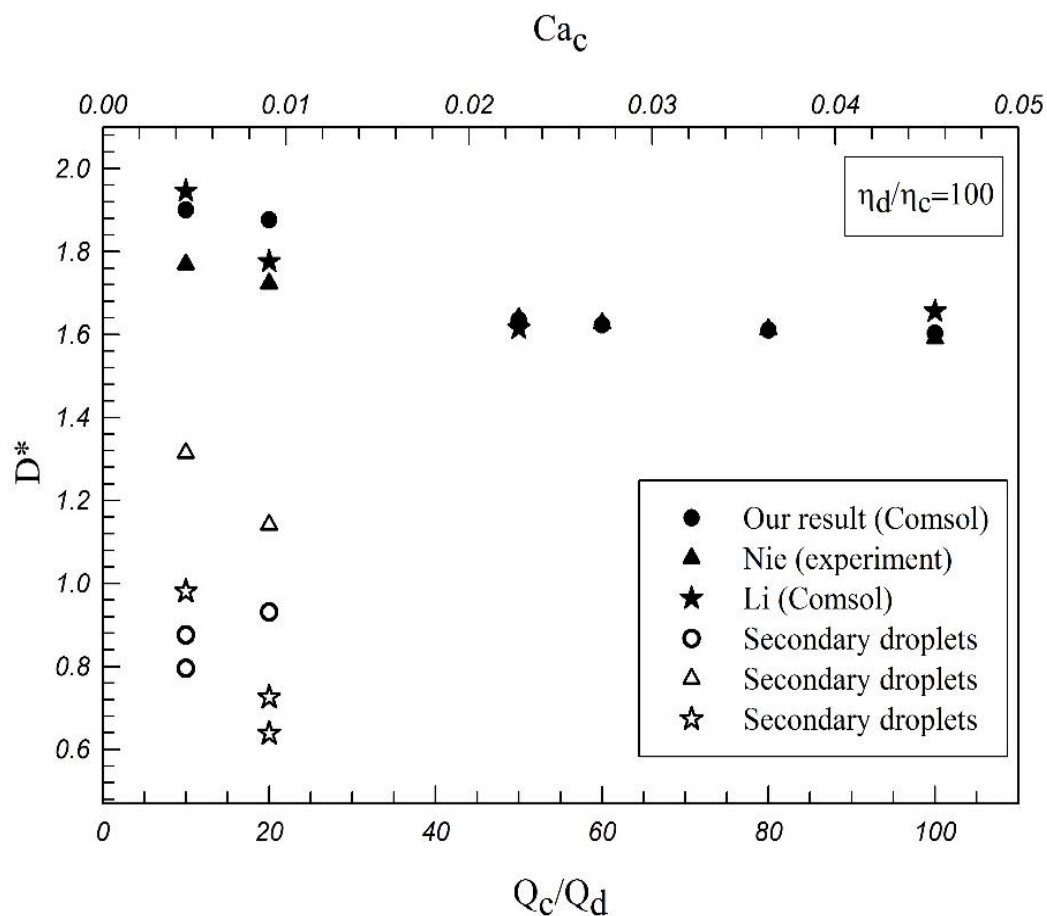
۰,۹۳۱	۱,۱۴۲	۰,۷۲۶	%۱۸,۵	%۲۸,۲	
-	-	۰,۶۳۹	-	-	
۱,۶۳۵	۱,۶۳۹	۱,۶۶۱	%۲	%۱,۵	۵۰
۱,۶۲۳	۱,۶۲۷	-	%۲	-	۶۰
۱,۶۱۱	۱,۶۱۲	-	%۰,۰۶	-	۸۰
۱,۶۰۳	۱,۵۹۱	۱,۶۱۱	%۰,۸	%۰,۵	۱۰۰

در شکل ۳-۶ اندازه قطرات به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ و برحسب نسبت دبی‌های مختلف و اعداد موینگی معادل با هر نسبت دبی ارائه شده است. نقاط نشان داده شده با مثلث، نشان‌دهنده نتایج تجربی نای و همکاران [۵۲] است. نای و همکاران در نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ حالت چندپخشی گزارش نکردند. نقاطی که با ستاره نشان داده شده بیانگر نتایج عددی لی و همکاران [۳۸] است. نتایج آن‌ها در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 20$ حالت چندپخشی با دو اندازه قطره را نشان داد و در نسبت‌های دیگر قطرات به صورت تک‌پخش گزارش شده‌اند. نقاط دایره نشان‌دهنده نتایج عددی تحقیق حاضر است. نتایج تحقیق حاضر در نسبت دبی‌های ۱۰ و ۲۰ حالت چندپخشی با دو اندازه قطره را نشان داد. همان‌طور که شکل ۳-۶ نشان می‌دهد تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی تحقیق حاضر و نتایج تجربی به خصوص در اعداد موینگی و نسبت دبی‌های بالا مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۶: بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و دیگر نتایج عددی به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

شکل ۳-۷ نشان‌دهنده اندازه قطرات به ازای نسبت لزجت ۱۰۰ برحسب نسبت دبی‌های مختلف و اعداد موینگی معادل با هر نسبت دبی است. نقاط مثلثی نشان‌دهنده نتایج تجربی نای و همکاران [۵۲]، نقاط نشان داده شده با ستاره بیانگر نتایج عددی لی و همکاران [۳۸] و نقاط دایره نشان‌دهنده نتایج عددی تحقیق حاضر است. نای و همکاران در آزمایش‌های خود تنها در نسبت دبی‌های ۱۰ و ۲۰ حالت چندپخشی با دو اندازه مختلف قطرات مشاهده کردند. آن‌ها در دیگر نسبت‌های دبی حالت تک‌پخشی را گزارش کردند. نتایج عددی لی و همکاران در نسبت دبی ۱۰ حالت چندپخشی با دو اندازه مختلف قطرات و در نسبت دبی ۲۰ حالت چندپخشی با سه اندازه مختلف قطرات را نشان می‌دهد. تحقیق حاضر در نسبت دبی ۱۰ حالت چندپخشی با سه اندازه مختلف قطرات و در نسبت دبی ۲۰ حالت چندپخشی با دو اندازه مختلف قطرات را نشان می‌دهد. شکل ۳-۷ بیانگر تطابق بالا بین نتایج عددی این پژوهش و نتایج تجربی نای و همکاران [۵۲] به‌خصوص در نسبت دبی و اعداد موینگی بالا است.



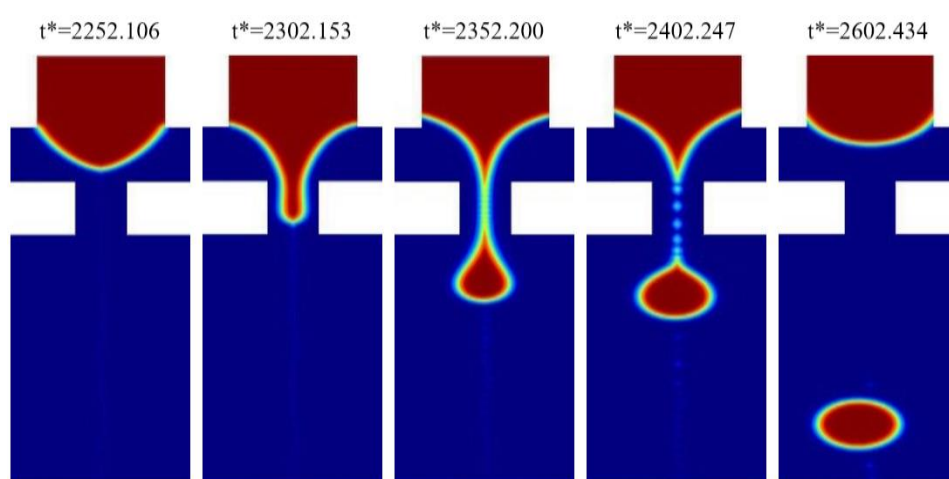
شکل ۳-۷: بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و دیگر نتایج عددی به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$. نکته جالب توجه که در شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت دبی در محدوده ذکر شده، تغییرات چندانی در اندازه قطرات مشاهده نمی‌شود و این بیانگر این است که رویکردهای معمول برای کنترل اندازه قطرات مانند کنترل نسبت دبی بین دو فاز در این شرایط چندان مؤثر نبوده و در چنین مواردی رویکردهای دیگری مورد نیاز است. در هندسه‌های جریان متمرکز شده معمول مشاهده شده است که کنترل اندازه قطرات هنگامی که لزجت فاز گسسته از لزجت فاز پیوسته خیلی بزرگ‌تر باشد، ممکن نبوده و همچنین برای آن تفسیر فیزیکی توسط مطالعات آزمایشگاهی ارائه نشده است.

نتایج حاصل از این شبیه‌سازی و نیز نتایج نای و همکاران [۵۲] نیز نشان می‌دهد که در $\eta_d/\eta_c = 50$ و $\eta_d/\eta_c = 100$ به ازای نسبت دبی‌های پایین شاهد قطرات ثانویه نسبتاً کوچک‌تر در کنار قطره اصلی خواهیم بود. در واقع بعد از جدایش قطره اصلی، قطره ثانویه که در مقایسه با قطره اصلی به مراتب قطر کمتری دارد شروع به جدایش کرده و بافاصله بسیار اندکی از قطره اصلی شروع به حرکت می‌کند. در واقعیت وجود

سورفکتانت در فاز پیوسته مانع از ادغام قطره اصلی و قطره ثانویه می‌شود و این دو قطره در پایین دست اریفیس به حرکت خود ادامه می‌دهند. در شبیه‌سازی‌هایی که در نسبت دبی‌های پایین انجام شد این موضوع به وضوح دیده شد. البته در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده قطرات ثانویه بعد از عبور از گلویی به قطره اصلی نزدیک شده و بعد از مدتی با قطره اصلی ادغام می‌شدند. دلیل این‌که در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته این اتفاق روی می‌دهد عدم وجود روش عددی خاصی برای اعمال کامل اثر سورفکتانت بر روی سیالات است. بر همین اساس در ادامه برای جلوگیری از این اتفاق، برای گزارش فاصله قطرات از نسبت دبی‌هایی که در آن قطرات ثانویه ایجاد صرف نظر شده و تنها در نسبت دبی‌هایی که در آن‌ها حالت تک‌پخشی دیده شد، استفاده شده است.

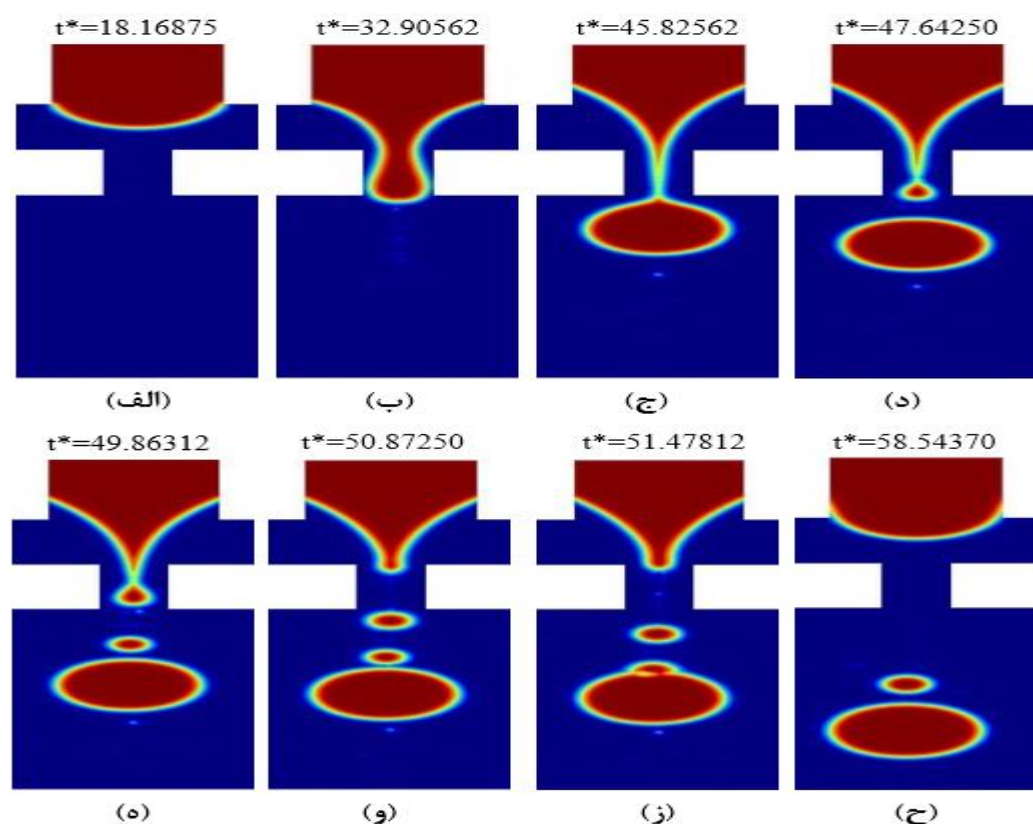
۳-۵- تک‌پخشی و چندپخشی

قطرات تولید شده در هندسه‌های جریان متمرکز شده عموماً حالت تک‌پخشی دارند. در شکل ۳-۸ فرآیند جدایش قطره در حالت تک‌پخشی نشان داده شده است. در این حالت قطراتی که تولید می‌شوند تقریباً دارای اندازه‌های یکسانی هستند. نیروی برشی شدید باعث جدا شدن قطره از باریکه کشیده شده فاز گسسته می‌شود. پس از جدایش قطره، باریکه فاز گسسته به عقب برگشته و دوباره فرآیند جدایش تکرار می‌شود.



شکل ۳-۸: فرآیند جدایش تک‌پخشی قطرات در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$ با $ca=0.02125$ در شرایط جریانی خاصی قطرات تولیدشده در هندسه‌های جریان متمرکز شده دارای چندپخشی

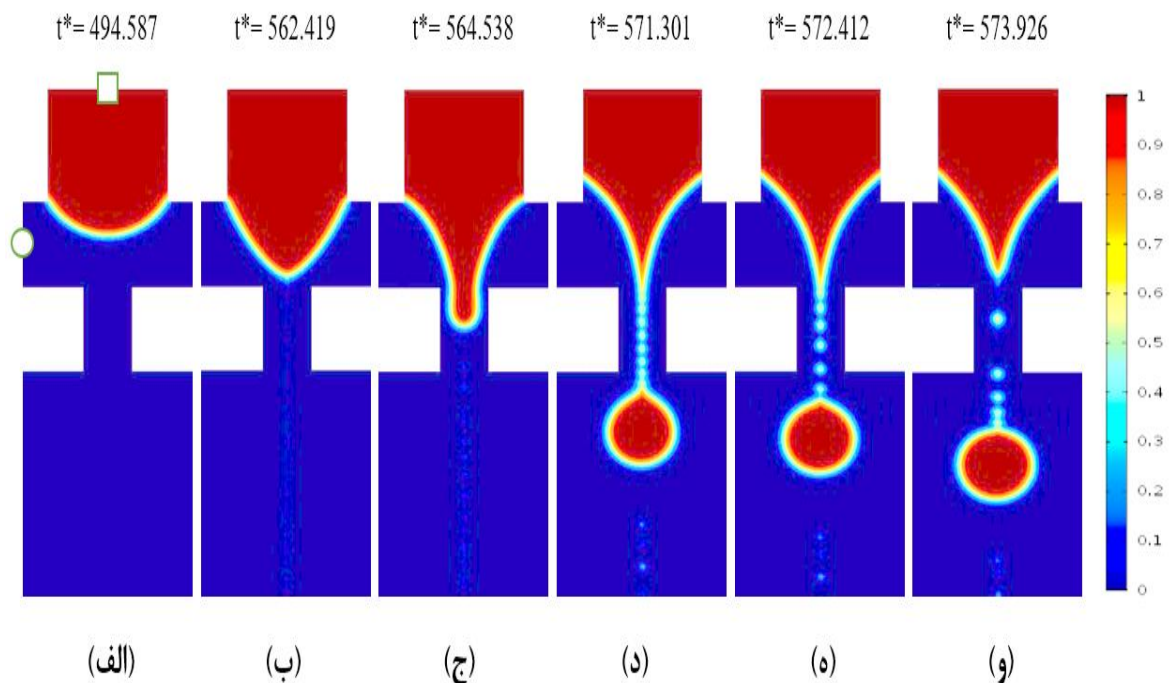
می‌شوند. در این حالت در هر دوره جدایش، چندین قطره با اندازه‌های مختلف مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹-۳ مشاهده می‌شود، در این حالت پس از جدایش قطره اولیه قطرات ثانویه با اندازه‌های مختلف و کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. در حالت چندپخشی باریکه فاز گسسته پس از جدایش قطره اصلی به عقب باز نمی‌گردد، بلکه در داخل اریفیس به رشد خود ادامه داده و تا زمانی که همه فاز گسسته که در داخل اریفیس است گسسته شود قطرات ثانویه تشکیل می‌شوند. قطرات ثانویه کوچک‌تر از قطره اصلی بوده و قطره اصلی نزدیک به ابعاد اریفیس خواهد بود. به دلیل وجود سورفکتانت و با توجه به این که مولکول‌های سورفکتانت به دلیل این که پدیده‌ای سطحی هستند و بر روی سطوح تجمع می‌یابند، قطرات چسبیده به هم نباید باهم ادغام شوند. این رفتار در مطالعات آزمایشگاهی نیز مشاهده شده است. همان‌طور که گفته شد، در روش‌های عددی هنوز روشی برای اعمال این پدیده ارائه نشده است و به همین دلیل همان‌طور که در شکل ۹-۳ مشاهده می‌شود قطره دوم بعد از نزدیک شدن به قطره اصلی، با آن ادغام می‌شود.



