



دانشگاه شاهرز

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک (تبدیل انرژی)

شبیه سازی عددی روند تشکیل قطره در یک
میکروکانال T- شکل تحت میدان مغناطیسی

توسط

مجتبی آقاجانی حقیقی

اساتید راهنما

دکتر همایون امداد

دکتر خسرو جعفرپور

دی ماه 1390

چکیده

شبیه سازی عددی روند تشکیل قطره در یک میکروکانال T- شکل تحت میدان مغناطیسی

توسط

مجتبی آقاجانی حقیقی

کاربرد میکرو دستگاهها در تحقیقات علمی و همچنین انجام عملیاتهای مختلف، به ویژه در علوم بیولوژی و بیوشیمی در چند دهه اخیر افزایش چشمگیری داشته است. در این دستگاهها عموماً از میکروسیالهایی که به صورت قطرات منفرد در جریان سیال حرکت می کنند استفاده می شود. دلیل این امر، قابلیت کنترل بر حجم قطرات ایجاد شده است. بدین ترتیب می توان حجم مشخصی از واکنش دهندهها را در فرآیندها به کار گرفت. کنترل اندازه قطرات به روشهای مختلفی انجام می شود. یکی از این روشها استفاده از اثر میدان مغناطیسی بر جریان سیال (MHD) است. بکارگیری این روش ویژگی های منحصر به فردی دارد، که از جمله آنها سهولت در تعبیه تشکیلات مربوطه در ابعاد میکرون، و عدم لزوم ایجاد تغییرات در خصوصیات فیزیکی فازها و پارامترهای جریان - مانند سرعت های ورودی - است. شایان ذکر است که اثر کشش سطحی در ابعاد ریز، بسیار حائز اهمیت بوده و در مقایسه با سایر نیروها مقادیر قابل توجهی را به خود اختصاص می دهد. در این پژوهش، ابتدا به مدلسازی عددی اثر کشش سطحی پرداخته شده است. صحت و دقت این مدلسازی، از طریق مقایسه نتایج با نمونه های معتبر مورد سنجش و ارزیابی قرار گرفته است. پس از آن اثرات MHD از نقطه نظر عددی در کانون توجه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از مدلسازی مربوط به این اثر نیز با نمونه های مختلفی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. سپس نتایج تحقیقات گذشته در شبیه سازی جریان در یک میکروکانال T- شکل بررسی و تایید شده است. این نتایج شامل تاثیر سرعت ورودی جریان اصلی و ثانویه، و همچنین تاثیر تغییر ثابت کشش سطحی بر اندازه قطرات می باشد. در ادامه به موضوع اصلی این پژوهش، یعنی شبیه سازی عددی تاثیر یک میدان مغناطیسی یکنواخت بر روند تشکیل و اندازه قطرات، در یک میکروکانال T- شکل پرداخته شده است. بر این اساس، مشاهده شد که قطر قطرات با افزایش شدت میدان مغناطیسی، کاهش می یابد.

فهرست مطالب

1- مقدمه	1
2- پیشینه تحقیق	6
1-2- مدلسازی جریان های دو فازی	6
2-2- مدلسازی اثر کشش سطحی	7
3-2- مدلسازی اثر میدان مغناطیسی	7
2-4- شبیه سازی جریان در میکروکانال ها	8
2-4-1- تاثیر میدان مغناطیسی بر روند تشکیل قطره در میکروکانالها	11
3- تئوری	12
3-1- روش کسر حجمی سیال (VOF)	12
3-2- معادلات پیوستگی و اندازه حرکت	13
3-3- اثر کشش سطحی	14
3-4- اثر میدان مغناطیسی	17
3-4-1- معادله القا	17
3-4-2- عدد بدون بعد رینولدز مغناطیسی	19
3-4-3- تشابه بین معادله القا و معادله چرخش	20
3-4-4- تابع پتانسیل برداری	21
4- ملاحظات عددی و گسسته سازی معادلات	23
4-1- بدون بعد سازی معادلات حاکم بر جریان	23
4-2- گسسته سازی به روش حجم محدود در دستگاه مختصات منحنی الخط	25

