

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه تبدیل انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی فازی تولید قطره در یک میکرو کانال با جریان دو فازی

نگارنده:

سیده مهسا فتاحی

استاد راهنما

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

استاد مشاور

دکتر مصطفی نظری

تیر ۹۸

تقدیم بہ

خدائی کہ آفرید

جہان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و بہ کسانی کہ عشقان را در وجودم دمید.

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که این جانب را در امر انجام این پایان نامه یاری

نموده‌اند به خصوص جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان و جناب آقای دکتر محسن نظری و

جناب آقای دکتر مصطفی نظری که همواره از راه‌های و مشاوره‌های آن‌ها بهره‌مند بوده‌ام تشکر

و قدردانی نمایم. همچنین لازم می‌دانم از زحمات پدر و مادر عزیزم که همیشه پشتیبان و مشوق من

بوده‌اند و همه دوستانی که در این مدت مرا یاری نموده‌اند، تشکر نمایم.

تعهدنامه

این جانب سیده مهسا فتاحی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی فازی تولید یک قطره در میکروکانال با جریان دوفازی تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در بررسی دینامیک سیالات در مقیاس میکرو، بررسی فرآیند تشکیل قطره در میکروکانال به منظور کنترل اندازه حرکت قطره‌های تولیدی می‌باشد. به‌طور کلی در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک، سه رژیم عمده برای جدایش قطره مشاهده می‌شود که شامل رژیم فشردگی، چکه کردن و جتی است. در پژوهش حاضر به بررسی تولید قطره در یک میکروکانال T-شکل پرداخته شده و به مطالعه اثرات نسبت لزجت بین دو فاز، نسبت نرخ جریان ورودی دو فاز و عدد موینگی پرداخته شده است. در این مطالعه، اندازه قطره، فاصله بین قطرات، فرکانس تولید قطرات و نیز زمان جدایش مورد بررسی قرار گرفته است. مدل سازی دینامیک سیالاتی، تشکیل و جدایش قطره فروفلوئید در روغن با روش لول‌ست مدل سازی شده و نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی و عددی موجود، مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند با کاهش کشش سطحی و افزایش عدد موینگی اندازه قطره و زمان جدایش کاهش و فرکانس تولید قطرات افزایش می‌یابد. طول قطره با افزایش نرخ جریان پیوسته، کاهش و با افزایش نرخ جریان گسسته، افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت نرخ جریان، طول جدایش افزایش می‌یابد و به رژیم جتی نزدیک می‌شود. هرچه نسبت لزجت بین دو فاز افزایش یابد، قطراتی با قطره بزرگ‌تر تولید خواهد شد و با افزایش فاصله بین قطره‌ها، فرکانس تولید قطره کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی : میکروکانال، قطر قطره، عدد موینگی، روش لول‌ست

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه و ضرورت انجام تحقیق.....	۲
۱-۲- رژیم‌های اصلی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک.....	۵
۱-۳- انواع دستگاه‌های میکروفلوئیدیک.....	۹
۱-۳-۱- دستگاه‌های T-شکل.....	۹
۱-۳-۲- دستگاه‌های هم جریان.....	۱۰
۱-۳-۳- دستگاه‌های میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده.....	۱۱
۱-۳-۴- میکروکانال‌های اتصال صلیبی و Y-شکل.....	۱۳
۱-۴- مروری بر کارهای انجام شده.....	۱۴
۱-۵- نوآوری تحقیق.....	۲۶
۱-۶- مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....	۲۷
۲- فصل دوم: روش تحقیق.....	۲۹
۲-۱- اعداد و پارامترهای بی‌بعد.....	۳۰
۲-۲- سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی.....	۳۲
۲-۳- فیزیک مساله.....	۳۲
۲-۳-۱- سطح مشترک و کشش سطحی.....	۳۲
۲-۳-۲- سورفاکتانت.....	۳۴

۳-۳-۲-زاویه تماس.....	۳۴
۴-۲-فرآیند جدایش.....	۳۵
۵-۲-توزیع فشار بین فازها و خطوط جریان.....	۳۷
۶-۲-تک پخشی و چند پخشی.....	۳۸
۷-۲-سیستم های چندفازی.....	۴۰
۸-۲-روش های ردیابی سطح مشترک.....	۴۱
۸-۲-۱-روش تسخیر کننده سطح.....	۴۱
۸-۲-۲-روش دنبال کننده سطح.....	۴۱
۳- فصل سوم: معادلات حاکم و روش حل عددی.....	۴۵
۳-۱-مدل سازی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی به کمک لولست	
پایستار.....	۴۶
۴- فصل چهارم : مدل سازی فرآیند جدایش و تشکیل قطره در نرم افزار کامسول.....	۵۳
۴-۱-مراحل مدل سازی فرآیند جدایش و تشکیل قطره در نرم افزار	
کامسول.....	۵۴
۴-۲-شبیه سازی جریان دوفازی سیال میکروکانال تی شکل.....	۵۵
۴-۲-۱-خواص سیالات.....	۵۵
۴-۲-۲-مدل سازی عددی.....	۵۶
۴-۲-۳-شرایط اولیه.....	۵۷

۴-۲-۴-شرایط مرزی.....	۵۸
۴-۳-شبکه بندی و استقلال از شبکه.....	۵۸
۵- فصل پنجم : تاثیر پارامترها بر رفتار قطره و نتایج آن.....	۶۱
۵-۱-اثر لزجت بر رفتار قطره.....	۶۲
۵-۲-تاثیر کشش سطحی و عدد موینگی بر اندازه قطره، طول جدایش، فرکانس و زمان جدایش.....	۶۶
۵-۳- تاثیر نرخ جریان بر اندازه قطره، طول جدایش، فرکانس و زمان جدایش.....	۶۹
۵-۴-ارزیابی صحت نتایج.....	۷۵
۶- فصل ششم : مدل سازی فازی عصبی کانال T-شکل برای پیش بینی اندازه قطرات.....	۷۷
۶-۱- شبکه های عصبی.....	۷۸
۶-۲- سیستم استنتاجی فازی.....	۸۰
۶-۳- ساختار شبکه فازی عصبی انفیس.....	۸۲
۶-۳-۱-لایه های انفیس.....	۸۴
۶-۳-۱-۱- فازی سازی.....	۸۴
۶-۳-۱-۲- محاسبه قدرت آتش هر قانون.....	۸۵

۸۵.....۳-۱-۳-۶- نرمال سازی

۸۵.....۴-۱-۳-۶- خروجی هریک از لایه ها

۸۶.....۵-۱-۳-۶- خروجی نهایی

۸۷.....۴-۶-مدل سازی فازی عصبی در پیش بینی قطر قطره

۸۷.....۱-۴-۶- آنالیز تاگاچی

۹۳.....۵-۶-نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۷.....پیوست

۱۰۹.....مراجع

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۴: خواص سیالات استفاده شده..... ۵۵
- جدول ۲-۴: تعداد المان های چهار شبکه بندی مختلف ۵۹
- جدول ۱-۵: جدول اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در $Q_c/Q_d=8$ و $Ca=0.145$ ۶۳
- جدول ۲-۵: جدول اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در $Q_c/Q_d=4$ و $Ca=0.17$ ۶۳
- جدول ۳-۵: جدول اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در $Q_c/Q_d=10$ و $Ca=0.12$ ۶۴
- جدول ۱-۶: محدوده پارامترهای ورودی..... ۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: دستگاه‌های میکروفلوئیدیک [۲۴, ۲۳] ۴
- شکل ۲-۱: شماتیک دستگاه‌های میکروفلوئیدیک و رژیم‌های مختلف [۳۲] ۸
- شکل ۳-۱: رژیم‌های متداول در میکروکانال‌ها (الف) - رژیم فشردگی (ب) - رژیم چکه‌ای (ج) - رژیم جتی [۴۱] ۹
- شکل ۴-۱: دستگاه میکروفلوئیدیک T-شکل ساده [20, 42] ۱۰
- شکل ۵-۱: دستگاه میکروفلوئیدیک T-شکل با دو تغییر ساده متداول [۴۲] ۱۰
- شکل ۶-۱: دستگاه میکروفلوئیدیک هم‌جریان [۴۲] ۱۱
- شکل ۷-۱: دستگاه میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده [۴۲] ۱۲
- شکل ۸-۱: دستگاه‌های میکروفلوئیدیک با (الف) تر شدن دیواره‌های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز شده با جریان‌های مخالف [۴۲] ۱۲
- شکل ۹-۱: شماتیک میکروکانال‌های (الف) اتصال صلیبی (ب) Y-شکل [۴۲] ۱۴
- شکل ۱۰-۱: تأثیر عدد موینگی و زاویه تماس بر اندازه قطرات در هندسه T-شکل [۳۹] ۱۷
- شکل ۱۱-۱: از نتایج پنگ فرایند تشکیل قطره در یک چرخه ۱۹
- شکل ۱-۲: فصل مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر [۸۰] (الف) نمای میکروسکوپی در اندازه مولکولی از فصل مشترک (ب) قطره آویزان (ج) قطره چسبیده به سطح ۳۳
- شکل ۲-۲: زاویه تماس بین مایع و سطح جامد ۳۵
- شکل ۳-۲: شماتیکی از پیشروی قطره ۳۶
- شکل ۴-۲: نمونه‌ای از فرآیند چند پخشی ۳۹
- شکل ۵-۲: دو روش کلی تعیین مرز مشترک [۸۳] الف - روش اویلری ب - روش لاگرانژی ۴۲
- شکل ۱-۳: نمودار پارامتر در مقطع میانی قطره ۵۱

- شکل ۴-۱: مراحل مدل سازی بر حسب کامسول ۵۴
- شکل ۴-۲: مدل سازی دو بعدی میکرو کانال و ابعاد آن ۵۷
- شکل ۴-۳: شبکه بندی میکرو کانال ۶۰
- شکل ۴-۴: طول جدایش قطره بر حسب زمان در چهار شبکه بندی مختلف ۶۰
- شکل ۵-۱: روند جدایش قطره به ازای $ca=0.194$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=8$ به ازای الف نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ و ب نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=1$ ۶۴
- شکل ۵-۲: فرکانس تشکیل و فواصل بین قطرات در زمان $t=0.8$ در الف نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ و ب نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=1$ ۶۵
- شکل ۵-۳: نمودار تغییر طول در برابر زمان به ازای ca های مختلف و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=1$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=4$ ۶۶
- شکل ۵-۴: نمودار تغییر طول در برابر زمان به ازای ca های مختلف و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=4$ ۶۶
- شکل ۵-۵: روند تشکیل قطره به ازای اعداد موینگی های مختلف در نسبت دبی $Q_c/Q_d=8$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ الف $ca=0.097$ و ب $ca=0.14$ و ج $ca=0.19$ ۶۷
- شکل ۵-۶: نمودار طول قطره در برابر زمان به ازای ca های مختلف و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=8$ ۶۸
- شکل ۵-۷: نمودار تاثیر عدد موینگی بر قطر و فاصله بین قطرات به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=8$ ۶۸
- شکل ۵-۸: نمودار تاثیر عدد موینگی برفرکانس و فاصله بین قطرات به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ و نسبت دبی $Q_c/Q_d=8$ الف $ca=0.09$ ب $ca=0.145$ ۶۹
- شکل ۵-۹: روند تشکیل قطره تا زمان جدایش به ازای $ca=0.14$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$ در الف $Q_c/Q_d=4$ ب $Q_c/Q_d=8$ ج $Q_c/Q_d=10$ ۷۰

شکل ۵-۱۰: اثر نسبت نرخ جریان بر تغییر قطر و فاصله بین قطرات به ازای $ca=0.14$ و نسبت

لزجت $\mu_c/\mu_d = 10$ در $Q_c/Q_d=4$ ، $Q_c/Q_d=8$ و $Q_c/Q_d=10$ ۷۱

شکل ۵-۱۱: اثر نسبت نرخ جریان بر فرکانس قطره و طول جدایش بر حسب زمان به ازای

$ca=0.14$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$ در $Q_c/Q_d=4$ ، $Q_c/Q_d=8$ و $Q_c/Q_d=10$ ۷۲

شکل ۵-۱۲: روند تشکیل قطره به ازای به ازای $ca=0.14$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ در الف

$Q_c/Q_d=4$ ب $Q_c/Q_d=8$ ۷۳

شکل ۵-۱۳: فرکانس تشکیل قطره به ازای به ازای $ca=0.14$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ در

الف $Q_c/Q_d=4$ ب $Q_c/Q_d=8$ ۷۳

شکل ۵-۱۴: نمودار تاثیر عدد موینگی بر قطر به ازای نسبت جریان های مختلف در نسبت لزجت

$\mu_c/\mu_d=17.6$ ۷۴

شکل ۵-۱۵: نمودار تاثیر عدد موینگی بر زمان جدایش به ازای نسبت جریان های مختلف در

نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17.6$ ۷۴

شکل ۵-۱۶: الف) نمودار تطابق داده عددی و داده تجربی قطر بر حسب نرخ جریان در الف)

$\mu_{oil}=100\text{mpa}$ و $Q_{oil}=0.028\mu\text{L/s}$ و Q_{water} متغیر و ب) $\mu_{oil}=100\text{mpa}$ و Q_{oil}

$=0.0028\mu\text{L/s}$ و Q_{water} متغیر ۷۵

شکل ۶-۱: ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه ۸۰

شکل ۶-۲: ساختار کلی سیستم فازی ۸۱

شکل ۶-۳: روش استنتاج فازی سوگنو ۸۲

شکل ۶-۴: معماری کلی لایه فازی عصبی تطبیقی انفیس ۸۶

شکل ۶-۵: مرحله اول آنالیز تاگاچی ۸۹

شکل ۶-۶: مرحله دوم آنالیز تاگاچی ۹۰

شکل ۶-۷: تابع عضویت عدد موینگی ۹۱

- شکل ۶-۸: تابع عضویت نسبت ویسکوزیته..... ۹۱
- شکل ۶-۹: تابع عضویت نسبت دبی..... ۹۲
- شکل ۶-۱۰- نمودار مقایسه قطر تخمینی با قطر پیش‌بینی شده و میزان خطا..... ۹۳

فهرست علائم

علائم لاتین

Bo	عدد باند
Ca	عدد موئینگی
h	اندازه المان شبکه (m)
Re	عدد رینولدز
Q	دبی
A	مساحت (m^2)
L	طول جدایش قطره (m)
t	زمان (s)
W	عرض کانال (μm)
V_f	حجم نسبی سیال دو در کامسول
u	مؤلفه سرعت در جهت x (m/s)
v	مؤلفه سرعت در جهت y (m/s)
F_{st}	نیروی کشش سطحی
P	فشار (pa)
n_r	بردار نرمال سطح مشترک
n	ضریب غیرنیوتنی توانی
we	عدد وبر

علائم یونانی

β	طول لغزش
γ	پارامتر مقداردهی اولیه
δ	تابع دلتای دیراک
ε	ضخامت سطح مشترک
ε_r	لزجت تصنعی
μ	لزجت (mPa/s)
μ_r	نسبت لزجت
α	نسبت دبی
η	لزجت دینامیکی
θ	زاویه تماس
ρ	چگالی (kg/m^3)
σ	کشش سطحی بین دو فاز (mN/m)

τ	تنش برشی
τ_a	زمان تصنعی
ϕ	تابع لولست

زیرنویس ها

c	فاز پیوسته
d	فاز گسسته
in	ورودی
out	خروجی
∞	بی نهایت

۱- فصل اول : مقدمه

۱-۱- مقدمه و ضرورت انجام تحقیق

در سال‌های اخیر تحقیق بر روی دستگاه‌های میکروفلوئیدیک^۱ شتاب زیادی گرفته و موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در این زمینه شده است [۱]. میکروفلوئیدیک یک اصطلاح بوده که برای علم و فناوری کنترل رفتار سیالات در میکروکانال‌هایی که حداقل یکی از ابعاد آن‌ها کمتر از یک میلی‌متر باشد استفاده می‌شود. از این فناوری برای اولین بار برای دستگاه‌های تجزیه و آنالیز شیمیایی کوچک‌شده استفاده شد [۲،۳]. از ویژگی‌های شاخص دستگاه‌های میکروفلوئیدیک می‌توان به مقیاس طولی کوچک و رژیم جریان آرام^۲ در آن‌ها اشاره کرد [۴]. این فناوری، دانشی بین رشته‌ای 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. این روش‌ها در طیف وسیعی شامل ساخت میکرو ذرات تک‌پخش^۳، افزایش اختلاط، تبلور پروتئین‌ها، ترکیب نانوذرات و آنالیز میکروشیمیایی^۴ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۱۱]. تشکیل قطره در میکروکانال، کاربردهای فراوانی مثل امولسیون، کپسوله کردن دارو، علم پزشکی، بیوتکنولوژی، سیستم‌های میکروالکترومکانیک، سنتز، کریستالیزاسیون، واکنش‌های شیمیایی، محصولات آرایشی بهداشتی و صنایع غذایی و پلیمر و میکرو-راکتورها دارد و مسلماً یکنواختی قطرات کیفیت محصولات را تامین می‌کند و تشکیل قطره‌های منفرد جداشونده با فواصل یکنواخت نسبت به یکدیگر، بسیار مهم می‌باشد [۵-۸]. در گذشته در یک محفظه از رژیم‌های توربولانسی به منظور افزایش و بالا بردن جدایش قطره‌ها استفاده می‌گردید، که این کار بسیار پیچیده بوده است. اما امروزه با استفاده از دستگاه‌های میکروفلوئیدیک بستر رو به رشدی برای تولید انبوه و کنترل‌شده قطرات فراهم شده است. برای کنترل دقیق اندازه و شکل قطره‌ها از طریق دستگاه‌های میکروسیالی، آگاهی کامل از فرآیند و نحوه تشکیل قطره، حائز اهمیت است. این کاربردهای

^۱ Microfluidic devices

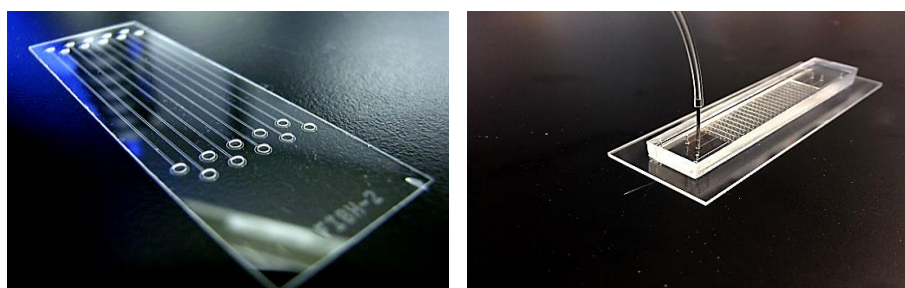
^۲ Laminar

^۳ Monodispersed

^۴ Micro chemical

گسترده، موجب تحقیقات آزمایشگاهی و عددی بی‌شماری در این زمینه شده است. قطرات مایع پخش‌شده در یک سیال مخلوط نشدنی ثانویه به‌ویژه زمانی که اندازه و توزیع اندازه قطرات در مقیاس میکرو و یا نانو باشد سودمند خواهد بود [۱۲]. این دستگاه‌ها این امکان را می‌دهند که بتوان بر روی اندازه‌ی قطره و توزیع آن کنترل داشت [۱۳]. دستگاه‌های میکروفلوئیدیک یک روش ساده برای تولید امولسیون‌هایی نزدیک به حالت تک‌پخش و دست یافتن به فرکانس شکل‌گیری بالا در دستگاه‌های مایع چند فازي هستند [۱۴]. از مزایای مهم این دستگاه‌ها می‌توان به هزینه پایین تولید، مقرون‌به‌صرفه بودن از لحاظ اقتصادی، کوتاه‌تر بودن زمان آنالیز، حداقل استفاده از نمونه‌ها و حداقل ضایعات تولیدی از محصولات، افزایش بهره‌وری و اشغال فضای خیلی کم اشاره کرد [۱۵، ۱۶]. در دستگاه‌های میکرو-فلوئیدیک 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 میکروکپسول-ها و نیز میکروذرات تک‌پخش به‌منظور دارورسانی هدفمند مواد مغذی و همچنین برای کپسوله کردن سلول‌های زنده باشد. علاوه‌براین، محدوده‌ی حجمی قطرات تک‌پخش که از پیکو لیتر تا نانو لیتر بوده و می‌توانند در میکروورگ‌های مشخص برای واکنش و اختلاط سریع استفاده شوند [۱۷-۱۹]. دستگاه-های میکروسیالی مبتنی بر قطره با توانایی تولید بالا، حوزه‌ای چالش‌برانگیز هستند. دستگاه‌های میکرو-فلوئیدیک یکپارچه حدود دو دهه است که در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی استفاده می‌شوند. ادغام فناوری-های نانوذرات و میکروواکنش‌گرها فرصت‌های زیادی را برای توسعه دستگاه‌های دارورسانی هوشمند و میکروواکنش‌گرها 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 سه بعدی و تجزیه و تحلیل تک‌سلولی استفاده می‌شود. دستگاه‌های میکروفلوئیدیک یکپارچه می‌توانند به‌آسانی به مولدهای انرژی خورشیدی، دستگاه‌های

سلول سوختی تعمیم یابند [۲۰]. در شکل ۱-۱ نمونه‌هایی از دستگاه‌های میکروفلوئیدیک ساخته شده با فن لیتوگرافی^۱ بر روی صفحات سیلیکون نشان داده شده است. جریانات چند فازی سیالات در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک را می‌توان به جریان‌های مبتنی بر قطره و جریانات موازی طبقه‌بندی کرد. در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک مبتنی بر قطره 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 شاهد تولید قطره خواهیم بود [۱۷-۲۰].



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

در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک از نوع جریان متمرکز شده کمتر شاهد رژیم جتی بوده و تشکیل و جدایش قطره در این نوع از میکروکانال‌ها بیشتر در رژیم چکه‌ای و رژیم فشردگی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش رفتار سیالات نیوتنی در فرآیند جدایش قطره مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

رفتار قطرات در جریان چندفازی به نیروهای مختلفی مانند نیروهای لزج، نیروی اینرسی، گرانش، کشش سطحی، فشار و غیره بستگی دارد. اعداد بی‌بعد بیان‌کننده نسبت اثرهای فیزیکی بوده که راهی برای ساده‌سازی مسائل پیچیده می‌باشد. مهم‌ترین اعداد بی‌بعد استفاده شده در این تحقیق عدد رینولدز و عدد موئینگی است. عدد رینولدز بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج بوده و از آن برای بیان نوع رژیم جریان استفاده می‌شود. عدد موئینگی نسبت نیروهای لزج به کشش سطحی است. در موئینگی‌های پایین کشش سطحی عاملی مهم بوده و باعث تولید پایدار قطرات می‌شود. در مقابل نیروی

^۱ Soft lithography

لزوج منجر به تغییر شکل بزرگ قطرات و شکل نامتقارن آن می‌شود. اعداد بی‌بعد مهم در این مطالعه، عدد موینگی (Ca)، عدد رینولدز (Re)، نسبت لزجت و نسبت نرخ جریان ورودی دو فاز است. علاوه بر این اندازه قطره، فاصله بین قطرات، فرکانس تولید قطرات و نیز زمان جدایش قطرات مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با داده‌های آزمایشگاهی و عددی موجود، مشخص شده است که نتایج به دست آمده از دقت و صحت کافی برخوردار است.

روش‌های ردیابی مرز مشترک و تسخیر مرز مشترک به عنوان دو نوع رهیافت مهم برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی هستند. روش‌های انتگرال مرزی و المان محدود روش‌های عمومی برای ردیابی مرز مشترک می‌باشند. در این مطالعه از روش لول‌ست برای ردیابی موقعیت فصل مشترک بین دو فاز و شبیه‌سازی تشکیل و جدایش قطره در یک میکروکانال از نوع جریان متمرکز شده که در آن دو سیال مخلوط نشدنی در جریان هستند استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهند با افزایش عدد موینگی و نسبت نرخ جریان اندازه قطرات تشکیل شده کوچک‌تر می‌شود، البته در اعداد موینگی و نسبت دبی بالای فاز پیوسته، تأثیر افزایش نسبت دبی و عدد موینگی بر اندازه قطرات کم‌تر می‌شود. در اعداد موینگی پایین تأثیر تغییر نسبت دبی بر روی اندازه قطرات بیشتر بوده ولی احتمال جدایش چندپخشی قطرات زیاد می‌شود. جدایش چندپخشی زمانی اتفاق می‌افتد که پس از جدایش قطره اصلی باریکه باقی‌مانده از فاز گسسته در اریفیس به عقب برگشته و کمی در اریفیس به رشد خود ادامه می‌دهد تا قطرات ثانویه جدا شوند.

۱-۲- رژیم‌های اصلی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک

به‌طور کلی در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک بسته به فعل و انفعالات دیواره کانال و قطرات سه رژیم عمده برای جدایش قطره مشاهده می‌شود که شامل رژیم فشردگی، رژیم چکه کردن و رژیم جتی

می‌شود [۲۳]. که به طور کلی این سه رژیم در امولسیون‌سازی در میکروکانال‌ها وجود دارد [۴۰-۳۸]. تحقیقات عددی نشان می‌دهد که شکستن قطرات به عدد موینگی و نسبت ویسکوزیته و قطر اولیه قطره وابسته است و همچنین نشان می‌دهد که این عدد می‌تواند پویایی قطره را توصیف کند [۲۴]. در تحقیقات صورت گرفته، رژیم‌های غالب تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک عموماً رژیم‌های چکه‌ای^۱ و جتی^۲ گزارش شده است [۲۷-۲۵]. رژیم فشردگی^۳ بیشتر در اتصال T- شکل و میکروکانال جریان متمرکز شده^۴ گزارش شده است [۳۰-۲۸]. سازوکار تشکیل قطره در هر رژیم متفاوت بوده و تحت تأثیر برهم‌کنش نیروهای مختلف شامل نیروهای بین سطحی^۵، نیروی لزج^۶، اینرسی و گرانشی است [۳۱].

عدد موینگی فاز پیوسته پارامتر مهمی در دسته بندی رژیم‌های جریان دوفازی در میکروکانال‌ها می‌باشد [۳۱ و ۲۹ و ۳۶]. با توجه به تعریف، L طول قطره و W_c عرض کانال میانی، سه رژیم جریان را می‌توان برای فاز گسسته پیدا کرد: رژیم فشردگی ($L > 2W_c$)، رژیم چکه کردن ($W_c < L < 2W_c$) و رژیم جتی ($L < W_c$). در رژیم فشردگی عدد موینگی تأثیر چندانی بر اندازه قطره ندارد. در واقع در این رژیم کشش سطحی یا لزجت دو سیال اهمیتی ندارد و اندازه قطره به شدت وابسته به نرخ جریان‌ها می‌باشد و با افزایش نسبت نرخ جریان قطرات بزرگتری تشکیل می‌شود. اما در مقابل در رژیم چکه کردن نیروهای تنش ویسکوز و عدد موینگی تأثیر زیادی بر اندازه قطره داشته و اندازه قطره تقریباً مستقل از نسبت نرخ جریان می‌باشد. در این حالت قطره‌ها به صورت تناوبی، مجزا از هم و با فرکانس ثابت از نوک کانال تشکیل می‌شوند و این رژیم در نسبت سرعت‌های پایین اتفاق می‌افتد و در نسبت جریان‌های کوچک نقطه جدایش همان نقطه تیز کانال T - شکل است. اما با افزایش نسبت نرخ جریان نقطه جدایش از

^۱ Dripping

^۲ jetting

^۳ squeezing

^۴ Flow focusing devices

^۵ Interfacial force

^۶ Viscous force

گوشه تیز قسمت شکل به طرف پایین دست جریان حرکت میکند. در اعداد موینگی و نسبت نرخ جریان بالا، نقطه جدایش به سمت پایین دست حرکت کرده و حالت جت پایداری را به وجود می آورد.

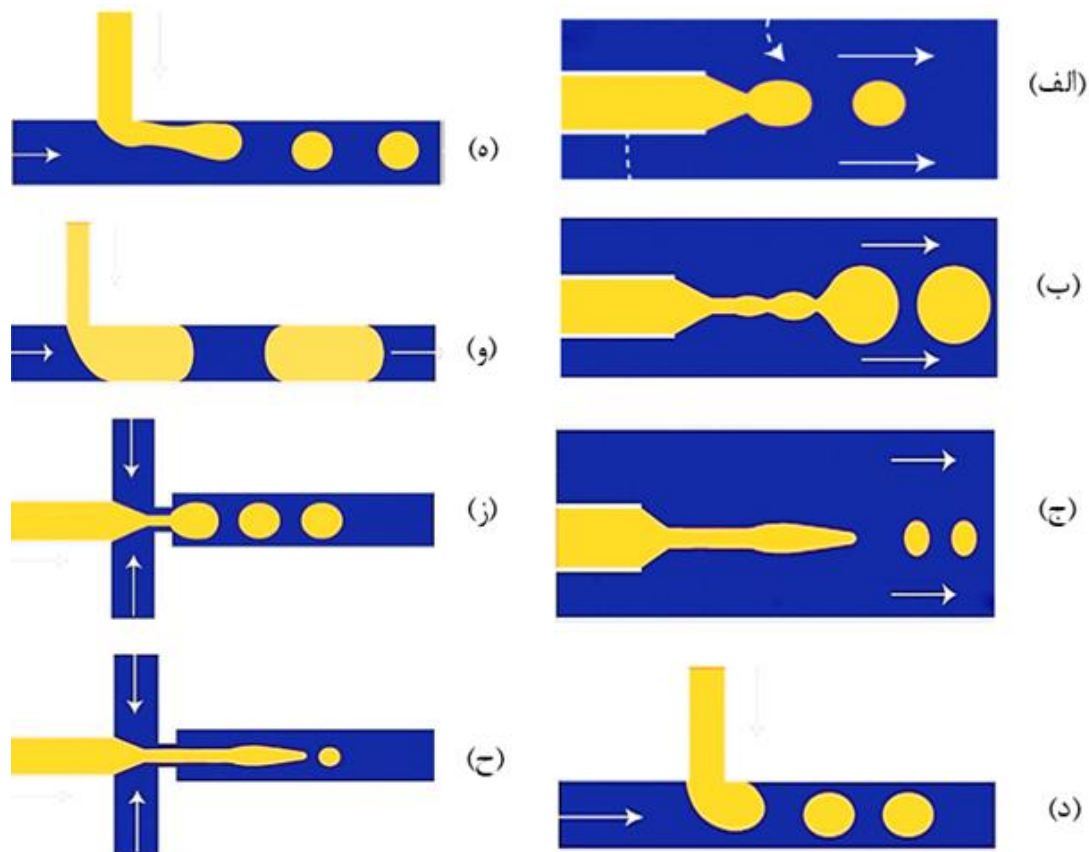
در رژیم چکه ای اندازه قطره توسط تعادل بین نیروی پسا که از فاز پیوسته بر قطره بیرون آمده اعمال می شود و نیروی کشش سطحی که در برابر کشیدگی باریکه فاز گسسته مقاومت می کند تعیین می شود [۱۳]. در رژیم جتی سیال گسسته از کانال میانی در ناحیه ای دورتر از نوک کانال جدا شده و تبدیل به قطره می گردد. این رژیم در نسبت سرعت های بالا رخ می دهد. از عدد موینگی^۱ فاز پیوسته می توان برای پیش بینی سازوکار حاکم بر تشکیل قطره استفاده کرد اگر $Ca_c < 0.01$ در رژیم فشردگی و اگر $0.03 < Ca_c < 0.01$ در رژیم چکه کردن قرار می گیرد. با افزایش بیشتر Ca_c ، نقطه جدایش به تدریج به پایین دست حرکت کرده و این امر منجر به یک گذار از رژیم چکه ای پایدار به رژیم جتی می شود [۴۲].

فرکانس تشکیل قطره به صورت معکوس زمان تشکیل بین دو قطره متوالی تعریف می شود. در اعداد موینگی کم با افزایش نسبت نرخ جریان، فاصله بین قطرات کاهش و زمان تشکیل بین دو قطره متوالی افزایش می یابد. با افزایش عدد موینگی و ورود به رژیم چکه کردن همین روند ادامه می یابد. اما از عدد موینگی تقریباً 0.04 به بعد افزایش نسبت نرخ جریان تاثیر چندانی در فاصله بین قطرات و زمان تشکیل بین دو قطره متوالی ندارد. این نتایج در شبیه سازی های [۸۵، ۲۹] و مشاهدات آزمایشگاهی [۸۸] نیز مشاهده شده است.

در رژیم فشردگی به دلیل این که تنش های برشی اعمال شده توسط فاز پیوسته نسبت به کشش سطحی کوچک هستند، قطره در حال شکل گیری رشد خود را حفظ کرده و تا زمانی که تقریباً تمام کانال اصلی را پر کند به رشد خود ادامه می دهد. و سیال فاز گسسته تمایل دارد تمام عرض کانال اصلی را اشغال کند گوشه تیز قسمت T- شکل، نقطه جدایش قطره است. در نتیجه فاز پیوسته به صورت یک فیلم

^۱ capillary

باریک شده و در فضای بین دیواره‌ی کانال و قطره محدود می‌شود و منجر به افزایش فشار فاز پیوسته در بالادست قطره می‌شود. با توجه به نیروی فشاری بیش‌ازحد ناشی از فاز پیوسته، فاز گسسته فشرده شده و تا زمانی که به شکل قطره گسسته شود این فشردگی ادامه می‌یابد [۲۹، ۳۷، ۲۳، ۴۶، ۳۶].



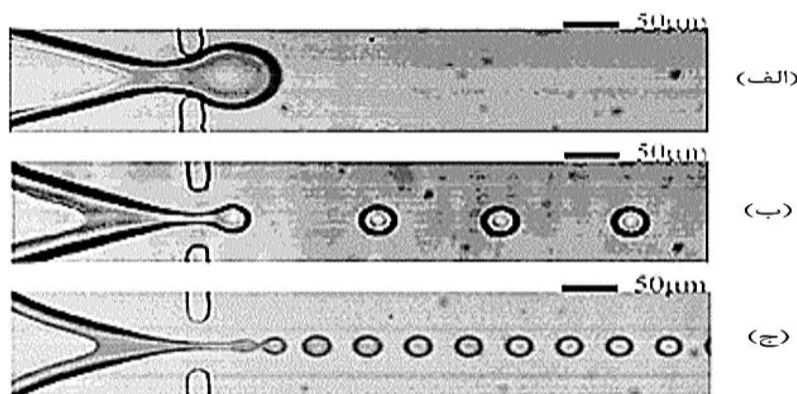
شکل ۱-۲: شماتیک دستگاه‌های میکروفلوئیدیک و رژیم‌های مختلف [۳۲].

در رژیم چکه‌ای، نیروی اینرسی قابل چشم‌پوشی بوده و نیروی بین سطحی نیروی غالب است (شکل ۱-۲-الف، د، ز). همچنین نیروی بین سطحی تمایل دارد قطره‌های در حال شکل‌گیری را به عقب و به سمت روزه نازل تزریق بکشد. تشکیل قطره زمانی شروع می‌شود که نیروی لزج از نیروی بین سطحی بیشتر شود و قطره‌ها در نزدیکی اریفیس^۱ شکل می‌گیرند [۳۳]. در رژیم چکه کردن اندازه قطره توسط تعادل بین نیروی پسا که از فاز پیوسته بر قطره بیرون آمده اعمال می‌شود و نیروی کشش

^۱ Orifice

سطحی که در برابر کشیدگی باریکه فاز گسسته مقاومت می‌کند تعیین می‌شود

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



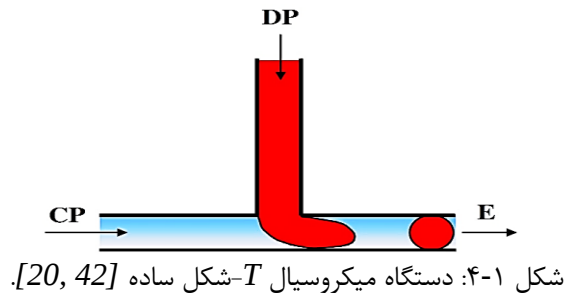
شکل ۱-۳: رژیم‌های متداول در میکروکانال‌ها (الف) - رژیم فشرده (ب) - رژیم چکه‌ای (ج) - رژیم جتی [۴۱]

۱-۳-۳-انواع دستگاه‌های میکروسیال

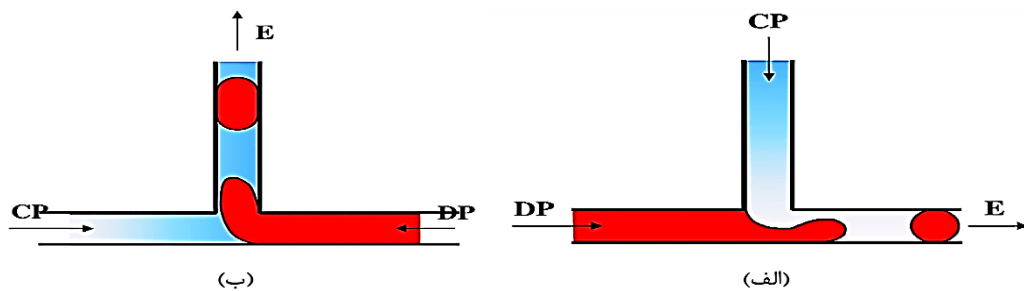
۱-۳-۱-دستگاه‌های T-شکل

میکروکانال‌های T-شکل ساده‌ترین شکل برای تولید قطرات و حباب‌ها هستند. هندسه استاندارد این دستگاه در شکل ۱-۴ نشان داده شده است و در آن فاز پیوسته از کانال اصلی وارد و فاز گسسته نیز از

طریق کانال عمودی وارد می‌شود [۴۲].



در شکل ۵-۱ برخی تغییرات و تبدیل‌های مختلف اعمالی روی شکل استاندارد میکروکانال T -شکل نشان داده شده است. در شکل ۵-۱-الف فاز گسسته از کانال اصلی افقی به فاز پیوسته وارد شده از کانال عمودی تزریق می‌شود. در شکل ۵-۱-ب فازهای گسسته و پیوسته از دو انتهای کانال اصلی افقی تزریق شده و خروجی آن‌ها از کانال عمودی است [۴۲].