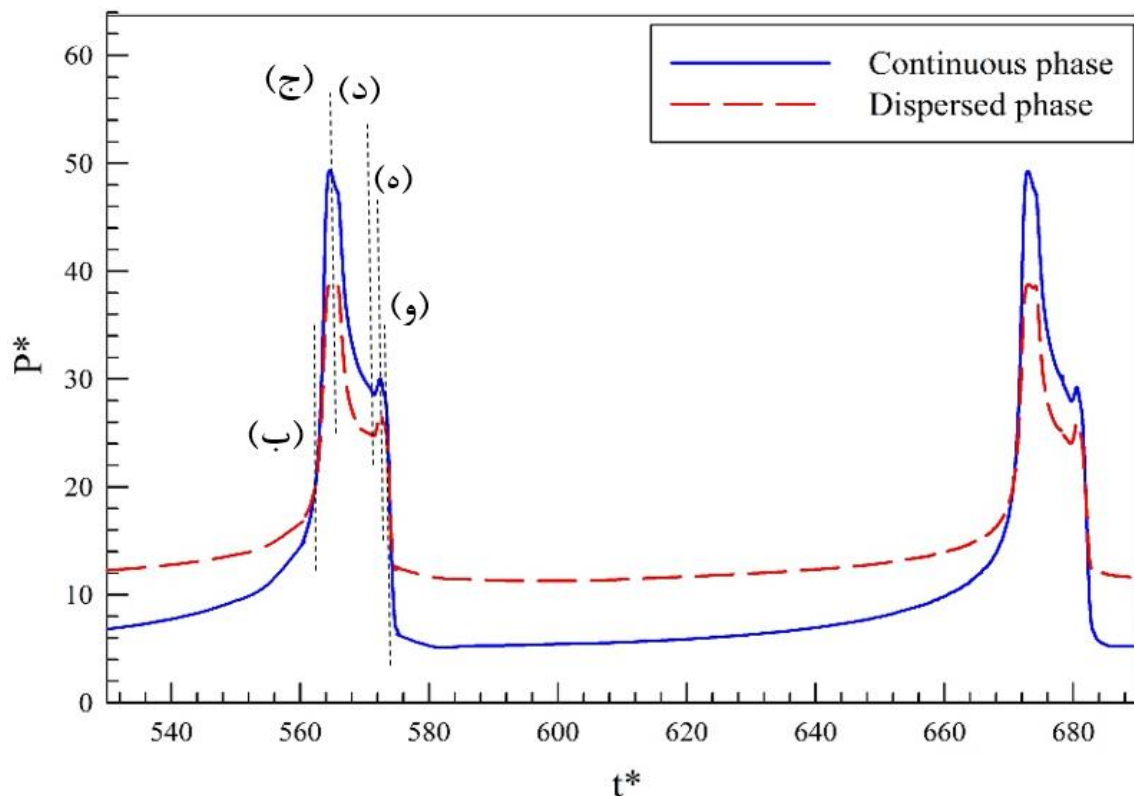
شکل ۹-۳: فرآیند جدایش چندپخشی قطرات در $Q_c/Q_d = 10$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$ با $Ca_c = 0.00425$

۳-۶- فرآیند جدایش قطره در رژیم چکه‌ای و توزیع فشار بین فازها

نیروهای اثرگذار بر تشکیل قطره شامل نیروهای فشاری، نیروی حاصل از کشش سطحی و نیروی لزج می‌باشند. به دلیل پیچیدگی فرآیند جدایش قطره، مقادیر نیروی کشش سطحی و نیروی لزج برشی با توجه به زمان و موقعیت مکانی سطح مشترک متغیر است. در شکل ۳-۱۰ فرآیند جدایش قطره در زمان‌های مختلف نشان داده شده است. نقاط دایره و مربع نشان‌دهنده مکان نقاطی هستند که در آن نمودار توزیع فشار فازهای پیوسته و گسسته در زمان‌های مختلف در شکل ۳-۱۱ ترسیم شده است.



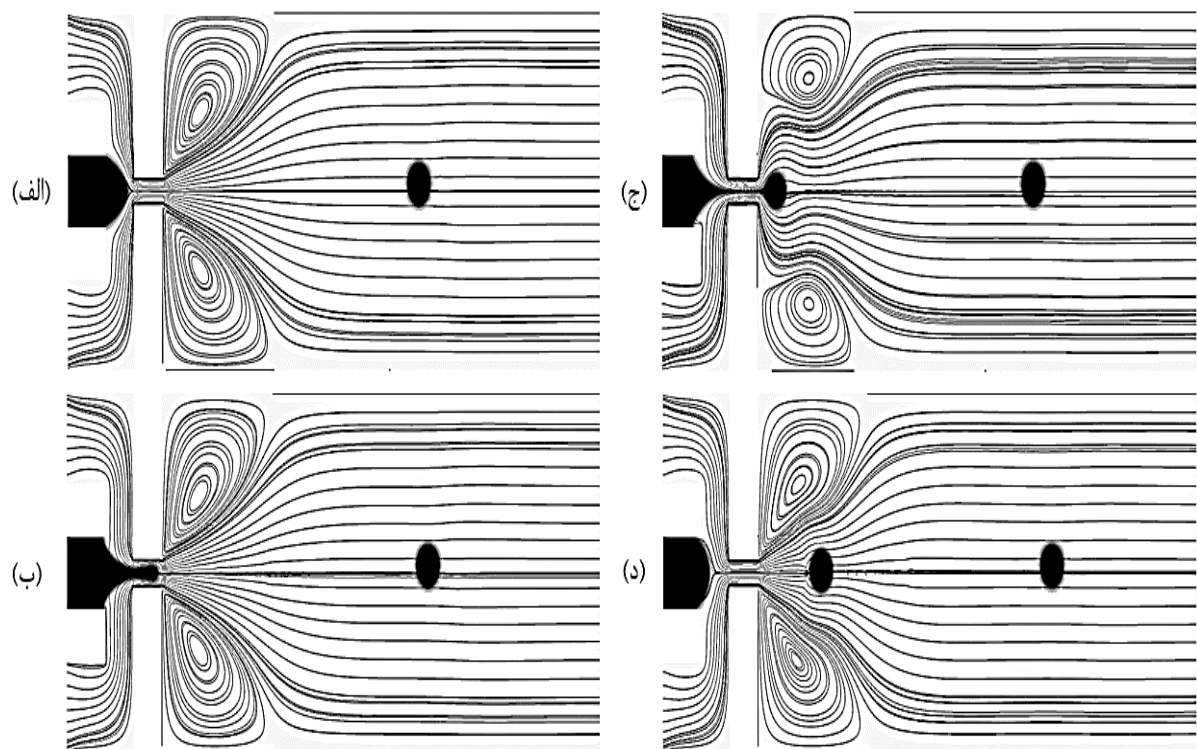
شکل ۳-۱۰: جدایش قطره در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$



شکل ۳-۱۱: توزیع فشار بین دو فاز در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

در شکل ۳-۱۰ الف ابتدا فشار فاز گسسته به دلیل وجود کشش سطحی و اثرات آن از فشار فاز پیوسته بیشتر است. با توجه به شکل ۳-۱۰ باگذشت زمان فشار هر دو فاز بیشتر می شود؛ فشار فاز گسسته به دلیل کشش سطحی در فصل مشترک زیاد می شود و فشار فاز پیوسته نیز به دلیل کمتر و کوچک تر شدن مجرای عبور جریان، زیرا پیشروی فاز گسسته منجر به کوچک تر شدن مجرای عبوری فاز پیوسته در محدوده ی اریفیس و اطراف آن می شود. البته شیب افزایش فشار فاز پیوسته بیشتر از فاز گسسته بوده و این منجر به این می شود که در یک لحظه این دو نمودار یکدیگر را قطع کنند. از این لحظه به بعد فاز گسسته وارد اریفیس شده و به دلیل اینکه فاز گسسته سطح بیشتری از اریفیس را اشغال می کند، سطح عبوری فاز پیوسته کاهش می یابد (شکل ۳-۱۰ ج) و فاز پیوسته افزایش فشار بیشتری تجربه کند. به دلیل دبی بیشتر فاز پیوسته و سرعت خیلی زیاد فاز پیوسته نسبت به فاز گسسته در داخل اریفیس و در نتیجه تنش های لزج بالایی که از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته وارد می شود، فاز گسسته در داخل اریفیس کشیده شده و دنباله ی آن به صورت یک باریکه، سطح اریفیس را اشغال می کند (شکل ۳-۱۰ د). در این حالت با توجه به شکل ۳-۱۱

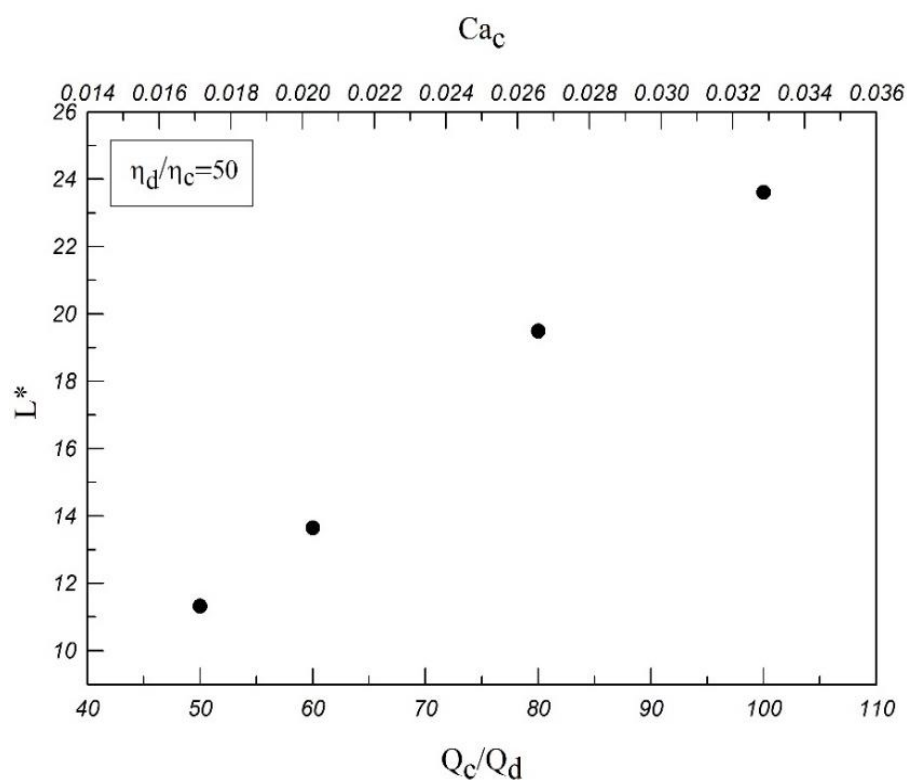
هر دو فاز یک افت فشار محسوسی را تجربه می‌کنند. در مورد فاز پیوسته می‌توان گفت که با باریک شدن فاز گسسته در داخل اریفیس، سطح عبوری برای فاز پیوسته افزایش می‌یابد که با کاهش فشار همراه خواهد بود. در مورد فاز گسسته می‌توان گفت اثر نیروهای لزج ناشی از فاز پیوسته بر فاز گسسته منجر به یک مکش و کشیدگی فاز گسسته در ناحیه اریفیس شده و باعث یک افت فشار می‌شود. در شکل ۳-۱۰-۵ هنگامی که توده‌ی فاز گسسته به انتهای اریفیس می‌رسد و از انتهای آن عبور می‌کند، با توجه به اینکه در این حالت انتهای باریکه‌ی فاز گسسته شکل قطره را به خود می‌گیرد این منجر به یک افزایش فشار بسیار کوچک فاز پیوسته در پشت آن می‌شود. همچنین فاز گسسته نیز افزایش فشار بسیار کوچکی را تجربه می‌کند. با توجه به شکل ۳-۱۱ با ادامه این روند و با کش آمدن دنباله‌ی فاز گسسته و همچنین دورتر شدن قطره‌ی چسبیده به دنباله‌ی فاز گسسته از اریفیس، هر دو فاز مجدداً دچار کاهش فشار می‌شوند و شیب کاهش فشار فاز گسسته بیشتر خواهد بود. در نهایت در یک لحظه‌ی خاص فشار هر دو فاز باهم برابر شده و نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز نیز یکدیگر را قطع می‌کنند. در این لحظه قطره از انتهای دنباله باریک شده فاز گسسته جدا شده و در پایین دست اریفیس به صورت یک قطره‌ی مجزا حرکت می‌کند (شکل ۳-۱۰-۶). دنباله باقی مانده فاز گسسته نیز به عقب برگشته و این روند مجدداً برای زمان‌های بعدی تکرار می‌شود و منجر به تولید قطرات بعدی خواهد شد. خطوط جریان نیز در میکروکانال به ازای $Q_c/Q_d = 50$ و $\eta_d/\eta_c = 50$ در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود، به دلیل تغییرات فشار در پایین دست اریفیس در گوشه‌های کانال واقع در پایین دست اریفیس گردابه‌هایی ایجاد می‌شود. طول و اندازه این گردابه‌ها در زمان‌های مختلف تغییر کرده و باعث می‌شود قطره از مرکز تقارن کانال منحرف شود. در اعداد مویبگی‌هایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفتند انحراف بسیار ناچیز قطرات از مرکز میکروکانال مشاهده شد، به گونه‌ای که این انحرافات قابل چشم‌پوشی بودند. لذا در بررسی فاصله بین قطرات از این انحرافات بسیار کوچک صرف‌نظر کرده و فاصله طولی بین قطرات گزارش شدند.



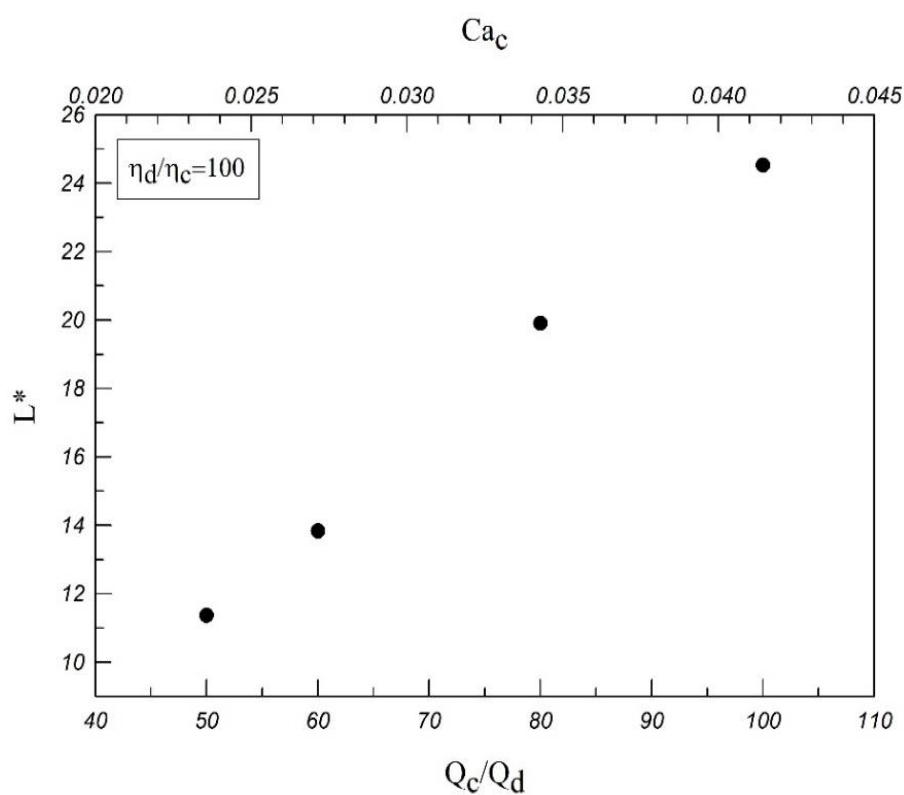
شکل ۳-۱۲: خطوط جریان در میکروکانال به ازای $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۷- فاصله بین قطرات

در شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ فاصله‌ی بی‌بعد قطرات حاصل از شبیه‌سازی تحقیق حاضر بر حسب نسبت دبی‌های مختلف و موینگی‌های معادل آن‌ها در هر دو نسبت لزجت ۵۰ و ۱۰۰ گزارش شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که با تغییر نسبت دبی بین فازها شاهد تغییرات زیادی در فاصله بین قطرات خواهیم بود و بیان‌گر این است که تغییر دبی فازها در کنترل فاصله بین قطرات بسیار تأثیرگذار است. افزایش نسبت دبی و عدد موینگی در واقع باعث افزایش سرعت فاز پیوسته و نیروی لزج ناشی از آن می‌شود. با توجه به شکل ۳-۱۳ و شکل ۳-۱۴ تغییرات فاصله بین قطرات نسبت به تغییر نسبت دبی، رفتاری نزدیک به حالت خطی را نشان می‌دهد.