- 31.....3-4 گسسته سازی معادلات اندازه حرکت و پیوستگی
- 32.....4-4 گسسته سازی نیروی کشش سطحی در مختصات منحنی الخط
- 34.....5-4 گسسته سازی معادله پتانسیل برداری میدان مغناطیسی
- 36.....6-4 روش کسر حجمی سیال (VOF)
- 38.....5- نتایج و بحث
- 38.....1-5-1 مدلسازی اثر کشش سطحی
- 38.....1-1-5-1 قطره ساکن
- 43.....2-1-5-1 ناپایداری ریلی - تیلور
- 49.....3-1-5-1 قطره آویزان در آستانه جدایش
- 54.....2-5-2 مدلسازی اثرات MHD
- 54.....1-2-5-1 جریان هارتمن
- 59.....2-2-5-2 جریان کوئت تحت اثر میدان مغناطیسی
- 61.....3-2-5-3 جابجایی چهار سلولی
- 64.....4-2-5-4 جریان گردابی منفرد
- 66.....5-2-5-5 مجموعه ای از گردابه ها در میدان افقی
- 68.....3-5-3 بررسی جریان در میکروکانال T- شکل
- 69.....1-3-5-1 بررسی اثر سرعت جریان اصلی بر قطر قطره ها
- 71.....2-3-5-2 بررسی اثر سرعت جریان ثانویه بر قطر قطره ها
- 71.....3-3-5-3 بررسی اثر کشش سطحی بر قطر قطره ها
- 73.....4-5-4 بررسی جریان در میکروکانال T- شکل تحت میدان مغناطیسی
- 74.....1-4-5-1 تاثیر میدان مغناطیسی بر قطر قطره ها
- 75.....2-4-5-2 تاثیر میدان مغناطیسی بر روند تشکیل قطره
- 77.....1-2-4-5-1 تاثیر میدان مغناطیسی بر سرعت تشکیل قطره
- 77.....2-2-4-5-2 تاثیر میدان مغناطیسی بر نرخ تولید قطرات
- 78.....3-2-4-5-3 تاثیر میدان مغناطیسی بر سرعت حرکت قطره

80..... 6- جمع بندی نتایج و پیشنهادات

83..... 7- فهرست منابع

فهرست شکل ها

- شکل (1-1) تفاوت چسبندگی سطحی دو سطح Hydrophobic و Hydrophilic (Shui et al. 2006) 4
- شکل (1-2) روند تشکیل قطره در میکروکانال T- شکل (Nisisako et al. 2002) 9
- شکل (2-2) نتایج آزمایشهای (Nisisako et al. 2002) در یک میکروکانال T- شکل،
بررسی اثر افزایش سرعت سیال اصلی و ثانویه بر قطر قطره 10
- شکل (3-2) نتایج شبیه سازی عددی (Reedman 2002) در یک میکروکانال T- شکل،
بررسی اثر افزایش سرعت سیال اصلی و ثانویه بر قطر قطره 10
- شکل (1-3) ایجاد نیروی کشش سطحی ناشی از چسبندگی بین مولکولهای یک سیال 14
- شکل (1-4) تصویری از مولفه های یک بردار در دستگاه مختصات منحنی الخط در دو بعد 25
- شکل (2-4) تصویری از یک حجم کنترل دو بعدی و همسایه های پیرامون آن 29
- شکل (3-4) حجم کنترل های مربوط به فشار و مولفه های سرعت در شبکه جابجا شده 31
- شکل (4-4) تصویری از خط مرز در یک سلول و نواحی تفکیک شده توسط آن 37
- شکل (1-5) مشخصات هندسی و شرایط مرزی در مدلسازی قطره ساکن 39
- شکل (2-5) نتایج عددی مدلسازی قطره ساکن (Vincent and Caltagirone 1992)،
به ترتیب در زمانهای $t = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 1, 5$ s 40
- شکل (3-5) نتایج عددی تحقیق حاضر برای قطره ساکن به ترتیب در
زمانهای $t = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 1, 5$ s 40
- شکل (4-5) جریان های زائد در نزدیکی سطح آزاد 41
- شکل (5-5) نمودار تغییرات شاخص RMS سرعت در زمان 42
- شکل (6-5) تصویری از بردارهای عمود بر سطح آزاد 42
- شکل (7-5) مراحل گسترش ناپایداری ریلی- تیلور (Popinet and Zaleski 1999) 43
- شکل (8-5) مشخصات هندسی و شرایط مرزی در مدلسازی ناپایداری ریلی- تیلور 44
- شکل (9-5) شبیه سازی پدیده ناپایداری ریلی- تیلور توسط (Raessi et al. 2010) 45