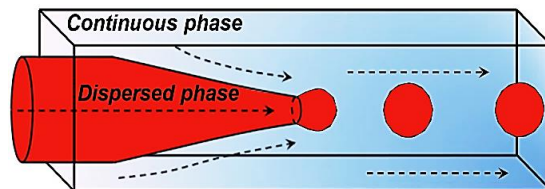
شکل ۵-۱: دستگاه میکروسیال T -شکل با دو تغییر ساده متداول [۴۲].

۱-۳-۲-دستگاه‌های هم جریان

طراحی و تحقیق بر روی دستگاه‌های هم جریان^۱ در جهت افزایش نرخ شکل‌گیری قطره و نیز ایجاد ترکیب‌های پیچیده است. شکل ۶-۱ یک شکل ساده از هندسه هم جریان را نشان می‌دهد. فاز پخش شونده از درون موئینگی میانی جریان می‌یابد، در حالی که فاز پیوسته از طریق موئینگی مربعی بیرونی و هم‌جهت با فاز پخش‌شونده جریان می‌یابد [۴۲]. در نرخ‌های پایین دو سیال، قطرات کروی از نوک لوله درونی شروع به رشد کرده و تا زمانی که به اندازه‌ای برسند که نیروی پسای لزج اعمال‌شده توسط

^۱ Co-flow devices

فاز پیوسته بیشتر از کشش سطحی شود، این روند ادامه می‌یابد (رژیم چکه کردن). در جریان‌های بالای فاز پیوسته، فاز گسسته باریک‌تر شده و به دلیل ناپایداری رایلی-پلاتیو، در پایین‌دست جریان به قطرات بیشتر گسسته می‌شود (رژیم جتی).



شکل ۱-۶: دستگاه میکروسیال هم‌جریان [۴۲].

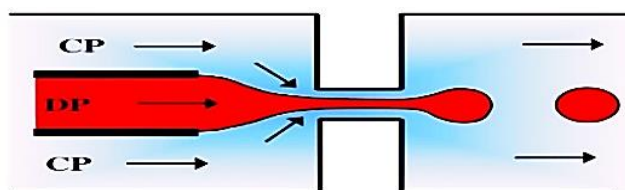
دو دسته از گذار از رژیم چکه کردن به رژیم جتی شناسایی شده است. دسته اول با نرخ جریان فاز پیوسته ایجاد می‌شود؛ با افزایش آن اندازه قطرات در حال شکل‌گیری در نوک لوله کاهش یافته و یک جت باریک طولانی شکل می‌گیرد و قطره از انتهای این جت جدا می‌شود. دسته دوم از گذار بین چکه کردن و جتی با نرخ جریان فاز گسسته ایجاد می‌شود؛ با افزایش آن قطره در حال ظهور به پایین‌دست جریان فشرده شده و در نهایت در انتهای جت شکل‌گرفته قطرات بزرگ جدا می‌شوند. در رژیم جتی اول تنش برشی اعمال‌شده از فاز پیوسته به قطره در مقایسه با کشش سطحی بزرگ‌تر است. در رژیم جتی دوم نیروهای اینرسی فاز گسسته در برابر کشش سطحی بزرگ‌تر است. در نسبت‌های خیلی بالا از نرخ جریان، تنش لزج اعمال‌شده توسط فاز پیوسته آن‌قدر بزرگ می‌شود که قطره‌ی در حال شکل‌گیری به خود شکل مخروطی^۱ گرفته و یک جت خیلی نازک از نوک‌تیز آن خارج و به قطرات ریز شکسته می‌شود.

۱-۳-۳- دستگاه‌های میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده

دستگاه میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده صفحه‌ای توسط آنا و همکاران توسعه داده شده‌اند [۴۴]. در شکل فاز گسسته از طریق کانال میانی و فاز پیوسته نیز از طریق دو کانال کناری تغذیه می‌شوند و هردو فاز مجبور هستند از یک اریفیس کوچک که در پایین‌دست این سه کانال واقع شده عبور

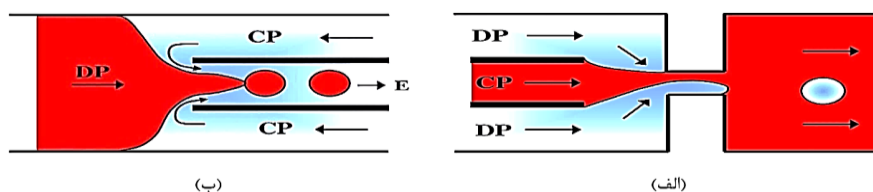
^۱ Taylor cone

کنند.



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

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



شکل ۸-۱: دستگاه های میکروفلوئیدیک با (الف) تر شدن دیواره های اریفیس با مایع کانال میانی (ب) جریان متمرکز- شده با جریان های مخالف [۴۲].

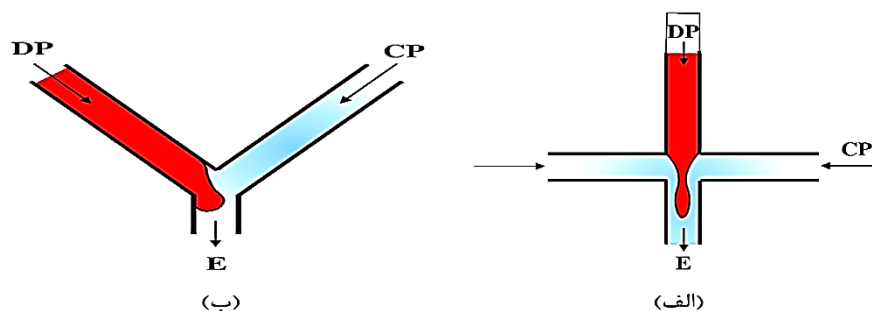
الگوی جریان دیگر در دستگاه های جریان متمرکز شده شامل یک جریان در جهت مخالف است که در شکل ۸-۱-ب نشان داده شده است و برخلاف طرح دستگاه هم جریان، در آن دو سیال از دو انتهای کانال یکسان و در جهت مخالف هم تغذیه شده و قطرات توسط کانال هم محور دیگر جمع آوری می شوند [۴۲]. از مزیت های عمده دستگاه های میکروسیالی جریان متمرکز شده می توان به توانایی تولید قطراتی با اندازه کوچک تر از ابعاد اریفیس در آن ها اشاره کرد. این ویژگی بسیار مفید است زیرا برای هر اندازه قطره داده شده، می توان از یک کانال با اندازه اریفیس بزرگ تر استفاده کرد ولی در قیاس با این دستگاه ها، در دستگاه هم جریان احتمال مسدود شدن اریفیس با ذرات معلق و یا هرگونه باقی مانده به دام افتاده به حداقل می رسد. سه رژیم عمده تولید قطره در دستگاه های میکروفلوئیدیک جریان متمرکز

شده شامل رژیم‌های فشردگی، چکه‌ای و رژیم جتی هستند [۴۴]. در رژیم فشردگی اندازه قطرات تقریباً برابر یا بزرگ‌تر از اندازه اریفیس بوده و در آن فاز گسسته بخش قابل توجهی از سطح مقطع اریفیس را اشغال می‌کند و فاز پیوسته مجبور می‌شود از شکاف باریک بین دیوار اریفیس و سطح مشترک بین دو فاز جریان یابد. این رژیم در اعداد موینگی پایین ($Ca_c < 0.1$) که در آن نیروی لزج ناشی از فاز پیوسته کوچک است ایجاد می‌شود [۳۸، ۴۵]. در رژیم چکه کردن، جت فاز گسسته به دلیل تنش‌های لزج ناشی از فاز پیوسته باریک شده و منجر به این می‌شود که اندازه‌های قطرات کمی کوچک‌تر از اندازه اریفیس شوند. این رژیم در عدد موینگی بالا ($Ca_c > 0.1$) و به‌خصوص هنگامی که فاز گسسته لزجت بالایی داشته و یا نسبت‌های جریان بالا باشد، ایجاد می‌شود [۳۸]. در رژیم جتی، فاز گسسته به شکل یک جت طولانی تا پایین‌دست اریفیس ادامه یافته و قطرات از انتهای این جت بلند جدا می‌شوند؛ در نتیجه کنترل بر جدایش قطره کمتر می‌شود. اندازه قطرات می‌تواند بزرگ‌تر از رژیم چکه کردن بوده و بزرگ‌تر از اندازه اریفیس باشد. میکروکانال‌های جریان متمرکز به‌طور معمول دارای کانال‌های مستطیلی متقارن و دارای ابعادی بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند [۴۳].

۱-۳-۴- میکروکانال‌های اتصال صلیبی و Y-شکل

اتصالات صلیبی^۱ به‌صورت شکل ۱-۹-الف بوده و در آن‌ها فاز پیوسته از دو طرف فاز گسسته جریان می‌یابد. شرایط جریان در اتصالات صلیبی را می‌توان با عدد وبر فاز گسسته $We_d = \frac{\rho_d \cdot L \cdot u_d^2}{\sigma}$ که در آن ρ_d و u_d به ترتیب چگالی و سرعت فاز گسسته، L قطر کانال و σ کشش سطحی هستند و Ca_c عدد موینگی فاز پیوسته تعریف می‌شود. برای We_d و $Ca_c > 1$ ، فاز گسسته به‌صورت قطره جدا نمی‌شود، در حالی که برای We_d و $Ca_c < 1$ ، جدایش فاز گسسته به صورت قطره اتفاق می‌افتد [۴۲].

^۱ cross junction



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

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

۴-۱- مروری بر کارهای انجام شده

تورسن^۱ و همکاران [۴۶] برای نخستین بار تشکیل قطرات آب در روغن را داخل میکروکانال‌ها مشاهده و نشان دادند که تشکیل قطره به نیروهای تنش برشی و کشش سطحی بین دو سیال بستگی داشته و طول قطره با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته کاهش می‌یابد.

آنا^۲ و همکاران [۱۲] برای اولین بار هندسه میکروکانال متقاطع را در یک دستگاه میکروفلوئیدیک ادغام کردند و به تولید امولسیون پرداختند. آن‌ها محدوده‌ای از رفتار تشکیل قطره در یک دستگاه میکروفلوئیدیک با کانال‌های مستطیلی متقاطع را ارائه دادند و روی تاثیر نسبت جریان فاز مایع بر الگوی تشکیل قطره مطالعاتی را انجام دادند. جریان‌های داخلی و خارجی کانال‌ها به ترتیب آب و روغن بود.

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

^۱ Thorsen

^۲ Anna

T-شکل و جریان متمرکز شده بودند. آن‌ها با آزمایش‌های زیاد و با تغییر عدد موینگی، کسر حجمی و نسبت لزجت، اندازه قطره را مشخص کردند و سه حالت متمایز جدایش وابسته به این سه پارامتر بی‌بعد و نوع جریان را مشاهده کردند.

آنا و همکاران [۴۴] به بررسی دینامیک جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداخته و با کنترل غلظت سورفکتانت و کنترل عدد موینگی و نسبت نرخ جریان‌های داخلی و خارجی چندین حالت متمایز گسسته شدن قطرات را مشاهده کردند. آن‌ها یک حالت جدایش جدید که رژیم شکل‌گیری رگه‌ای^۱ نامیده شد را مشاهده کردند. این رژیم شبیه به جریان قطرات ریز در نوک باریکه فاز گسسته بوده و در آن قطراتی کوچک در محدوده چند میکرومتر یا کوچک‌تر تولید می‌شوند. آن‌ها رشد رشته و حداکثر طول آن را به‌عنوان تابعی از تغییرات جریان و سورفکتانت موجود در محلول مشخص کرده و همچنین دوره جدایش قطره به‌عنوان تابعی از این متغیرها را نیز مشخص کردند.

سیواسامی^۲ و همکاران [۵۳] به‌صورت تجربی و نیز عددی و با کمک روش حجم سیال نمودارهای توزیع فشار فازهای گسسته و پیوسته را در دستگاه‌های میکروسیالی T-شکل ارائه و دریافتند که نمودارهای فشار فاز پیوسته و فاز گسسته تا زمانی که فرآیند تشکیل قطره ادامه یابد، تغییر می‌کند.

هوا^۳ و همکاران [۸۱] با استفاده از روش حجم محدود^۴ مکانیزم تشکیل قطره را در یک میکرو-کانال هم‌محور بررسی کردند. آن‌ها اثرات نرخ جریان فاز پیوسته، لزجت و کشش سطحی را بر سائز قطره در هر دو رژیم قطره‌ای و جتی بررسی کردند.

همچنین کوباد^۵ و همکاران [۴۷] به بررسی تشکیل حباب در یک هندسه متقاطع پرداختند. آن‌ها

^۱ Thread formation

^۲ Sivasamy

^۳ hua

^۴ front tracking

^۵ cubad

گزارش کردند که فروپاشی و جدایش حباب حاصل موازنه بین فشار فازهای گاز و مایع بوده و اندازه حباب توسط نسبت نرخ جریان‌های دو فاز قابل پیش بینی است.

گارتکی و همکاران [۳۶] به بررسی تشکیل قطره در یک میکروکانال T-شکل پرداخته و به این نتیجه رسیدند که تشکیل قطره از دو سیال مخلوط نشدنی در اعداد موینگی پایین به خاطر اختلاف فشار در راستای باریک شدگی قطره است و به عبارتی در اعداد موینگی بالا نیروی لزجت نیروی حاکم است و قطره‌ها توسط پایداری موینگی تشکیل می‌شوند.

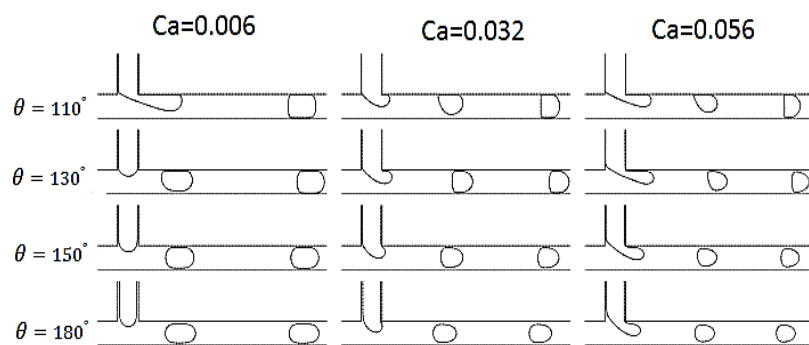
فو و همکاران [۷] دریافتند که فرایند فروپاشی حباب در یک میکروکانال متقاطع توسط مرحله فروپاشی کنترل می‌شود و نرخ و زمان فروپاشی گلویی به نسبت نرخ جریان‌های گاز-مایع و لزجت فاز مایع بستگی دارد.

لن^۱ و همکاران [۷۰] به بررسی میکروکانال هم‌محور حاوی جریان دو فازی مایع-مایع به کمک روش لول‌ست پرداخته و دو الگوی جریان چکه‌ای و جتی را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها گذار الگوی جریان و تغییرات اندازه قطره به وسیله تغییر سرعت و لزجت دو فاز را بررسی کرده و توزیع فشار و میدان سرعت برای هر دو رژیم جتی و چکه‌ای و نیز تغییرات فشار فاز گسسته در طول شکل‌گیری یک قطره را مورد بررسی قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها تفاوت ذاتی بین رژیم چکه‌ای و رژیم جتی را نشان داد. سیالات مورد استفاده شامل روغن سیلیکون نیوتنی و محلول آبی نیوتنی پلی سولفون (PSF) بودند.

لیو^۲ و همکاران [۳۹] گزارش کردند که سطح دیوار کانال نقش مهمی در تولید قطرات بزرگ‌تر با زاویه تماس کوچک‌تر به‌ویژه برای مقادیر کوچک عدد موینگی ایفا می‌کند. آن‌ها ادعا کردند که افزایش زاویه تماس به بیش از ۱۶۵ درجه تأثیر ناچیزی بر اندازه قطرات در تمامی مقادیر عدد موینگی دارد.

^۱ lan

^۲ liu



شکل ۱۰-۱: تأثیر عدد موینگی و زاویه تماس بر اندازه قطرات در هندسه T -شکل [۳۹].

لیو و همکاران [۶۴] تأثیر عدد موینگی، نسبت لزجت بین دو فاز و نسبت دبی جریان را روی تشکیل قطرات آب در روغن در هندسه‌های متقاطع توسط مدل چند فازي روش بولتزمن بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که هندسه کانال نقش مهمی در فرآیند تشکیل قطره دارد همچنین رابطه طول قطره با نسبت نرخ جریان‌های دو فاز یک تابع خطی بوده و با عدد موینگی رابطه‌ای توانی دارد.

ژانگ^۱ و همکاران [۸۳] دینامیک تشکیل قطره و تأثیر عدد موینگی، نسبت نرخ جریان، نسبت لزجت و تأثیر لزجت فاز پیوسته را در یک میکروکانال متقاطع با استفاده از روش بولتزمن شبکه‌ای و مدل انرژی آزاد بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها بیان‌گر تأثیر عدد موینگی بر اندازه قطرات است. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، با افزایش عدد موینگی اندازه قطرات کاهش می‌یابد.

وانگ^۲ و همکاران [۶۳] با استفاده از روش شبکه بولتزمن تأثیر ایجاد تغییرات هندسی کوچک در میکروکانال T -شکل را بررسی کرده و نشان دادند در نسبت سرعت کم بین فازها و در شرایط برابر در میکروکانال تغییر یافته، قطره‌های کوچک‌تری نسبت به هندسه T -شکل ساده تولید می‌شود. نتایج شبیه‌سازی وانگ نشان داد جریان چند فازي در میکروکانال‌ها نسبت به تغییرات هندسی کوچک بسیار حساس هستند.

^۱ zhang

^۲ Wang

وو^۱ و همکاران [۷۵] به بررسی تشکیل قطره در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک هم‌جریان و جریان متمرکز شده به صورت متقارن محوری پرداخته و تأثیر عدد موینگی بر رژیم‌های تشکیل قطره، اندازه قطره و فرکانس تشکیل قطره را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که در دستگاه‌های میکروسیالی جریان متمرکز شده، گذار بین رژیم‌های جتی و چکه‌ای در اعداد موینگی کم اتفاق افتاده و قطرات تولید شده در این هندسه از قطرات تولید شده در دستگاه‌های هم‌جریان کوچک‌تر و دارای توزیع اندازه گسترده و فرکانس بالاتر هستند. آن‌ها دریافتند که تشکیل قطره در هندسه جریان متمرکز شده به طور قابل توجهی تحت تأثیر شعاع اریفیس قرار داشته ولی طول اریفیس تأثیر چندانی بر تشکیل قطره ندارد. علاوه بر این هنگامی که شعاع اریفیس به اندازه کافی کوچک باشد و یا عدد موینگی بزرگ‌تر از 0.3 باشد، تنها رژیم جتی مشاهده می‌شود.

شی^۲ و همکاران [۸۵] تشکیل قطره را در میکروکانال T شکل و با استفاده از روش بولتزمن بررسی کردند. آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل: نسبت نرخ جریان (Q_d/Q_c) ، عدد موینگی (Ca) ، هندسه (W_d/W_c) و خاصیت ترشوندگی را در یک نسبت لزجت ثابت (μ_d/μ_c) مورد بررسی قرار دادند که Q_d ، W_d و μ_d به ترتیب عرض کانال فرعی، مقدار نرخ جریان و مقدار لزجت در فاز جداشونده و Q_c ، W_c و μ_c به ترتیب عرض کانال اصلی، مقدار نرخ جریان و مقدار لزجت در فاز پیوسته می‌باشد. همچنین از بررسی تأثیر نسبت نرخ جریان بر اندازه قطرات به این نتیجه رسیدند که، اندازه قطرات با افزایش نسبت نرخ جریان افزایش می‌یابد. آن‌ها تأثیر عدد موینگی را بر اندازه قطرات بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که با افزایش عدد موینگی اندازه قطرات کاهش می‌یابد.

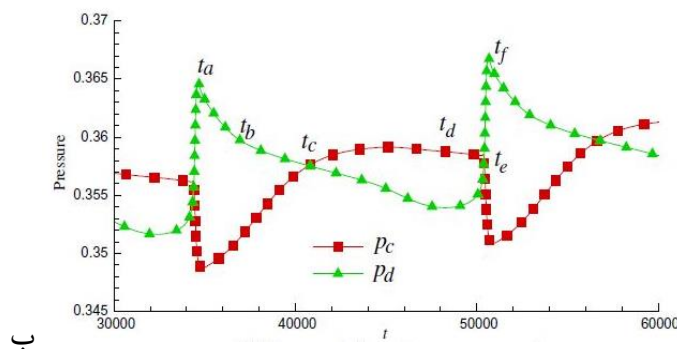
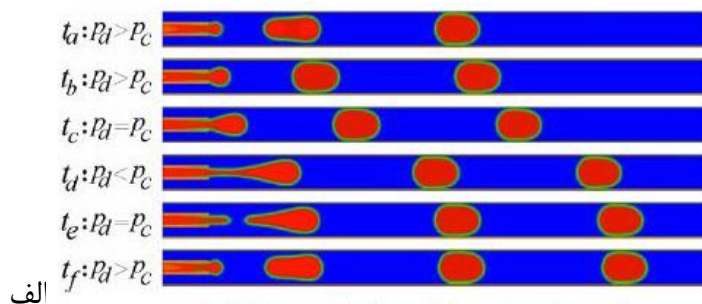
چنگ^۳ و همکاران [۶۲] فرآیند تشکیل قطره را در یک میکروکانال هم‌محور بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که، تشکیل قطره به علت اختلاف فشاری است که بین دو فاز به وجود می‌آید. در

^۱ wu

^۲ shi

^۳ cheng

شکل ۱-۱۱-ب) تغییرات P_d و P_c را بر حسب زمان نشان می‌دهد که به ترتیب P_c و P_d فشار فاز پیوسته و فاز جداشونده در مقطع میانی کانال بیرونی و کانال مرکزی، می‌باشد. قطره (فاز جداشونده) از t_a تا t_c شروع به پیشروی می‌کند تا در زمان t_d فرآیند جدایش قطره رخ می‌دهد و بعد از زمان t_d تا t_e قطره جدا می‌شود و در سیال پیوسته پیش می‌رود. رشد قطره به وسیله اختلاف فشار مثبت ادامه می‌یابد تا زمانی که اختلاف فشار از بین برود.



شکل ۱-۱۱: از نتایج پینگ-فرآیند تشکیل قطره در یک چرخه در یک میکروکانال هم-محور در یک عدد

موینگی ثابت $Ca = 0.145$ و در یک نسبت سرعت‌های ورودی ثابت 0.8 .

(الف) تغییرات زمانی تشکیل یک قطره در یک چرخه، (ب) تغییرات زمانی فشارهای P_d و P_c [۱۱].

تن^۱ و همکاران [۵۶] تشکیل قطرات آب در روغن و روغن در آب را در هندسه میکروکانال متقاطع به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که، اندازه قطرات با افزایش لزجت

^۱ Tan

سیال پیوسته، کاهش می‌یابد. درحالی‌که با افزایش دبی سیال جداشونده به آرامی افزایش می‌یابد.

آریاگا^۱ و همکاران [۵۷]، با به‌کارگیری هندسه‌ای شامل دو کانال هم‌محور (کو-فلوئینگ) نتایج مربوط به فرآیند امولسیون در ابزارهای میکروسیالی مایع-مایع را در لزجت‌های مختلف ارائه کردند.

علیزاده و همکاران [۸۹]، از مدل تابع مشخصه‌ی برای شبیه‌سازی تشکیل قطره در فرآیند امولسیون (ترکیب دو سیال مخلوط‌نشده) در میکروکانال کو-فلوئیدینگ (هم‌محور) که دارای هندسه‌ای پیچیده با سه ورودی می‌باشد، استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، فرآیند تشکیل قطره را تحت گستره وسیعی از تغییرات دبی جریان، نسبت لزجت و کشش سطحی بین دو فاز شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دو نوع رژیم جریان چکه کردن^۲ و جتی^۳ (جتی باریک و جتی پهن) بر رفتار جریان در فرآیند تشکیل قطره حاکم است. آن‌ها دریافتند که، رژیم چکه کردن حالتی از فرآیند تشکیل قطره می‌باشد که در آن قطره‌ها به صورت تناوبی، مجزا از هم و با فرکانس ثابت از نوک جریان کانال میانی تشکیل می‌شوند. این رژیم در نسبت سرعت‌های پایین دو فاز اتفاق می‌افتد. یکی دیگر از انواع رژیم‌های جریان حاکم بر فرآیند تشکیل قطره، رژیم جتی نام دارد که، در آن سیال جدا-شونده از کانال میانی، در ناحیه‌ای دورتر از نوک نازل، جدا شده و تبدیل به قطره می‌شود که نتایج آن‌ها نشان می‌داد که این رژیم در سرعت‌های بالای هر دو سیال رخ می‌دهد. در حالتی که سرعت سیال کانال بیرونی بالا باشد، قطره‌ها در ناحیه انتهایی جت شکل گرفته و جت باریک تشکیل می‌شود. نوع دوم رژیم جتی با افزایش دبی جریان سیال کانال میانی رخ می‌دهد، یک جت با انتهای پیاپی شکل و کشیدگی پهن تشکیل می‌شود و جدایش قطره در انتهای جت رخ می‌دهد. برخلاف رژیم چکه کردن، هر دو حالت رژیم جتی ناپایدار بوده و قطره‌های غیریکسان با اندازه‌های بزرگ و کوچک تشکیل می‌شوند.

همچنین آن‌ها در بررسی عدد موینگی دریافتند که در یک نسبت سرعت ثابت با افزایش عدد

^۱ Arriaga

^۲ dripping

^۳ jetting

موینگی اندازه قطره‌ها کاهش یافته و فرکانس تشکیل افزایش می‌یابد. به طور کلی در بررسی رفتار جریان در میکروکانال‌ها، هنگامی که عدد موینگی کوچک باشد تشکیل قطره تحت تاثیر فشار اطراف خود می‌باشد. به عبارت دیگر قطره‌ها عمدتاً توسط اختلاف فشار بین دو فاز پیوسته وجداشونده بریده می‌شوند. در این حالت قطره‌ها بزرگتر از عرض کانال بوده و اصطلاحاً اسلاگ^۱ تشکیل می‌شود.

هنگامی که عدد موینگی بزرگ می‌شود نیروی لزجت به اندازه کافی قوی می‌باشد تا بر نیروی کشش سطحی غلبه کند و قطره‌ها اغلب با استفاده از ناپایداری برشی شکل می‌گیرند. نیروی کشش سطحی در این حالت به اندازه کافی قوی نیست تا بر نیروی برشی اعمالی از فاز پیوسته غلبه کند در نتیجه فاز جداشونده تحت تاثیر این نیروی اعمالی به صورت یک جریان باریک کشیده می‌شود. در نهایت قطره‌هایی کروی با شعاع‌هایی بسیار کوچک‌تر از عرض کانال در نوک فاز کشیده شده، تشکیل می‌شوند.

آن‌ها تاثیر نسبت سرعت بین فازها را بر فرآیند تشکیل و اندازه قطره‌ها بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که در یک عدد موینگی ثابت، با افزایش نسبت جریان، اندازه قطره‌ها کاهش می‌یابد زیرا با افزایش سرعت جریان فاز پیوسته، میدان فشار پشت قطره زمان کمتری برای شکل گرفتن دارد و در نتیجه قطره‌ها زودتر جدا شده و قطر قطره‌ها کاهش می‌یابد.

تانگ^۲ و همکاران [۵۵]، تشکیل قطرات نیوتونی و غیرنیوتونی را در یک سیال پیوسته غیرنیوتونی در میکروکانال‌های T شکل و میکروکانال هندسه متقاطع با استفاده از روش انرژی آزاد بررسی کردند. آن‌ها تاثیر ضریب غیرنیوتونی توانی (n)، لزجت (μ) و کشش سطحی (σ) را بر تشکیل قطرات مطالعه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب غیرنیوتونی مدل توانی در سیال پیوسته، لزجت سیال پیوسته افزایش یافته که این مانع از رشد قطره در سیال پیوسته می‌شود. بنابراین با افزایش ضریب

^۱ slug

^۲ Tang

غیرنیوتونی توانی در سیال پیوسته، اندازه قطره کاهش می‌یابد و فرکانس تشکیل قطرات افزایش خواهد یافت. آن‌ها همچنین دریافتند که با کاهش اندازه کشتی سطحی، طول قطرات کاهش می‌یابد.

تانگ و همکاران [۶۶] تشکیل قطره نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی را در میکروکانال‌های T-شکل و جریان متمرکز شده را با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند و پارامترهای مختلف شامل نسبت نرخ جریان، عدد موینگی، هندسه و خواص ترشوندگی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که اندازه و شکل قطرات علاوه بر خواص سیال مانند نسبت نرخ جریان و عدد موینگی به شرایط خارجی جریان مانند هندسه دستگاه و خواص ترشوندگی دیواره‌ها کانال وابسته است. با افزایش عدد موینگی، نقطه جدایش قطره از گوشه اتصال T-شکل و نیز از اریفیس به پایین دست آن‌ها حرکت می‌کند. آن‌ها گزارش کردند که میکروکانال T-شکل با کانال جانبی عریض قطراتی با طول بزرگ و میکروکانال جریان متمرکز شده با اریفیس عریض نیز به احتمال فراوان قطراتی با قطر بزرگ تولید می‌کنند.

همچنین کوباد^۱ و همکاران [۴۷] به بررسی تشکیل حباب در یک هندسه متقاطع پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که فروپاشی و جدایش حباب حاصل موازنه بین فشار فازهای گاز و مایع بوده و اندازه حباب توسط نسبت نرخ جریان‌های دو فاز قابل پیش‌بینی است.

مالوگی^۲ و همکاران [۵۰] به بررسی فرآیند جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداختند. آن‌ها تولید میکروقطرات آبی در یک دستگاه جریان متمرکز شده حاوی سیالات آب و روغن را با ترکیب الکترودهایی با پوشش عایق که اجازه کنترل پیوسته ترشوندگی آب را می‌دهد؛ مورد بررسی قرار دادند. برحسب فشار ورودی آب و روغن و پس از اعمال ولتاژ مشخص شد که سه نوع شرایط عملیاتی شامل سطح مشترک پایدار آب و روغن، تولید قطره و تشکیل جت آرام ایجاد می‌شود. آن‌ها

^۱ Cubaud

^۲ Malloggi

بیان کردند که کنترل کامل بر تولید قطره در یک محدوده تعریف شده مناسب از فشار ورودی، ترشوندگی الکتریکی و فشار هیدرواستاتیکی در محل اتصال به دست می آید.

تان^۱ و همکاران [۵۱] تشکیل قطرات آب در روغن و روغن در آب را در هندسه میکروکانال متقاطع به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که اندازه قطرات با افزایش لزجت سیال پیوسته، کاهش می یابد در حالی که با افزایش نرخ جریان سیال گسسته به آرامی افزایش می یابد.

علاوه بر این نای^۲ و همکاران [۵۲] به تشکیل قطره در هندسه های جریان متمرکز شده پرداخته و نتایج مربوط به فرآیند امولسیون سازی در دستگاه های میکروسیالی مایع-مایع را در لزجت ها و نسبت دبی های مختلف ارائه کردند.

همچنین تائوتائو^۳ و همکاران [۵۴] دینامیک جدایش و تشکیل قطره در رژیم های چکه ای و جتی و گذار بین این رژیم ها را در دستگاه های جریان متمرکز شده مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق آن ها مایعات با لزجت بالاتر به عنوان فاز گسسته در سیالات با لزجت پایین تر تزریق شدند. در رژیم جتی، عرض جت پایدار با نسبت لزجت و نسبت نرخ جریان هر دو فاز تحت تأثیر قرار می گیرد و ارتباط بین اندازه قطره و نسبت نرخ جریان هر دو فاز می تواند با رابطه قانون-توانی با توان وابسته به نسبت لزجت هر دو فاز درجه بندی شود. آن ها نشان دادند بیشترین ناپایداری ناپایا به نسبت لزجت هر دو فاز وابسته بوده و تقریباً مستقل از نسبت نرخ جریان هر دو فاز است.

مویلی^۴ و همکاران [۶۵] به بررسی تشکیل قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی پرداخته و یک مدل توانا برای پیش بینی مقادیر غلظت و نرخ جریان در حالتی که جریان قطرات ریز در نوک باریکه فاز گسسته ایجاد می شود را توسعه دادند. با توجه به این که در مشاهدات آزمایشگاهی در این حالت

^۱ Tan

^۲ Nie

^۳ Taotao

^۴ Moyle

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

همچنین جاناتان^۱ و همکاران [۶۷] با استفاده از شبکه بولتزمن به بررسی رفتار دینامیکی قطره با نیروی ترموکپیلاری در میکروکانال‌ها پرداختند. کار آن‌ها نشان داد که شبکه بولتزمن یک ابزار شبیه‌سازی برای توسعه دستگاه‌های میکروفلوئیدیک مبتنی بر قطره است. هندسه مورد مطالعه نیز از نوع T-شکل بود.

چونگ^۲ و همکاران [۶۸] یک روش کنترل اندازه حباب تولیدشده در دستگاه جریان متمرکز شده را گزارش کردند. آن‌ها با یک مبدل مافوق صوت جریان آکوستیک را به سطح مشترک بین گاز و مایع القاء کردند. آن‌ها بیان کردند جریان القایی به‌طور زیادی بر روند شکل‌گیری حباب‌های گاز اثر می‌گذارد. سطح مشترک نوسانی به‌صورت یک پمپ عمل کرده و نرخ جریان گاز را به میزان قابل توجهی افزایش داده و قطرات بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. آن‌ها نشان دادند که این روش توانایی بهبود تولید حباب‌های میکروسیالی برای تولید حباب‌های قابل تنظیم را دارد.

وونگ^۳ و همکاران [۶۹] به‌صورت عددی اثر پارامترهای رئولوژیکی بر تشکیل قطرات غیریوتنی و رفتار نازک‌شونده برشی را بررسی کردند. آن‌ها یک میکروکانال T-شکل را با روش ردیابی فصل مشترک لول‌ست مورد بررسی قرار داده و از مدل لزجت کاریو-یاسودا برای تعیین لزجت سیال غیریوتنی

^۱ Jonathan

^۲ Chong

^۳ Wong

استفاده کردند. آن‌ها به صورت مجزا اثر پارامترهای مختلفی مانند نسبت لزجت صفر به لزجت بی‌نهایت (μ_0 / μ_∞) را بر فرآیند تشکیل قطره نشان دادند.

علاوه بر این لی^۱ و همکاران [۳۸] به بررسی کنترل جدایش قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی با استفاده از یک میدان الکتریکی خارجی در دستگاه‌های میکروفلوئیدیک پرداختند. در تحقیق آن‌ها از محلول آبی نیوتنی با سورفکتانت SDS و روغن سیلیکون نیوتنی استفاده شد. آن‌ها اثر میدان الکتریکی استاتیکی خارجی در فرآیند جدایش را با استفاده از روش لول‌ست پایستار که با مدل الکترواستاتیکی همراه شد، مورد بررسی قرار دادند. شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که اثر متقابل میدان الکتریکی و بار الکتریکی بر سطح مشترک سیال باعث القای نیروی الکتریکی می‌شود و این نیرو نقش مهمی در کنترل شکل‌گیری قطره دارد. اگر سیستم میکروفلوئیدیک با یک میدان الکتریکی با قدرتهای مختلف به کار گرفته شود، فرآیند جدایش قطره سه رژیم متمایز را تجربه می‌کند. در رژیم اول که در آن ولتاژ الکتریکی پایین اعمال می‌شود، اندازه قطرات تقریباً به صورت خطی با افزایش ولتاژ کاهش می‌یابد. در رژیم دوم که در آن میدان الکتریکی دارای قدرت متوسط است اندازه قطرات با ولتاژ اعمالی افزایش می‌یابد. در رژیم سوم که در آن ولتاژ اعمالی بسیار زیاد است، اندازه قطرات دوباره با ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد. آن‌ها دریافتند زمانی که لزجت فاز گسسته خیلی بیشتر از فاز پیوسته باشد در این صورت میکروفلوئیدیک‌های مبتنی بر قطره فعال؛ که دستگاه‌های میکروفلوئیدیک معمول را با محرکه‌های خارجی مانند میدان‌های خارجی DC ترکیب می‌کند توانایی زیادی در کنترل جدایش قطره دارند.

اشرف^۲ و همکاران [۷۱] به ارائه روش دقیق محاسباتی برای ردیابی سطح مشترک بین دو فاز با روش لول‌ست پرداختند. حل معادله با مشتقات جزئی وابسته به زمان معادلات لول‌ست با جایگزینی مشتقات جزئی فضایی با تفاضل مرکزی و با طرح رانگ-کوتا مرتبه دو برای پیشروی زمانی انجام شد.

^۱ Li

^۲ Ashraf

هرناندز^۱ و همکاران [۷۲] یک مطالعه عددی و آزمایشگاهی بر روی دستگاه میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده با سیالات نیوتنی و با کانال خروجی هم‌اندازه با اریفیس به‌منظور تولید قطرات تک‌پخش و در ابعاد میکرو و با قابلیت کنترل بهتر انجام دادند. سه پارامتر هندسی تأثیرگذار که شامل فاصله بین انتهای کانال ورودی فاز گسسته تا ابتدای اریفیس، طول و عرض کانال خروجی هستند، شناسایی شدند. سیالات مورد استفاده شامل روغن سیلیکون نیوتنی در محلول آبی SDS نیوتنی است. داده‌های حاصل از شبیه‌سازی از یک مطالعه پارامتری کامل و شبیه‌سازی المان محدود استخراج شد.