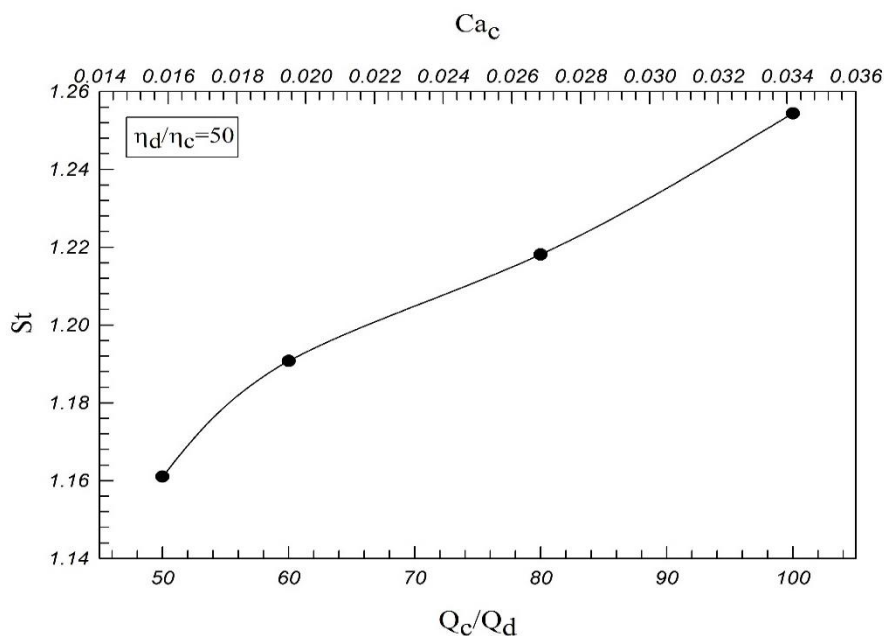
شکل ۳-۱۳: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$



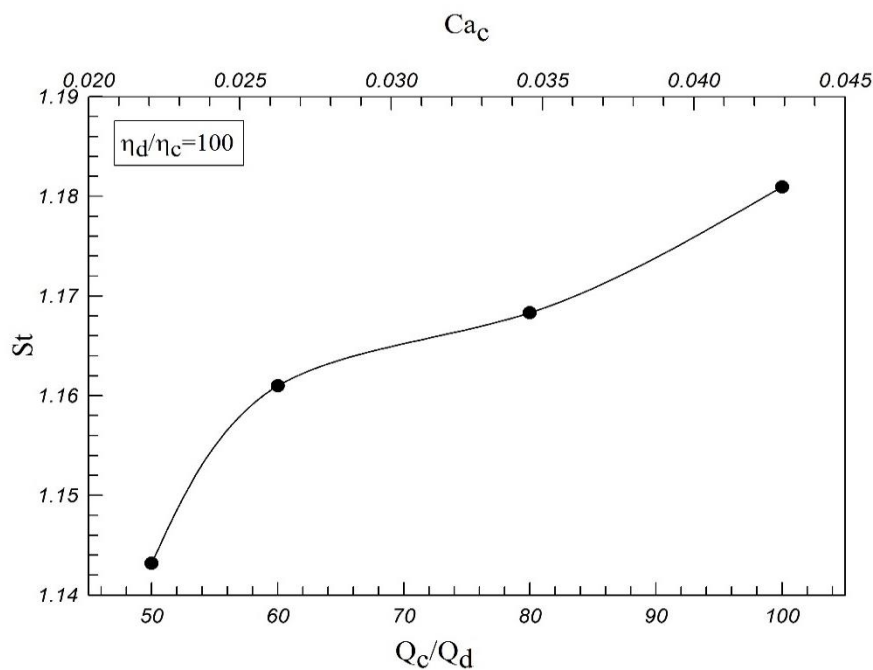
شکل ۳-۱۴: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف و به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$

۳-۸- فرکانس تولید قطرات

در شکل ۳-۱۵ و شکل ۳-۱۶ فرکانس تولید قطرات برای هر دو نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ و $\eta_d/\eta_c = 100$ ارائه شده است.



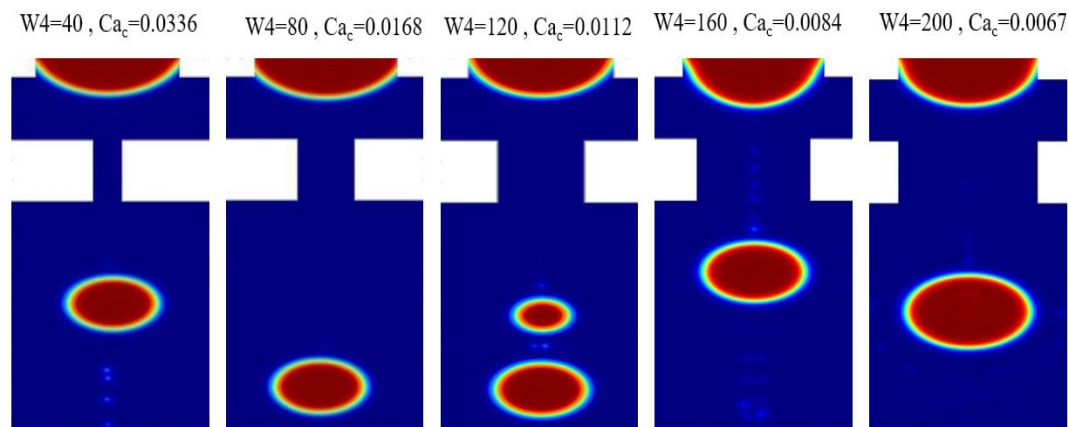
شکل ۳-۱۵: فرکانس تولید قطرات (عدد استروهمال) در اعداد موینگی مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$



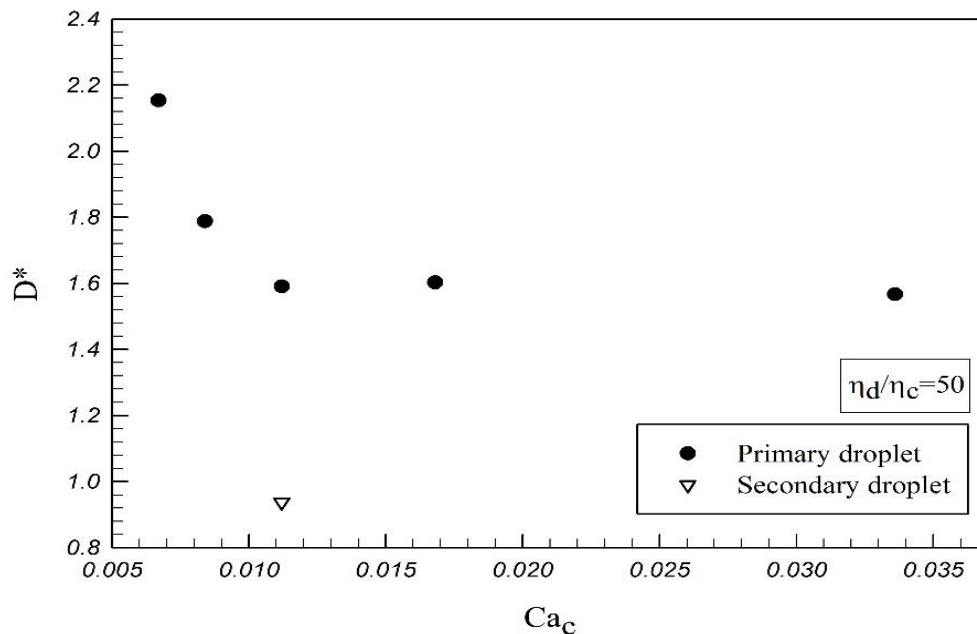
شکل ۳-۱۶: فرکانس تولید قطرات (عدد استروهمال) در اعداد موینگی مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۹- تأثیر ابعاد اریفیس

عرض اریفیس نیروی برشی موضعی و فشار در ناحیه اریفیس را کنترل کرده و بر فرآیند جدایش قطرات تأثیر می‌گذارد. با توجه به شکل ۳-۱۷ و شکل ۳-۱۸ مشاهده می‌شود با کاهش اندازه اریفیس اندازه قطره تغییر چندانی نکرده است ولی با افزایش اندازه اریفیس قطرات بزرگ‌تری تشکیل شده و حتی در بعضی ابعاد ممکن است حالت چندپخشی ایجاد شود.



شکل ۳-۱۷: اثر اندازه اریفیس بر جدایش قطرات در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

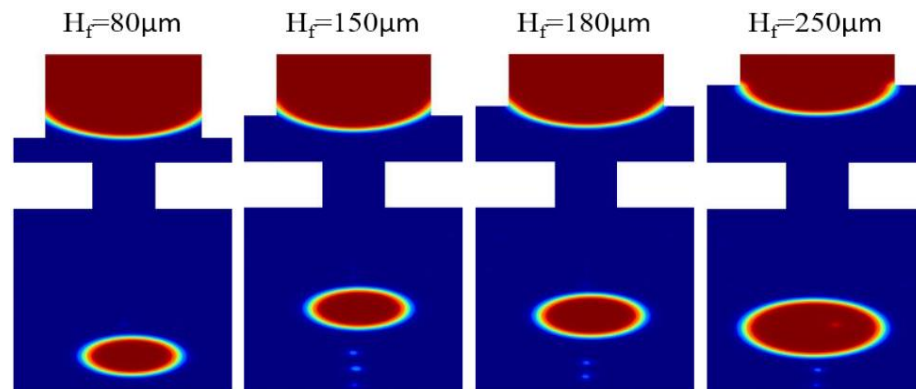


شکل ۳-۱۸: اثر اندازه اریفیس بر اندازه قطرات در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۱۰- اثر تغییر فاصله بین انتهای کانال تزریق میانی و ابتدای اریفیس (H_f)

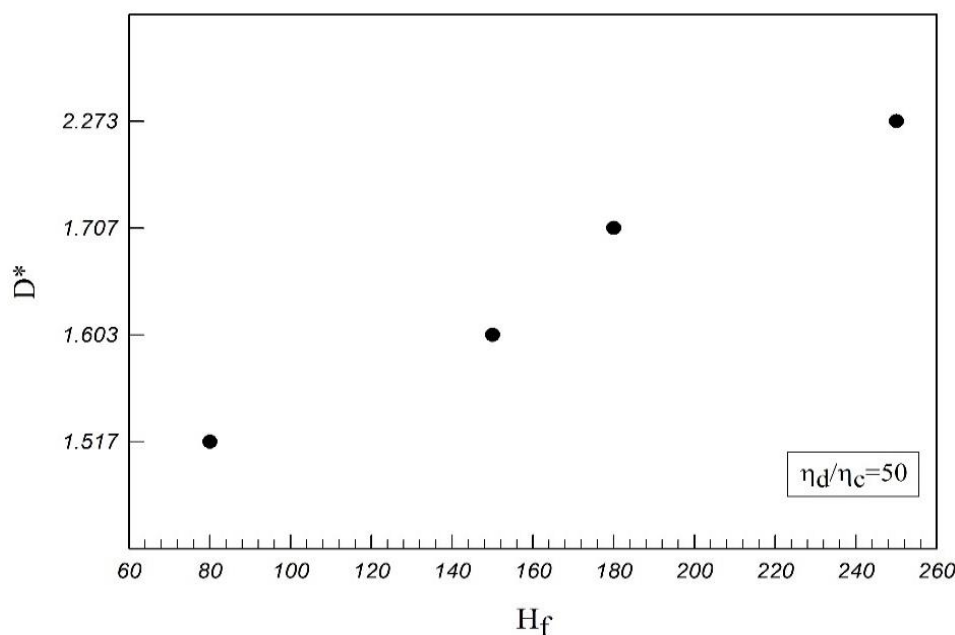
فاصله بین انتهای کانال تزریق میانی و ابتدای اریفیس (H_f) بر روند جدایش بسیار تأثیرگذار است. با تغییر

این فاصله فشار وارد شده بر فاز قطره که توسط فاز پیوسته اعمال می شود تغییر کرده و باعث تأثیرات زیادی بر روند جدایش می شود. فشار فاز پیوسته باعث فشردگی شدن باریکه فاز قطره در ابتدای اریفیس شده و با تغییر این فشار ضخامت فاز قطره در اریفیس دچار تغییر می شود. در شکل ۳-۱۹ مشاهده می شود با افزایش این فاصله اندازه قطرات تولیدی افزایش فراوانی می یابند.



شکل ۳-۱۹: تأثیر تغییر فاصله بین خروجی کانال مرکزی و ابتدای اریفیس بر جدایش قطرات در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

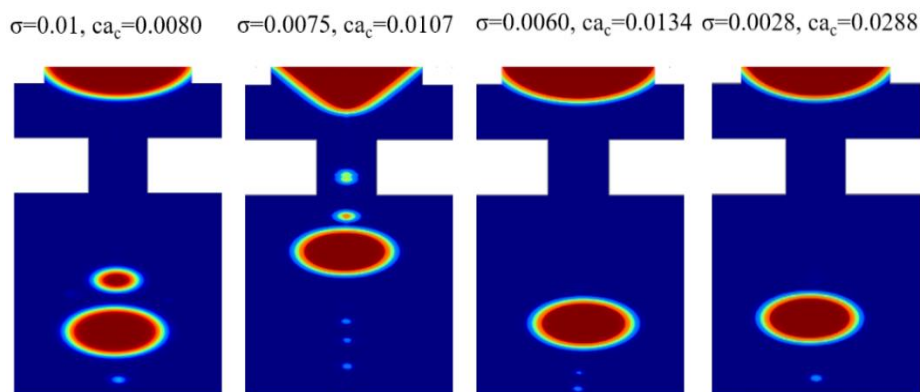
شکل ۳-۲۰ به طور کمی نشان دهنده میزان تأثیر فاصله بین انتهای کانال تزریق مرکزی و ابتدای اریفیس بر اندازه قطرات تشکیل شده است. تغییرات اندازه قطره نسبت به تغییر این فاصله رفتاری نزدیک به حالت خطی داشته و نتایج نشان دهنده تأثیر بسیار زیاد این فاصله بر اندازه قطرات است.



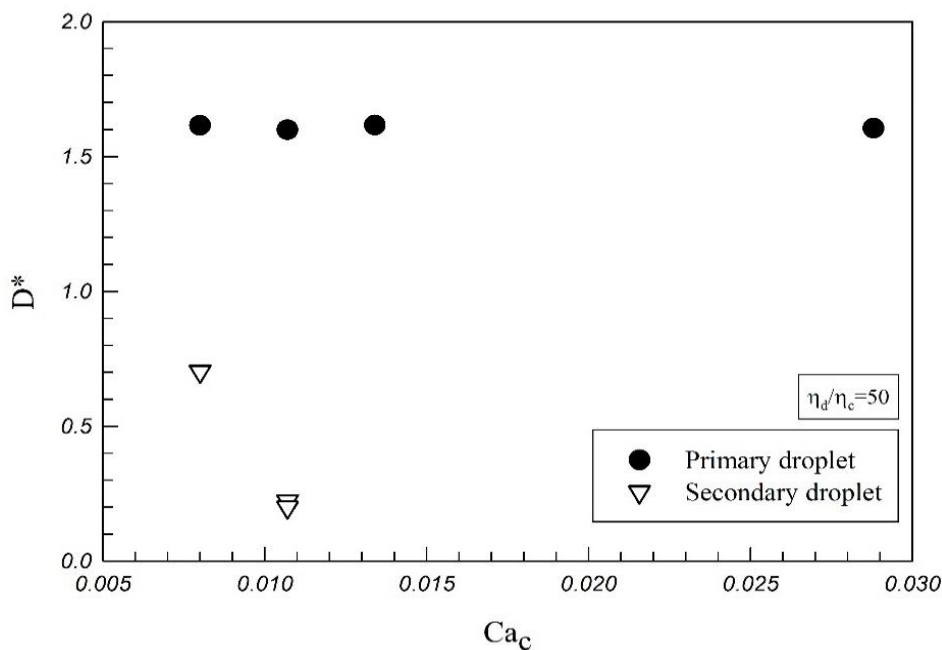
شکل ۳-۲۰: تأثیر تغییر فاصله بین خروجی کانال مرکزی و ابتدای اریفیس بر اندازه قطرات تشکیل شده در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۱۱- تأثیر کشش سطحی

در قسمت‌های قبل گفته شد نیروهای تأثیرگذار بر فرآیند جدایش قطره شامل نیروهای کشش سطحی، فشار و تنش‌های لزج اعمال شده توسط فاز پیوسته است. کشش سطحی نیرویی سطحی بوده و در امتداد فصل مشترک بر آن وارد می‌شود. همچنین این نیرو پس از جدایش قطره باعث حفظ شکل کروی آن می‌شود. با توجه به شکل ۳-۲۱ می‌توان گفت در مقادیر کشش سطحی بالا و یا در اعداد مویبگی پایین فرآیند جدایش چندپخشی اتفاق افتاده و در آن قطرات ثانویه بزرگی تشکیل می‌شود. با کاهش کشش سطحی و به‌طور متناظر با افزایش عدد مویبگی اندازه قطرات ثانویه کوچک‌تر می‌شود. با توجه به شکل ۳-۲۱ مشاهده می‌شود در مقادیر بسیار پایین کشش سطحی و در اعداد مویبگی بالا فرآیند جدایش قطره در حالت تک‌پخشی انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۲۱: تأثیر کشش سطحی بر فرآیند تشکیل قطره در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ در شکل ۳-۲۲ به صورت کمی تأثیر کشش سطحی بر اندازه قطرات در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود در نسبت دبی و نسبت لزجت گفته شده، با تغییر میزان کشش سطحی در اندازه قطرات اصلی تغییر چندانی مشاهده نمی شود.