- شکل (10-5) نتایج شبیه سازی پدیده ناپایداری ریلی - تیلور 46
- شکل (11-5) تصویری از جریان های گردابی در پشت جریان نفوذی 47
- شکل (12-5) حل تحلیلی و نتایج عددی نرخ رشد ناپایداری n بر حسب ϕ 48
- شکل (13-5) مراحل جدایش قطره آویزان در شبیه سازی عددی توسط (Gueyffier et al. 1999) 50
- شکل (14-5) نتایج عددی (Gueyffier et al. 1999) در شبیه سازی جدایش قطره آویزان 51
- شکل (15-5) مشخصات هندسی و شرایط مرزی در شبیه سازی جدایش قطره آویزان 52
- شکل (16-5) تصاویری از نتایج عددی تحقیق حاضر در شبیه سازی جدایش قطره آویزان 53
- شکل (17-5) کانال به کار رفته در جریان هارتمن و نحوه اعمال میدان مغناطیسی 54
- شکل (18-5) مشخصات هندسی و شرایط مرزی در مدلسازی جریان هارتمن 56
- شکل (19-5) نتایج حل تحلیلی (Hughes and Young 1966) و نتایج عددی تحقیق حاضر برای جریان هارتمن 57
- شکل (20-5) پروفایل سرعت در جریان هارتمن بر اساس مقادیر واقعی سرعت 58
- شکل (21-5) هندسه به کار رفته در مدلسازی جریان کوئت 59
- شکل (22-5) نتایج حل تحلیلی (Hughes and Young 1966) و نتایج عددی تحقیق حاضر برای جریان کوئت 60
- شکل (23-5) میدان سرعت در مدلسازی جابجایی چهار سلولی 61
- شکل (24-5) کانتور تابع خطی شرط اولیه در مدلسازی جابجایی چهار سلولی 62
- شکل (25-5) نتایج عددی (Zegeling 2005) سمت راست، و نتایج عددی تحقیق حاضر سمت چپ، در زمان های $t = 0.5, 1, 3, 5$ s 63
- شکل (26-5) میدان سرعت در مدلسازی جریان گردابی منفرد 64
- شکل (27-5) نتایج عددی (Zegeling 2005) سمت راست، و نتایج عددی تحقیق حاضر سمت چپ، در زمان های $t = 1, 2, 3, 10$ s 65
- شکل (28-5) میدان سرعت در مدلسازی مجموعه ای از گردابه ها در میدان افقی 66
- شکل (29-5) نتایج عددی (Zegeling 2005) سمت راست، و نتایج عددی تحقیق حاضر سمت چپ، در زمان های $t = 0.25, 0.5, 1, 10$ s 67
- شکل (30-5) مشخصات هندسی میکروکانال T- شکل 69
- شکل (31-5) نمودار تغییرات قطر قطره در اثر تغییر در سرعت ورودی جریان اصلی برای تحقیق حاضر و کار عددی (Liow 2004)، سرعت ورودی سیال ثانویه 0.05 m/s 70

- شکل (5-32) نمودار تغییرات قطر قطره در اثر تغییر در سرعت ورودی جریان اصلی برای تحقیق حاضر و کار عددی (Liow 2004)، سرعت ورودی سیال ثانویه 0.01 m/s..... 70
- شکل (5-33) نمودار تغییرات قطر قطره در اثر تغییر در سرعت ورودی جریان اصلی برای تحقیق حاضر، در دو سرعت ورودی 0.05 m/s و 0.01 m/s از سیال ثانویه 71
- شکل (5-34) نمودار لگاریتمی تغییرات قطر قطره بر حسب ثابت کشش سطحی برای تحقیق حاضر و کار عددی (Liow 2004)..... 72
- شکل (5-35) تصویری از ایجاد قطرات ریز، به هنگام تشکیل قطره در $\sigma = 0.0089 \text{ N/m}$ 72
- شکل (5-36) میدان مغناطیسی یکنواخت اعمال شده بر مسیر اصلی میکروکانال T- شکل 73
- شکل (5-37) تاثیر میدان مغناطیسی بر قطر قطرات در مقایسه با حالت معمول (بدون اعمال میدان)، در سرعت های ورودی مختلف جریان اصلی، برای دو عدد هارتمن مختلف 74
- شکل (5-38) تاثیر تغییرات قطر قطره بر حسب عدد هارتمن در دو سرعت ورودی مختلف جریان اصلی 75
- شکل (5-39) روند تشکیل قطره در میکروکانال T- شکل تحت تاثیر میدان مغناطیسی در زمان های مختلف 76
- شکل (5-40) روند تشکیل قطره در میکروکانال T- شکل بدون اعمال میدان مغناطیسی در زمان های مختلف 76
- شکل (5-41) تفاوت پروفایل سرعت توسعه یافته ی جریان بدون اعمال میدان مغناطیسی و تحت تاثیر میدان مغناطیسی 78
- شکل (5-42) روند تشکیل قطره در میکروکانال T- شکل بدون اعمال میدان مغناطیسی و تحت تاثیر میدان مغناطیسی 79

فهرست جدول ها

- جدول (1-5) مشخصات فیزیکی فازها در مدلسازی قطره ساکن 39
- جدول (2-5) خصوصیات فیزیکی به کار رفته برای شبیه سازی پدیده ناپایداری ریلی - تیلور 45
- جدول (3-5) اعداد بدون بعد به کار رفته در شبیه سازی جدایش قطره آویزان 50
- جدول (4-5) مشخصات فیزیکی تترادکان و آب 69

1- مقدمه

میکروفناوری امروزه تبدیل به ابزاری قوی برای جستجو و موشکافی در ذرات و اجزای ریز عالم هستی شده است. دلیل روی آوردن بشر به فناوری های ابعاد کوچک (میکرو و نانو)، همین امر است که این ابزارها نقش چشم و دست آدمی را برای ریزبینی و تفحص در این ابعاد بازی می-کنند.

