





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

بررسی عددی تشکیل قطره در رژیم جریان سه فازی در یک

میکروکانال

نگارنده

سیدعلیرضا موسوی رهیزی

استاد راهنما

دکتر علی عباس نژاد

تیر ۱۳۹۹

شماره: ۲۰/۲۹۹/۱۰۷
تاریخ: ۹۹/۵/۲۸

باسمه تعالی



مدریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید علیرضا موسوی رهیزی با شماره دانشجویی ۹۶۰۰۳۸۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان بررسی عددی تشکیل قطره در رژیم جریان سه فاز در یک میکروکانال که در تاریخ ۱۳۹۹/۰۴/۲۴ با حضور هیأت داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹-۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	علی عباس نژاد	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	مسلم صبوری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	محمود نوروزی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	محسن نظری	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم اثر

تقدیم به مهربان فرشتگانی که:

سحلات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جبارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای

زندگی ام، مدیون حضور سبز آن‌هاست

تقدیم به خانواده‌ی عزیزم.

تشکر و قدردانی

از خدای متعال سپاس گزارم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود تا بتوانم این مرحله از علم آموزی را با

موفقیت به پایان برسانم. از خانواده‌ی عزیزم به خاطر حمایت و محبت‌های بی‌دریغی که نسبت به من داشته و دارند، کمال تشکر و

سپاس را دارم. از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر علی عباس نژاد به خاطر راهنمایی‌های ارزشمند و زحمات ایشان در کلیه‌ی

مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

در انتها از تمامی اساتید محترم دانشکده‌ی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود که توفیق شاکردی‌شان را داشتم، سپاس گزارم

نموده از خدای متعال سلامت و توفیق برای ایشان مسألت دارم.

سید علیرضا موسوی رهیزی

تیر ۱۳۹۹

تعمدنامه

این جانب سیدعلیرضا موسوی رهییزی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی بررسی عددی تشکیل قطره در رژیم جریان سه‌فازی در یک میکروکانال تحت راهنمایی دکتر علی عباس‌نژاد متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه‌ی مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

- کلیه‌ی حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

جریان سیالات چندفازی، از مباحث بسیار مهم و تأثیرگذار علم مکانیک سیالات است که نحوه‌ی مواجهه با آن و شناخت درست مسائل مطرح شده در این زمینه، می‌تواند تأثیر شگرفی در آینده‌ی جهان فناوری و صنعت داشته باشد. پژوهش حاضر به‌صورت منسجم بر روی شبیه‌سازی جریان‌های سه‌فازی، در حالات مختلف ویسکوالاستیک و دوگانه با چند قطره درونی انجام گرفته است. در این مطالعه از روش عددی سطح تراز استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی صحت سنجی نتایج ابتدا جریان دوفازی در میکروکانال T شکل مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از همان مکانیزم، جریان سه‌فازی در میکروکانال ترکیبی T شکل شبیه‌سازی و فرآیند تشکیل جریان‌های سه‌فازی تجزیه و تحلیل شده است. بدین منظور اثرات تغییر میزان سرعت و لزجت فازهای درونی میانی و بیرونی بر روی خواص قطرات ایجاد شده در این نوع خاص از جریانات مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که با بررسی اثرات سرعت، و لزجت سیال‌های موجود در داخل یک میکروکانال تی شکل سلسله مراتبی می‌توان نتایج اثرات واضح این پارامترها را به‌صورت واضح بر نحوه جدایش قطرات داخل و بیرونی، اندازه بی‌بعد و فاصله بی‌بعد بین جدایش قطرات را ملاحظه نمود به‌گونه‌ای که با تنظیم نمودن پارامترهای سرعت و لزجت می‌توان بسته به کاربردهای موردنظر اندازه قطرات جدا شده تعداد آن‌ها و فاصله ایجاد شده بین آن‌ها را کنترل نمود.

کلمات کلیدی: میکروکانال تی شکل، روش سطح تراز، جدایش قطرات، قطره‌های دارای پوشش.

فهرست مطالب

فهرست جداول.....	ظ
فهرست اشکال.....	ع
فهرست علائم.....	ق
فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ تعریف میکروکانال.....	۸
۳-۱ میکروکانال‌ها و انواع آن‌ها.....	۱۰
۱-۳-۱ میکروکانال‌های T شکل.....	۱۱
۲-۳-۱ میکروکانال‌های هم‌جریان.....	۱۳
۳-۳-۱ میکروسیالی جریان متمرکز شده.....	۱۴
۴-۳-۱ میکروکانال‌های اتصال صلیبی و Y شکل.....	۱۶
۵-۳-۱ میکروکانال‌های تولید کننده قطرات چند جزئی.....	۱۷
۴-۱ نمونه‌های کاربردی میکروکانال در صنعت.....	۲۰
۱-۴-۱ کاربرد میکروکانال جهت پاکسازی و تصفیه خون.....	۲۱
۲-۴-۱ کاربرد میکروکانال در کروماتوگرافی.....	۲۱
فصل ۲: پیشینه پژوهش.....	۲۳
۱-۲ تاریخچه پژوهش.....	۲۴
۲-۲ جایگاه پژوهش حاضر و فرضیات مسئله.....	۳۰
۱-۲-۲ کاربرد، اهمیت و ضرورت تحقیق.....	۳۳

۳۳	۲-۲-۲ نوآوری تحقیق.....
۳۴	۳-۲-۲ جریان‌های سه‌فازی.....
۳۶	۴-۲-۲ نحوه شبکه‌بندی و استقلال از شبکه.....
۳۷	۵-۲-۲ میکروکانال T شکل.....
۳۹	فصل ۳: معادلات حاکم.....
۴۰	۱-۳ پیشگفتار.....
۴۱	۲-۳ فرض پیوستگی.....
۴۲	۳-۳ معادلات حاکم.....
۴۴	۴-۳ جریان آرام.....
۴۵	۵-۳ قانون هاگن - پوازی.....
۴۵	۶-۳ ناپایداری ریلی - پلاتر.....
۴۶	۷-۳ خیس‌کنندگی و کشش سطحی.....
۴۶	۱-۷-۳ خیس‌کنندگی.....
۴۷	۲-۷-۳ لزجت.....
۴۷	۳-۷-۳ کشش سطحی.....
۴۹	۴-۷-۳ سورفوکانت.....
۵۰	۸-۳ نیروها، مقیاس‌گذاری و اعداد بی‌بعد.....
۵۱	۱-۸-۳ اعداد و پارامترهای بی‌بعد.....
۵۶	۲-۸-۳ عدد کاپیلاری (Ca).....
۵۷	۳-۸-۳ عدد وبر (We).....
۵۷	۹-۳ روش‌های مطرح در بررسی سیالات چندفازی.....
۵۹	۱-۹-۳ روش‌های شبیه‌سازی مستقیم جریان سیال چندفازی.....
۶۱	۲-۹-۳ روش کسر حجمی سیال.....
۶۴	۳-۹-۳ روش سطح تراز.....

۴-۹-۳	روش پیشروی جبهه.....	۶۶
فصل ۴: تعریف مسئله و نتایج.....		
۴-۱	مقدمه.....	۷۵
۴-۲	صحت سنجی و بررسی استقلال از شبکه.....	۷۶
۴-۳	شکل‌گیری جریان سه‌فازی.....	۷۹
۴-۴	فاصله بین قطرات.....	۸۵
۴-۵	تأثیر کشش سطحی.....	۸۷
۴-۶	اثر افزایش سرعت فاز داخلی.....	۸۹
۴-۷	اثر افزایش سرعت فاز میانی.....	۹۳
۴-۸	اثر افزایش سرعت فاز خارجی.....	۹۴
۴-۹	اثر افزایش ویسکوزیته فاز داخلی.....	۹۵
۴-۱۰	اثر افزایش ویسکوزیته فاز میانی.....	۹۷
۴-۱۱	اثر افزایش ویسکوزیته فاز خارجی.....	۹۸
فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....		
۵-۱	نتایج این پایان‌نامه.....	۱۰۲
۵-۲	پیشنهادهای.....	۱۰۳
مراجع.....		
		۱۰۴

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خواص سیالات استفاده شده ۳۶
- جدول ۱-۳: طبقه‌بندی رژیم‌های جریان با توجه به عدد ناسن [۵۱] ۴۱
- جدول ۲-۳: نیروها و اعداد بی‌بعد ۵۱
- جدول ۱-۴: نتایج مربوط به استقلال از شبکه‌بندی برای حالت $Ca=0.0165$ ۷۷
- جدول ۲-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر در نسبت دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در مراجع [۸۳ و ۳۴] به ازای $\eta_d/\eta_C = 50$ ۷۹

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: افشانه، فرایندهای مؤثر بر آن و بررسی فرایند کاویتاسیون [۱، ۲]..... ۳
- شکل ۲-۱: نمونه‌ای از دستگاه‌های میکروسیالی [۲۵، ۲۶]..... ۷
- شکل ۳-۱: نمونه‌هایی از میکروکانال‌ها [۳۰]..... ۱۰
- شکل ۴-۱: دستگاه میکروسیالی T شکل ساده [۲۲، ۳۳]..... ۱۱
- شکل ۵-۱: دستگاه میکروسیالی T شکل با دو تغییر ساده متداول [۳۳]..... ۱۲
- شکل ۶-۱: دستگاه میکروسیالی هم‌جریان [۳۳، ۳۴]..... ۱۳
- شکل ۷-۱: دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده [۳۳]..... ۱۴
- شکل ۸-۱: دستگاه‌های میکروسیالی با (الف) تر شدن دیواره‌های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز شده با جریان‌های مخالف [۳۳، ۳۴]..... ۱۵
- شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال‌های (الف) اتصال صلیبی (ب) Y شکل [۳۳، ۳۴]..... ۱۶
- شکل ۱۰-۱: استراتژی‌های میکروسیالی معمول برای تولید قطراتی به‌صورت روکش‌دار [۳۳، ۳۴]..... ۱۸
- شکل ۱۱-۱: شماتیک تولید قطرات روکش‌دار توسط سری کردن سه میکروکانال اتصال صلیبی [۳۳، ۳۴]..... ۱۹
- شکل ۱۲-۱: شماتیک دستگاه‌های میکروسیالی معمول جهت تولید قطرات چند جزئی [۲۲، ۳۳، ۳۴]..... ۱۹
- شکل ۱۳-۱: نمونه‌ای از دستگاه ریز جریانی با شبکه‌ای از میکروکانال جهت تصفیه خون [۳۹]..... ۲۱
- شکل ۱۴-۱: نمونه‌ای از دو کروماتوگراف برای جداسازی مواد تجزیه‌ای [۳۹]..... ۲۲
- شکل ۱-۲: شماتیک یک میکروکانال T شکل واحد..... ۳۲
- شکل ۲-۲: شماتیکی از هندسه تولید کننده جریان سه‌فازی..... ۳۵
- شکل ۳-۲: نحوه شبکه‌بندی هندسه مسئله..... ۳۷
- شکل ۳-۳: (الف) شرایط خیس کنندگی. (چپ) دو فاز به‌صورت نسبی سطح را خیس می‌کنند و خط تماس را شکل می‌دهند. (راست) فاز شماره دو ترجیح به خیس کنندگی کامل سطح دارد. (ب) شرایط تعادل خیس کنندگی برای دو فاز با خیس کنندگی نسبی، مشخص شدن زاویه تماس مقدار کشش سطحی [۶۱]..... ۴۷

شکل ۳-۲: فصل مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر [۶۳] (الف) نمای میکروسکوپی در اندازه مولکولی از فصل مشترک (ب) قطره آویزان (ج) قطره چسبیده به سطح ۴۹

شکل ۳-۳: نحوه فرارفت روش کسر حجمی سیال [۷۹] ۶۲

شکل ۳-۴: روش‌های متفاوت بازسازی سطح جدایی در روش کسر حجمی سیال [۷۹] ۶۴

شکل ۳-۵: تابع نشانه در روش سطح تراز [۷۹] ۶۵

شکل ۳-۶: نمایی از یک سطح جدایی سه‌بعدی [۸۱] ۶۸

شکل ۳-۷: یک المان و اطلاعات ذخیره شده روی آن [۸۱] ۶۹

شکل ۳-۸: اصلاح ساختار المان [۸۱] ۷۰

شکل ۳-۹: مقایسه روش سطح تراز بالا و پیشروی جبهه پایین [۸۲] ۷۲

شکل ۴-۱: مقایسه اندازه بی‌بعد قطره به‌عنوان تابعی از عدد کاپیلاری با نتایج آزمایشگاهی [۸۳] ۷۸

شکل ۴-۲: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر به ازای دو نسبت لزجت مختلف در نسبت دبی $Qc/Qd = 20$ و $Cac = 0.0083$ داخلی، (الف) نتایج پژوهش حاضر (ب) نتایج آزمایشگاهی [۸۲] (ج) نتایج عددی لی و همکاران [۸۳] ۸۰

شکل ۴-۳: تولید قطره داخلی در مقطع تی شکل اول به دلیل جدایش فاز درونی در عدد کاپیلاری $0.083/0$ ۸۲

شکل ۴-۴: مراحل شکل‌گیری قطره داخلی در داخل پوششی از جریان فاز دوم در جریان خارجی در عدد کاپیلاری داخلی و خارجی به ترتیب $0.083/0$ و $0.01/0$ ۸۴

شکل ۴-۵: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ ۸۶

شکل ۴-۶: فاصله بین قطرات برحسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف و به ازای نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 100$ ۸۶

شکل ۴-۷: تأثیر کشش سطحی بر فرآیند تشکیل قطره در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ در اتصال T شکل اول ۸۷

شکل ۴-۸: اندازه قطره در کشش سطحی‌های مختلف و اعداد موینگی‌های معادل در $Qc/Qd = 50$ و نسبت لزجت $\eta d/\eta c = 50$ در اتصال T شکل اول ۸۸

شکل ۴-۹: اثر تغییر سرعت سیال فاز داخلی بر میزان فاصله بی‌بعد بین قطرات و اندازه بی‌بعد آن‌ها ۸۹

- شکل ۴-۱۰: مراحل شکل‌گیری دو قطره داخلی در داخل پوششی از جریان فاز دوم در عدد کاپیلاری داخلی ۰/۰۰۸۳ و عدد کاپیلاری خارجی ۰/۰۱۵..... ۹۲
- شکل ۴-۱۱: اثر تغییر سرعت سیال فاز میانی بر میزان اندازه بی‌بعد قطره داخلی و پوشش آن..... ۹۳
- شکل ۴-۱۲: اثر تغییر سرعت سیال فاز خارجی بر میزان اندازه بی‌بعد محصور کننده قطره داخلی..... ۹۴
- شکل ۴-۱۳: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز داخلی بر میزان فاصله بی‌بعد بین قطرات و اندازه بی‌بعد آن‌ها..... ۹۵
- شکل ۴-۱۴: مراحل شکل‌گیری قطره داخلی با ویسکوزیته بالا در عدد کاپیلاری ۰/۲..... ۹۷
- شکل ۴-۱۵: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز میانی بر میزان اندازه بی‌بعد قطره داخلی و پوشش آن..... ۹۸
- شکل ۴-۱۶: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز خارجی بر میزان اندازه بی‌بعد محصور کننده قطره داخلی..... ۹۹

فهرست علائم

عدد بی بعد کاپیلاری	Ca
قطر هیدرولیکی	$D_H(m)$
عدد بی بعد نادسن	K_n
انحنا	$k(m^{-1})$
مشخصه مقیاس طولی	$L(m)$
جرم مولی	$M(kg/mol)$
عدد آوگادرو	N
بردار عمود بر سطح	n
فشار	$p(Pa)$
دبی جرمی سیال	$Q(kg/s)$
سرعت	$U(m/s)$
بردار سرعت	$u(m/s)$
عدد بی بعد وبر	We
مکان	$x(m)$
عدد رینولدز	Re
لزجت دینامیکی سیال	$\mu(Pa.s)$
چگالی سیال	$\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

کشش سطحی	$\gamma(\text{Pa. m})$
----------	------------------------

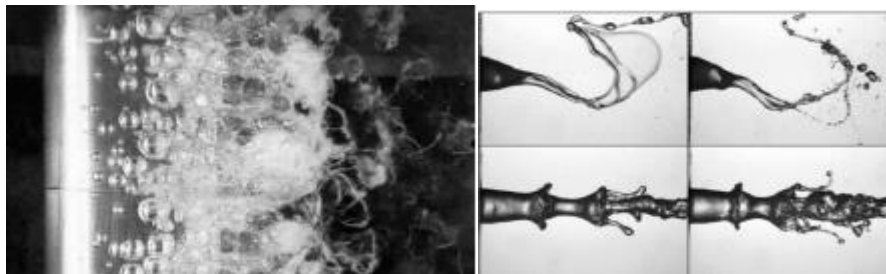
فصل ۱ : مقدمه

۱-۱ مقدمه

جریان سیالات چندفازی، از مباحث بسیار مهم و تأثیرگذار علم مکانیک سیالات است که نحوه مواجهه با آن و شناخت درست مسائل مطرح شده در این زمینه، می‌تواند تأثیر شگرفی در آینده‌ی جهان فناوری و صنعت داشته باشد. در مسائل جریان سیالات چندفازی، عموماً با یک سطح مشترک بین دو سیال مواجه هستیم. مثال‌های بسیار زیادی از کاربردهای این جریانات در صنعت وجود دارند که از میان آنان، می‌توان به فرآیند جوشش در دیگ‌های بخار اشاره نمود. همچنین، میزان بسیار قابل‌توجهی از انرژی موردنیاز، از طریق سوزاندن سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید که در اکثر موارد باید پیش از احتراق به‌صورت افشانه یا مجموعه‌ای از قطرات ریز اتمیزه شود. در طبیعت نیز می‌توان نمونه‌های بسیار زیادی از این سیالات چندفازی معرفی نمود. شاید مهم‌ترین این نمونه‌ها باران باشد. علاوه بر آن، می‌توان از نقش بسیار مهم قطرات و حباب‌ها در انتقال حرارت و جرم میان اتمسفر و اقیانوس‌ها سخن گفت.

مسائل جریان سیالات چندفازی با توجه به میزان اهمیت روزافزونشان در علم و صنعت، بخش بسیار بزرگی از مقالات علمی حوزه مکانیک سیالات را به خود اختصاص می‌دهند. عموماً به دلیل ریاضیات پیشرفته‌ی این مسائل که شامل معادلات غیرخطی و فازهای متحرک است؛ پژوهش‌های مطرح در این حوزه تا ابتدای پیشرفت‌ها در محاسبات کامپیوتری، تنها منحصر به آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های مقیاسی بود. پژوهش‌های تجربی در این حوزه با موانع بسیاری روبروست که از آن دست می‌توان به بسیار کوچک بودن مقیاس‌های زمانی و مکانی و دسترسی محدود به قطرات از لحاظ تصویربرداری اشاره نمود. علاوه بر آن، پاسخ‌های تحلیلی نیز منحصر به موارد ایدئال یا بسیار ساده است که کمتر قابل‌تعمیم به مسائل صنعتی هستند. با توجه به موارد فوق، اهمیت روش‌های عددی و گسترش ابزارهای محاسباتی برای این مسائل، در اواخر دهه پنجاه و اوایل دهه شصت میلادی به‌شدت افزایش یافت.

به عنوان مثال‌هایی از سیالات چندفازی و اهمیت آنان، می‌توان به اهمیت افشانه‌ها اشاره نمود. افشانه‌ها در موارد بسیاری همچون احتراق، پوشش سازی، اصلاح سطح فلزات، نقاشی و موارد دیگر کاربرد دارند. برای تولید یک افشانه مناسب برای کاربردهای فوق، باید توزیع اندازه قطرات معلوم و به نحوی بهینه‌سازی گردد. شکل ۱-۱ سمت راست، نمایشی از این نمونه افشانه‌ها است که توسط ماموتانت و ویلرماکس [۱] انجام شده است. از دیگر مثال‌های مهم، می‌توان به پدیده کاویتاسیون اشاره نمود. تولید حباب می‌تواند به وسیله حرارت دادن به سیال و رساندن آن به دمایی فراتر از دمای اشباع باشد که در جوشش رخ می‌دهد، یا از طریق کاهش فشار سیال به فشاری پایین‌تر از فشار اشباع که در مسائل کاویتاسیون رخ می‌دهد. شکل ۱-۱، سمت چپ، یک نمونه از پژوهش‌های تجربی بر فرآیند کاویتاسیون را که توسط کرمین [۲] انجام گرفته است نمایش می‌دهد. در این پژوهش عبور سیال از سطح ایرفویل موجب کاهش شدید در فشار و این امر موجب کاویتاسیون و ایجاد حباب بر روی سطح ایرفویل شده است.



شکل ۱-۱: افشانه، فرایندهای مؤثر بر آن و بررسی فرایند کاویتاسیون [۱، ۲].

از دیگر زمینه‌های مطالعاتی که توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده است بررسی جریان‌های دوفازی و چندفازی در داخل مجراهای میکروکانالی می‌باشند. 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 [۳]. میکروسیالی یک اصطلاح بوده که برای توصیف رفتار،

¹ Microfluidic devices

کنترل و نیز به کارگیری 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 [۴]. 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 [۵]. از ویژگی‌های شاخص دستگاه‌های میکروسیالی می‌توان به مقیاس طولی کوچک و رژیم جریان آرام^۱ در آن‌ها اشاره کرد [۶]. کاربردهای اولیه و رایج فناوری میکروسیالی شامل رئولوژی^۲ 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 [۷، ۸]. 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 زیست پزشکی 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 [۹، ۱۰]. روش‌های تولید قطره به سرعت در حال توسعه هستند به گونه‌ای که پایه و اساسی قوی و قابل کنترل را برای ایجاد قطره فراهم می‌کنند. این روش‌ها در طیف وسیعی شامل ساخت میکروذرات تک‌پخش^۳، افزایش اختلاط، تبلور پروتئین‌ها، ترکیب نانو ذرات و آنالیز میکروشیمیایی^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱-۱۳]. این کاربردهای گسترده، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در این زمینه شده است. قطرات

^۱ Laminar

^۲ Rheology

^۳ Monodispersed

^۴ Micro chemical

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 [۱۴]. این دستگاه‌ها این امکان را می‌دهند که بتوان بر روی اندازه‌ی قطره و توزیع آن کنترل داشت [۱۵]. دستگاه‌های میکروسیالی یک روش ساده برای تولید امولسیون‌هایی نزدیک به حالت تک‌پخش و دست یافتن به فرکانس شکل‌گیری بالا در دستگاه‌های مایع چندفازی هستند [۱۶]. 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 [۱۷، ۱۸].

جریان‌ات چندفازی 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 دستگاه‌های با اتصال از نوع X شکل، Y شکل و T شکل و نیز دستگاه‌های جریان متمرکز، دستگاه‌های هم‌جریان و واحدهای تفکیک یا ادغام قطره [۱۹-۲۲]. 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 میکروکپسول‌ها و نیز میکروذرات 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 [۱۹-۲۱].

دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره با توانایی تولید بالا، حوزه‌ای چالش‌برانگیز هستند. یک دستگاه واحد میکروسیالی معمولاً امولسیون‌هایی در یک توان عملیاتی از ده تا صد میکرولیتر در دقیقه تولید می‌کند، درحالی‌که توان عملیاتی بیشتری حتی برای کاربردهای دارویی و زیست پزشکی

مورد نیاز است [۲۳، ۲۴]. برخی از گروه‌های تحقیقاتی توان عملیاتی دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره را به کمک موازی کردن دستگاه‌های تولید قطره افزایش داده‌اند [۲۳، ۲۴]. دستگاه‌های میکروسیالی یکپارچه حدود دو دهه است که در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شوند. ادغام فناوری‌های نانوذرات 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 تک‌سلولی 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 [۲۲]. در شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از دستگاه‌های میکروسیالی ساخته‌شده با فن لیتوگرافی نرم^۲ بر روی صفحات سیلیکون نشان داده شده است.

^۱ Point-of-care

^۲ Soft lithography



شکل ۱-۲: نمونه‌ای از دستگاه‌های میکروسیالی [۲۵، ۲۶].

تحلیل و بررسی جریان در ریز مجاری، دانش و فناوری سیستم‌هایی است که مقادیر بسیار کم سیال را با استفاده از کانال‌هایی با ابعاد ده‌ها و صدها میکرومتر پردازش و دست‌کاری می‌کنند. اولین کاربرد فناوری‌های ریز مجاری در آنالیز جریان می‌باشد که در آن، این سیستم‌ها توانایی‌های مفیدی از جمله توانایی استفاده از مقادیر بسیار کم نمونه‌ها، مواد واکنش‌گر، انجام جداسازی‌ها و آشکارسازی‌ها با دقت و حساسیت بالا و با هزینه‌ی کم، زمان کم آنالیز و اثرات کم بر جریان‌های تحت آنالیز، ارائه می‌کنند. جریان در ریز مجاری دو مشخصه بارز که شامل اندازه بسیار کوچک و جریان لایه‌ای سیال داخل کانال است را دربر می‌گیرد و قابلیت‌های جدیدی به لحاظ بنیادی در کنترل غلظت‌های مولکول‌ها در زمان و فضا ارائه می‌نماید [۲۷].

ریز مجاری‌ها مزایای بسیاری دارد و معایب آن (حداقل در کاربردهای عمده آن در آنالیز) بسیار ناچیز است. اما هنوز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته است. باور محققان بر این می‌باشد که فناوری جریان در ریز مجاری در زمینه آنالیز و احتمالاً ساخت مولکول‌ها، بسیار متداول خواهد شد به دلیل آن‌که مزایای آن غیرقابل‌انکار است.

توانایی ساخت ابزارهای میکرو الکترومکانیکی زمینه‌ای جدید برای تحقیقات گسترده علمی ایجاد نموده و آهنگ رشد تحقیقات علمی با ایده‌های نو را شتاب بخشیده است. بدون شک تحقیق در مورد جریان سیالات به صورت میکرو برای توسعه‌ی آتی سیستم‌هایی در مقیاس میکرو حیاتی است. میکروکانال‌ها از مهم‌ترین بخش‌های این دستگاه‌ها هستند که به منظور انتقال سیال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، جابجایی، سوخت‌رسانی و جداسازی سلول‌های بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این دستگاه‌ها عموماً از میکروسیال‌هایی که به صورت قطرات منفرد در جریان سیال حرکت می‌کنند، استفاده می‌شود. مطالعه و بررسی میکرو ابزارهایی که شامل سیال هستند، تحت عنوان میکروسیالات انجام می‌شود و بخشی از میکروسیالات که با جریان سروکار دارند، تحت نام میکروجریان‌ها شناخته می‌شوند [۲۸]. از میکرومجرها در مقاصد مختلفی نظیر انتقال حرارت، انتقال گونه‌های جرمی و طراحی لایه‌های سطحی استفاده می‌شود. در میکروکانال‌ها به دلیل داشتن نسبت سطح به حجم بیشتر و مسیر انتقال کم‌تر نسبت به کانال‌های معمولی در جریان دوفازی، میزان انتقال حرارت و انتقال جرم قابل توجه است. جریان در ابعاد ریز متفاوت از جریان در ابعاد با مقیاس‌های متداول می‌باشد، با کاهش اندازه‌ی ابعاد کانال نیروی سطحی همچون نیروی برشی و تنش سطحی نسبت به نیروهای حجمی همچون نیروی جاذبه و نیروی اینرسی دارای اهمیت می‌شوند [۲۹].

۲-۱ تعریف میکروکانال

میکروکانال بر اساس تعریف متداولی که توسط محققین ارائه شده است، به کانالی گفته می‌شود که قطر هیدرولیکی آن بین ۱۰ تا ۲۰۰ میکرومتر باشد [۳۰]. قطر هیدرولیک، طول مشخصه‌ای است که در کانال مطرح می‌شود. زمانی که سیال مورد نظر در مقطعی غیر دایره‌ای در حرکت است، این کمیت به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$D_H = 4A/P \quad (1-1)$$

برای مقطع دایره‌ای قطر هیدرولیک به صورت زیر تعریف می‌شود. در این دو رابطه P محیط خیس شده کانال و A سطح مقطع جریان است.

$$DH = \frac{4\pi D^2 / 4}{\pi D} = D \quad (2-1)$$

محققان این طبقه‌بندی را بر اساس قطر هیدرولیکی به صورت زیر ارائه کرده است.

- کانال‌های معمولی با قطر بزرگ‌تر از ۳ میلی‌متر
- مینی کانال با قطر بزرگ‌تر از ۰/۲ میلی‌متر تا ۳ میلی‌متر
- میکروکانال‌ها با قطر بزرگ‌تر از ۱۰ میکرومتر تا ۰/۲ میلی‌متر

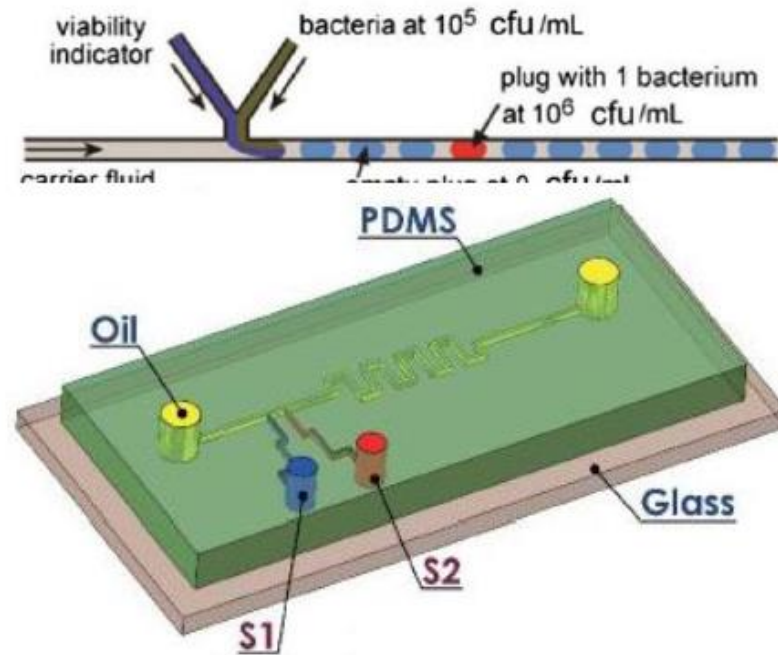
تعریف جامع دیگری برای میکروکانال‌ها به صورت زیر ارائه شده است.

به کانالی که حداقل یکی از ابعاد آن در محدوده ۱۰ تا ۲۰۰ میکرومتر باشد، میکروکانال گویند. در تعریف اخیر، کانال‌هایی را که از قرار دادن دو صفحه با ابعاد معمولی در فاصله‌ی چند میکرومتری از یکدیگر تشکیل می‌شوند را میکروکانال به حساب می‌آورد. حقیقتاً در این کانال، ابعاد و دیواره‌ها روی رفتار فیزیکی سیال تأثیر می‌گذارد به طوری که رفتار پدیده‌های سیالاتی در کانال‌هایی با شرایط هندسی مذکور کاملاً متفاوت از رفتار آن‌ها در کانال‌های معمولی است. ریزسازی تجهیزات تا حدود ابعاد میکرومتر منجر به افزایش قابل توجه نسبت سطح به حجم می‌شود.

برای جریان در داخل میکروکانال‌ها با توجه به وجود ابعاد بسیار کوچک در اندازه کانال‌ها، عبارت‌های شامل حجم (مانند وزن) در شرایط معمول در مقایسه با عبارت‌های شامل سطح (مانند تنش‌های) در روابط نظیر رابطه بقای اندازه حرکت خطی قابل صرف‌نظر خواهند بود. بنابراین با کاهش ابعاد سیستم، نسبت سطح به حجم زیاد می‌شود. در میکروسیستم‌ها وجود سطح زیاد در دسترس، باعث افزایش قابل ملاحظه مقاومت لزجی می‌شود [۳۱].