شکل ۳-۲۲: اندازه قطره در کشش سطحی های مختلف و اعداد موینگی های معادل در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$

۳-۱۲- نتیجه گیری

برای ایجاد قطرات مطلوب نسبت دبی و نسبت لزجت بین دو فاز مهم هستند. اصولاً دستگاه های جریان

متمرکز شده برای شرایطی که در آن نسبت لزجت بین فازها و نیز نسبت دبی در آن‌ها بسیار زیاد است استفاده می‌شود. در این دستگاه‌ها هرچه نسبت لزجت بین دو فاز افزایش یابد، اندازه قطرات تولیدی نیز افزایش می‌یابد ولی با افزایش نسبت دبی بین دو فاز اندازه این قطرات کوچک می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد در نسبت دبی‌های بالاتر میزان تأثیر آن بر قطر قطرات بسیار کمتر شده ولی همچنان بر روی فاصله بین قطرات تأثیر بسیاری دارند. در نسبت لزجت‌های بسیار پایین نیز قطرات تولیدی بسیار کوچک و با فاصله بسیار اندکی از هم تشکیل می‌شوند. اثر ابعاد اریفیس و فاصله بین کانال خروجی مرکزی و اریفیس بر اندازه قطرات و فرآیند جدایش بررسی شد. نتایج نشان دادند تغییر فاصله بین کانال مرکزی و اریفیس تأثیر بسیار زیادی بر اندازه قطرات داشته و نسبت به تغییر اندازه اریفیس این تأثیر بسیار بیشتر است. تغییرات کشش سطحی بر اندازه قطرات تأثیر زیادی نداشته و بیشتر باعث ایجاد حالت چندپخشی می‌شود. تغییرات نسبت دبی بین دو فاز بر اندازه قطرات بررسی شد و نتایج نشان می‌دهد در نسبت دبی‌های پایین تغییر اندازه قطرات بسیار بیشتر بوده و در نسبت دبی‌های بالاتر تغییرات کمتری در اندازه قطرات مشاهده می‌شود. احتمال به وجود آمدن حالت جدایش چندپخشی در نسبت دبی‌های پایین بیشتر شده در حالی که در نسبت دبی‌های بالاتر جدایش قطره در حالت تک‌پخشی صورت می‌گیرد. رفتار توزیع فشار بین دو فاز در فرآیند جدایش مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج می‌توان گفت زمان‌هایی که فشار دو فاز در آن‌ها برابر می‌شوند بسیار تأثیرگذار بوده و با توجه به این توزیع فشار می‌توان زمان جدایش را به دست آورد.

۴- فصل چهارم: فرآیند جدایش قطره

غیرنیوتنی از نوع نازک شونده-برشی در فاز

پیوسته نیوتنی

۴-۱- مقدمه

۴-۱-۱- سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان

سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان سیالاتی هستند که در آن‌ها تنش برشی تنها تابعی غیرخطی از نرخ برش است. این سیالات به دو گروه سیالات دارای تنش تسلیم^۱ و سیالات فاقد تنش تسلیم تقسیم می‌شوند. در سیالاتی که دارای تنش تسلیم هستند شرط جریان یافتن، رسیدن تنش به حد مشخصی برای شروع حرکت سیال است. سیالات فاقد تنش تسلیم به سیالات شبه پلاستیک^۲ (نازک‌شونده برشی^۳) و سیالات ویسکوپلاستیک (دایلاتانت^۴ یا ضخیم‌شونده برشی^۵) تقسیم می‌شود. این سیالات به صورت سیالات نیوتنی تعمیم یافته نیز نامیده می‌شوند. برای سیالاتی که در آن‌ها لزجت به نرخ برش وابسته است، رابطه تنش برشی و نرخ برش توسط رابطه (۴-۱) که در آن η تابعی از نرخ برش $\dot{\gamma}$ است بیان می‌شود [۸۴]:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (۴-۱)$$

در این مطالعه، از مدل کاریو برای نشان دادن رفتار باریک شونده سیال غیرنیوتنی استفاده شده است. این مدل تطابق بسیار خوبی با گسترده وسیعی از داده‌های آزمایشگاهی که در آن‌ها لزجت با نرخ برش تغییر می‌کند، دارد و به صورت رابطه (۴-۲) نمایش داده می‌شود که در آن مقدار $a=2$ در نظر گرفته می‌شود [۸۴]:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left\{ 1 + \left(\lambda \dot{\gamma} \right)^a \right\}^{\frac{n-1}{a}} \quad (۴-۲)$$

در این معادله η_0 لزجت در نرخ برش صفر برحسب پاسکال ثانیه، η_{∞} لزجت در نرخ برش نهایی، λ ثابت زمانی برحسب ثانیه و n شاخص توانی است که شیب نمودار تغییرات $\eta(\dot{\gamma})$ را نشان می‌دهد. در این رابطه، a

^۱ Yield Stress

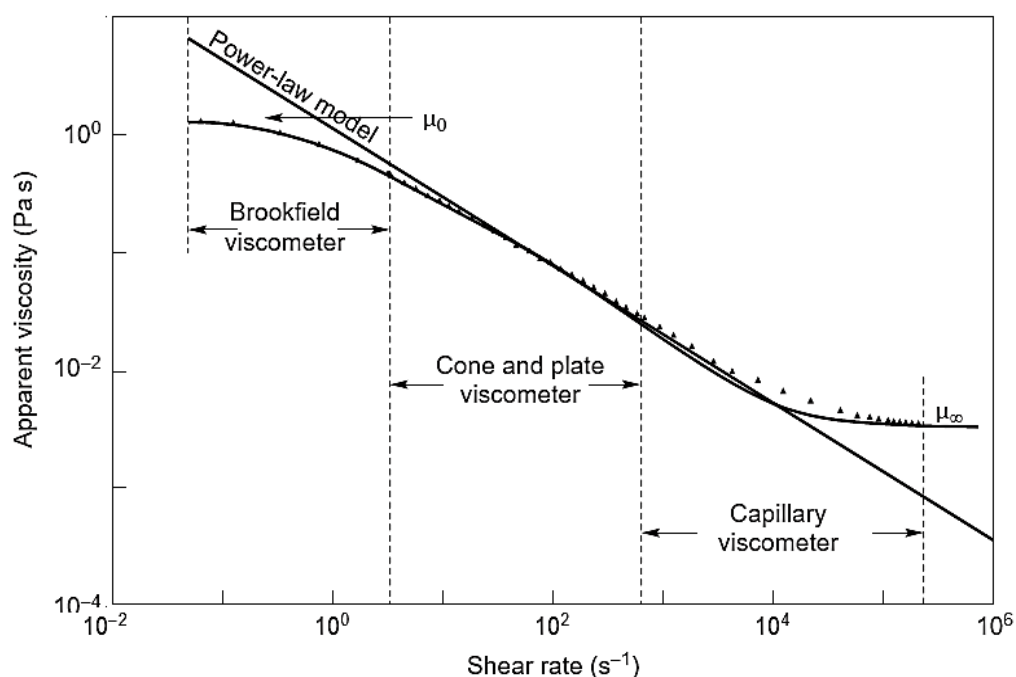
^۲ Pseudo plastic

^۳ Shear-thinning

^۴ Dilatant

^۵ Shear-thickening

پارامتر بی‌بعدی است که انتقال از ناحیه‌ی نرخ برش صفر به ناحیه‌ی توانی را نشان می‌دهد. برای بسیاری از محلول‌های پلیمری، این معادله به ازای $\eta_{\infty} = 0$ و $a=2$ تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. رفتار لزجت برحسب نرخ برش برای یک محلول پلیمری با رفتار نازک‌شونده برشی در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: لزجت برشی صفر و بی‌نهایت برای یک محلول پلیمری با رفتار نازک‌شونده برشی [۸۴]

۴-۲- شرایط مرزی و خواص رئولوژیکی سیالات استفاده شده

در این بخش برای فاز پیوسته از محلول آبی نیوتنی سدیم دو د سیل سولفات با در صد وزنی SDS 2% که یک محلول نیوتنی حاوی سورفکتانت است استفاده شد. همچنین برای فاز گسسته از دو نوع سیال غیرنیوتنی با خواص مختلف مطابق با جدول ۱-۴ استفاده شد و مقادیر لزجت در نرخ برش صفر برابر با لزجت روغن‌های سیلیکون بخش نیوتنی در نظر گرفته شد. مقدار شاخص توانی شامل مقادیر ۱ و ۰,۸ و ۰,۶ و ۰,۴ در نظر گرفته شده و اثر آن بر فرآیند جدایش مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل شرایط مرزی، شرایط اولیه و هندسه مسئله مطابق با فصل سوم در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱: خواص سیالات استفاده شده

سیالات	چگالی (kg/m^3)	η_0 (Pa.s)	η_{∞} (Pa.s)	λ (s)	a	کشش سطحی (N/m)
سیال غیرنیوتنی ۱	۹۶۰	۰,۰۵	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	2	۰,۰۰۴۸
سیال غیرنیوتنی ۲	۹۶۰	۰,۱	۰,۰۰۱	۰,۰۰۱	2	۰,۰۰۳۸
2 % SDS (محلول آبی)	۱۰۰۰	۰,۰۰۱	-	-	-	-

۴-۳- شبکه بندی و استقلال از شبکه بندی

با توجه به خواص رئولوژیکی سیالات استفاده شده در این فصل و استفاده از سیالات غیرنیوتنی، ممکن است فرآیند بررسی استقلال از شبکه که در فصل قبل استخراج شد برای سیالات غیرنیوتنی صادق نبوده و نیاز به بررسی مجدد فرآیند استقلال از شبکه باشد. در این قسمت مجدداً فرآیند استقلال از شبکه با در نظر گرفتن سیالات غیرنیوتنی بررسی می شود. نوع شبکه بندی در نواحی مختلف هندسه مطابق با شکل ۳-۳ بوده و تعداد شبکه استفاده شده در بخش های مختلف هندسه مطابق با شکل ۳-۱، در جدول ۴-۲ آمده است.

جدول ۴-۲: شبکه بندی استفاده شده در بخش های مختلف

نوع شبکه	تعداد سلول ها در ناحیه ۱	تعداد سلول ها در ناحیه ۲	تعداد سلول ها در ناحیه ۳	تعداد سلول ها در ناحیه ۴	تعداد سلول ها در ناحیه ۵	تعداد سلول ها در ناحیه ۶	تعداد کل سلول ها
M-1	۸۸۸	۳۴۰	۱۵۹۶	۵۵۸	۶۷۱۴	۲۷۶۰۲	۶۶۵۲۸
M-2	۱۰۱۴	۳۷۸	۱۸۴۵	۶۲۷	۷۵۰۵	۳۱۲۰۵	۷۵۱۷۱
M-3	۱۱۷۶	۴۳۷	۲۰۱۶	۷۰۰	۸۴۰۰	۳۵۲۸۰	۸۴۹۰۲
M-4	۱۲۷۶	۴۸۰	۲۲۹۵	۷۷۷	۹۴۰۸	۳۹۸۷۲	۹۵۷۳۶
M-5	۱۴۵۷	۵۴۶	۲۶۹۵	۹۲۰	۱۱۰۴۰	۴۶۰۸۰	۱۱۰۸۲۱
M-6	۱۷۳۴	۶۴۴	۳۰۵۲	۱۰۷۵	۱۲۹۲۵	۵۳۲۵۱	۱۲۸۳۸۵
M-7	۲۰۳۵	۷۵۰	۳۵۹۱	۱۲۶۹	۱۵۱۲۰	۶۲۷۲۰	۱۵۰۹۹۰

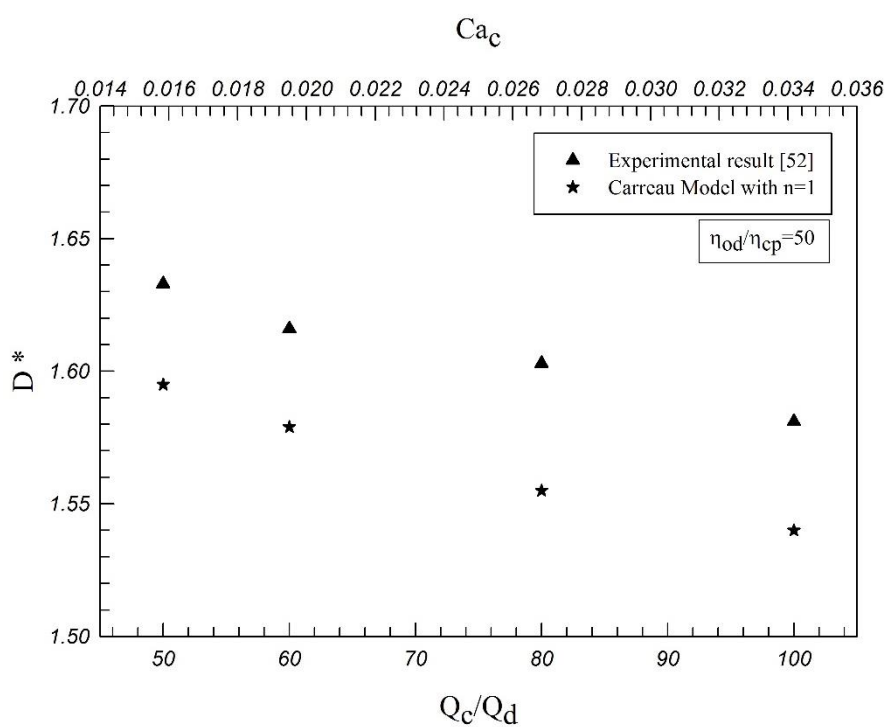
در جدول ۳-۴ اندازه قطرات در شبکه‌بندی‌های مطابق با جدول ۲-۴ آمده است. با توجه به اطلاعات ارائه شده در این جدول می‌توان به این نتیجه رسید، برای کاهش هزینه محاسباتی با تقریب خوبی می‌توان از شبکه M-5 برای استخراج نتایج استفاده کرد. لذا لازم به ذکر است کلیه نتایج ارائه شده در بخش غیرنیوتنی این پژوهش با استفاده از شبکه M-5 حاصل شده است.

جدول ۳-۴: اندازه قطرات در شبکه‌بندی‌های مختلف $Q_c/Q_d = 50$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ و $n=0.8$

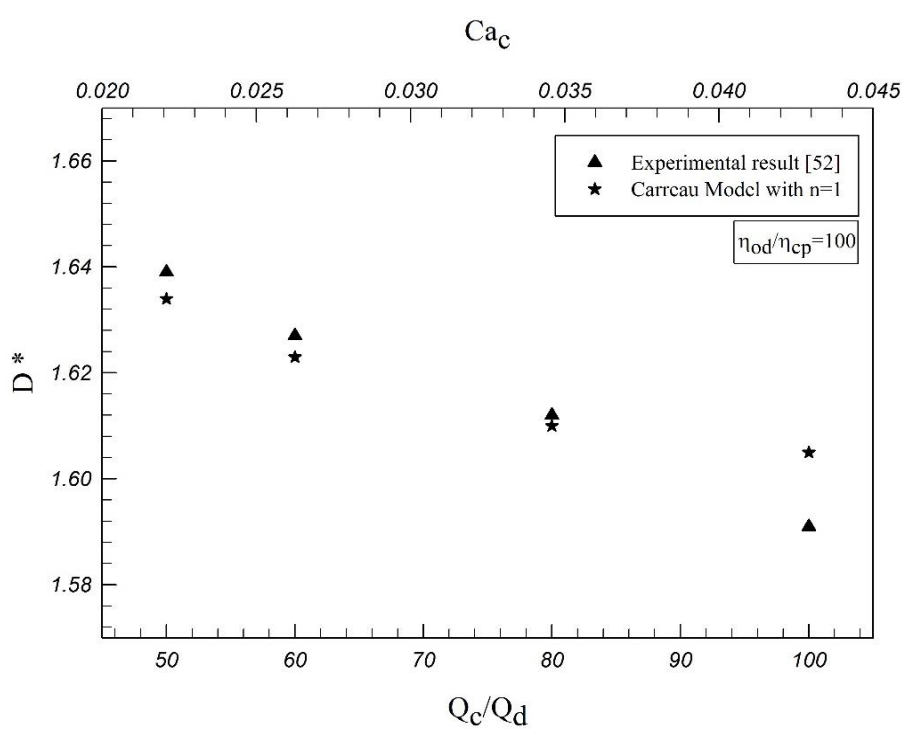
شبکه	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
تعداد سلول	۶۶۵۲۸	۷۵۱۷۱	۸۴۹۰۲	۹۵۷۳۶	۱۱۰۸۲۱	۱۲۸۳۸۵	۱۵۰۹۹۰
D*	۱,۶۰۲	۱,۶۲۵	۱,۵۷۶	۱,۶۲۱	۱,۵۷۰	۱,۵۶۵	۱,۵۷۸

۴-۴- اعتبارسنجی

با توجه به اینکه تحقیقات عددی و آزمایشگاهی خاصی بر روی جدایش قطرات غیرنیوتنی در هندسه جریان متمرکز شده انجام نگرفته است، از این رو نتایجی مشخصی برای اعتبارسنجی نتایج غیرنیوتنی وجود نداشت. در این پژوهش برای اعتبارسنجی نتایج غیرنیوتنی از نتایج نای و همکاران [۵۲] استفاده شد. با توجه به این که در بخش غیرنیوتنی از مدل لزجت کاریو برای مدل سازی رفتار فاز گسسته غیرنیوتنی استفاده شده و برای فاز گسسته مقدار لزجت در نرخ برش صفر برابر با لزجت بخش نیوتنی در نظر گرفته شده است می‌توان به منظور صحتسنجی نتایج به دست آمده از روش عددی از نتایج نای و همکاران [۵۲] کمک گرفت. در مدل کاریو اگر مقدار شاخص توانی برابر با مقدار یک در نظر گرفته شود در این صورت بیانگر رفتار سیال نیوتنی خواهد بود. در شکل ۲-۴ و شکل ۳-۴ برای اعتبارسنجی نتایج غیرنیوتنی، اندازه قطرات به دست آمده به ازای مقدار شاخص توانی یک ($n=1$) در مدل کاریو با نتایج آزمایشگاهی نای و همکاران [۵۲] مقایسه شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تطابق خوبی بین این دو حالت مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۲: مقایسه اندازه قطرات در نسبت دبی‌های مختلف بین نتایج نای و همکاران [۵۲] و مدل کاریو با $n=1$