این ابزارها را به طور کلی سیستم های میکروالکترومکانیکی¹ (MEMS) می نامند که از لحاظ کاربردی تنوع زیادی در علوم مختلف دارند. در بسیاری از این سیستم ها از میکروسیالها² استفاده می شود. گونه ای از این سیستم ها، آزمایشگاههای تراشه ای³ (LOC) هستند. LOC تراشه کوچکی است که یک یا چند فرآیند آزمایشگاهی از جمله آنالیز یا تجزیه های شیمیایی و بیولوژیکی را به وسیله میکروسیالهای موجود در خود انجام می دهد (Jönsson 2007).

میکروسیالهای به کار رفته در این سیستم ها اغلب چندفازی هستند و ترجیحاً از میکروسیالهای قطره ای⁴ استفاده می شود که دلیل این رجحان به تفصیل بیان می شود.

در بررسی پدیده ها نسبت سطح به حجم، یک پارامتر بسیار مؤثر است. اگر یک حجم ثابت از سیال داشته باشیم، هر چه بتوان آن را به اجزای کوچکتری تقسیم کرد، نسبت حجم به سطح بالا می رود. حال اگر این اجزا در حد میکرون باشند، این نسبت به حد فوق العاده ای بالا می رود. بدین ترتیب میکروسیالهای قطره ای به علت سطح تماس بالا، جهش بزرگی در افزایش غلظت موضعی واکنش دهنده ها و در نتیجه افزایش سرعت واکنش های شیمیایی ایجاد کرده اند (Yang et al. 2010).

¹ MicroElectroMechanical Systems

² Microfluids

³ Lab-on-a-Chip

⁴ Drop-based Microfluids

از دیگر مشخصه های میکروسیالهای قطره‌ای، گسستگی در جریان سیال و قابلیت تغییر در اندازه و حجم قطره می‌باشد (Shui et al. 2006). بدین ترتیب می‌توان حجم مشخصی از یک سیال را توسط قطره‌ای از آن، به صورت یک نمونه منفرد به محل مورد نظر انتقال داد. مضاف بر اینکه مصرف سیال نمونه، با این روش به شدت کاهش می‌یابد. این مشخصه به ویژه در علم بیولوژی کاربرد دارد. در زمینه هایی چون آنالیز DNA، آنالیز سلول‌ها، آنالیز آنزیم‌ها و آنالیز ساختار پروتئین (Yang et al. 2010)، از میکروسیالهای قطره‌ای استفاده می‌شود. مثلاً میکروآرایه‌های PCR¹ نمونه‌ای از LOCها هستند که برای شناسایی باکتری‌ها، ویروس‌ها و سلول‌های سرطانی استفاده می‌شوند، یا میکروآرایه‌های نمونه برداری خون که می‌توانند محتویات یک سلول را برای یافتن DNA موجود در آن بشکنند (Yager et al. 2006).

از دیگر کاربردهای میکروسیالهای قطره‌ای می‌توان به انواع میکروآکتورها²، مانند میکرومخلوط‌کننده‌ها³ (Hardt et al. 2001)، میکروآرایه‌های DNA⁴ (Lashkari et al. 1997) و نیز پرینترهای Inkjet (Baroud and Willaime 2004) اشاره کرد.

این کاربردها اهمیت فرآیند تشکیل قطره و تحت کنترل درآوردن⁵ آن، و توجه به خصوصیات از قطره، از جمله اندازه قطره و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر آنها را دوچندان می‌کند.

روش‌های مختلفی برای تحت کنترل درآوردن روند تشکیل قطره موجود است که به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند:

کنترل توسط ایجاد تغییر در نیروهای داخلی سیال (مانند کشش بین سطوح سیالها⁶)، نیروهای مکانیکی (مانند استفاده از دیافراگم‌ها) و نیروهای غیر مکانیکی (میدان‌های مغناطیسی⁷، الکتریکی⁸، حرارت⁹، موج¹⁰ و نور¹¹) که هر یک مزایا و معایب خود را داراست (Shui et al. 2006, Yang et.al 2010).

¹ Polymerase Chain Reaction

² Microreactors

³ Micromixers

⁴ DNA Microarrays

⁵ Manipulation

⁶ Interfacial Tension

⁷ Magnetic Actuation

⁸ Electrohydrodynamics

⁹ Thermocapillary

¹⁰ Acoustic Radiation

¹¹ Photonic Effects

تجربه نشان داده است که روند تشکیل قطره کمی با ناپایداری سیال همراه است (Hardt et al. 2001). این امر ما را بر آن می‌دارد تا برای کنترل مطمئن‌تر این روند، تنها بر تغییرات در نیروهای داخلی سیال اکتفا نکنیم.

تأثیر نیروی ناشی از میدان مغناطیسی از جهاتی منحصر به فرد است. تأثیر این نیرو مستقل از PH، قدرت یونی¹ و بار الکتریکی سطح² است و با گستره‌ی وسیعی از مواد و فرآیندهای شیمیایی و بیوشیمیایی سازگار است (Yang et al. 2010). ضمناً تهیه و تعبیه تشکیلات مورد نیاز این اثر در حد میکرون به آسانی میسر است.