بین جریان دو فاز در میکروکانال‌ها با جریان دو فاز در ابعاد معمولی تفاوت‌هایی وجود دارد. مهم‌ترین تفاوت جریان در کانال‌هایی با ابعاد میکرو نسبت به کانال‌های معمولی این است که در

میکروکانال‌ها، جریان آرام می‌باشد. بنابراین، در میکروکانال‌ها نیروی موئینگی (تنش سطحی) دارای اهمیت می‌شود در صورتی که جهت کانال نسبت به قائم اهمیت چندانی ندارد [۳۰]. چند نمونه از میکروکانال‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱: نمونه‌هایی از میکروکانال‌ها [۳۰].

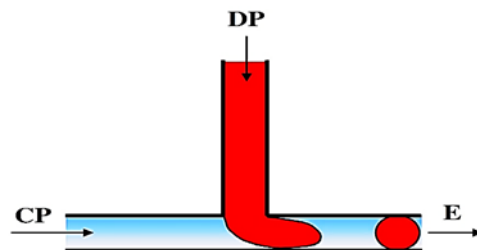
۳-۱ میکروکانال‌ها و انواع آن‌ها

از میکروکانال‌ها در سیستم‌های الکترومکانیکی و وسیله‌های دیگر، با سطح مقطع‌ها و اندازه‌های متفاوت استفاده می‌کنند. با توجه به کاربرد وسیع تعداد زیادی از شرکت‌های صنعتی از میکروکانال‌ها، میکروکانال‌ها را برای ساختن فرآیندهای اختصاصی چنین کانال‌هایی توسعه داده و این فناوری را به‌شدت در حال رشد و توسعه و پیشرفت قرار داده است. این میکروکانال‌ها ممکن است ساختار سه‌بعدی یا حالت صفحه‌ای داشته باشد. به‌طور وسیع میکروکانال‌ها به دو دسته‌ی میکروکانال با سطح مقطع غیردایره‌ای و میکروکانال با سطح مقطع دایره‌ای تقسیم می‌شوند. در طیف دسته‌ای میکروکانال‌هایی با سطح مقطع غیردایره‌ای، میکروکانال‌های با مقطع دوزنقه‌ای و مستطیلی به‌طور

گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق شبیه‌سازی میکروکانال‌هایی با سطح مقطع غیردایره‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. دو روش رایج و گسترده در ساخت میکروکانال‌ها وجود دارد که شامل برش دقیق و حک کردن کانال‌ها بر روی بلور و می‌باشد [۳۲].

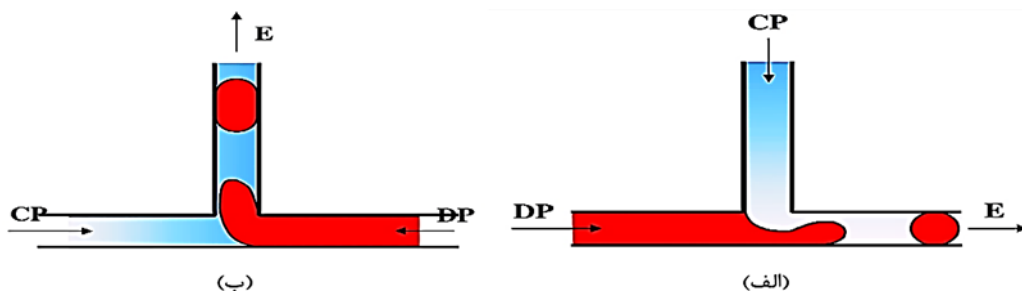
۱-۳-۱ میکروکانال‌های T شکل

ساده‌ترین شکل میکروکانال‌ها، میکروکانال‌های T شکل است که برای تولید حباب‌ها و قطرات به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. هندسه استاندارد این دستگاه در شکل ۴-۱ نشان داده شده است و از کانال اصلی فاز پیوسته وارد می‌شود و نیز از طریق کانال عمودی، فاز پخش شونده وارد می‌شود [۳۳، ۳۴].



شکل ۴-۱: دستگاه میکروسیالی T شکل ساده [۲۲، ۳۳].

اندازه عددی این میکروکانال‌ها دارای حدود قطری معادلی ۱ تا ۸۰ میکرومتر بوده و قطراتی در اندازه‌ای بین ۴ تا ۱۹۰ میکرومتر تولید کرده و کمتر از ۵ درصد ضریب تغییرات (CV) آن است [۳۵]. برخی تغییرات در شکل ۵-۱ و تبدیل‌های مختلف اعمالی روی شکل استاندارد میکروکانال T شکل نشان می‌دهد. در شکل ۵-۱ الف از کانال اصلی افقی فاز گسسته به فاز پیوسته وارد شده و از کانال عمودی تزریق می‌شود. در شکل ۵-۱ ب از دو انتهای کانال اصلی فازهای گسسته و پیوسته افقی تزریق شده و از کانال عمودی خروجی آن خروج می‌گردد [۳۳].



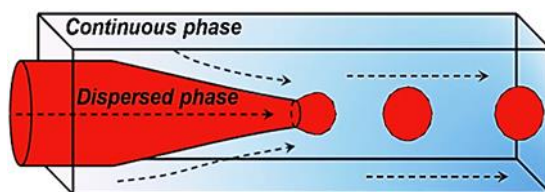
شکل ۵-۱: دستگاه میکروسیالی T شکل با دو تغییر ساده متداول [۳۳].

در شکل‌گیری قطره سه رژیم متمایز در دستگاه‌های T شکل وجود دارد. شامل رژیم‌های چکه کردن، جتی و فشردگی است. به دلیل اینکه تنش‌های برشی اعمال‌شده در رژیم فشردگی توسط فاز پیوسته نسبت به کشش سطحی کوچک هستند، تقریباً تمام سطح مقطع کانال اصلی را نوک جریان فاز گسسته اشغال می‌کند. در نتیجه فیلم باریک شده به صورت یک فاز پیوسته شده و در فضای بین قطره و دیواره‌ی کانال محدود می‌شود و در بالادست افزایش فشار فاز پیوسته را شامل می‌شود. فاز پیوسته باریکه حاصل از این اتفاق باعث می‌شود که فاز گسسته را فشرده کرده تا جدایش ایجاد شود. در رژیم فشردگی اندازه قطره تابعی از نسبت نرخ جریان دو فاز بوده و وابستگی فراوانی به لزجت دو سیالی یا کشش سطحی ندارد. اندازه قطره در رژیم چکه کردن توسط تعادل بین نیروی پسا که از فاز پیوسته بر قطره بیرون آمده اعمال می‌شود و نیروی اندازه قطره 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) برای سازوکار حاکم بر تشکیل قطره و پیش‌بینی آن می‌توان استفاده کرد؛ اگر $Ca_c < 0.002$ در رژیم فشردگی و اگر $0.001 < Ca_c < 0.3$ در رژیم چکه کردن قرار می‌گیرد. با افزایش بیشتر Ca_c ، به تدریج به پایین دست نقطه جدایش حرکت کرده و این امر منجر به یک گذار از رژیم چکه‌ای پایدار به رژیم جتی می‌شود [۳۳، ۳۴].

^۱ Capillary

۱-۳-۲ میکروکانال‌های هم‌جریان

در جهت افزایش نرخ شکل‌گیری قطره و نیز ایجاد ترکیب‌های پیچیده در طراحی و تحقیق بر روی دستگاه‌های هم‌جریان^۱. شکل ۱-۶ یک‌شکل ساده از هندسه هم‌جریان، می‌باشد. از درون موئینگی میانی فاز پخش شونده جریان می‌یابد، درحالی‌که از طریق موئینگی مربعی بیرونی، فاز پیوسته و هم‌جهت با فاز پخش شونده جریان می‌یابد [۳۳]. قطرات کروی از نوک لوله درونی شروع به رشد کرده در نرخ‌های پایین و دو سیال تا زمانی که به‌اندازه‌ای برسند که نیروی پسای لزج اعمال شده توسط فاز پیوسته بیشتر از کشش سطحی شود، این روند ادامه می‌یابد (رژیم چکه کردن). فاز گسسته باریک‌تر شده در جریان‌های بالای فاز پیوسته، در پایین‌دست به دلیل ناپایداری ریلی-پلاتر، جریان به قطرات بیشتر گسسته می‌شود (رژیم جتی) [۳۴].



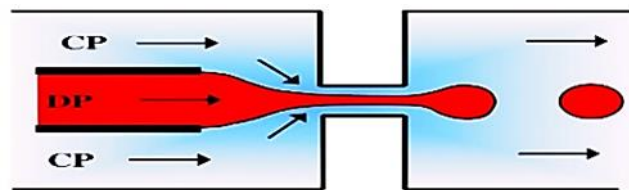
شکل ۱-۶: دستگاه میکروسیالی هم‌جریان [۳۳، ۳۴].

دو دسته گذرا از رژیم چکه کردن به رژیم جتی گذار شناخته‌شده است. دسته اول با فاز پیوسته نرخ جریان ایجاد می‌شود؛ اندازه قطرات در حال شکل‌گیری در نوک لوله کاهش‌یافته با افزایش آن، و یک جت باریک طولانی شکل می‌گیرد و از انتهای این جت قطره جدا می‌شود. از گذار بین چکه کردن و جتی با نرخ جریان فاز گسسته دوم ایجاد می‌شود؛ با بیشتر کردن آن قطره در موقع ظهور جریان فشرده شده به پایین دست و در نهایت در انتهای جت شکل‌گرفته و قطرات بزرگ جدا می‌شوند. اولین تنش برشی اعمال‌شده در رژیم جتی از فاز پیوسته به قطره در مقایسه با کشش سطحی بزرگ‌تر است. در رژیم جتی دوم نیروهای فاز گسسته اینرسی بزرگ‌تر و در برابر کشش

سطحی است. از تنش لزج اعمال شده در نسبت‌های نرخ جریان خیلی بالا توسط فاز پیوسته آن‌قدر بزرگ می‌شود، که قطره‌ی به خود شکل مخروطی گرفته در حال شکل‌گیری^۱ و یک جت خیلی نازک از نوک‌تیز آن خارج و به قطرات ریز شکسته شود [۳۴].

۳-۳-۱ میکروسیالی جریان متمرکز شده

توسط آنا و همکاران دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده^۲ صفحه‌ای توسعه داده شده‌اند [۳۶]. در شکل ۷-۱ از طریق کانال میانی فاز گسسته و از طریق دو کانال کناری از پیوسته نیز تغذیه می‌شوند و دو فاز مجبور هستند از یک اریفیس کوچک که در پایین‌دست این سه کانال واقع شده است عبور کنند [۳۴].

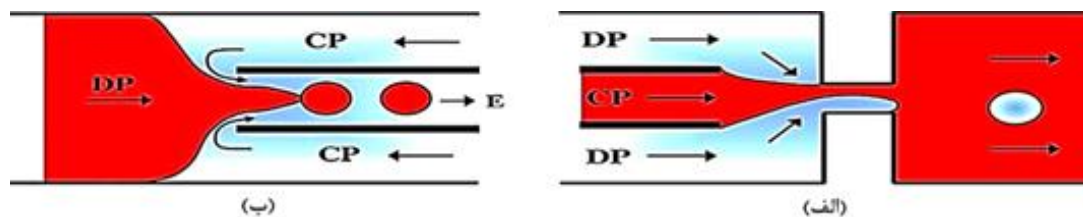


شکل ۷-۱: دستگاه میکروسیالی جریان متمرکز شده [۳۳].

در ناحیه اریفیس به صورت یک رشته باریک از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته تغییر شکل یافته است فشار و تنش برشی وارد می‌شود که در نهایت فاز گسسته شکسته شدن و در پایین‌دست اریفیس باعث جدایش قطره می‌شود. در شکل ۷-۱ دیواره‌های اریفیس توسط مایع کانال میانی تر نمی‌شود ولی اگر دیواره‌های اریفیس توسط مایع کانال میانی تر شود آنگاه مانند شکل ۸-۱-الف از سیال کانال‌های بیرونی قطراتی در پایین‌دست اریفیس شکل می‌گیرند [۳۳].

^۱ Taylor cone

^۲ Flow focused devices



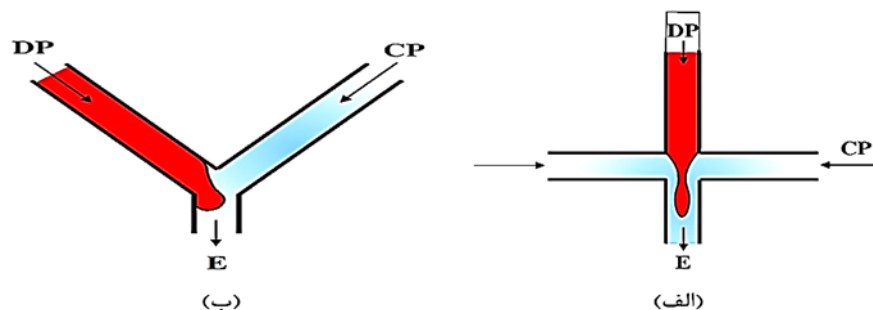
شکل ۸-۱: دستگاه‌های میکروسیالی با (الف) تر شدن دیواره‌های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز شده با جریان‌های مخالف [۳۳، ۳۴].

در دستگاه‌های جریان متمرکز شده الگوی جریان دیگر شامل یک جریان در جهت مخالف است که در شکل ۸-۱-ب نشان می‌دهد و در آن دو سیال از دو انتهای کانال یکسان و در جهت مخالف هم تغذیه شده برخلاف طرح دستگاه هم جریان، و توسط کانال هم‌محور دیگر قطرات جمع‌آوری می‌شوند [۳۳]. از مزیت‌های آن به توانایی تولید قطراتی با اندازه کوچک‌تر از ابعاد اریفیس در آن دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده می‌توان اشاره کرد. می‌توان از یک کانال با اندازه اریفیس بزرگ‌تر استفاده کرد این ویژگی بسیار مفید است زیرا برای هر اندازه قطره داده شده می‌توان استفاده کرد، ولی در دستگاه هم جریان احتمال مسدود شدن اریفیس با ذرات معلق و یا هرگونه باقی‌مانده به دام افتاده در مقایسه با این دستگاه‌ها، به حداقل می‌رسد. در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده سه رژیم عمده تولید قطره شامل رژیم‌های فشرده‌گی، چکه‌ای و رژیم جتی هستند [۳۶]. اندازه قطرات تقریباً برابر یا بزرگ‌تر از اندازه اریفیس بوده در رژیم فشرده‌گی، و بخش قابل توجهی از سطح مقطع اریفیس را در آن فاز گسسته اشغال می‌کند و از شکاف باریک بین دیوار اریفیس و سطح مشترک بین دو فاز، فاز پیوسته مجبور می‌شود جریان یابد. این رژیم در اعداد موینگی پایین ($Ca_c < 0.1$) که نیروی لزج ناشی از فاز پیوسته کوچک است ایجاد می‌شود [۳۷، ۳۸]. جت فاز گسسته به دلیل تنش‌های لزج ناشی از فاز پیوسته باریک شده در رژیم چکه کردن، منجر به این می‌شود که اندازه اریفیس بزرگ‌تر از اندازه‌های قطرات شوند. عدد موینگی بالا در این رژیم ($Ca_c > 0.1$) و به‌خصوص هنگامی که نسبت‌های جریان بالا باشد و یا فاز گسسته لزجت بالایی داشته، ایجاد می‌شود [۳۸]. فاز گسسته در رژیم جتی به شکل یک جت طولانی تا پایین‌دست اریفیس ادامه یافته و جت قطرات بلند

از انتهای این جدا می‌شوند؛ در نتیجه کنترل بر جدایش قطره کمتر می‌شود. می‌تواند رژیم چکه کردن کوچک‌تر بوده و نیز کوچک‌تر از اندازه اریفیس از اندازه قطرات باشد. میکروکانال‌های جریان متمرکز به‌طور معمول دارای کانال‌های مستطیلی متقارن و دارای ابعادی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند [۳۵].

۴-۳-۱ میکروکانال‌های اتصال صلیبی و Y شکل

در شکل ۹-۱ الف اتصالات صلیبی^۱ به‌صورتی بوده که از دو طرف فاز گسسته آن‌ها فاز پیوسته جریان می‌یابد. شرایط جریان در اتصالات صلیبی را می‌توان با عدد ویر فاز گسسته $we_d = \frac{\rho_d u_d^2 l}{\gamma}$ (که در آن ρ_d و u_d به ترتیب چگالی و سرعت فاز گسسته، L قطر کانال و γ کشش سطحی هستند) و عدد موینگی فاز پیوسته توصیف کرد. فاز گسسته به‌صورت قطره جدا نمی‌شود برای We_d و $Ca_c > 1$ ، درحالی‌که جدایش فاز گسسته به‌صورت قطره برای We_d و $Ca_c < 1$ ، اتفاق می‌افتد.



شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال‌های (الف) اتصال صلیبی (ب) Y شکل [۳۳، ۳۴].

^۱ Cross junction

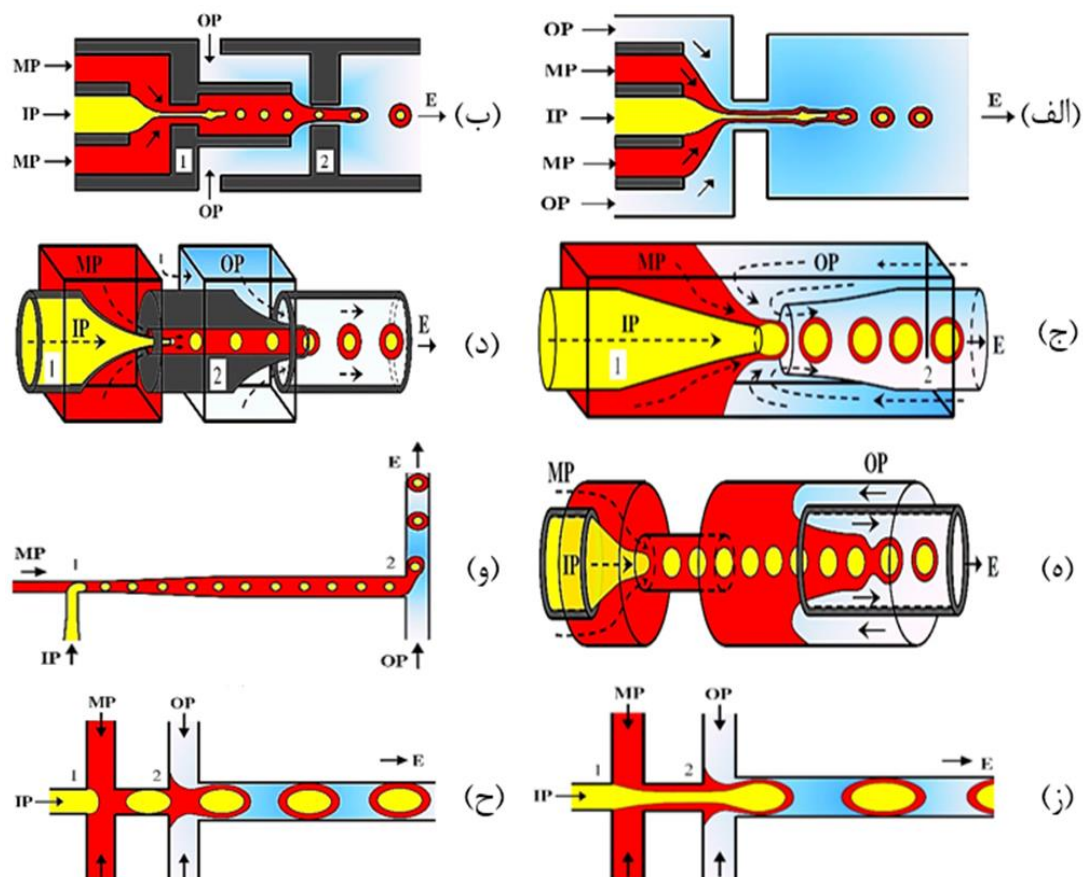
در اتصال Y شکل اندازه قطرات تشکیل شده مستقل از نرخ جریان و لزجت فاز گسسته بوده که این رفتار اتصالات T با شکل متفاوت است. دو سیال در اعداد رینولدز پایین، از دو ورودی متفاوت در اتصالات Y شکل در پایین دست کانال به صورت جریان‌های لایه‌ای (آرام) جریان می‌یابند.

۱-۳-۵ میکروکانال‌های تولید کننده قطرات چند جزئی

یکی از مزایای بزرگ فناوری میکروسیالی توانایی ایجاد قطرات چند جزئی با ساختار درونی تطبیق پذیر است. برای تولید قطراتی به صورت روکش دار^۱ روش‌های میکروسیالی معمول در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. بر پایه یک جدایش تک مرحله‌ای این روش‌ها از رشته مایع هم‌محور مرکب از دو سیال انحلال ناپذیر و یا دو جدایش متوالی قطره در سازنده قطره هستند. در شکل ۱-۱۰-الف یک جت مرکب و قطرات روکش دار در فاز بیرونی از دو سیال انحلال ناپذیر گسسته شده شکل می‌گیرند [۳۳].

با استفاده از دو مولد جریان متمرکز شده متوالی در شکل ۱-۱۰-ب قطرات روکش دار شکل گرفته‌اند. قطرات روکش دار می‌توانند در دستگاه‌های متقارن محوری با ترکیب و جریان سیال در جهت مخالف^۱ و یا امولسیون سازی هم‌جریان و یا استفاده از امولسیون سازی دو مرحله‌ای هم‌جریان تولید شوند (شکل ۱-۱۰-ج، د، ه).

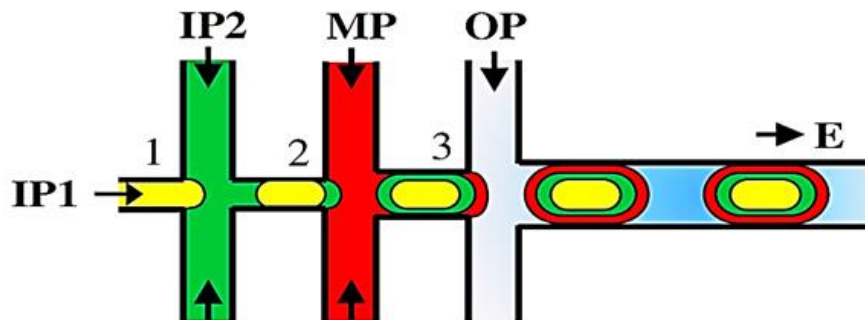
^۱ Counter-current flow



شکل ۱۰-۱: استراتژی‌های میکروسیالی معمول برای تولید قطراتی به صورت روکش‌دار [۳۳، ۳۴].

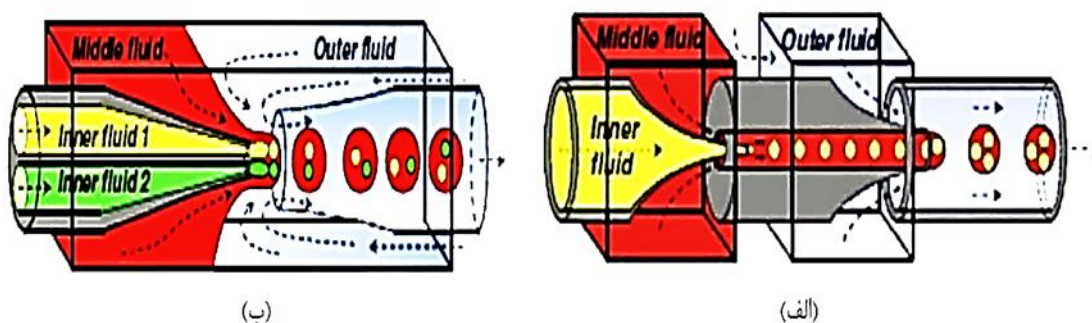
ضخامت روکش می‌تواند در دستگاه‌های موینگی شیشه‌ای متقارن محوری، از چند میکرون تا چند ده میکرون باشد و همچنین می‌تواند با تنظیم نسبت نرخ جریان فاز میانی به نرخ جریان فاز داخلی کنترل شود. از شکل ۱۰-۱ د به صورت هندسه‌های هم‌جریان و یا T-شکل متناوب نشان داده شده در شکل ۱۰-۱ و برای تولید آمولسیون‌های چند جزئی حاوی تعدادی از قطرات فاز درونی در هر قطره فاز قطره میانی استفاده می‌شود. توسط اضافه کردن چند مرحله متوالی، آمولسیون‌های مرتبه بالاتر شامل چهار و یا چندین فاز مایع غیرقابل اختلاط را می‌توان قطرات روکش‌دار را همچنین می‌توان ایجاد کرد. با استفاده از اتصال صفحه‌ای شکل پشت سر هم صلیبی، با ترشوندگی متناوب آب‌دوست و آب‌گریز و یا اتصال صلیبی شکل غیرصفحه‌ای با خواص آب‌گریز مانند شکل ۱۰-۱ ز و

شکل ۱-۱۰-ح تولید کرد. تعمیم این قاعده به سه اتصال صلیبی و یا بیشتر که مانند شکل ۱-۱۱ به صورت سری باشند می‌تواند منجر به تولید امولسیون‌های مرتبه بالاتر مانند امولسیون‌های سه‌گانه، چهارگانه و یا پنج‌گانه شود [۳۳].



شکل ۱-۱۱: شماتیک تولید قطرات روکش‌دار توسط سری کردن سه میکروکانال اتصال صلیبی [۳۳، ۳۴].

همچنین می‌توان قطرات روکش‌دار را در اتصال اول با افزایش نرخ‌های جریان شکل داد. در شکل ۱-۱۰-ز یک جت از فاز درونی که تا اتصال دوم گسترش یافته و یک جت هم‌محور در آنجا توسط لایه‌ای از فاز میانی احاطه شده و ایجاد کرد. اگر نرخ‌ها به گونه‌ای در جریان اتصال دوم مناسب تنظیم شوند جت هم‌محور ایجاد شده به صورت قطرات روکش‌دار جدا می‌شود.



شکل ۱-۱۲: شماتیک دستگاه‌های میکروسیالی معمول جهت تولید قطرات چند جزئی [۲۲، ۳۳، ۳۴].

دستگاه‌های پیچیده‌تر میکروسیالی در شکل ۱-۱۲ 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

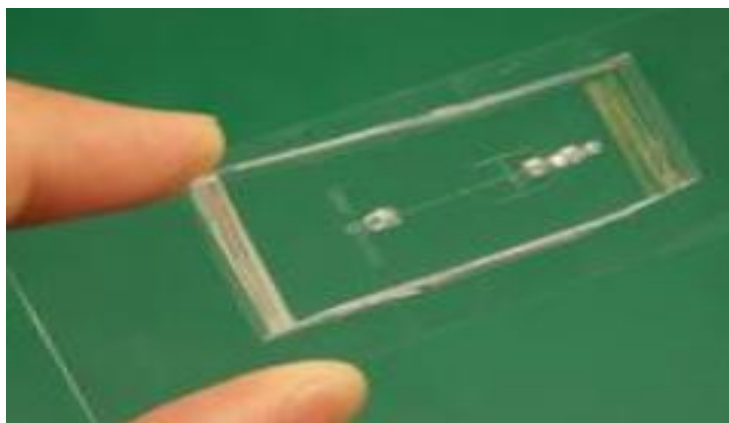
به صورت یک بخش از هم جریان درون یک بخش جریان متمرکز باشند، امولسیون‌های چند جزئی تولید شده دارای قطرات داخلی از دو جزء مختلف خواهند بود [۳۳].

۱-۴ نمونه‌های کاربردی میکروکانال در صنعت

استفاده از ابزارهای میکروسیالی در زمینه‌های پزشکی و صنعتی کاربرد فراوانی دارد. میکروسیستم‌ها در صنایع، وسایل پزشکی و دستگاه‌های متفاوتی نظیر سرمایش قطعات الکترونیکی، طراحی مبدل‌های حرارتی میکرو، دستگاه‌های کامپیوتری پیشرفته، سلول‌های سوختی، سرمایش و روانکاری سیستم‌های رباتیک، سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، میکرو رآکتورها، تلفن‌های قابل حمل در زمینه ارتباطات سیار، تکنولوژی‌های اطلاعاتی و غیره کاربردهای گسترده‌ای دارند. از طرف دیگر از این سیستم‌ها برای تجزیه و تحلیل شیمیایی و بیولوژیکی استفاده می‌شود. مزیت اولیه در این نوع کاربردها این است که به خوبی با اندازه ساختار بیولوژیکی سازگار هستند و می‌توانند مواد بیولوژیکی نظیر پروتئین‌ها، دی‌ان‌ای، انواع سلول‌ها مانند سلول‌های اولیه جنینی، نمونه‌های شیمیایی و آنالیت‌ها را منتقل و شناسایی کنند. علاوه بر این میکرومجرها می‌توانند، زمینه عملیات چندگانه مربوط به تجزیه و تحلیل شیمیایی را روی یک سطح کوچک یا تراشه مهیا کنند. به چنین کاربردهایی اصطلاحاً (کارهای آزمایشگاهی روی تراشه‌ها) گویند. برای مثال در آزمایشگاه‌های خون، نمونه مورد نظر روی یک تراشه قرار داده می‌شود. سپس خون به وسیله میکرومجرها به قسمت‌های مختلفی نظیر قسمت پردازش اطلاعات، منتقل می‌شود [۲۸]. برای درک اهمیت کاربرد میکروکانال‌ها در صنایع به تعریف چند نمونه از آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۴-۱ کاربرد میکروکانال جهت پاکسازی و تصفیه خون

محققان مؤسسه فناوری ماساچوست نمونه اولیه‌ای از دستگاه ریز جریانی را طراحی کرده‌اند که قادر به پاکسازی و تصفیه خون از آلودگی‌های باکتریایی است. این دستگاه کوچک شامل یک ریز تراشه‌ی پلیمری با شبکه‌ای از میکروکانال‌ها است. جریان خون آلوده به باکتری از طریق یک کانال منفرد وارد دستگاه می‌شود و در این مرحله فرآیند حاشیه‌گزینی باعث می‌شود که میکروب‌ها، لکوسیت‌ها و پلاکت‌ها به سمت کانال‌های فرعی هدایت شوند و گلبول قرمز در کانال اصلی باقی بماند. در نهایت گلبول قرمز خالص از کانال اصلی به جریان خون باز می‌گردد. همچنین محققان موفق به ارائه‌ی روشی برای جداسازی سلول‌های سرطانی از سلول‌های سالم شدند. در این روش جریان عبوری از میکروکانال با لیزر تصویربرداری می‌شود [۳۹]. نمونه‌ای از دستگاه ریز جریانی در شکل ۱-۱۳ مشاهده می‌شود.

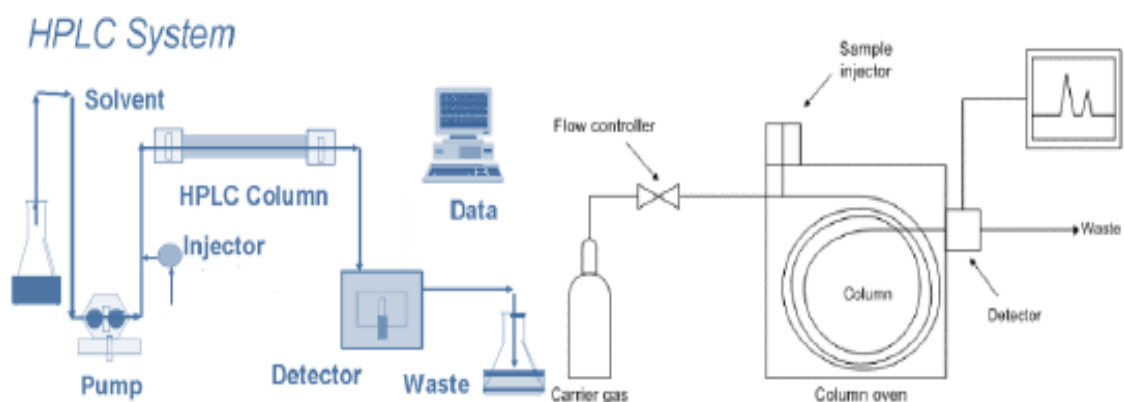


شکل ۱-۱۳: نمونه‌ای از دستگاه ریز جریانی با شبکه‌ای از میکروکانال جهت تصفیه خون [۳۹].