فنگ^۲ و همکاران [۷۳] به بررسی فرآیند تشکیل قطره در هندسه میکروفلوئیدیک جریان متمرکز شده در اعداد موئینگی پایین به روش المان محدود پرداختند. در تحقیق آن‌ها آب به‌عنوان فاز گسسته و روغن به‌عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته شده و اثر نرخ جریان فاز گسسته بر فرآیند شکل‌گیری قطره و سرعت قطره در پایین‌دست جریان و دوره تناوب فرآیند تشکیل قطره بررسی شد.

همچنین نکویی^۳ و همکاران [۷۴] به شبیه‌سازی فرآیند تشکیل قطرات نیوتنی در فاز پیوسته نیوتنی در هندسه میکروسیالی T -شکل پرداختند. آن‌ها به بررسی ارتباط بین حجم قطره با عدد موئینگی ($0.5 < Ca < 0.01$) و نسبت لزجت فاز قطره به فاز پیوسته ($15 < \frac{\mu_d}{\mu_c} < 0.1$) پرداخته و دریافتند که برای همه نسبت‌های لزجت بررسی‌شده در پژوهش آن‌ها اندازه قطرات با افزایش عدد موئینگی، کاهش می‌یابد.

۵-۱-نواوری تحقیق

اکثر مطالعات انجام‌شده در میکرو کانال های T -شکل به‌صورت آزمایشگاهی و برای سیالات خاص بوده و کمتر به مطالعه عددی رفتار دوفازی سیالات پرداخته شده است. در تحقیق حاضر یک

^۱ Hernández

^۲ Feng

^۳ Nekouei

مدل عددی بر پایه‌ی تابع لول‌ست^۱ برای شبیه‌سازی دینامیک سیالاتی قطرات (با خواص نیوتنی) و چگونگی شکل‌گیری و انتشار قطرات پرداخته شده است. همچنین اثر پارامترهای مختلف مانند نرخ جریان، لزجت، کشش سطحی و ترشوندگی سطح (با تمرکز بر اعداد بی بعد) بر روی قطر قطره، فاصله بین قطره‌ها، فرکانس تولید و طول جدایش قطره انجام شده است و تطابق رفتاری بین مدل عددی تحقیق حاضر و نتایج عددی و آزمایشگاهی حاصل شده است.

۱-۶- مروری بر فصل‌های پایان نامه

در فصل دوم به روش تحقیق و اعداد بی‌بعد و بیان فیزیک قطره و روش‌های ردیابی سطح پرداخته شده است. در فصل سوم به معادلات حاکم بر مساله و در فصل چهارم به معرفی سیالات استفاده شده، مدل سازی عددی میکروکانال T-شکل و شرایط مرزی و اولیه و زاویه تماس پرداخته شده است. در فصل پنجم جدایش قطرات و عوامل موثر بر آن شامل اعداد موینگی نسبت لزجت و دبی و تاثیر آن بر اندازه قطره و فرکانس و فاصله بین قطرات و زمان جدایش مورد بحث قرار گرفته است. همچنین اعتبارسنجی نتایج حاصل با نتایج عددی و آزمایشگاهی کارهای انجام شده ارائه گردیده است. در فصل ششم به پیش‌بینی قطر قطره با استفاده از شبکه عصبی تطبیقی انفیس و آنالیز تاگاچی پرداخته شد و نتیجه-گیری کلی تحقیق و پیشنهادهایی برای تحقیقات آینده ارائه شده است.

^۱ Level set

۲- فصل دوم: روش تحقیق

۱-۲ - اعداد و پارامترهای بی بعد

اغلب پدیده‌هایی که در طبیعت و در علم مکانیک سیالات با آن‌ها مواجه می‌شویم به متغیرهای زیادی وابسته هستند و این وابستگی باعث می‌شود تجزیه و تحلیل این پدیده‌ها دشوار شود. به کمک آنالیز ابعادی^۱ می‌توان به جای بررسی مجزای پارامترها و تأثیرات آن‌ها، اعداد بی بعد حاکم بر مسئله را شناسایی و در تجزیه و تحلیل مسئله از آن‌ها بهره برد. آنالیز ابعادی در مکانیک از اهمیت کلیدی برخوردار است و در آن از میان تعدادی نیرو که در مقیاس‌های مختلف در میکروکانال به جریان سیال اعمال می‌شوند، مهم‌ترین و تأثیرگذارترین آن‌ها در برابر دیگر آثار را مورد بررسی و قضاوت قرار می‌دهند. اعداد بی بعد^۲ 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 چند فاز به نیروهای مختلفی مانند نیروهای لزج، نیروی اینرسی، گرانش، کشش سطحی بین دو فاز، دبی جریان‌های ورودی یا همان سرعت‌های متوسط فازها در هر ورودی و لزجت‌های دینامیکی دو فاز و فشار و غیره بستگی دارد. تأثیر نسبی آن‌ها بر جریان را می‌توان با پارامترهای بی بعد زیر شرح داد:

نسبت لزجت: نسبت لزجت دو سیال به صورت $\mu_r = \mu_c / \mu_d$ تعریف می‌شود که در این جا اندیس d نشان‌دهنده فاز گسسته و اندیس c بیانگر فاز پیوسته است.

نسبت نرخ جریان: عدد بی بعد مهم دیگر در این مساله $\alpha = Q_c / Q_d$ یا همان نسبت نرخ جریان و یا همان نسبت سرعت‌های ورودی دو فاز می‌باشد.

عدد رینولدز^۳: این عدد بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای لزج بوده و از آن برای بیان نوع رژیم جریان استفاده می‌شود. کاربرد مهم این عدد در تعیین آرام یا آشفتگی بودن جریان است.

^۱ Dimensional Analysis

^۲ Dimensionless Numbers

^۳ Reynolds number

نیروهای اینرسی با وجود این که اثرات خاصی بر میکروقطرات با سرعت بالا و یا در زمان گسسته شدن آنها دارد، اما در بیشتر موارد در مقیاس میکرو، می توان آن را نادیده گرفت.

$$Re = \frac{\rho_c u_c w_c}{\mu_c} \quad (1-2)$$

عدد موینگی^۱: یکی از اعداد بی بعد مهم در میکروکانال ها برای فهم الگوهای جریان چند فازی

استفاده می شود به صورت نسبت نیروهای لزج یا ویسکوز به کشش سطحی تعریف می شود. این عدد به صورت رابطه زیر تعریف می شود. که در آن u_c ورودی فاز پیوسته. μ_c لزجت دینامیکی فاز پیوسته و σ کشش سطحی بین دو فاز است. در موینگی های پایین کشش سطحی عاملی مهم بوده و باعث تولید پایدار قطرات می شود. در مقابل نیروی لزج نقش مهمی داشته و منجر به تغییر شکل بزرگ قطرات و شکل نامتقارن آن می شود.

$$ca = \frac{\mu_c u_c}{\sigma} \quad (2-2)$$

عدد وبر: این عدد نسبت نیروی اینرسی به نیروی کشش سطحی را بیان می کند. در میکرو-

کانال ها این عدد معمولاً خیلی کوچک بوده و بنابراین کشش سطحی اثر برجسته ای روی جریان دارد.

$$We = \frac{\rho u^2 L}{\sigma} \quad (3-2)$$

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

می شود:

$$Bo = \frac{\Delta \rho \cdot g \cdot L^2}{\sigma} \quad (4-2)$$

که در آن $\Delta \rho$ اختلاف چگالی جرمی بین دو سیال است. در ابعاد میکرو به دلیل کوچک بودن

^۱ Capillary number

ابعاد میکروکانال $Bo \ll 1$ بوده و اثر گرانش قابل صرف نظر کردن است.

اعداد وبر، رینولدز و باند در جریان میکرو قطره کوچک هستند. علاوه بر این پارامترهای تأثیرگذار بسیاری مانند محدودیت‌های دیواره میکروکانال و ترشوندگی دیواره‌ها و نسبت ابعاد هندسی میکروکانال اثرات مهمی بر جریان چند فازی 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.

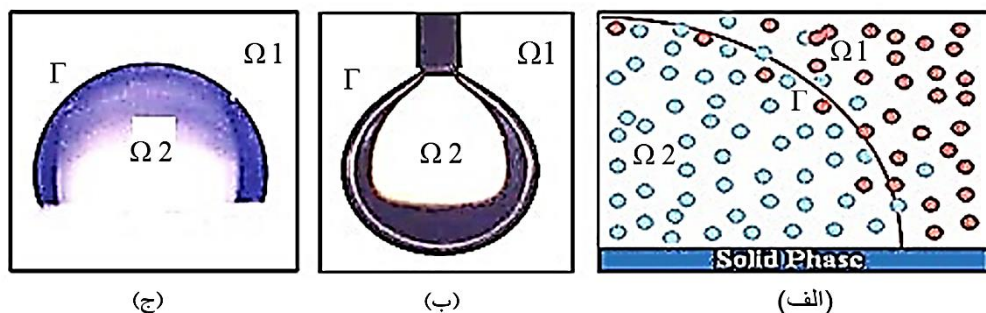
۲-۲- سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی

سیال نیوتنی ماده‌ای است که فاقد تنش تسلیم باشد و تنش برشی در آن به صورت خطی با نرخ برش تغییر کند. در این سیالات، نسبت تنش برشی به نرخ برش مقدار ثابتی است که این مقدار ثابت، لزجت نامیده می‌شود. چنانچه سیالی یکی از شرایط سیال نیوتنی را نداشته باشد سیال غیرنیوتنی نامیده می‌شود [۸۴].

۲-۳- فیزیک مساله

۲-۳-۱- سطح مشترک و کشش سطحی

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



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

برای تعریف تابع کشش سطحی از یک قطره آویزان شده و یا قطره چسبیده به سطح استفاده می‌شود. با توجه به وجود اثر کشش سطحی در قطره، فشار داخل قطره همیشه بیشتر از فاز پیوسته است. به طور معمول از معادله یانگ-لاپلاس^۱ برای تعیین اختلاف فشار بین دو سمت یک سطح مشترک بر حسب شعاع انحنا، استفاده می‌شود که مقدار این اختلاف فشار که فشار لاپلاس^۲ نیز نامیده می‌شود بر حسب کشش سطحی به صورت معادله زیر بیان می‌شود.

$$\nabla p_L = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (۱-۲)$$

که در اینجا σ کشش سطحی بین دو فاز و R_1, R_2 دو شعاع انحنای سطح مشترک هستند. در دستگاه‌های میکروسیالی، به دلیل این که ابعاد استفاده شده کوچک هستند کشش سطحی نه تنها بر نیروی گرانشی بلکه بر دیگر نیروهای فیزیکی مانند نیروهای اینرسی و لزج نیز غالب می‌شود.

^۱ Young-laplace equation

^۲ Laplace pressure

۲-۳-۲-سورفکتانت

سورفکتانت یا عامل فعال‌کننده سطحی^۱ ترکیب‌های فعال سطحی بوده که دارای گروه‌های آب‌دوست^۲ و گروه‌های آب‌گریز^۳ هستند. سورفکتانت‌ها به‌تناسب ساختار مولکولی در حلال‌های آلی و آب واکنش داده و باعث کاهش کشش سطحی می‌شوند. ساختار شیمیایی این مواد اغلب شامل یک مولکول نسبتاً طولانی با یک انتهای آب‌گریز و انتهای دیگر آب‌دوست است. سورفکتانت‌ها وقتی با غلظت کم به یک مایع اضافه می‌شوند، خواص سطحی مایع را تغییر می‌دهند.

۲-۳-۳-زاویه تماس^۴

به لحاظ تئوری زاویه‌ای است که یک قطره در سه مرز فاز که در آن سطح مشترک مایع-مایع یا گاز-مایع با یک سطح جامد با هم تلاقی می‌کنند، ایجاد می‌کند. در صورتی که سطح مشترک بین دو فاز با سطح زاویه‌ای کمتر از ۹۰ درجه داشته باشد سیال تمایل به خیس کردن سطح دارد در این صورت سطح را آب‌دوست و اگر این زاویه بیشتر از ۹۰ درجه باشد، سیال به شکل فشرده در می‌آید چنین سطحی را آب‌گریز می‌نامند. زاویه تماس دیوار، نقش مهمی را در طول نهایی قطره در اعداد مویینگی پایین ایفا می‌کند. اندازه قطره در اعداد مویینگی پایین خیلی بزرگ است و قطرات پلاگ شکل هستند و در نتیجه بخش بزرگی از قطره به دیواره‌های کانال چسبیده است. بنابراین قطرات تولید شده در کانال‌هایی با دیواره‌های آب‌گریز بزرگتر از قطرات تولیدی در کانال‌هایی با دیواره‌های آب‌دوست هستند. اما وقتی جریان دو فازی در رژیم قطره شدن است، سایز قطره کوچک است و تنها بخش کوچکی از قطره در تماس با دیوار قرار دارد، بنابراین با افزایش عدد مویینگی این تاثیر کاهش می‌یابد. ضمناً با کاهش زاویه تماس شکل قطره به‌تدریج از شبه کره به گلابی شکل تغییر می‌کند بنابراین زاویه تماس

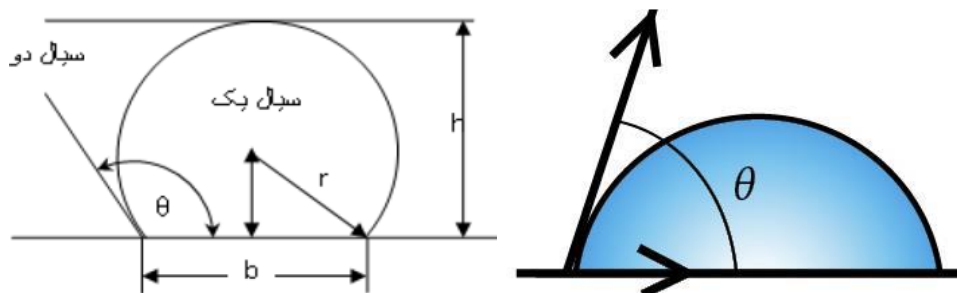
^۱ Surface active agent

^۲ Hydrophilic

^۳ Hydrophobic

^۴ Contact angle

نباید خیلی کوچک تنظیم شود.



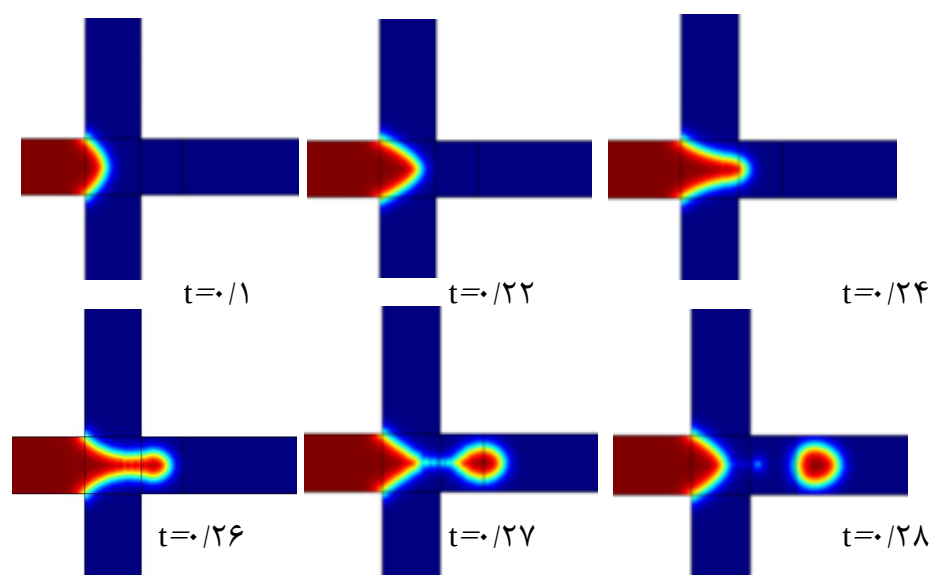
شکل ۲-۲: زاویه تماس بین مایع و سطح جامد

در قسمت‌های قبل گفته شد نیروهای تأثیرگذار بر فرآیند جدایش قطره شامل نیروهای کشش سطحی، فشار و تنش‌های لزج اعمال شده توسط فاز پیوسته است. کشش سطحی نیرویی سطحی بوده و در امتداد فصل مشترک بر آن وارد می‌شود. همچنین این نیرو پس از جدایش قطره باعث حفظ شکل کروی آن می‌شود. می‌توان گفت در مقادیر کشش سطحی بالا و یا در اعداد موینگی پایین فرآیند جدایش چندپخشی اتفاق افتاده و در آن قطرات ثانویه بزرگی تشکیل می‌شود. با کاهش کشش سطحی و به‌طور متناظر با افزایش عدد موینگی اندازه قطرات ثانویه کوچک‌تر می‌شود. مشاهده می‌شود در مقادیر بسیار پایین کشش سطحی و در اعداد موینگی بالا فرآیند جدایش قطره در حالت تک‌پخشی انجام می‌گیرد. با کاهش کشش سطحی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، فاز پیوسته توانایی نگهداری فاز پخش‌شونده در گوشه را ندارد تا موجب رشد سیال در آن ناحیه گردد بلکه فاز پخش‌شونده باریک شده و طویل می‌گردد، به‌طوری‌که دارای جریان جتی می‌باشد که مشابه نتایج شبیه‌سازی شی و تانگ است [۸۵]. همچنین با کاهش کشش سطحی، از قطر قطره کاسته می‌شود و طول جدایش آن افزایش می‌یابد. با افزایش کشش سطحی، اختلاف طول جدایش و اندازه قطره کاهش می‌یابد.

۲-۴- فرایند جدایش

در این قسمت دینامیک جدایش قطره، نیروهای اعمالی بر قطره و کنش این نیروها شامل نیروی

کشش سطحی، نیروی تنش برشی دیوار و نیروی فشاری که منجر به جدایش قطره می شود مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. همان گونه که در شکل ۲-۳ مشاهده می شود فاز گسسته از طریق کانال اصلی وارد می شود و فاز پیوسته از طریق دو کانال کناری به هندسه مسئله تزریق می شوند. در ابتدا فاز گسسته در هر دو جهت محوری و شعاعی در کانال ورودی اصلی چپ و کانال دو طرف بالا و پایین گسترش می یابد و نوک آن شبیه یک نیم گنبد است. در مرحله دوم فاز گسسته به لبه های کانال خارجی رسیده و پیشروی می کند تا تمام عرض کانال را به طور جزئی مسدود کند. در طول این زمان فاز پیوسته، فاز گسسته را در جهت شعاعی باریک می کند و آن را در جهت محوری گسترش می دهد تا زمانی که گلوله تشکیل شود. در مرحله سوم گلوله شکل می گیرد و به تدریج بسیار نازک می شود تا زمانی که جدایش رخ دهد و قطره تشکیل شود. در واقع فاز گسسته بعد از خروج از مجرای خود توسط فاز پیوسته فشرده شده و پس از عبور از اریفیس، قطرات فاز گسسته تشکیل شده و در کانال عریض واقع در پایین دست اریفیس به حرکت خود ادامه می دهند [۵۹]. زمانی که طول می کشد تا این فرآیند شکل گرفته و قطره به نقطه جدایش برسد را زمان جدایش می گویند. و فاصله از شروع کانال تا محل جدایش اولین قطره را طول جدایش می نامند. وقتی زمان شروع جدایش، کاهش می یابد قطره سریع تر جدا شده و طول جدایش کم می شود.



شکل ۲-۳: شماتیکی از پیشروی قطره نتایج حاصل در $\mu_c/\mu_d=17/6$ و $Q_c/Q_d=8$ و $ca=0/194$

۲-۵- توزیع فشار بین فازها و خطوط جریان

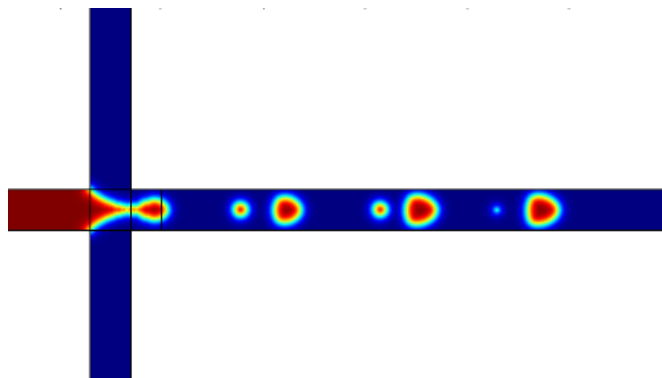
توزیع فشار بین دو فاز در فرآیند تشکیل قطره، کمک شایانی بر شناخت و درک رفتار قطره می‌کند. بعد از این که فاز گسسته وارد ناحیه اریفیس می‌شود، هر دو فاز یک افت فشار شدید را تجربه کرده و وقتی فاز گسسته به انتهای اریفیس رسیده و قطره تشکیل شده در آستانه جدایش قرار می‌گیرد؛ هر دو فاز مقدار بسیار کوچکی افزایش فشار داشته و بعد از جدایش قطره، فشار هر دو فاز کم می‌شود و این فرآیند مجدداً تکرار می‌شود. از نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز مشاهده می‌شود که در هر مرحله جدایش قطرات دو زمان حساس وجود دارد که در آن فشار بین دو فاز با هم برابر می‌شوند. در لحظاتی که در آن‌ها فشار بین دو فاز با هم برابر می‌شوند یا فاز گسسته در حال ورود به ناحیه اریفیس است و یا فاز گسسته در آستانه جدایش و تشکیل قطره است. اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز گسسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در حال ورود به اریفیس است و اگر قبل از این که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز پیوسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در انتهای اریفیس بوده و قطره در آستانه جدایش است. ابتدا فشار فاز گسسته به دلیل وجود کشش سطحی و اثرات آن از فشار فاز پیوسته بیشتر است. باگذشت زمان فشار هر دو فاز بیشتر می‌شود؛ فشار فاز گسسته به دلیل کشش سطحی در فصل مشترک و فشار فاز پیوسته نیز به دلیل کوچک‌تر شدن مجرای عبور جریان زیاد می‌شود، زیرا پیشروی فاز گسسته منجر به کوچک‌تر شدن مجرای عبوری فاز پیوسته در محدوده‌ی اریفیس و اطراف آن می‌شود. البته شیب افزایش فشار فاز پیوسته بیشتر از فاز گسسته بوده و این منجر به این می‌شود که در یک لحظه این دو نمودار یکدیگر را قطع کنند. از این لحظه به بعد فاز گسسته وارد اریفیس شده و به دلیل اینکه فاز گسسته سطح بیشتری از اریفیس را اشغال می‌کند، سطح عبوری فاز پیوسته کاهش می‌یابد و فاز پیوسته افزایش فشار بیشتری تجربه کند. به دلیل دبی بیشتر فاز پیوسته و سرعت خیلی زیاد فاز پیوسته نسبت به فاز گسسته در داخل اریفیس و در نتیجه تنش‌های لزج بالایی که از طرف فاز پیوسته به فاز گسسته وارد می‌شود،

فاز گسسته در داخل اریفیس کشیده شده و دنباله‌ی آن به صورت یک باریکه، سطح اریفیس را اشغال می کند در این حالت هر دو فاز یک افت فشار محسوسی را تجربه می کنند. در مورد فاز پیوسته می توان گفت که با باریک شدن فاز گسسته در داخل اریفیس، سطح عبوری برای فاز پیوسته افزایش می یابد که با کاهش فشار همراه خواهد بود. در مورد فاز گسسته می توان گفت اثر نیروهای لزج ناشی از فاز پیوسته بر فاز گسسته منجر به یک مکش و کشیدگی فاز گسسته در ناحیه اریفیس شده و باعث یک افت فشار می شود. هنگامی که توده‌ی فاز گسسته به انتهای اریفیس می رسد و از انتهای آن عبور می کند، با توجه به این که در این حالت انتهای باریکه‌ی فاز گسسته شکل قطره را به خود می گیرد این منجر به یک افزایش فشار بسیار کوچک فاز پیوسته در پشت آن می شود. همچنین فاز گسسته نیز افزایش فشار بسیار کوچکی را تجربه می کند. با ادامه این روند و با کش آمدن دنباله‌ی فاز گسسته و همچنین دورتر شدن قطره‌ی چسبیده به دنباله‌ی فاز گسسته از اریفیس، هر دو فاز مجدداً دچار کاهش فشار می شوند و شیب کاهش فشار فاز گسسته بیشتر خواهد بود. در نهایت در یک لحظه‌ی خاص فشار هر دو فاز با هم برابر شده و نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز نیز یکدیگر را قطع می کنند. در این لحظه قطره از انتهای دنباله باریک شده فاز گسسته جدا شده و در پایین دست اریفیس به صورت یک قطره‌ی مجزا حرکت می کند. دنباله باقی مانده فاز گسسته نیز به عقب برگشته و این روند مجدداً برای زمان‌های بعدی تکرار می شود و منجر به تولید قطرات بعدی خواهد شد.

۶-۲- تک پخشی و چند پخشی

قطرات تولید شده در میکروکانال‌ها عموماً حالت تک پخشی دارند. در این حالت قطراتی که تولید می شوند تقریباً دارای اندازه‌های یکسانی هستند. نیروی برشی شدید باعث جدا شدن قطره از باریکه کشیده شده فاز گسسته می شود. پس از جدایش قطره، باریکه فاز گسسته به عقب برگشته و دوباره فرآیند جدایش تکرار می شود. در شرایط جریانی خاصی قطرات تولید شده دارای چند پخشی می شوند. در این حالت در هر دوره جدایش، چندین قطره با اندازه‌های مختلف مشاهده می شود. در این حالت پس از جدایش قطره

اولیه قطرات ثانویه با اندازه‌های مختلف و کوچک‌تر تشکیل می‌شوند. در حالت چندپخشی مطابق شکل ۴-۲ باریکه فاز گسسته پس از جدایش قطره اصلی به عقب باز نمی‌گردد، بلکه در داخل اریفیس به رشد خود ادامه داده و تا زمانی که همه فاز گسسته که در داخل اریفیس است گسسته شود قطرات ثانویه تشکیل می‌شوند. قطرات ثانویه کوچک‌تر از قطره اصلی بوده و قطره اصلی نزدیک به ابعاد اریفیس خواهد بود. به ازای نسبت دبی‌های پایین شاهد قطرات ثانویه نسبتاً کوچک‌تر در کنار قطره اصلی خواهیم بود. در واقع بعد از جدایش قطره اصلی، قطره ثانویه که در مقایسه با قطره اصلی به مراتب قطر کمتری دارد شروع به جدایش کرده و با فاصله بسیار اندکی از قطره اصلی شروع به حرکت می‌کند. در واقعیت وجود سورفکتانت در فاز پیوسته مانع از ادغام قطره اصلی و قطره ثانویه می‌شود و این دو قطره در پایین‌دست اریفیس به حرکت خود ادامه می‌دهند. در شبیه‌سازی‌هایی که در نسبت دبی‌های پایین انجام شده است این موضوع به وضوح دیده می‌شود. البته در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده قطرات ثانویه بعد از عبور از گلویی به قطره اصلی نزدیک شده و بعد از مدتی با قطره اصلی ادغام می‌شوند. دلیل این که 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 می‌شود صرف‌نظر شده و تنها در نسبت دبی‌هایی که در آن‌ها حالت تک‌پخشی دیده می‌شود، استفاده شده است.



شکل ۴-۲: فرآیند چند پخشی در نتایج عددی حاصل در $\mu_c/\mu_d=5$ و $Q_c/Q_d=4$ و $ca=0.171$

۲-۷-سیستم‌های چندفازی

یکی از مسائلی که به طور عمده در مکانیک سیالات مورد بررسی قرار می‌گیرد، مسائلی است که در آن‌ها تنها یک سیال مورد بررسی قرار نمی‌گیرد و با چند سیال در آن محیط مواجه می‌شویم. این شاخه از سیالات به عنوان سیالات چندفازی مطرح می‌شوند. جریان‌ها را می‌توان به چهار دسته تک‌جزئی تک‌فاز، تک‌جزئی چندفاز مثل (آب و بخار آب)، چندجزئی تک‌فاز مثل (محلول آب و اتانول) و چند جزئی چندفاز مثل (آب و روغن) تقسیم کرد [۴۹].

از جمله مشکلات موجود در این مسائل، وجود سطح مشترک بین چند فاز می‌باشد. این سطح مشترک سبب ناپیوستگی در کمیت‌های موجود در مرز مشترک می‌شود. این ناپیوستگی‌ها مدل‌سازی و اعمال شرایط مرزی در این مرزها را سخت و پیچیده می‌کند. برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی نیاز است تا از مدل‌هایی که در آن کسر حجمی سیال به طور دقیق مدل می‌شود، استفاده نمود. به همین دلیل مدل‌سازی سطح مشترک بین چندفاز بخصوص در مواقع بسیار حساس از قبیل شناسایی حرکت قطره و نیز رژیم‌های حاکم بر آن بسیار پیچیده به نظر می‌رسد [۱۳، ۶]. روش‌های ردیابی مرز مشترک و تسخیر مرز مشترک به عنوان دو نوع رهیافت مهم برای شبیه‌سازی جریان‌های چندفازی با استفاده از روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی هستند. روش‌های انتگرال مرزی و المان محدود روش‌های عمومی برای ردیابی مرز مشترک می‌باشند [۵۸].

پیچیدگی اساسی جریان‌هایی که حداقل شامل دو فاز هستند، چه از لحاظ فیزیکی و چه از لحاظ عددی، چالش بزرگی را پیش روی توسعه دهندگان برنامه‌های رایانه‌ای تجاری برای تولید برنامه‌هایی جامع در این زمینه به وجود آورده است. پیچیدگی فرمول‌بندی ریاضی معادلات حاکم بر جریان‌های دوفازی و وابسته بودن آن به کمیت‌های مختلف از مهمترین دلایل کمبود دانش کلی در مورد جریان‌های دوفازی است [۴۹].

۸-۲- روش‌های ردیابی سطح مشترک

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

۸-۲-۱- روش‌های تسخیرکننده سطح

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

۸-۲-۲- روش‌های دنبال‌کننده سطح

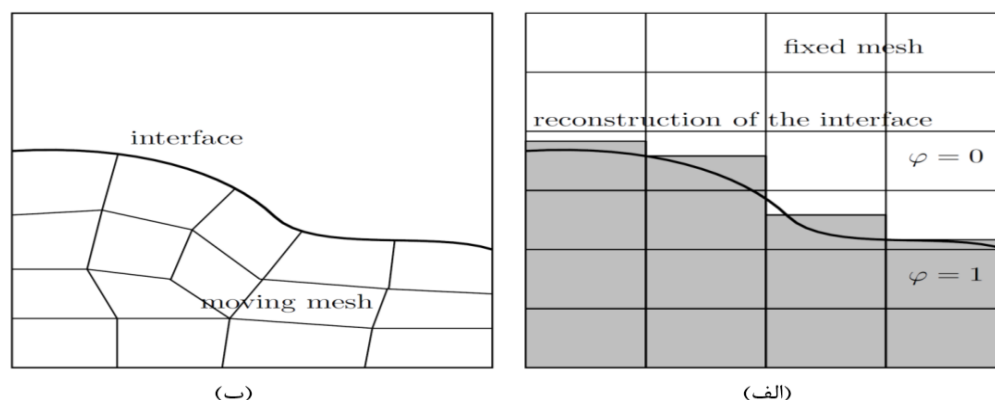
روش‌های دنبال‌کننده سطح^۳ ماهیت لاگرانژی داشته و شبکه حل در آن‌ها متحرک در نظر گرفته شده و برای هر سیال یک شبکه در نظر گرفته می‌شود و سطح مشترک، مرز بین دو ناحیه حل خواهد بود. در این حالت، مرز شبکه روی سطح مشترک بوده و با در نظر گرفتن چند نقطه روی سطح مشترک و ردیابی این نقاط، سطح مشترک ردیابی و موقعیت جدید دو شبکه مشخص می‌شود. در مسائلی که در آن‌ها گرادیان‌های شدید سرعت ایجاد شود، شکل جریان پیچیده شده و باعث به وجود آمدن خطا در روش‌های لاگرانژی می‌شود؛ بنابراین در حالتی که هندسه سطوح پیچیده بوده و یا پدیده‌هایی نظیر

^۱ Capturing Methods

^۲ Indicator Phase Function

^۳ Tracking Methods

شکست^۱ و یا پیوستن^۲ دو سطح روی دهد، استفاده از این روش‌ها با مشکلاتی روبرو خواهد شد [۸۲].



شکل ۲-۵: دو روش کلی تعیین مرز مشترک [۸۳] الف- روش اویلری ب- روش لاگرانژی

کنترل فوق‌العاده بر حجم، یکنواختی و نرخ تولید قطرات و حباب‌ها از ویژگی‌های منحصربه‌فرد رفتار دستگاه‌های میکروسیالی است. سطوح مشترک محدود شده در کانال‌های میکروسیالی رفتار کاملاً متفاوتی از جریان‌های نامحدود دارند. تولید میکروسیالی قطرات و حباب‌ها کاملاً متفاوت با تولید قطرات و حباب‌ها در هندسه‌های نامحدود بوده و تحت تأثیر سطح مشترک است [۴۵]. روند جدایش قطره با توجه به وابستگی آن به پارامترهای متعددی مانند نسبت دبی‌ها، لزجت‌ها و پارامترهای هندسی هنوز به‌طور کامل شناخته نشده است. شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالاتی^۳ یک روش جایگزین برای درک این فرآیند پیچیده ارائه می‌دهد. مدل‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۴ و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول که یک نرم‌افزار عددی بر پایه روش المان محدود^۵ است؛ انجام شده است. روش المان محدود بیانگر یک رویکرد عددی است که توسط آن معادلات دیفرانسیل کلی به یک شیوه تقریبی حل می‌شوند. دامنه هندسی مسئله به واحدهایی کوچک که المان‌های محدود نامیده می‌شوند، تقسیم شده و سپس یک تخمین و تقریب بر روی هر سلول اعمال می‌شود.

^۱ Break Up

^۲ Coalescence

^۳ Computational Fluid Dynamics (CFD)

^۴ Computational Fluid Dynamics

^۵ Finite Element Method

به طور معمول از روش‌های عددی مانند لول‌ست، روش حجم سیال^۱، روش میدان فاز^۲ و روش شبکه بولتزمن^۳ برای تعیین موقعیت فصل مشترک در جریان دوفازی استفاده می‌شود [۷۶]. از روش میدان فاز بیشتر در جریان‌های دوفازی که در آن‌ها حباب تشکیل می‌شود، استفاده می‌شود [۷۷]. در روش حجم سیال معادله کسر حجمی اعمال شده و چگالی وزنی و لزجت در هر سلول محاسباتی تعیین می‌شود. اگرچه در روش حجم سیال ذاتاً بقای جرم برقرار است، اما در آن فصل مشترک به خوبی پیش‌بینی نمی‌شود که این امر باعث عدم دقت در تخمین نیروهای بین سطحی می‌شود [۷۸]. به طور کلی روش حجم سیال انحناهای شدید را به خوبی پیش‌بینی نمی‌کند. برای دستگاه‌های جریان متمرکز- شده در ناحیه اریفیس شاهد تغییرات شدید در انحنا فصل مشترک خواهیم بود و هنگامی که از روش حجم سیال استفاده شود، عدم دقت در پیش‌بینی فصل مشترک می‌تواند منجر به خطای زیاد در شبیه‌سازی جدایش قطره شود. از طرفی روش لول‌ست فصل مشترک را توسط یک تابع بیان می‌کند که برای محاسبه انحنا و نیروهای کشش سطحی بسیار مناسب است [۷۹]. از این رو در این تحقیق از روش لول‌ست برای شبیه‌سازی فرآیند جدایش قطره در شبیه‌سازی میکروکانال T-شکل استفاده شده است.

^۱ Volume of fluid (VOF)

^۲ Phase-field method

^۳ Lattice-Boltzmann method

۳- فصل سوم : معادلات حاکم و روش حل عددی

۳-۱ مدل سازی و شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی به کمک لول ست

پایستار

در این تحقیق مدل سازی دینامیک سیالاتی و شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار کامسول ورژن ۵/۳a که یک طرح عددی بر پایه روش المان محدود است انجام شده است [۶۰]. روش لول ست^۱ ابتدا در سال ۱۹۸۸ توسط اوشر و ستین^۲ توسعه داده شد. این روش یک تکنیک عددی است که با حرکت سطوح سیال سروکار دارد. این روش به ویژه برای مسائلی که در آن موقعیت سطح حاصله در طول فرآیند تغییر می یابد و همچنین در مسائلی که در آن زوایا و گوشه های نوک تیز وجود دارد به کار می رود. ایده اصلی در این روش، در نظر گرفتن یک تابع اسکالر پیوسته به نام ϕ است. در مطالعه حاضر، برای ردیابی فصل مشترک بین دو فاز از روش لول ست پایستار که توسط اولسون و کریز ارائه شده و دارای دقت مرتبه بالا و بقای جرم خوبی است استفاده شده است. از این رویکرد برای توصیف سطح مشترک بین دو سیال انحلال ناپذیر که به طور ضمنی توسط کانتور $\phi=0/5$ در تابع لول ست تعریف شده، استفاده می شود در این مدل فاز پیوسته از کانال های کناری تزریق می شود ($\phi=1$) و فاز گسسته ($\phi=0$) از کانال میانی تزریق می شود [۷۹].

هنگامی که سطح مشترک توسط میدان سرعت بیرونی داده شده جابجا شود، $u=(u_x, u_y)$ تغییر تابع لول ست متناظر با حرکت سطح مشترک توسط معادله جابجایی یا انتقال زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = 0 \quad (1-3)$$

معادله انتقال تنها نیاز است که به صورت محلی در نزدیکی سطح مشترک حل شود. اگر جریان تراکم ناپذیر باشد برای میدان سرعت خواهیم داشت $\nabla \cdot u = 0$ و معادله انتقال می تواند به صورت زیر نوشته

^۱ Conservative Level-Set Method

^۲ Osher and Sethian

شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u \phi) = 0 \quad (2-3)$$

معادله فوق بیان گر یک معادله پیوستگی برای تابع لولست است. به منظور ثابت نگه داشتن ضخامت سطح مشترک در شبیه سازی عددی، یک فشرده سازی مصنوعی به صورت معادله (3-3) اضافه و اجرا می شود.