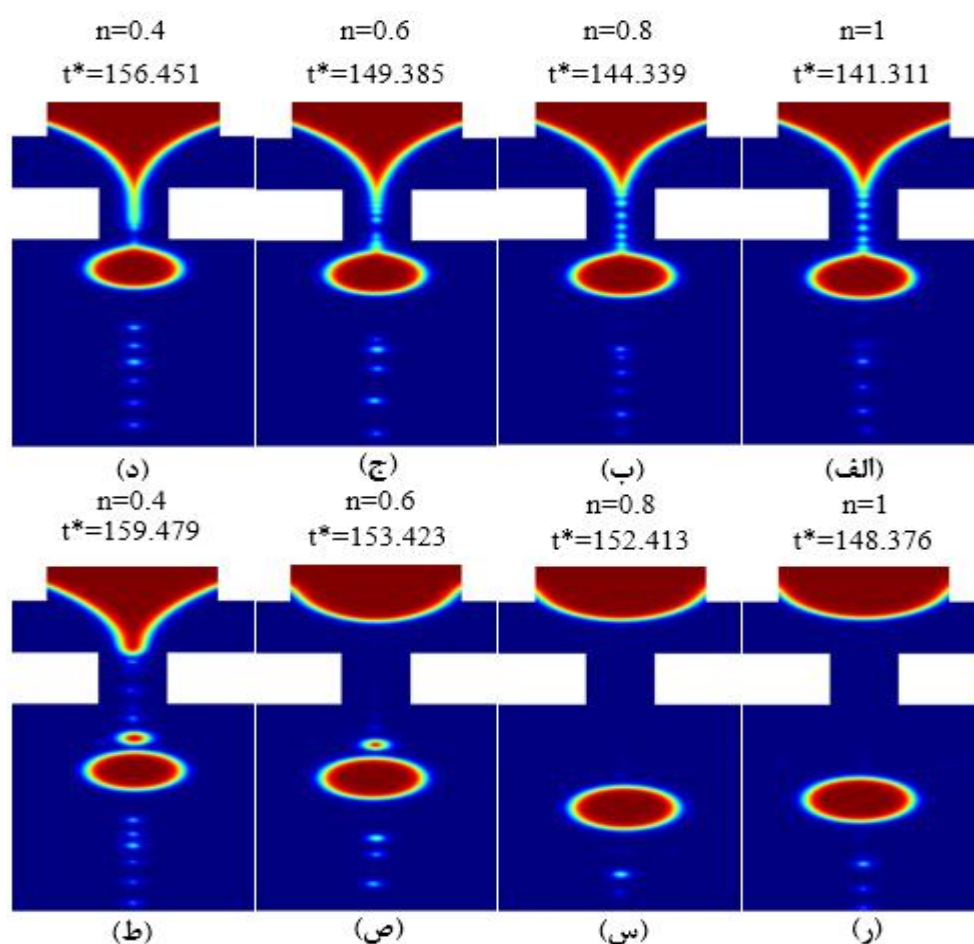
شکل ۴-۳: مقایسه اندازه قطرات در نسبت دبی‌های مختلف بین نتایج نای و همکاران [۵۲] و مدل کاریو با $n=1$

در شکل ۴-۲ خطای کمی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. به طور مثال در نسبت دبی

$Q_c/Q_d = 100$ در نتایج آزمایشگاهی اندازه بی بعد قطره برابر با ۱,۵۸۱ و در نتایج این پژوهش برابر با ۱,۵۴۰ بدست آمده است که نشان دهنده خطای نسبی کمتر از ۲,۶٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی است. در شکل ۳-۴ و در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 100$ قطر بی بعد قطره در نتایج آزمایشگاهی برابر با ۱,۵۹۱ و در نتایج پژوهش حاضر برابر با ۱,۶۰۵ بوده که نشان دهنده خطای نسبی کمتر از ۰,۹٪ نسبت به نتایج آزمایشگاهی است.

۴-۵- اثر شاخص توانی بر اندازه قطرات

در شکل ۴-۴ تأثیر مقدار شاخص توانی بر فرآیند جدایش قطرات در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ نشان داده شده است. با کاهش مقدار شاخص توانی بعد از جدایش قطره اصلی پیشروی باریکه فاز گسسته بیشتر شده و طول بیشتری از اریفیس را اشغال می کند. در واقع بعد از جدایش قطره اصلی باریکه باقی مانده از فاز گسسته به عقب برنگشته و در مجرای اریفیس می ماند. ضمن اینکه با کاهش شاخص توانی ضخامت باریکه فاز گسسته باقی مانده در اریفیس نیز بیشتر می شود. در شرایط یکسان با کاهش مقدار شاخص توانی، حالت چندپخشی بیشتر شده و همان طور که در شکل ۴-۴ ص و شکل ۴-۴ ط مشاهده می شود قطرات ثانویه از باقی مانده باریکه فاز گسسته در اریفیس جدا می شوند. همچنین با کاهش مقدار n ، زمان بی بعد جدایش قطره بیشتر شده و مقدار پیشروی باریکه باقی مانده که بعد از جدایش قطره در اریفیس حضور دارد نیز بیشتر می شود.

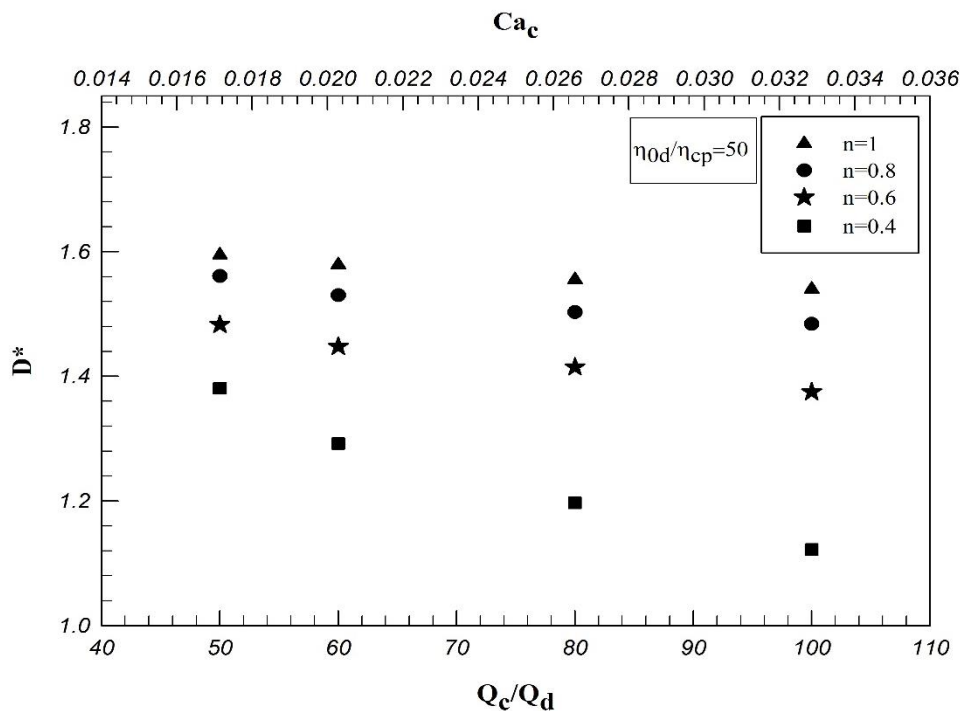


شکل ۴-۴: تأثیر پارامتر توانی بر جدایش قطرات. در همه موارد $Ca_c = 0.0168$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$

در شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ اندازه قطرات اصلی تشکیل شده برحسب عدد موینگی به ازای مقادیر مختلف شاخص توانی نشان داده شده است. در این شکل‌ها فقط اندازه قطرات اصلی گزارش شده‌اند و به دلیل نزدیکی بودن اندازه قطرات ثانویه و روی هم قرار گرفتن آن‌ها در نمودار، اندازه این قطرات در جداول گزارش شده‌اند.

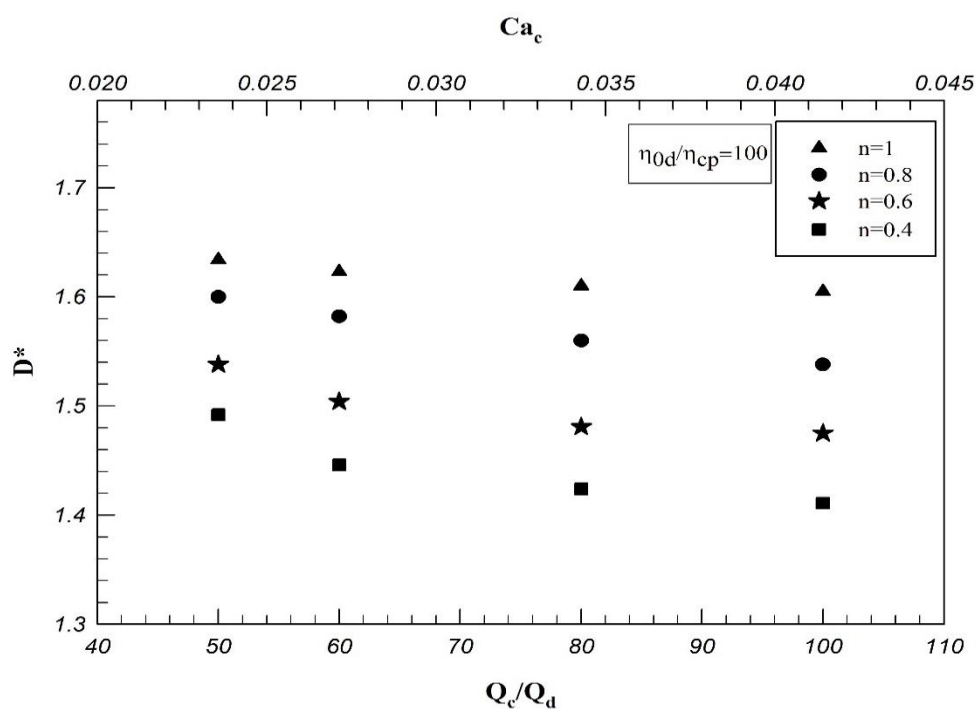
همان‌طور که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار شاخص توانی اندازه قطرات تولید شده نیز کاهش می‌یابند. این کاهش اندازه در مقادیر پایین شاخص توانی بیشتر بوده و در مقادیر پایین شاخص توانی افزایش عدد موینگی و نسبت دبی بین دو فاز تأثیر بیشتری بر اندازه قطرات اصلی می‌گذارد. دلیل این رفتار تغییر حالت جدایش قطرات از تک‌پخشی به حالت چندپخشی است. در مقادیر شاخص توانی برابر با ۱ و ۰.۸،

فرآیند جدایش در حالت تک پخشی قرار داشته و فرآیند جدایش در آن‌ها نزدیک به هم است.



شکل ۴-۵: فاصله بین قطرات در مقادیر مختلف n و $\eta_{0d}/\eta_{cp} = 50$

در مقادیر پایین تر شاخص توانی، فرآیند تشکیل قطره به صورت چندپخشی بوده و باعث می شود در اعداد موینگی و نسبت دبی‌های بالا قطرات ثانویه بیشتری تشکیل شده و تأثیر اعداد موینگی و نسبت دبی بر تغییر اندازه قطرات بیشتر شود. برای مثال در شکل ۴-۵ و در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 100$ در مقدار شاخص توانی برابر با ۱ و ۰,۸ قطرات ثانویه مشاهده نشده است در حالی که در مقدار شاخص توانی ۰,۶ تعداد چهار قطره ثانویه و در مقدار شاخص توانی ۰,۴ تعداد پنج قطره ثانویه تشکیل شد. با افزایش نسبت لزجت بین دو فاز و در نسبت دبی و اعداد موینگی بالا قطرات ثانویه رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در شکل ۴-۶ در مقادیر پایین شاخص توانی تأثیر افزایش نسبت دبی و عدد موینگی کمتر شده است زیرا در این مقادیر شاخص توانی، با افزایش نسبت دبی تعداد قطرات ثانویه چندان تغییری نمی‌یابد در حالی که در نسبت‌های لزجت پایین و در مقادیر پایین n ، افزایش عدد موینگی بر تعداد قطرات ثانویه تأثیر فراوانی دارد.



شکل ۴-۶: فاصله بین قطرات در مقادیر مختلف n و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

در جداول زیر به طور کمی اندازه قطرات اصلی و ثانویه در مقادیر مختلف n ، اعداد مویبگی و نسبت

دبی‌های گوناگون گزارش شده است.

جدول ۴-۴: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=1$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$

قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد مویبگی (Ca_c)
-	-	-	-	۱,۵۹۵	۰,۰۱۶۸
-	-	-	-	۱,۵۷۹	۰,۰۲۰۱
-	-	-	-	۱,۵۵۵	۰,۰۲۶۹
-	-	-	-	۱,۵۴۰	۰,۰۳۳۶

جدول ۴-۵: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.8$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$

قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد مویبگی (Ca_c)
-	-	-	-	۱,۵۶۱	۰,۰۱۶۸
-	-	-	-	۱,۵۳۰	۰,۰۲۰۱
-	-	-	-	۱,۵۰۳	۰,۰۲۶۹
-	-	-	-	۱,۴۸۸	۰,۰۳۳۶

جدول ۴-۶: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.6$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$

قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد موینگی (Cac)
-	-	-	۰,۲۸۰	۱,۴۸۳	۰,۰۱۶۸
-	-	-	۰,۴۱۰	۱,۴۴۸	۰,۰۲۰۱
-	۰,۳۰۰	۰,۳۰۷	۰,۲۶۲	۱,۴۱۵	۰,۰۲۶۹
۰,۱۵۵	۰,۱۹۵	۰,۱۳۷	۰,۲۳۱	۱,۳۷۵	۰,۰۳۳۶

جدول ۴-۷: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.4$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$

قطره ثانویه D^*_6	قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد موینگی (Cac)
-	-	-	-	۰,۴۰۰	۱,۳۸۱	۰,۰۱۶۸
-	-	-	۰,۵۷۰	۰,۳۸۰	۱,۲۹۲	۰,۰۲۰۱
-	-	۰,۳۸۷	۰,۳۵۵	۰,۳۲۴	۱,۱۹۷	۰,۰۲۶۹
۰,۴۱۴	۰,۳۴۳	۰,۲۹۱	۰,۲۸۰	۰,۳۳۳	۱,۱۲۲	۰,۰۳۳۶

جدول ۴-۸: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=1$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد موینگی (Cac)
-	-	-	-	۱,۶۳۴	۰,۰۲۱۲
-	-	-	-	۱,۶۲۳	۰,۰۲۵۵
-	-	-	-	۱,۶۱۰	۰,۰۳۴۰
-	-	-	-	۱,۶۰۵	۰,۰۴۳۵

جدول ۴-۹: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.8$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

قطره ثانویه D^*_5	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_2	قطره اصلی D^*_1	عدد موینگی (Cac)
-	-	-	-	۱,۶۰۰	۰,۰۲۱۲
-	-	-	-	۱,۵۸۲	۰,۰۲۵۵
-	-	-	-	۱,۵۶۰	۰,۰۳۴۰
-	-	-	-	۱,۵۳۸	۰,۰۴۳۵

جدول ۴-۱۰: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.6$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

عدد موینگی (Ca)	قطره اصلی D^*_1	قطره ثانویه D^*_2	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_5
۰,۰۲۱۲	۱,۵۳۸	۰,۱۷۵	-	-	-
۰,۰۲۵۵	۱,۵۰۴	۰,۱۷۶	-	-	-
۰,۰۳۴۰	۱,۴۸۱	۰,۳۵۰	-	-	-
۰,۰۴۳۵	۱,۴۷۵	-	-	-	-

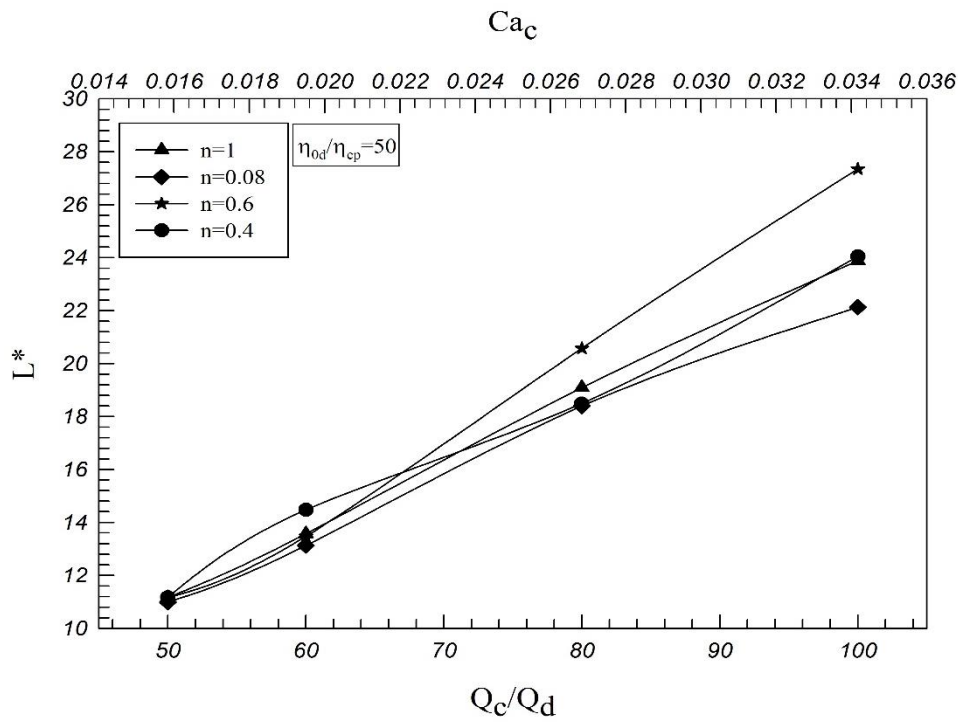
جدول ۴-۱۱: اندازه قطرات تشکیل شده در مقادیر $n=0.4$ و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