تأثیر میدان مغناطیسی به دو صورت به سیال القا می‌شود:

در حالت اول سیال مورد نظر یونی است. بدین ترتیب اثر میدان مغناطیسی مستقیماً بر آن القا می‌شود. در استخراج نفت از چاههای زیر دریاهای آب شور، معمولاً مواد استخراج شده مخلوطی از نفت و آب شور است. در عملیات خالص سازی نفت، مواد استخراج شده را از یک میدان مغناطیسی می‌گذرانند. بدین ترتیب آب شور به علت یونی بودن و برخورداری از هدایت الکتریکی مناسب³، تحت تأثیر میدان مغناطیسی از نفت که غیر یونی است جدا شده و نفت خالص حاصل می‌شود. بر اساس این حالت، می‌توان روند تشکیل قطره‌ی یک سیال یونی، در یک سیال غیر یونی را تحت میدان مغناطیسی تحت کنترل درآورد.

در حالت دوم که معمولاً سیالهای مورد نظر غیر یونی هستند، از یک سری ذرات فرایارامغناطیسی⁴ در یکی از فازهای سیال استفاده می‌شود که نیرویی توسط یک آهنربای دائمی یا آهنربای الکتریکی به ذرات القا می‌شود. با اعمال نیرو روی این ذرات، فاز مورد نظر نیز همراه با آنها به هر سمت کشیده می‌شود. اثر این نیرو تحت تأثیر نوع ذرات مغناطیسی مورد استفاده، اندازه قطره، کشش سطحی⁵، لزجت سیال و همچنین تعداد ذرات مغناطیسی مورد استفاده و... می‌باشد (Yang et al. 2010). این نکته بسیار حائز اهمیت است که زمانی سیال به خوبی متأثر از نیروی القا شده در ذرات می‌شود که چسبندگی⁶ بین سیال قطره و پوشش

¹ Ionic Strength

² Surface Charge

³ Electrical Conductivity

⁴ Superparamagnetic

⁵ Surface Tension

⁶ Adhesion

سطحی¹ ذرات مغناطیسی زیاد باشد. بدین منظور بهتر است پوشش سطحی ذرات مغناطیسی طبق شکل (1-1)، Hydrophilic باشد (Yang et al. 2010).



شکل (1-1) تفاوت چسبندگی سطحی دو سطح Hydrophilic و Hydrophobic (Shui et al. 2006)

همواره در مقیاس های کوچک، بر خلاف ابعاد معمولی، نیروی ناشی از کشش بین سطوح سیالات از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. رفتار میکروسیالها از جهاتی با سیال در ابعاد معمولی متفاوت است. در ابعاد کوچک، کشش سطحی و نیروی ناشی از لزجت سیال نقش برجسته تری نسبت به باقی نیروها (مانند اینرسی) دارند. در مقیاس های میکرو و نانو نسبت اهمیت نیروها به ترتیب زیر است (Shui et al. 2006):

شناوری > نیروهای اینرسی ~ نیروی جاذبه > نیروهای لزجی > نیروی کشش بین سطحی

عموماً در سیستم های چند فازی در میکروکانالها ما با تقابل دو نیرو روبرو هستیم. نیروی لزجی و کشش بین سطوح سیالات، که بنا بر ترتیب فوق نیز جزء قوی ترین نیروها هستند. نیروی لزجی به صورت مماس بر مرز دو سیال عمل می کند و سعی در افزایش مرز دو سیال دارد. نیروی کشش بین سطحی عمود بر مرز سیال ها عمل می کند و سعی در کاهش مرز دو سیال دارد. به همین دلیل، غلبه نیروهای لزجی بر کشش بین سطحی باعث ایجاد جریان موازی² و غلبه نیروی کشش بین سطحی بر نیروهای لزجی منجر به ایجاد جریان گسسته³ و قطره ای یک فاز در فاز دیگر می شود (Joanicot and Ajdari 2005).

¹ Surfactant's Tail

² Startified Flow

³ Segmented Flow

اثر نیروی ناشی از میدان مغناطیسی بر سیالات، در علم هیدرودینامیک مغناطیسی¹ (MHD)، بررسی می‌شود. علم MHD از جمع دو علم هیدرودینامیک و الکترومغناطیس پدید آمده است. با این حال گستره علمی که MHD پوشش می‌دهد بسیار فراتر از دامنه علم هیدرودینامیک به علاوه الکترومغناطیس است (Palacios 2006).

در این پژوهش به دلیل دو فازی بودن جریان سیال، برای تمیز سطوح آزاد فازهای مختلف، از یک برنامه (Nikseresht 2004, Ziaei 2006)، بر مبنای کسر حجمی سیال، استفاده شده است. پس از افزودن ملاحظات کشش سطحی و اثرات مغناطیسی به این برنامه، تأثیر میدان مغناطیسی بر روند تشکیل قطره در یک میکروکانال T- شکل بررسی خواهد شد.