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau_a} + \nabla \cdot f(\phi) = 0 \quad (3-3)$$

که در آن τ_a بیانگر زمان تصنعی و f شار فشاری هستند. این شار فشاری تصنعی، در ناحیه $0 < \phi < 1$ و در جهت نرمال سطح مشترک اعمال می شود. شار فشاری تصنعی در جهت نرمال فصل مشترک به صورت زیر تعریف می شود:

$$f(\phi) = \phi(1-\phi)n_r = \phi(1-\phi)\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (4-3)$$

برای جلوگیری از ناپیوستگی در سطح مشترک، معادله (3-3) با اضافه کردن یک مقدار کمی لزجت یا دیفیوژن، به صورت معادله (5-3) اصلاح می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial \tau_a} + \nabla \cdot f(\phi) = \varepsilon_r \nabla^2 \phi \quad (5-3)$$

که در آن ε_r لزجت تصنعی است. معادله (5-3) و معادله (2-3) می توانند به صورت یک معادله با زمان تصنعی تنظیم شده ی معادل با زمان واقعی ترکیب شوند؛ بنابراین معادله به دست آمده به صورت زیر اصلاح می شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u \phi) = \varepsilon_r \nabla^2 \phi - \nabla \cdot f(\phi) \quad (6-3)$$

ترم لاپلاسین نشان داده شده در معادله فوق نوعی ترم دیفیوژن تصنعی است که سعی در بزرگ کردن عرض سطح مشترک دارد و هنگامی که دارای یک ضخامت ε_r است، این دو ترم در تعادل هستند و

ضخامت سطح مشترک را ثابت نگه می‌دارند. معادله می‌تواند در فرم پایستار زیر تعریف شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \left(u \phi + \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon_r \nabla \phi \right) = 0 \quad (۷-۳)$$

برای حفظ تابع لول‌ست، یک روند "مقداردهی اولیه دوباره"^۱ برای تقریب و تخمین معادله لول-ست مورد نیاز است؛ بنابراین یک روش لول‌ست مقداردهی اولیه دوباره شده و پایستار برای توصیف و انتقال سطح سیال استفاده شده است. معادله (۸-۳) بیانگر جابجایی^۲ تابع لول‌ست مقداردهی اولیه دوباره شده است:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left[\varepsilon_r \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (۸-۳)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot \left(u \phi + \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} - \varepsilon_r \nabla \phi \right) = 0 \quad (۹-۳)$$

که در آن γ و ε_r پارامترهای تثبیت‌کننده عددی هستند. γ نشان‌دهنده پارامتر مقداردهی اولیه دوباره و ε_r تعیین‌کننده ضخامت سطح مشترک است. مقدار γ نزدیک به حداکثر سرعت موجود در مسئله پیشنهاد شده است [۸۶]. ε_r نشان‌دهنده ضخامت سطح مشترک بوده و برابر بیشینه اندازه شبکه در زیر دامنه و در مجاور سطح مشترک فرض می‌شود. معادله (۹-۳) با معادلات حاکم که شامل معادله تراکم ناپذیر ناویر-استوکس به صورت معادله (۱۰-۳) و معادله پیوستگی (۱۱-۳) برای ادوکشن^۳ تابع لول‌ست (ϕ) ، کوپل می‌شود.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla \cdot \eta \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) + F_{st} \quad (۱۰-۳)$$

^۱ Reinitialization

^۲ Convection

^۳ Advection

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (۱۱-۳)$$

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

$$\rho(x,t) = \rho_c + (\rho_c - \rho_d)\phi \quad (۱۲-۳)$$

$$\eta(x,t) = \eta_c + (\eta_c - \eta_d)\phi \quad (۱۳-۳)$$

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

$$n_r = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (۱۴-۳)$$

$$K = \nabla \cdot n_r \quad (۱۵-۳)$$

که در آن n_r بردار یکه نرمال در سطح مشترک قطره و K انحنای سطحی موضعی است. همچنین نیروی کشش سطحی F_{st} اعمال شده بر روی سطح مشترک بین دو فاز توسط معادله زیر محاسبه می شود [۷۹]:

$$F_{st} = \sigma K n_r \delta \quad (۱۶-۳)$$

که در آن σ نشان دهنده کشش سطحی و δ تابع دلتای دیراک متمرکز شده در سطح مشترک بین دو سیال است که توسط معادله (۱۷-۳) تقریب زده می شود:

$$\delta = 6|\nabla \phi| |\phi(1-\phi)| \quad (۱۷-۳)$$

در این تحقیق مدل‌سازی دینامیک سیالاتی^۱ و شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول که یک طرح عددی بر پایه روش المان محدود است انجام شده است. روش المان محدود ابتدا در گیر گسسته‌سازی حوزه مکانی با استفاده از یک شبکه شده و هنگامی که این گسسته‌سازی فیزیکی دامنه جریان کامل شد، تخمین و تقریب برای متغیرهای وابسته مطرح شده و برای دامنه‌های کوچک فضا و زمان حل می‌شوند [۸۷].

فاصله بین قطرات از کمیت‌های مهم در دستگاه‌های میکروسیالی بوده و شناخت عوامل مؤثر بر آن در درک رفتار قطرات و شکل‌گیری آن‌ها بسیار مؤثر است. عموماً مرز بین دو فاز را $\phi=0.5$ در نظر می‌گیرند. اگر فرض کنیم به صورت دوبعدی یک قطره مجزا داشته باشیم در آن صورت می‌توان مساحت و قطر قطره را به کمک روابط زیر به دست آورد:

$$A_{\phi=0.5} = \int_{\Omega} \phi dx \quad (3-18)$$

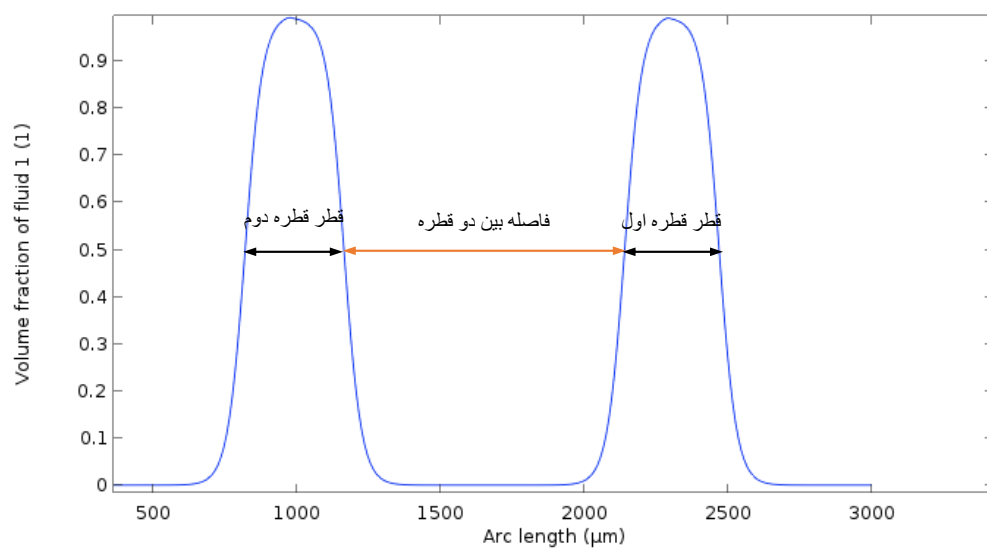
$$D = 2\sqrt{\frac{A_{\phi=0.5}}{\pi}} \quad (3-19)$$

درواقع قطر زیر، قطر یک قطره کروی است که حجمی معادل با قطره تشکیل شده در نتایج تجربی دارد.

$$d_{eff} = 2\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\Omega} (\phi > 0.5) d\Omega} \quad (3-20)$$

در بازه‌هایی که $\phi=0$ فقط فاز گسسته و در بازه‌هایی که $\phi=1$ فقط فاز پیوسته وجود دارد عموماً مرز بین دو فاز را $\phi=0.5$ در نظر می‌گیرند. لذا برای تعیین فاصله بین قطرات می‌توان نقاطی که در آن‌ها مقدار ϕ برابر با 0.5 است را یافته و به صورت نشان داده شده در شکل ۳-۱ فاصله قطرات را تعیین کرد. این روند را برای تعیین اندازه قطره نیز می‌توان انجام داد.

^{۱۱} Computational fluid dynamics



شکل ۳-۱: نمودار پارامتر ϕ در مقطع میانی قطره به ازای نتایج عددی حاصل در نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$

و عدد موینگی $ca=0/145$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=4$

۴- فصل چهارم : مدل سازی فرآیند جدایش و تشکیل

قطره

۴-۱- مراحل مدل سازی فرآیند جدایش و تشکیل قطره در نرم افزار کامسول

در نرم افزار کامسول، ابتدا باید مدل سازی هندسی را انجام داد. سپس شرایط مرزی و نوع شبکه-

بندی را انجام داد. در شکل زیر مراحل مدل سازی به ترتیب زیر آورده شده است:



شکل ۴-۱: مراحل مدل سازی عددی

۴-۲- انتخاب گام زمانی در شبیه‌سازی جریان دوفازی تولید قطرات

در شبیه‌سازی جریان دوفازی میکروکانال با استفاده از نرم افزار کامسول از روش لول‌ست استفاده شده است. در مدل عددی حاضر، گام زمانی باید به درستی لحاظ شود تا نتایج در گام‌های زمانی مشخص شده، مشاهده و تحلیل گردد. برای این کار، گام‌های زمانی مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت و زمان جدایش قطره و طول جدایش به عنوان دو پارامتر حساس ثبت گردید. گام‌های زمانی ۰/۱، ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ در این آزمایش عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است. باید اطمینان حاصل شود که نتایج، در گام‌های زمانی ریزتر تغییری نمی‌کند. مشاهده گردید که طول و زمان جدایش و قطر قطره به‌ازای گام زمانی کوچکتر از ۰/۰۰۵ تغییری نمی‌کند، بنابراین گام زمانی ۰/۰۰۵ برای گام زمانی انتخاب شد و در تست‌های مختلف با اعداد بی‌بعد مختلف دائماً کنترل شده است.

۴-۲-۱- خواص سیالات استفاده شده

در مدل‌سازی عددی میکروکانال T- شکل از روغن معدنی برای فاز پیوسته و از سیال فروفلوئید بر پایه آب به عنوان فاز گسسته استفاده شده است. سیال گسسته را سیال ۱ و سیال پیوسته را سیال ۲ در نظر می‌گیریم در جدول ۴-۱ خواص سیالات مورد استفاده آورده شده است.

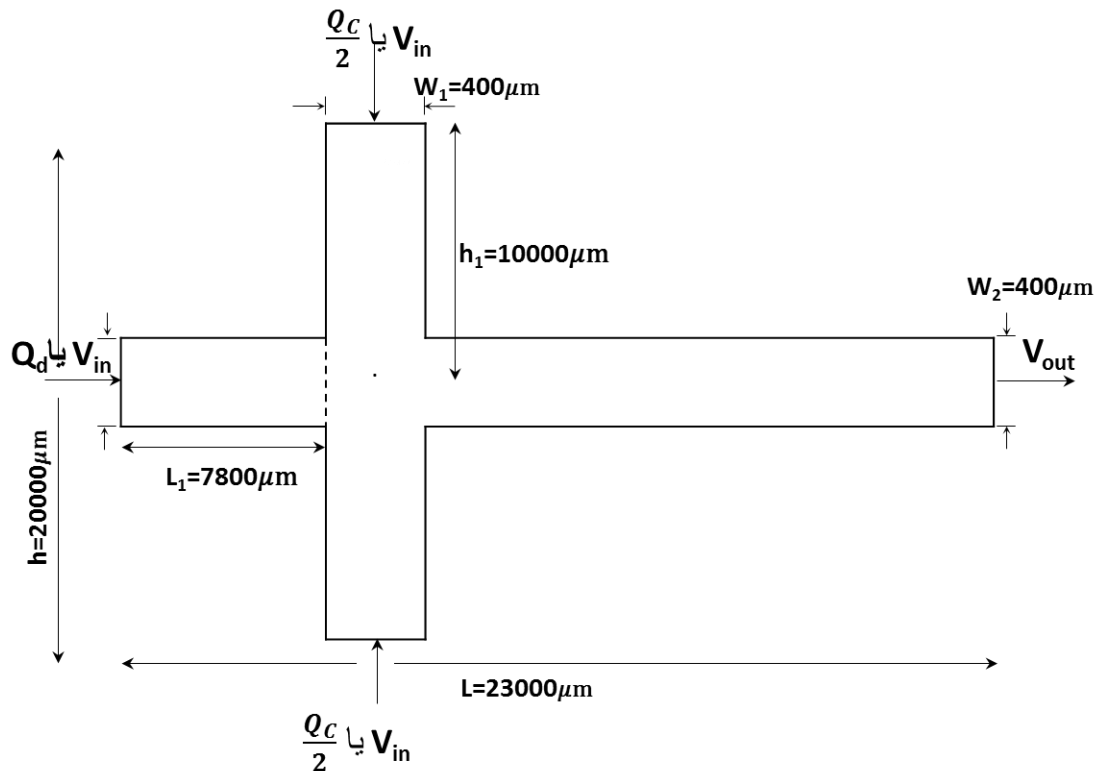
جدول ۴-۱: جدول خواص سیالات استفاده شده

سیالات گسسته و پیوسته	چگالی (kg/m^3)	مقدار لزجت ($mPa.s$)	کشش سطحی (mN/m)
فروفلوئید بر پایه آب	۱۱۰۰	۲	۱/۵
روغن معدنی	۸۳۸	۳۵/۲	۱/۵

۴-۲-۲-مدل سازی عددی

نمایی از یک میکروکانال دوبعدی، به شکل ۴-۲ داریم. فاز گسسته از طریق کانال اصلی و فاز پیوسته از طریق دو کانال کناری به هندسه مسئله تزریق می‌شوند. فاز گسسته بعد از خروج از مجرای خود توسط فاز پیوسته فشرده شده و پس از عبور از اریفیس، قطرات فاز گسسته تشکیل شده و در کانال عریض پایین دست اریفیس به حرکت خود ادامه می‌دهند. در شبیه سازی جریان دوفازی میکرو-کانال، از روش لول ست استفاده شده است و گام زمانی ۰/۰۰۵ می‌باشد. با توجه به خواص سیال و عدد رینولدز $Re=0.0793$ متناسب با مرجع [۵۹]، سرعت فاز پیوسته برابر مقدار ثابت (m/s) ۰/۰۰۸ به دست می‌آید و چون سیال پیوسته از دو ورودی به هندسه تزریق می‌شود، بنابراین از هر ورودی به اندازه نصف دبی جریان و یا نصف سرعت یعنی (m/s) ۰/۰۰۴ می‌باشد. نرخ جریان در بازه $4 < \alpha < 10$ تعریف شده است و معادل آن سرعت فاز گسسته در بازه $10^{-3} \times 2 < U_d < 10^{-4} \times 8$ تغییر خواهد کرد. تغییرات کشش سطحی در بازه $3 < \sigma < 1/5$ (mN/m) در نظر گرفته شده است. در نتیجه عدد موینگی نیز در بازه $0.194 < Ca < 0.097$ تغییر خواهد کرد. لزجت فاز پیوسته برابر مقدار ثابت در جدول و تغییرات لزجت فاز گسسته در بازه $3 < \mu_d < 1/5$ (mPa.s) در نظر گرفته شده است و معادل آن نسبت لزجت نیز در بازه $17/6 < \mu_r < 1$ تغییر خواهد کرد.

W_1 عرض کانال عمودی کناری که در آن فاز پیوسته جاری است و W_2 عرض کانال میانی اصلی است که در آن فاز گسسته جاری است. رابط اولیه بین دو فاز با خط چین مشخص شده است. همچنین h ارتفاع کانال عمودی و h_1 نصف ارتفاع کانال عمودی و L طول کانال میانی و L_1 فاصله از ابتدای کانال میانی تا خط چین رابط دو فاز می‌باشد. همچنین Q_c دبی فاز پیوسته و Q_d دبی فاز گسسته است.



شکل ۴-۲: مدل سازی دوبعدی میکروکانال درمساله حاضر وابعاد آن

۴-۲-۳- شرایط اولیه

با توجه به شکل ۴-۲، شرایط اولیه و مرزی به کار رفته در این تحقیق جهت حل معادلات حاکم به این شرح است. در لحظه $t=0$ کانال تزریق میانی به طور کامل حاوی سیال فاز گسسته ($\phi=0$) بوده و باقی دامنه محاسباتی شامل کانال های تزریق کناری، اریفیس و کانال واقع در پایین دست اریفیس حاوی فاز پیوسته ($\phi=1$) در نظر گرفته شده است. مرز مشترک اولیه بین دو فاز نیز در لحظه $t=0$ به کمک خط چین در شکل ۴-۲ نشان داده شده است. علاوه بر این جریان تراکم ناپذیر و همدمای فرض شده و از نیروی گرانش به دلیل کوچک بودن عدد باند صرف نظر شده است. همچنین از تغییرات خواص فیزیکی از جمله لزجت و کشش سطحی صرف نظر شده و فرض شده است که کشش سطحی موجود در مرز مشترک میان دو فاز، مقداری ثابت بوده و بازمان تغییر نمی کند. ترشوندگی سطوح کانال نسبت به سیال، وابسته به زاویه تماس می باشد [۸۵]. دیواره های مشخص شده میکروکانال با شرط دیواره ترشونده

و زاویه تماس دیواره نشان داده در شکل ۴-۲ در قسمت سمت راست کانال متقاطع ۱۱۰ درجه و در سمت چپ کانال متقاطع ۹۰ درجه می‌باشد.

۴-۲-۴-شرایط مرزی

دینامیک واقعی سیال به شدت به محیط آن بستگی دارد. این وابستگی از دیدگاه ریاضی با بیان مناسب شرایط مرزی توصیف می‌شود.

ورودی‌های جریان: در مرزهای ورودی هر دو فاز، جریان با سرعت یکنواخت وارد می‌شود. همچنین سیال ۲ به‌عنوان فاز پیوسته تعریف شده است. بنابراین در کانال‌های تزریق کناری که حاوی سیال پیوسته است $V_f = 1$ می‌باشد و در کانال میانی که حاوی سیال گسسته است $V_f = 0$ قرارداد می‌شود.

خروجی جریان: در خروجی هندسه شرط فشار خروجی نسبی صفر بدون تنش لزج اعمال شده است و شرط جریان، سرعت یکنواخت می‌باشد. $V=0$ و $U=U_{out}$

۴-۳-شبکه‌بندی و استقلال از شبکه‌بندی

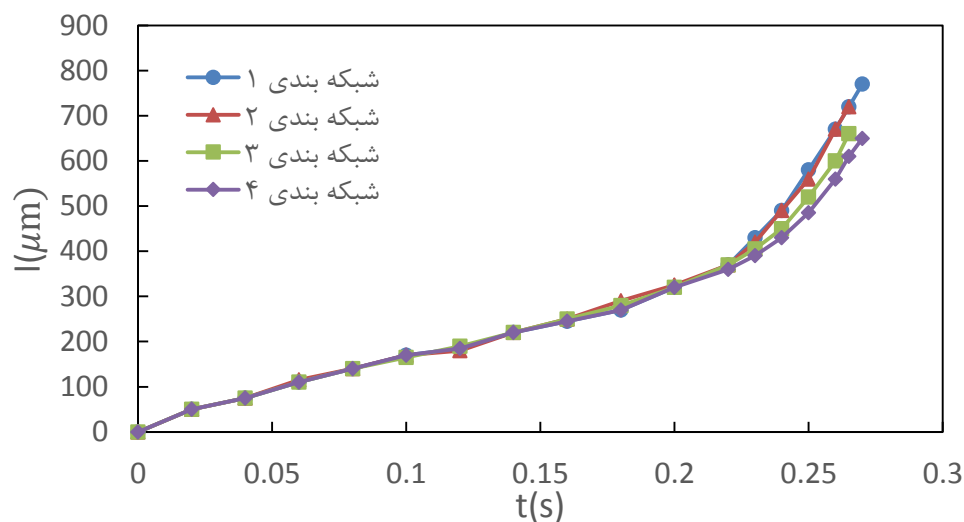
اولین قدم در حل مناسب معادلات، شبکه‌بندی دامنه محاسباتی است. در شبکه‌بندی ایجادشده نواحی اریفیس و همچنین ناحیه میانی کانال که قطرات تشکیل شده و حرکت می‌کنند از اهمیت بیشتری برخوردارند و تغییرات شدید در انحنای سطح مشترک بین دو فاز ایجاد می‌شود. لذا ناحیه میانی باید دارای شبکه بندی ریزتر باشد. در شبکه بندی ریزتر ابتدا طبق جدول ۴-۲ چهار شبکه بندی مثلی به ابعاد ۲۰، ۱۵، ۱۰ و ۵ امتحان شد. هرچه شبکه‌بندی ریزتر شود، دقت محاسبه بالا می‌رود اما از طرفی حجم محاسبات زیاد شده و مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا داده‌ها آنالیز شود. بنابراین سعی بر آن شد که تغییرات طول جدایش قطره بر حسب زمان نسبت به این چهار شبکه‌بندی سنجیده شود و زمانی

که اختلاف تغییرات در شبکه‌بندی های مختلف ناچیز بود شبکه بندی مناسب انتخاب می‌شود.

جدول ۲-۴ تعداد المان های چهار شبکه بندی مختلف

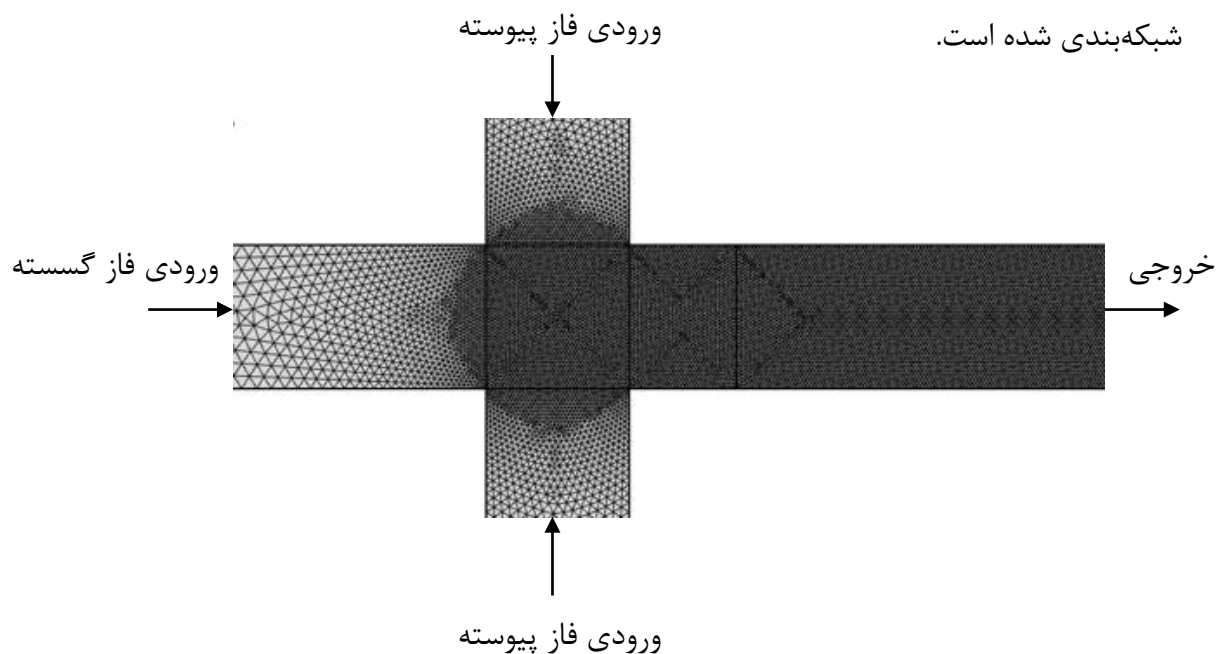
شبکه‌بندی	ابعاد شبکه مثلثی (μm)	تعداد المان
۱	۵	۶۲۴۴۸۸
۲	۱۰	۱۶۷۴۱۲
۳	۱۵	۸۰۳۲۱
۴	۲۰	۵۰۳۲۸

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود تغییرات طول جدایش قطره به ازای شبکه‌بندی ۳ و ۴ تفاوتی در حدود ۱۶ درصد با شبکه‌بندی ۱ و ۲ دارد ولی شبکه‌بندی ۲ و ۱ اختلاف بسیار ناچیزی دارد. طبق جدول ۲-۴، شبکه بندی ۱ مربوط به شبکه مثلثی به ابعاد ۵ میکرومتر با ۶۲۴۴۸۸ المان و شبکه‌بندی ۲ مربوط به شبکه مثلثی به ابعاد ۱۰ میکرومتر با ۱۶۷۴۱۲ المان است. از آنجایی که اختلافی در نتایج مربوطه بین این دو شبکه‌بندی وجود ندارد، لذا به هدف کاهش حجم محاسبات، شبکه‌بندی ۲ انتخاب می‌شود.



شکل ۴-۳: طول جدایش قطره بر حسب زمان در چهار شبکه بندی مختلف

بنابراین مطابق شکل ۴-۴ به منظور دست یافتن به جواب دقیق و کاهش حجم محاسبات، نواحی کم اهمیت با شبکه درشت تر مثلثی به ابعاد ۵۰ میکرومتر و نواحی مهم تر شامل نواحی اریفیس و کانال میانی که قطرات در آن تشکیل شده و حرکت می کنند، با شبکه ریزتر مثلثی به ابعاد ۱۰ میکرومتر



شکل ۴-۴: نمونه شبکه بندی در میکروکانال مورد مطالعه

۵- فصل پنجم : تاثیر پارامترهای نسبت لزجت، نسبت نرخ

جریان و عدد مویینگی بر رفتار قطره و نتایج آن

۵-۱- اثر نسبت لزجت دو فاز بر اندازه قطره، طول جدایش، فرکانس و زمان

جدایش قطرات

طول قطره با افزایش لزجت پیوسته کاهش می‌یابد. در اعداد موینگی پایین یا لزجت فاز پیوسته کمتر، قطره تمام عرض کانال را پر کرده و جدایش در قسمت نقطه تیز قسمت T- شکل برای دو نسبت لزجت اتفاق می‌افتد و نسبت لزجت تأثیری در اندازه قطره ندارد. با افزایش عدد موینگی و عبور از رژیم فشردگی، نسبت لزجت بیشتر، فاز پیوسته توانایی نگهداری فاز پخش شونده در گوشه را ندارد تا موجب رشد سیال در آن ناحیه گردد؛ فاز پخش شونده باریک شده و طویل می‌گردد، به طوری که دارای جریان جتی می‌باشد و موقعیت نقطه جدایش را به سمت پایین دست جریان هل می‌دهد. در این حالت، تشکیل قطره حاصل رقابت بین نیروی برشی ویسکوز و نیروی موینگی است. همچنین با افزایش لزجت فاز پیوسته، از قطر قطره کاسته می‌شود. با افزایش عدد موینگی، قطره در جهت جریان بیشتر کشیده شده، قطر آن کاهش و طول جدایش افزایش می‌یابد. شی و تانگ نیز دریافتند که با افزایش لزجت فاز پیوسته، اندازه قطره کاهش می‌یابد [۸۵]. در اعداد موینگی پایین (رژیم فشردگی) و بخشی از رژیم چکه کردن، اندازه قطره مستقل از نسبت لزجت می‌باشد. اما از یک عدد موینگی به بعد اندازه قطره به نسبت لزجت کاملاً وابسته است. همان‌طور که پیش ازین اشاره شد، مدت زمانی که طول می‌کشد تا فرآیند شکل‌گیری قطره انجام شود و قطره به نقطه جدایش برسد را زمان جدایش می‌نامند و فرکانس تشکیل قطره به صورت معکوس زمان تشکیل بین دو قطره متوالی است. مطابق جداول ۵-۱ و ۵-۲ و ۵-۳ با رقیق شدن سیال، لزجت سیال کاهش یافته و موجب رشد بیشتر قطره می‌شود. بدین ترتیب تشکیل قطره به تاخیر می‌افتد و طول جدایش بیشتر می‌شود. همچنین، قطر آن افزایش می‌یابد. با بزرگتر شدن قطره، فاصله بین قطره‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که فرکانس تولید قطره کاهش می‌یابد.

جدول ۵-۱: اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در عدد مویینگی $Ca=0.145$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$

نسبت لزجت	قطر قطره (μm)	فاصله بین قطرات (μm)	فرکانس (1/s)	زمان جدایش (s)
۱۷/۶	۲۷۵	۱۶۸۵	۵	۰/۳۱
۱۰	۲۶۵	۱۶۱۸	۵	۰/۳۱
۵	۲۶۰	۱۵۰۰	۵	۰/۳۰۵
۱	۲۱۰	۱۴۲۶	۶	۰/۲۷۵

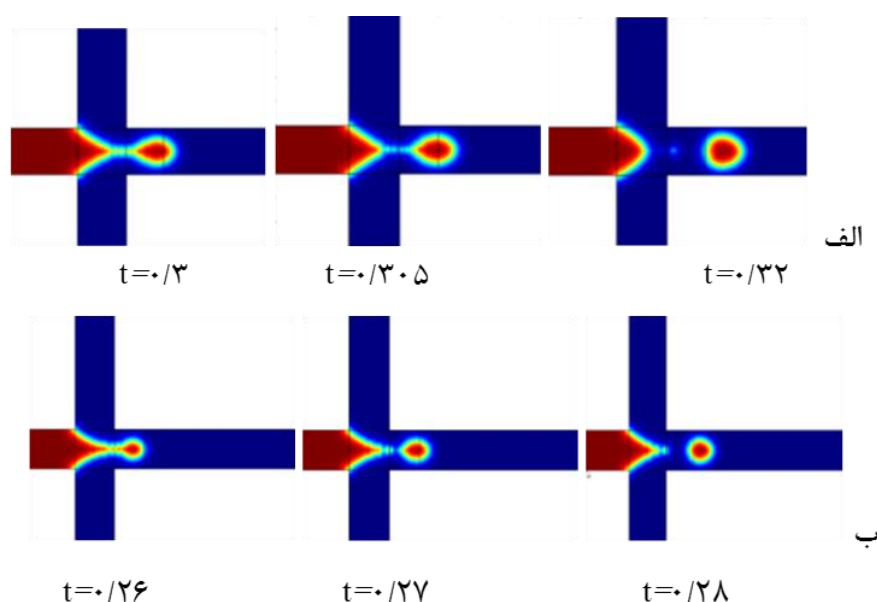
جدول ۵-۲: اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در عدد مویینگی $Ca=0.171$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=4$

نسبت لزجت	قطر قطره (μm)	فاصله بین قطرات (μm)	فرکانس (1/s)	زمان جدایش (s)
۱۷/۶	۳۰۰	۹۰۰	۱۰	۰/۱۷
۱۰	۲۸۰	۸۰۰	۱۱	۰/۱۷
۵	۳۰۰	۱۰۰۰	۱۱	۰/۱۶
۱	۲۵۰	۶۹۰	۱۲	۰/۱۶

جدول ۳-۵: اثر نسبت لزجت بر رفتار قطره در عدد موینگی $ca=0.121$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=10$

نسبت لزجت	قطر قطره (μm)	فاصله بین قطرات (μm)	فرکانس (1/s)	زمان جدایش (s)
۱۷/۶	۲۸۰	۲۲۴۰	۳	۰/۴
۱۰	۲۸۰	۲۲۵۰	۴	۰/۳۹
۵	۲۷۰	۲۱۳۸	۴	۰/۳۸
۱	۲۲۵	۱۶۰۰	۵	۰/۳۴۵

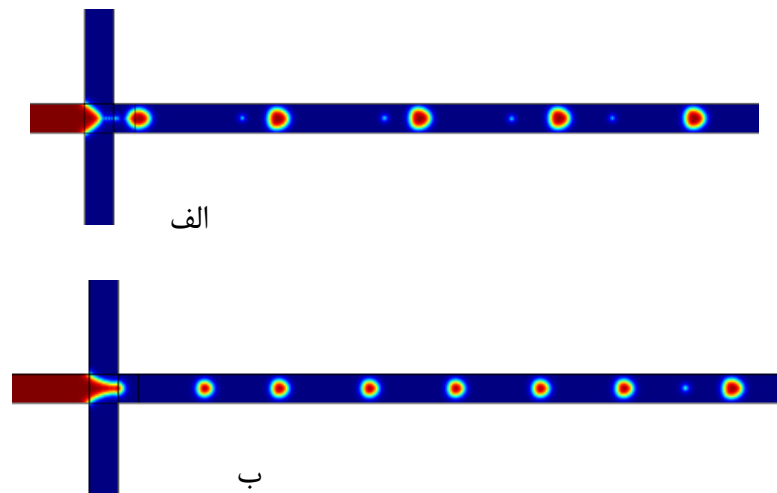
شکل ۱-۵ الف وب روند جدایش قطره را به ازای عدد موینگی 0.145 و نسبت دبی ثابت ۸ در دو نسبت لزجت مختلف ۱۷/۶ و ۱۰ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در نسبت لزجت ۱ قطراتی به ابعاد 206 میکرومتر و در نسبت لزجت ۱۷/۶ قطراتی به قطر 237 میکرومتر تشکیل می‌شود. بنابراین در نسبت لزجت کمتر قطر قطرات کمتر است.



شکل ۱-۵: روند جدایش قطره به ازای عدد موینگی $ca=0.145$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$ به ازای دو

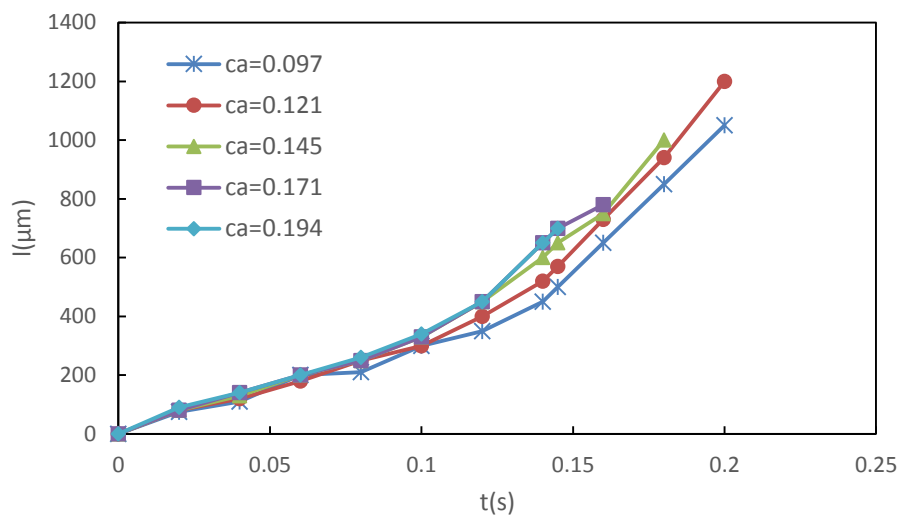
نسبت لزجت μ_c/μ_d (الف، ۱۷،۶ و ب) ۱

همچنین فرکانس و فواصل بین قطرات آن‌ها در شکل ۵-۲ نمایش داده شده است. شکل زیر فرکانس و فواصل بین قطرات را در زمان $t=1$ نشان می‌دهد. در نسبت لزجت بیشتر، فرکانس تشکیل قطرات، کمتر و فاصله بین قطرات بیشتر است. در نسبت لزجت $17/6$ فاصله بین قطرات 1266 میکرومتر و فرکانس 5 و در نسبت لزجت 1 فاصله بین قطرات 984 میکرومتر و فرکانس 7 می‌باشد.



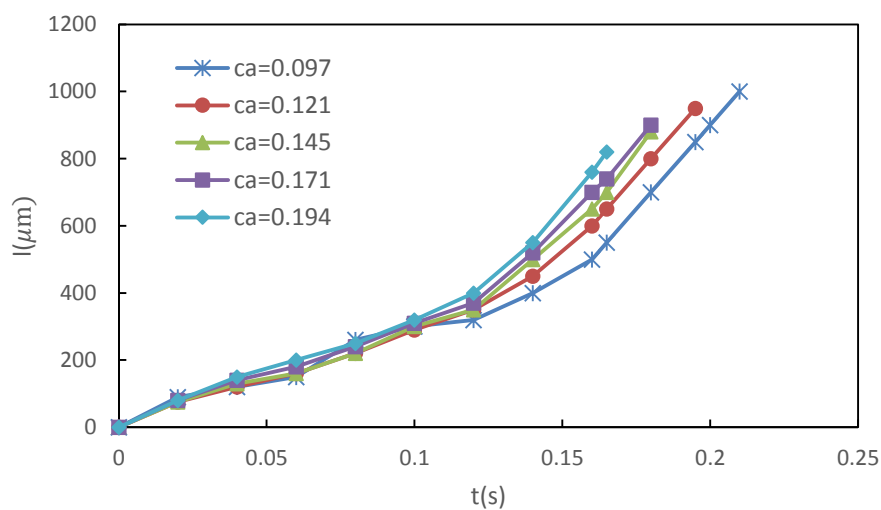
شکل ۵-۲: فرکانس و فواصل بین قطرات در $t=1$ به ازای عدد موینگی $ca=0.145$ و $Q_c/Q_d=8$ به ازای دو نسبت لزجت الف ($17/6$) و ب (1)

در شکل های ۳-۵ و ۴-۵ نمودار تغییر طول در برابر زمان در اعداد موینگی مختلف به ازای نسبت دبی ثابت، در دو نسبت لزجت آورده شده است. نقطه جدایش جایی است که قطره شکل گرفته و جدا می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در اعداد موینگی بالا، طول و زمان جدایش کمتر است و با کاهش عدد موینگی، طول و زمان جدایش افزایش می‌یابد. همچنین در نسبت لزجت بیشتر، طول و زمان جدایش افزایش می‌یابد.