عدد موینگی (Ca)	قطره اصلی D^*_1	قطره ثانویه D^*_2	قطره ثانویه D^*_3	قطره ثانویه D^*_4	قطره ثانویه D^*_5
۰,۰۲۱۲	۱,۴۹۲	۰,۳۰۴	-	-	-
۰,۰۲۵۵	۱,۴۴۶	۰,۲۷۹	۰,۱۸۸	-	-
۰,۰۳۴۰	۱,۴۲۴	۰,۵۱۱	-	-	-
۰,۰۴۳۵	۱,۴۱۱	۰,۵۱۸	-	-	-

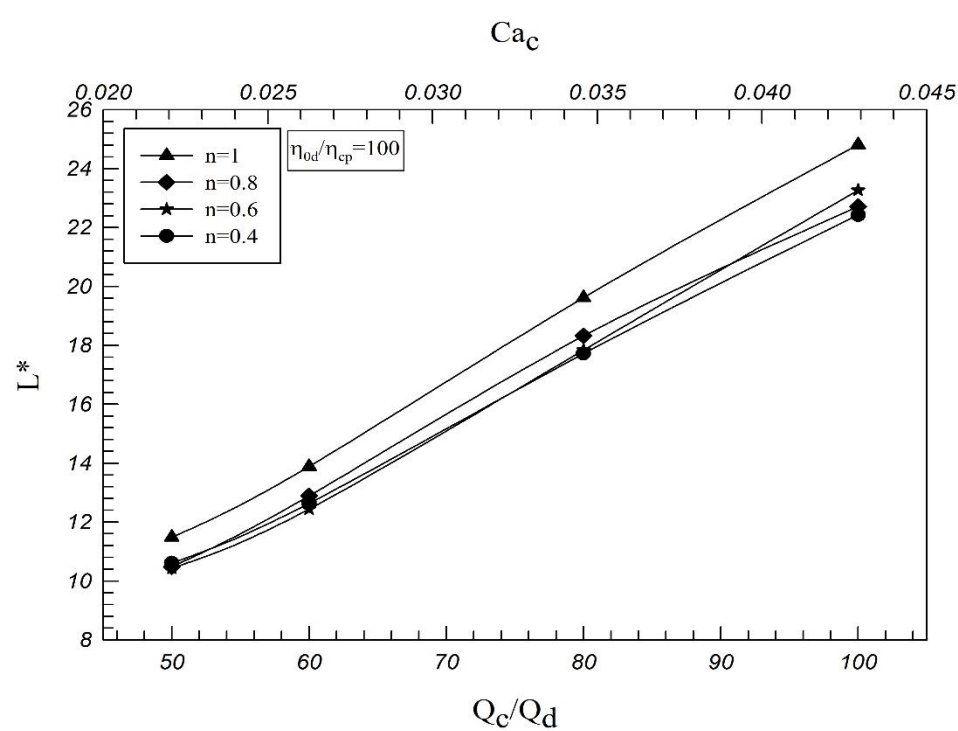
۴-۶- فاصله بین قطرات

فاصله بین قطرات از کمیت‌های مهم در دستگاه‌های میکروسیالی بوده و شناخت عوامل مؤثر بر آن در درک رفتار قطرات و شکل‌گیری آن‌ها بسیار مؤثر است. در شکل ۴-۷ و شکل ۴-۸ به تأثیر شاخص توانی کاریو بر فاصله بین قطرات پرداخته شده است. به دلیل تأثیر بالای نیروی لزج اعمال‌شده از فاز پیوسته بر قطره مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت دبی و عدد موینگی فاز پیوسته فاصله بین قطرات نیز به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در این پژوهش با توجه به اینکه قطرات ثانویه نزدیک به قطره اصلی اندکی پایین‌تر از پایین‌دست اریفیس با قطره اصلی ادغام می‌شدند، لذا دقیقاً نمی‌توان فاصله بین قطرات اصلی را گزارش کرد ولی از طرفی با توجه به این که قطرات ثانویه در مقایسه با قطره اصلی دارای اندازه‌های بسیار کوچکی هستند و از طرفی فاصله بین قطرات در مقایسه با ابعاد قطرات بسیار زیاد است، لذا با توجه به این که تاکنون در مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته بر هندسه میکروسیالی جریان متمرکز شده هیچ‌گاه فاصله بین قطرات مورد بررسی قرار نگرفته است می‌توان تا حدودی از خطای ناشی از ادغام قطرات ثانویه صرف‌نظر کرده

و با اندکی خطا این فاصله را گزارش کرد. در این صورت یک شناخت حداقلی بر روی فاصله بین قطرات و تأثیر شاخص توانی بر روی آن ایجاد می‌شود. در شکل‌های زیر فاصله طولی بین قطرات با صرف نظر کردن از تأثیر ادغام قطرات ثانویه بر روی فاصله طولی بین قطرات گزارش شده است.



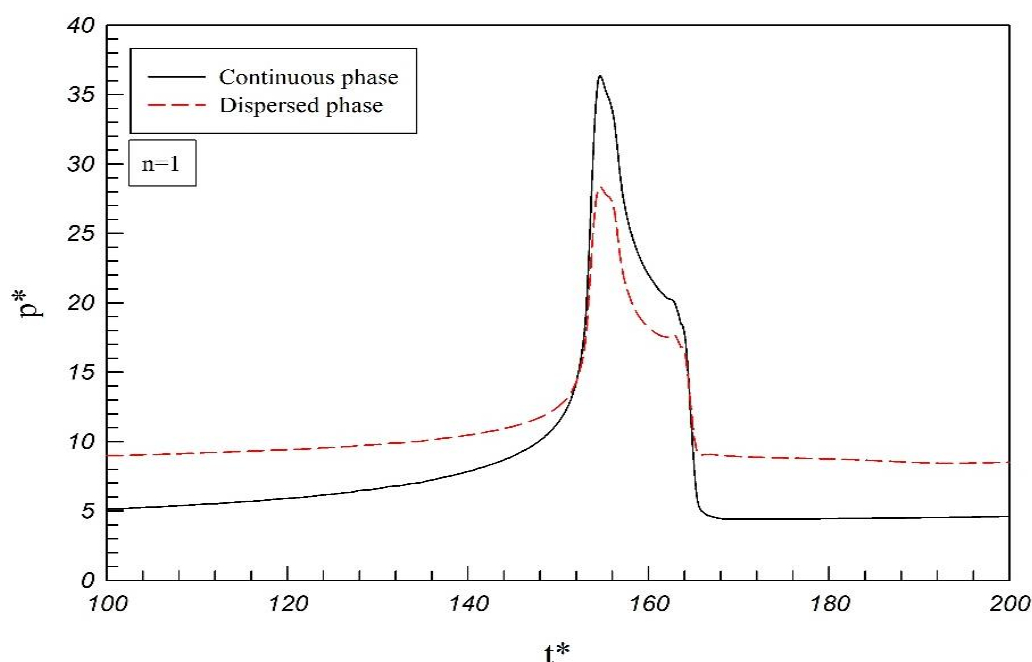
شکل ۴-۷: مقایسه فاصله بین قطرات در شاخص‌های توانی مختلف و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$



شکل ۴-۸: مقایسه فاصله بین قطرات در شاخص‌های توانی مختلف و $\eta_{od}/\eta_{cp} = 100$

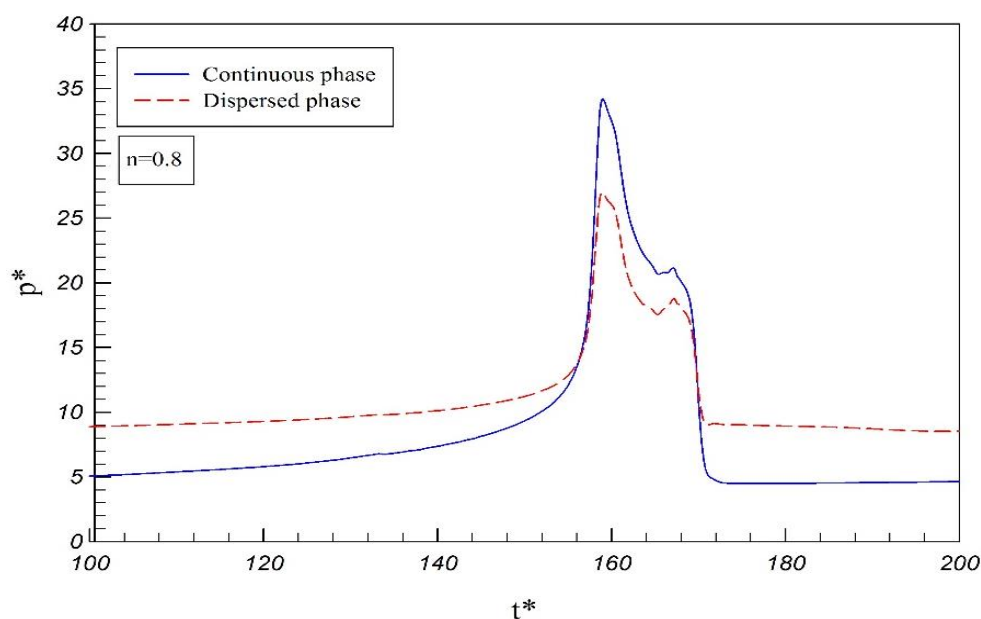
۴-۷- اثر شاخص توانی بر توزیع فشار بین فازها

توزیع فشار بین دو فاز در فرآیند تشکیل قطره، بر شناخت و درک رفتار قطره کمک شایانی می‌کند. در شکل‌های زیر توزیع فشار بین دو فاز در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 60$ و نسبت لزجت $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ در مقادیر مختلف شاخص توانی نشان داده شده است. در شکل ۴-۹ مقدار حداکثر فشار بی بعد فاز پیوسته برابر با ۳۷ و مقدار حداکثر فشار فاز گسسته برابر با ۳۹ است.



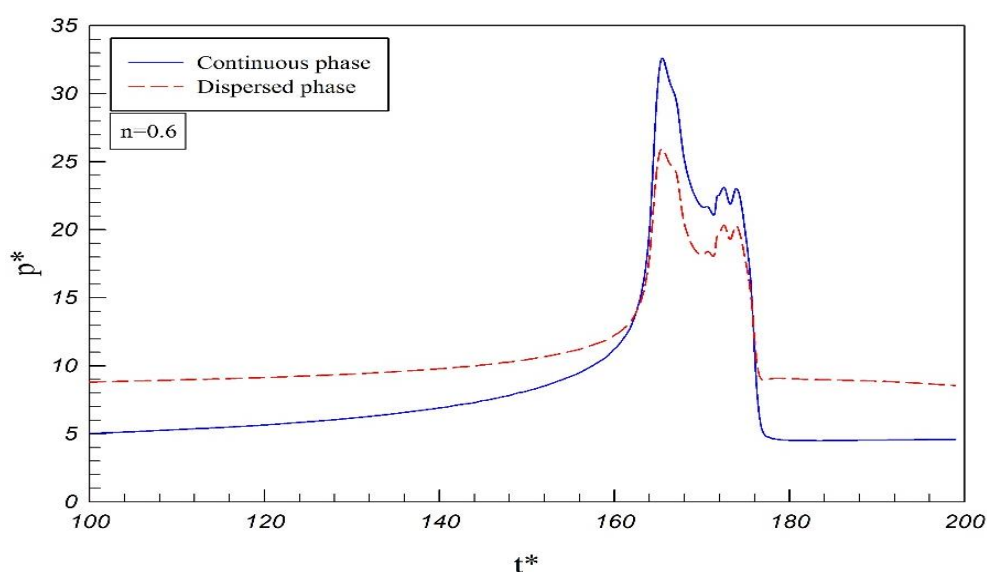
شکل ۹-۴: توزیع فشار بین دو فاز در $Q_c/Q_d = 60$ ، $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ و $n=1$

با کاهش مقدار شاخص توانی قطرات اصلی تولیدشده کوچک تر شده و در مقادیر پایین n حالت چندپخشی اتفاق می افتد. در حالت تک پخشی مطابق با شکل ۹-۴ و شکل ۱۰-۴ بعد از این که فاز گسسته وارد ناحیه اریفیس می شود، هر دو فاز یک افت فشار شدید را تجربه کرده و وقتی فاز گسسته با انتهای اریفیس رسیده و قطره تشکیل شده در آستانه جدایش قرار می گیرد هر دو فاز مقدار بسیار کوچکی افزایش فشار داشته و بعد از جدایش قطره، فشار هر دو فاز کم می شود و این فرآیند مجدداً تکرار می شود. همان طور که گفته شد با کاهش مقدار شاخص توانی، قطرات اصلی تولیدشده نیز کوچک تر می شوند. این کاهش اندازه قطرات اصلی بر توزیع فشار بین دو فاز تأثیر گذاشته و این تأثیر در شکل های زیر مشخص است. در شکل های زیر مشخص است که با کاهش n مقدار حداکثر فشار بین دو فاز نیز کمتر می شود.



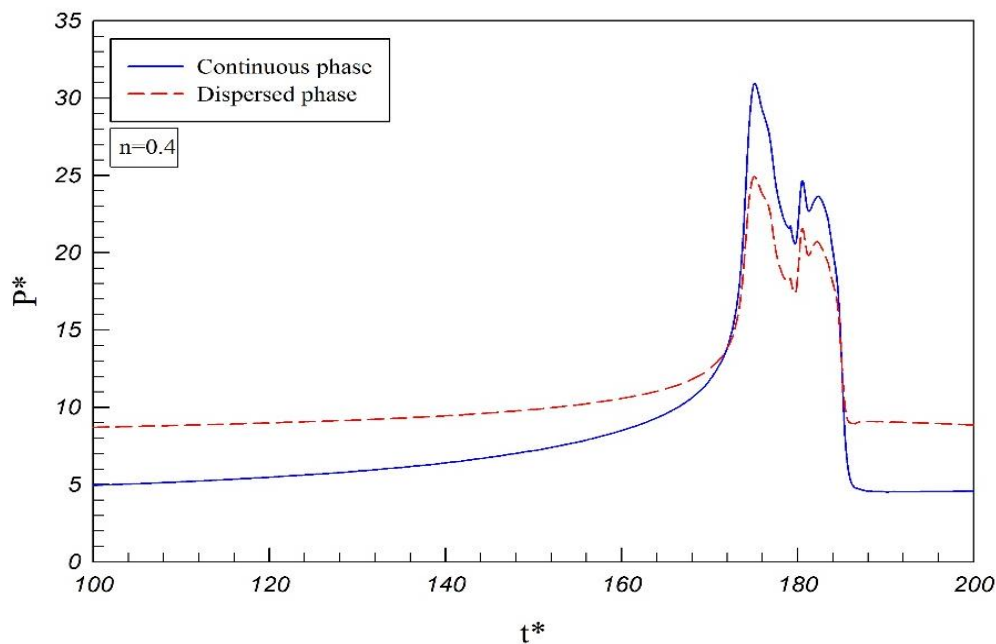
شکل ۴-۱۰: توزیع فشار بین دو فاز در $Q_c/Q_d = 60$ ، $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ و $n=0.8$

در شکل ۴-۱۱ بعد از افزایش جزئی فشار هر دو فاز در آستانه جدایش، هر دو فاز افت فشار کوچکی را تجربه کرده و به دلیل تشکیل قطره ثانویه کوچک مجدداً هر دو فاز افزایش فشار بسیار کوچکی را تجربه کرده و بعد از جدایش قطره ثانویه، هر دو فاز افت فشار محسوسی را تجربه کرده و این روند مجدداً برای قطرات بعدی تکرار می‌شود.