۱-۴-۲ کاربرد میکروکانال در کروماتوگرافی

پرکاربردترین شیوه‌ی جداسازی مواد تجزیه‌ای، کروماتوگرافی است که در تمام شاخه‌های علوم کاربردهایی دارد. کروماتوگرافی گروه‌های گوناگون و مهمی از روش‌های جداسازی مواد را شامل می‌شود که می‌توان با این روش اجزای تشکیل دهنده مشابه در مخلوط‌های کمپلکس را جدا و شناسایی کرد.

در کروماتوگرافی دو فاز ثابت و فاز متحرک وجود دارد، فاز ثابت درواقع اجزای درون لوله یا شبکه جداسازی را تشکیل می‌دهند و فاز متحرک مربوط به ماده‌ای است که می‌خواهد مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. اجزای مختلف این ترکیب با سرعت‌های مختلفی حرکت می‌کنند و همین امر باعث جداسازی این ذرات می‌شود. جداسازی بر اساس تفکیک دیفرانسیلی بین فاز متحرک و ثابت انجام می‌شود. تفاوت‌های نامحسوس در مقدار قسمت‌های یک ترکیب در فاز ثابت باعث جدایی اجزا می‌شود [۳۹]. در شکل ۱۴-۱ نمایی از دو نوع کروماتوگراف قابل مشاهده است.



شکل ۱۴-۱: نمونه‌ای از دو کروماتوگراف برای جداسازی مواد تجزیه‌ای [۳۹].

فصل ۲: پیشینه پژوهش

۲-۱ تاریخچه پژوهش

در سال ۲۰۰۶ گارستگي و همکاران [۴۱] فرآیند شکل‌گیری قطرات و حباب‌ها را در اتصالات تی شکل به صورت دو وجهی با مقاطع عرضی مستطیلی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند زمانی که قطره تمام مقطع کانال را پر می‌کند، افت فشار ناشی از مقاومت بالای لایه‌های نازک جریان سیال فاز پیوسته، باعث جدایش قطرات از دیواره‌های میکروکانال می‌شود. آن‌ها چنین رژیم جریانی را رژیم جریان فشرده‌گی نامیدند. همچنین با استفاده از رابطه‌ای ساده جهت مقیاس گذاری، ابعاد قطرات و حباب‌های تولید شده در هندسه‌های تی شکل را تخمین زدند و نقش لزجت فاز پیوسته، کشش سطحی و ابعاد هندسه دستگاه را در چگونگی تغییر رژیم جریان داخل میکروکانال‌ها بررسی کردند. نتایج آزمایشگاهی حاکی بر آن بود که در اعداد موئینگی کم، زمانی که نیروهای سطحی بر تنش برشی غالب هستند، به دلیل افت فشار در میان قطره و حباب، پدیده شکستن امواج مخلوط نشدنی در اتصالات تی ایجاد می‌شود. آن‌ها تأکید داشتند که هندسه‌ای که مکانیسم فشرده سازی را ارتقاء می‌دهد بایستی دارای شرایط زیر باشد:

- عرض کانال اصلی در میکروکانال‌ها بیشتر از ارتفاع آن باشد.
- عرض کانال فرعی ورودی حداقل برابر با نیمی از عرض کانال اصلی باشد.

در سال ۲۰۰۷ منچ و همکاران [۴۲] به مطالعات عددی دینامیک شکست جریانات مخلوط نشدنی در هندسه‌ی محدود شده‌ی تی شکل پرداختند. جهت بررسی شکل‌گیری قطره به سه رژیم متداول فشرده‌گی، چکیدن و جت مانند اشاره کردند و درباره‌ی چگونگی تشکیل قطره در هر یک از این سه رژیم به بحث و گفتگو پرداختند. در رژیم فشرده‌گی به دو ویژگی مهم اشاره کردند که اولین مورد آن فقدان وابستگی ابعاد قطرات (حباب‌ها) بر روی پارامترهای مواد از جمله لزجت سیال و تنش سطحی بود. مورد دوم اشاره بر آن داشت که در این رژیم تنش‌های برشی اعمال شده نقش مهمی را در شکست و ظاهر شدن قطرات (حباب‌ها) ایفا نمی‌کنند. این رژیم در اعداد موئینگی کوچک قابل مشاهده است.

سپس به بررسی رژیم چکیدن پرداخته و در نهایت به رژیم جت مانند اشاره کردند که فقط در نرخ‌های جریان بسیار بالا و یا تنش‌های سطحی بسیار پایین ایجاد می‌شود. عدد موئینگی در این رژیم بالا بوده و فاز پراکنده به پایین دست جریان در اتصال تی گسترش می‌یابد. دو سیال مخلوط نشدنی با جریان آرام، کنار همدیگر عرض کانال را مسدود کرده، به‌طوری که طول آن‌ها حداقل چندین برابر بزرگ‌تر از عرض کانال می‌باشد.

در سال ۲۰۰۸ خو و همکاران [۱۵] به تجزیه و تحلیل سیستماتیک مقیاس قانون شکل‌گیری قطره با استفاده از روش بررسی جریان عبوری در اتصالات تی پرداختند. با این بیان که عدد موئینگی یک پارامتر مهم به‌منظور تشخیص تمایز الگوهای جریان دوفازی و مکانیسم‌های تجزیه می‌باشد. آن‌ها علاوه بر رژیم‌های گزارش شده در مطالعات پیشین به بررسی رژیم انتقالی پرداختند. در رژیم چکیدن، یک عدد موئینگی اصلاح شده برای فاز پیوسته‌ی محلی، در محل تشکیل قطره معرفی کردند. عدد معرفی شده قادر به پیشگویی دقیق قطر قطره در این رژیم بود. همچنین بیان کردند که دینامیک شکست در این رژیم، تحت اثر تعادل بین نیروهای برشی و نیروی سطحی، اتفاق می‌افتد. در رژیم فشردگی با الگو گرفتن از مطالعات پیشین جهت پیشگویی طول شاخه از نتایج آزمایشگاهی گارستکی و همکاران [۴۱] استفاده کردند. آن‌ها بر اساس نتایج به دست آمده اظهار داشتند که فرآیند شکست قطره تحت اثر کاهش فشار در عبور از طول شاخه‌ی انتهایی اتفاق می‌افتد. برای رژیم انتقالی با توجه به تأثیر دو مکانیسم ذکر شده در بالا، یک مدل ریاضی پیشنهاد کردند که با دقت بالا طول شاخه‌ی مورد نظر را محاسبه می‌کرد.

در سال ۲۰۰۹ گوپتا و همکاران [۳۱] به بررسی عددی شکل‌گیری قطره و پایداری جریان در اتصالات تی پرداختند. در آن تحقیق، اعداد موئینگی بالا و نرخ‌های جریان متفاوت از فازهای پیوسته و گسسته مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها با استفاده از شبکه‌ی بولتزمن توانستند جریان‌های موازی را از جریان‌های قطره‌ای تشخیص دهند. همچنین وابستگی نسبت نرخ جریان و نسبت لزجت را بر شکل

گیری قطرات ایجاد شده، نشان دادند. همچنین گزارش کردند که به دلیل نسبت سطح به حجم بیشتر در میکروکانال، جریان معمولاً تحت تأثیر تنش سطحی می‌باشند. پژوهشگران با استفاده از داده‌های تجربی بیان کردند که اگر میزان سرعت جریان فاز پیوسته نسبت به فاز گسسته افزایش یابد، الگوی جریان از فرم قطره در اتصالات تی به فرم موازی در کانال تبدیل می‌شود. تحقیقات نشان داد زمانی که نیروهای تنش سطحی با نیروهای لزجت قابل مقایسه هستند، گذار به رژیم‌های جریانات مختلف زودتر و سریع‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج مطالعات آن‌ها حاکی از آن بود که پارامترهای هدایت کننده‌ی تولید قطرات علاوه بر عدد موئینگی، شامل نرخ‌های جریان، نرخ لزجت و هندسه میکروکانال می‌باشد، لذا تأثیر لزجت بالا در فاز پیوسته را مورد بررسی قرار دادند.

در سال ۲۰۱۰ سانتوس و همکاران [۴۳] به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تأثیر زاویه‌ی تماس بر روی شکل‌گیری لخته‌های گاز در یک جریان دوفازی در میکروکانال تی شکل پرداختند. تحقیقات آن‌ها حاکی بر دو روش ابتکاری بود. در روش اول سعی بر این بود تا از یک پروفیل سرعت جریان آرام توسعه یافته‌ی پر به‌عنوان شرایط مرزی در قسمت ورودی‌های سیال استفاده کنند. این روش جهت کاهش طول دامنه محاسباتی استفاده می‌شد، لذا با کمک آن، زمان محاسباتی کاهش می‌یافت که به دلیل سه‌بعدی بودن مدل‌سازی، بسیار ارزشمند بود. در روش دوم، ایده‌هایی را به منظور ردیابی لخته‌های گاز جهت به دست آوردن ویژگی‌های دقیق جریان که در برگیرنده‌ی حجم و سرعت متوسط لخته‌ها بود، ارائه کردند. در این مطالعه یافتند که زاویه‌ی تماس استاتیک اثر قابل توجهی بر روی شکل و ابعاد لخته گاز و پروفیل سرعت هر دو فاز گاز و مایع دارد.

در سال ۲۰۱۲ راجش و همکاران [۴۴] به بررسی آزمایشگاهی جریان‌های سه فاز مایع-مایع-گاز با استفاده از تصویربرداری سرعت بالا در میکروکانال‌هایی با اتصالات تی پرداختند. آن‌ها جهت ترسیم و شناخت رژیم‌های جریان و درک تأثیر میزان نرخ جریان از فازهای پیوسته (نفت سفید) و فازهای گسسته (هوا-آب) استفاده کردند. به‌منظور ایجاد انواع مختلف الگوهای جریان و کنترل کردن شکل

حباب‌ها و قطرات از توزیع کننده‌های سوزنی با اندازه‌های مختلف در ورودی جریان آب‌وهوا استفاده کردند. سپس با ارائه‌ی مقاله‌ای به بررسی شکل‌گیری مکانیسم حباب‌های هوا و قطرات آب در رژیم‌های مختلف جریان، اندازه‌گیری طول لخته‌ها، تأثیر توزیع‌کننده‌های مایع و گاز، تأثیر افزودن مواد فعال سطحی و معرفی رژیم‌های مختلف جریان سه فاز پرداختند و اظهار داشتند که علاوه بر موارد بالا با کنترل دبی‌های آب، روغن و هوا می‌توان الگوهای جریان متفاوت با ابعاد مختلف را ایجاد کرد. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که در یک عدد وبر ثابت آب‌وهوا، با افزایش عدد موئینگی فاز پیوسته روغن، نیروی برشی افزایش یافته و طول لخته‌ها کاهش می‌یابد. در صورتی که در یک عدد موئینگی ثابت، افزایش عدد وبر هوا منجر به افزایش نیروی اینرسی وارد شده از طرف هوا در مقایسه با نیروی فصل مشترک روغن-هوا می‌شود و از این رو طول لخته‌های هوا، افزایش می‌یابد. همچنین در مورد عدد موئینگی کمتر روغن، نتایج حاکی از آن بود که اولین قطره‌ی آب توسط نیروی برشی اعمال شده از فاز پیوسته جدا شده و به دومین اتصال تی هدایت می‌شود. در حالی که دومین قطره آب توسط حباب‌های ورودی هوا جدا می‌شود.

هوانگ و همکاران [۴۵] در سال ۲۰۱۲ به حل عددی دوبعدی و سه‌بعدی جریان‌های لخته‌ای با عدد موئینگی کم در میکروکانال‌ها با استفاده از نرم‌افزار اپن فم پرداختند. حرکت پایدار حباب‌ها در مسیرهای بسیار باریک و شکل‌گیری حباب‌ها در اتصالات تی شکل مورد بررسی قرار گرفت. توانایی روش حجم محدود با حل گر اینترفم در نرم‌افزار اپن فم برای مدل‌سازی جریان‌های لخته‌ای در میکروکانال‌ها ارزیابی شده است. آن‌ها از دو سیال هوا و اتانول جهت مدل‌سازی استفاده کردند. سیال نیوتنی، غیرقابل تراکم و در تمام شبیه‌سازی‌ها شرط عدم لغزش و زاویه‌ی برخورد صفر در نظر گرفته شده بود. مشکل اصلی آن‌ها مدل‌سازی حل لایه نازک روغنی بود که حباب‌های غیرخیس را برای به دست آوردن مشخصه‌های جریان محاصره می‌کرد. با استفاده از شبکه‌های ریز و محلی لایه نازک روغن در نزدیکی دیواره‌های کانال به خوبی مدل‌سازی شده است. آن‌ها نشان دادند که نرم‌افزار اپن فم به خوبی

قادر به مدل کردن جریان‌های دوفازی در داخل میکروکانال‌ها با عدد موئینگی کم می‌باشد. آن‌ها مشاهده کردند که حباب‌ها توسط لایه نازک روغن از دیواره‌ها جدا می‌شوند و طبق تجربه جهت مدل‌سازی جریان با عدد موئینگی کم دریافتند که بایستی مرتبه‌ی لایه روغن از نظر بزرگی دو مرتبه کمتر از عرض کانال باشد. همچنین متوجه شدند که برای به دست آوردن نتایجی دقیق جهت مدل‌سازی ضخامت لایه نازک فصل مشترک بین دو سیال با نرم‌افزار اپن فم، بایستی حداقل دو سلول شبکه‌ای در لایه روغن وجود داشته باشد.

یان و همکاران [۴۶] در سال ۲۰۱۲ به شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تشکیل قطره داخل میکروکانال پرداختند. از روش سطح معیار جهت مطالعات عددی استفاده کردند. مهم‌ترین دستاورد آن‌ها محاسبه و مقایسه‌ی میزان فشار تولید شده در نقطه‌ی خروج از کانال فرعی در طول فرآیند تولید قطره داخل میکروکانال هست، به‌طوری‌که آن‌ها به تحلیل رفتار فشار در رژیم‌های متفاوتی از جمله رژیم‌های فشرده‌گی، چکیدن، انتقالی، جت مانند و موازی پرداختند.

در سال ۲۰۱۳ هوانگ و همکاران [۴۷] به تحقیق درباره‌ی دینامیک شکست قطره در اتصالات تی شکل پرداختند. شکست قطره به‌صورت حرکت خزشی در میکروکانال‌هایی با هندسه‌ی محدود و استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی به روش حجم سیال در نرم‌افزار اپن فم مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها اشاره کردند که برای فروپاشی قطرات محصور نشده، دو مرحله مجزا وجود دارد:

۱. تغییر شکل ناپایای قطره که ناشی از ورود جریان خارجی فاز گسسته به درون میکروکانال است.

۲. کشش سطحی که به‌وسیله‌ی خم شدن سریع سه‌بعدی اتفاق می‌افتد و مستقل از ورود جریان خارجی فاز گسسته می‌باشد.

در مرحله اول اگر نیروی جریان خارجی ورودی متوقف شود، قطره به‌صورت کاملاً آرام به حالت اولیه برمی‌گردد اما در مرحله دوم قطره برای همیشه خواهد شکست. آن‌ها اظهار داشتند که در هندسه‌های

محدود همانند قطرات محصور نشده دو شرط بحرانی متمایز وجود دارد که مشخص می‌شود در مرحله اول یا قطره به فاز دوم رسیده و برای همیشه خواهد شکست یا به حالت پایا رسیده و نخواهد شکست و در مرحله دوم زمان شروع خم شدن سریع را تعیین خواهد کرد. آن‌ها در تحقیقاتشان به تجزیه و تحلیل مرحله دوم فروپاشی قطرات محصور نشده پرداختند. مطالعات حاکی از آن بود که پدیده خم شدن سریع زمانی آغاز می‌شود که انحنای گلولی صفحه میانی کانال، بزرگ‌تر از هر قسمت دیگر شود. در هر دو مورد پدیده شکست و ضخامت گلولی ارتباط مستقیم با تقاطع انحنا دارد.

خانیا نی و انصاری [۴۸] در سال ۲۰۱۴ به حل عددی مستقیم جریان غیرقابل تراکم دو فاز گاز-مایع برای حرکت حباب در میکروکانالی به شعاع ۱۰ میکرون پرداختند. آن‌ها از روش حجم سیال با مدل نیروی سطحی پیوسته در نرم‌افزار اپن فم استفاده کردند. جریان پیوسته حباب در میکروکانال دایره‌ای با فرض هندسه متقارن محوری و شرایط مرزی تناوبی مدل‌سازی شد. با استفاده از حل عددی نشان دادند که رابطه خطی بین کسر تهی و نسبت حجمی گاز در میکروکانال‌های دایره‌ای نیز برقرار است. در رابطه با افت فشار مشخص شد که امکان استفاده از روابط لاکهارت-مارتینلی تنها برای کسر تهی‌های پایین (کوچک‌تر از ۰/۲) وجود دارد. همچنین ضخامت لایه سیال با تعدادی از روابط تجربی مورد مقایسه قرار گرفت و مشخص شد که شبیه‌سازی عددی، شکل حباب را به‌طور دقیق نشان می‌دهد.

فیگل و همکاران [۴۹] در سال ۲۰۱۴ طی پژوهشی به بررسی تأثیر نوع جریان، اندازه کانال و عدد موئینگی در تولید قطره از میکرو منافذ پرداختند. آن‌ها از روش حل عددی و نرم‌افزار اپن فم استفاده کردند. جهت تفکیک سطح آزاد سیالات از روش حجم سیال استفاده شد. حل عددی توسط حل آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده بود و اثرات هندسه‌های مختلف و خواص سیال و جریان در پدیده تولید قطره و به‌ویژه اندازه آن بررسی شد. در نتیجه این مطالعه بیان شد که در یک بازه ثابت از اعداد موئینگی، نرخ برش دیواره کانال، بدون در نظر گرفتن نسبت چسبندگی‌ها، نوع جریان برشی و ارتفاع کانال، شاخص مهمی در تعیین اندازه قطرات است.

در پژوهشی که توسط بدرام و همکاران [۵۰] در سال ۲۰۱۵ انجام گرفت، از میکروکانال‌هایی با قابلیت تولید قطرات با اندازه‌های مختلف استفاده شد. این میکروکانال‌های تی شکل، که دارای یک سوپاپ در یکی از شاخه‌های فرعی هستند، می‌توانند قطراتی با اندازه‌های غیر یکسان تولید کنند. این پژوهش از روش حجم سیال استفاده کرده است. آن‌ها دریافتند که با کاهش عدد موئینگی، قطرات کوچک‌تری می‌توانند در انشعابات سوپاپ‌دار تولید کنند. علاوه‌براین، زمان شکست قطره وابسته به میزان باز یا بسته بودن سوپاپ می‌باشد و با افزایش عدد موئینگی کاهش پیدا می‌کند. نتایج آن‌ها همچنان بیانگر این واقعیت است که طول شکست قطره وابسته به میزان باز بودن سوپاپ نیست و با کاهش عدد موئینگی کاهش می‌یابد. از دیگر نتایج این تحقیق می‌توان به افت فشار در این کانال، که به شکل خطی با افزایش بازشدگی سوپاپ کاهش می‌یابد اشاره کرد.

حسینی صدیق [۳۴] یک حل عددی از جریان دوفازی تراکم‌ناپذیر با استفاده از نرم‌افزار کامسول ارائه کرده است. هندسه مورد مطالعه یک میکروکانال از نوع جریان متمرکز شده است که در آن دو سیال غیرقابل امتزاج از مرزهای ورودی تزریق می‌شوند. هدف تحقیق بررسی تأثیر نسبت دبی و نسبت چسبندگی بین دو فاز بر رفتار فازها و تعیین اندازه و فاصله بین آن‌ها و فرکانس تشکیل است. در این تحقیق برای ردیابی فصل مشترک بین فازها معادله لولست اضافه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند افزایش نسبت دبی یا عدد موئینگی باعث کاهش اندازه قطرات تولیدی و افزایش فرکانس تولید قطره شده و نیز فاصله بین آن‌ها افزایش می‌یابد ولی در نسبت دبی‌های ثابت، با افزایش نسبت چسبندگی فرکانس تولید کاهش می‌یابد. توزیع فشار بین دو فاز یک رفتار تناوبی داشته و در ورودی فازها ابتدا فاز گسسته دارای فشار بیشتری نسبت به فاز پیوسته است ولی با رشد قطره این رفتار تغییر می‌کند.

۲-۲ جایگاه پژوهش حاضر و فرضیات مسئله

بررسی رفتار دستگاه‌های چندفازی که شامل سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی هستند با توجه به

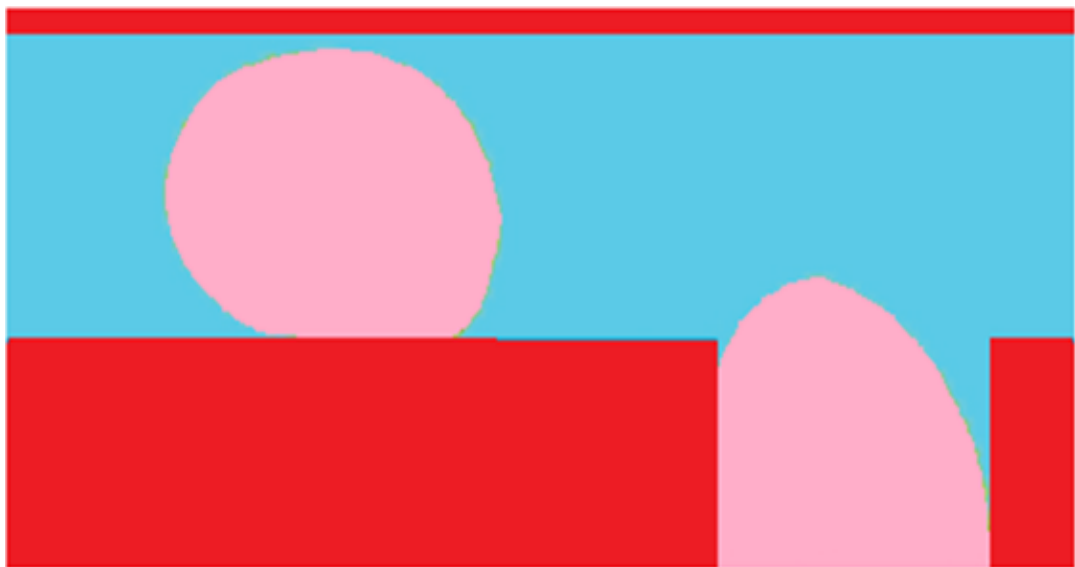
کاربردهای آن‌ها، بسیار مهم است. تزریق سیالات در یکدیگر به صورت چندفازی دارای کاربردهای وسیعی مانند تزریق مستقیم دارو در عروق که یکی از زمینه‌های پرکاربرد و مؤثر در مهندسی پزشکی و بایو برای درمان بسیاری از بیماری‌ها و ناهنجاری‌ها است، به طوری که توزیع نامناسب دارو باعث کاهش تأثیر آن می‌شود. به طور کلی کنترل رفتار سیال تزریق شونده در مجرا و رژیم‌هایی که به خود می‌گیرند و همچنین کنترل نحوه پراکندگی و انتشار آن‌ها در صنایع مختلف بسیار مورد توجه است.

دستگاه‌های میکروسیالی مبتنی بر قطره با توانایی تولید بالا، حوزه‌ای چالش‌برانگیز هستند. 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. به عنوان مثال تولید قطرات تک‌پخش می‌تواند الگویی مفید برای تولید میکروکپسول‌ها و نیز میکروذرات تک‌پخش به منظور دارورسانی هدفمند مواد مغذی و همچنین برای کپسوله کردن سلول‌های زنده باشد.

تحقیقات انجام شده در زمینه فرآیند جدایش قطره در دستگاه‌های میکروسیالی بیشتر به صورت تجربی بوده و کارهای کمتری به صورت عددی بر روی آن‌ها انجام شده است. ضمناً محققان در مطالعاتی که انجام دادند هنوز به دیدگاه واحدی دست نیافتند. روند جدایش قطره با توجه به وابستگی آن به پارامترهای متعددی مانند نسبت دبی‌ها، لزجت‌ها و پارامترهای هندسی هنوز به طور کامل شناخته نشده است. از این رو در پژوهش حاضر هدف بررسی جدایش قطره در جریانات سه‌فازی به کمک نرم‌افزار کامسول می‌باشد. همان گونه که از پیشینه مورد بررسی نیز قابل استنباط است میزان پژوهش‌هایی که مرتبط با جدایش و تولید قطره در رژیم‌های سه‌فازی است به ندرت مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. لذا در این پژوهش تلاش می‌شود تا با استفاده از نرم‌افزار کامسول به فیزیک این نوع جریانات سه‌فازی و عوامل مؤثر بر آن بیشتر اشراف بیابیم.

در این مطالعه مطابق با آنچه قبلاً بیان شد و با توجه به مزایا و معایبی که روش‌های عددی مختلف

نسبت به هم دارند، از روش سطح تراز^۱ استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی صحت سنجی نتایج ابتدا جریان دوفازی در میکروکانال T شکل مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از همان مکانیزم، جریان سه فازی در میکروکانال ترکیبی T شکل شبیه سازی و فرآیند تشکیل جریان های سه فازی تجزیه و تحلیل شده است. بدین منظور اثرات تغییر میزان سرعت و لزجت فازهای درونی میانی و بیرونی بر روی خواص قطرات ایجاد شده در این نوع خاص از جریانات مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد و تلاش می شود به صورت فیزیکی تحلیل شوند. نمونه ای از یک میکروکانال T شکل واحد در شکل ۱-۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱-۲: شماتیک یک میکروکانال T شکل واحد

با توجه به این قضیه که مطالعه جریانات دوفازی مربوط به جدایش قطرات در میکروکانال های مختلف و بخصوص میکروکانال های تی شکل به وفور مورد بررسی قرار گرفته است و اطلاعات به دست آمده درباره آنها به تفصیل ارائه شده است، در این بررسی تلاش بر این است تا با استفاده از نتایج مطالعات پیشین که مورد بررسی قرار گرفته اند، با سری کردن دو میکروکانال تی شکل، جریانات

^۱ Level set

سه‌فازی مختلفی ایجاد و مورد بررسی قرار گیرند. در پروژه حاضر تلاش می‌شود تا کنترل دقیق را بر روی شکل‌گیری قطرات و شرایط آن‌ها مهیا کند، تا قطرات با قابلیت تکثیر و پراکندگی مناسبی تولید شوند.

۲-۲-۱ کاربرد، اهمیت و ضرورت تحقیق

بررسی رفتار دستگاه‌های چند فازی که شامل سیالات نیوتنی 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 نیوتنی سیالات، 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 کلوئیدها خواص رئولوژیکی^۱ 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 و نیروهای لزج^۲ کنترل می‌شود و رئولوژی سیال در مشخص کردن رفتار سیالات قبل و در زمان شکل‌گیری قطره مهم است.

۲-۲-۲ نوآوری تحقیق

هدف عمده‌ی این پژوهش ارزیابی تشکیل قطره و رفتار آن در میکروکانال‌ها با استفاده از جریان‌های نیوتنی است. این پژوهش شامل بخش‌های زیر است:

^۱ Rheological properties

^۲ Viscous forces

۱. توسعه‌ی یک مدل شبیه‌سازی عددی بر پایه تابع لولست برای شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی قطرات با خواص نیوتنی.

۲. اعتبارسنجی مدل عددی ایجادشده با نتایج آزمایشگاهی و عددی به‌منظور کسب اطمینان در استفاده از آن. در فرآیند اعتبارسنجی هدف ما بررسی تطابق رفتاری بین مدل عددی تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی انجام‌شده است.

از نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تاکنون اکثر مطالعات انجام‌شده در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکزشده به‌صورت آزمایشگاهی بوده و کمتر به مطالعه عددی روی رفتار آن‌ها پرداخته‌شده 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 معرفی‌شده. به کمک این اعداد بی‌بعد می‌توان مستقل از نوع مایعات و یا شرایط محیطی، به پیش‌بینی این پدیده‌ها پرداخت.

مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱ و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول که یک نرم‌افزار عددی بر پایه روش المان محدود^۲ است انجام‌شده است. روش المان محدود بیانگر یک رویکرد عددی است که توسط آن معادلات دیفرانسیل کلی به یک شیوه تقریبی حل می‌شوند.

۳-۲-۲ جریان‌های سه‌فازی

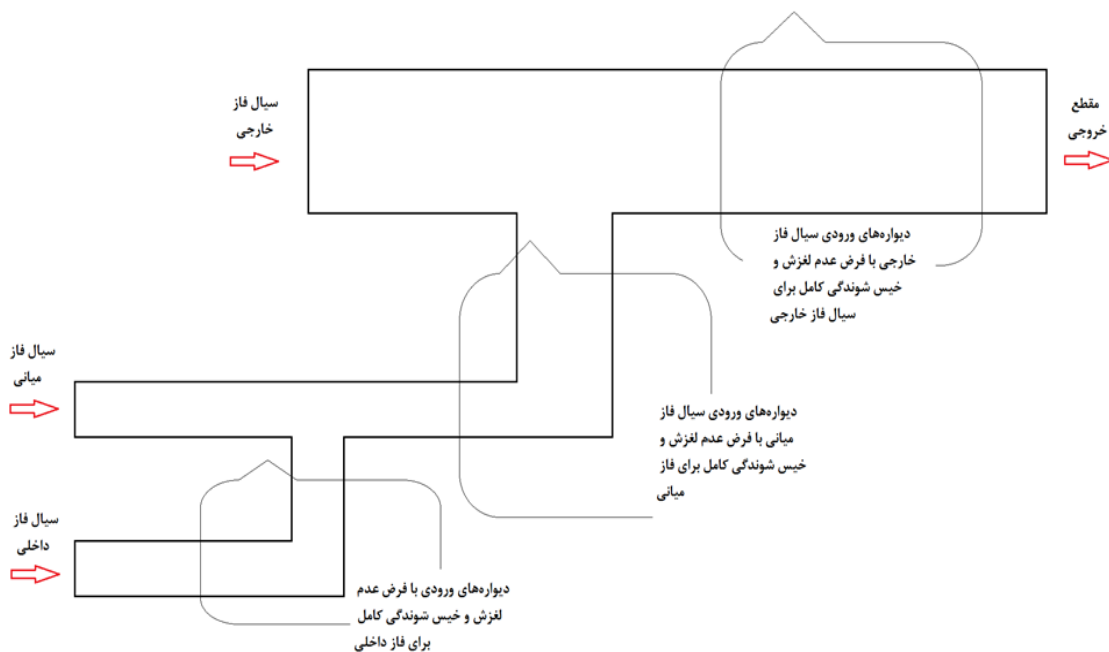
در جریان‌های سه‌فازی مربوط به جدایش قطرات به‌طور معمول یک پوسته محافظ برای مواد فعال ایجاد می‌شود. همچنین سبب جلوگیری از آلودگی با مقاطع کانال و یا فاز خارجی می‌شود و از

¹ Computational Fluid Dynamics

² Finite Element Method

آزادسازی واکنش‌های محصولات مضر به درون فاز بیرونی جلوگیری می‌کند. با این وجود، اگر آزادسازی مورد نیاز باشد، قطره خارجی می‌تواند توسط عواملی همچون تنش برشی شدید خارجی، شرایط خاصی از گرما، pH، تنش‌های فیزیکی با روش‌های فعال، پاره شود و سبب آزادسازی قطره داخلی شود.

سه نوع مختلف از جریان‌های سه فازی در یک میکروکانال T شکل چندگانه دوبعدی شبیه‌سازی شده است. عرض کانال‌های درونی، میانی و بیرونی به ترتیب برابرند با $50\text{ }\mu\text{m}$ ، $50\text{ }\mu\text{m}$ و $150\text{ }\mu\text{m}$. همان‌گونه که در شکل ۲-۲ نمایش داده شده است، در اتصال T شکل اول، فاز درونی و فاز میانی به ترتیب در کانال‌های عمودی و افقی جریان پیدا می‌کنند که در $250\text{ }\mu\text{m}$ پایین دست ورودی فاز میانی قرار دارد. علاوه بر آن، در اتصال T شکل دوم، فاز میانی و فاز بیرونی به ترتیب در کانال‌های عمودی و افقی جریان پیدا می‌کنند که در $200\text{ }\mu\text{m}$ پایین دست ورودی فاز بیرونی قرار دارد.