شکل ۳-۵: نمودار تغییر طول در برابر زمان در اعداد موینگی های مختلف به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=1$ و

نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=4$



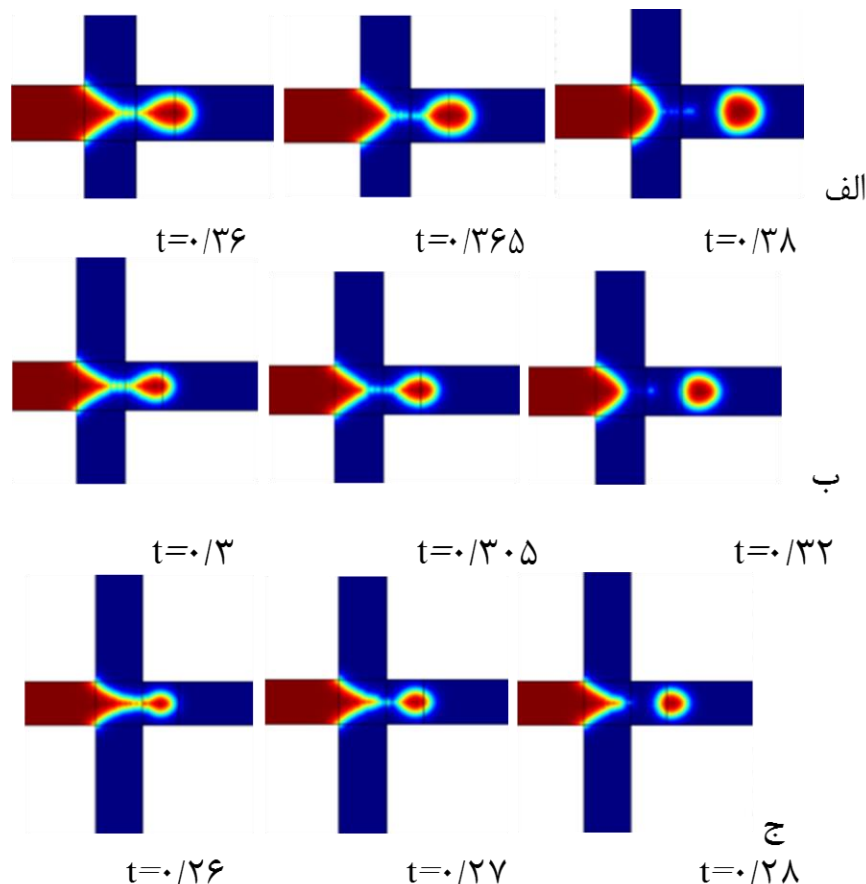
شکل ۴-۵: نمودار تغییر طول در برابر زمان در اعداد موینگی های مختلف به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$ و

و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=4$

۵-۲- اثر عدد موینگی بر اندازه قطره، طول جدایش فرکانس و زمان جدایش

در شکل ۵-۵، مراحل حرکت فاز جداشونده تا رسیدن به مرحله جدایش به ازای اعداد موینگی مختلف را نشان می‌دهد. با کاهش کشش سطحی اندازه عدد موینگی زیاد می‌شود و همان طور که در شکل ۵-۵ دیده می‌شود هرچه عدد موینگی زیادتر می‌شود اندازه قطرات کاهش و فرکانس افزایش می‌یابد.

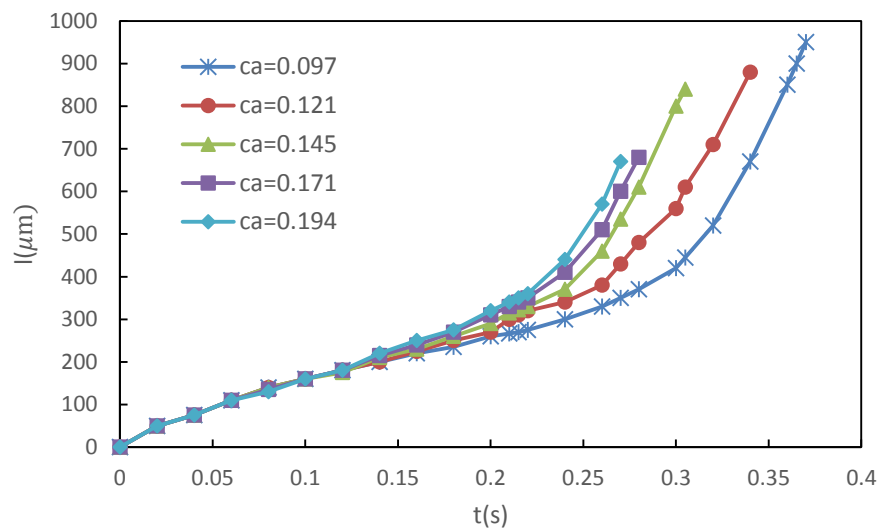
همچنین با افزایش عدد موینگی و با افزایش نسبت جریان، زمان جدایش می‌یابد. زمان جدایش در شکل الف ۰/۳۸ ثانیه، شکل ب ۰/۳۲ ثانیه و شکل ج ۰/۲۸ ثانیه می‌باشد. همچنین اندازه قطره در شکل الف ۳۶۴ میکرومتر، شکل ب ۳۲۰ میکرومتر و شکل ج ۲۷۰ میکرومتر می‌باشد. طول جدایش در شکل الف ۹۵۰ میکرومتر، شکل ب ۸۴۰ میکرومتر و شکل ج ۶۷۰ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۵-۵: روند تشکیل قطره به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ و نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$

الف) به ازای عدد موینگی $Ca=0/097$ ب) عدد موینگی $Ca=0/145$ ج) عدد موینگی $Ca=0/194$

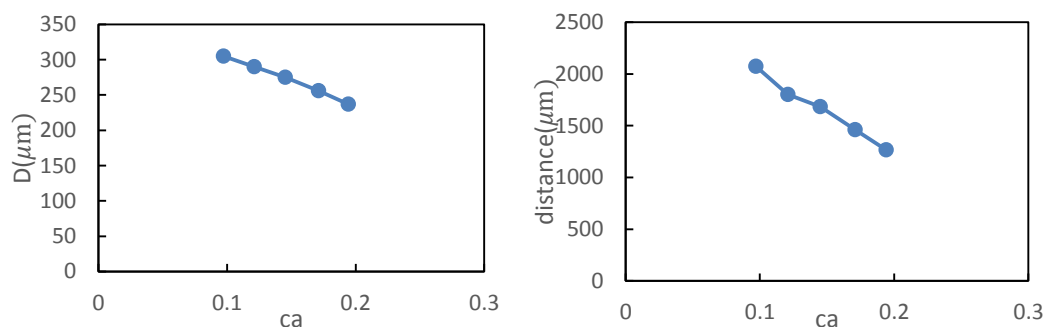
همان گونه که در شکل ۵-۶ مشاهده می‌شود با افزایش عدد موینگی نیروی ویسکوز به نیروی کشش سطحی افزایش می‌یابد و در نتیجه قطره سریع تر جدا شده و طول جدایش کاهش می‌یابد. یعنی قطره طول کمتری را به سمت پایین دست کانال کشیده می‌شود.



شکل ۵-۶: اندازه طول جدایش به ازای زمان در اعداد موینگی‌های مختلف و به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ و

نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$

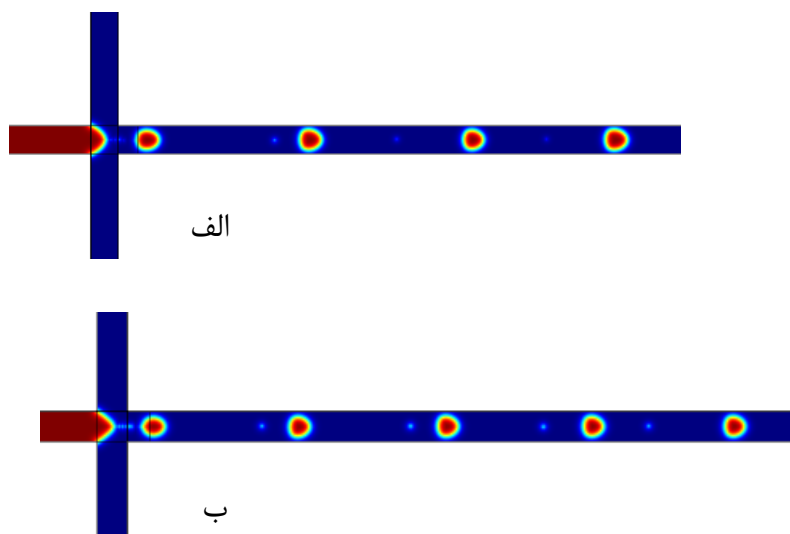
شکل ۵-۷ نمایانگر عدد موینگی بر قطر قطرات و فواصل بین قطرات می‌باشد. با کاهش کشش سطحی و یا افزایش عدد موینگی قطر قطره و فاصله بین قطرات کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۷: نمودار اثر عدد موینگی بر قطر و فاصله بین قطرات به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ و نسبت دبی ۸

در شکل ۵-۸ اثر عدد موینگی بر فرکانس و فواصل بین قطرات را در $t=1$ ثانیه در نسبت دبی ۸ و نسبت لزجت $17/6$ مشاهده می‌کنیم. در شکل الف به ازای عدد موینگی $0/094$ ، زمان جدایش $0/37$ ثانیه و طول جدایش 2075 میکرومتر و در شکل ب، به ازای عدد موینگی $0/145$ ، زمان جدایش $0/305$ ثانیه و طول جدایش 1685 میکرومتر می‌باشد. بنابراین در اعداد موینگی کمتر، قطره دیرتر جدا شده و فرکانس قطرات کمتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل زیر می‌بینیم به ازای زمان $t=1$ ثانیه در

شکل الف فرکانس ۴ و در شکل ب ۵ است.



شکل ۵-۸: تاثیر عدد موینگی بر فرکانس و فواصل قطرات در زمان مشخص به ازای نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ و

نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$ (الف) $Ca=0/097$ و (ب) $Ca=0/145$

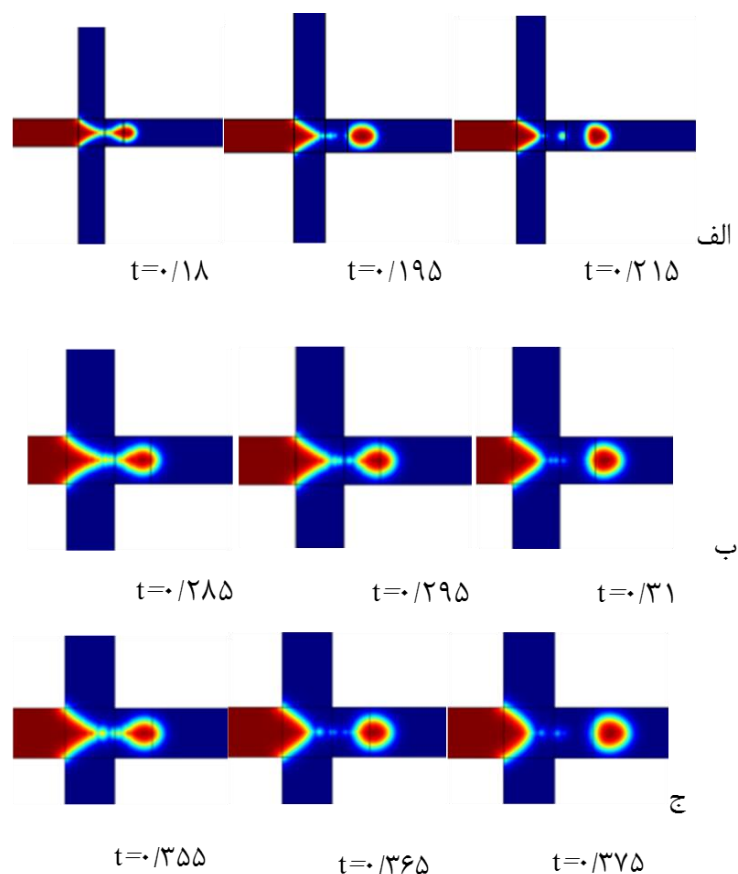
۵-۳- اثر نرخ جریان بر قطر قطره، فاصله بین قطرات، فرکانس، طول جدایش و

زمان جدایش

در رژیم فشردگی عدد موینگی تاثیر چندانی بر اندازه قطره ندارد و اندازه قطره وابسته به نرخ جریانها است. در اعداد موینگی پایین معمولاً کمتر از $0/01$ نیروی فشاری که توسط فاز پیوسته بر فاز گسسته اعمال می شود، موجب تشکیل قطره می گردد. تنش برشی اعمال شده بر فصل مشترک، نیروهای دراگ ویسکوز، در مقایسه با نیروهای کشش سطحی برای قطره در حال ظهور می تواند نادیده گرفته شود و فشار فشرده کننده، نقش اساسی را در تشکیل قطره ایفا می کند. نیروهای ویسکوز آن قدر قوی نیست تا بر نیروهای فصل مشترک غلبه نماید. بنابراین قطره تمام قسمت T- شکل کانال اصلی و در نتیجه جریان پیوسته را مسدود می کند. در این لحظه طول قطره تقریباً برابر با عرض کانال است که این امر موجب افزایش فشار بالادست جریان قطره در حال ظهور می شود. گردن قطره فشرده شده و این رشد در قطره، در یک نسبت نرخ جریان Q_d ادامه می یابد. سر فاز گسسته به سمت کانال اصلی دراز می شود

تا گردن فاز گسسته (d) به اندازه کافی باریک شود. نرخ کاهش ضخامت گردن فاز گسسته (d) تقریباً با سرعت متوسط فاز پیوسته برابر است. در طول این فرایند قطره کشیده می‌شود تا در نهایت قطره‌ای از سیال گسسته تشکیل و از سیال جدا شود که با افزایش نسبت نرخ جریان طول جدایش افزایش می‌یابد و به رژیم جتی نزدیک می‌شود.

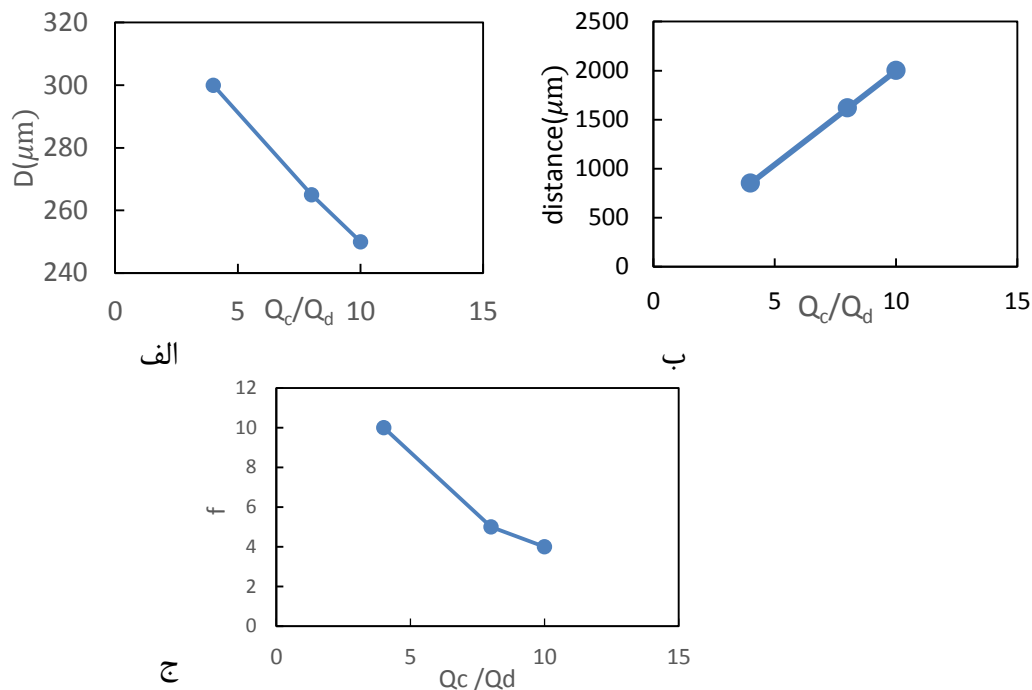
شکل ۵-۹ روند تشکیل قطره را در سه نرخ جریان نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که قطر قطره در شکل الف ۳۰۰ میکرومتر، شکل ب ۲۶۵ میکرومتر و شکل ج ۲۵۰ میکرومتر می‌باشد. همچنین زمان جدایش شکل الف ۰/۱۸۵ ثانیه، شکل ب ۰/۳۱ ثانیه و شکل ج ۰/۳۷۵ ثانیه می‌باشد. طول جدایش شکل الف ۸۸۰ میکرومتر، شکل ب ۸۴۰ میکرومتر و شکل ج ۹۳۰ میکرومتر می‌باشد.



شکل ۵-۹: روند تشکیل قطره تا زمان جدایش به ازای عدد موینگی $Ca=0/145$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$

الف) نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=4$ ب) نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$ و ج) نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=10$

طول قطره با افزایش نرخ جریان فاز پیوسته کاهش و با افزایش نرخ جریان گسسته افزایش می یابد. چون با افزایش سرعت فاز پیوسته میدان فشار پشت قطره زمان کمتری برای شکل گرفتن دارد. در نتیجه قطر قطره کاهش می یابد. شکل ۵-۱۰ نشان می دهد که با افزایش نسبت دبی قطر قطره کاهش یافته و فواصل بین آن ها، افزایش می یابد. همچنین فرکانس کاهش می یابد.

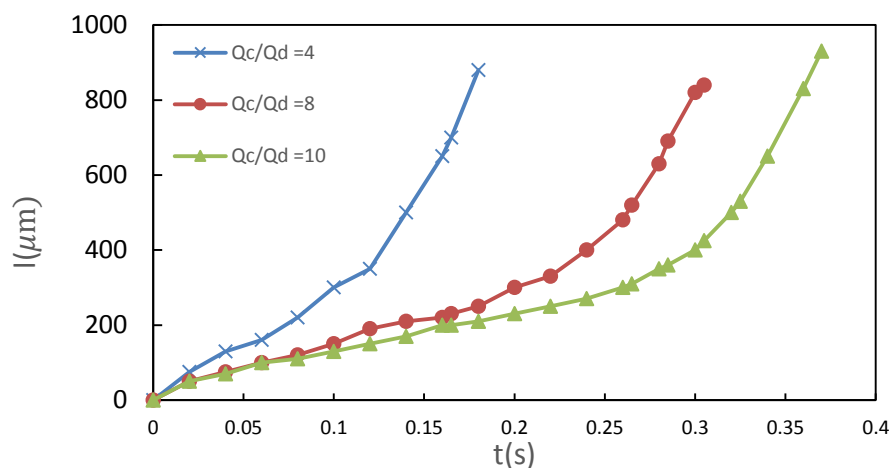


شکل ۵-۱۰: تاثیر نسبت نرخ جریان بر الف) تغییر قطر قطره ب) فاصله بین قطرات ج) فرکانس قطرات به ازای

عدد موینگی $Ca=0.145$ نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=10$ در سه نسبت نرخ جریان ۴ و ۸ و ۱۰

همچنین طول جدایش بر حسب زمان، برای سه نرخ جریان در شکل ۵-۱۱ نشان داده شده

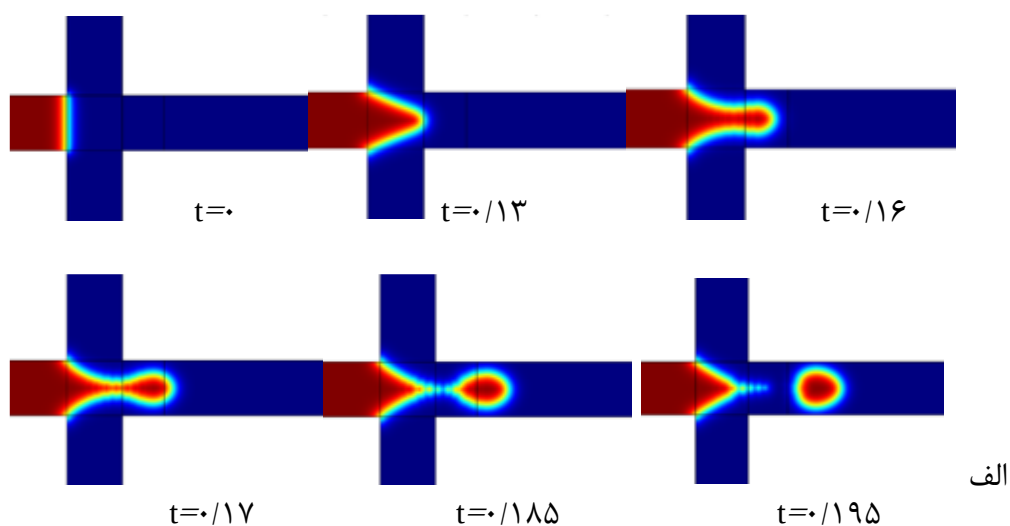
است. با افزایش نسبت دبی و یا همان نرخ جریان، طول و زمان جدایش افزایش یافته و فرکانس کاهش می یابد.

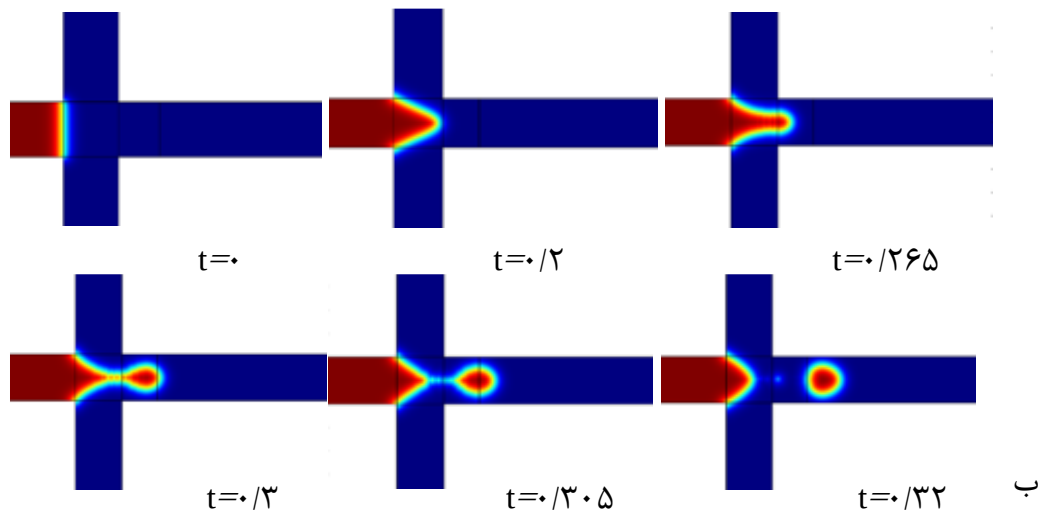


شکل ۵-۱۱: تاثیر نسبت نرخ جریان بر طول جدایش بر حسب زمان به ازای عدد موینگی

در سه نسبت نرخ جریان ۴ و ۸ و ۱۰ $\mu_c/\mu_d=10$ نسبت لزجت $Ca=0/145$

شکل ۵-۱۲ روند تشکیل قطره به ازای عدد موینگی $Ca=0/145$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ در دو نرخ جریان نشان می دهد. قطر قطره در شکل الف ۳۲۰ میکرومتر و در شکل ب ۲۷۵ میکرومتر می باشد. همچنین زمان جدایش در شکل الف ۰/۱۹ ثانیه و در شکل ب ۰/۳۱ ثانیه می باشد. طول جدایش در شکل الف ۹۹۰ میکرومتر و در شکل ب ۸۴۰ میکرومتر می باشد.

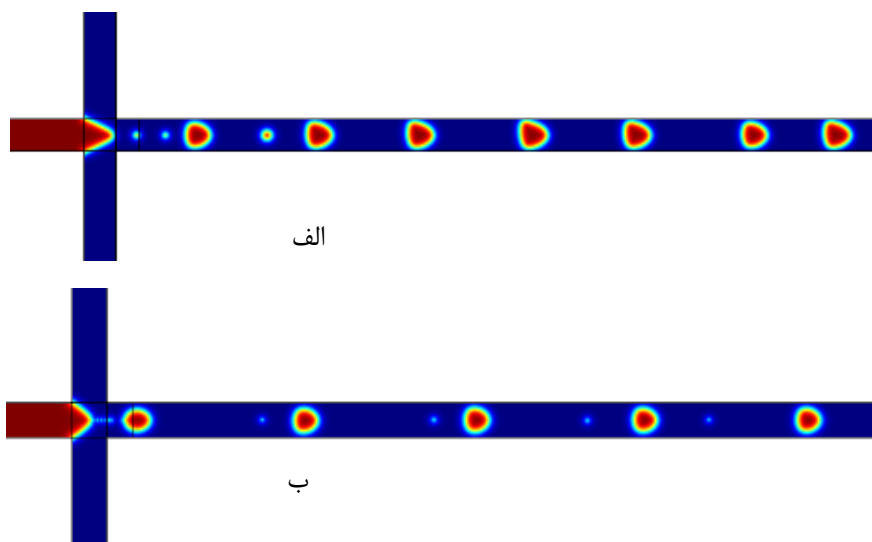




شکل ۵-۱۲: روند تشکیل قطره به ازای عدد موینگی $Ca=0.145$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ (الف) نسبت نرخ

جریان $Q_c/Q_d=4$ (ب) نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$

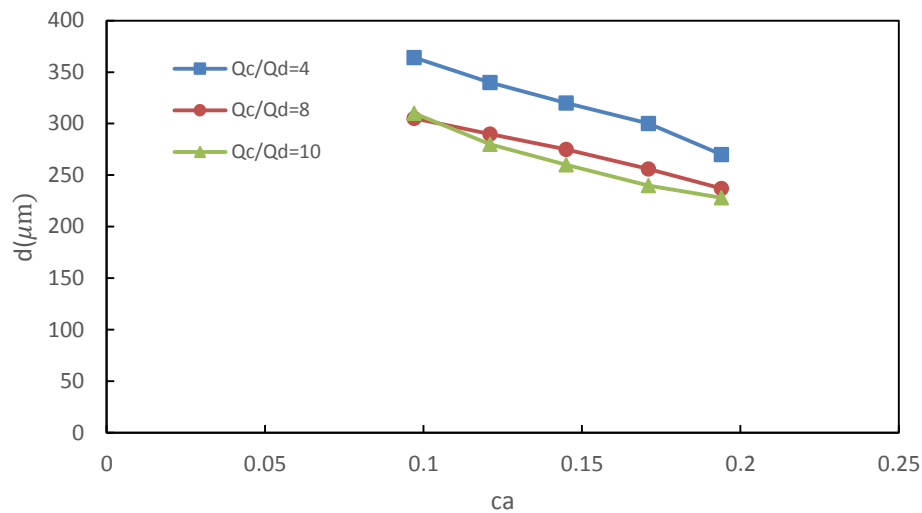
همچنین شکل ۵-۱۳ نشانگر فواصل و فرکانس قطرات در این دو نرخ جریان می باشد. در لحظه $t=1$ فرکانس در شکل الف ۷ و در شکل ب ۵ می باشد. فاصله بین قطرات در شکل الف ۱۰۸۷ میکرومتر و در شکل ب ۱۶۸۵ میکرومتر می باشد.



شکل ۵-۱۳: فرکانس تشکیل قطرات به ازای عدد موینگی $Ca=0.145$ و نسبت لزجت $\mu_c/\mu_d=17/6$ (الف) نسبت نرخ

جریان $Q_c/Q_d=4$ (ب) نسبت نرخ جریان $Q_c/Q_d=8$

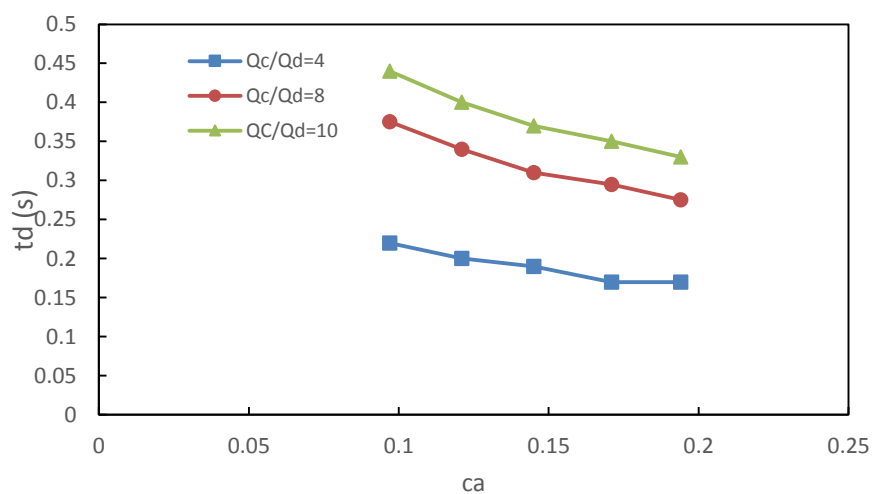
در شکل‌های ۵-۱۴ و ۵-۱۵ تاثیر دو پارامتر مهم، عدد مویینگی و نرخ جریان به طور همزمان در یک نمودار بر قطر قطره و زمان جدایش قطره ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ جریان و عدد مویینگی، قطر کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۱۴ تاثیر عدد مویینگی بر قطر به ازای نسبت نرخ جریان‌های مختلف در نسبت $\mu_c/\mu_d=17.6$

همچنین مطابق شکل ۵-۱۵ با افزایش عدد مویینگی، زمان جدایش کاهش و با افزایش نسبت

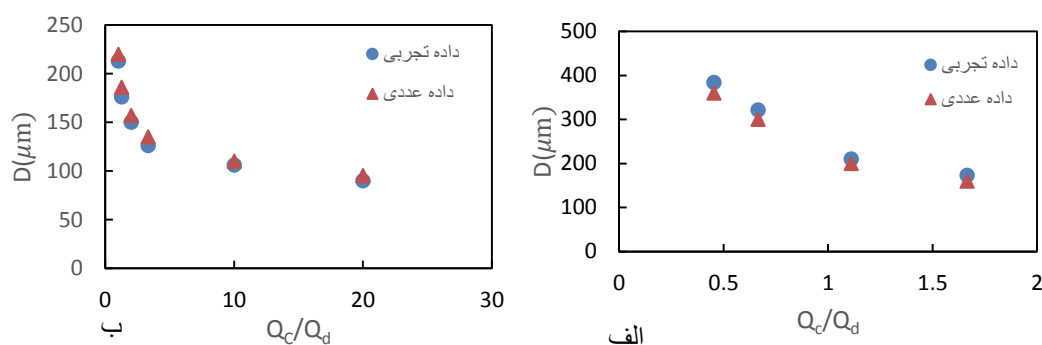
نرخ جریان، زمان جدایش افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۱۵ اثر عدد مویینگی بر زمان جدایش به ازای نسبت نرخ جریان مختلف در $\mu_c/\mu_d=17.6$

۵-۴- ارزیابی صحت نتایج

در این بخش به منظور صحت سنجی دقت روش عددی استفاده شده، نتایج به دست آمده از روش عددی این پژوهش با نتایج تجربی گارتکی و همکاران [۳۶] که در آن روغن فاز پیوسته و آب فاز گسسته بود مقایسه شد. همان طور که در شکل ۵-۱۶ الف و ب مشاهده می شود به ازای لزجت مشخص فاز پیوسته و در دو نرخ جریان از آن به ازای نسبت دبی های مشخص نرخ جریان فاز گسسته را تغییر داده و قطر قطرات حاصل اندازه گیری شده است که در شکل مشخص و مشاهده شد که قطر قطرات تطابق خوبی با داده های حاصل از گارتکی و همکاران دارد.



شکل ۵-۱۶: الف) نمودار تطابق داده عددی و داده تجربی قطر بر حسب نرخ جریان الف) $\mu_{oil} = 100 \text{ mPa.s}$ و

$Q_{oil} = 0.0028 \mu\text{L/s}$ و Q_{water} متغیر و ب) $\mu_{oil} = 100 \text{ mPa.s}$ و $Q_{oil} = 0.0028 \mu\text{L/s}$ و Q_{water} متغیر

۶-مدل سازی فازی عصبی کانال T- شکل برای پیش بینی اندازه قطرات

۶-۱- شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی یک مدل محاسباتی از عملیاتی است که در مغز انسان صورت می‌گیرد. شبکه‌های عصبی از تعدادی گره تشکیل شده که توسط ارتباطاتی به هم متصل می‌باشند. هر ارتباط یک وزن عددی مختص به خود را دارد. شبکه‌های عصبی می‌توانند وزن‌ها را به منظور بهبود عملکرد، تنظیم نمایند. گره‌ها به دو دسته استاتیکی و تطبیقی تقسیم‌بندی می‌شوند و در فرآیند یادگیری پارامترهای گره‌های تطبیقی تنظیم می‌شوند. از مزایای مهم شبکه‌های عصبی می‌توان به یادگیری تطبیقی، تحمل خطا، دسته‌بندی، تعمیم‌دهی، توانایی زیاد در محاسبه و پردازش داده و استخراج اطلاعات، قابلیت حذف اغتشاش، پایداری و انعطاف‌پذیری اشاره کرد. قابلیت یادگیری همان توانایی تنظیم پارامترهای شبکه عصبی می‌باشد. برای این منظور نمونه‌های آموزش را به شبکه اعمال می‌کنند. اگر نمونه‌های تست به این شبکه آموزش دیده اعمال شود، خروجی مناسب را با درصد خطای کوچک می‌توان به دست آورد. به این ترتیب شبکه‌های عصبی می‌توانند با تغییر شرایط به صورت هوشمندانه خود را تطبیق یا اصلاح نمایند.

در واقع شبکه‌های عصبی را می‌توان در حل مسایلی که روابط دقیق ریاضی بین ورودی‌ها و خروجی‌های آن برقرار نیست به کار برد. شبکه‌های عصبی قادر به دسته‌بندی ورودی‌ها برای دریافت خروجی مناسب می‌باشند. همچنین شبکه عصبی قابلیت تعمیم‌دهی دارد و این خاصیت، شبکه را قادر می‌سازد تا تنها با برخورد محدودی نمونه، یک قانون کلی از آن به دست آورده و نتایج این آموخته‌ها را به موارد مشابه قبل تعمیم دهیم.

پس از آن که نمونه‌های اولیه به شبکه آموزش داده شد شبکه می‌تواند در مقابل ورودی‌های آموزش داده نشده (ورودی‌های تست) یک خروجی مناسب تولید نماید. این خروجی بر اساس مکانیسم تعمیم، که چیزی جز فرایند درون‌یابی نیست به دست می‌آید.

یکی از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی، شبکه عصبی چندلایه پرسپترون^۱ است که از یک لایه ورودی یک یا چند لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده است. هر لایه دارای ماتریس وزن، بردارهای بایاس و خروجی‌های مختص به خود است و خروجی هر یک از لایه‌های میانی به عنوان ورودی لایه بعدی به کار می‌رود. در شکل زیر ساختار شبکه عصبی با سه لایه وجود دارد که هر لایه جدا از لایه دیگر می‌باشد. هر لایه تعدادی گره دارد که بعضی ثابت و بعضی تطبیقی‌اند. با آموزش شبکه، توابع و وزن‌ها تنظیم می‌شوند. P_i ها ورودی‌های شبکه می‌باشند. W وزن و b بایاس و a خروجی نهایی می‌باشد. خروجی لایه اول به صورت $a_1 = f_1(w_1p + b_1)$ می‌باشد. ساختار یک نورون تنها از یک واحد پردازشی مقدماتی شامل جمع‌کننده و تابع فعال‌سازی با چندین ورودی و یک خروجی است. نحوه کار به این صورت است که مقدار ورودی با ضرب در مقدار وزن، وزن دار شده به همراه بایاس وارد تابع جمع می‌شود و مقدار ورودی تابع انتقال n ، را ایجاد می‌کند.

$$n = W_{11}P_1 + W_{12}P_2 + \dots + W_{1R}P_R + b \quad (۱-۶)$$

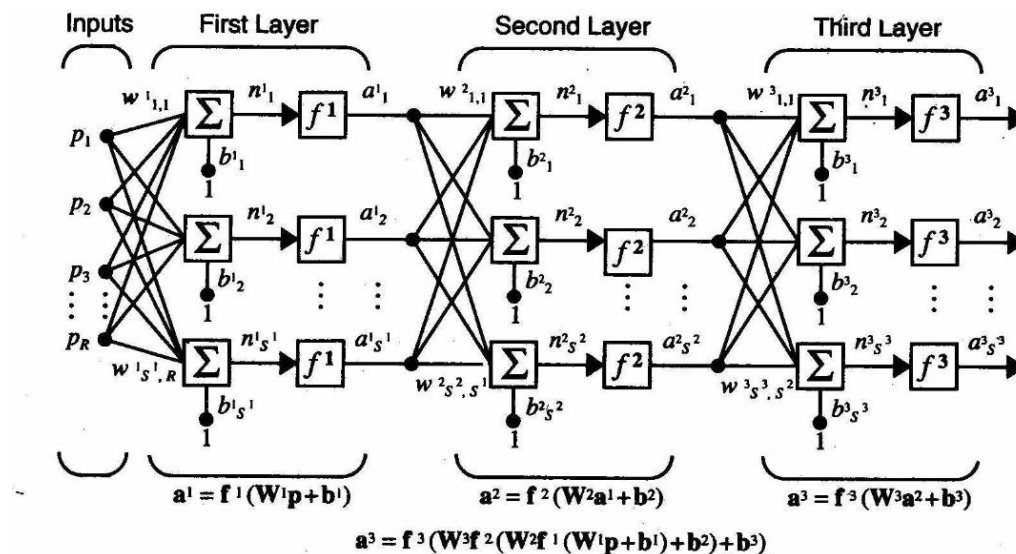
سپس مقدار n وارد تابع انتقال f شده و در نهایت مقدار a را به خود اختصاص می‌دهد که خروجی نهایی است.

$$a = f(W_{11}P_1 + W_{12}P_2 + \dots + W_{1R}P_R + b) = f(n) \quad (۲-۶)$$

در یک شبکه عصبی چندلایه هر لایه دارای ماتریس وزن، بردارهای بایاس و خروجی‌های مختص به خود است و خروجی هر یک از لایه‌های میانی به عنوان ورودی لایه بعدی به کار می‌رود.