شکل ۴-۱۱: توزیع فشار بین دو فاز در $Q_c/Q_d = 60$ ، $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ و $n=0.6$

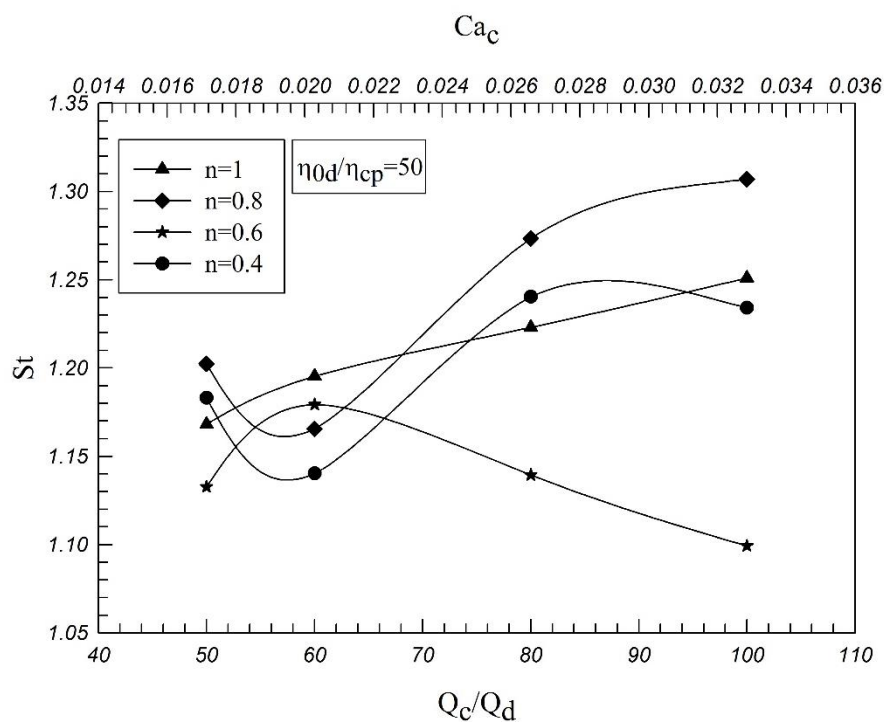
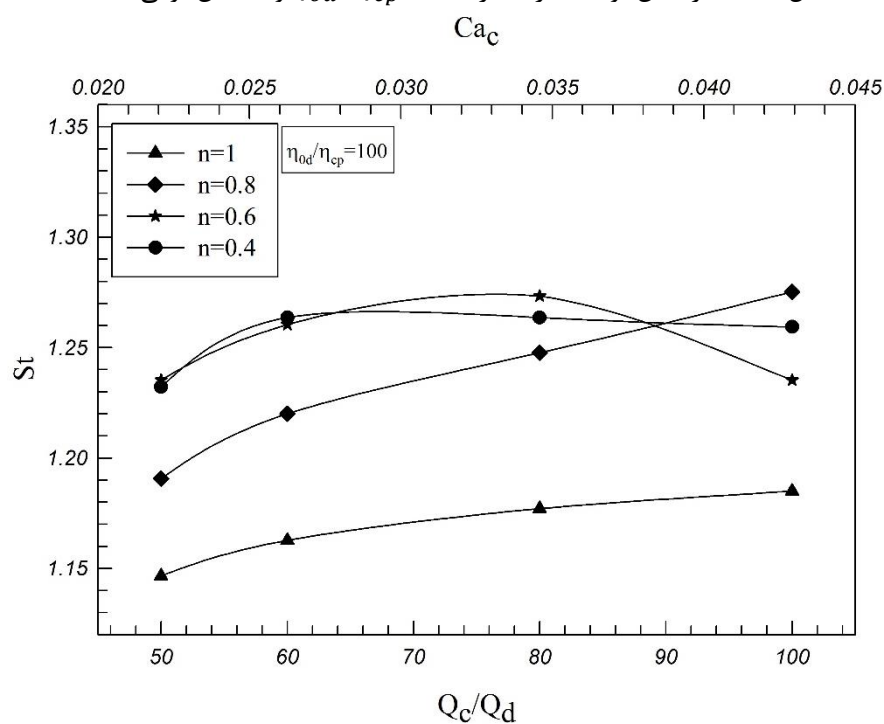
با دقت در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز ملاحظه می شود که با کاهش شاخص توانی، زمانی که در آن حداکثر فشار برای دو فاز اتفاق می افتد افزایش می یابد. به طور مثال در شکل ۴-۹ و برای حالت $n=1$ حداکثر فشار برای قطره اول در زمان بی بعد ۱۵۶ اتفاق می افتد در حالی که در شکل ۴-۱۱ این زمان برابر با ۱۶۵ است.



شکل ۴-۱۲: توزیع فشار بین دو فاز در $Q_c/Q_d = 60$ ، $\eta_{od}/\eta_{cp} = 50$ و $n=0.4$

۴-۸- نمودار اثر n بر فرکانس تولید قطرات

در شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ فرکانس تولید قطرات گزارش شده اند. همان طور که ملاحظه می شود رفتار مشخصی بین فرکانس تولید در مقادیر مختلف n ملاحظه نمی شود که این امر به دلیل روی دادن حالت چندپخشی در مقادیر کوچک n است.

شکل ۴-۱۳: فرکانس تولید قطرات در $\eta_{0d}/\eta_{cp} = 50$ و شاخص توانی مختلفشکل ۴-۱۴: فرکانس تولید قطرات در $\eta_{0d}/\eta_{cp} = 100$ و شاخص توانی مختلف

۴-۹- نتیجه گیری

در صورتی که فاز گسسته غیر نیوتنی باشد در این صورت مقدار شاخص توانی (n) در مدل کاریو تأثیر بسیاری بر اندازه قطرات خواهد داشت. با کاهش مقدار شاخص توانی، اندازه قطرات اصلی کوچک شده و در مقادیر کم

شاخص توانی حالت چندپخشی با چندین قطره ثانویه کوچک ایجاد می‌شود. همچنین با کاهش شاخص توانی در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز به دلیل چندپخشی شدن تشکیل قطرات، تغییرات کوچکی در مرحله آخر جدایش قطره مشاهده می‌شود. زمان‌هایی که فشار بین دو فاز باهم برابر می‌شوند در فرآیند جدایش بسیار مهم هستند. در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز مشاهده شد که در هر مرحله جدایش قطرات دو زمان حساس وجود دارد که در آن فشار بین دو فاز باهم برابر می‌شوند. در لحظاتی که در آن‌ها فشار بین دو فاز باهم برابر می‌شوند یا فاز گسسته در حال ورود به ناحیه اریفیس است و یا فاز گسسته در آستانه جدایش و تشکیل قطره است. اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز گسسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در حال ورود با اریفیس است و اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز پیوسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در انتهای اریفیس بوده و قطره در آستانه جدایش است. با کاهش شاخص توانی فاز قطره، زمانی که در آن هر دو فاز دارای بیشینه فشار هستند افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با کاهش مقدار شاخص توانی قطرات اصلی تولید شده نیز کوچک‌تر می‌شوند. این کاهش اندازه قطرات اصلی بر توزیع فشار بین دو فاز تأثیر گذاشته و با کاهش مقدار شاخص توانی، مقدار حداکثر فشار هر دو فاز نیز کمتر می‌شود.

۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

- ✓ نتایج نشان می دهند با افزایش عدد موینگی و نسبت نرخ جریان فاز پیوسته اندازه قطرات تشکیل شده کوچک تر می شود، البته در اعداد موینگی و نسبت دبی بالای فاز پیوسته، تأثیر افزایش نسبت دبی و عدد موینگی بر اندازه قطرات کم تر می شود.
- ✓ در اعداد موینگی پایین تأثیر تغییر نسبت دبی بر روی اندازه قطرات بیشتر بوده ولی احتمال ایجاد حالت جدایش چندپخشی قطرات زیاد می شود.
- ✓ جدایش چندپخشی زمانی اتفاق می افتد که پس از جدایش قطره اصلی باریکه باقی مانده از فاز گسسته در اریفیس به عقب برنگشته و کمی در اریفیس به رشد خود ادامه می دهد تا قطرات ثانویه جدا شوند.
- ✓ نتایج این پژوهش نشان می دهد که تأثیر تغییر فاصله بین انتهای کانال تزریق میانی و اریفیس (H_f) بر اندازه قطرات بسیار بیشتر از تأثیر تغییر اندازه اریفیس است.
- ✓ در صورتی که فاز گسسته غیرنیوتنی باشد در این صورت مقدار شاخص توانی (n) در مدل کاریو تأثیر بسیاری بر اندازه قطرات خواهد داشت. با کاهش مقدار شاخص توانی، اندازه قطرات اصلی کوچک شده و در مقادیر کم شاخص توانی حالت چندپخشی با چندین قطره ثانویه کوچک ایجاد می شود. همچنین با کاهش شاخص توانی در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز به دلیل چندپخشی شدن تشکیل قطرات، تغییرات کوچکی در مرحله آخر جدایش قطره مشاهده می شود. زمان هایی که فشار بین دوفاز باهم برابر می شوند در فرآیند جدایش بسیار مهم هستند.
- ✓ در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز مشاهده شد که در هر مرحله جدایش قطرات دو زمان حساس وجود دارد که در آن فشار بین دو فاز باهم برابر می شوند. در لحظاتی که در آن ها فشار بین دوفاز باهم برابر می شوند یا فاز گسسته در حال ورود به ناحیه اریفیس است و یا فاز گسسته در آستانه جدایش و تشکیل قطره است. اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود،

فشار فاز گسسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در حال ورود با اریفیس است و اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز پیوسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در انتهای اریفیس بوده و قطره در آستانه جدایش است.

✓ با کاهش شاخص توانی فاز قطره، زمانی که در آن هر دو فاز دارای بیشینه فشار هستند افزایش می‌یابد. ضمن اینکه با کاهش مقدار شاخص توانی قطرات اصلی تولیدشده نیز کوچک‌تر می‌شوند. این کاهش اندازه قطرات اصلی بر توزیع فشار بین دو فاز تأثیر گذاشته و با کاهش مقدار شاخص توانی، مقدار حداکثر فشار هر دو فاز نیز کمتر می‌شود.

۵-۲- پیشنهادها

برای تحقیقات بیشتر و کامل‌تر شدن پژوهش حاضر، بررسی‌ها و مطالعات روی هندسه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده پیشنهاد می‌شود:

- بررسی عددی و آزمایشگاهی گذار بین رژیم‌های مختلف
- شبیه‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار سیالات ویسکوالاستیک در فرآیند تشکیل و جدایش قطرات
- بررسی جدایش قطرات با در نظر گرفتن فاز پیوسته غیرنیوتنی و یا هر دو فاز غیرنیوتنی
- بررسی تأثیر تغییرات نرخ جریان فاز گسسته بر فرآیند جدایش قطرات
- بررسی دقیق‌تر حالت چندپخشی در تشکیل قطرات
- بررسی تأثیر میدان‌های خارجی مانند میدان الکتریکی، آکوستیک و غیره
- مطالعه عددی روی تشکیل قطرات و رفتار دینامیکی آن‌ها در رگ‌ها

پوستها

پیوست الف

در جداول زیر متغیرها و پارامترهایی که در نرم‌افزار المان محدود کامسول برای شبیه‌سازی فرآیند جدایش و تشکیل قطره در بخش نیوتنی پژوهش حاضر تعریف شد، آمده است.

جدول ب-۱: تنظیمات کلی تعریف‌شده برای متغیرها و پارامترها در نرم افزار کامسول برای بخش نیوتنی پژوهش

Name	Expression	value	Description
L1	350E-06[m]	3.5000E-4 m	
W1	1000E-06[m]	0.001 m	
L2	L1-150E-6[m]	2.0000E-4 m	
W2	500E-06[m]	5.0000E-4 m	
L3	L2	2.0000E-4 m	
W3	200E-06[m]	2.0000E-4 m	
L4	150E-06[m]	1.5000E-4 m	
W4	80E-06[m]	8.0000E-5 m	
L5	2800E-06[m]	0.0028 m	
W5	1000E-06[m]	0.001m	
DEPTH_3D	86E-06[m]	8.6000E-5 m	
sigma	0.0048[N/m]	0.0048 N/m	Surface tension
rho_cp	1000[kg/m^3]	1000 kg/m^3	Density of continuous phase
eta_cp	0.001[Pa*s]	0.001 Pa*s	Viscosity of continuous phase
rho_dp	960[kg/m^3]	960 kg/m^3	Density of dispersed phase
eta_ratio	50		Viscosity ratio
eta_dp	(eta_ratio)*eta_cp	0.05 Pa.s	viscosity of dispersed phase
contact_angle	145*(pi/180)[rad]	2.5307 rad	Contact angle
Qd_ml/s	0.04	0.04	Flow rate of dispersed phase
Q_ratio	50	50	Flow rate ratio
Qc_ml/s	(Q_ratio)*(Qd_mls)	2	Flow rate of continuous phase
Qc_3D	(Qc_mls)*(1E-8/36)[m^3/s]	5.5556E-10 m^3/s	Flow rate of continuous phase
Qd_3D	(Qd_mls)*(1E-8/36)[m^3/s]	1.1111E-11 m^3/s	Flow rate of dispersed phase
Ad_3D	W3*(DEPTH_3D)	1.7200E-8 m^2	Area of dispersed phase

Ac_3D	$(W1-W2)*(DEPTH_3D)$	4.3000E-8 m ²	Area of continous phase
Ud_3D	$(Qd_3D)/(Ad_3D)$	6.4599E-4 m/s	velocity of dispersed phase
Uc_3D	$(Qc_3D)/(Ac_3D)$	0.01292 m/s	velocity of continuous phase
Ud	$Qd_3D/(W4*DEPTH_3D)$	0.001615 m/s	velocity of dispersed phase in the orifice region
Uc	$Qc_3D/(W4*DEPTH_3D)$	0.080749 m/s	velocity of continuous phase in the orifice region
Re_dp_3D	$((rho_dp)*(Ud)*(W4))/(\eta_dp)$	0.0024860	Reynolds of dispersed phase
Ca_dp_3D	$((\eta_dp)*(Ud))/(\sigma)$	0.016823	Capillary of dispersed phase
Re_cp_3D	$((rho_cp)*(Uc)*(W4))/(\eta_cp)$	6.4599	Reynolds of continuous phase
Ca_cp_3D	$((\eta_cp)*(Uc))/(\sigma)$	0.016823	Capillary of continuous phase

همچنین در این تحقیق برای محاسبه قطر قطرات پس از جدا شدن آن‌ها در انتهای اریفیس و در

پایین دست کانال خروجی، در نرم‌افزار کامسول یک اپراتور انتگرال‌گیری به صورت زیر تعریف شد:

$$d_{\text{eff}} = 2 * \left(\left(\int_{\text{top1}}^{\text{phils} > 0.5} (x > 2.7 [\text{mm}]) \right) / \pi \right)^{1/2} \quad (\text{ب-۱})$$



شکل ب-۱: مراحل مدل‌سازی فرآیند جدایش و تشکیل قطره در نرم‌افزار کامسول

پیوست ب

جنس تراشه‌ها:

مواد معمول در ساخت دستگاه‌های میکروسیالی را می‌توان به دسته‌های عمده‌ای شامل پلیمرها، سیلیکون، شیشه و فلزات طبقه‌بندی کرد. البته سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و مواد دیگری نیز ممکن است استفاده شوند که کمتر متداول هستند [۸۸]. ماده دیگری به نام PDMS^۱ نیز وجود داشته که با توجه به هزینه کم آن، سهولت ساخت و شفافیت نوری به‌عنوان ماده معمول در ساخت دستگاه‌های میکروسیالی به کار می‌رود. از اشکالات این مواد می‌توان به آب‌گریز بودن PDMS و بازگشت سریع آب‌گریزی پس از آب‌دوست کردن سطح و انتقال دمای پایین در دماهای کمتر از 120 درجه سانتی‌گراد اشاره کرد [۸۹، ۹۰].

^۱ Polydimethylsiloxane

مراجع:

- [1] V. Kumar, M. Paraschivoiu, and K. Nigam, "Single-phase fluid flow and mixing in microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 66, pp. 1329-1373, 2011.
- [2] A. Manz, N. Graber, and H. á. Widmer, "Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing," *Sensors and actuators B: Chemical*, vol. 1, pp. 244-248, 1990.
- [3] G. M. Whitesides, "The origins and the future of microfluidics," *Nature*, vol. 442, p. 368, 2006.
- [4] A. Webster, C. E. Dyer, S. J. Haswell, and J. Greenman, "A microfluidic device for tissue biopsy culture and interrogation," *Analytical Methods*, vol. 2, pp. 1005-1007, 2010.
- [5] Y. Kikuchi, K. Sato, H. Ohki, and T. Kaneko, "Optically accessible microchannels formed in a single-crystal silicon substrate for studies of blood rheology," *Microvascular Research*, vol. 44, pp. 226-240, 1992.
- [6] A. Manz, D. J. Harrison, E. M. Verpoorte, J. C. Fettinger, A. Paulus, H. Lüdi, *et al.*, "Planar chips technology for miniaturization and integration of separation techniques into monitoring systems: capillary electrophoresis on a chip," *Journal of Chromatography A*, vol. 593, pp. 253-258, 1992.
- [7] L. Kang, B. G. Chung, R. Langer, and A. Khademhosseini, "Microfluidics for drug discovery and development: from target selection to product lifecycle management," *Drug discovery today*, vol. 13, pp. 1-13, 2008.
- [8] B. H. Weigl, R. L. Bardell, and C. R. Cabrera, "Lab-on-a-chip for drug development," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 55, pp. 349-377, 2003.
- [9] T. Nisisako, T. Torii, and T. Higuchi, "Novel microreactors for functional polymer beads," *Chemical Engineering Journal*, vol. 101, pp. 23-29, 2004.
- [10] M. Sun, W.-B. Du, and Q. Fang, "Microfluidic liquid-liquid extraction system based on stopped-flow technique and liquid core waveguide capillary," *Talanta*, vol. 70, pp. 392-396, 2006.
- [11] M. Takagi, T. Maki, M. Miyahara, and K. Mae, "Production of titania nanoparticles by using a new microreactor assembled with same axle dual pipe," *Chemical Engineering Journal*, vol. 101, pp. 269-276, 2004.
- [12] S. L. Anna, N. Bontoux, and H. A. Stone, "Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels," *Applied physics letters*, vol. 82, pp. 364-366, 2003.
- [13] J. Xu, S. Li, J. Tan, and G. Luo, "Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 5, pp. 711-717, 2008.
- [14] L. Sang, Y. Hong, and F. Wang, "Investigation of viscosity effect on droplet formation in T-shaped microchannels by numerical and analytical methods," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 6, pp. 621-635, 2009.
- [15] M. Castaño-Álvarez, D. F. P. Ayuso, M. G. Granda, M. T. Fernández-Abedul, J. R.