شایان ذکر است که در نگارش روابط موجود در فصل‌های مختلف این پایان‌نامه، استفاده از حروف درشت² نشانگر توابع برداری است.

¹ Magnetohydrodynamics
² Bold Letters

2- پیشینه تحقیق

در این فصل پیشینه ای از مسائل مربوط به مدلسازی جریان های دوفازی، مدلسازی اثر کشش سطحی و میدان مغناطیسی، و کارهای عددی و تجربی انجام شده در زمینه شبیه سازی جریان در میکروکانال های T- شکل بررسی می شود.

2-1- مدلسازی جریان های دو فازی

یکی از بهترین روش های مدلسازی سطح آزاد در جریان های دوفازی، روش کسر حجمی سیال¹ (VOF) است که برای اولین بار توسط (Hirt and Nicholas 1981) منتشر شد. در این روش از یک تابع اسکالر به نام تابع رنگ² برای دنبال کردن حجم هر سیال استفاده می شود. در روش VOF برای بازسازی سطح آزاد³ از الگوریتم های مختلفی استفاده می شود که الگوریتم PLIC⁴ که برای اولین بار توسط (Youngs 1982) معرفی شد، از دقیق ترین آنهاست. یکی از مراحل مهم در روش VOF-PLIC بدست آوردن بردارهای عمود بر سطح آزاد است. از جمله الگوریتم های کارآمد برای بدست آوردن بردار عمود بر سطح، الگوریتم پارکر و یانگ⁵ و نیز ELVIRA⁶ است (Pilliod and Puckett 2004). ELVIRA دقیق ترین و جامع ترین الگوریتم برای محاسبه بردار عمود بر سطح است که توسط (Pilliod 1992) ارائه شده است.

¹ Volume Of Fluid

² Color function

³ Interface Reconstruction

⁴ Piecewise Linear Interface Calculation

⁵ Parker and Youngs

⁶ Efficient Least Squares VOF Interface Reconstruction Algorithm

2-2- مدلسازی اثر کشش سطحی

دو روش عمده برای مدلسازی اثر کشش سطحی موجود می‌باشد. یکی روش CSS¹ که از تانسور تنش استفاده می‌کند، و دیگری روش CSF² است. در روش CSF که توسط (Brackbill et al. 1992) ارائه شد، از تنش‌های برشی روی سطح آزاد صرف‌نظر می‌شود و ضریب کشش سطحی ثابت در نظر گرفته می‌شود. با این ساده‌سازی‌ها، نیروی ناشی از کشش سطحی تنها در جهت عمود بر سطح مقدار دارد. در این روش، این نیرو که به صورت یک نیروی تماسی³، تنها روی خط مرز دو سیال عمل می‌کند، به یک نیروی حجمی⁴ هموار تبدیل شده و در معادله اندازه حرکت قرار داده می‌شود.

یکی از مسائل مهم در مدلسازی اثر کشش سطحی، تخمین صحیح انحنای سطح آزاد است که این کار معمولاً با استفاده از تغییرات تابع رنگ در میدان سیال انجام می‌شود. در کار انجام شده توسط (Brackbill et al. 1992)، دو روش مختلف یکی بر پایه طرح MAC⁵ و دیگری ALE⁶ (Maire et al. 2007, Hirt et al. 1972)، برای مدلسازی نیروی بین بین سطح دو سیال ارائه شده است که جزئیات آن در (Brackbill et al. 1992) آمده است. نمونه‌های مختلفی به وسیله این روش مدلسازی شده است که در فصل نتایج توضیحات کامل آورده شده است.

2-3- مدلسازی اثر میدان مغناطیسی

اثر میدان مغناطیسی بر سیال به وسیله نیروی لورنز⁷ در معادلات نویر استوکس⁸ ظاهر می‌شود. این نیرو از ضرب خارجی چگالی جریان الکتریکی و شدت میدان مغناطیسی بدست می‌آید. به طور کلی دو روش برای مدلسازی عددی معادلات MHD استفاده می‌شود. یکی روش

¹ Continuum Surface Stress

² Continuum Surface Force

³ Contact Force

⁴ Volume Force

⁵ Marker And Cell

⁶ Arbitrary Lagrangian Eulerian

⁷ Lorentz Force

⁸ Navier Stokes Equations

المان محدود¹ است، و دیگری حجم محدود². در روش المان محدود، عموماً از روش گالرکین³ گالرکین³ (Ern (and Guermond 2004) استفاده می‌شود. در این روش از یک مقدار جبرانی⁴ به صورت یک تابع گرادیان، برای اطمینان از ارضای قانون گوس استفاده می‌شود (Salah (1999, Salah et al. 2001). معادله دیفرانسیل جزئی حاکم بر شدت میدان مغناطیسی القا شده در جریان سیال را معادله القا⁵ گویند. در مسائل عددی به دو صورت با معادله القا برخورد می‌شود. در حالت اول مستقیماً از خود معادله القا برای بدست آوردن شدت میدان مغناطیسی القایی استفاده می‌شود (Massaglia et al. 2008). در حالت دوم با تعریف یک تابع پتانسیل برداری⁶، ابتدا معادله القا به فرمی ساده تر تبدیل شده و پس از حل این معادله جدید، شدت میدان مغناطیسی با یک تبدیل ساده بدست می‌آید (Zegeling 2005, Jiangguo 2007).