[۹۴].

^۱ Multi Layer Perceptron(MLP)

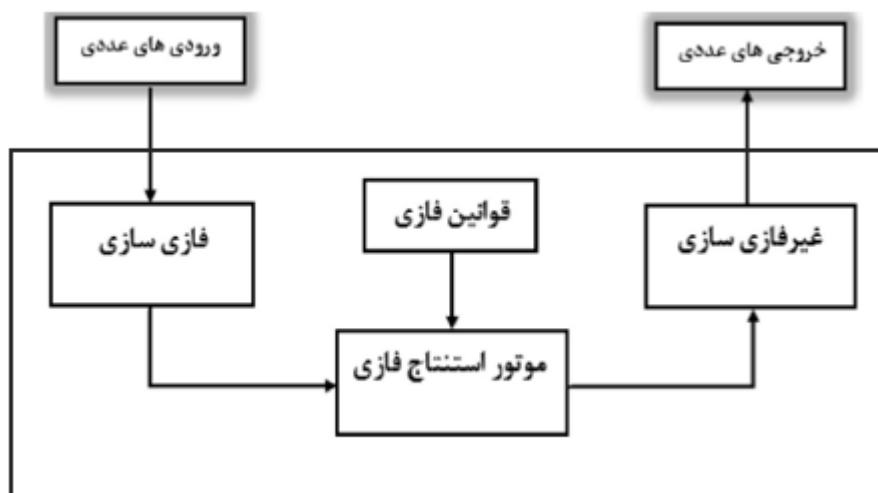


شکل ۶-۱- ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

۶-۲- سیستم استنتاجی فازی

این سیستم، یک چارچوب محاسباتی پرترفدار بر مبنای مجموعه‌های فازی و قواعد اگر- آنگاه^۱ است که برای فرموله کردن دستورات شرطی منطق فازی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساختار پایه ای سیستم‌های استنتاج فازی از سه بخش مفهومی تشکیل می‌شود. یک بخش، قواعدی هستند که شامل گزینشی از قواعد فازی می‌باشند. یک بخش، پایگاه داده است که توابع عضویت مورد استفاده در قواعد فازی، در قالب آن تعریف می‌شود. در نهایت یک بخش، ساز و کار استنتاج است که روال استنتاج توسط آن و به کمک قواعد و حقایق موجود، برای رسیدن به یک خروجی معقول انجام می‌پذیرد.

^۱ If-Then



شکل ۶-۲ ساختار کلی سیستم فازی

دو نوع از سیستم‌های استنتاج فازی که دارای کاربردهای گسترده‌ای هستند عبارتند از: مدل‌های فازی ممدانی و مدل‌های فازی سوگنو^۱. در سیستم فازی سوگنو بر خلاف ممدانی، خروجی به شکل فازی نبوده و صریح است. به عبارت دیگر، بخش غیرفازی‌ساز در شکل وجود ندارد. مثلاً اگر x, y ورودی و z خروجی باشد قوانین سوگنو به صورت زیر است:

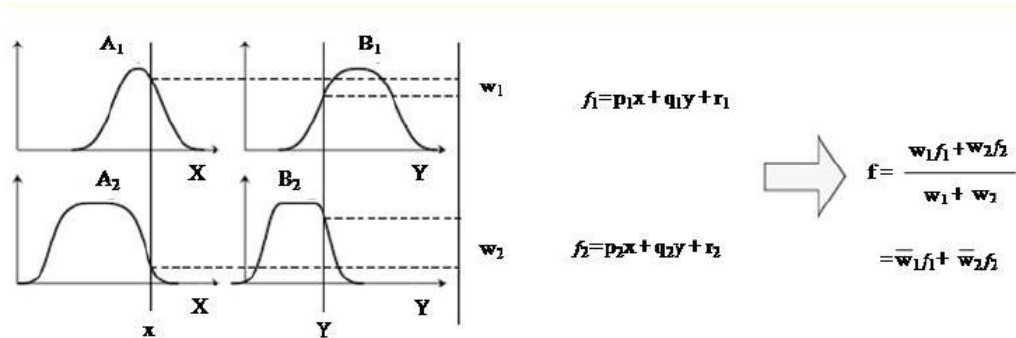
If x is A and y is B then $z=f(x,y)$

سیستم‌های استنتاج فازی از مجموعه‌ای از قواعد اگر آنگاه فازی تشکیل شده‌اند. در رابطه فوق، A و B مجموعه‌های فازی و $Z=f(x,y)$ یک تابع در قسمت نتیجه قاعده (قانون) می‌باشد. معمولاً $f(x,y)$ یک چند جمله‌ای با متغیرهای x,y است. در زیر نحوه استنتاج یک سیستم فازی سوگنوی مرتبه ۱ با دو ورودی و دو قانون نمایش داده شده است.

قانون ۱: If x_1 is A_1 and y is B_1 , then $f_1 = p_1x_1 + q_1y + r_1$

قانون ۲: If x_1 is A_2 and y is B_2 , then $y = p_2x_1 + q_2y + r_2$

^۱ sugeno



شکل ۳-۶- روش استنتاج فازی سوگنو

خروجی به صورت میانگین وزنی هر قانون است. وزن هر لایه را قدرت آتش آن لایه می‌نامند [۹۰، ۹۱ و ۹۳].

۳-۶- ساختار شبکه فازی عصبی انفیس^۱

سیستم های فازی و شبکه های عصبی مکمل یکدیگرند. شبکه های عصبی قابلیت یادگیری از داده ها را دارند در حالی که سیستم های فازی نمی توانند. فهم سیستم های فازی به دلیل استفاده از اصطلاحات زبان شناسی و قوانین اگر-آن گاه می باشند. در حالی که شبکه های عصبی این گونه نیستند. شبکه های عصبی قابلیت یادگیری سطح پایین و توان محاسباتی بالا اما سیستم های فازی قابلیت تفکر انسان گونه سطح بالا دارند. شبکه های عصبی با توانایی قابل توجه خود در استنتاج نتایج از داده های پیچیده می توانند در استخراج الگوها و شناسایی گرایش های مختلفی که برای انسان ها پیچیده و دشوار است استفاده شوند.

در مورد مسایل مدل سازی، صرفا نمی توان با شبکه های عصبی به فیزیک مساله پی برد. به عبارت دیگر مرتبط ساختن پارامترها یا ساختار شبکه به پارامترهای فرایند معمولا غیرممکن است. دقت نتایج بستگی زیادی به اندازه مجموعه آموزش دارد. قواعد یا دستورات مشخصی برای طراحی شبکه جهت کاربرد اختیاری وجود ندارد.

^۱ anfis

منظور از تعیین پارامترهای سیستم فازی توسط شبکه عصبی، تعیین خودکار پارامترهای فازی، مانند قواعد فازی و یا توابع عضویت مجموعه‌های فازی است. به عبارتی اختصار نروفازی^۱ سیستم ترکیبی حاصل از شبکه عصبی و سیستم استنتاجی فازی گفته شده که در آن شبکه عصبی به عنوان تعیین کننده پارامترهای سیستم فازی مورد استفاده قرار می گیرد. منطق فازی برای بهبود کارایی شبکه و یا افزایش توان یادگیری شبکه عصبی مورد استفاده قرار می گیرد. در این شبکه‌ها افزودن قواعد فازی برای تغییر نرخ یادگیری و یا تغییر (ورودی/خروجی) شبکه از حالت غیر فازی به فازی است. شبکه عصبی و سیستم فازی در یک ساختار هماهنگ با یکدیگر ترکیب می شوند. از جمله این ساختارها می توان به شبکه انفیس اشاره کرد.

ANFIS مخفف Adaptive Network-based Fuzzy Inference System می باشد و در سال

۱۹۹۳ توسط دکتر راگر جانگ^۲ معرفی شد و در سال ۱۹۹۶ توسط یانگ بسط یافت. اولین بار جانگ توانست از قدرت زبانی سیستم‌های فازی و آموزش شبکه های عصبی استفاده نماید و سیستمی تحت عنوان سیستم‌های فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی ارایه نماید. سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی روش مناسبی برای حل مسایل غیرخطی است. انفیس، ترکیبی از روش استنتاج فازی (FIS) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) است که از توانایی هر دو مدل بهره می برد. لذا به طور هم زمان از توانایی‌های سیستم های فازی مبتنی بر پایگاه دانش و قابلیت های آموزش و یادگیری شبکه های عصبی مبتنی بر روش های تطبیقی منتفع می شود.

سیستم های انفیس در اصل یک سیستم تاکاگی – سوگنو-کانگ درجه ۱ هستند. از آنجا که تعیین پارامترهای توابع عضویت در قسمت مقدم قواعد و همچنین تعیین ضرائب قسمت تالی قواعد همانند تعیین وزنهای شبکه عصبی است به کمک روش هایی مثل الگوریتم های پس انتشار خطا انجام

^۱ Neuro Fuzzy

^۲ ROGER JANG

می شود.

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی از الگوریتم‌های شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. این سیستم از قدرت زبانی سیستم فازی با قدرت عددی یک شبکه عصبی در مدل‌سازی فرآیندهای پیچیده بسیار قدرتمند می‌باشد و قابلیت پیش بینی نتایج با استفاده از داده‌های موجود را دارد. سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی شبکه ای ۵ لایه‌ای، متشکل از گره‌ها و کمان اتصال دهنده گره می‌باشد. لایه اول، داده‌های ورودی با درجه عضویت می‌باشد که توسط کاربر مشخص می‌گردد. کلیه عملیات مدل‌سازی در لایه‌های دوم تا چهارم انجام می‌گیرد. با ضرب مقادیر ورودی به هر گره در یکدیگر، وزن هر قانون در لایه دوم به دست می‌آید. در لایه سوم وزن نسبی قانون‌ها محاسبه می‌شوند. در لایه چهارم هر گره دارای تابع گره بوده و به تمام ورودی‌ها و یک گره در لایه سوم متصل است. لایه آخر، لایه خروجی شبکه می‌باشد که هدف آن جمع بندی تمام خروجی‌ها و حداقل نمودن اختلاف خروجی به دست آمده از شبکه و خروجی واقعی است. لایه یک و لایه چهار تطبیقی و بقیه لایه‌ها استاتیکی است.

۶-۳-۱- لایه های انفیس

۶-۳-۱-۱- لایه فازی سازی:

هر ورودی وارد تابع عضو متناظر می شود و تبدیل به ورودی فازی می شود که x یا y ورودی گره و مجموعه‌های A یا B مجموعه فازی مربوط به گره مورد نظر می باشند. نوروں‌های فازی یک سیگنال ورودی را دریافت و در خصوص درجه وابستگی این سیگنال به مجموعه فازی نوروں تصمیم می‌گیرند. نوروں‌ها در این لایه تنها سیگنال‌های ورودی خارجی^۱ را به لایه بعدی هدایت می‌کنند. در این لایه هر گره یک تابع عضویت را نشان می‌دهد که پارامترهای آموزش پذیر بخش مقدم هستند.

^۱ crisp

۶-۳-۱-۲- محاسبه قدرت آتش هر قانون

این مقادیر به عنوان وزن مقدمه هر قانون می‌باشند. قدرت آتش در این لایه تولید می‌شود و میزان قدرت آتش هر قانون بر مبنای t_{norm} ضرب به صورت زیر است:

$$w_i = \mu_{A_i}(x_i) \mu_{B_i}(y_i) \quad i=1, 2 \quad (3-6)$$

هر گره خروجی بیانگر قدرت آتش^۱ یک قاعده می‌باشد و تنها به یک قانون فازی سوگتو ارتباط دارد.

۶-۳-۱-۳- نرمال سازی

این لایه، لایه نرمالیزه کردن است و هر نورون در این لایه سیگنال‌هایی را از تمام نورون‌ها دریافت نموده و محاسبه می‌کند در واقع خروجی این لایه، نرمالیزه شده لایه قبلی است. این مقدار مشخص کننده این است که تا چه حدی به ازای ورودی‌ها، قانون مربوطه در نتیجه نهایی صادق است. هر وزن طبق معادله زیر نرمال می‌شود.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i=1, 2 \quad (4-6)$$

۶-۳-۱-۴- خروجی هر یک از لایه‌ها

هر نورون در این لایه به نرون نرمالیزه شده مربوطه مرتبط است و همچنین سیگنال‌های ورودی نخستین x_1 x_2 را دریافت می‌کند. هر گره i در این لایه، یک گره منطبق با تابع گره، به صورت زیر است:

^۱ firing strenght

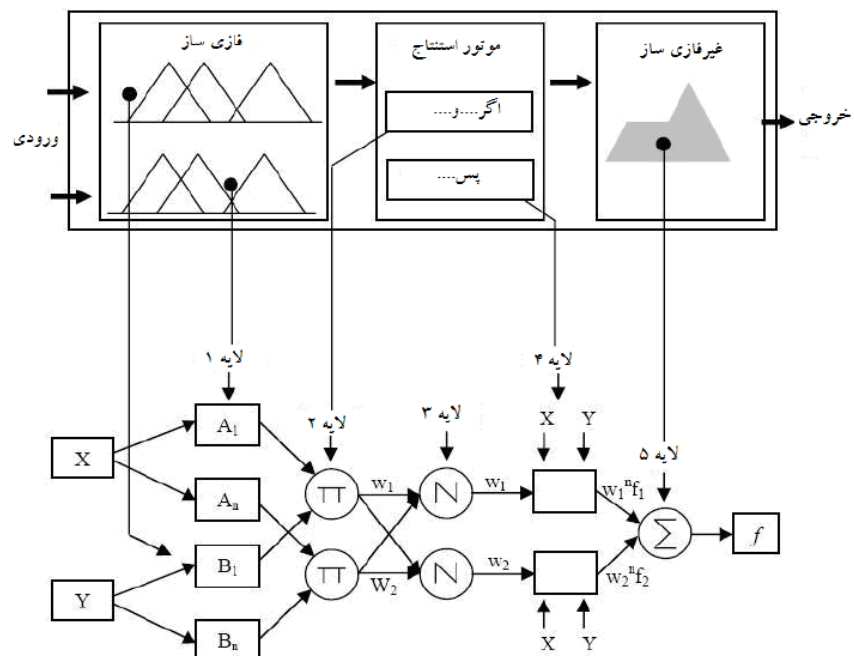
$$Q_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad i=1, 2 \quad (5-6)$$

که در آن $\bar{w}_i$ ، یک قدرت آتش نرمال شده از لایه سوم بوده و p_1, q_1, r_1 مجموعه پارامترهای این گره می باشند. همچنین پارامترهای این لایه به پارامترهای استنتاجی موسومند.

۵-۱-۳-۶- خروجی لایه:

تنها گره این لایه، یک گره ثابت به نام $\sum$ می باشد که تمام خروجی ها را به عنوان مجموع همه سیگنال های ورودی، به صورت زیر محاسبه می کند و در نهایت از طریق دیفازی کردن، خروجی های فازی به خروجی های عددی تبدیل می شوند. در این لایه تنها یک نورون وجود دارد [۹۰، ۹۱ و ۹۳].

$$Q_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i \bar{w}_i f_i}{\sum_i \bar{w}_i} \quad i=1, 2 \quad (6-6)$$



شکل ۴-۶- معماری کلی لایه فازی عصبی تطبیقی انفیس

۴-۶- مدل سازی فازی-عصبی در پیش بینی قطر قطره در میکروکانال

این مدل پیش بینی شده به عنوان یک مدل انفیس است که با مجموعه داده های ورودی شامل عدد موپینگ، نسبت لزجت و نسبت جریان و خروجی که در اینجا قطر قطره می باشد آموزش داده شده است و با روش شبیه سازی بر اساس معادلات حاکم در میکروسیال تولید شده است.

۴-۶-۱- آنالیز تاگوچی

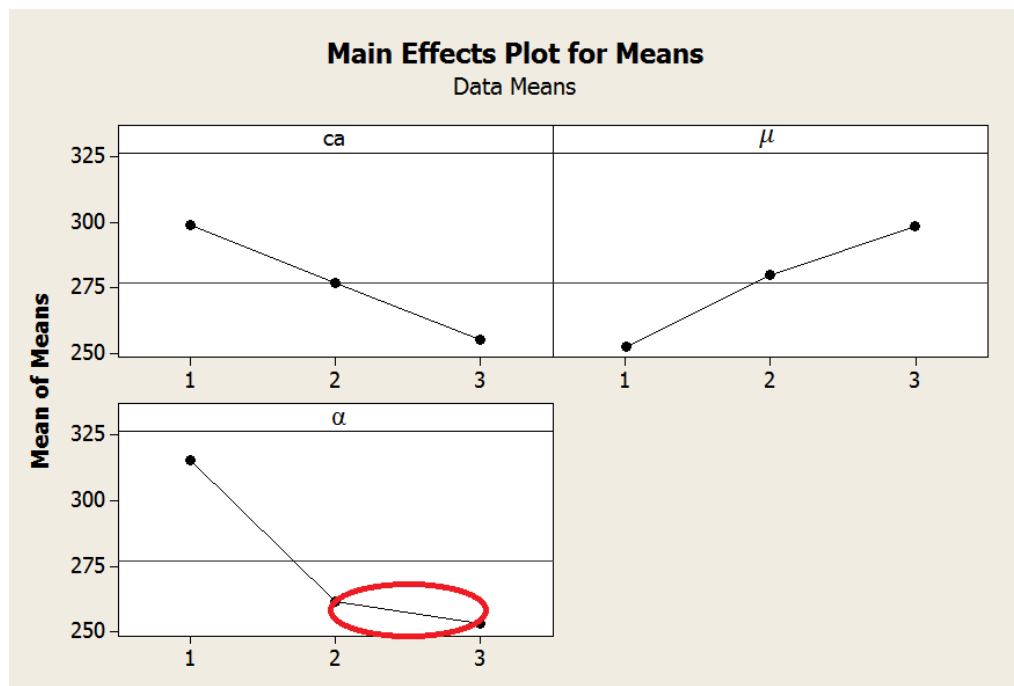
آنالیز تاگوچی برای شناسایی مهم ترین و موثرترین پارامترهای ورودی که بر خروجی مورد نظر اثر می گذارد به کار می رود. در آزمون ها ضروری است بدانیم چه پارامترهایی بیشترین تاثیر را بر خروجی مورد نظر دارند تا امتحان های غیر ضروری حذف شود و از اتلاف وقت و هزینه جلوگیری شود. از تحلیل تاگوچی برای ایجاد بهترین و مؤثرترین مجموعه داده که نشان دهنده موثرترین پارامترها در اندازه قطره است، استفاده شده است [۹۰]. در اینجا سه پارامتر که شامل عدد کیپلاری، نسبت دبی و نسبت لزجت است را به عنوان ورودی و قطر قطره را به عنوان خروجی مورد بررسی قرار می دهیم. برای استفاده از آنالیز تاگوچی از نرم افزار مینی تب^۱ استفاده شد. در ابتدا برای هر یک از داده های پارامترهای ورودی سطحی تعریف می کنیم. در جدول ۴-۶ تعداد سطوح و پارامترهای ورودی آورده شده است.

^۱ Mini tab

Level	Ca	μ_r	α
۱	۰/۰۹	۱	۴
۲	۰/۱۲	۵	۸
۳	۰/۱۴	۱۰	۱۰
۴	۰/۱۷	۱۷/۶	
۵	۰/۱۹		

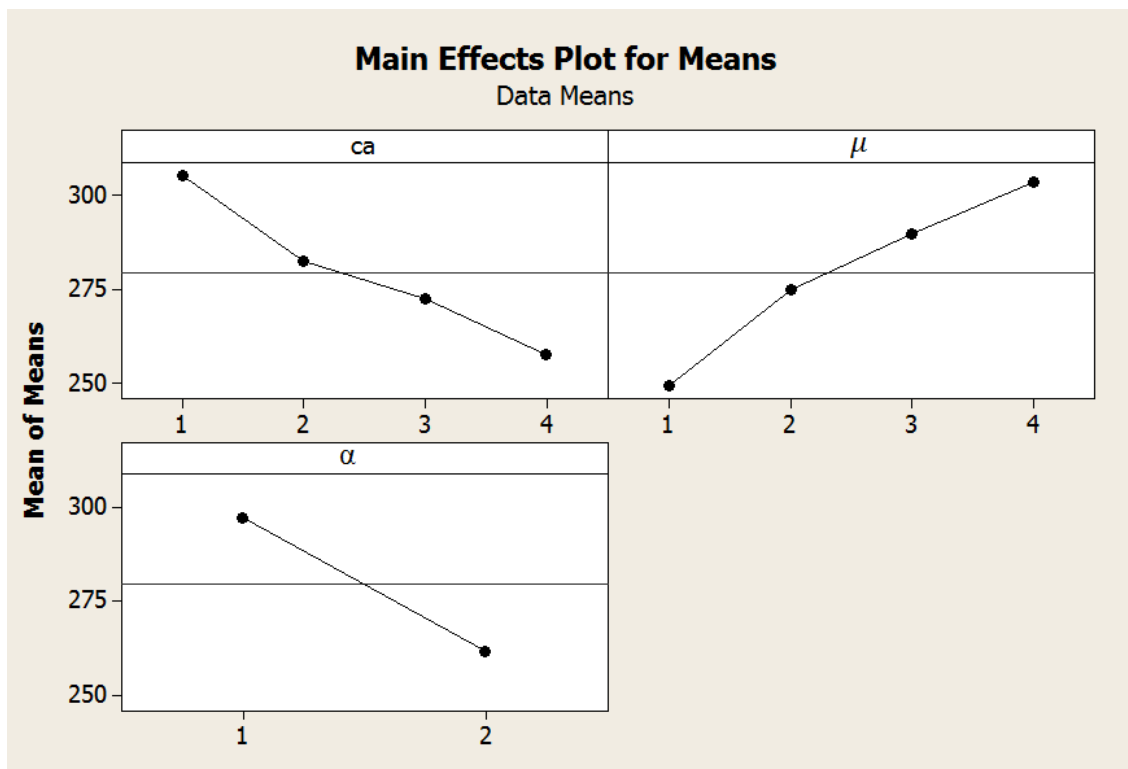
جدول ۶-۱- تعداد سطوح داده‌های ورودی

با ورود به نرم‌افزار مینی‌تب باید تعداد فاکتورهای ورودی و تعداد سطوح مشخص شود. در مرحله اول به پارامترهای ورودی تعداد سطوح یکسانی داده می‌شود تا تشکیل ماتریس متعامد بدهد. از آنجایی که برای نسبت دبی بیشتر از سه سطح تعریف نشده است لذا در گام نخست برای هر پارامتر سه سطح تعریف می‌شود. سپس نرم‌افزار تعدادی خروجی می‌خواهد. بنابراین پارامترهای خروجی که در اینجا همان قطر قطره است نیز وارد می‌شود. بعد از وارد کردن پارامترهای خروجی نرم‌افزار با استفاده از اصول تاگوچی داده‌ها را آنالیز و سه نمودار طبق شکل ۶-۵ می‌دهد. همانطور که در شکل ۶-۵ مشاهده می‌شود سه نمودار برای پارامترهای ورودی شامل عدد موینگی، نسبت لزجت و نسبت دبی به دست آمد که محور افقی مربوط به تعداد سطوح و محور عمودی مربوط به پارامتر خروجی که در اینجا قطر قطره است می‌باشد. در ناحیه مشخص شده با رنگ قرمز تغییرات ناچیز است. لذا در مرحله بعد نسبت دبی در این سطح حذف می‌شود. همچنین در شکل تغییرات عدد موینگی بیشتر از بقیه بوده لذا اثر عدد موینگی از بقیه بیشتر است.



شکل ۶-۵- مرحله اول آنالیز تاگوچی

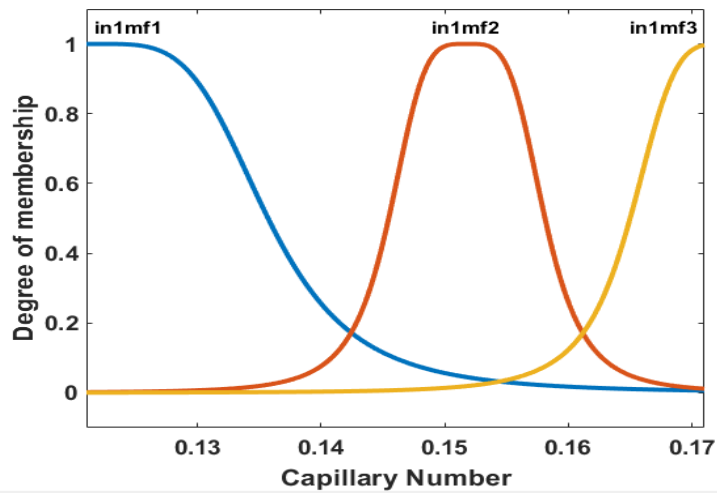
تاگوچی این امکان را می‌دهد که برای بعضی مراحل که تاثیر بیشتری دارد از ابتدا تعیین شود که تعداد مراحلش بیشتر باشد. بنابراین در مرحله دوم، تعداد سطوح مربوط به عدد مویینگی را زیاده‌تر کرده و اثر نسبت دبی بین سطح ۲ و ۳ که تغییر ناچیز داشت را حذف می‌نماییم. برای این کار، از ابتدا برای عدد مویینگی چهار مرحله در نظر گرفته می‌شود. نسبت دبی نیز دارای دو مرحله است. سپس نرم‌افزار با آنالیز تاگوچی برای نسبت لزجت نیز چهار مرحله در نظر گرفت. مرحله دوم آنالیز تاگوچی در شکل ۶-۶ نشان داده شده است. در این مرحله قسمتی که شیب کم داشته باشد و اختلاف تغییرات ناچیز باشد ملاحظه نشد. بنابراین آنالیز در ۲ مرحله انجام شد که تعداد سطوح در هر مرحله متفاوت است. برای هر پارامتر دایره قرمز نشان دهنده این است که تغییر پارامتر در آن جا، حداقل تاثیر را بر اندازه قطره دارد. بنابراین امتحانات در این فواصل انجام نمی‌شود.



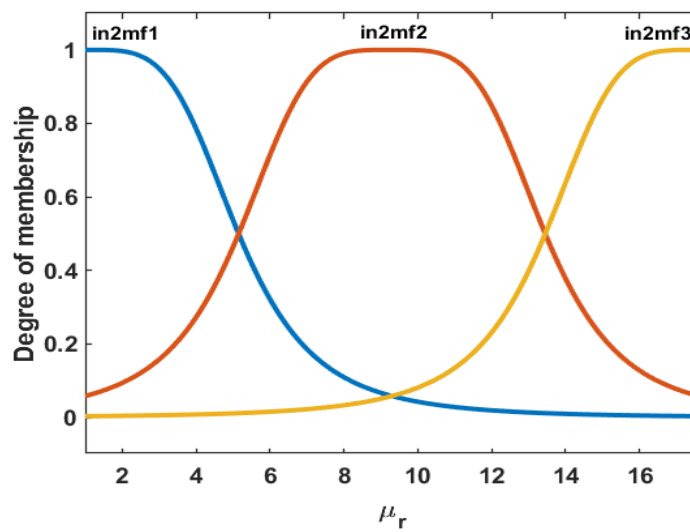
شکل ۶-۶- مرحله دوم آنالیز تاگچی

مجموعه داده‌ها برای تجزیه و تحلیل در انفیس تولید شد، مدل انفیس دارای ۳ ورودی، ۵ لایه و ۱ خروجی است. دامنه تغییرات نسبت نرخ جریان $10 > \alpha > 4$ ، دامنه تغییرات عدد موینگی $0.194 < Ca < 0.097$ و دامنه تغییرات نسبت لزجت $17/6 < \mu I < 1$ می‌باشد. ابتدا، با استفاده از شبیه سازی، برخی از داده های ورودی-خروجی را بدست می‌آوریم و آن‌ها را به عنوان مجموعه داده‌های آموزشی نگه می‌داریم. تا فیزیک حاکم بر مساله را بیشتر روشن کند. این مدل می‌تواند بیشتر برای کاهش تعداد طراحی‌های پرهزینه استفاده شود. در سطح فازی سازی، هر ورودی به تابع عضو متناظر وارد می‌شود و ورودی فازی تولید می‌شود، این توابع عضو با توجه به محدوده و سطوح مجموعه داده ها مربوط به هر پارامتر تولید می‌شوند. توابع عضویت پارامترهای ورودی در شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ و ۶-۹ مشخص شده است. با این مدل، انفیس اندازه قطره را پیش‌بینی می‌کند. در واقع در اینجا، یک مدل پیش بینی ارائه شد که می‌تواند برای بررسی اثر پارامترها در تولید قطرات در یک سیستم شبیه ساز استفاده شود که هم سبب سهولت کار شده و هم از انجام هزینه‌های گزاف آزمایشگاهی جلوگیری می‌کند. این مدل

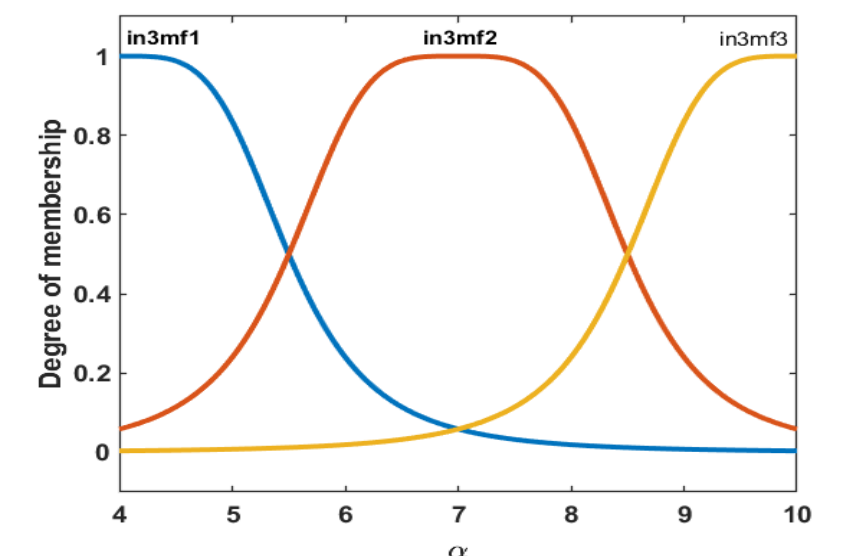
پیش‌بینی می‌تواند با یک خطای تحمل نسبتاً قابل اعتماد باشد.



شکل ۶-۷- تابع عضویت عدد موپینگ



شکل ۶-۸- تابع عضویت نسبت لزجت



شکل ۶-۹- تابع عضویت نسبت دبی

اما در این بخش ها فقط به ویژگی های فازی سیستم اشاره شد، ما باید اعتبار نتایج را که نقطه اصلی سیستم انفیس است، تست کنیم. این آزمون با توجه به ضریب تعیین (R^2) حاصل می شود که این موارد را تعیین می کند:

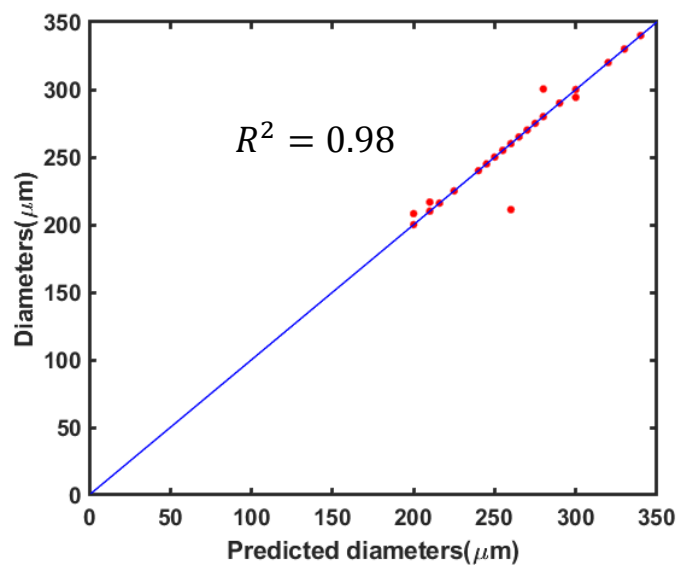
$$SS_{tot} = \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (۷-۶)$$

$$SS_{res} = \sum_i (y_i - f_i)^2 \quad (۸-۶)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (۹-۶)$$

$\bar{y}$ ستون خروجی مجموعه داده است که با شبیه سازی عددی تایید شده تولید می شود و f خروجی های انفیس است که خروجی های پیش بینی شده در واقع هستند و $\bar{y}$ صورت زیر است [۹۰]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_i y_i \quad i = 1 \text{ تا } n \quad (۱۰-۶)$$



شکل ۶-۱۰- نمودار مقایسه قطر تخمینی با قطر پیش‌بینی شده و میزان خطا

۵-۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

رژیم فشردگی در اعداد موئینگی پایین مشاهده می‌شود و نیروی موثر در این رژیم اختلاف فشار بین دو سیال است. با افزایش عدد موئینگی تاثیر نیروی اختلاف فشار می‌تواند نادیده گرفته شود و نیروی موثر در این رژیم نیروی برشی می‌باشد. همچنین تاثیر عدد موئینگی نسبت نرخ جریان و نسبت لزجت بر طول جدایش، زمان جدایش و اندازه قطره مورد مطالعه قرار گرفت. در رژیم فشردگی عدد موئینگی تاثیر چندانی بر اندازه قطره ندارد و اندازه قطره به شدت وابسته به نرخ جریان‌ها می‌باشد اما در مقابل در رژیم چکه کردن عدد موئینگی تاثیر زیادی بر اندازه قطره داشته و اندازه قطره تقریباً مستقل از نسبت نرخ جریان می‌باشد. در اعداد موئینگی پایین (رژیم فشردگی) و بخشی از رژیم چکه کردن، اندازه قطره مستقل از نسبت لزجت می‌باشد اما به ازای عدد موئینگی $(ca > 0.4)$ اندازه قطره به نسبت لزجت کاملاً وابسته است. برای تمام نمونه‌ها وقتی نسبت عرض‌ها W_d/W_c کمتر از ۱ باشد به ازای نسبت سرعت‌های مختلف، طول نهایی قطره اختلاف محسوسی ندارد اما با افزایش نسبت عرض، اختلاف طول نهایی قطره به ازای نسبت سرعت‌های مختلف افزایش می‌یابد. شکل گیری قطره سیال فروفلوئید در روغن به طور گسترده‌ای با روش‌های عددی تحلیل شده است.

نتایج نشان داد که خواص فاز پیوسته، تاثیر زیادی بر شکل گیری و اندازه قطره دارد. کاهش توان فاز پخش شونده، تمام عرض کانال را پر می کند و موجب رشد بیشتر قطره می شود. بدین ترتیب جدایش قطره به تاخیر می افتد، اندازه آن و همچنین فاصله بین قطره ها افزایش می یابد. همچنین با کاهش کشش سطحی، اندازه قطره کاهش و طول جدایش آن افزایش می یابد و با افزایش لزجت فاز پیوسته و عدد مویینگی، فاز پیوسته توانایی نگهداری فاز پخش شونده در گوشه را ندارد، فاز پخش شونده باریک شده به طوری که دارای جریان جتی می باشد. موقعیت نقطه جدایش را به سمت پایین دست جریان هل می دهد و از اندازه قطره کاسته می شود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش نسبت نرخ جریان، طول جدایش افزایش می یابد و به رژیم جتی نزدیک می شود.

هرچه عدد مویینگی زیادتر شود زمان رسیدن به حالت تعادل افزایش می یابد. با افزایش نسبت لزجت در عدد رینولدز ثابت، زمان جدایش قطره به تعویق می افتد. با افزایش عدد مویینگی، اثر نیروی لزجت افزایش یافته و کشیدگی قطره در جهت جریان بیشتر می شود. با کاهش نسبت لزجت، کشیدگی قطره کمتر می شود. تحقیق حاضر را میتوان پیشرفتی در راستای به کارگیری ابزار عددی برای بررسی رفتار قطره های نیوتنی در سیالات نیوتنی و همچنین صحت سنجی در جریان های پیچیده تر دانست. 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. تغییر فاصله بین کانال مرکزی و اریفیس تأثیر بسیار زیادی بر اندازه قطرات داشته و نسبت به تغییر اندازه اریفیس این تأثیر بسیار بیشتر است. تغییرات کشش سطحی بر اندازه قطرات تأثیر زیادی نداشته و بیشتر باعث ایجاد حالت چندپخشی می شود. همچنین تغییرات نسبت دبی بین دو فاز بر اندازه قطرات مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان

می‌دهد در نسبت دبی‌های پایین تغییر اندازه قطرات بسیار بیشتر بوده و در نسبت دبی‌های بالاتر تغییرات کمتری در اندازه قطرات مشاهده می‌شود. احتمال به وجود آمدن حالت جدایش چندپخشی در نسبت دبی‌های پایین بیشتر شده درحالی‌که در نسبت دبی‌های بالاتر جدایش قطره در حالت تک-پخشی صورت می‌گیرد. رفتار توزیع فشار بین دو فاز در فرآیند جدایش نیز مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج بدست آمده می‌توان گفت زمان‌هایی که فشار دو فاز برابر می‌شوند بسیار تأثیرگذار بوده و با توجه به این توزیع فشار می‌توان زمان جدایش را به‌دست آورد.