شکل ۲-۲: شماتیکی از هندسه تولید کننده جریان سه فازی

در شبیه‌سازی انجام شده برای فازی پیوسته از آب و همچنین برای فاز گسسته از دو نوع محلول آبی با لزجت دینامیکی و کشش سطحی مختلف مطابق جدول ۱-۲ استفاده شده است.

جدول ۱-۲: خواص سیالات استفاده شده

سیالات	چگالی (kg/m ³)	لزجت دینامیکی (mPa.s)	کشش سطحی بین دو فاز (mN/m)
محلول آبی	۱۱۰۰	۱	۶
محلول آبی	۱۱۰۰	۱	
آب	۱۰۰۰	۲	

۲-۲-۴ نحوه شبکه‌بندی و استقلال از شبکه

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 یک‌سو سبب دقیق‌تر شدن حل عددی می‌گردد و از سوی دیگر هزینه محاسباتی را افزایش می‌دهد. در شکل زیر نحوه شبکه‌بندی هندسه مسئله نمایش داده شده است.



شکل ۲-۳: نحوه شبکه‌بندی هندسه مسئله

۲-۲-۵ میکروکانال T شکل

شکل‌گیری قطره در میکروکانال T شکل تحت تأثیر اعداد بی‌بعد گوناگونی مانند $Q = u_c / u_d$ (نسبت بین دبی‌های ورودی دو فاز)، Ca ، Re ، نسبت بین عرض کانال فازهای جداشونده و پیوسته و نسبت بین لزجت دو فاز $\lambda = \mu_d / \mu_c$ می‌باشد.

برای شروع، شرایط مرزی به‌صورت سرعت‌های یکنواخت برای ورودی‌های هر یک از فازها، در کانال کناری و در کانال اصلی، در نظر گرفته شده است. در دیواره‌های میکروکانال شرط عدم لغزش روی دیواره و شرط دیواره تر شونده با مقدار زاویه تماس 145° درجه بین سطح مشترک و دیواره‌ها اعمال شده است.

این شرط مرزی در مسائلی که در آن‌ها امکان برخورد سطح مشترک بین سیال‌ها 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. در خروجی هندسه شرط فشار خروجی نسبی صفر بدون تنش لزج اعمال شده است.

علاوه بر این جریان تراکم ناپذیر و هم‌دما فرض شده و از نیروی گرانش به دلیل کوچک بودن عدد باند صرف‌نظر شده است. همچنین از تغییرات خواص فیزیکی از جمله چگالی، لزجت و کشش سطحی صرف‌نظر شده و فرض شده است که کشش سطحی موجود در مرز مشترک میان فازها، مقداری ثابت بوده و بازه تغییر نمی‌کند.

شرایط اولیه به‌کاررفته در حل مسئله حاضر و معادلات حاکم بر آن به این صورت است که در لحظه $t=0$ کانال اصلی به‌طور کامل حاوی سیال فاز گسسته ($\phi=1$) بوده و کانال‌های تزریق کناری، حاوی فاز پیوسته ($\phi=0$) در نظر گرفته شده است.

فصل ۳: معادلات حاکم

۳-۱ پیشگفتار

جریان‌های چندفازی در بسیاری از زمینه‌های زندگی روزمره بشر نقش ایفا می‌کنند، چه در طبیعت و چه در محیط تغییر داده شده توسط بشر که این امر موجب شکل‌گیری و وجود حیات و همچنین ایجاد رابطه‌ای قوی با نوع بشر، جانوران و گیاهان می‌شود. بارش باران، جریان‌های اقیانوسی و رودخانه‌ها، و همچنین فرآیند جابجایی در رگ‌های خونی انسان و حیواناتی که سبب انتقال اکسیژن و دیگر مواد معدنی برای جریان پیدا نمودن زندگی می‌شود، همه مثال‌هایی از جریان‌های دو یا چندفازی می‌باشند. بنابراین فهم دقیق این پدیده‌ها، ویژگی‌های آن‌ها و توانایی‌های آن‌ها به‌منظور کنترل دقیق و استفاده در جهت بهبود سطح زندگی، ضروری می‌باشد. مانند دیگر زمینه‌های علم و تکنولوژی، سه روش برای تحلیل نمودن دینامیک سیالات به‌منظور حل نمودن مسائل موجود، وجود دارند شامل: روش‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی در اینجا سعی شده که با استفاده از روش عددی، دینامیک جریان‌های دو یا سه‌فازی در میکروکانال‌های مورد بررسی قرار گیرد. باید متذکر شد، رسیدن به بهترین جواب، توسط ترکیبی از هر سه روش امکان‌پذیر می‌باشد.

در فصل قبل، مفاهیم اولیه‌ی جریان‌های دوفازی در میکروکانال‌ها، انواع کاربردهای آن‌ها و کارهای انجام شده تاکنون در این زمینه‌ها، مورد بررسی قرار گرفتند. در این فصل، قوانین حاکم بر فیزیک این نوع جریان‌های پارامترهای مؤثر و میزان تأثیر آن‌ها در شکل‌گیری قطرات و در انتها اعداد بی‌بعد مؤثر بر رژیم‌های جریان، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۲-۳ فرض پیوستگی

به دلیل اینکه همه مواد تشکیل شده از مولکول یا دسته‌ای از مولکول‌ها می‌باشند، تعیین خواص ماکروسکوپی سیالات توسط خواص مولکول‌های تشکیل دهنده آن، امکان‌پذیر است. با این وجود، این تئوری توصیف مولکولی خواص سیالات، در عمل، در همه موارد مهندسی (جریان گازهای رقیق و...) صحیح نمی‌باشد، بنابراین، فرض پیوستگی باید ابتدا در نظر گرفته شود، زیرا مقیاس طول در سیستم‌های میکروسیالی بسیار کوچک است (۱-۱۰۰۰ میکرومتر) راه مناسب برای مشخص نمودن انحراف یک جریان از حالت پیوستگی، توسط عدد نادسن می‌باشد. اگر عدد نادسن نزدیک یا بزرگ‌تر از یک باشد، مسیر آزاد میانگین حرکت مولکول‌ها نسبت به ابعاد طول قابل مقایسه می‌شود [۵۱].

جدول ۱-۳: طبقه‌بندی رژیم‌های جریان با توجه به عدد نادسن [۵۱].

مدل	عدد نادسن	جریان
معادلات ناویر - استوکس (شرایط مرزی عدم لغزش)	$Kn < 0.01$	جریان لزج
معادلات ناویر - استوکس (شرایط مرزی با لغزش)	$0.01 < Kn < 0.1$	جریان با لغزش
معادلات بولتزمن	$0.1 < Kn < 10$	جریان گذرا
معادلات برخورد بولتزمن	$10 < Kn$	جریان مولکولی آزاد

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (۱-۳)$$

در معادله بالا، λ برابر میانگین مسیر آزاد برای مولکول‌ها و L مشخصه‌ی مقیاس طول می‌باشند. برای مایعات، تقریباً برابر طول بین مولکولی است L_{mol} حجم اشغال شده توسط یک مولکول L_{mol}^3 به راحتی قابل محاسبه بوده؛

$$L_{mol} = \left(\frac{M_{mol}}{\rho N_A} \right)^{1/3} \quad (۲-۳)$$

ρ برابر چگالی، M_{mol} جرم مولی و N_A عدد آووگادرو می‌باشند. برای آب $\lambda = L_{mol} = 0.31 \text{ nm}$

است. عدد نادسن بیان کننده پیوستگی رژیم جریان و معادلات حاکم است.

۳-۳ معادلات حاکم

زیبایی و جالب توجه بودن پدیده‌های هیدرودینامیکی در سیستم‌های میکروسیالی، از عبارت‌های غیرخطی در معادلات ناویر - استوکس نشأت می‌گیرد. در اینجا همه‌ی سیال‌ها به‌عنوان سیال لیولنی و هر یک به‌صورت نازی پوسته و همگن در نظر گرفته شده‌اند. معادلات بنیادی دینامیک این نوع جریان‌های میکروسیالی دربردارنده دو معادله اصلی، تابع قوانین بایستاری، می‌باشند که به ترتیب برابرند با معادله بایستاری جرم و بایستاری اندازه حرکت. مدل عددی، حالت گسترش یافته مستقیم این معادلات است بنابراین معادلات مورد استفاده در اینجا برابرند با معادلات ناویر - استوکس که عبارت‌های کشش سطحی در آن جاگذاری شده است معادله (۳-۳) (این معادلات پس از دانشمندانی چون کلاود اولیس تاور^۱ (۱۸۲۲) و جرج گابریل استوکس^۲ (۱۸۳۶)، که آن‌ها را استنتاج نمودند، نام‌گذاری شده است. این معادله شکل ساده‌سازی شده کاربرد قانون دوم نیوتن برای المان‌های سیال می‌باشد. این معادله بیان می‌کند که تغییرات در مومنتم در حجم بسیار کوچکی از سیال، برابر مجموع نیروهای خارجی اعمال شده به آن، به‌علاوه‌ی جابجایی ممنتم وابسته به مولکول‌ها است). معادلات سه‌بعدی بایستاری جرم برای سیال چگالی متغیر معادله (۳-۴) و تراکم ناپذیر معادله (۳-۵) [۵۲].

$$\rho(\partial_t u + u \cdot \nabla u) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu D) + \sigma \kappa \delta_s n \quad (۳-۳)$$

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (۴-۳)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۵-۳)$$

در معادلات بالا، u برابر با سرعت سیال، ρ چگالی سیال و μ لزجت دینامیکی و D برابر با تانسور تغییر شکل می‌باشد. تابع دلتای دیراک، بیان‌کننده این امر می‌باشد که عبارت کشش سطحی بر روی سطح مشترک بین دوفاز متمرکز شده است. σ ضریب کشش سطحی بوده K و n به ترتیب

^۱ Claude-louis navier

^۲ George gabriel stokes

مشخص کننده انحنا و بردار عمود بر سطح به سمت بیرون برای سطح مشترک بین دوفاز می‌باشند [۵۳].

برای جریان دو فاز، تابع کسر حجمی فازها به صورت C مشخص شده که برای تعیین لزجت و چگالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، تابع فیلتر فضایی برای هموار سازی کسر حجمی بین دو فاز مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از آن، میدان با میانگین گیری مقادیر چهار گوشه‌های میدان C (هشت مقدار در حالت سه بعدی) ساخته می‌شود. این کار توسط درونیایی دوطبقی^۱ از مقادیر مراکز سلول‌ها انجام می‌شود. وقتی که فیلتر فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، خواص همراه با سطح مشترک بین دو فاز بر روی سه سلول گسسته سازی شده پخش می‌شود [۵۴].

$$\mu(c) = c\mu_1 + (1-c)\mu_2 \quad (۶-۳)$$

$$\rho(c) = c\rho_1 + (1-c)\rho_2 \quad (۷-۳)$$

اندیس‌های (۱) و (۲) به ترتیب مشخص کننده فازهای یک و دو می‌باشند.

در صورتی که جریان مورد شبیه‌سازی، جریان سه فاز باشد معادلات (۶-۳) و (۷-۳) به شکل زیر تغییر پیدا می‌کنند [۴۲]:

$$\mu(c_1, c_2) = c_1\mu_1 + c_2\mu_3 + (1-c_1-c_2)\mu_2 \quad (۸-۳)$$

$$\rho(c_1, c_2) = c_1\rho_1 + c_2\rho_3 + (1-c_1-c_2)\rho_2 \quad (۹-۳)$$

اندیس‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب مشخص کننده فازهای اول، دوم و سوم می‌باشند.

با توجه به پیوستگی جرم، معادله جابجایی خالص^۲ برای چگالی، با توجه به عبارت کسر حجمی در هر سلول، شکل زیر را به خود می‌گیرد:

$$\partial_t c + \nabla \cdot (cu) = 0 \quad (۱۰-۳)$$

در این روش، سلول‌های شامل سطح مشترک بین دوفاز، به عنوان سلول‌های یک ترکیب یکنواخت

^۱ Bilinear interpolation

^۲ Advection

در نظر گرفته نمی‌شوند، در حالی که فازها به صورت جدا از هم با یک مدل VOF تکه‌ای خطی^۱ با توجه به مراجع تعیین شده‌اند. در هر سلول محاسباتی نیروی کشش سطحی، که بر روی سطح مشترک بین دوفاز وارد می‌شود معادله (۳-۲)، تعیین کننده تعامل بین فازهای مختلف می‌باشد. برای تولید سطح مشترک بین دو فاز، از یک مدل VOF تکه‌ای خطی استفاده شده که توسط پاینت^۲ در کد جریس گنجانده شده است. سطح مشترک بین دو فاز به صورت یک خط (در حالت دوبعدی) و یا یک صفحه (در حالت سه‌بعدی) تعیین می‌شود که در معادله زیر توصیف شده است [۵۵].

$$m \cdot x = \alpha \quad (۳-۱۱)$$

در معادله فوق m برابر با نرمال محلی عمود بر سطح مشترک بین دو فاز، و x برابر بردار مکان می‌باشد.

۳-۴ جریان آرام

در دینامیک سیالات، جریان آرام، گاهی اوقات به عنوان جریان خط جریان شناخته می‌شود که رژیم فاز جریان با مشخصه‌های ممنوم زیاد و جابجایی ممنوم کم است. این رژیم شامل حرکت‌های بسیار منظم ذرات سیال است که توسط لایه‌های موازی، سازمان‌دهی شده‌اند. اگرچه همه مولکول‌ها در یک خط مستقیم حرکت می‌کنند اما سرعت آن‌ها باهم برابر نیست. برای مثال با در نظر گرفتن یک لوله، اگر سرعت میانگین سیال U باشد، در نتیجه، مولکول‌ها در مرکز لوله دارای سرعت تقریبی $2U$ هستند، در حالی که مولکول‌ها در دیواره‌های لوله تقریباً ساکن هستند. قطرات جدا از هم با جریان لایه‌ای، می‌تواند با تزریق دو فاز غیرقابل ترکیب در کانال، با توجه به خواص سیال مانند خیس کنندگی، سرعت‌های سیال، لزجت سیال و ویژگی‌های هندسی، به وجود آیند. علاوه بر آن، در این رژیم، مایع تمایل به اختلاط جانبی در جریان ندارد و همچنین جریان متقاطع عمود بر جهت جریان

^۱ Piecewise-linear

^۲ Popimet

وجود ندارد و گردابه و چرخشی در سیال به وجود نمی‌آید. در اعداد رینولدز کوچک‌تر از یک، حرکت خزشی (با جریان استوکس) اتفاق می‌افتد. این نوع جریان یک حالت مشخص از جریان آرام است که تأثیر لزجت (اصطکاک) بیشتر از نیروهای اینرسی است [۵۶].

۳-۵ قانون هاگن - پوازی

معادله هاگن - پوازی یک قانون فیزیکی برای سیال متحرک در یک لوله طویل می‌باشد و افت فشار در آن به نرخ جریان حجمی سیال وابسته می‌باشد. فرض بر این است که سیال لزج و غیرقابل تراکم است، جریان در کانال آرام است، مقطع کانال ثابت است و سیال هیچ شتابی ندارد و این فرضیه در سیستم‌های میکروسیالی برقرار است [۵۷].

۳-۶ ناپایداری ریلی - پلاتر

ناپایداری ریلی - پلاتر توضیح می‌دهد که چرا و چگونه در یک جریان در حال سقوط سیال، جدایش اتفاق افتاده و به قطرات کوچک‌تر تبدیل می‌شود. علت نیروی به وجود آورنده‌ی این فرایند، تمایل ذاتی سیال برای کمینه کردن مساحت سطح آن است. توضیح این ناپایداری باوجود اغتشاشات کوچک در سطح مایع آغاز می‌شود. این اغتشاشات به دلیل نوسانات فشار در درون مایع، به علت تغییرات کوچک در انحنای محلی سطح مشترک بین دو فاز به وجود می‌آیند و همواره وجود دارند و مهم نیست که جریان چقدر آرام باشد. اگر اغتشاشات تبدیل به عناصر سینوسی شوند، معادله شعاع جریان به این صورت نوشته می‌شود. $r(z) = r_0 + A_k \cos(kz)$ که r_0 شعاع جریان غیر مغشوش، A_k دامنه اغتشاشات، z فاصله در طول جریان و k عدد موج است (k یک اندازه‌گیری از وجود تعداد قلم‌ها و دره‌ها در هر متر از سیال است). بعضی از عناصر جریان با توجه به زمان افزایش می‌یابند درحالی‌که دیگر عناصر یا زمان کاهش می‌یابند. در میان آن‌هایی که با زمان افزایش می‌یابند، بعضی با سرعت بیشتری با زمان افزایش می‌یابند. میزان این تغییرات تابعی از عدد موج (k) و شعاع جریان اصلی

استوانه (r_0) می باشد. با فرض اینکه دامنه‌ی همه عناصر ممکن، در ابتدا تقریباً برابرند (اما کوچک‌اند)، اندازه‌ی نهایی قطرات را می توان با عدد موج عناصری که سریع تر رشد می کنند، پیش بینی نمود. باگذشت زمان عناصری که بیشترین نرخ رشد را دارند، حاکم می شوند و در نهایت باعث جدایش جریان و تولید قطرات می شوند، که به آن زمان مشخص ناپایداری گفته می شود [۵۸].

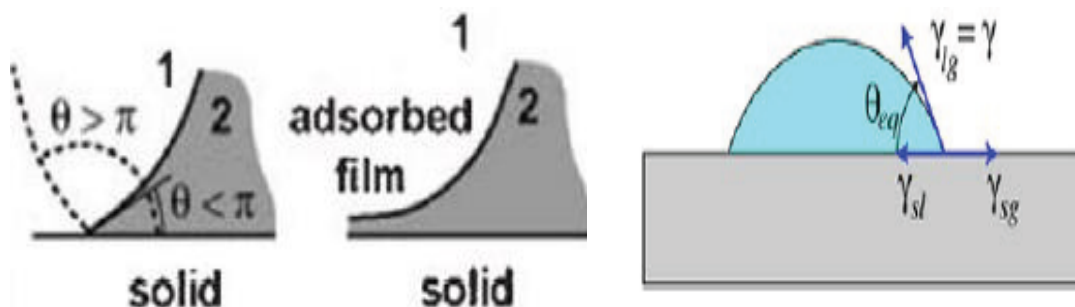
۷-۳ خیس کنندگی و کشش سطحی

۱-۷-۳ خیس کنندگی

وقتی دو سیال غیرقابل ترکیب به صورت لایه‌ای در ارتباط با یکدیگر قرار می گیرند، دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد: اول این که یکی از دو سیال به صورت کامل دیواره کانال را خیس می کند و دیگری را از سطح آن جدا می کند. در حالت دوم هر دو سیال به صورت نسبی با یک زاویه موازنه، کانال را خیس می کنند شکل ۱-۳-الف. زاویه توازن به وسیله تعادل نیرو بین سه فاز در خط تماس آن‌ها تخمین زده می شود [۵۹]:

$$\gamma_{l_1, l_2} \cos \theta_{eq} = \gamma_{s, l_2} - \gamma_{s, l_1} \quad (۱۲-۳)$$

درحالی که γ نماد کشش سطحی است شکل ۱-۳-ب. با توجه به نزدیکی دیواره‌های کانال به دوفاز، شرایط خیس کنندگی به اندازه خیلی زیادی شکل گیری و جابجایی قطرات را تحت تأثیر قرار می دهد. برای تشکیل یک رژیم جریان پایدار، خیس کنندگی کامل فاز پیوسته در دیواره‌ها لازم است. فیلم نازکی که دیواره‌ها را خیس می کند و بین قطرات و دیواره‌ها قرار می گیرد، به روان سازی حرکت قطرات در داخل میکروکانال و تکه تکه شدن مواد درون آن کمک می کند [۶۰].



الف

ب

شکل ۳-۱: الف) شرایط خیس کنندگی. (چپ) دو فاز به صورت نسبی سطح را خیس می کنند و خط تماس را شکل می دهند. (راست) فاز شماره دو ترجیح به خیس کنندگی کامل سطح دارد. ب) شرایط تعادل خیس کنندگی برای دو فاز با خیس کنندگی نسبی، مشخص شدن زاویه تماس مقدار کشش سطحی [۶۱].

۳-۷-۲ لزجت

لزجت یک سیال برابر اندازه گیری مقاومت آن در برابر تغییر شکل تدریجی به وسیله ی تنش برشی و یا تنش کششی می باشد. به شکلی ساده تر، مقاومت درونی سیال در برابر جریان یافتن را مشخص می کند و ممکن است به عنوان اندازه میزان اصطکاک سیال در نظر گرفته شود. هرچقدر لزجت بیشتر باشد، مقاومت سیال در برابر جاری شدن بیشتر است و برعکس. با استثناء قائل شدن برای سوپرسیال ها، همه سیال های واقعی اندازه ای مقاومت در برابر تنش دارند، بنابراین ویسکوز هستند. به صورت کلی رفتار فیزیکی همراه با لزجت را می توان به این صورت توصیف نمود: در هر جریانی، لایه های مولکول ها با سرعت های متفاوت حرکت می کنند و لزجت سیال از تنش برشی بین این لایه ها که در نهایت با هرگونه نیروی اعمال شده مخالفت می کند، به وجود می آید [۶۲].

۳-۷-۳ کشش سطحی

کشش سطحی به دلیل عدم تعادل نیروها روی مولکول های سیال در کنار سطح مشترک بین دو فاز غیرقابل ترکیب به وجود می آید، مولکول های داخل سیال به طور کامل توسط مولکول هایی از جنس

خودشان احاطه شده‌اند، بنابراین نیروهای خارجی در تعادل‌اند. در سطح مشترک بین دو فاز، مولکول‌ها در معرض هر دو فاز هستند و نیروهای جذب کننده توسط مولکول‌های هم نوع هر سیال باعث ایجاد یک نیروی خالص می‌شود که آن را به سمت داخل می‌کشد. این نیرو با نیروی مقاوم سیال در برابر تراکم در تعادل است. در نتیجه تعادل نیروها، کشش سطحی با کاهش مساحت سطح و تمایل به تشکیل شکل کروی، تمایل به کمینه کردن انرژی سطحی سیال دارد. شکل منحنی باعث ایجاد یک جهش فشار در طول سطح مشترک بین دو فاز می‌شود که توسط معادله لاپلاس-یانگ مشخص می‌شود: $\Delta p = \gamma \kappa$ که κ انحنای سطح مشترک بین دو فاز است و به وسیله شعاع اصلی آن تعیین می‌شود.

$$\kappa = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3-13)$$

کشش سطحی، γ ، به عنوان انرژی مورد نیاز برای افزایش یک واحد مساحت سطح (Jm^{-2}) با نیرو بر واحد طول (Nm^{-1}) مماس بر سطح مشترک بین دو فاز، مشخص می‌شود. حضور سطح مشترک بین دو فاز باعث ایجاد یک دسته شرایط مرزی دینامیکی و سینماتیکی بر روی جریان سیال می‌شود. تا زمانی که دو فاز نتوانند با یکدیگر ترکیب شوند، عناصر عمودی سرعت در سطح مشترک بین دو فاز باید برای هر دو فاز با یکدیگر همخوانی داشته باشند. سرعت‌های مماسی سیال برای هر دو فاز در سطح مشترک بین دو فاز باید با یکدیگر برابر باشند، تنش‌های مارانگونی¹ به عنوان یک نتیجه از گرادیان کشش سطحی باعث ایجاد یک جهش در تعادل تنش مماسی در سطح مشترک بین دو فاز می‌شوند:

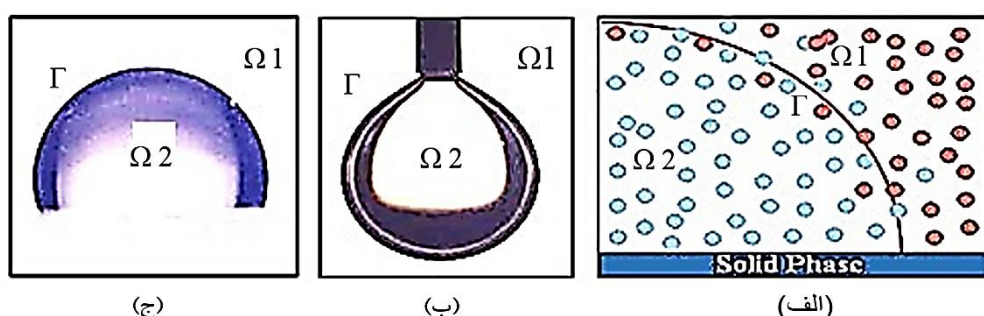
$$\mu_c \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_c = \mu_d \left. \frac{\partial u}{\partial r} \right|_d + \nabla \gamma \quad (3-14)$$

$\nabla \gamma$ نتیجه‌ای از تغییرات فضایی در کشش سطحی است که ممکن است به دلیل مواد

¹ Marangoni

سورفوکتانت^۱ و گرادیان دما باشد. همچنین، تنش‌های ویسکوز و تغییرات فشار عمود بر سطح مشترک بین دو فاز، باید در تعادل باشند.

آزمایشات صورت گرفته بر روی کشش سطحی در سیستم‌های میکروسیال مشخص شده نشان داد، افزایش نرخ تنش برشی برای انواع مختلف مونومرها تأثیری در لزجت آن‌ها نداشته، بلکه در این نوع میکروکانال‌ها، مونومرها رفتاری نیوتنی از خود نشان دادند [۶۳]. شکل ۲-۳ دیدگاه میکروسکوپی سطح مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳: فصل مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر [۶۳] (الف) نمای میکروسکوپی در اندازه مولکولی از فصل مشترک (ب) قطره آویزان (ج) قطره چسبیده به سطح

۳-۷-۴ سورفوکتانت^۲

سورفوکتانت‌ها از هر دو نوع آب دوست و آب گریز وجود دارند و این باعث می‌شود که در هر دو فاز آلی و آبی قابل حل شدن باشند. در نتیجه، سورفوکتانت حرکت کرده و در سطح مشترک بین دو فاز به تله می‌افتد. مهم‌ترین هدف از اضافه کردن سورفوکتانت، کاهش دادن کشش سطحی در سطح مشترک و پایدار کردن قطرات در برابر انعقاد است، وقتی سورفوکتانت وجود داشته باشد، فیزیک جریان دوفاز به اندازه‌های زیادی تغییر می‌کند. جذب سطحی سورفوکتانت یک فرآیند انتقال جرم دینامیکی است که در ابعاد زمانی مشابه با شکل‌گیری و جابجایی قطرات اتفاق می‌افتد. سورفوکتانت‌ها می‌توانند در طول سطح مشترک بین دو تا از حرکت توده‌های سیال یا توسط نفوذ، در حالت حجمی

^۱ Surfactant

^۲ Surfactant

۳-۸ نیروها، مقیاس گذاری و اعداد بی بعد

مشخص نمودن ویژگی‌های جریان‌ها با استفاده از اعداد بی بعد، به دلیل کاهش تعداد پارامترهای مؤثر بر سیستم، می‌تواند بسیار مفید باشد. با استفاده نمودن از نرمال سازی مناسب می‌توان معادلات حاکم اصلی را به شکل بی بعد آن‌ها تغییر داد که با توجه به آن گروه بی بعدی از متغیرهای مربوطه ظاهر می‌شوند. استفاده نمودن از مقادیر با اعداد بی بعد، تعیین نمودن تأثیر تغییرات مقیاسی بر روی مدل‌های آزمایشگاهی را ممکن می‌نماید. همچنین با استفاده از اعداد بی بعد می‌توان اهمیت نسبی هر عبارت در معادلات بنیادی حاکم بر جریان را تخمین زد [۶۵].

در میکروسیال‌های دوفاز، قطرات فاز جداشونده در یک فاز غیرقابل ترکیب دیگر شکل گرفته و باعث تولید قطرات متعدد می‌شوند. هر قطره اساساً یک میکرو واکنش دهنده‌ی قابل جابجایی است که با تکه تکه کردن مواد در یک صفحه میکرو مانند، از نفوذ آن‌ها در یکدیگر جلوگیری می‌کند. در اینجا بهتر است تا دو فاز به طور کامل مشخص شوند. فازی که قطره را حمل می‌کند فاز پیوسته^۱ و فازی که قطرات را تشکیل می‌دهد فاز جداشونده^۲ نام دارد. با وجود شرایط مطلوب خیس شوندگی، قطرات توسط فیلم نازکی از فاز پیوسته که از جذب شدن و آلودگی مقاطع بین قطرات و دیواره‌های کانال جلوگیری می‌کند. از دیواره‌های کانال جدا می‌شوند. همچنین با توجه به شکل‌گیری گردابه‌ها، با جهت دوران مخالف جهت حرکت قطره، اختلاط افزایش پیدا می‌کند.

در این جریان دوفاز، تعادلی بین چهار نیروی مؤثر در رژیم جریان وجود دارد. این نیروها عبارت‌اند از: اینرسی، تنش‌های ویسکوز، کشش سطحی و نیروی پویانسی جدول ۳-۲. اهمیت نسبی این نیروها

¹ Continuous

² Dispense

به وسیله ترکیبی از اعداد بی بعد مشخص می شود مانند: عدد رینولدز (لزجت اینرسی)، عدد کاپیلاری^۱ (کشش سطحی/ لزجت)، وبر^۲ (کشش سطحی اینرسی) [۶۶].

با توجه به سرعت جریان پایین و نسبت سطح به حجم بالا در میکروکانال های نیروی پویانسی و گرانش در برابر نیروی لزجت و کشش سطحی، تأثیر کمتری داشته است.

جدول ۳-۲: نیروها و اعداد بی بعد

علائم اختصاری	معادله	تعریف	عدد بی بعد	تأثیر ابعادی از درجه طول
Re	$\frac{\rho UL}{\mu}$	لزجت / اینرسی	رینولدز	۱
Ca	$\frac{\mu U}{\gamma}$	کشش سطحی / لزجت	کاپیلاری	۰
We	$\frac{\rho U^2 L}{\gamma}$	کشش سطحی / اینرسی	وبر	۱

۳-۸-۱ اعداد و پارامترهای بی بعد

اغلب پدیده هایی که در طبیعت و در علم مکانیک سیالات با آن ها مواجه می شویم به متغیرهای زیادی وابسته هستند و این وابستگی باعث می شود تجزیه و تحلیل این پدیده ها دشوار شود. به کمک آنالیز ابعادی^۳ می توان به جای بررسی مجزای پارامترها و تأثیرات آن ها، اعداد بی بعد حاکم بر مسئله را شناسایی و در تجزیه و تحلیل مسئله از آن ها بهره برد. آنالیز ابعادی در مکانیک از اهمیت کلیدی برخوردار است و در آن از میان تعدادی نیرو که در مقیاس های مختلف در میکروکانال به جریان سیال اعمال می شوند، مهم ترین و تأثیرگذارترین آن ها در برابر دیگر آثار را مورد بررسی و قضاوت قرار

^۱ Capillary

^۲ Weber

^۳ Dimensional Analysis

می‌دهند. اعداد بی‌بعد^۱ بیان‌کننده نسبت این اثرهای فیزیکی بوده و نشان‌دهنده اهمیت نسبی نیروها و انرژی‌ها است که می‌تواند راهی برای ساده‌سازی مسائل پیچیده باشد. رفتار میکرو قطرات در جریان چندفازی 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:

عدد رینولدز: این عدد بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج بوده و از آن برای بیان نوع رژیم جریان استفاده می‌شود. نیروهای اینرسی باوجود اینکه اثرات خاصی بر میکرو قطرات با سرعت‌بالا و یا در زمان گسسته شدن آن‌ها دارد، اما در بیشتر موارد می‌توان آن را نادیده گرفت.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (۱۵-۳)$$

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

$$We = \frac{\rho u^2 L}{\sigma} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن $\Delta\rho$ اختلاف چگالی جرمی بین دو سیال است.