یکی از نمونه های مهم در حل جریان سیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی، جریان هارتمن⁷ است. در این نمونه جریان در یک کانال ساده تحت اثر یک میدان مغناطیسی یکنواخت فرض می‌شود (Hughes and Young 1966). این نمونه به همراه نمونه های دیگری از اثرات میدان مغناطیسی بر جریان سیال در فصل نتایج بررسی شده است.

2-4- شبیه سازی جریان در میکروکانال ها

هندسه های مختلفی برای تشکیل قطره در یک میکروسیال چند فازی در میکروکانالها موجود است. این هندسه ها عبارتند از:

- میکروکانال T- شکل

- میکروکانال متقاطع

- میکروکانال Flow-Focusing

¹ Finite Element

² Finite Volume

³ Galerkin

⁴ Penalty Factor

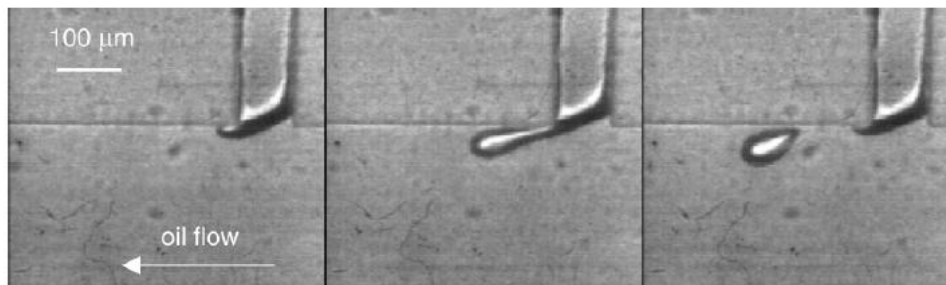
⁵ Induction Equation

⁶ Vector Potential Function

⁷ Hartmann Flow

از این میان، کاربرد میکروکانالهای T- شکل در میکروسیستم های الکترومکانیکی (MEMS)، به وفور دیده می شود و معمولاً به صورت شبکه ای از میکروکانالهای T- شکل موجود هستند (Yang et al. 2010).

آزمایشهای مختلفی در هندسه های متفاوت برای یافتن پارامترهای مؤثر بر الگوی جریان انجام شده است. Thorsen از اولین کسانی بوده که از میکروکانال T- شکل برای ایجاد قطره استفاده کرده است. در این هندسه، مطابق شکل (1-2)، سیال ثانویه تحت نیروی برشی سیال اصلی، وارد کانال اصلی می شود و در نهایت تحت اثر نیروی کشش سطحی، قطره ای از سیال ثانویه جدا شده و در کانال اصلی حرکت می کند (Yang et al. 2010).

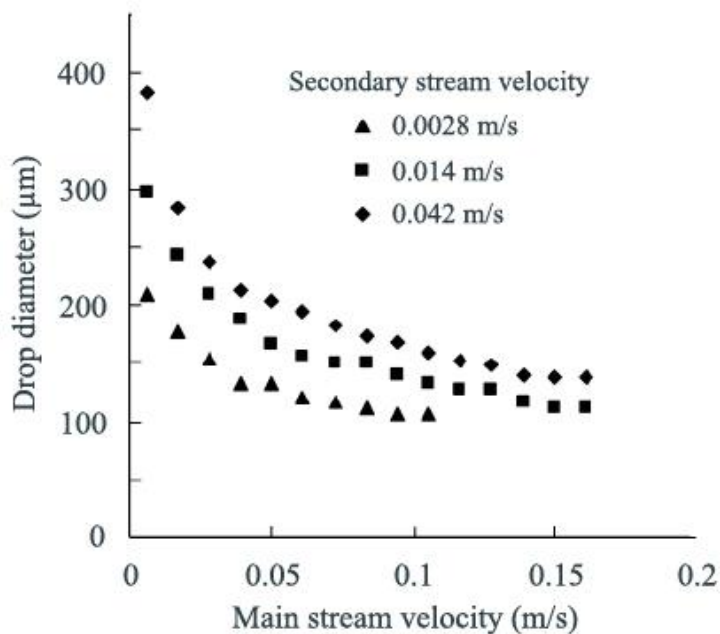


شکل (1-2) روند تشکیل قطره در میکروکانال T- شکل (Nisisako et al. 2002)

آزمایشهای مفیدی نیز توسط (Nisisako et al. 2002) در میکروکانال T- شکل انجام شده است. بنا بر نتایج ایشان، همان طور که در شکل (2-2) مشاهده می شود، با افزایش سرعت جریان اصلی، قطر قطره ها کاهش می یابد. همچنین با افزایش نرخ ورود سیال ثانویه به میکروکانال اصلی، قطر قطره ها نیز افزایش یافته است.