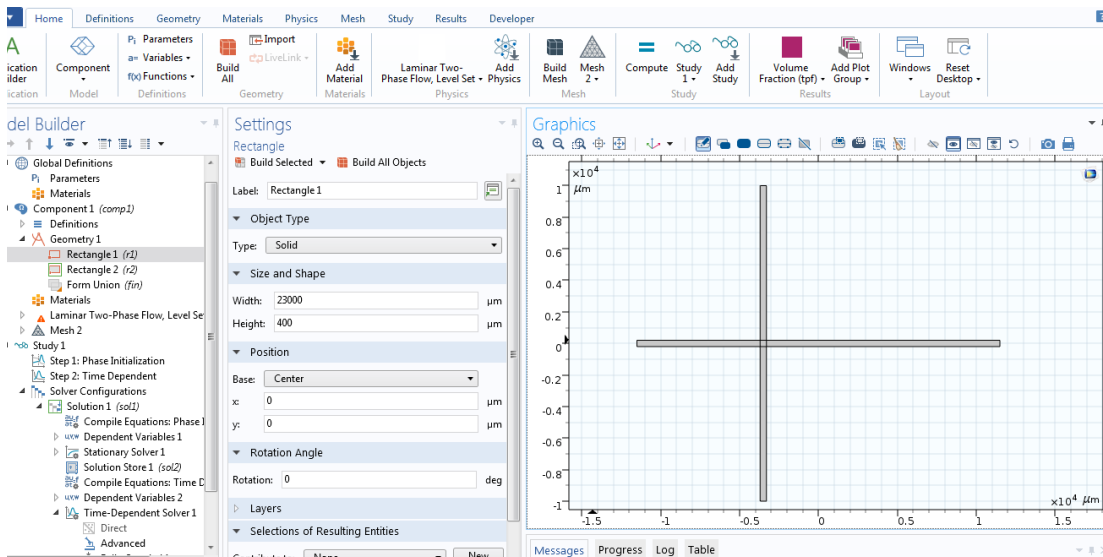
نتایج نشان می‌دهند با افزایش عدد موینگی و نسبت نرخ جریان فاز پیوسته اندازه قطرات تشکیل شده کوچک‌تر می‌شود، البته در اعداد موینگی و نسبت دبی بالای فاز پیوسته، تأثیر افزایش نسبت دبی و عدد موینگی بر اندازه قطرات کم‌تر می‌شود. در اعداد موینگی پایین تأثیر تغییر نسبت دبی بر روی اندازه قطرات بیشتر بوده ولی احتمال ایجاد حالت جدایش چندپخشی قطرات زیاد می‌شود. جدایش چندپخشی زمانی اتفاق می‌افتد که پس از جدایش قطره اصلی باریکه باقی‌مانده از فاز گسسته در اریفیس به عقب برنگشته و کمی در اریفیس به رشد خود ادامه می‌دهد تا قطرات ثانویه جدا شوند.

در نمودارهای توزیع فشار بین دو فاز مشاهده شد که در هر مرحله جدایش قطرات دو زمان حساس وجود دارد که در آن فشار بین دو فاز باهم برابر می‌شوند. در لحظاتی که در آن‌ها فشار بین دو فاز با هم برابر می‌شوند یا فاز گسسته در حال ورود به ناحیه اریفیس است و یا فاز گسسته در آستانه جدایش و تشکیل قطره است. اگر قبل از این‌که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز گسسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در حال ورود به اریفیس است و اگر قبل از این‌که فشار بین دو فاز برابر شود، فشار فاز پیوسته بیشتر باشد به این معنی است که در آن لحظه فاز گسسته در انتهای اریفیس بوده و قطره در آستانه جدایش است. همچنین با استفاده از داده‌های عددی، یک مدل پیش‌بینی اریفیس برای تخمین قطر قطرات پیش‌بینی گردید. برای تحقیقات بیشتر و کامل‌تر شدن پژوهش حاضر، پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

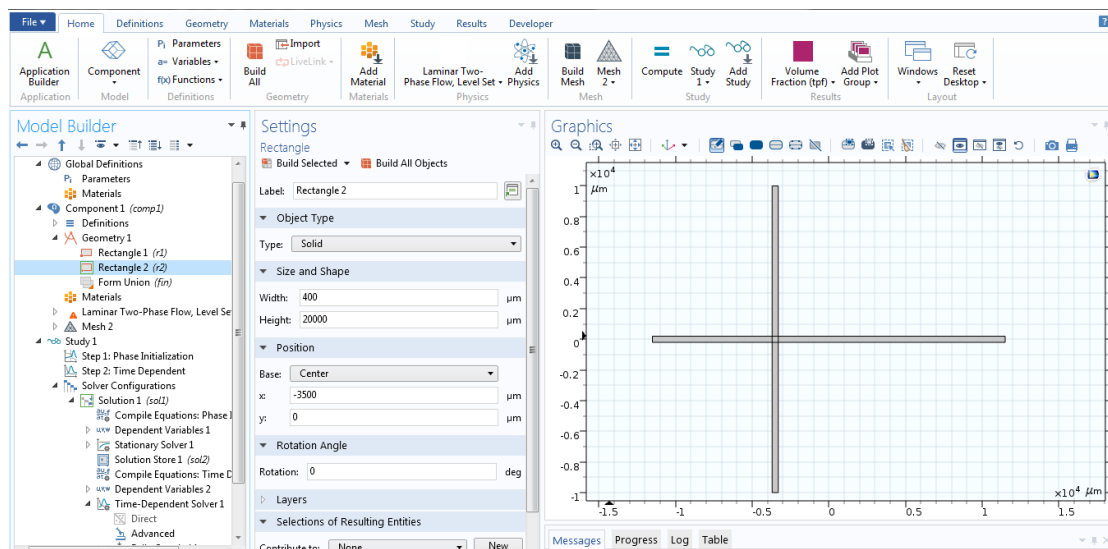
- تحلیل سه بعدی کار انجام شده
- بررسی برخورد دو قطره غیرنیوتنی در جریان نیوتنی و غیرنیوتنی
- تحلیل جریان در هندسه‌های دیگر
- بررسی عددی و آزمایشگاهی گذار بین رژیم‌های مختلف
- شبیه‌سازی عددی و مطالعه آزمایشگاهی بر رفتار سیالات ویسکوالاستیک در فرآیند تشکیل و جدایش قطرات بررسی سیالات غیرنیوتنی
- بررسی جدایش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

پیوست ها

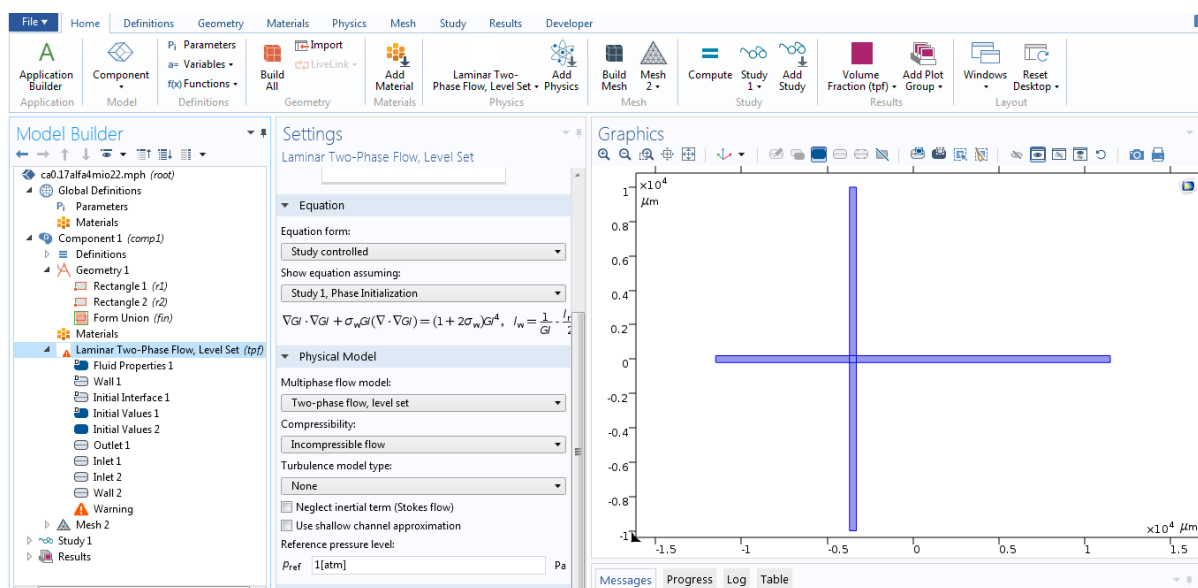
برای استفاده از کامسول در پایان نامه ارایه شده از کامسول دوبعدی جریان آرام دو فازی لول ست استفاده شده است. برای این کار در محیط نرم افزار ابتدا گزینه 2D سپس از قسمت fluid flow جریان Multiple flow انتخاب می شود. پس از آن گزینه phase field و سپس جریان laminar انتخاب می شود تا محیط نرم افزار مورد نظر باز گردد. سپس دکمه Add را زده و transient را هم Add کرده تا تشکیل قطره در زمان را نشان دهد. سپس واحد را میکرومتر انتخاب و وارد محیط نرم افزار می شویم. در ابتدا باید مدل سازی هندسی صورت گیرد و سپس شرایط ورودی و خروجی و شرایط مرزی و شبکه بندی صورت گیرد. در مدل هندسی مورد نظر از دو مستطیل استفاده شده که نمایانگر کانال اصلی و عمودی می باشد. از منوی geometry کلیک راست کرده شکل مورد نظر انتخاب می شود. در اینجا به دو مستطیل نیاز است. دو مستطیل هر کدام جدا جدا ترسیم می شوند و در آن ها طول و عرض مستطیل و نحوه قرارگیری نسبت به مبدا با اعداد مشخص می شوند و سپس build زده می شود.



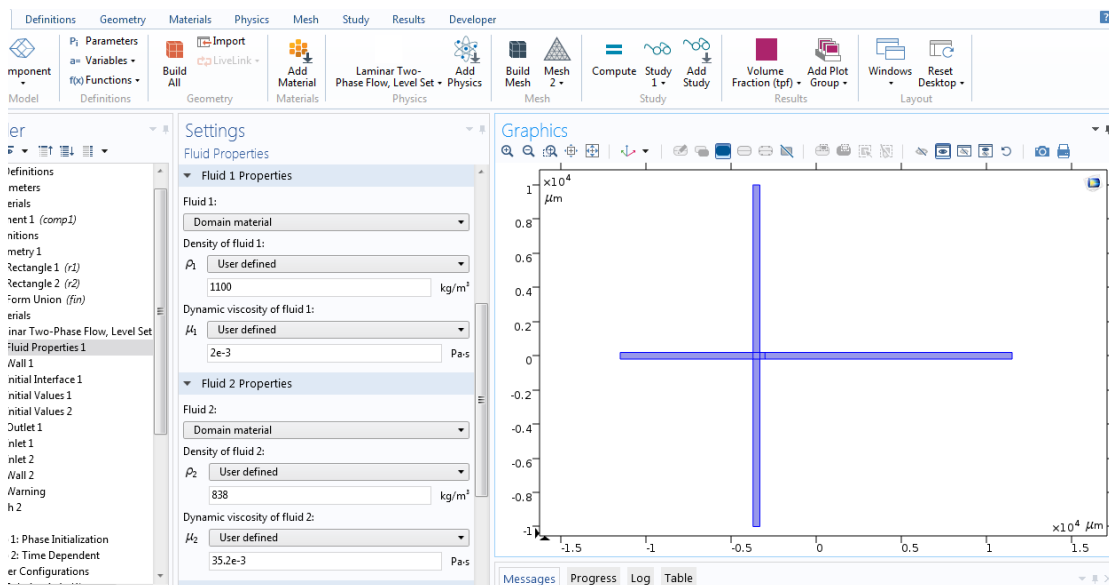
به همین ترتیب این کار برای مستطیل دوم نیز انجام شده است.



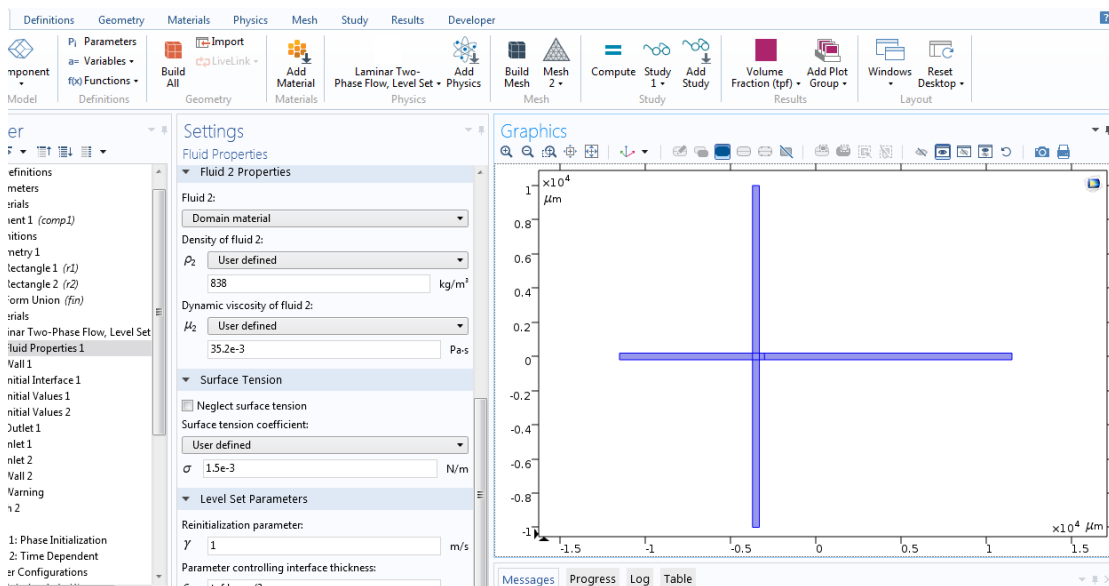
مرحله بعدی منوی laminar Two-phase flow,level set (tpf) است که قبلا در ابتدا انتخاب شده و محیط آن به صورت زیر است. در این محیط ابتدا باید مشخصات دو سیال مورد نظر شامل چگالی، لزجت سیال و همچنین کشش سطحی بین دو سیال وارد شود.



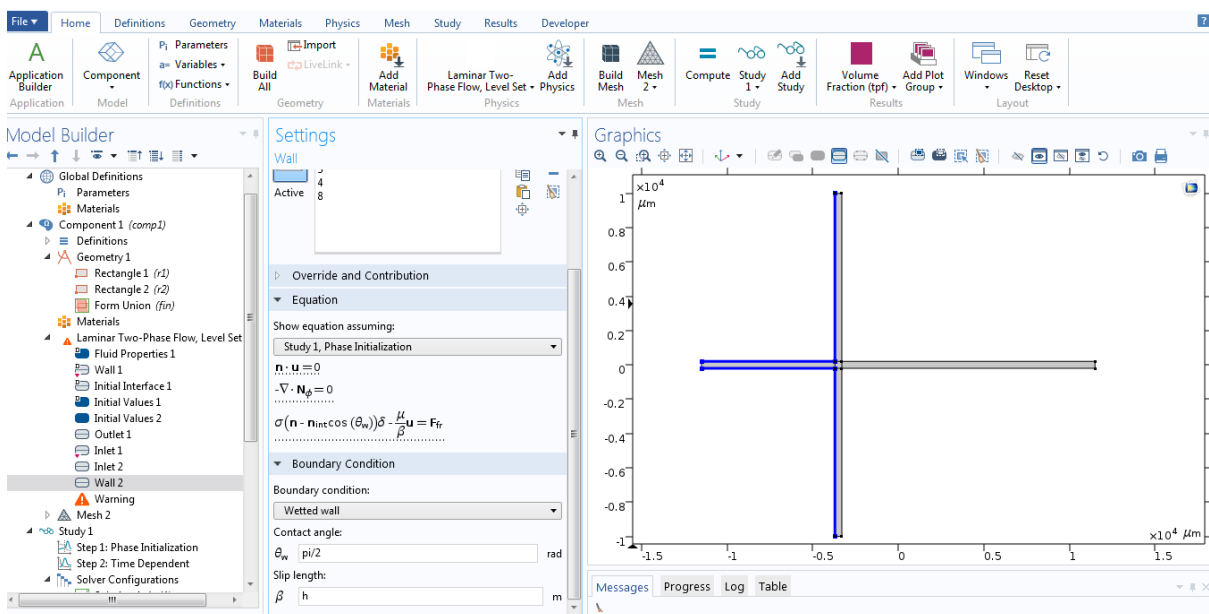
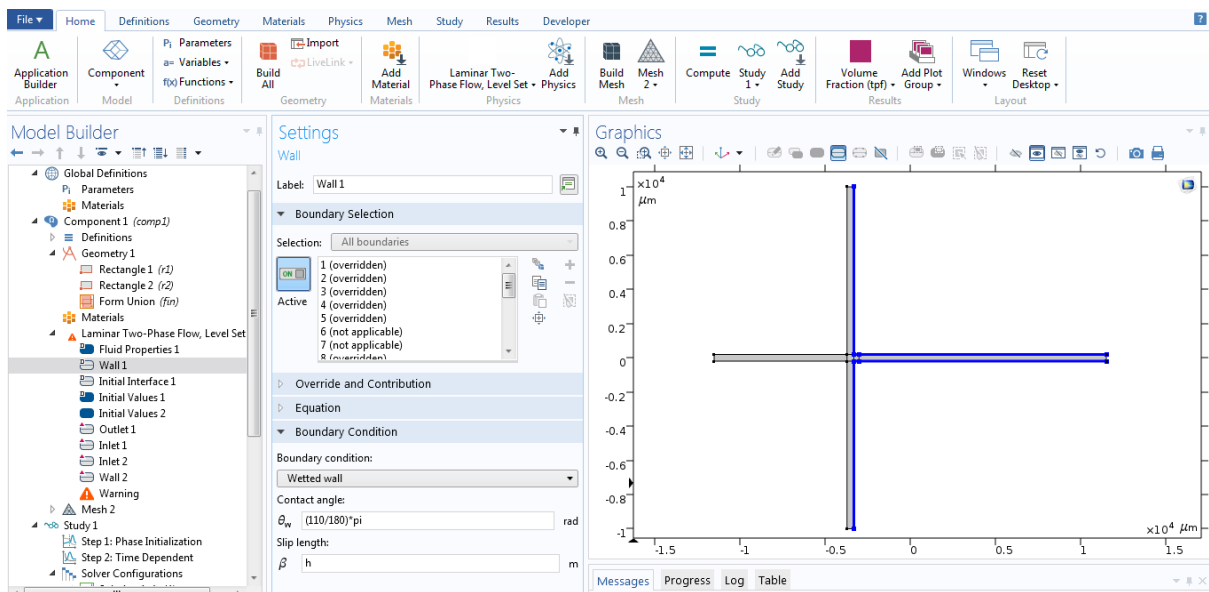
سیال گسسته را سیال یک در نظر گرفته و مشخصات آن طبق شکل زیر وارد می‌شود.



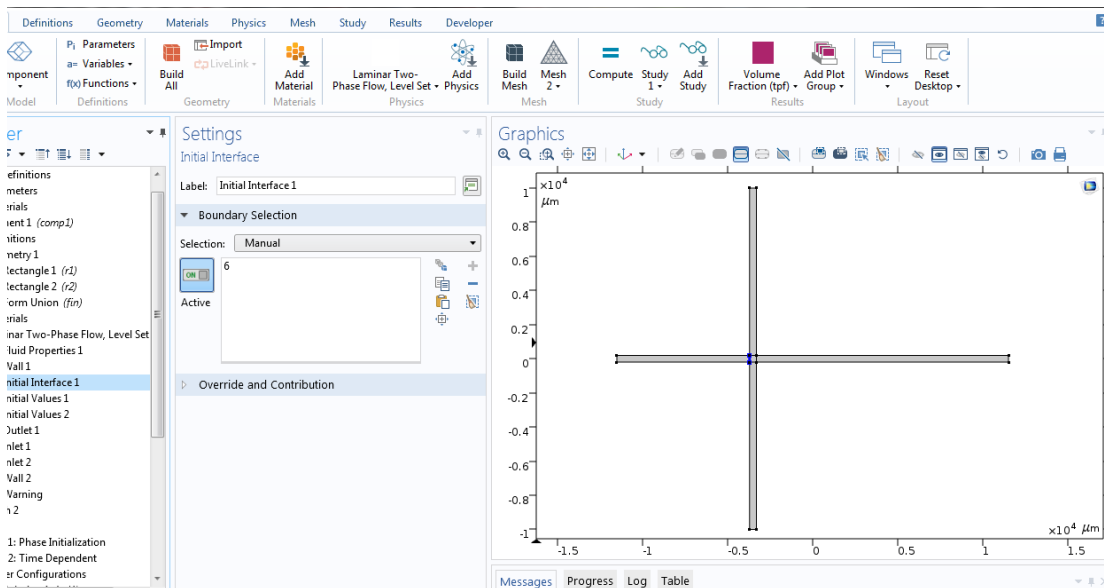
این کار برای سیال پیوسته یا همان سیال دو تکرار شده و سپس کشش سطحی بین دو سیال نیز وارد می‌گردد. طی این مراحل مدل‌سازی هندسی موردنظر کامل می‌شود.



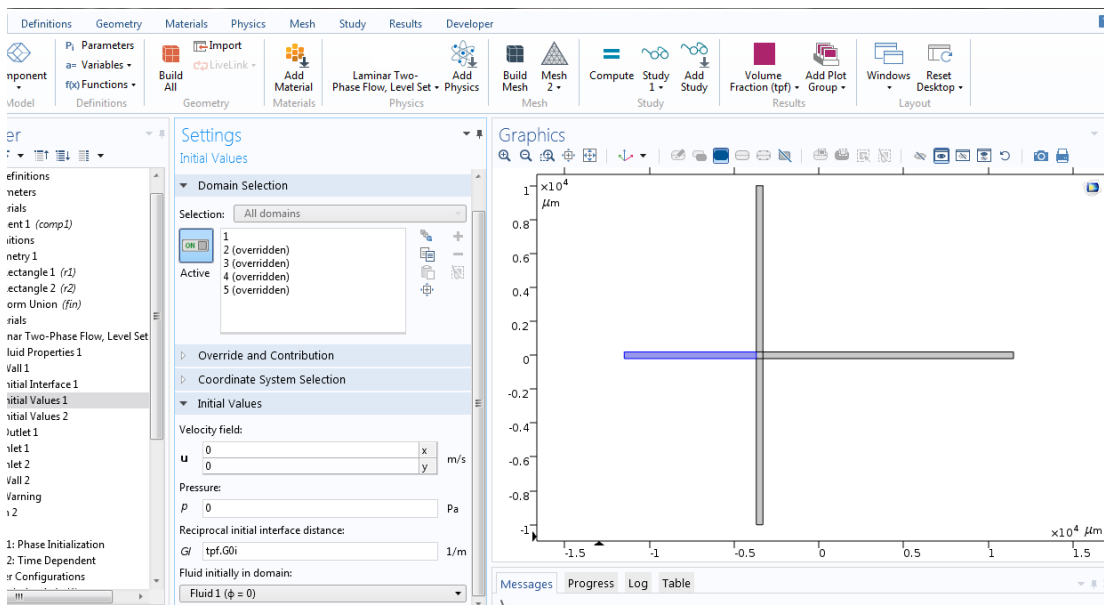
از گزینه wall زوایای دیواره‌ها تعیین می‌شود به این صورت که طبق شکل دیواره‌های موردنظر را از گزینه boundary selection انتخاب می‌شود. سپس شرایط و زوایای دیواره طبق شکل اعمال می‌گردد.



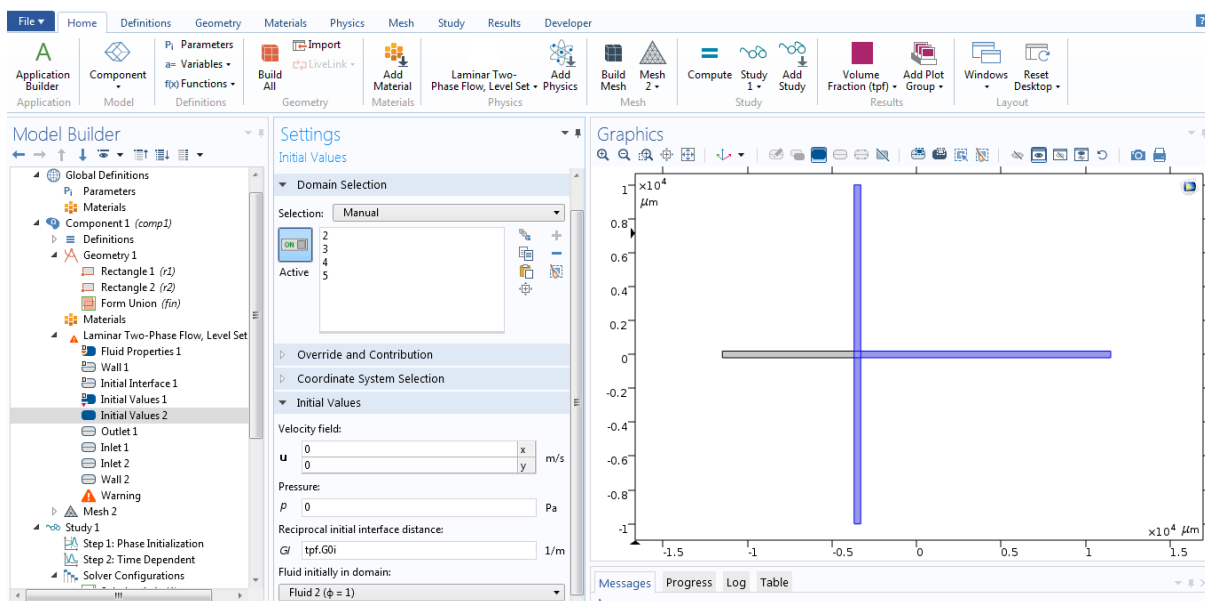
از گزینه initial interface خط رابط بین دو سیال پیوسته و گسسته طبق شکل زیر انتخاب می‌شود.



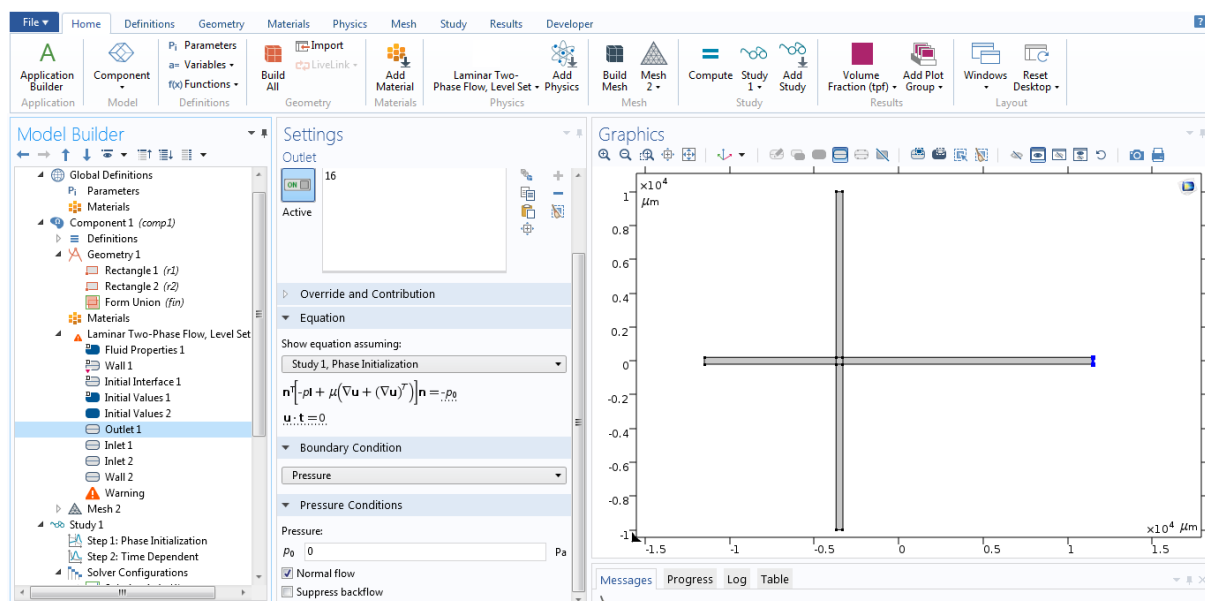
از قسمت initial values مشخص می‌شود که سیال یک و سیال دو هرکدام در لحظه اولیه در کدام قسمت‌های کانال وجود دارند. برای انجام این کار از قسمت domain selection ناحیه مورد نظر انتخاب شده و از قسمت fluid initially in domains سیال انتخاب می‌گردد.



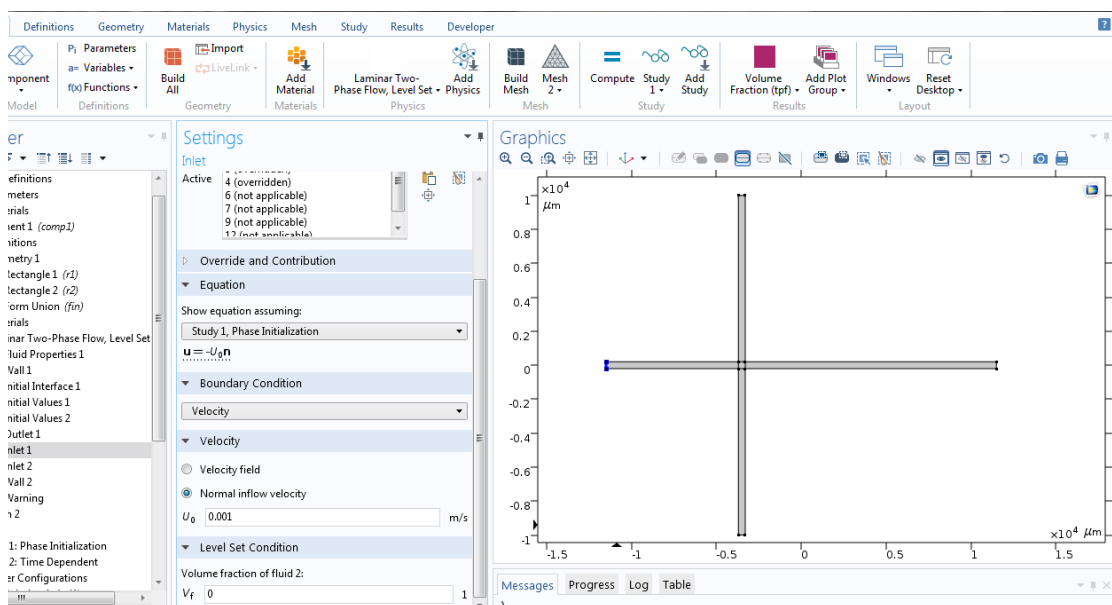
همچنین همین کار برای سیال دو عینا طبق شکل زیر تکرار می‌شود



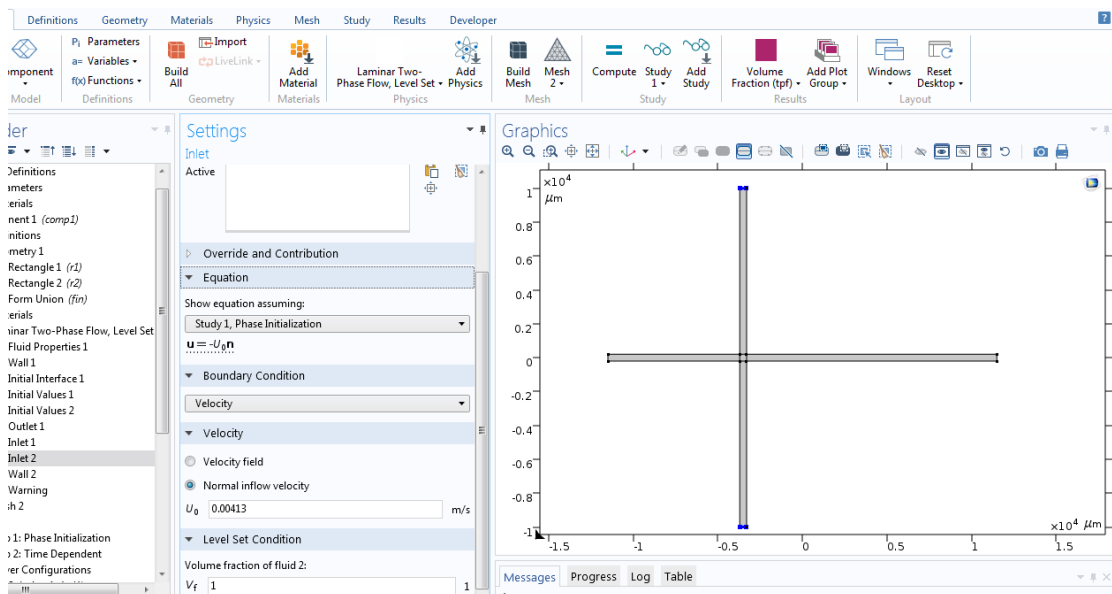
گام بعدی مشخص کردن شروط خروجی و ورودی است. در شکل زیر قسمتی از کانال که خروجی است و شرایطی که برای خروجی در نظر گرفته شده مشخص شده است.



پس وارد منوی قسمت Inlet شده طبق شکل خطی را که ورودی سیال گسسته است را مشخص و سپس اندازه سرعت وارد می‌شود. توجه شود که V_F برای سیال گسسته ۰ و برای سیال پیوسته ۱ است.



برای سیال پیوسته نیز همین روند را طبق شکل زیر انجام می‌دهیم.

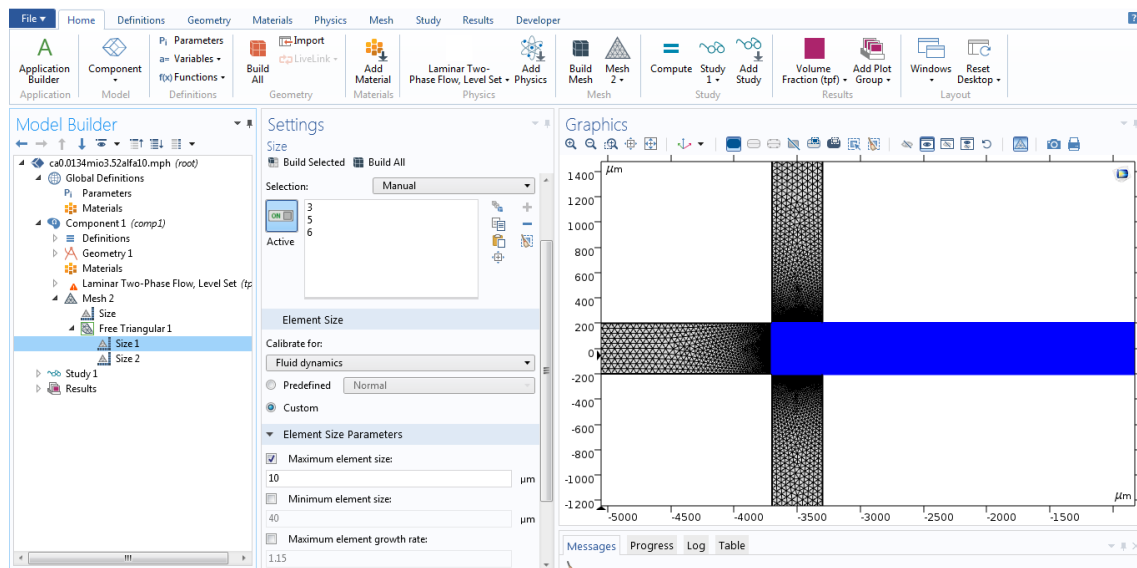


بعد از این مراحل، از گزینه mesh به شبکه‌بندی طبق شکل زیر پرداخته شده است. به این صورت

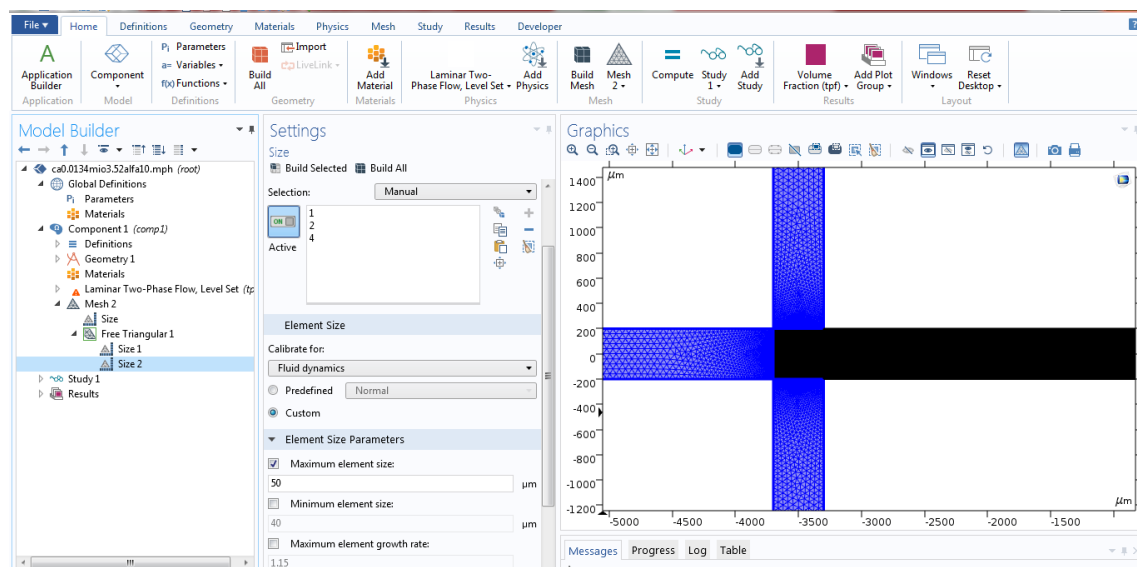
که ابتدا نوع شبکه به صورت free traingular یا همان شبکه مثلثی انتخاب شده است. سپس با کلیک

راست بر روی آن از منوی size ابتدا ناحیه مورد نظر را در قسمت domain انتخاب و سپس تیک

custom را زده تا در پنجره ظاهر شده ابعاد المان شبکه را وارد نماییم.