عدد موینگی: عدد موینگی نسبت نیروهای لزج به کشش سطحی است. در موینگی‌های پایین کشش سطحی عاملی مهم بوده و باعث تولید پایدار قطرات می‌شود. در مقابل نیروی لزج نقش مهمی داشته و منجر به تغییر شکل بزرگ قطرات و شکل نامتقارن آن می‌شود. این عدد به صورت رابطه (۳-۱۷) تعریف می‌شود و در آن u_c سرعت فاز پیوسته است.

$$Ca_c = \frac{We_c}{Re_c} = \frac{\eta_c u_c}{\sigma} \quad (۱۷-۳)$$

عدد نادسن^۲: این عدد که بیان‌کننده مقیاس طولی میکروسکوپی^۱ به ماکروسکوپی^۲ بوده و به صورت

^۱ Dimensionless Numbers

^۲ Knudsen number

زیر تعریف می شود:

$$Kn = \frac{\beta}{n} \quad (۱۸-۳)$$

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 اینجا اندیس d نشان دهنده فاز گسسته^۳

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:

$$u_c = \frac{Q_c}{A_{orif}} = \frac{Q_c}{W_4 h} \quad (۱۹-۳)$$

$$t^* = \frac{tu_c}{W_4} \quad (۲۰-۳)$$

$$P^* = \frac{p}{\rho_c u_c^2} \quad (۲۱-۳)$$

$$D^* = \frac{D}{W_4} \quad (۲۲-۳)$$

$$L^* = \frac{L}{W_4} \quad (۲۳-۳)$$

$$T = \frac{\Delta t}{N} \quad (۲۴-۳)$$

$$f^* = \frac{W_4}{TU_d} \quad (۲۵-۳)$$

که در اینجا U_d سرعت فاز گسسته در ورودی کانال تزریق میانی، N تعداد قطرات تشکیل شده به

^۱ Microscopic

^۲ Macroscopic

^۳ Dispersed phase

ازای زمان Δt و T دوره تناوب تشکیل قطرات است. با توجه به تعاریف فوق می‌توان دریافت که اعداد ویر و رینولدز در جریان میکرو قطره کوچک هستند. علاوه بر این پارامترهای تأثیرگذار بسیاری مانند محدودیت‌های دیواره میکروکانال و تر شونده‌گی دیواره‌ها و نسبت ابعاد هندسی میکروکانال اثرات مهمی بر جریان چندفازی حاوی قطره دارند. در ضمن اعمال میدان‌های نیروی خارجی مانند میدان‌های الکتریکی، حرارتی، آکوستیک و غیره باعث می‌شود که برای توصیف اثر آن‌ها نیاز به مشخص کردن اهمیت نسبی نیروهای اعمالی و کشش سطحی باشد.

استفاده از شکل بی‌بعد معادلات ناویر – استوکس در مکانیک سیالات بسیار رایج است. چنانچه یک جریان دارای یک طول مرجع L و سرعت مرجع U باشد، در این صورت پارامترهای جریان را می‌توان به شکل زیر بی‌بعد کرد:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^* &= \mathbf{V} / U & x^* &= x / L & y^* &= y / L & z^* &= z / L \\ \nabla^* &= L \nabla & t^* &= t U / L & p^* &= (p - p_0) / (\rho U^2) \end{aligned} \quad (26-3)$$

با توجه به روابط بالا می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \mathbf{V} &= U \mathbf{V}^* & x &= L x^* & y &= L y^* & z &= L z^* \\ \nabla &= \nabla^* / L & t &= t^* L / U & p &= p_0 + p^* \rho U^2 \end{aligned} \quad (27-3)$$

با توجه به رابطه بالا، برای شکل بی‌بعد معادله پیوستگی جریان تراکم ناپذیر داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 & \longrightarrow \frac{\partial(Uu^*)}{\partial(Lx^*)} + \frac{\partial(Uv^*)}{\partial(Ly^*)} + \frac{\partial(Uw^*)}{\partial(Lz^*)} = 0 \\ \frac{U}{L} \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} \right) = 0 & \longrightarrow \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} + \frac{\partial w^*}{\partial z^*} = 0 \quad \text{or} \quad \nabla^* \cdot \mathbf{V}^* = 0 \end{aligned} \quad (28-3)$$

در خصوص بی‌بعد سازی معادلات مومنتوم، از معادله مومنتوم در جهت X و با صرف نظر از اثرات

گرانش داریم:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right),$$

$$\rho \left(\frac{\partial(Uu^*)}{\partial(t^*L/U)} + (Uu^*) \frac{\partial(Uu^*)}{\partial(Lx^*)} + (Uv^*) \frac{\partial(Uu^*)}{\partial(Ly^*)} + (Uw^*) \frac{\partial(Uu^*)}{\partial(Lz^*)} \right) =$$

$$- \frac{\partial(p_0 + p^* \rho U^2)}{\partial(Lx^*)} + \mu \left(\frac{\partial^2(Uu^*)}{\partial(Lx^*)^2} + \frac{\partial^2(Uu^*)}{\partial(Ly^*)^2} + \frac{\partial^2(Uu^*)}{\partial(Lz^*)^2} \right),$$

$$\frac{\rho U^2}{L} \left(\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} \right) = - \frac{\rho U^2}{L} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{\mu U}{L^2} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}} \right)$$

با تقسیم کردن خط آخر معادله بالا به $\frac{\rho U^2}{L}$ داریم:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\frac{\rho U L}{\mu}} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (3-30)$$

بنابراین برای معادله بی بعد مونتوم در جهت x داریم:

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + w^* \frac{\partial u^*}{\partial z^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x^*} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial z^{*2}} \right) \quad (3-31)$$

در نهایت با توجه به معادلات بالا فرم بسته معادلات ناویر استوکس جریان تراکم ناپذیر به صورت زیر

خواهد بود:

$$\nabla^* \cdot \mathbf{V}^* = 0$$

$$\frac{D\mathbf{V}^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^{*2} \mathbf{V}^* \quad (3-32)$$

برای جریان تراکم پذیر و انتقال حرارت مربوط به آن می توان از پارامترهای زیر جهت بی بعد سازی

استفاده نمود:

$$x_i^* = \frac{x_i}{L} \quad t^* = \frac{tU}{L} \quad \mathbf{V}^* = \frac{\mathbf{V}}{U} \quad p^* = \frac{p - p_0}{\rho U^2} \quad \Phi^* = \frac{L^2}{\mu_0 U^2} \Phi$$

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_0} \quad T^* = \frac{T - T_0}{T_w - T_0} \quad \mu^* = \frac{\mu}{\mu_0} \quad k^* = \frac{k}{k_0} \quad \nabla^* = L \nabla \quad (3-33)$$

با استفاده از پارامترهای بی بعد فوق، صورت بی بعد معادلات ناویر - استوکس و انتقال حرارت

به صورت زیر است:

$$\text{Continuity: } \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + \nabla \cdot (\rho^* \mathbf{V}^*) = 0$$

$$\text{Navier-Stokes: } \rho^* \frac{D\mathbf{V}^*}{Dt^*} = \frac{1}{Fr} \rho^* - \nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^* \cdot \left[\mu^* \left(\frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} + \frac{\partial u_j^*}{\partial x_i^*} \right) \right] \quad (34-3)$$

$$\text{Energy: } \rho^* \frac{DT^*}{Dt^*} = Ec \frac{Dp^*}{Dt^*} + \frac{1}{RePr} \nabla^* \cdot (k^* \nabla^* T^*) + \frac{Ec}{Re} \Phi^*$$

در رابطه فوق Φ تلفات ویسکوز، Re عدد رینولدز، Fr عدد فرود، Pr عدد پرانتل، Ec عدد اکرت است.

$$Re = \frac{\rho_0 UL}{\mu_0} \quad Fr = \frac{U^2}{gL} \quad Pr = \frac{\mu_0 c_p}{k_0} \quad Ec = \frac{U^2}{c_p T_0} \quad (35-3)$$

۳-۸-۲ عدد کاپیلاری (Ca)

عدد کاپیلاری مهم‌ترین عدد بی‌بعد برای توصیف تجزیه و تحلیل در پدیده‌های دوفاز در مقیاس میکرو می‌باشد که این پدیده‌ها شامل: شکل‌گیری، جدایش، انعقاد، جابجایی و اختلاط قطرات می‌باشند. این اعداد بی‌بعد، رقابت بین تنش‌های ویسکوز که در جهت کشیدن و طولیل کردن سطح مشترک بین دو فاز عمل می‌کند، و کشش سطحی، که تمایل به مینیمم کردن مساحت سطح دارد، را تخمین می‌زند. نیروهای ناشی از تنش برشی به‌عنوان یک نیروی مخرب در جهت فروپاشی قطره عمل می‌کنند درحالی‌که کشش سطحی به‌عنوان یک نیروی منسجم عمل کرده و تمایل به پایدار کردن قطره دارد. بنابراین عدد کاپیلاری را می‌توان معیاری برای انسجام قطره دانست. کنترل بر تمام فرآیندهای قطره شامل دست‌کاری در مقدار سه متغیر مستقل عدد کاپیلاری می‌باشد. این سه متغیر عبارت‌اند از: لزجت μ ، سرعت جریان U و کشش سطحی γ . دیگر پارامترهای بی‌بعد که مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت‌اند از نسبت لزجت بین دو فاز $\lambda = \mu_d / \mu_c$ و نسبت جریان‌های بین دو فاز $Q = Q_c / Q_d$ و در صورتی که عدد رینولدز بزرگ‌تر از یک باشد باید نسبت بین اعداد رینولدز دو فاز را نیز بررسی نمود. معمولاً عدد کاپیلاری از خواص فاز پیوسته محاسبه می‌شود ولی برای عدد رینولدز بزرگ‌تر از یک باید عدد رینولدز هر دو فاز را محاسبه نمود، زیرا تأثیر آن‌ها در مقایسه با یکدیگر

تعیین کننده رژیم‌های مختلف جریان و تغییر در اندازه قطرات شکل گرفته است [۶۷].

۳-۸-۳ عدد وبر (We)

بررسی عدد وبر اغلب برای تجزیه و تحلیل جریان‌های سیالی که در آن‌ها سطح مشترک بین دو فاز وجود دارد، مفید واقع می‌شود؛ مخصوصاً در مورد جریان‌های چندفازی با سطح مشترک بین فازها، یا انحنای زیاد این عدد بی‌بعد منعکس کننده تعادلی بین نیروهای اینرسی و نیروهای کشش سطحی است. این عدد هنگامی برای توصیف رفتار جریان مهم است که اندازه بسیار کمی در لزجی وجود داشته باشد، و بنابراین عدد کاپیلاری کوچک باشد. علاوه بر آن، این نیروی اینرسی است که باید بر نیروی کشش سطحی غلبه کند و نهایتاً منجر به جدایش شده و قطره را تولید کند. با افزایش این عدد بی‌بعد ناپایداری‌های شکل گرفته در این نوع جریان‌ها تا حدودی کاهش یافته و مکان جدایش تغییر می‌نماید (به پایین دست جریان هدایت می‌شود) [۶۸].

۳-۹ روش‌های مطرح در بررسی سیالات چندفازی

بررسی سیالات چندفازی در هر سه حوزه‌ی عددی، تجربی و تحلیلی دارای سابقه‌ای طولانی است. در این مقدمه‌ی کوتاه، تنها به بررسی روش‌های عددی مطرح پرداخته خواهد شد. تلاش‌های اولیه در این حوزه با توجه ویژه به شرایط ایدئال آغاز گردید. این شرایط که شامل عدد رینولدزهای نزدیک به صفر یا بسیار بزرگ است می‌تواند منجر به ساده شدن بعضی جمله‌های ریاضی به منظور حل تحلیلی معادلات شود. در شرایط چسبندگی بسیار بالا یا بسیار پایین (معادل عدد رینولدز صفر و بی‌نهایت می‌توان با حذف اثر اینرسی (جریان استوکس) با حذف کلی اثر چسبندگی (جریان غیر لزج) معادلات را ساده نمود. از پژوهش‌های مهم در این زمینه می‌توان به مقاله بردی و بیس [۶۹] و اسمر کا [۷۰] اشاره نمود.

روش‌های انتگرال مرزی، که معادلات را تنها بر روی مرزها حل می‌نمایند، به دلیل دقت بسیار بالا

می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای شبیه‌سازی مسائل در جریان غیر لزج باشند. بزرگ‌ترین ضعف این روش، عدم توانایی شبیه‌سازی جریان لزج است. برای مسائل دارای عدد رینولدز متوسط، نیاز به حل کامل معادلات ناویر استوکس^۱ بر روی شبکه حل است. در این زمینه، روش نشانه و سلول^۲، از اولین راه‌حل‌های ارائه شده برای حل این مسئله است. این روش که توسط هارلو و ولش [۷۱] معرفی گردید، به‌عنوان آغازی برای روش‌های با فرض تک سیال^۳ مطرح است. اولین روش شبیه‌سازی عددی مستقیم^۴ بر اساس فرض تک سیال، توسط نوح و وودوارد [۷۲] در سال ۱۹۷۶ ارائه گردید. این روش که توسط هیرت و نیکولز [۷۳] توسعه یافت، به روش "کسر حجمی سیال" موسوم است. اثر و ستیان [۷۴] و ساسمن و همکاران [۷۰] نیز بر اساس فرض تک سیال، با بهبود بعضی ویژگی‌های روش کر حجمی سیال، روش "سطح تراز"^۵ را پیشنهاد نمودند. همچنین اونوردی و تریگواسون [۷۵]، "روش پیشروی جبهه"^۶ را ارائه دادند. سه روش پیشروی جبهه، کسر حجمی سیال^۷، و سطح تراز که همگی از روش‌های حل مستقیم جریان چندفازی هستند، در ادامه به‌طور خلاصه بررسی می‌گردند. ازجمله روش‌های دیگری که به بررسی جریان سیالات چندفازی می‌پردازند، می‌توان به روش المان محدود اشاره نمود. روش‌های مبتنی بر المان محدود در سیالات چندفازی توسط هو و همکاران [۷۶] گسترش یافته و در شبیه‌سازی برخی حالات موفق بوده‌اند. همچنین در سال‌های گذشته روش لیس پولترمان که توسط چن و دولت [۷۷] و سوچی [۷۸] گسترش یافته است از محبوبیت زیادی در شبیه‌سازی جریان چندفازی برخوردار گشته است. ماهیت سینتیکی روش لاتیس بولترمان^۸، موجب

¹ Navier-stokes

² Marker and cell (MAC)

³ One fluid approach

⁴ Direct numerical simulation

⁵ Volume of fluid

⁶ Level set

⁷ Front tracking method

⁸ Lattice-boltzmann

ایجاد خاصیت‌های ویژه‌ای می‌گردد که استفاده از این روش را در مسائل سیالات چندفازی توجیه می‌نماید. ضعف این روش، در عدم توانایی شبیه‌سازی حالات با نسبت چگالی و چسبندگی بالا است.

۳-۹-۱ روش‌های شبیه‌سازی مستقیم جریان سیال چندفازی

در روش‌های شبیه‌سازی عددی مستقیم، بدون مدل‌سازی و با در نظر گرفتن تمام مقیاس‌های زمانی و مکانی، معادلات حاکم حل می‌گردند. وقتی معادلات سیالات چندفازی حل می‌گردند، باید در نظر داشت که اگر از یک مجموعه معادله برای کل میدان حل استفاده می‌شود، باید تفاوت در فازهای متفاوت به نحوی به میدان حل اعمال گردد. این به معنای لزوم افزایش جملاتی به معادلات ناویر استوکس، به‌منظور در نظر گرفتن سطح جدایی و جملات مربوط به کشش سطحی و همچنین نشان دادن اختلاف مقادیر چگالی و چسبندگی در فازهای مقاوم است. از آنجایی که این جملات اضافه در مرز بین دو فاز متفاوت اعمال می‌شوند، معمولاً به‌صورت تابع دلتا^۱ و سطح جدایی به‌وسیله یک تابع پله نمایش داده می‌شوند. برای به دست آوردن گرادیان تابع، تابع پله به‌صورت انتگرال یک تابع دلتای چندبعدی تعریف می‌گردد. برای میدان دوبعدی رابطه (۳-۱)، شکلی از یک تابع پله را نمایش می‌دهد.

$$H(x, y) = \int_A \delta(x - x') \delta(y - y') da' \quad (3-36)$$

که در آن انتگرال بر روی سطح A محاسبه می‌شود که توسط کانتور محدود شده است. da' المان سطح و ds' المان طول است. مقدار تابع H یک است، اگر نقطه در داخل کانتور S باشد و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد بود گرادیان تابع H را می‌توان از طریق رابطه (۳-۳۶) به دست آورد.

^۱ Delta function

$$\begin{aligned}\nabla H(x, y) &= \int_A \nabla [\delta(x - x') \delta(y - y')] da' = - \int_A \nabla' [\delta(x - x') \delta(y - y')] da' \\ &= - \int \delta(x - x') \delta(y - y') n' ds'\end{aligned}\quad (37-3)$$

که در رابطه (37-3)، n' بردار نرمال بر سطح است. بنابراین، با استفاده از تعریف تابع پله به صورت رابطه (36-3) می توان با فرض چگالی ثابت برای هر فاز، چگالی در کل میدان را به صورت رابطه (38-3) بیان نمود.

$$\rho(x, y) = \rho_1 H(x, y) + \rho_0 [1 - H(x, y)] \quad (38-3)$$

ρ ، چگالی در نقاط متفاوت را نمایش می دهد. که مشابه این رابطه، برای چسبندگی نیز برقرار است. همچنین گرادیان میدان چگالی نیز به صورت رابطه (39-3) محاسبه می گردد.

$$\nabla \rho = \rho_1 \nabla H - \rho_0 \nabla H = (\rho_1 - \rho_0) \nabla H = \nabla \rho \int \delta(x - x') \delta(y - y') n' ds' = \nabla \rho \delta(n) n \quad (39-3)$$

که n بردار نرمال سطح است. همچنین معادلات ناویر استوکس در روش های حل مستقیم جریان چندفازی دارای یک جمله اضافی مربوط به محاسبات نیروهای کشش سطحی می باشند. در این حالت معادله ناویر استوکس به شکل رابطه (40-3) نوشته خواهد شد. این شکل معادله ی ناویر استوکس، در روش پیشروی جبهه به کار می رود.

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla u + \nabla u^T) - \int \sigma \kappa n \delta(x - X(s, t)) ds \quad (40-3)$$

در این معادلات κ مقدار انحنا برای جریان دوبعدی و دو برابر انحنا ی میانگین برای جریان سه بعدی است. u ، μ ، p و σ به ترتیب، بردار سرعت، چسبندگی، فشار، و کشش سطحی را نشان می دهند. $\delta(x - X(s, t))$ ، یک تابع پله برای نمایش جهش مقادیر بر سطح جلایی است که در آن $X(s, t)$ بیانی از موقعیت سطح جدایی بر روی شبکه لاگرانژی¹ (در روش پیشروی جبهه سطح جدایی توسط یک شبکه لاگرانژی بیان می گردد)، بر حسب مکان s ، زمان t و موقعیت x ، بر روی شبکه ثابت با

¹ Lagrangian grid

اولری^۱ است. به وسیله‌ی جمله‌ی ناپیوسته‌ی اضافه شده می‌توان گفت که معادله‌ی فوق قابل بیان برای کل میدان سیال است که ممکن است طی آن مقادیر چسبندگی و چگالی در طول سطح جدایی، به‌طور ناگهانی تغییر کنند. درواقع، این همان استفاده از فرم تک سیال است. معادله‌ی پیوستگی در این حالت مشابه فرم معادله پیوستگی برای جریان‌ات تراکم ناپذیر است.

$$\nabla u = 0 \quad (3-41)$$

برای سیالات چندفازی که سطح جدایی آنان به‌درستی تعریف شده باشد تنها نیاز به یافتن درست وضعیت تابع پله با H است، تا حالت میدان سیال در هر لحظه به‌روز گردد. با یافتن درست وضعیت این تابع، می‌توان میدان‌های چگالی و چسبندگی را به درستی به‌روز نمود و درواقع وضعیت هر فاز را به دست آورد. هر یک از روش‌های حل مستقیم جریان سیالات چندفازی برای تشخیص دقیق موقعیت سطح جدایی^۲ با مرز مشترک فازهای متفاوت و فرارفت^۳ این مرز، یا به‌عبارت دیگر، تعیین موقعیت دقیق سطح جدایی در هر گام زمانی، پیشنهادی دارند. در ادامه، به بررسی سه روش از مهم‌ترین روش‌های مطرح در این حوزه پرداخت خواهد شد.

۳-۹-۲ روش کسر حجمی سیال^۴

در این روش یک تابع نشانه^۵ f ، برای تعیین مکان دقیق سطح جدایی به کار می‌رود. این تابع نشانه به همراه سیال حرکت می‌کند و در یک‌فاز مقدار یک و در دیگری مقدار صفر دارد. وقتی سرعت سیال مشخص باشد، می‌توان مقدار این تابع را از طریق رابطه (۳-۴۲) به‌روزرسانی نمود.

¹ Eulerian grid

² Terface

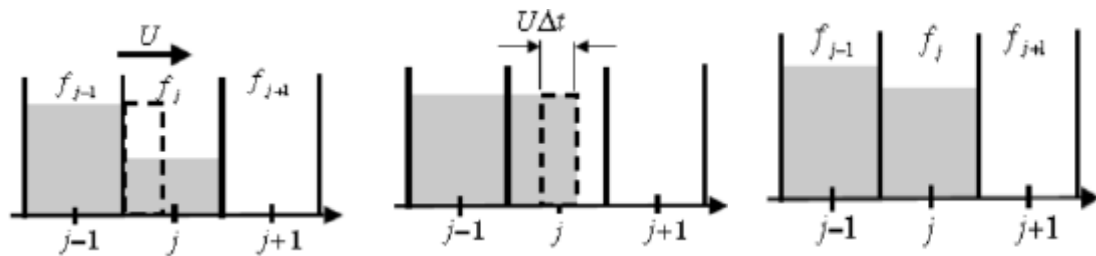
³ Advection

⁴ Volume of fluid method

⁵ Marker function

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \cdot \nabla f = 0 \quad (3-42)$$

u ، سرعت جریان است. نوع حل و انتگرال گیری از این معادله، برخلاف شکل ساده‌ی آن، از اهمیت بسزایی در این حوزه برخوردار است. سرعت در این روش، با حل معادلات ناویر استوکس بر روی یک شبکه ثابت و معمولاً از طریق یک روش تصویر کردن^۱، به دست می‌آید. پس از این مرحله، سرعت به دست آمده، با استفاده از معادله (3-42)، مقدار تابع نشانه را بر روی شبکه حرکت می‌دهد. سطح جدایی با مرز مشترک، باید از یک روش خام میان‌یابی گردد تا موقعیت جدید آن در هر مرحله به دست آید. شکل 3-3، نحوه‌ی فرارفت تابع نشانه در روش کسر حجمی سیال و نحوه‌ی بازسازی سطح جدایی را نمایش می‌دهد.



شکل 3-3: نحوه فرارفت روش کسر حجمی سیال [۷۹].

همان‌طور که در شکل 3-3 مشاهده می‌شود، مقدار تابع f در تمام نقاط شبکه غیر از نقاطی که به سطح جدایی نزدیک هستند، صفر یا یکی است. در سلولی که مقدار تابع f مقداری بین صفر و یک است، از طریق یک نوع میانگین‌گیری بین دو سلول کاری، مکانی برای سطح جدایی پیدا می‌شود و این مکان با سرعت u که از حل معادلات ناویر استوکس به دست آمده است، پیشروی کرده و در یک موقعیت جدید قرار می‌گیرد سپس، دو بار از طریق میانگین‌گیری کردن و مقایسه با دو سلول مجاور،

¹ Projection method

مقدار تابع f بازسازی می‌گردد. انتگرال زمانی رابطه‌ای شکل ریاضی این عملیات را در حالت کلی‌تر نمایش می‌دهد

$$\int_t^{t+\Delta t} F_{j+1/2} dt = \begin{cases} 0, \Delta t \leq (1-f_i)h/U \\ h-(f_i+U\Delta t), \Delta t > (1-f_i)h/U \end{cases} \quad (43-3)$$

روش کسر حجمی سیال در دو و سه بعد، تلاشی برای گسترش انتگرال و روش ارائه شده در بالا، از یک بعد، به دو و سه بعد است. به‌منظور تعمیم این روش به دو و سه بعد، روش‌های متعددی ارائه گردیده که از مهم‌ترین آنان می‌توان به روش‌های به دست آوردن سطح جدایی خط ساده^۱، محاسبه سطح جدایی تکه‌ای^۲، و روش هبرت و نیکولز [۷۳] اشاره نمود. شکل ۳-۴، به نمایش نحوه‌ی عملکرد این روش‌ها در بازسازی سطح جدایی یک میدان دوبعدی می‌پردازد. در این شکل قسمت a، سطح جدایی اصلی را نشان می‌دهد. قسمت b، روش محاسبه سطح جدایی خط ساده را نشان می‌دهد که طی آن، سطح جدایی همواره عمود بر جهت فرارفت است. قسمت c روش هبرت و نیکولز [۷۳] را نمایش می‌دهد که در آن سطح جدایی موازی با خطوط شبکه بازسازی می‌شود. قسمت d تبر روش محاسبه سطح جدایی تکه‌ای را نمایش می‌دهد که در آن مسطح جدایی با استفاده از خطوط مستقیم با جهت "بهینه" بازسازی می‌شود [۷۹]. روش کسر حجمی سیال، روشی با کاربری نسبتاً آسان است که بقای جرم در میدان سیالات چندفازی را به‌صورت خودکار رعایت می‌کند. اما به جهت نوع ارتقا با فرارفت تابع نشانه و بازسازی مجدد آن، پخش عددی^۳ را به مسئله تحمیل می‌کند. این پخش عددی، همان‌طور که در بخش مرور پژوهش‌های پیشین بررسی شد، محاسبه‌ی دقیق مکان سطح جدایی را مشکل می‌کند و منجر به تولید جریان‌های اغتشاشی^۴ بر سطح جدایی می‌گردد. این روش یکی شدن دو سطح جدایی با جدایش آنان را به‌طور خودکار و البته به طریقی غیر فیزیکی انجام می‌دهند که

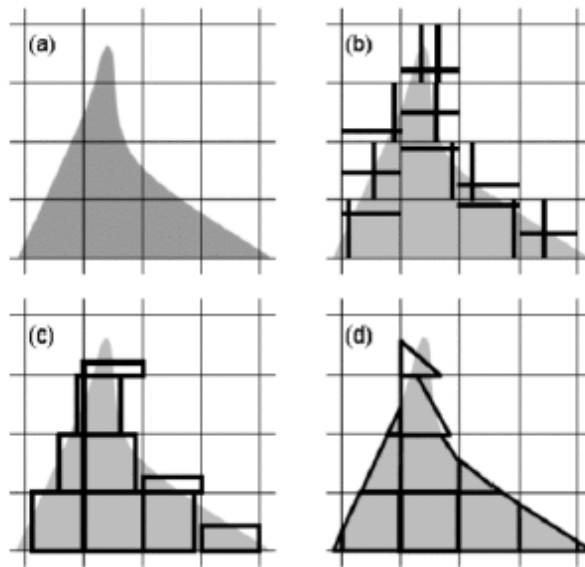
¹ Simple line interface calculation (SLIC)

² Piecewise linear interface calculation (PLIC)

³ Numerical diffusion

⁴ Parasitic flow

مشکلات و مزایای آن در ادامه بررسی خواهد شد.



شکل ۳-۴: روش‌های متفاوت بازسازی سطح جدایی در روش کسر حجمی سیال [۷۹].

۳-۹-۳ روش سطح تراز^۱

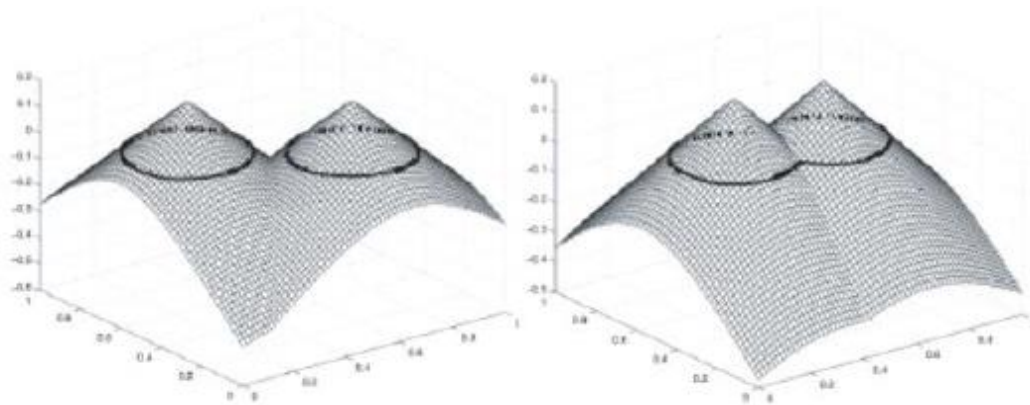
این روش را می‌توان یک جایگزین اصلی برای روش کسر حجمی سیال دانست. این روش نیز از یک تابع نشانه برای تعیین مکان دقیق سطح جدایی استفاده می‌نماید. برخلاف روش کسر حجمی سیال، در اینجا از یک تابع با تغییر پیوسته و یا هموار به عنوان تابع نشانه استفاده می‌گردد. این تابع در یک سیال مقدار مثبت و در دیگری مقدار منفی دارد. بدین طریق، مقدار صفر برای این تابع را می‌توان نشان-دهنده‌ی مکان سطح جدایی دانست. رابطه (۳-۴۴)، یک نمونه از توابع نشانه مورد استفاده در روش سطح تراز را نشان می‌دهد. که در آن d ، فاصله عمودی تا سطح جدایی است.

$$\varphi(H, t) \begin{cases} +d, \text{Phase 1} \\ -d, \text{Phase 2} \end{cases} \quad (3-44)$$

همچنین شکل ۳-۵، نمایی از تابع نشانه مورد استفاده در این روش را نمایش می‌دهد. در این تصویر نمای سمت چپ، تابع نشانه برای دو قطره‌ی جدا از هم و شکل سمت راست، تابع نشانه برای دو قطره

¹ Level set method

در حال یکی شدن است. مشاهده می‌شود که تابع نشانه استفاده شده در این حالت پیوسته است. مزیت انتخاب این تابع پیوسته، امکان استفاده از روش‌های عددی مرتبه‌ی بالاتر است که می‌تواند منجر به افزایش دقت و کاهش پخش عددی در فرارفت و به‌روزرسانی تابع نشانه گردد.



شکل ۳-۵: تابع نشانه در روش سطح تراز [۷۹].

تابع نشانه در این روش نیز مشابه تابع نشانه روش کسر حجمی سیال به‌وسیله معادله (۳-۴۵) فرارفت می‌شود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = 0 \quad (۳-۴۵)$$

به‌لحاظ نظری، معادله فوق را می‌توان با تمام روش‌های مرتبه بالا برای حل معادلات هایدربولیک حل نمود، ولی عموماً از روش مرتبه دوم رانگ کوتا-انو^۱ که توسط شو و اش^[۷۹] برای این روش توسعه داده شده است، استفاده می‌شود. روش سطح تراز، برخلاف روش کسر حجمی، توانایی رعایت خودبه‌خودی بقای جرم را ندارد بنابراین، باید عملیات ویژه‌ای بدین منظور انجام شود. علاوه بر این، مشکل پخش عددی در این روش نیز وجود دارد. مزیت این روش در توانایی بالای آن در شبیه‌سازی جریانات چندفازی با نسبت‌های چسبندگی و چگالی بالاست. همچنین در این روش نیز، پدیده‌ی یکی

^۱ Runge-kutta/Eno

شدن و جدایش قطرات به‌طور خودکار، اما غیر فیزیکی انجام می‌شود و نیازی به انجام فرآیند خاصی در این زمینه نیست.

۳-۹-۴ روش پیشروی جبهه^۱

در مقابل روش‌های استفاده کننده از تابع نشانه، روش‌های دیگری نیز برای تعیین دقیق مکان سطح جدایی وجود دارند که به‌جای استفاده از تابع، از توزیع نقاط (یا المان‌ها) بر روی سطح جدایی استفاده می‌نمایند. این روش‌ها را در گروه روش‌های پیگیری سطح جدایی یا پیشروی جبهه می‌توان تقسیم‌بندی نمود. در این بخش به بررسی جزئیات این روش، با توجه به جزئیات موردنیاز در این تحقیق پرداخته خواهد شد.