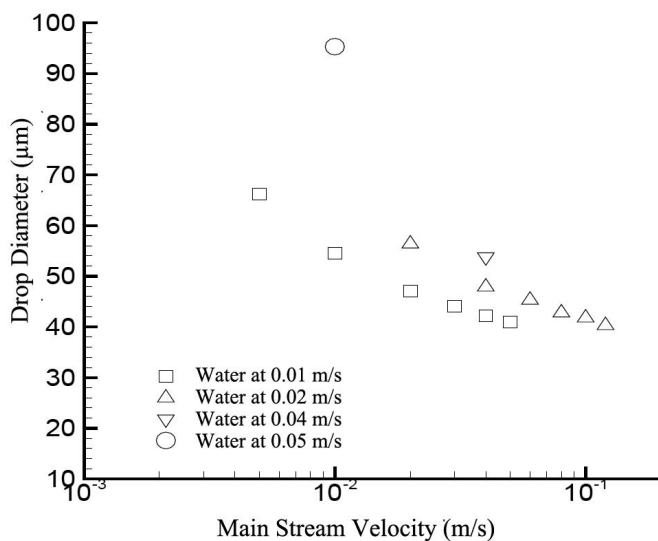
با افزایش سرعت جریان اصلی، نسبت نیروهای برشی به نرمال افزایش می یابد. در نتیجه قطر قطره ها بنا بر غلبه نیروی لزجی بر کشش بین سطحی کاهش یافته و حرکت قطره ای جریان، رفته رفته به حرکت موازی فازها تبدیل می شود (Shui et al. 2006).

همین آزمایشات به صورت تجربی توسط (Liow and Cole 2004) نیز انجام شده است و همین نتایج به دست آمده است.



شکل (2-2) نتایج آزمایشهای (Nisisako et al. 2002) در یک میکروکانال T- شکل، بررسی اثر افزایش سرعت سیال اصلی و ثانویه بر قطر قطره

در پژوهشی عددی توسط (Reedman 2002)، طبق شکل (2-3)، همین نتایج تأیید شده است.



شکل (2-3) نتایج شبیه سازی عددی (Reedman 2002) در یک میکروکانال T- شکل، بررسی اثر افزایش سرعت سیال اصلی و ثانویه بر قطر قطره

در تحقیقی دیگر که به صورت عددی توسط (Liow 2004) انجام گرفته است، علاوه بر تأیید نتایج فوق، تأثیر تغییر کشش بین سطوح دو سیال نیز بررسی شده است. طبق گزارش وی، با کاهش کشش بین سطحی سیالات، قطر قطره نیز کاهش یافته است.

2-4-1- تاثیر میدان مغناطیسی بر روند تشکیل قطره در میکروکانالها

اثرات MHD، با توجه به ویژگی‌های منحصر به فردی که در فصل پیشین توضیح داده شد، می‌تواند نقش برجسته‌ای در تحت کنترل در آوردن روند تشکیل قطره در میکروکانالها ایفا کند. از جمله مهمترین این ویژگی‌ها می‌توان به عدم وابستگی آن به خصوصیات شیمیایی سیال‌ها و بار الکتریکی سطح، و سازگاری آن با اکثر مواد و فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی، سهولت تعبیه تشکیلات مورد نیاز این نیرو در مقیاس میکرون و انعطاف بالا در کنترل قطره، به دلیل سهولت تغییر در شدت این نیرو (به ویژه با استفاده از آهنربای الکتریکی)، اشاره کرد.

به طور کلی آزمایشات تجربی یا پژوهش‌های عددی در زمینه بررسی اثرات MHD بر روند تشکیل قطره در میکروکانالها، کمتر در کانون توجه قرار گرفته یا نتایج آنها منتشر نشده است. اما از سال 2007، تحقیقات وسیعتری در این زمینه آغاز شده است (Yang et al. 2010).

برخورداری از قابلیت‌های ذکر شده در کنترل روند تشکیل قطره تحت اثرات MHD، و از طرفی کاربرد آن در برخی میکرو دستگاه‌های بیولوژیکی (مانند PCR ها)، دلایلی بر تحقیق و تفحص بیشتر در این زمینه است.

هدف از این پژوهش، بررسی عددی اثرات MHD بر روند تشکیل قطره در یک میکروکانال T- شکل می‌باشد. در این راستا ابتدا به مدلسازی عددی اثر کشش سطحی و اثرات MHD، به طور مجزا پرداخته خواهد شد. پس از آن، نتایج پژوهش‌های پیشین در این زمینه بررسی شده و در ادامه، روند تشکیل قطره در جریان ثانویه، تحت اثر یک میدان مغناطیسی یکنواخت بر جریان اصلی میکروکانال، شبیه سازی خواهد شد.