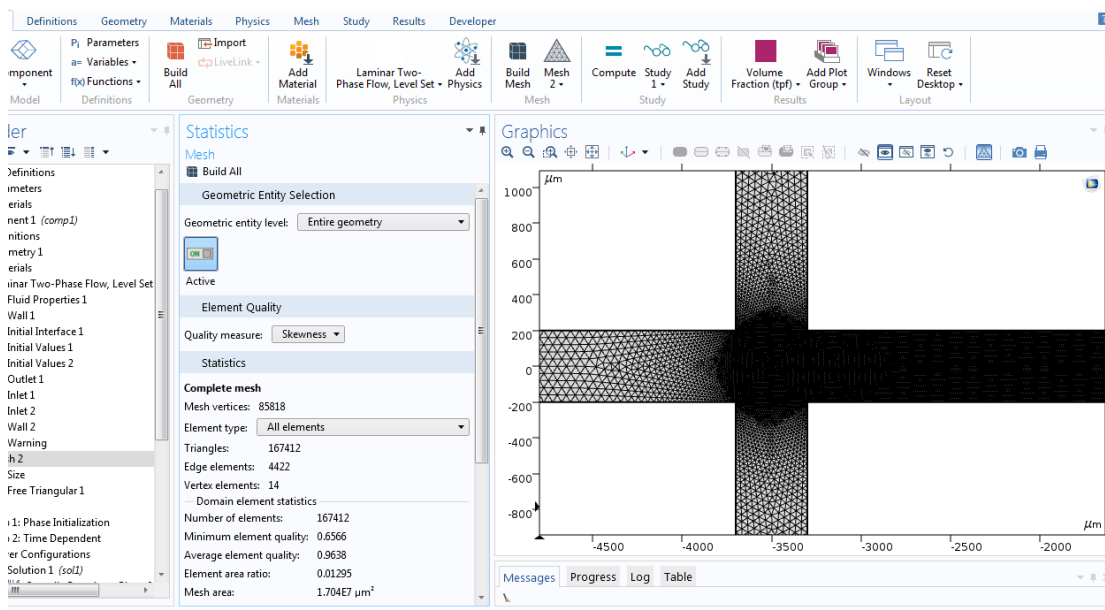


سپس همین کار برای ناحیه دیگر انجام می‌شود.

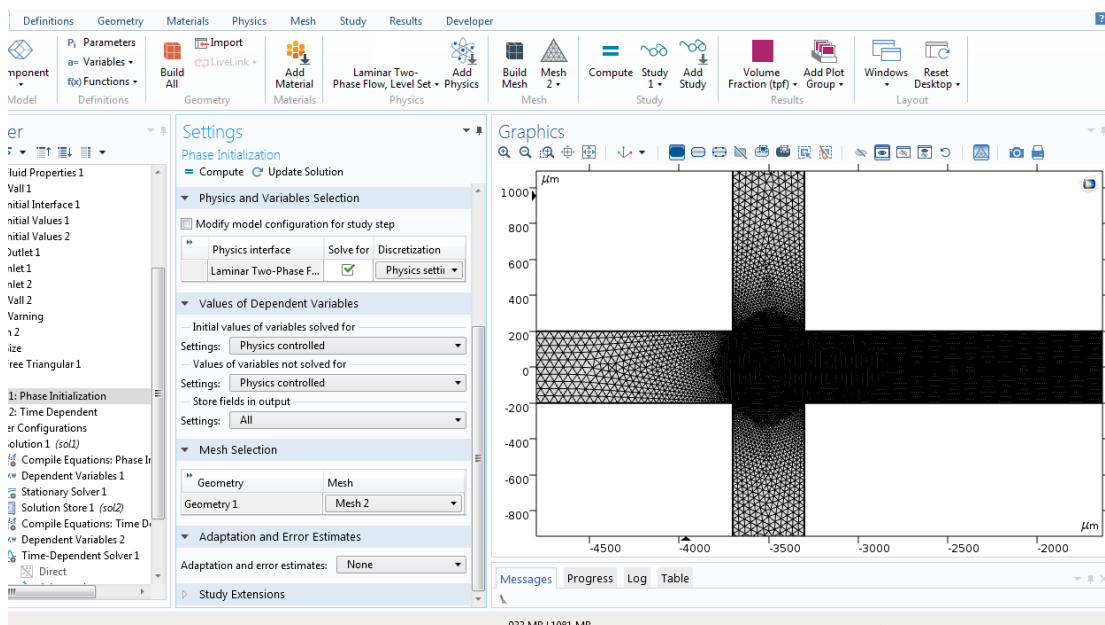


اگر روی قسمت mesh کلیک راست و staticifce را انتخاب نماییم پنجره ای مطابق زیر باز

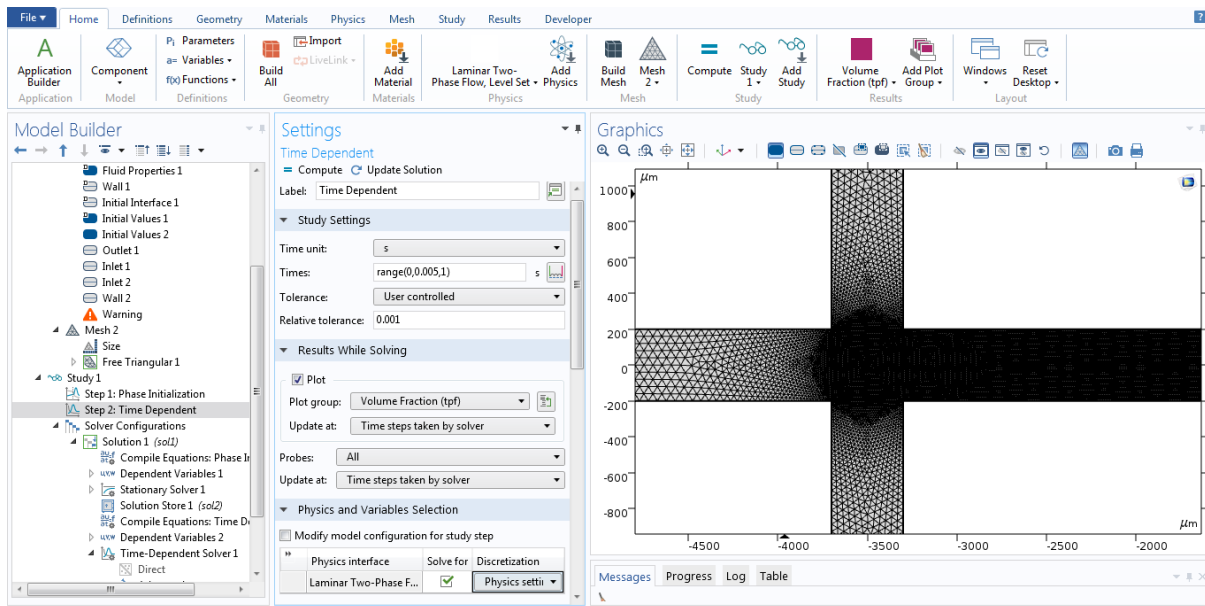
می‌شود که در آن تعداد المان‌ها محاسبه می‌شود.



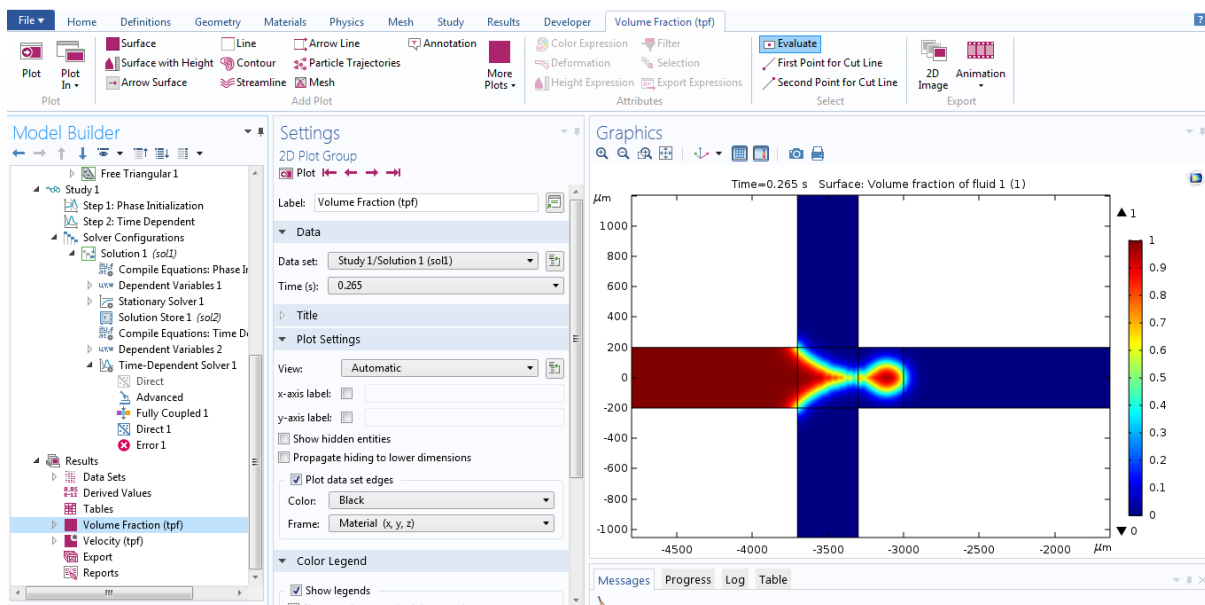
از قسمت study گزینه Phase initialization در گام اول مطابق شکل زیر عمل کرده و به این می‌پردازیم که جریان آرام دو فازي لولست است.



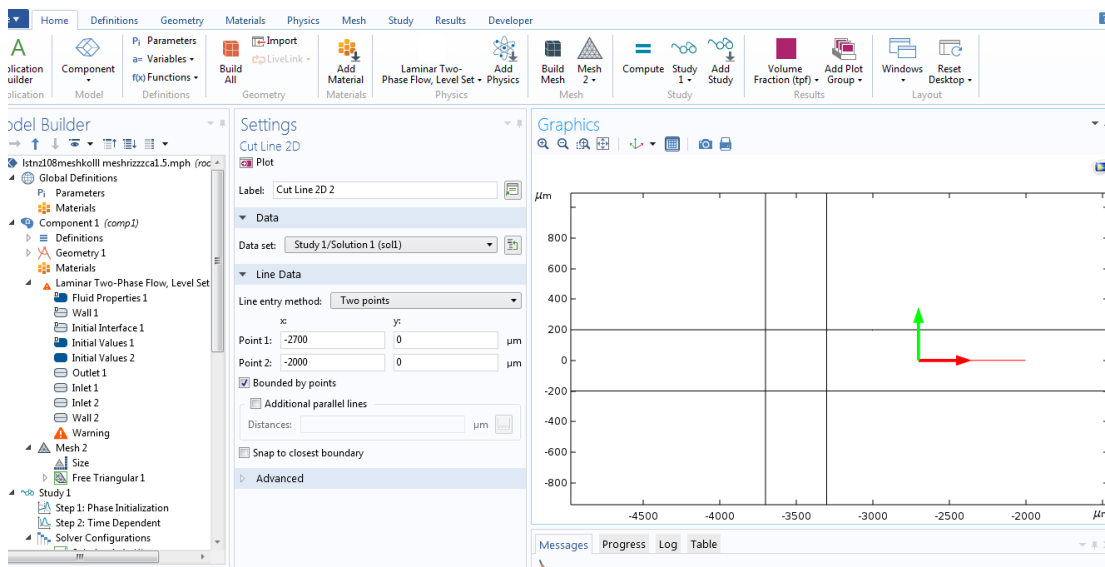
در گام بعدی از منوی time dependent صفحه مربوط به زمان را باز کرده و در آن محدوده‌ای برای زمان تعریف می‌شود و گام زمانی‌ای برای آن در نظر گرفته می‌شود.



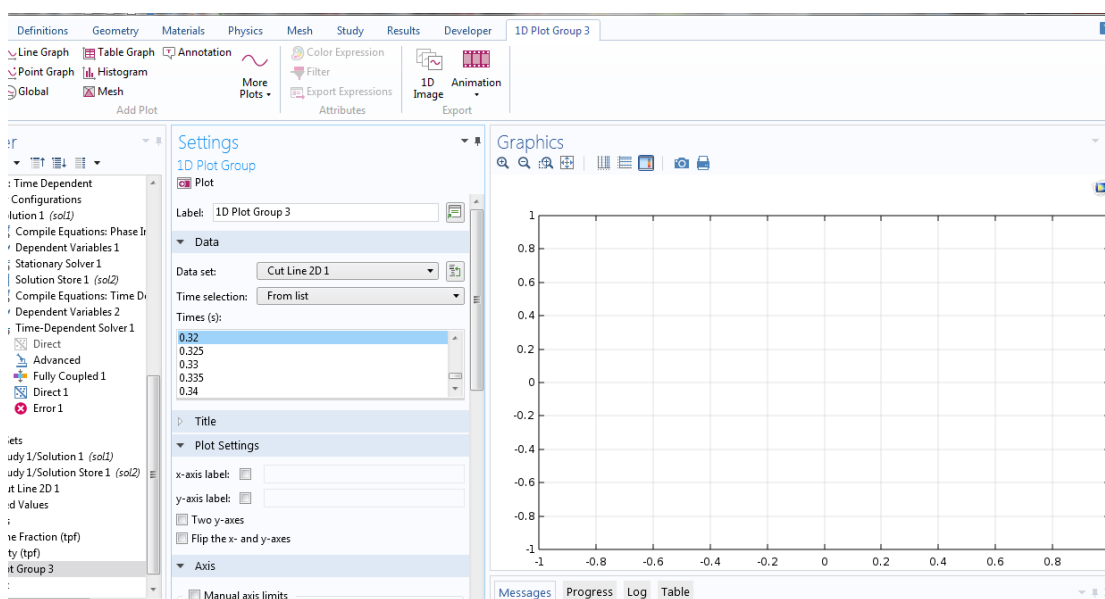
عملیات مدل سازی طی این مراحل تمام شد. حال باید به نتایج ازمونی result پرداخت. از قسمت volume fraction(tpf) که زیرمجموعه نتایج است شکل قطرات موجود در کانال که همان نتایج است دیده می شود.



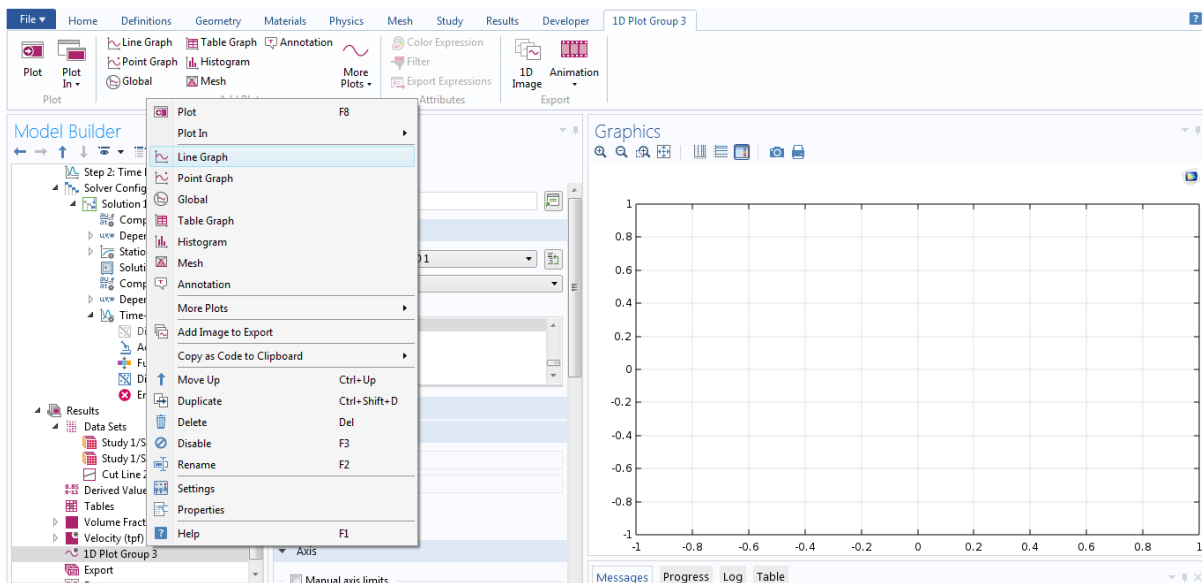
اگر از زیرمجموعه data sets کلیک راست صورت گیرد پنجره ای مطابق شکل زیر باز شده که در آن می توان یک خط فرضی به نام cut line کشید که در محور قطره موردنظر باشد تا در گام بعدی بتوان از آن برای بیان مکان قطره استفاده نمود تا قطر حساب گردد.



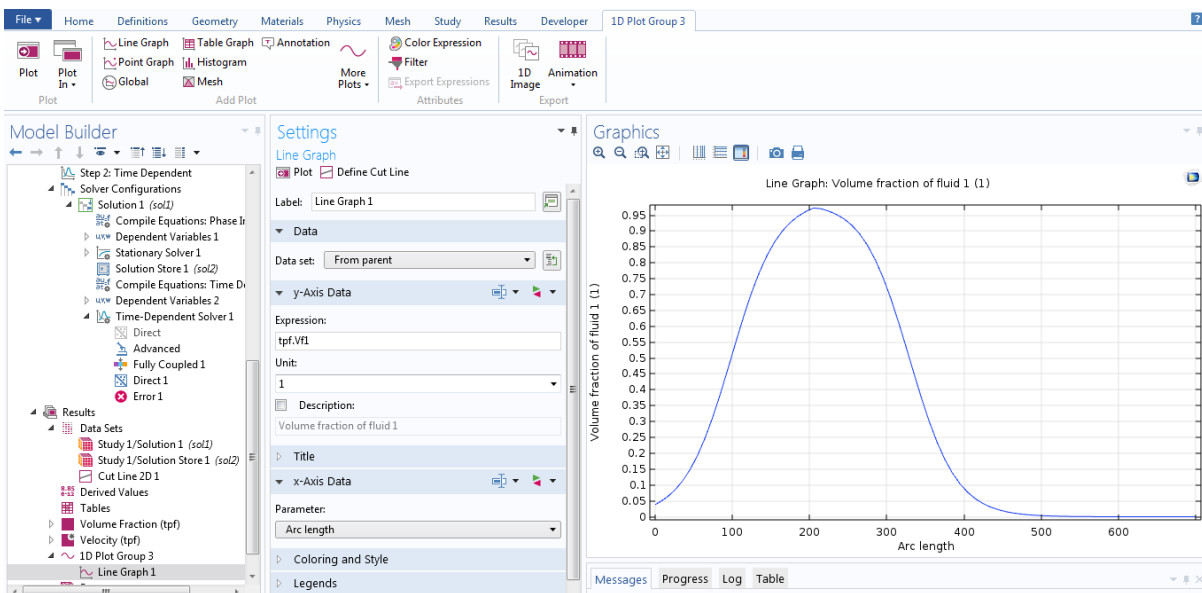
سپس با کلیک راست بر روی گزینه result قسمت 1D plot group را انتخاب و مطابق شکل زیر data set را بر روی cut line و قسمت time selection زمان موردنظر انتخاب می‌شود.



سپس با کلیک راست بر 1D plot group قسمت line graph انتخاب و بعد plot را می‌زنیم.



و در نهایت نموداری مطابق شکل زیر ترسیم می‌شود که از آن همان‌گونه که از قبل توضیح داده شد می‌توان قطر و فواصل قطرات را به دست آورد.



- [1] V. Kumar, M. Paraschivoiu, and K. Nigam, (2011), "Single-phase fluid flow and mixing in microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 66, pp. 1329-1373.
- [2] A. Manz, N. Graber, and H. á. Widmer, (1990), "Miniaturized total chemical analysis systems: a novel concept for chemical sensing," *Sensors and actuators B: Chemical*, vol. 1, pp. 244-248.
- [3] G. M. Whitesides, . (2006), "The origins and the future of microfluidics," *Nature*, vol. 442, p. 368.
- [4] A. Webster, C. E. Dyer, S. J. Haswell, (2010), and J. Greenman, "A microfluidic device for tissue biopsy culture and interrogation," *Analytical Methods*, vol. 2, pp. 1005-1007.
- [5]. Zhao, C. X., Miller, E., Cooper - White, J. J., & Middelberg, A. P, (2011), "Effects of fluid-fluid interfacial elasticity on droplet formation in microfluidic devices. *AIChE Journal*, 57(7), 1669-1677.
- [6]. Du, W., Fu, T., Zhu, C., Ma, Y., & Li, H. Z, (2016), "Breakup dynamics for high - viscosity droplet formation in a flow - focusing device: Symmetrical and asymmetrical ruptures". *Aiche Journal*, 62(1), 325-337.
- [7] .Fu, T., Ma, Y., Funfschilling, D., & Li, H. Z, (2009), "Bubble formation and breakup mechanism in a microfluidic flow-focusing device. *Chemical Engineering Science*", 64(10), 2392-2400.
- [8] B. H. Weigl, R. L. Bardell, and C. R. Cabrera, (2003), "Lab-on-a-chip for drug development," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 55, pp. 349-377.
- [9] T. Nisisako, T. Torii, and T. Higuchi, (2003), "Novel microreactors for functional polymer beads," *Chemical Engineering Journal*, vol. 101, pp. 23-29, 2004.
- [10] M. Sun, W.-B. Du, and Q. Fang, (2006), "Microfluidic liquid-liquid extraction system based on stopped-flow technique and liquid core waveguide capillary," *Talanta*, vol. 70, pp. 392-396.
- [11] M. Takagi, T. Maki, M. Miyahara, and K. Mae, (2004), "Production of titania nanoparticles by using a new microreactor assembled with same axle dual pipe," *Chemical Engineering Journal*, vol. 101, pp. 269-276.
- [12] S. L. Anna, N. Bontoux, and H. A. Stone, (2003), "Formation of dispersions using "flow focusing" in microchannels," *Applied physics letters*, vol. 82, pp. 364-366,.
- [13] J. Xu, S. Li, J. Tan, and G. Luo, (2008), "Correlations of droplet formation in T-junction microfluidic devices: from squeezing to dripping," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 5, pp. 711-717.
- [14] L. Sang, Y. Hong, and F. Wang, (2009), "Investigation of viscosity effect on droplet formation in T-shaped microchannels by numerical and analytical methods," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 6, pp. 621-635.
- [15] M. Castaño-Álvarez, D. F. P. Ayuso, M. G. Granda, M. T. Fernández-Abedul, J. R. García, and A. Costa-García, (2008), "Critical points in the fabrication of microfluidic devices on glass substrates," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 130, pp. 436-448.
- [16] L. Zhu, L.-y. Hou, and W.-y. Zhang, (2010), "A new fabrication method for glass

- microfluidic devices used in micro chemical system," *Sensors and actuators B: Chemical*, vol. 148, pp. 135-146.
- [17] C. N. Baroud, F. Gallaire, and R. Dangla, (2010), "Dynamics of microfluidic droplets," *Lab on a Chip*, vol. 10, pp. 2032-2045.
 - [18] R. Seemann, M. Brinkmann, T. Pfohl, and S. Herminghaus, (2011), "Droplet based microfluidics," *Reports on progress in physics*, vol. 75, p. 016601.
 - [19] S.-Y. Teh, R. Lin, L.-H. Hung, and A. P. Lee, "Droplet microfluidics, (2008), " *Lab on a Chip*, vol. 8, pp. 198-220.
 - [20] G. Vladislavljević, I. Kobayashi, and M. Nakajima, (2012), "Production of uniform droplets using membrane, microchannel and microfluidic emulsification devices," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 13, pp. 151-178.
 - [21] V. Barbier, H. Willaime, P. Tabeling, and F. Jousse, (2006), "Producing droplets in parallel microfluidic systems," *Physical Review E*, vol. 74, p. 046306.
 - [22] C. Holtze, "Large-scale droplet production in microfluidic devices—an industrial perspective, (2013), " *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 114008.
 - [23] - Bai, L., Fu, Y., Zhao, S., & Cheng, Y, (2016), "Droplet formation in a microfluidic T-junction involving highly viscous fluid systems", *Chemical Engineering Science*, 145, 141-148
 - [24] . Liu, J., & Trung Nguyen, N, (2010), "Numerical simulation of droplet-based microfluidics-A review ". *Micro and Nanosystems*, 2(3), 193-201.
 - [25] J. Nunes, S. Tsai, J. Wan, and H. Stone, (2013), "Dripping and jetting in microfluidic multiphase flows applied to particle and fibre synthesis," *Journal of physics D: Applied physics*, vol. 46, p. 114002.
 - [26] A. Utada, E. Lorenceau, D. Link, P. Kaplan, H. Stone, and D. Weitz, (2005), "Monodisperse double emulsions generated from a microcapillary device," *Science*, vol. 308, pp. 537-541.
 - [27] A. S. Utada, A. Fernandez-Nieves, J. M. Gordillo, and D. A. Weitz, (2008), "Absolute instability of a liquid jet in a coflowing stream," *Physical review letters*, vol. 100, p. 014502.
 - [28] Y. N. Cheung and H. Qiu, (2011), "Characterization of acoustic droplet formation in a microfluidic flow-focusing device," *Physical Review E*, vol. 84, p. 066310.
 - [29] M. De Menech, P. Garstecki, F. Jousse, and H. Stone, (2008), "Transition from squeezing to dripping in a microfluidic T-shaped junction," *journal of fluid mechanics*, vol. 595, pp. 141-161.
 - [30] H. Liu and Y. Zhang, "Droplet formation in microfluidic cross-junctions, (2011)," *Physics of Fluids*, vol. 23, p. 082101.
 - [31] T. P. Lagus and J. F. Edd, (2013), "A review of the theory, methods and recent applications of high-throughput single-cell droplet microfluidics," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, p. 114005.
 - [32] G. T. Vladislavljević, R. Al Nuamani, and S. A. Nabavi, (2017),"Microfluidic production of multiple emulsions," *Micromachines*, vol. 8, p. 75.
 - [33] R. M. Erb, D. Obrist, P. W. Chen, J. Studer, and A. R. Studart, (2011), "Predicting sizes of droplets made by microfluidic flow-induced dripping," *Soft Matter*, vol. 7, pp. 8757-8761.
 - [34] E. Castro-Hernandez, V. Gundabala, A. Fernández-Nieves, and J. M. Gordillo, "Scaling the drop size in coflow experiments, (2009)," *New Journal of Physics*, vol. 11, p. 075021.
 - [35] A. Utada, L.-Y. Chu, A. Fernandez-Nieves, D. Link, C. Holtze, and D. Weitz,

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

[۴۹] بیجارچی، ورحیمیان، (۱۳۹۳)، شبیه سازی عددی برخورد دو قطره در داخل میدان دوفازی با استفاده از روش بولتزمن شبکه ای دوفازی. مهندسی مکانیک مدرس-۸۵ (۲ :) ۱۴ ; .

- [50] F. Malloggi, S. A. Vanapalli, H. Gu, D. van den Ende, and F. Mugele, (2007), "Electrowetting-controlled droplet generation in a microfluidic flow-focusing device," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 19, p. 462101.
- [51] J. Tan, J. Xu, S. Li, and G. Luo, (2008), "Drop dispenser in a cross-junction microfluidic device: Scaling and mechanism of break-up," *Chemical Engineering Journal*, vol. 136, pp. 306-311.
- [52] Z. Nie, M. Seo, S. Xu, P. C. Lewis, M. Mok, E. Kumacheva, et al., (2008), "Emulsification in a microfluidic flow-focusing device: effect of the viscosities of

- the liquids," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 5, pp. 585-594, 2008.
- [53] J. Sivasamy, T.-N. Wong, N.-T. Nguyen, and L. T.-H. Kao, (2011), "An investigation on the mechanism of droplet formation in a microfluidic T-junction," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 11, pp. 1-10.
 - [54] T. Fu, Y. Wu, Y. Ma, and H. Z. Li, (2012), "Droplet formation and breakup dynamics in microfluidic flow-focusing devices: from dripping to jetting," *Chemical engineering science*, vol. 84, pp. 207-217.
 - [55] L. Peng, M. Yang, S.-s. Guo, W. Liu, and X.-z. Zhao, (2011), "The effect of interfacial tension on droplet formation in flow-focusing microfluidic device," *Biomedical microdevices*, vol. 13, pp. 559-564.
 - [56] Y. Lu, T. Fu, C. Zhu, Y. Ma, and H. Z. Li, (2014), "Pinch-off mechanism for Taylor bubble formation in a microfluidic flow-focusing device," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 16, pp. 1047-1055.
 - [57] L. Arriaga, E. Amstad, and D. Weitz, (2015), "Scalable single-step microfluidic production of single-core double emulsions with ultra-thin shells," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 3335-3340.
 - [58] Y. Ren, Z. Liu, and H. C. Shum, (2015), "Breakup dynamics and dripping-to-jetting transition in a Newtonian/shear-thinning multiphase microsystem," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 121-134.
 - [59] Tatao Fu, Youguang Ma and Huai Z .li ., (2013), ferrofluid droplet formation and breakup dynamics in a microfluidic flow focusing device, *The Royal society chemistry Journal*
 - [60] K. B. Deshpande and W. B. Zimmerman, (2006), "Simulation of interfacial mass transfer by droplet dynamics using the level set method," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 6486-6498.
 - [61] P. B. Umbanhowar, V. Prasad, and D. A. Weitz, (2000), "Monodisperse emulsion generation via drop break off in a coflowing stream," *Langmuir*, vol. 16, pp. 347-351.
 - [62] S. Gong, P. Cheng, and X. Quan, (2010), "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in microchannels under an electric field," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 5863-5870.
 - [63] W. Wang, Z. Liu, Y. Jin, and Y. Cheng, (2011), "LBM simulation of droplet formation in micro-channels," *Chemical engineering journal*, vol. 173, pp. 828-836.
 - [64] H. Liu and Y. Zhang, (2011), "Lattice Boltzmann simulation of droplet generation in a microfluidic cross-junction," *Communications in computational physics*, vol. 9, pp. 1235-1256.
 - [65] T. M. Moyle, L. M. Walker, and S. L. Anna, (2012), "Predicting conditions for microscale surfactant mediated tipstreaming," *Physics of Fluids*, vol. 24, p. 082110.
 - [66] Y. Shi, G. Tang, and H. Xia, (2014), "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in T-junction and flow focusing devices," *Computers & Fluids*, vol. 90, pp. 155-163.
 - [67] J. Li, H. Liu, N. Ioannou, Y. Zhang, and J. M. Reese, (2015), "Lattice Boltzmann Simulations of Thermocapillary Motion of Droplets in Microfluidic Channels," *Communications in computational physics*, vol. 17, pp. 1113-1126.
 - [68] Z. Z. Chong, S. B. Tor, N. H. Loh, T. N. Wong, A. M. Gañán-Calvo, S. H. Tan,

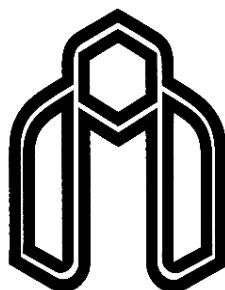
- et al., (2015), "Acoustofluidic control of bubble size in microfluidic flow-focusing configuration," *Lab on a Chip*, vol. 15, pp. 996-999.
- [69] V.-L. Wong, K. Loizou, P.-L. Lau, R. S. Graham, and B. N. Hewakandamby, (2014), "Numerical Simulation of the Effect of Rheological Parameters on Shear-Thinning Droplet Formation," in *Proceedings of the ASME 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Chicago, Illinois, August, pp. 3-8.
- [70] W. Lan, S. Li, and G. Luo, (2015), "Numerical and experimental investigation of dripping and jetting flow in a coaxial micro-channel," *Chemical Engineering Science*, vol. 134, pp. 76-85.
- [71] A. Balabel, (2015), "Numerical Simulation of Two-Phase Flow in Micro-and Nano-Devices Using Level Set Method," *Journal of Nanoscience and Nanoengineering*, vol. 1, pp. 1-8.
- [72] E. Castro-Hernández, M. P. Kok, M. Versluis, and D. F. Rivas, (2016), "Study of the geometry in a 3D flow-focusing device," *Microfluidics and nanofluidics*, vol. 20, p. 40.
- [73] F. Bai, X. He, X. Yang, R. Zhou, and C. Wang, (2017), "Three dimensional phase-field investigation of droplet formation in microfluidic flow focusing devices with experimental validation," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 93, pp. 130-141.
- [74] M. Nekouei and S. A. Vanapalli, (2017), "Volume-of-fluid simulations in microfluidic T-junction devices: Influence of viscosity ratio on droplet size," *Physics of Fluids*, vol. 29, p. 032007.
- [75] L. Wu, X. Liu, Y. Zhao, and Y. Chen, (2017), "Role of local geometry on droplet formation in axisymmetric microfluidics," *Chemical Engineering Science*, vol. 163, pp. 56-67.
- [76] K. S. Krishna, Y. Li, S. Li, and C. S. Kumar, (2013), "Lab-on-a-chip synthesis of inorganic nanomaterials and quantum dots for biomedical applications," *Advanced drug delivery reviews*, vol. 65, pp. 1470-1495.
- [77] H. A. Amiri and A. A. Hamouda, (2013), "Evaluation of level set and phase field methods in modeling two phase flow with viscosity contrast through dual-permeability porous medium," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 52, pp. 22-34.
- [78] E. Olsson, G. Kreiss, and S. Zahedi, (2007), "A conservative level set method for two phase flow II," *Journal of Computational Physics*, vol. 225, pp. 785-807.
- [79] E. Olsson and G. Kreiss, (2005), "A conservative level set method for two phase flow," *Journal of computational physics*, vol. 210, pp. 225-246.
- [80] V. L. Wong, (2015), "Computational studies of shear-dependent non-newtonian droplet formation at microfluidics T-junction with experimental justification," University of Nottingham.
- [81] J. Hua, B. Zhang, and J. Lou, (2007), "Numerical simulation of microdroplet formation in coflowing immiscible liquids," *AIChE Journal*, vol. 53, pp. 2534-2548.
- [82] Y.-C. Chang, T. Hou, B. Merriman, and S. Osher, (1996), "A level set formulation of Eulerian interface capturing methods for incompressible fluid flows," *Journal of computational Physics*, vol. 124, pp. 449-464.

- [83] H. Liu and Y. Zhang, (2011), "Lattice Boltzmann simulation of droplet generation in a microfluidic cross-junction," *Communications in computational physics*, vol. 9, pp. 1235-1256.
- [84] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, (2011), "Non-Newtonian flow and applied rheology": engineering applications: Butterworth-Heinemann.
- [85] Y. Shi, G. H. Tang, and H. H. Xia, (2014), "Lattice Boltzmann simulation of droplet formation in T-junction and flow focusing devices," *Computers & Fluids*, vol. 90, pp. 155-163.
- [86] J. A. Sethian, (1999), "Level set methods and fast marching methods": evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science vol. 3: Cambridge university press.
- [87] K. B. Deshpande and W. B. Zimmerman, (2006), "Simulation of interfacial mass transfer by droplet dynamics using the level set method," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 6486-6498.
- [88] G. F. Christopher, N. N. Noharuddin, J. A. Taylor, and S. L. Anna, (2008), "Experimental observations of the squeezing-to-dripping transition in T-shaped microfluidic junctions," *Physical Review E*, vol. 78, p. 036317.
- [۸۹] م علیزاده، م طیبی رهنی و م افتخاری یزدی ، (۱۳۹۴)، بررسی عددی فرایند امولسیون در میکروکانال ها با استفاده از روش شبکه بولتزمن با مدل تابع مشخصه مهندسی مکانیک مدرس .
- [90] A. Lashkaripour, M. Goharimanesh, A. AboueiMehrizi, D. Densmored, (2018) "An adaptive neural-fuzzy approach for microfluidic droplet size prediction" *Microelectronics Journal* 78 (2018) 73–80
- [91] J. Jang, (1993) "ANFIS : Adaptive-Ne twork-Based Fuzzy" *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, VOL. 23, NO. 3, MAY/JUNE 1993 b65
- [92] Guan, Jian., Zurada, Jozef and S. Levitan. Alan (2008), An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Approach to Real Estate Property Assessment, *Journal of Real Estate Research* ,, 30, 395-422.
- [۹۳] ع. امامی میبدی و ص. باقری، (۱۳۹۳)، مقایسه ی توانایی پیش بینی مدل های شبکه ی عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی فازی انطباقی و تبدیل موجک عصبی قیمت سبد نفت خام اوپک. فصل نامه ی مطالعات اقتصاد انرژی سال دهم شماره ۴۳ زمستان ۹۳ صفحات ۱۲۹-۱۵۴
- [۹۴] غ. شاه قلی، ح. غفوری و ت. مصری، (۱۳۹۵)، مدل سازی تراکم خاک زیر تاثیر تراکتور با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، نشریه ماشین های کشاورزی جلد ۸ شماره ۱ نیمسال اول ۹۷ ص ۱۰۵-۱۱۸

Abstract

One of the important challenges in studying the dynamic of fluids on a micro scale is to study the process of droplet formation in the microchannel in order to control the size of the production droplets movement. Generally, in microfluidic devices, there are three major regimes for droplet separation, which include compression, dripping and jetting. In the present study, the numerical method of droplet production in a T-shaped microcanal has been investigated and the effects of the viscosity ratio between two phases, the ratio of the input flow rate of the two phases and the number of capillaries have been studied. In this study, the size of the droplet, the distance between the droplets, the frequency of droplet production, and the separation time are investigated. Modeling of fluid dynamics, formation and separation of ferrofluid droplets in oil is modeled by level set method, and the results of this study are compared with available experimental and numerical data. The results show that by decreasing surface tension and increasing the capillary size, the size of the drop and the separation time decreases and the frequency of droplet production increases. The length of the drop increases with increasing continuous flow, and increases with increasing dispersed flow rates. By increasing the ratio of the flow rate, the separation length increases and approaches the Jetting regime. As the viscosity ratio increases between two phases, droplets with larger droplets will be produced, and as the gap between the droplets increases, the droplet production frequency decreases.

Keywords: Microchannel, Drop diameter, Capillary number, Level set method



Shahrood University of Technology

Engineering Department

**Fuzzy modeling of droplet generation in a micro channel with
two phase flow**

By:

Seyedeh Mahsa Fattahi

Supervisor(s):

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan,

Dr. Mohsen Nazari

Advisor:

Dr. Mostafa Nazari

July 2019