در روش پیشروی جبهه، یک ساختار یا شبکه‌ی محاسباتی جدید به مسئله اضافه می‌گردد. این شبکه‌ی جدید که عموماً از آن با عنوان شبکه‌ی لاگرانژی یاد می‌شود، مجموعه‌ای از نقاط است که سطح جدایی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، یک ساختار از داده‌ها^۲ موردنیاز است تا علاوه بر ذخیره کردن مکان نقاط ارتباط منطقی بین آن نقاط را در قالب المان‌ها در خود ذخیره کند. به این مجموعه از اطلاعات در اصطلاح این روش‌ها، سطح جدایی یا جبهه^۳ گفته می‌شود. علاوه بر پیچیدگی قابل توجه و همچنین تفاوت در اعمال این ساختار در مسائل دو یا سه‌بعدی، عموماً چنین ساختاری موجب افزایش بار محاسباتی مسائل است. در مسائلی که دقت، از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است، استفاده از این روش مناسب خواهد بود. درواقع این روش به دلیل دوری از میان‌یابی‌ها و نحوه‌ی فرارفت در دو روش کسر حجمی سیال و سطح تراز، و اینکه سطح جدایی را به‌طور مستقیم فرارفت می‌کند، فاقد پخش عددی قابل‌توجه است. همچنین باید توجه کرد که مجموعه‌ی محاسباتی نشان دهنده‌ی سطح

^۱ Front tracking method

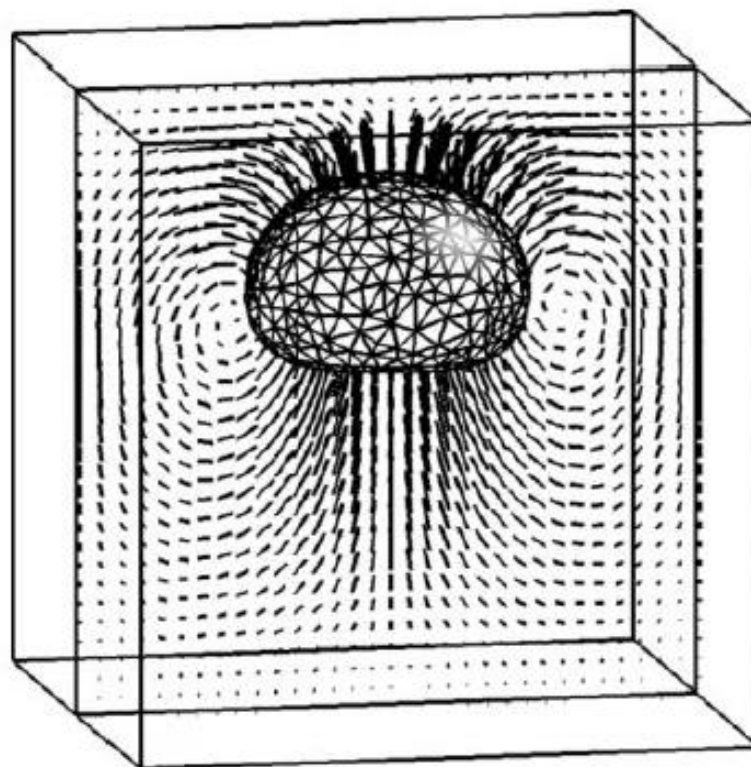
^۲ Data structure

^۳ Front

جدایی، شامل نقاط و المان‌هایی است که باید در طی فرآیند تغییر شکل، کشش و فشرده شدن، شکل خود را اصلاح کنند. به بیان دیگر معمولاً نیاز می‌شود که با افزایش بیش از حد سطح یک المان، آن المان اصلاح شده و به دو یا چند المان ریزتر تقسیم شود و یا در هنگامی که سطح آن بسیار کوچک شده است، با حذف خطوط، المان جدیدی که بزرگ‌تر از قبل است ایجاد گردد.

در روش پیشروی جبهه، باید یک فرآیند درست برای تعامل بین دو شبکه لاگرانژی و اوپلری نیز پیش‌بینی شود. وقتی سطح جدایی با سرعت به دست آمده از شبکه ثابت (این مرحله کاملاً مشابه روش حل دو روش کسر حجمی سیال یا سطح تراز است) فرارفت می‌نماید، شکل و موقعیت سطح جدایی نیز عوض می‌شود. در اینجا باید چگالی و چسبندگی، با توجه به موقعیت جدید سطح جدایی بر روی شبکه ثابت بازسازی شوند. همچنین جملات مربوط به کشش سطحی که در معادلات ناویر استوکس استفاده می‌گردند باید با توجه به شرایط جدید سطح جدایی محاسبه و به شبکه ثابت منتقل گردند. برای جابه‌جایی اطلاعات بین شبکه ثابت و متحرک عموماً از یک تقریب برای سطح جدایی استفاده می‌شود که دارای توزیع هموار است.

باید به این نکته‌ی مهم اشاره نمود که روش پیشروی جبهه، برخلاف روش‌های کسر حجمی سیال و سطح تراز، نیاز به انجام یک مجموعه از عملیات هندسی، برای تغییر هندسه‌ی سطح جدایی در هنگام نزدیک شدن دو قطره به یکدیگر، یا جدا شدن دو قطره از یکدیگر دارد. از این نکته عموماً به عنوان یکی از نقاط ضعف مهم در روش پیشروی جبهه یاد می‌شود. چراکه به خصوص برای سطوح جدایی سه‌بعدی چنین عملیاتی بسیار پرحجم خواهد بود. در روش پیشروی جبهه سه‌بعدی، ساختار سطح جدایی به‌طور معمول با یک شبکه غیرمنظم مثلثی بیان می‌گردد. شکل ۳-۶ نمونه‌ای از یک شبکه را نشان می‌دهد.

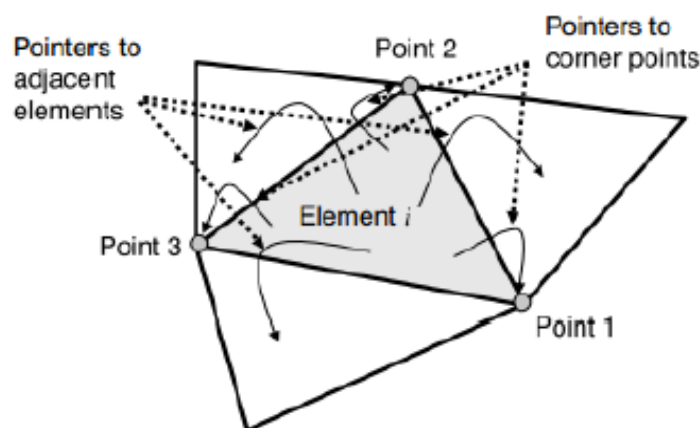


شکل ۳-۶: نمایی از یک سطح جدایی سه بعدی [۸۱].

به منظور سادگی بیشتر در توضیح ساختار چنین شبکه‌هایی، ابتدا به توضیح المان‌های مثلثی غیرمنظم در حالت دوبعدی پرداخته خواهد شد. سطح جدایی شامل نقاطی است که در قالب المان‌ها به هم متصل شده‌اند. برای هر نقطه در کد محاسباتی، تنها مختصات آن نقطه ذخیره می‌شود. المان‌ها (ساختارهای شامل نقاط) بیشتر اطلاعات مربوط به سطح جدایی را در خود ذخیره می‌کنند. هر المان اطلاعاتی مربوط به همسایه‌ی خود، همچنین اطلاعات فیزیکی سطح جدایی که شامل کشش سطحی و تغییر در مقدار تابع نشانه در طول سطح جدایی است را، در خود ذخیره می‌کند. همچنین هر المان، دارای یک جهت است که بیرون و داخل را نشان می‌دهد. برای یک سطح جدایی مشخص، همه‌ی المان‌ها باید یک جهت مشخص داشته باشند.

به منظور ساده‌تر شدن فرآیند حذف و یا اضافه کردن اجزاء در سطح جدایی، بهتر است از یک

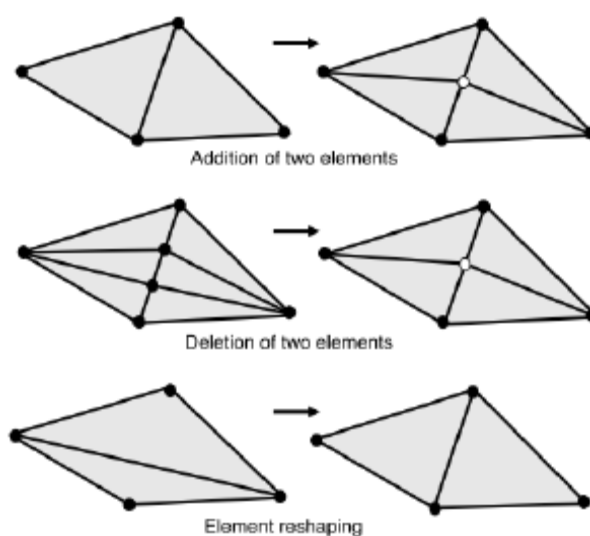
فهرست اتصال یافته استفاده شود. در یک فهرست اتصال یافته، هر شیء علاوه بر اینکه خصوصیت ذاتی خود را شامل مختصات نقاط و اطلاعات مربوط به هر المان در خود ذخیره می‌کند، یک اشاره‌گر، به شیء بعدی در فهرست نیز در خود دارد. زبانه‌ای C و C++ با داشتن خاصیت ساختارها چنین قابلیتی را دارند. در زبان فرترن باید برای هر متغیر استفاده شده برای هر شیء، یک آرایه‌ی جدا شامل یک اشاره‌گر تعریف نمود. ترتیب حرکت بین اشیا نیز کاملاً دلخواه است. درواقع، به‌دلخواه از یک شی حرکت می‌کنیم و با استفاده از قابلیت اشاره‌گرها در تمام اشیا حرکت کرده و جستجو می‌کنیم. شکل ۳-۷، متغیرهای اصلی یک المان مثلثی شکل را نمایش می‌دهد.



شکل ۳-۷: یک المان و اطلاعات ذخیره شده روی آن [۸۱].

یکی از مراحل مهم در روش پیشروی جبهه، بازسازی سطح جدایی است. نقاط سطح جدایی در طی فرآیند حل ممکن است به یکدیگر بسیار نزدیک، یا از یکدیگر بسیار دور شوند. این امر ممکن است المان‌ها را دچار مشکل نماید. برای المان‌های سه‌بعدی، فرآیند تشخیص المان‌هایی که نیاز به اصلاح ساختار دارند و همچنین روش‌های این اصلاح متنوع است. یکی از این راه‌ها تقسیم یک خط برای ریز کردن المان‌ها، با ایجاد گره جدید، یا از بین بردن یک خط، شامل حذف دو گره، برای درشت کردن

آنها است. همچنین یک راه دیگر بدین منظور، تغییر مکان خطوط المان برای بهتر شدن شکل المان است. شکل ۳-۸، این فرآیند بازسازی را نشان می‌دهد. تغییر در ساختار المان منجر به تغییر شکل المان‌های همسایه نیز می‌شود که معمولاً برای ساده‌تر کردن این فرآیند ابتدا با دور زدن بر روی تمام المان‌ها، نامزدهای این تغییر ساختار را با در نظر گرفتن مساحت هر المان (که نباید بیش از حد بزرگ یا کوچک باشد) پیدا کرده و سپس تغییر موردنظر را بر تمام المان‌های بدشکل اعمال می‌نماییم. همان‌طور که پیش از این نیز بیان گردید، پس از تغییر شکل سطح جدایی، باید اطلاعات از شبکه متحرک به شبکه ثابت و یا عکس آن، منتقل گردد. برای این مسئله روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. روشی که در اینجا ارائه می‌شود سطح جدایی را به‌عنوان یک ناحیه انتقالی هموار بین دو فاز متفاوت در نظر می‌گیرد.



شکل ۳-۸: اصلاح ساختار المان [۸۱].

مرحله‌ی ابتدایی برای انجام فرآیند انتقال اطلاعات بین دو شبکه، تشخیص این نکته است که هر نقطه از سطح جدایی یا شبکه متحرک، به کدام نقاط شبکه ثابت نزدیک است. به‌طور مثال برای یک شبکه سازمان یافته و منظم، شماره گرهای از شبکه ثابت که به نقطه دلخواهی از شبکه متحرک با

مکان x_f نزدیک است، درحالی که تعداد گره‌های شبکه ثابت در آن جهت N_x ، و طول آن جهت L_x است را، می‌توان از طریق رابطه (۳-۴۶) به دست آورد.

$$i = \text{floor}(x_f \times N_x / L_x) \quad (۳-۴۶)$$

عملگر floor ، بیانگر نزدیک‌ترین عدد صحیح به مقدار داخل کمانک است. پیدا کردن نقاطی از شبکه ثابت که به شبکه متحرک نزدیک هستند، با اصلاحاتی بر روش ساده بالا ممکن است. به‌طورمعمول یافتن نقاطی از سطح جدایی که به شبکه ثابت نزدیک هستند، از فرآیند فوق پیچیده‌تر است.

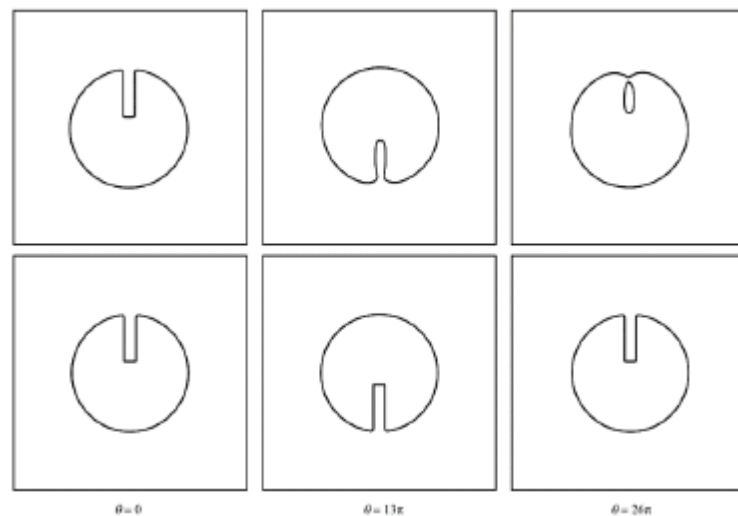
درنهایت، می‌توان مراحل ساده زیر را برای روش پیشروی جبهه پیشنهاد نمود:

- ۱- جابجایی سطح جدایی در گام زمانی جدید
 - ۲- توزیع چگالی و چسبندگی، بر اساس موقعیت جدید سطح جدایی
 - ۳- اصلاح ساختار سطح جدایی (حذف یا اضافه کردن المان‌های جدید)
 - ۴- به‌دست آوردن نیروهای مرتبط با کشش سطحی بر روی سطح جدایی و توزیع آن بر شبکه ثابت
 - ۵- پیدا کردن میدان سرعت با چشم‌پوشی از فشار
 - ۶- پیدا کردن میدان فشار با استفاده از سرعت تقریبی مرحله قبل
 - ۷- اصلاح میدان سرعت از طریق فشار محاسبه شده در مرحله ۶ و بازگشت به مرحله ۱
- مقالات متعددی به مقایسه روش‌های مطرح حل مستقیم سیالات چندفازی پرداخته‌اند. دو و همکاران [۸۲] یک حل پیشروی جبهه را که از روش رانگ-کوتای مرتبه چهارم استفاده می‌نماید: با حل سطح تراز که از یک روش ونو^۱ با دقت مرتبه پنج استفاده می‌نماید، مقایسه کردند. همان‌طور که در شکل ۳-۹ نمایش داده شده است.

روش پیشروی جبهه، سطح جدایی را که به‌صورت یک دیسک در حال چرخش دارای حفره است،

¹ Weno

بسیار تیزتر (پخش عددی کم‌تر) از روش سطح تراز شبیه‌سازی نموده است.



شکل ۳-۹: مقایسه روش سطح تراز بالا و پیشروی جبهه پایین [۸۲].

به‌طور کلی، روش پیشروی جبهه، دارای یک مزیت بزرگ است که به دقت بالای آن و عدم تحمیل پخش عددی به مسئله مربوط می‌شود. در مقابل منتقدان این روش عموماً از دو مشکل اساسی سخن می‌گویند.

مشکل اول، پیچیده بودن فرآیند حل مسئله در هنگامی که سطح جدایی به‌صورت سه‌بعدی در نظر گرفته می‌شود، است. این پیچیدگی بار محاسباتی این روش را به‌شدت افزایش می‌دهد و به همین دلیل محاسبات در محدوده‌ی اعداد رینولدز خاص و همچنین نسبت چسبندگی‌ها و چگالی‌های نه‌چندان زیاد قابل انجام هستند.

مشکل دوم این روش، نحوه‌ی مواجهه آن با مسائلی است که در آن دو قطره به هم نزدیک شده و با یکدیگر یکی می‌شوند و یا یک قطره تحت یک عامل خارجی به حالت نخ درآمده و در معرض جدایش قرار می‌گیرد. روش‌های کسر حجمی سیال و سطح تراز، فرآیند یکی شدن و جدایش قطرات را به‌صورت خودکار و اگرچه "غیرفیزیکی" شبیه‌سازی می‌نمایند. درواقع، رفتار طبیعی این دو روش یکی کردن دو قطره‌ی نزدیک به هم است، زیرا مرز فاز از روی مقادیر شبکه بازسازی می‌گردد. برخلاف این

رفتار روش‌های فوق، رفتار طبیعی روش پیشروی جبهه جدا بودن دو قطره است. زیرا هر قطره یک شبکه لاگرانژی جداست. بنابراین، برای نقض این رفتار طبیعی و به هم پیوستن دو قطره یا جدایش یک قطره و تبدیل شدن به قطرات کوچک‌تر باید یک فرآیند "خاص" رخ بدهد. به این فرآیند خاص در اصطلاح تغییر هندسه‌ی سطح جدایی گفته می‌شود که موضوع اصلی این پژوهش است. در ادامه، به توضیح بیشتر پدیده یکی شدن و جدایش قطرات پرداخته می‌شود.

فصل ۲: تعریف مسئله و نتایج

۴-۱ مقدمه

با توجه به این که در بررسی حاضر هدف اصلی بررسی جدایش قطرات در جریان های سه فازی به صورت عددی و با استفاده از نرم افزار کامسول می باشد، تلاش شد تا هندسه ای مورد استفاده قرار بگیرد که هم در صنایع مختلف به ویژه داروسازی به صورت گسترده تر مورد استفاده قرار می گیرد، هم به لحاظ فیزیکی جدایش قطرات در آن به سادگی انجام می پذیرد و شرایط لازم برای دستیابی به جریان سه فازی برای جدایش قطرات را فراهم می آورد، از این رو هندسه تی شکل برای جدایش قطرات در جریان دوفازی و هندسه تودرتوی تی شکل برای جدایش قطرات در جریان سه فازی مورد استفاده قرار گرفته است تا هم هزینه انجام محاسبات کاهش یابد و هم به لحاظ کاربردی دارای پتانسیل بالاتری باشد.

۴-۲ صحت سنجی و بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی این کار، با توجه به عدم وجود نتایج تجربی برای جریان سه فازی مشابه در میکروکانال ها، مجبور به مقایسه نتایج عددی با نتایج پژوهش های تجربی دوفازی در داخل میکروکانال ها شده ایم. بدین منظور ابتدا سعی شده تا کار انجام شده توسط لی و همکاران [۸۳]، مورد شبیه سازی قرار گیرد. تمامی خواص و مشخصات هندسی به صورت مشابه در نظر گرفته شده اند. برای این منظور، چگالی فازهای جداشونده و پیوسته به ترتیب برابر و لزجت آن ها به صورت در نظر گرفته شده است. برای همه شبیه سازی ها، سرعت فاز جداشونده و کشش سطحی بین دو فاز، به ترتیب برابر $p_d = 1.162 \text{ g/cm}^3$ و $p_c = 0.984 \text{ g/cm}^3$ و لزجت آن ها به صورت $\mu_d = 68.6 \text{ mPa.s}$ و $\mu_c = 10.58 \text{ mPa.s}$ در نظر گرفته شده است، به منظور انجام شبیه سازی ها، سرعت فاز جدا شونده و کشش سطحی بین دو فاز به ترتیب برابر $u_d = 0.28 \text{ mm/s}$ و $\gamma = 12.5 \text{ mN/m}$ در نظر گرفته شده است، در حالی که سرعت فاز پیوسته بین 0.7 الی 3.5 متغیر لحاظ شده است.

جدول ۴-۱: نتایج مربوط به استقلال از شبکه‌بندی برای حالت $Ca=0.0165$

اندازه شبکه	اندازه بی‌بعد (L/W)
۲۰۰۰۰	۲۲/۰۵
۴۰۰۰۰	۱۶/۶۵
۸۰۰۰۰	۱۲/۳
۱۶۰۰۰۰	۱۲/۱
۲۵۰۰۰۰	۱۲/۰۵

به‌منظور حصول اطمینان از عدم وابستگی نتایج پژوهش حاضر به نحوه شبکه‌بندی انجام شده لازم است با تعداد شبکه بندی‌های مختلف نتایج حاصل از حل مسئله را مورد بررسی قرار داد بدین منظور در جدول ۴-۱ نتایج مربوط به استقلال از شبکه ارائه شده است.

نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر به روش عددی با نتایج آزمایشگاهی لی و همکاران [۸۳]، در شکل ۴-۱ نمایش داده شده‌اند. نتایج مربوط به تغییرات عدد مربوط به اندازه بی‌بعد قطره نسبت به تغییر عدد Ca نشان دهنده اختلاف اندک بین نتایج تجربی و عددی می‌باشد.



شکل ۴-۱: مقایسه اندازه بی بعد قطره به عنوان تابعی از عدد کاپیلاری با نتایج آزمایشگاهی [۸۳].

در جدول ۴-۲ قطر بی بعد قطرات حاصل از شبیه سازی برحسب نسبت دبی های مختلف و به ازای $\eta_d/\eta_c = 50$ ارائه شده است. نتایج حاصل از حل عددی پژوهش حاضر با نتایج مطالعه تجربی لی و همکاران [۸۳] و مطالعه عددی صدیق حسینی و همکاران [۳۴] نیز مقایسه 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 و عددی گزارش شده توسط سایر محققین دارد.

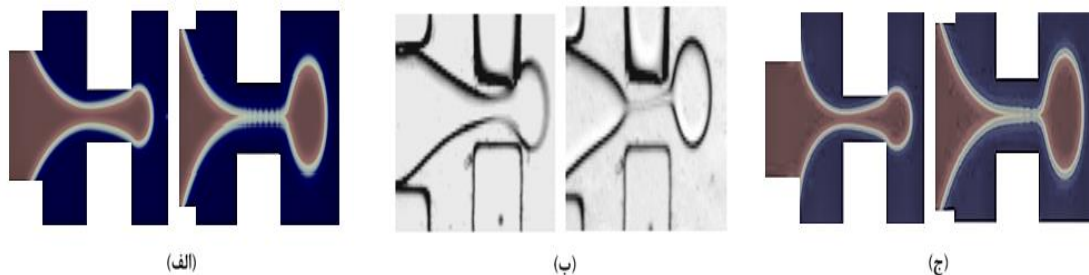
جدول ۲-۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر در نسبت دبی‌های مختلف و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی و عددی گزارش شده در مراجع [۸۳ و ۳۴] به ازای $\eta_d/\eta_c = 50$

نسبت دبی	D* (مطالعه عددی) [۳۴]	D* (نتایج تجربی) [۸۳]	D* (مطالعه حاضر)	خطای نسبی نسبت به نتایج تجربی	خطای نسبی نسبت به نتایج عددی
۱۰	۱,۹۳۷	۱,۸۸۵	۲,۱۱۰	%۱۱,۹	%۸,۹
۵۰	۱,۶۰۳	۱,۶۳۳	۱,۷۵۱	%۷,۲۲	%۹,۲۳
۱۰۰	۱,۵۴۶	۱,۵۸۱	۱,۶۱۳	%۲,۰۲	%۴,۳۳

۳-۴ شکل‌گیری جریان سه‌فازی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد فازهای درونی و میانی یکدیگر را در اتصال اول ملاقات می‌کنند. قطره درونی توسط تعادل سه پارامتر مهم ناپایداری، درگ لزجی^۱ و افزایش فشار در بالادست کانال اصلی، تولید می‌شود. فشار افزایش یافته سبب می‌شود که فاز پیوسته باعث فشرده شدن فاز جداشونده شود و منجر به نازک شدن فاز جداشونده و درنهایت جدایش آن گردد. این روند در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. پس‌از آن، قطرات با اختلاف یکسان نسبت به یکدیگر، به سمت پایین دست جریان حمل می‌شوند و در قطره درحالی که شکل‌گیری بیرونی کپسوله می‌شوند. اگر قطره درونی وجود نداشت، سطح مشترک فاز بیرونی و میانی بلافاصله جدا می‌شد، و قطره بیرونی تولید می‌شد؛ با این وجود، قطره درونی از انجام بلافاصله این فرآیند شکل‌گیری قطره بیرونی جلوگیری می‌کند. علاوه بر آن، شکل و حالت قطره درونی بارها تغییر کرده، با توجه به تغییرات ناگهانی سرعت جریان و فشرده شدن توسط قطره بیرونی این روند نیز به‌خوبی در شکل ۳-۴ نمایش داده است.

^۱ Viscous drag



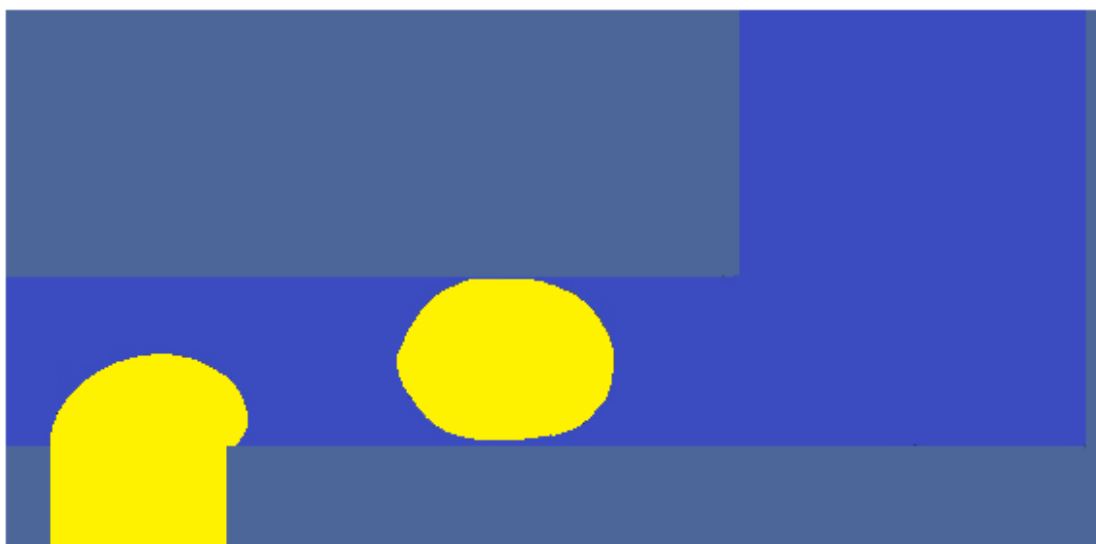
شکل ۴-۲: مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی و عددی دیگر به ازای دو نسبت لزجت مختلف در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 20$ و $Cac=0.0083$ داخلی، (الف) نتایج پژوهش حاضر (ب) نتایج آزمایشگاهی [۸۲] (ج) نتایج عددی لی و همکاران [۸۳].

عدد موینگی نسبت نیروهای لزج به کشش سطحی است. در موینگی‌های پایین کشش سطحی عاملی مهم بوده و باعث تولید پایدار قطرات می‌شود. در مقابل نیروی لزج نقش مهمی داشته و منجر به تغییر شکل بزرگ قطرات و شکل نامتقارن آن می‌شود.

در شکل ۴-۲ نتایج تجربی حاصل از پژوهش دوی و همکاران و همچنین نتایج عددی حاصل از پژوهش لی و همکاران 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.