- García, and A. Costa-García, "Critical points in the fabrication of microfluidic devices on glass substrates," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 130, pp. 436-448, 2008.
- [16] L. Zhu, L.-y. Hou, and W.-y. Zhang, "A new fabrication method for glass microfluidic devices used in micro chemical system," *Sensors and actuators B: Chemical*, vol. 148, pp. 135-146, 2010.
- [17] C. N. Baroud, F. Gallaire, and R. Dangla, "Dynamics of microfluidic droplets," *Lab on a Chip*, vol. 10, pp. 2032-2045, 2010.
- [18] R. Seemann, M. Brinkmann, T. Pfohl, and S. Herminghaus, "Droplet based microfluidics," *Reports on progress in physics*, vol. 75, p. 016601, 2011.
- [19] S.-Y. Teh, R. Lin, L.-H. Hung, and A. P. Lee, "Droplet microfluidics," *Lab on a Chip*, vol. 8, pp. 198-220, 2008.
- [20] G. Vladislavljević, I. Kobayashi, and M. Nakajima, "Production of uniform droplets using membrane, microchannel and microfluidic emulsification devices," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 13, pp. 151-178, 2012.
- [21] V. Barbier, H. Willaime, P. Tabeling, and F. Jousse, "Producing droplets in parallel microfluidic systems," *Physical Review E*, vol. 74, p. 046306, 2006.
- [22] C. Holtze, "Large-scale droplet production in microfluidic devices—an industrial perspective," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 114008, 2013.
- [23] <http://blogs.nature.com/spoonful/2012/02/chip-promises-better-diagnosis-for-common-blood-disorder.html>.
- [24] <http://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/introduction-to-lab-on-a-chip-2015-review-history-and-future/>.
- [25] J. Nunes, S. Tsai, J. Wan, and H. Stone, "Dripping and jetting in microfluidic multiphase flows applied to particle and fibre synthesis," *Journal of physics D: Applied physics*, vol. 46, p. 114002, 2013.
- [26] A. Utada, E. Lorenceau, D. Link, P. Kaplan, H. Stone, and D. Weitz, "Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device," *Science*, vol. 308, pp. 537-541, 2005.
- [27] A. S. Utada, A. Fernandez-Nieves, J. M. Gordillo, and D. A. Weitz, "Absolute instability of a liquid jet in a coflowing stream," *Physical review letters*, vol. 100, p. 014502, 2008.
- [28] Y. N. Cheung and H. Qiu, "Characterization of acoustic droplet formation in a microfluidic flow-focusing device," *Physical Review E*, vol. 84, p. 066310, 2011.
- [29] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse, and H. Stone, "Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction," *journal of fluid mechanics*, vol. 595, pp. 141-161, 2008.
- [30] H. Liu and Y. Zhang, "Droplet formation in microfluidic cross-junctions," *Physics of Fluids*, vol. 23, p. 082101, 2011.
- [31] T. P. Lagus and J. F. Edd, "A review of the theory, methods and recent applications of high-throughput single-cell droplet microfluidics," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 114005, 2013.
- [32] G. T. Vladislavljević, R. Al Numani, and S. A. Nabavi, "Microfluidic production of multiple emulsions," *Micromachines*, vol. 8, p. 75, 2017.

- [33] R. M. Erb, D. Obrist, P. W. Chen, J. Studer, and A. R. Studart, "Predicting sizes of droplets made by microfluidic flow-induced dripping," *Soft Matter*, vol. 7, pp. 8757-8761, 2011.
- [34] E. Castro-Hernandez, V. Gundabala, A. Fernández-Nieves, and J. M. Gordillo, "Scaling the drop size in coflow experiments," *New Journal of Physics*, vol. 11, p. 075021, 2009.
- [35] A. Utada, L.-Y. Chu, A. Fernandez-Nieves, D. Link, C. Holtze, and D. Weitz, "Dripping, jetting, drops, and wetting: The magic of microfluidics," *Mrs Bulletin*, vol. 32, pp. 702-708, 2007.
- [36] P. Garstecki, M. J. Fuerstman, H. A. Stone, and G. M. Whitesides, "Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of breakup," *Lab on a Chip*, vol. 6, pp. 437-446, 2006.
- [37] P. Garstecki, A. Ganan-Calvo, and G. Whitesides, "Formation of bubbles and droplets in microfluidic systems," *Technical sciences*, vol. 53, 2005.
- [38] Y. Li, M. Jain, Y. Ma, and K. Nandakumar, "Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device," *Soft matter*, vol. 11, pp. 3884-3899, 2015.
- [39] H. Liu and Y. Zhang, "Droplet formation in a T-shaped microfluidic junction," *Journal of applied physics*, vol. 106, p. 034906, 2009.
- [40] Y. Shi and G. Tang, "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in non-Newtonian fluids," *Communications in Computational Physics*, vol. 17, pp. 1056-1072, 2015.
- [41] W. Lee, L. M. Walker, and S. L. Anna, "Role of geometry and fluid properties in droplet and thread formation processes in planar flow focusing," *Physics of Fluids*, vol. 21, p. 032103, 2009.
- [42] G. T. Vladislavljević, N. Khalid, M. A. Neves, T. Kuroiwa, M. Nakajima, K. Uemura, *et al.*, "Industrial lab-on-a-chip: Design, applications and scale-up for drug discovery and delivery," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 65, pp. 1626-1663, 2013.
- [43] Q. Yuan and R. A. Williams, "Precision emulsification for droplet and capsule production," *Adv Powder Technol*, vol. 25, pp. 122-135, 2014.
- [44] S. L. Anna and H. C. Mayer, "Microscale tipstreaming in a microfluidic flow focusing device," *Physics of Fluids*, vol. 18, p. 121512, 2006.
- [45] S. L. Anna, "Droplets and bubbles in microfluidic devices," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 48, pp. 285-309, 2016.
- [46] T. Thorsen, R. W. Roberts, F. H. Arnold, and S. R. Quake, "Dynamic pattern formation in a vesicle-generating microfluidic device," *Physical review letters*, vol. 86, p. 4163, 2001.
- [47] T. Cubaud, M. Tatineni, X. Zhong, and C.-M. Ho, "Bubble dispenser in microfluidic devices," *Physical Review E*, vol. 72, p. 037302, 2005.
- [48] S. L. Anna, G. F. Christopher, and N. Noharuddin, "Droplet Breakup in Shear and Elongation Dominated Flows in Microfluidic Devices," in *ASME 2005 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2005, pp. 669-671.
- [49] Z. Yu, O. Hemminger, and L.-S. Fan, "Experiment and lattice Boltzmann simulation of two-phase gas–liquid flows in microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 62,

- pp. 7172-7183, 2007.
- [50] F. Malloggi, S. A. Vanapalli, H. Gu, D. van den Ende, and F. Mugele, "Electrowetting-controlled droplet generation in a microfluidic flow-focusing device," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 19, p. 462101, 2007.
- [51] J. Tan, J. Xu, S. Li, and G. Luo, "Drop dispenser in a cross-junction microfluidic device: Scaling and mechanism of break-up," *Chemical Engineering Journal*, vol. 136, pp. 306-311, 2008.
- [52] Z. Nie, M. Seo, S. Xu, P. C. Lewis, M. Mok, E. Kumacheva, *et al.*, "Emulsification in a microfluidic flow-focusing device: effect of the viscosities of the liquids," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 5, pp. 585-594, 2008.
- [53] J. Sivasamy, T.-N. Wong, N.-T. Nguyen, and L. T.-H. Kao, "An investigation on the mechanism of droplet formation in a microfluidic T-junction," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 11, pp. 1-10, 2011.
- [54] T. Fu, Y. Wu, Y. Ma, and H. Z. Li, "Droplet formation and breakup dynamics in microfluidic flow-focusing devices: from dripping to jetting," *Chemical engineering science*, vol. 84, pp. 207-217, 2012.
- [55] L. Peng, M. Yang, S.-s. Guo, W. Liu, and X.-z. Zhao, "The effect of interfacial tension on droplet formation in flow-focusing microfluidic device," *Biomedical microdevices*, vol. 13, pp. 559-564, 2011.
- [56] Y. Lu, T. Fu, C. Zhu, Y. Ma, and H. Z. Li, "Pinch-off mechanism for Taylor bubble formation in a microfluidic flow-focusing device," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 16, pp. 1047-1055, 2014.
- [57] L. Arriaga, E. Amstad, and D. Weitz, "Scalable single-step microfluidic production of single-core double emulsions with ultra-thin shells," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 3335-3340, 2015.
- [58] Y. Ren, Z. Liu, and H. C. Shum, "Breakup dynamics and dripping-to-jetting transition in a Newtonian/shear-thinning multiphase microsystem," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 121-134, 2015.
- [59] J. Hua, B. Zhang, and J. Lou, "Numerical simulation of microdroplet formation in coflowing immiscible liquids," *AIChE Journal*, vol. 53, pp. 2534-2548, 2007.
- [60] D. Qiu, L. Silva, A. L. Tonkovich, and R. Arora, "Micro-droplet formation in non-Newtonian fluid in a microchannel," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 8, pp. 531-548, 2010.
- [61] J. Berthier, S. Le Vot, P. Tiquet, N. David, D. Lauro, P. Benhamou, *et al.*, "Highly viscous fluids in pressure actuated flow focusing devices," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 158, pp. 140-148, 2010.
- [62] S. Gong, P. Cheng, and X. Quan, "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in microchannels under an electric field," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 5863-5870, 2010.
- [63] W. Wang, Z. Liu, Y. Jin, and Y. Cheng, "LBM simulation of droplet formation in microchannels," *Chemical engineering journal*, vol. 173, pp. 828-836, 2011.
- [64] H. Liu and Y. Zhang, "Lattice Boltzmann simulation of droplet generation in a microfluidic cross-junction," *Communications in computational physics*, vol. 9, pp.

- 1235-1256, 2011.
- [65] T. M. Moyle, L. M. Walker, and S. L. Anna, "Predicting conditions for microscale surfactant mediated tipstreaming," *Physics of Fluids*, vol. 24, p. 082110, 2012.
- [66] Y. Shi, G. Tang, and H. Xia, "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in T-junction and flow focusing devices," *Computers & Fluids*, vol. 90, pp. 155-163, 2014.
- [67] J. Li, H. Liu, N. Ioannou, Y. Zhang, and J. M. Reese, "Lattice Boltzmann Simulations of Thermocapillary Motion of Droplets in Microfluidic Channels," *Communications in computational physics*, vol. 17, pp. 1113-1126, 2015.
- [68] Z. Z. Chong, S. B. Tor, N. H. Loh, T. N. Wong, A. M. Gañán-Calvo, S. H. Tan, *et al.*, "Acoustofluidic control of bubble size in microfluidic flow-focusing configuration," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 996-999, 2015.
- [69] V.-L. Wong, K. Loizou, P.-L. Lau, R. S. Graham, and B. N. Hewakandamby, "Numerical Simulation of the Effect of Rheological Parameters on Shear-Thinning Droplet Formation," in *Proceedings of the ASME 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting, Chicago, Illinois, August, 2014*, pp. 3-8.
- [70] W. Lan, S. Li, and G. Luo, "Numerical and experimental investigation of dripping and jetting flow in a coaxial micro-channel," *Chemical Engineering Science*, vol. 134, pp. 76-85, 2015.
- [71] A. Balabel, "Numerical Simulation of Two-Phase Flow in Micro-and Nano-Devices Using Level Set Method," *Journal of Nanoscience and Nanoengineering*, vol. 1, pp. 1-8, 2015.
- [72] E. Castro-Hernández, M. P. Kok, M. Versluis, and D. F. Rivas, "Study of the geometry in a 3D flow-focusing device," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 20, p. 40, 2016.
- [73] F. Bai, X. He, X. Yang, R. Zhou, and C. Wang, "Three dimensional phase-field investigation of droplet formation in microfluidic flow focusing devices with experimental validation," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 93, pp. 130-141, 2017.
- [74] M. Nekouei and S. A. Vanapalli, "Volume-of-fluid simulations in microfluidic T-junction devices: Influence of viscosity ratio on droplet size," *Physics of Fluids*, vol. 29, p. 032007, 2017.
- [75] L. Wu, X. Liu, Y. Zhao, and Y. Chen, "Role of local geometry on droplet formation in axisymmetric microfluidics," *Chemical Engineering Science*, vol. 163, pp. 56-67, 2017.
- [76] K. S. Krishna, Y. Li, S. Li, and C. S. Kumar, "Lab-on-a-chip synthesis of inorganic nanomaterials and quantum dots for biomedical applications," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 65, pp. 1470-1495, 2013.
- [77] H. A. Amiri and A. A. Hamouda, "Evaluation of level set and phase field methods in modeling two phase flow with viscosity contrast through dual-permeability porous medium," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 52, pp. 22-34, 2013.
- [78] E. Olsson, G. Kreiss, and S. Zahedi, "A conservative level set method for two phase flow II," *Journal of Computational Physics*, vol. 225, pp. 785-807, 2007.
- [79] E. Olsson and G. Kreiss, "A conservative level set method for two phase flow," *Journal of computational physics*, vol. 210, pp. 225-246, 2005.
- [80] V. L. Wong, "Computational studies of shear-dependent non-newtonian droplet

- formation at microfluidics T-junction with experimental justification," University of Nottingham, 2015.
- [81] <http://www.dataphysics.de/2/start/understanding-interfaces/basics/surfactants-and-critical-micelle-concentration-cmc/>.
- [82] Y.-C. Chang, T. Hou, B. Merriman, and S. Osher, "A level set formulation of Eulerian interface capturing methods for incompressible fluid flows," *Journal of computational Physics*, vol. 124, pp. 449-464, 1996.
- [83] A. Caboussat, "Numerical simulation of two-phase free surface flows," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 12, pp. 165-224, 2005.
- [84] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [85] <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Viscosity2.html>.
- [86] J. A. Sethian, *Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science* vol. 3: Cambridge university press, 1999.
- [87] K. B. Deshpande and W. B. Zimmerman, "Simulation of interfacial mass transfer by droplet dynamics using the level set method," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 6486-6498, 2006.
- [88] J. L. Sang-Joon and S. Narayan, "Microfabrication for Microfluidics," *Artech House*, 2010.
- [89] K. A. Heyries, M. G. Loughran, D. Hoffmann, A. Homsy, L. J. Blum, and C. A. Marquette, "Microfluidic biochip for chemiluminescent detection of allergen-specific antibodies," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 23, pp. 1812-1818, 2008.
- [90] J. Zhou, A. V. Ellis, and N. H. Voelcker, "Recent developments in PDMS surface modification for microfluidic devices," *Electrophoresis*, vol. 31, pp. 2-16, 2010.

Abstract:

Droplet production in microfluidic devices has a wide range of application in biology, chemistry and medicine. Because of the wide spread use of this phenomenon several studies have been devoted to investigating various aspects of microfluidic droplet production numerically and experimentally. In microfluidic systems three major regimes of squeezing, dripping and jetting are identified for the droplet breakup. In flow focusing microfluidic devices the formation and breakup of the droplet appear more in the dripping and squeezing regimes than the jetting regimes. In present research the droplet formation and the droplet break up in flow focusing microfluidic devices for an immiscible flow is investigated numerically. Therefore, the level set method is used for the simulation of the interface tracking between two immiscible phases and the Newtonian and shear-thinning non-Newtonian fluids are investigated. The important dimensionless parameters of capillary number, viscosity ratio of two phases and the ratio of the inlet flow rate are investigated. Also the variation of the width of focusing channel (H_f), the variation of the size of the orifice, the exponent of carreau model (n) on the breakup droplet, the size of the droplet, the distance between drops, the droplet formation frequency and pressure distribution between phases. Obtained result comparison of numeric solution with available numeric and laboratory data indicates that obtained results have accuracy and reliability. The results show that, increasing the capillary number and ratio of the flow rate decreases the size of the formed droplets and the effect of these parameters is more significant in small values of capillary number and flow rate. In small values of capillary number, the possibility of the poly-dispersed breakup increases. The poly-dispersed breakup appears when the primary droplet is pinched off from the dispersed phase, the dispersed phase continues to grow side the orifice, forming secondary droplets until all the dispersed phase in the orifice are separated. The results of this study shows that, the effect of the variation of the width of focusing channel (H_f) on droplet size is more than the variation of the size of the orifice. In non-Newtonian dispersed phase, the exponent index has a significant effect on the droplet size. By decreasing this index, the size of droplets reduces and in small values of this parameter the poly-dispersed with several secondary small droplets appear. Also because of droplet formation poly-dispersed due to decreasing the exponent index, in pressure contribution diagrams between two phases, small variations observed in the last stage of droplet breakup process.

Keywords: flow-focusing micro channel, level set method, non-Newtonian fluids, droplet breakup, capillary number, poly-dispersed.



Shahrood University of Technology

Engineering Department

**Numerical investigation of two phase flow
in microchannel**

By:

Seyed Yaser Hoseini Sedigh

Supervisor(s):

Dr. Ali Abbasnejad,

Dr. Mohsen Nazari

September 2017