الف) مرحله اول



ب) مرحله دوم

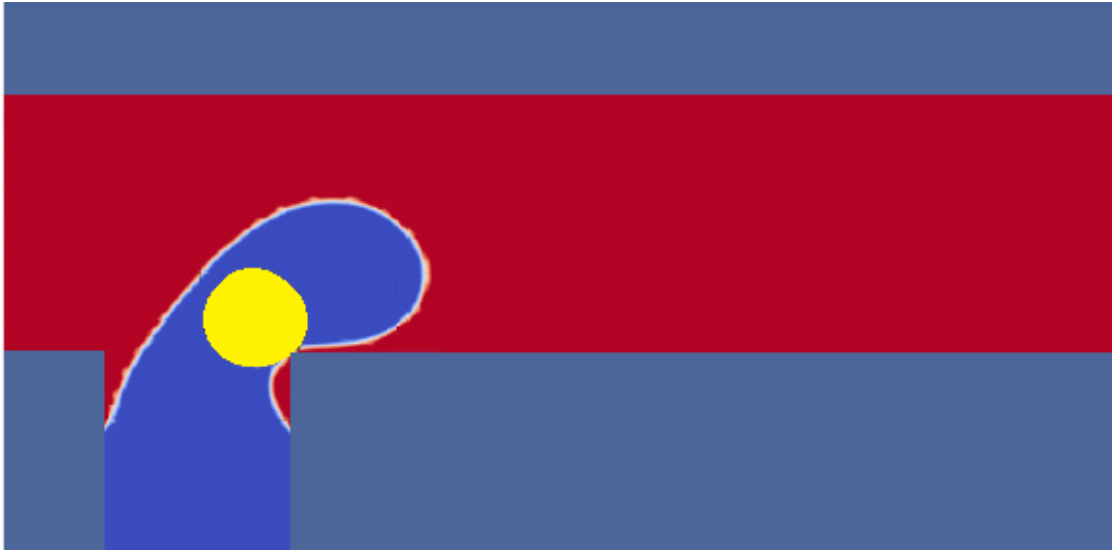


ج) مرحله سوم

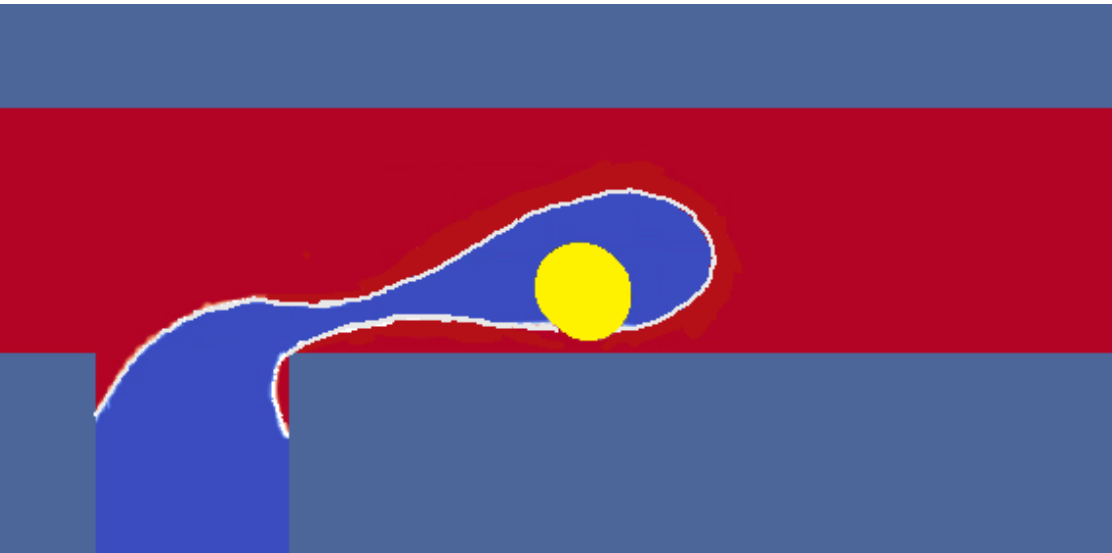


د) مرحله چهارم

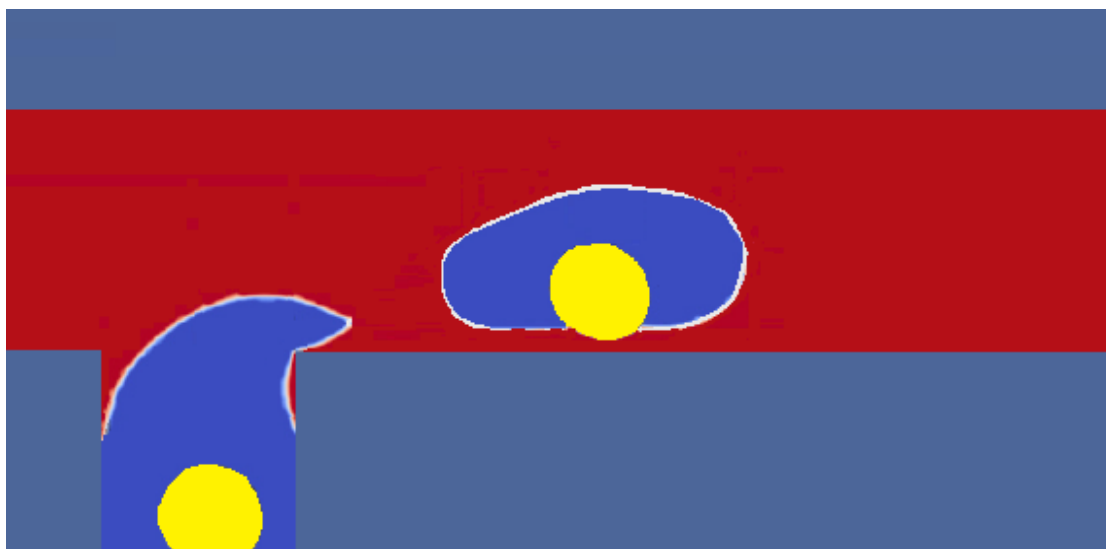
شکل ۳-۴: تولید قطره داخلی در مقطع تی شکل اول به دلیل جدایش فاز درونی در عدد کاپیلاری ۰/۰۰۸۳



الف) مرحله اول



ب) مرحله دوم



(ج) مرحله سوم



(د) مرحله چهارم

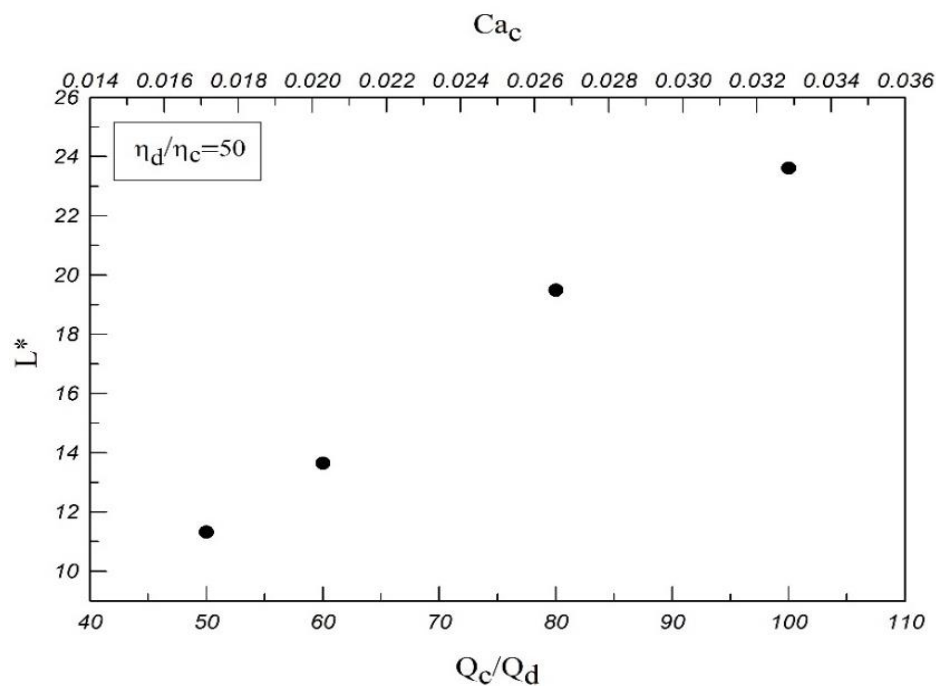
شکل ۴-۴: مراحل شکل‌گیری قطره داخلی در داخل پوششی از جریان فاز دوم در جریان خارجی در عدد کاپیلاری داخلی و خارجی به ترتیب 0.0083 و 0.01

اندازه قطره درونی و بیرونی و ساختار قطره می‌تواند توسط نرخ جریان‌های ورودی و یا اعمال تغییرات در خواص فیزیکی سیالات مورد استفاده کنترل شود که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۳-۴ و ۴-۴ سرعت ورودی فازهای درونی، میانی و بیرونی به ترتیب برابرند

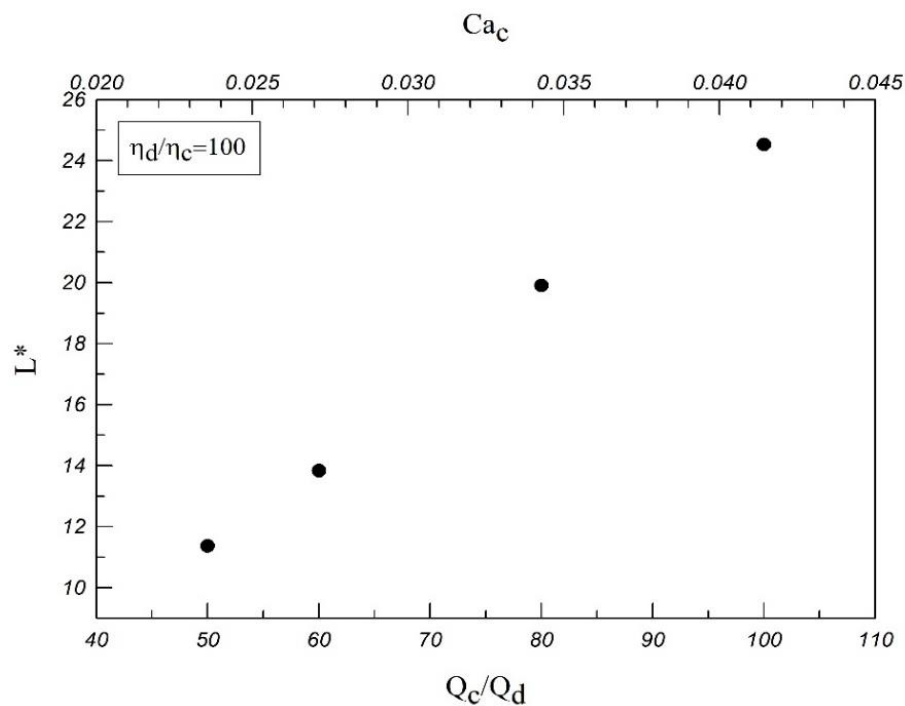
با 10 mm/s ، 25 mm/s و 60 mm/s همچنین لزجت و چگالی فاز میانی به ترتیب برابرند با 2 mPa.s و 1000 Kg/m^3 چگالی فازهای درونی و بیرونی برابر است با 1100 Kg/m^3 ؛ همچنین لزجت آن‌ها برابر است با 1 mPa.s کشش سطحی بین فازهای درونی میانی و میانی بیرونی برابر است با 6 mN/m . توجه شود که عدد کاپیلاری به صورت حاصل ضرب سرعت و ویسکوزیته سیال حمل کننده بر اختلاف بین کشش سطحی سیال حمل کننده و قطره حمل شده زیر تعریف می شود. به بیان دیگر می توان این گونه تحلیل نمود که عدد کاپیلاری نشان دهنده نسبت نیروهای لزجی به نیروی کشش سطحی است. هر اندازه عدد کاپیلاری مقادیر کوچک تر داشته باشد به لحاظ فیزیک اثرات نیروهای کشش سطحی بر نیروهای لزجی غالب تر خواهند بود و جداسازی و ایجاد قطرات راحت تر صورت می پذیرد. این در حالی است که افزایش عدد کاپیلاری سبب افزایش اثر نیروهای کشش سطحی می شود و جدایش قطرات را با مشکل مواجه می نماید. از اثرات افزایشی و کاهش عدد کاپیلاری می توان در ایجاد قطرات دارای روکش استفاده برد بدین ترتیب که با افزایش و کاهش اعداد کاپیلاری مربوط به جریان خارجی و داخلی می توان شرایط را به گونه ای تنظیم نمود که قطرات دارای روکش ایجاد شوند.

۴-۴ فاصله بین قطرات

فاصله ی بی بعد قطرات حاصل از شبیه سازی تحقیق حاضر برحسب نسبت دبی های مختلف و موینگی های معادل آن ها در هر دو نسبت لزجت 50 و 100 گزارش شده اند. نتایج نشان می دهند که با تغییر نسبت دبی بین فازها شاهد تغییرات زیادی در فاصله بین قطرات خواهیم بود و بیان گر این است که تغییر دبی فازها در کنترل فاصله بین قطرات بسیار تأثیرگذار است. افزایش نسبت دبی و عدد موینگی درواقع باعث افزایش سرعت فاز پیوسته و نیروی لزج ناشی از آن می شود. با توجه به شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ تغییرات فاصله بین قطرات نسبت به تغییر نسبت دبی، رفتاری نزدیک به حالت خطی را نشان می دهد.



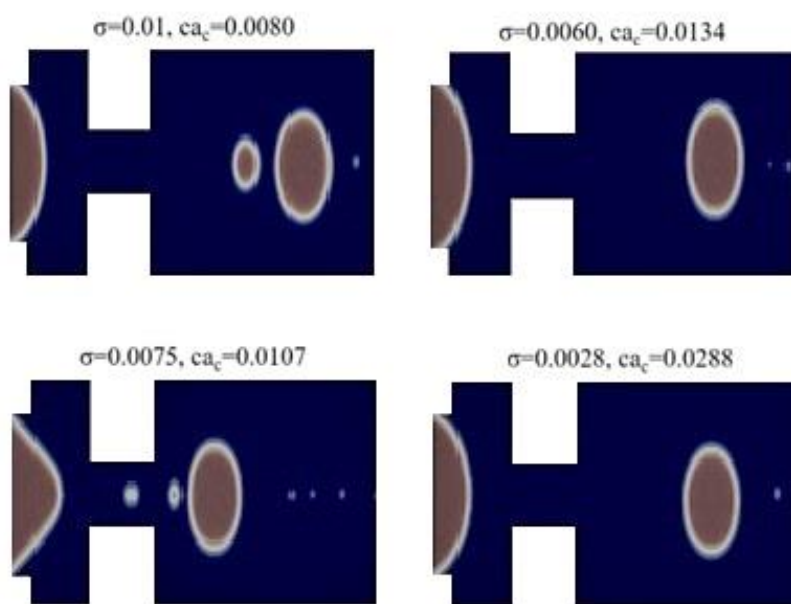
شکل ۴-۵: فاصله بین قطرات بر حسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$



شکل ۴-۶: فاصله بین قطرات بر حسب نسبت دبی و موینگی‌های مختلف و به ازای نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 100$

۴-۵ تأثیر کشش سطحی

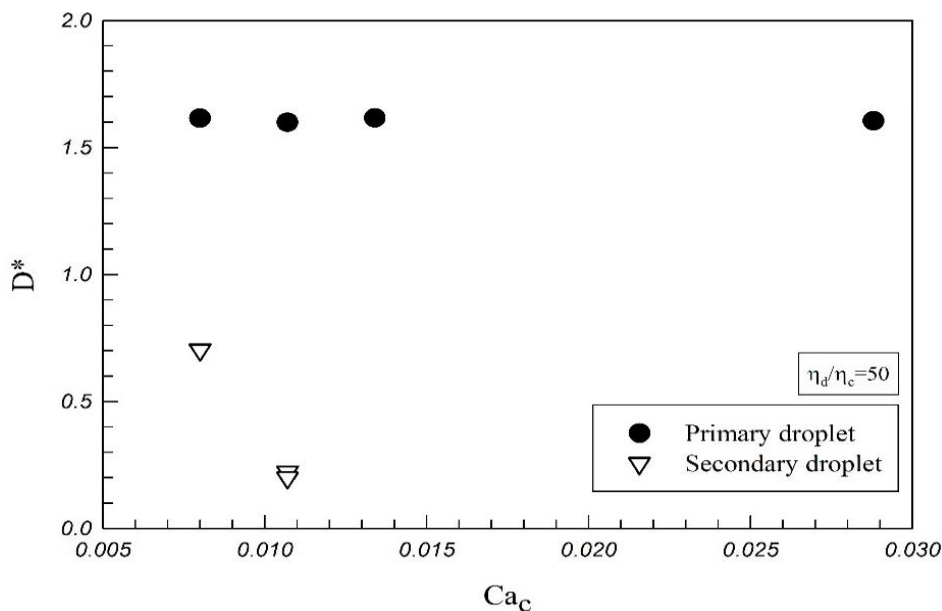
در قسمت‌های قبل گفته شد نیروهای تأثیرگذار بر فرآیند جدایش قطره شامل نیروهای کشش سطحی، فشار و تنش‌های لزج اعمال‌شده توسط فاز پیوسته است. کشش سطحی نیرویی سطحی بوده و در امتداد فصل مشترک بر آن وارد می‌شود. همچنین این نیرو پس از جدایش قطره باعث حفظ شکل کروی آن می‌شود. می‌توان گفت در مقادیر کشش سطحی بالا و یا در اعداد مویینگی پایین در اتصال t شکل اول در حالت تکپخشی انجام می‌گیرد. با کاهش کشش سطحی و به‌طور متناظر با افزایش عدد مویینگی اندازه قطرات ثانویه کوچک‌تر می‌شود. با توجه به شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود در مقادیر بسیار پایین کشش سطحی و در اعداد مویینگی بالا فرآیند جدایش قطره در حالت تکپخشی انجام می‌گیرد.



شکل ۴-۷: تأثیر کشش سطحی بر فرآیند تشکیل قطره در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ در اتصال T شکل اول

در شکل ۴-۸ به‌صورت کمی تأثیر کشش سطحی بر اندازه قطرات در نسبت دبی $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ ارائه‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نسبت دبی و نسبت

لزجت گفته شده، با تغییر میزان کشش سطحی در اندازه قطرات اصلی تغییر چندانی مشاهده نمی شود.



شکل ۴-۸: اندازه قطره در کشش سطحی های مختلف و اعداد موینگی های معادل در $Q_c/Q_d = 50$ و نسبت لزجت $\eta_d/\eta_c = 50$ در اتصال T شکل اول

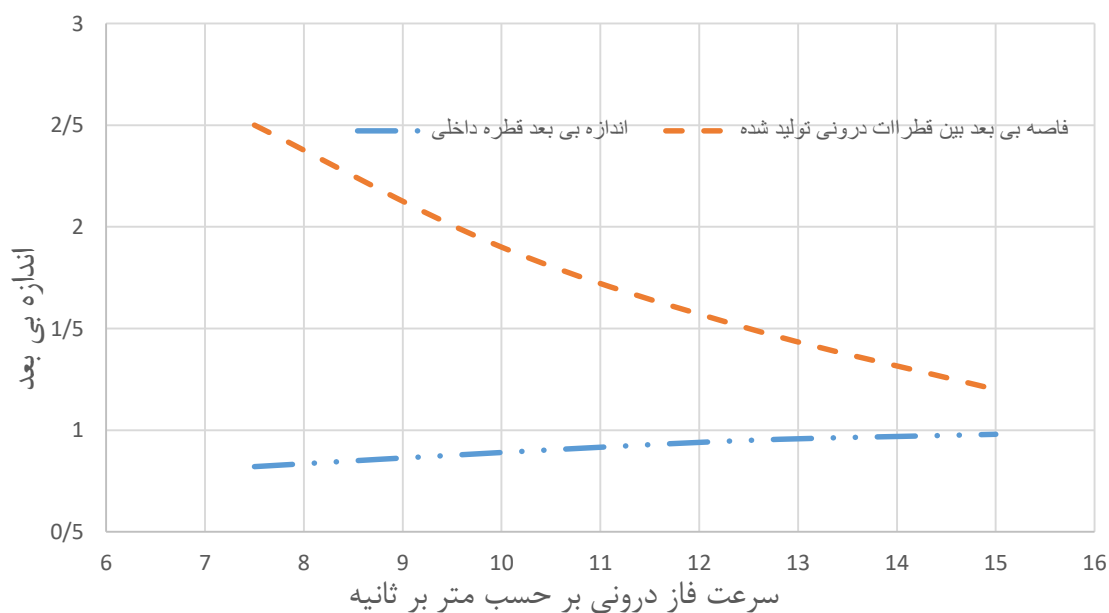
برای ایجاد قطرات مطلوب نسبت دبی و لزجت بین دوفاز مهم هستند. اصولاً دستگاه های جریان متمرکز شده برای شرایطی که در آن نسبت لزجت بین فازها و نیز نسبت دبی در آن ها بسیار زیاد است استفاده می شود. در این دستگاه ها هرچه نسبت لزجت بین دو فاز افزایش یابد، اندازه قطرات تولیدی نیز افزایش می یابد ولی با افزایش نسبت دبی بین دو فاز اندازه این قطرات کوچک می شود.

نتایج نشان می دهد در نسبت دبی های بالاتر میزان تأثیر آن بر قطر قطرات بسیار کمتر شده ولی همچنان بر روی فاصله بین قطرات تأثیر بسیاری دارند. در نسبت لزجت های بسیار پایین نیز قطرات تولیدی بسیار کوچک و با فاصله بسیار اندکی از هم تشکیل می شوند. تغییرات کشش سطحی بر اندازه قطرات تأثیر زیادی نداشته و بیشتر باعث ایجاد حالت چندپخشی می شود. تغییرات نسبت دبی بین دو فاز بر اندازه قطرات بررسی شد و نتایج نشان می دهد در نسبت دبی های پایین تغییر اندازه قطرات

بسیار بیشتر بوده و در نسبت دبی‌های بالاتر تغییرات کمتری مشاهده می‌شود. احتمال به وجود آمدن حالت جدایش چندپخشی در نسبت دبی‌های پایین بیشتر شده درحالی‌که در نسبت دبی‌های بالاتر جدایش قطره در حالت تک‌پخشی صورت می‌گیرد.

۶-۴ اثر افزایش سرعت فاز داخلی

اثر افزایش سرعت سیال داخلی بر روی اندازه بی‌بعد و فاصله بی‌بعد بین قطرات ایجاد شده در شکل ۹-۴ نمایش داده شده است. مطابق تعریف عدد کاپیلاری، اعمال تغییر در سرعت سیال فاز داخلی اثری بر عدد کاپیلاری ندارد ازاین‌رو همان‌گونه که در شکل واضح است با تغییر سرعت نمی‌توان اثرات قابل توجهی در اندازه قطرات ایجاد شده مشاهده نمود. این در حالی است که با افزایش سرعت سیال فاز داخلی مدت زمان تعادل نیروهای لزجی و کشش سطحی کاهش می‌یابد ازاین‌رو می‌توان فاصله ایجاد شده بین تشکیل قطرات داخلی را کاهش داد. که این اثر به‌خوبی در شکل ۹-۴ قابل ملاحظه است.



شکل ۹-۴: اثر تغییر سرعت سیال فاز داخلی بر میزان فاصله بی‌بعد بین قطرات و اندازه بی‌بعد آنها

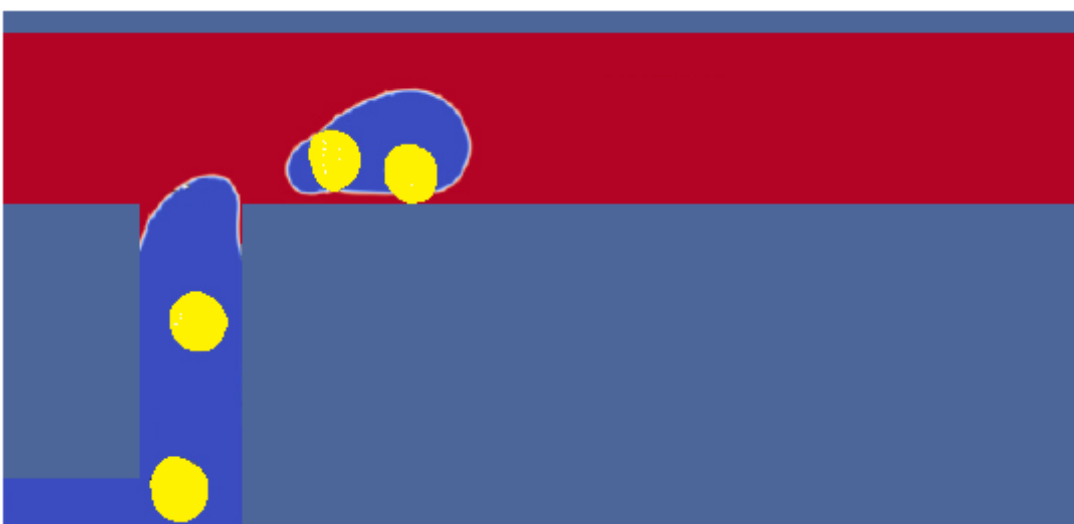
همان‌طور که در شکل ۴-۹ معلوم است با افزایش سرعت سیال داخلی فاصله بی‌بعد بین قطره‌های داخلی ایجاد شده و اندازه بی‌بعد آن‌ها در کانال T شکل اول به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. افزایش سرعت سیال فاز داخلی می‌تواند تا حدی سبب کاهش فاصله بی‌بعد بین تشکیل قطرات داخلی شود که تحت شرایط خاصی دو قطره داخلی در داخل پوشش میانی قرار گیرد این پدیده در شکل ۴-۱۰ نمایش داده شده است. درواقع برای ایجاد قطرات روکش‌دار دوقلو می‌توان با ثابت نگه داشتن عدد کاپیلاری و افزایش عدد رینولدز جریان سیال فاز داخلی تغییرات قطرات جدا شده را در شکل ۴-۱۰ مشاهده نمود.



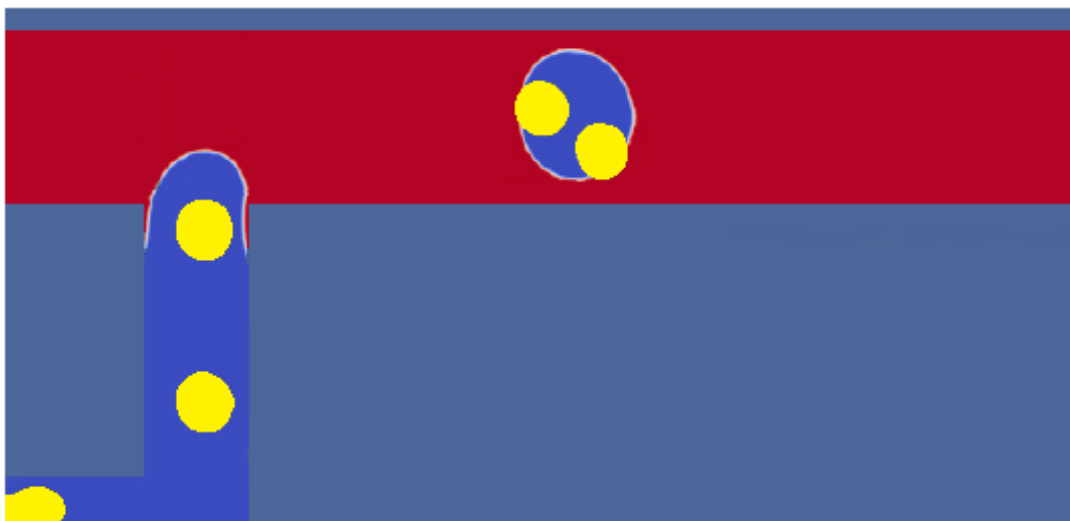
الف) مرحله اول



ب) مرحله دوم



ج) مرحله سوم



(د) مرحله چهارم

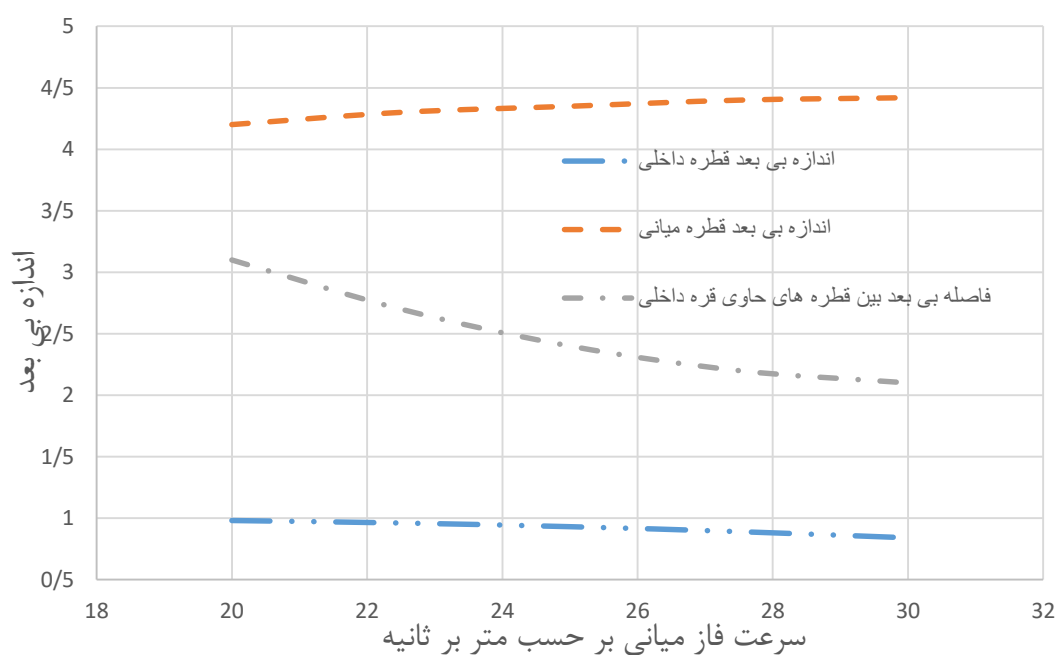
شکل ۴-۱۰: مراحل شکل‌گیری دو قطره داخلی در داخل پوششی از جریان فاز دوم در عدد کاپیلاری داخلی ۰/۰۸۳ و عدد کاپیلاری خارجی ۰/۰۱۵

شکل ۴-۱۰ چهار مرحله شکل‌گیری جریان سه‌فازی با دو قطره درونی را نشان می‌دهد. اولین قطره به سمت سر قطره بیرونی حرکت می‌کند و سرعت آن کاهش می‌یابد پس از آن، قطره درونی دوم در درون قطره در حال شکل‌گیری بیرونی حرکت می‌کند که سبب جلوگیری از جدایش قطره بیرونی می‌شود؛ سبب افزایش حجم قطره بیرونی می‌شود. فاز بیرونی، قطره درونی دوم را فشرده می‌کند و سپس آن را به سمت جلو و درون قطره بیرونی هل می‌دهد. پس از آن که قطره درونی دوم به دام افتاد، قطره بیرونی جدا می‌شود. علاوه بر آن، شکل و حالت قطره درونی بارها تغییر کرده، با توجه به تغییرات ناگهانی سرعت جریان و فشرده شدن توسط قطره بیرونی در اتصال T شکل دوم در نهایت، جریان سه‌فازی با دو قطره درونی شکل می‌گیرد. البته در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده قطرات ثانویه می‌توانند بعد از عبور از گلولی 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 صرف‌نظر شده و تنها در نسبت دبی‌هایی که در آن‌ها حالت تک‌پخشی دیده شد، استفاده شده است. شرایط جریان خزشی این کپسول را پایدار نگه می‌دارد که می‌تواند آن را برای کاربردهای دیگر جامد سازی نمود و یا در صورت نیاز می‌تواند آن را درون یک مجرای مارپیچی حرکت داد تا دو قطره درونی، در صورت نزدیک شدن کافی به یکدیگر، با یکدیگر ادغام شوند.

۷-۴ اثر افزایش سرعت فاز میانی

اثر افزایش سرعت سیال میانی بر روی اندازه بی‌بعد قطره داخلی، اندازه پوشش میانی محصور کننده و فاصله بی‌بعد بین پوشش‌های حاوی قطرات در شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده است.



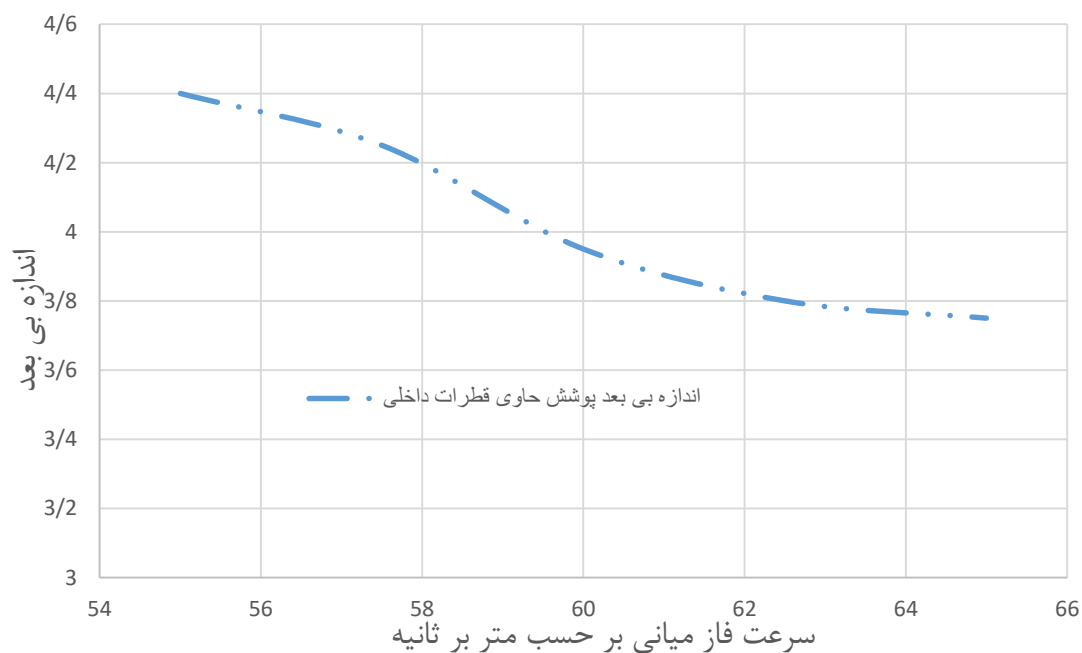
شکل ۴-۱۱: اثر تغییر سرعت سیال فاز میانی بر میزان اندازه بی‌بعد قطره داخلی و پوشش آن

همان‌گونه که در شکل ۴-۱۱ مایش داده شده است با افزایش سرعت سیال میانی اندازه بی‌بعد قطره‌های داخلی و خارجی ایجاد شده در کانال تی شکل به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. همچنین

افزایش سرعت فاز میانی مطابق انتظار فاصله بی بعد پوشش حاوی قطرات داخلی را کاهش می دهد. به لحاظ فیزیکی افزایش سرعت سیال فاز میانی به منزله افزایش عدد کاپیلاری اول می باشد که به لحاظ فیزیک می توان نتایج گزارش شده در شکل ۴-۱۱ را با آن اثبات نمود. با افزایش این عدد اندازه قطره خارجی به دلیل تسلط بیشتر نیروهای لزجی افزایش یافته و به طبع آن فاصله بین قطرات خارجی تولید شده کاهش می یابد.

۴-۸ اثر افزایش سرعت فاز خارجی

اثر افزایش سرعت سیال خارجی بر روی اندازه بی بعد پوشش میانی محصور کننده و فاصله بی بعد بین پوشش های حاوی قطره داخلی در شکل ۴-۱۲ نمایش داده شده است.



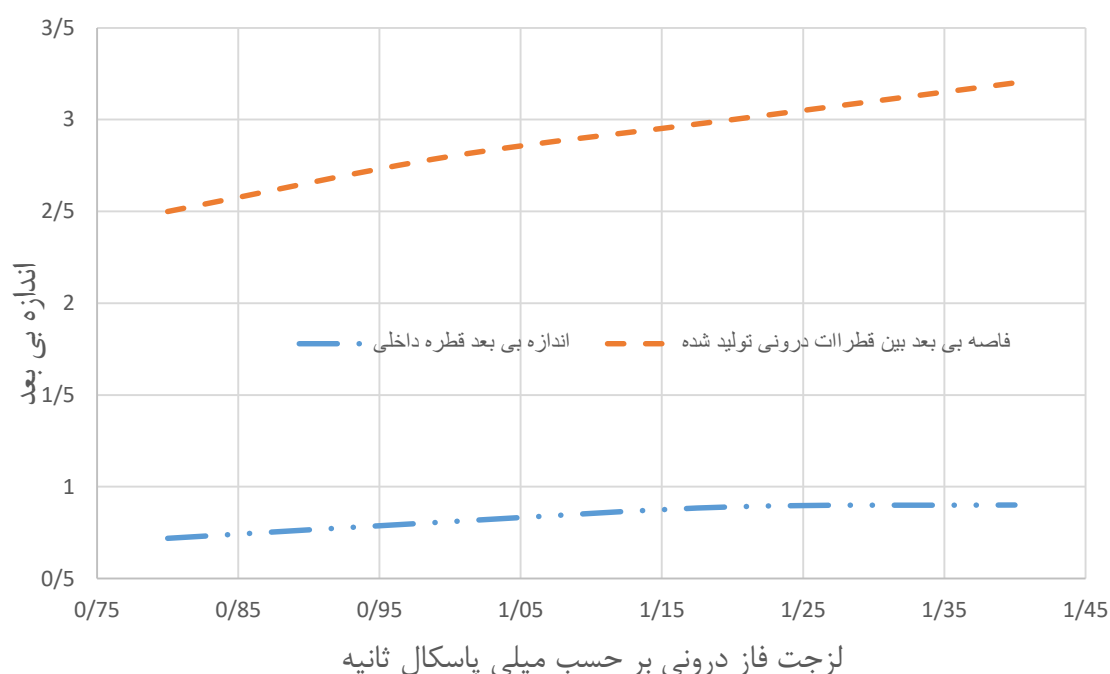
شکل ۴-۱۲: اثر تغییر سرعت سیال فاز خارجی بر میزان اندازه بی بعد محصور کننده قطره داخلی

همان گونه که در شکل ۴-۱۲ نمایش داده شده است با افزایش سرعت سیال خارجی، اندازه بی بعد قطره های پوششی ایجاد شده در کانال افقی اصلی کاهش می یابد. این پدیده نیز کاملاً مطابق با فیزیک

حاکم بر جریان می‌باشد زیرا با افزایش سرعت سیال خارجی، عدد کاپیلاری دوم افزایش می‌یابد از این رو جدایش سیال روکشی را با تأخیر همراه کرده که این امر سبب کاهش اندازه سیال روکشی می‌شود.

۹-۴ اثر افزایش ویسکوزیته فاز داخلی

اثر افزایش ویسکوزیته سیال داخلی بر روی اندازه بی‌بعد و فاصله بی‌بعد بین قطرات ایجاد شده در شکل ۴-۱۳ نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۳: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز داخلی بر میزان فاصله بی‌بعد بین قطرات و اندازه بی‌بعد آن‌ها

با توجه به شکل ۴-۱۳، با افزایش ویسکوزیته سیال داخلی فاصله بی‌بعد بین قطره‌های داخلی ایجاد شده و اندازه بی‌بعد آن‌ها در کانال تی شکل اول افزایش می‌یابد. توجه شود که افزایش فاصله بی‌بعد بین قطرات داخلی می‌تواند تا حدی ادامه یابد که تحت شرایط خاصی قطره داخلی در داخل پوشش میانی جدا نشود و به صورت ممتد ادامه یابد، این پدیده در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است. درواقع

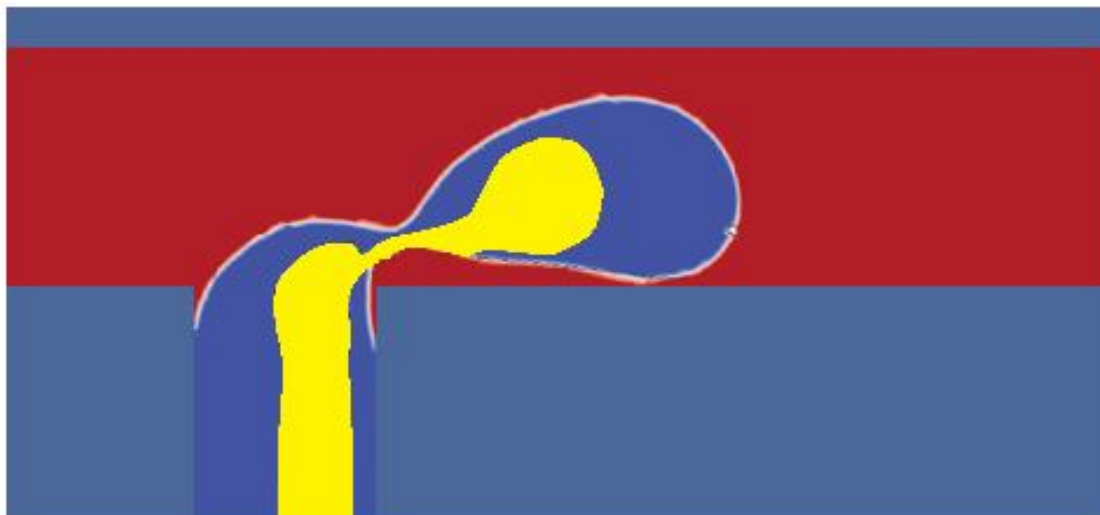
افزایش ویسکوزیته سیال فاز داخلی تغییری در عدد کاپیلاری داخلی ایجاد نمی‌کند، از این رو برای تعیین اثرات ناشی از تغییر ویسکوزیته سیال فاز داخلی باید از دیدگاه فیزیک عمیق‌تر به موضوع نگاه کرد.



الف) مرحله اول



ب) مرحله دوم



ج) مرحله سوم

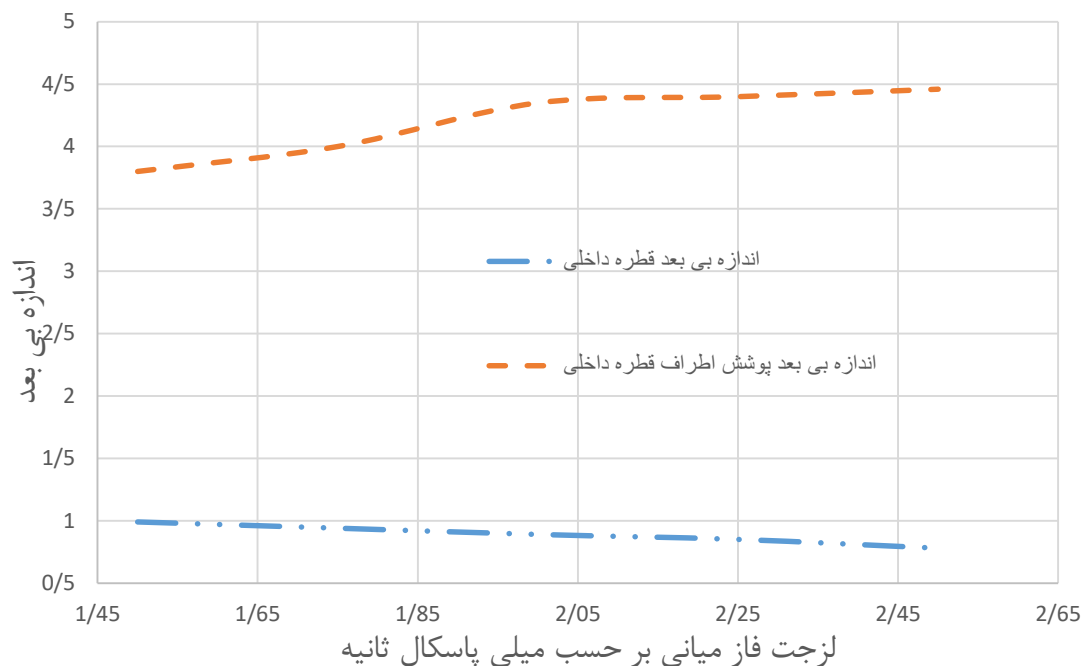


د) مرحله چهارم

شکل ۴-۱۴: مراحل شکل‌گیری قطره داخلی با ویسکوزیته بالا در عدد کاپیلاری ۰/۲

۴-۱۰ اثر افزایش ویسکوزیته فاز میانی

اثر افزایش ویسکوزیته سیال میانی بر روی اندازه بی‌بعد قطره داخلی و اندازه پوشش میانی محصور کننده در شکل ۴-۱۵ نمایش داده شده است. با افزایش ویسکوزیته سیال میانی اندازه بی‌بعد قطره‌های داخلی و خارجی ایجاد شده در کانال تی شکل به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

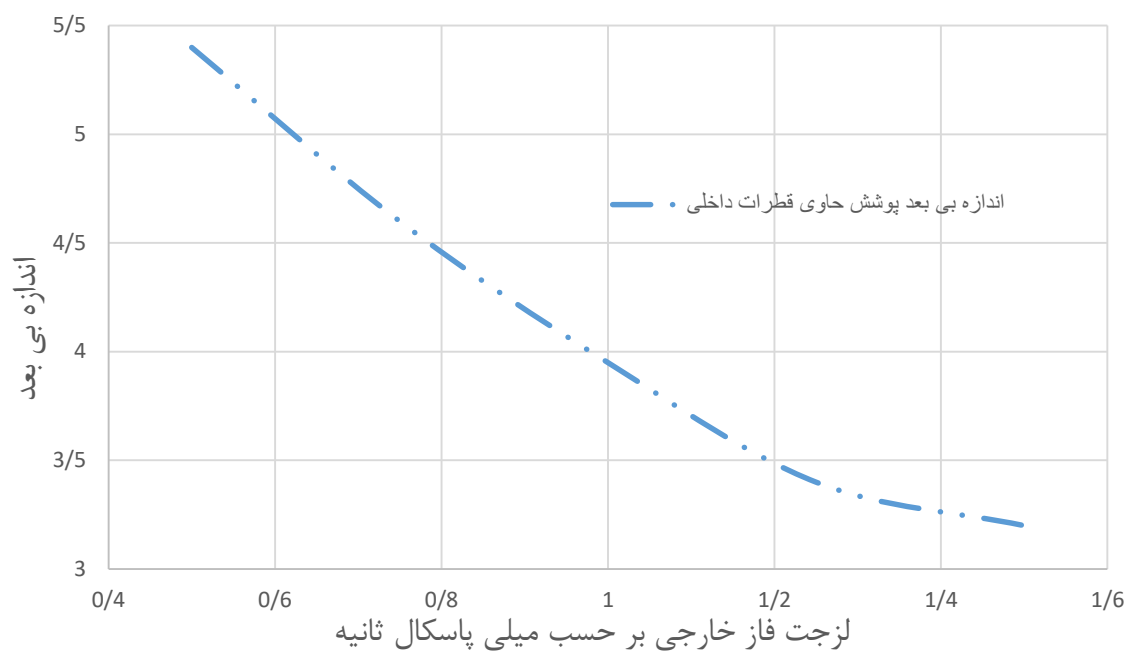


شکل ۴-۱۵: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز میانی بر میزان اندازه بی بعد قطره داخلی و پوشش آن

با وجه به شکل ۴-۱۵ با افزایش ویسکوزیته سیال فاز میانی عدد کاپیلاری اول افزایش می یابد که این امر سبب تقویت نیروهای لزجی اعمالی به سیال فاز داخلی و طبع کاهش اندازه قطرات فاز داخلی، و افزایش نیروهای لزجی مقاوم در برابر جدایش سیال میانی و به طبع آن افزایش اندازه روکش های جدا شده ذرات شده است که کاملاً مطابق با فیزیک مسئله می باشد.

۴-۱۱ اثر افزایش ویسکوزیته فاز خارجی

اثر افزایش ویسکوزیته سیال خارجی بر روی اندازه بی بعد پوشش میانی محصور کننده آن ایجاد در شکل ۴-۱۶ نمایش داده شده است. افزایش ویسکوزیته سیال فاز خارجی سبب افزایش عدد کاپیلاری دوم می شود از این رو نیروهای اعمالی لزجی به سیال میانی بیشتر شده و سبب جدایش سریع تر قطرات روکشی و به طبع آن کاهش شدید اندازه بی بعد آن ها می شود که کاملاً منطبق بر فیزیک حاکم بر جریان است.



شکل ۴-۱۶: اثر تغییر ویسکوزیته سیال فاز خارجی بر میزان اندازه بی بعد محصور کننده قطره داخلی

همان گونه که در شکل ۴-۱۶ نمایش داده شده است با افزایش ویسکوزیته سیال خارجی، اندازه

بی بعد قطره های پوششی ایجاد شده در کانال افقی اصلی کاهش می یابد.

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتایج این پایان نامه

پژوهش حاضر به صورت منسجم بر روی شبیه سازی جریان های سه فاز، در حالات مختلف ویسکوالاستیک و دوگانه با چند قطره درونی انجام گرفته است. در این مطالعه از روش عددی سطح تراز استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی صحت سنجی نتایج ابتدا جریان دوفازی در میکروکانال T شکل مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از همان مکانیزم، جریان سه فاز در میکروکانال ترکیبی T شکل شبیه سازی و فرآیند تشکیل جریان های سه فاز تجزیه و تحلیل شده است. بدین منظور اثرات تغییر میزان سرعت و لزجت فازهای درونی میانی و بیرونی بر روی خواص قطرات ایجاد شده در این نوع خاص از جریانات مورد بررسی و ارزیابی قرار می گیرد. خلاصه نتایج پژوهش حاضر به صوت زیر است.

- با افزایش سرعت سیال داخلی فاصله بی بعد بین قطره های داخلی ایجاد شده و اندازه بی بعد آن ها در کانال تی شکل اول به ترتیب کاهش و افزایش می یابد.
- با افزایش سرعت سیال میانی اندازه بی بعد قطره های داخلی و خارجی ایجاد شده در کانال تی شکل به ترتیب کاهش و افزایش می یابد. همچنین افزایش سرعت فاز میانی مطابق انتظار فاصله بی بعد پوشش حاوی قطرات داخلی را کاهش می دهد.
- با افزایش سرعت سیال خارجی، اندازه بی بعد قطره های پوششی ایجاد شده در کانال افقی اصلی کاهش می یابد.
- با افزایش ویسکوزیته سیال داخلی فاصله بی بعد بین قطره های داخلی ایجاد شده و اندازه بی بعد آن ها در کانال تی شکل اول افزایش می یابد. توجه شود که افزایش فاصله بی بعد بین

قطرات داخلی می‌تواند تا حدی ادامه یابد که تحت شرایط خاصی قطره داخلی در داخل پوشش میانی جدا نشود و به‌صورت ممتد ادامه یابد.

- با افزایش ویسکوزیته سیال میانی اندازه بی‌بعد قطره‌های داخلی و خارجی ایجاد شده در کانال تی شکل به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.
- با افزایش ویسکوزیته سیال خارجی، اندازه بی‌بعد قطره‌های پوششی ایجاد شده در کانال افقی اصلی کاهش می‌یابد.

۲-۵ پیشنهادات

در این بخش پیشنهادهایی که برای ادامه زمینه مطالعاتی مطالعه حاضر توسط دانشجویان، محققین علاقه‌مند و طراحان می‌تواند مورد بررسی قرار بگیرد به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

- تغییر زاویه اتصال مقطع تی شکل و بررسی آن بر جدایش قطرات فاز میانی و خارجی.
- بررسی تجربی و آزمایشگاهی مطالعه حاضر در رژیم‌های مختلف جریان و بررسی اثرات هم‌زمان عدد رینولدز و عدد کاپیلاری.
- بررسی اثر تغییرات نوع سیال به‌منظور اعمال تغییر در نیروهای کشش سطحی و اثر آن جدایش قطرات.
- تعیین محدوده‌های اعداد رینولدز و کاپیلاری برای انتقال جریان از حالت قطرات جدا شده پایدار به ناپایدار و حالات قطرات دوقلو به‌منظور کاربردهای بیشتر در ساخت و تزریق داروها.

مراجع

- [1] Marmottant, P. and E. Villermaux, *On spray formation*. Journal of fluid mechanics, 2004. **498**: p. 73-111.
- [2] Kermeen, R.W., *Water tunnel tests of NACA 4412 and Walchner Profile 7 hydrofoils in noncavitating and cavitating flows*. 1956.
- [3] Kumar, V., M. Paraschivoiu, and K. Nigam, *Single-phase fluid flow and mixing in microchannels*. Chemical Engineering Science, 2011. **66**(7): p. 1329-1373.
- [4] Manz, A., N. Graber, and H.á. Widmer, *Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing*. Sensors and actuators B: Chemical, 1990. **1**(1-6): p. 244-248.
- [5] Whitesides, G.M., *The origins and the future of microfluidics*. Nature, 2006. **442**(7101): p. 368.
- [6] Webster, A., et al., *A microfluidic device for tissue biopsy culture and interrogation*. Analytical Methods, 2010. **2**(8): p. 1005-1007.
- [7] Kikuchi, Y., et al., *Optically accessible microchannels formed in a single-crystal silicon substrate for studies of blood rheology*. Microvascular Research, 1992. **44**(2): p. 226-240.
- [8] Manz, A., et al., *Planar chips technology for miniaturization and integration of separation techniques into monitoring systems: capillary electrophoresis on a chip*. Journal of Chromatography A, 1992. **593**(1-2): p. 253-258.
- [9] Kang, L., et al., *Microfluidics for drug discovery and development: from target selection to product lifecycle management*. Drug discovery today, 2008. **13**(1): p. 1-13.
- [10] Weigl, B.H., R.L. Bardell, and C.R. Cabrera, *Lab-on-a-chip for drug development*. Advanced drug delivery reviews, 2003. **55**(3): p. 349-3.⁹⁹

- [11] Nisisako, T., T. Torii, and T. Higuchi, *Novel microreactors for functional polymer beads*. Chemical Engineering Journal, 2004. **101**(1): p. 23-29.
- [12] Sun, M., W.-B. Du, and Q. Fang, *Microfluidic liquid–liquid extraction system based on stopped-flow technique and liquid core waveguide capillary*. Talanta, 2006. **70**(2): p. 392-396.
- [13] Takagi, M., et al., *Production of titania nanoparticles by using a new microreactor assembled with same axle dual pipe*. Chemical Engineering Journal, 2004. **101**(1): p. 269-276.
- [14] Anna, S.L., N. Bontoux, and H.A. Stone, *Formation of dispersions using “flow focusing” in microchannels*. Applied physics letters, 2003. **82**(3): p. 364-366.
- [15] Xu, J., et al., *Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices :from squeezing to dripping*. Microfluidics and Nanofluidics, 2008. **5**(6): p. 711-717.
- [16] Sang, L., Y. Hong, and F. Wang, *Investigation of viscosity effect on droplet formation in T-shaped microchannels by numerical and analytical methods*. Microfluidics and nanofluidics, 2009. **6**(5): p. 621-635.
- [17] Castaño-Álvarez, M., et al., *Critical points in the fabrication of microfluidic devices on glass substrates*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008. **130**(1): p. 436-448.
- [18] Zhu, L., 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, 2010. **148**(1): p. 135-146.
- [19] Baroud, C.N., F. Gallaire, and R. Dangla, *Dynamics of microfluidic droplets*. Lab on a Chip, 2010. **10**(16): p. 2032-2045.
- [20] Seemann, R., et al., *Droplet based microfluidics*. Reports on progress in physics, 2011. **75**(1): p. 601-610.
- [21] Teh, S.-Y., et al., *Droplet microfluidics*. Lab on a Chip, 2008. **8**(2): p. 198-220.
- [22] Vladislavljević, G., I. Kobayashi, and M. Nakajima, *Production of uniform droplets using membrane, microchannel and microfluidic emulsification devices*. Microfluidics and nanofluidics, 2012. **13**(1): p. 151-178.
- [23] Barbier, V., et al., *Producing droplets in parallel microfluidic systems*. Physical Review E, 2006. **74**(4): p. 603-640.

- [24] Holtze, C., *Large-scale droplet production in microfluidic devices—an industrial perspective*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013. **46**(11): p. 104-108.
- [25] <http://blogs.nature.com/spoonful/2012/02/chip-promises-better-diagnosis-for-common-blood-disorder.html>.
- [26] <http://www.elflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/introduction-to-lab-on-a-chip-2015-review-history-and-future/>.
- [27] Nguyen, N.T. and S.T. Wereley, *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Artech House. Inc., Norwood, MA, 2002: p. 292-337.
- [28] Jang, J. and S. Wereley, *Pressure distributions of gaseous slip flow in straight and uniform rectangular microchannels*. Microfluidics and Nanofluidics, 2004. **1**(1): p. 41-51.
- [29] Niazmand, H., M. Renksizbulut, and E. Saeedi, *Developing slip-flow and heat transfer in trapezoidal microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008. **51**(25-26): p. 6126-6135.
- [30] van Steijn, V., C.R. Kleijn, and M.T. Kreutzer, *Predictive model for the size of bubbles and droplets created in microfluidic T-junctions*. Lab on a Chip, 2010. **10**(19): p. 2513-2518.
- [31] Gupta, A., S.S. Murshed, and R. Kumar, *Droplet formation and stability of flows in a microfluidic T-junction*. Applied physics letters, 2009. **94**(16): p. 164107.
- [32] Mala, G.M., D. Li, and J. Dale, *Heat transfer and fluid flow in microchannels*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997. **40**(13): p. 3079-3088.
- [33] Vladislavljević, G.T., et al., *Industrial lab-on-a-chip: Design, applications and scale-up for drug discovery and delivery*. Advanced drug delivery reviews, 2013. **65**(11): p. 1626-1663.
- [34] صدیق، ی.ح.، بررسی عددی جریان دوفازی در میکروکانال. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۶.
- [35] Yuan, Q. and R.A. Williams, *Precision emulsification for droplet and capsule production*. Adv Powder Technol, 2014. **25**(1): p. 122-135.
- [36] Anna, S.L. and H.C. Mayer, *Microscale tipstreaming in a microfluidic flow focusing device*. Physics of Fluids, 2006. **18**(12): p. 112-125.

- [37] Anna, S.L., *Droplets and bubbles in microfluidic devices*. Annual Review of Fluid Mechanics, 2016. **48**: p. 285-309.
- [38] Li, Y., et al., *Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device*. Soft matter, 2015. **11**(19): p. 3884-3899.
- [39] Chiesl, T.N., W. Shi, and A.E. Barron, *Poly (acrylamide-co-alkylacrylamides) for electrophoretic DNA purification in microchannels*. Analytical Chemistry, 2005. **77**(3): p. 772-779.
- [40] Adams, R.P., *Identification of essential oil components by gas chromatography/mass spectrometry*. Vol. 456. 2007: Allured publishing corporation Carol Stream, IL.
- [41] Garstecki, P., et al., *Formation of droplets and bubbles in a microfluidic T-junction—scaling and mechanism of break-up*. Lab on a Chip, 2006. **6**(3): p. 437-446.
- [42] De Menech, M., et al., *Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction*. journal of fluid mechanics, 2008. **595**: p. 141-161.
- [43] Santos, R. and M. Kawaji. *Effect of contact angle on gas slug formation, shape and flow in a microchannel T-junction by numerical simulation*. in *19th International Congress of Chemical and Process Engineering*. 2010.
- [44] Rajesh, V. and V.V. Buwa, *Experimental characterization of gas–liquid–liquid flows in T-junction microchannels*. Chemical engineering journal, 2012. **207**: p. 832-844.
- [45] Hoang, D., et al. *Modeling of low-capillary number segmented flows in microchannels using OpenFOAM*. in *AIP Conference Proceedings*. 2012. AIP.
- [46] Yan, Y., D. Guo, and S. Wen, *Numerical simulation of junction point pressure during droplet formation in a microfluidic T-junction*. Chemical engineering science, 2012. **84**: p. 591-601.
- [47] Hoang, D.A., et al., *numerical study on droplet breakup in a microfluidic T-junction*.
- [48] خدادادی., شبیه سازی عددی برخورد و حرکت حباب در کنار صفحه ی مایل به روش حجم سیال. مهندسی مکانیک مدرس, ۲۰۱۵. ۱۵(۱۰): ص. ۳۲۹-۳۴۰.

- [49] Feigl, K., et al., *Effect of flow type, channel height, and viscosity on drop production from micro-pores*. Chemical Engineering Science, 2014. **116**: p. 372-382.
- [50] Bedram, A., et al., *Numerical investigation of an efficient method (T-junction with valve) for producing unequal-sized droplets in micro-and nano-fluidic systems*. Journal of Fluids Engineering, 2015. **137** : (3) p. 200-213.
- [51] Wang, W., et al., *Controllable microfluidic production of multicomponent multiple emulsions*. Lab on a Chip, 2011. **11**(9): p. 1587-1592.
- [52] Abate, A.R., J. Thiele, and D.A. Weitz, *One-step formation of multiple emulsions in microfluidics*. Lab on a Chip, 2011. **11**(2): p. 253-258.
- [53] Abate, A. and D. Weitz, *High-order multiple emulsions formed in poly (dimethylsiloxane) microfluidics*. Small, 2009. **5**(18): p. 2030-2032.
- [54] Choi, C.H., D.A. Weitz, and C.S. Lee, *One step formation of controllable complex emulsions: from functional particles to simultaneous encapsulation of hydrophilic and hydrophobic agents into desired position*. Advanced materials, 2013. **25**(18): p. 2536-2541.
- [55] Gueyffier, D., et al., *Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows*. Journal of Computational physics, 1999. **152**(2): p. 423-456.
- [56] Gupta, A. and R. Kumar, *Effect of geometry on droplet formation in the squeezing regime in a microfluidic T-junction*. Microfluidics and Nanofluidics, 2010. **8**(6): p. 799-812.
- [57] Yang, H., Q. Zhou, and L.-S. Fan, *Three-dimensional numerical study on droplet formation and cell encapsulation process in a micro T-junction*. Chemical engineering science, 2013. **87**: p. 100-110.
- [58] Kumacheva ,E. and P. Garstecki, *Microfluidic reactors for polymer particles*. 2011: John Wiley & Sons.
- [59] Hamrock, B.J., S.R. Schmid, and B.O. Jacobson, *Fundamentals of fluid film lubrication*. 2004: CRC press.
- [60] Chabert, M., K.D. Dorfman, and J.L. Viovy, *Droplet fusion by alternating current (AC) field electrocoalescence in microchannels*. Electrophoresis, 2005. **26**(19): p. 3706-3715.

- [61] Schetz, J.A. and A.E. Fuhs, *Fundamentals of fluid mechanics*. 1999: John Wiley & Sons.
- [62] Glawdel, T., *Droplet Production and Transport in Microfluidic Networks with Pressure Driven Flow Control*. 2012.
- [63] Nie, Z., *Developing New Strategies for the Preparation of Micro-and Nano-structured Polymer Materials*. 2008.
- [64] Utada, A., et al., *Dripping, jetting, drops, and wetting: The magic of microfluidics*. Mrs Bulletin, 2007. **32**(9): p. 702-708.
- [65] Osorio Nesme, A., *High Performance Computations of Transient Transport in Microchannels using Lattice Boltzmann Methods*. 2010.
- [66] Nisisako, T., S. Okushima, and T. Torii, *Controlled formulation of monodisperse double emulsions in a multiple-phase microfluidic system*. Soft Matter, 2005. **1**(1): p. 23-27.
- [67] Utada, A., et al., *Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device*. Science, 2005. **308**(5721): p. 537-541.
- [68] Datta ,S.S., et al., *25th anniversary article: Double emulsion templated solid microcapsules: Mechanics and controlled release*. Advanced Materials, 2014. **26**(14): p. 2205-2218.
- [69] Brady, J.F. and G. Bossis, *Stokesian dynamics*. Annual review of fluid mechanics, 1988. **20**(1): p. 111-157.
- [70] Smereka, P., *On the motion of bubbles in a periodic box*. Journal of Fluid Mechanics, 1993. **254**: p. 79-112.
- [71] Harlow, F.H. and J.E. Welch, *Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface*. The physics of fluids, 1965. **8**(12): p. 2182-2189.
- [72] Noh, W.F. and P. Woodward. *SLIC (simple line interface calculation)*. in *Proceedings of the fifth international conference on numerical methods in fluid dynamics June 28–July 2, 1976 Twente University, Enschede*. 1976. Springer.
- [73] Hirt, C.W. and B.D. Nichols, *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. Journal of computational physics, 1981. **39**(1): p. 201-225.

- [74] Osher, S. and J.A. Sethian, *Fronts propagating with curvature-dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations*. Journal of computational physics, 1988. **79**(1): p. 12-49.
- [75] Unverdi, S.O. and G. Tryggvason, *A front-tracking method for viscous, incompressible, multi-fluid flows*. Journal of computational physics, 1992. **100**(1): p. 25-37.
- [76] Hu, H.H., N.A. Patankar, and M. Zhu, *Direct numerical simulations of fluid–solid systems using the arbitrary Lagrangian–Eulerian technique*. Journal of Computational Physics, 2001. **169**(2): p. 427-462.
- [77] Chen, S. and G.D. Doolen, *Lattice Boltzmann method for fluid flows*. Annual review of fluid mechanics, 1998. **30**(1): p. 329-364.
- [78] Succi, S., *The lattice Boltzmann equation: for fluid dynamics and beyond*. 2001: Oxford university press.
- [79] Prosperetti, A. and G. Tryggvason, *Computational methods for multiphase flow*. 2009: Cambridge university press.
- [80] Shu, C.-W. and S. Osher, *Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes*. Journal of computational physics, 1988. **77**(2): p. 439-471.
- [81] Tryggvason, G., R. Scardovelli, and S. Zaleski, *Direct numerical simulations of gas–liquid multiphase flows*. 2011: Cambridge University Press.
- [82] Du, J., et al., *A simple package for front tracking*. Journal of Computational Physics, 2006. **213**(2) :p. 613-628.
- [83] X.-B. Li, F.-C. Li, J.-C. Yang, H. Kinoshita, M. Oishi, M. Oshima, Study on the mechanism of droplet formation in T-junction microchannel, Chemical Engineering Science, 2012. **69**: p. 340-351.

Abstract

Multi-phase fluid flow is one of the most important and influential topics in fluid mechanics science, and how to deal with it and properly understand the issues raised in this field can have a tremendous impact on the future of the world of technology and industry. The present study has consistently performed simulations of three-phase currents in various viscoelastic and dual states with several internal droplets. In this study, the numerical method of level set is used. Also, in order to evaluate the accuracy of the results, first the two-phase current in the T-shaped micro-channel was examined and then using the same mechanism, the three-phase current in the combined T-shaped micro-channel was simulated and the process of forming three-phase currents was analyzed. For this purpose, the effects of changing the rate of velocity and viscosity of the middle and outer internal phases on the properties of the droplets created in this particular type of flow are investigated and evaluated.

The results of the study show that by examining the effects of velocity, and the viscosity of fluids within a hierarchical T-shaped microchannel, the results of the clear effects of these parameters can be clearly seen on how the internal and external droplets separate, the dimensionless dimension and the dimensionless distance between The separation of the droplets was observed in such a way that by adjusting the speed and viscosity parameters, the size of the separated droplets and the distance created between them could be controlled depending on the intended applications

Keywords: T-shaped micro-channel, level set method, droplet separation, coating drops.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

A Thesis submitted in partial Fulfillment of the Requirement for
The Degree of master of Science In
Mechanical Engineering

Numerical study of droplet formation in three-phase flow regime in a microchannel

By:

Seyyed Alireza Mousavi Rahizi

Supervisor:

Dr. Ali Abbasnejad

July 2020