دانشگاه کاشان

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مکانیک سیالات

پایان نامه

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در مهندسی مکانیک

عنوان

مطالعه عددی میدان جریان و انتقال جرم یک سیال غیرنیوتنی حاوی گونه‌های ردوکس (RedOx) درون یک میکروکانال تحت میدان مغناطیسی

استاد راهنما:

دکتر قنبرعلی شیخ زاده

استاد مشاور:

دکتر محسن بهپور

توسط:

سعید مزروعی سبدانی

بهمن 1390

بسم الله الرحمن الرحیم

به نام خداوند بخشنده مهربان

تقدیم نامه

.....

سپاس خدایی را که همیشه باید شکر گذار نعمتهای بی‌پایانش بود. از اولین گام‌های زندگی تا به امروز، همیشه و در همه حال حضور دو نفر باعث شده است دلیلی برای پیشرفت و ترقی در من بیدار بماند و مسلماً این دو نفر جز پدر و مادر عزیز و مهربانم نبوده‌اند. می‌دانم که برای رشد و ترقی ما چه تلاشها کرده‌اید و چه رنج‌هایی برده‌اید. امیدوارم توانسته باشم پاسخگوی زحمات بی‌پایان شما بوده باشم. این پایان‌نامه چیزی نیست جز نتیجه تلاش و زحمات شما پدر و مادر عزیزم که به نتیجه رسیده و من با تمام وجود آن را به شما تقدیم می‌کنم.

نویسنده

تشکر و قدردانی

انجام پایان نامه حاضر، بعد از لطف و عنایت الهی که در همه حال دست توانایش بازیگر است، مدیون تلاش افراد بی شماری بوده که بدین وسیله دوستی و سپاس بی پایان خود را به آنان تقدیم می‌کنم.

از استاد راهنمای گرامی، جناب آقای دکتر شیخ زاده که آموزش و راهنمایی‌های ایشان، چه در کلاس‌های درس و چه در مراحل مختلف، نقش مهمی در پیشبرد هرچه بهتر این پایان نامه بر عهده داشتند، کمال تشکر را دارم و آرزوی توفیق روز افزون را در همه زمینه‌ها برای ایشان از خداوند منان خواستارم.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محسن بهپور که راهنمایی‌های ایشان، نقشی مهم در یادگیری مطالب و پیشبرد هرچه بهتر این پایان نامه ایفا کرد، نهایت تشکر را دارم.

از جناب آقای دکتر غلامحسین فتح تبار به عنوان ناظر جلسه و همچنین از داوران محترم پایان نامه، آقایان دکتر حسین خراسانی‌زاده و دکتر علی‌اکبر عباسیان که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را بر خود هموار کردند و از نظرات و پیشنهادات خود اینجانب را بهره مند ساختند، بی‌نهایت سپاسگزارم.

چکیده

میدان جریان و انتقال گونه‌های ردوکس در درون یک میکروکانال که تحت میدان مغناطیسی قرار گرفته شده، مطالعه شده است. معادلات حاکم بر مسأله، معادلات مومنتوم برای جریان سیال و معادله نرست پلانک برای انتقال گونه‌های ردوکس می‌باشند که با شرایط مرزی معلوم و با استفاده از روش حجم محدود حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی جملات پخش از طرح تفاضل مرکزی و جمله جابجایی از طرح پیوندی استفاده شده و ارتباط میدان سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپلر برقرار شده است. نتایج برای دو نوع سیال یعنی سیال نیوتنی (آب) و سیال غیرنیوتنی (خون) ارائه گردیده است. سیال غیر نیوتنی با استفاده ار مدل پاور-لا مدل سازی شده است. گونه‌های مورد استفاده در این تحقیق $FeCl_3$ و $FeCl_2$ هستند. نتایج برای اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4 و در دو بخش مجزا ارائه و مقایسه شده است. در بخش نخست، جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس به عنوان تقویت کننده جریان سیال و در بخش دوم به عنوان عامل محرک اصلی جریان سیال در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج حاصله، مشاهده شد که زمانیکه عدد پکلت افزایش یابد قدرت جابجایی افزایش یافته و به واسطه آن شار جریان افزایش می‌یابد. در نتیجه این افزایش، نیروی لورنتز که از برهمکنش این شار جریان و یک میدان مغناطیسی بوجود می‌آید افزایش یافته و سرعت جریان زیاد می‌شود. برای سیال غیرنیوتنی (خون) این افزایش سرعت کمتر از سیال نیوتنی بوده است. در قسمت دوم نیز ملاحظه شد که با افزایش عدد پکلت مقدار دبی که از میکروکانال عبور می‌کند بیشتر می‌شود.

کلمات کلیدی: انتقال گونه‌های ردوکس، هیدرودینامیک مغناطیسی، میکروکانال، نیروی لورنتز

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست شکل‌ها ..... ج
فهرست جدول‌ها ..... د
فهرست علایم و نشانه‌ها ..... ه
فصل اول :مقدمه 1
1-1- پیشگفتار 2
2-1- مروری بر کارهای گذشت 2
3-1-تحقیق حاضر 6
1- 3-1 نوآوری، هدف و موضوع تحقیق 6
2-3-1- روش انجام تحقیق 7
فصل دوم: توصیف هیدرو دینامیک مغناطیسی و کاربردهای آن 8
2-1- مقدمه 9
2-2-هیدرودینامیک مغناطیسی چیست؟ 9
3-2-تاریخچه‌ای از هیدرودینامیک مغناطیسی 11
4-2-یادآوری قوانین الکترودینامیک 12
5-2-معادلات حاکم بر الکترودینامیک 15
1-5-2-میدان الکتریکی و نیروی لورنتز 15
2-5-2-قانون اهم و نیروی لورنتز حجمی 17
3-5-2-قانون آمپر 19
4-5-2- قانون فارادی 19
5-5-2- شکل کاهش یافته ی معادلات ماکسول در هیدرودینامیک مغناطیسی 21
فصل سوم: کلیاتی در مورد واکنش‌های اکسایش-کاهش، مبانی الکتروشیمی و معادله باتلر-والمر 23
1-3-مقدمه 24
2-3-واکنش‌های اکسایش-کاهش 24
3-3-معادله نرست 27
4-3-آند، کاتد و سلول الکتروشیمیایی 29
5-3-معادله باتلر-ولمر(سینتیک واکنش های الکترودی) 30
فصل چهارم: معادلات حاکم بر جریان سیال غیر نیوتنی و انتقال گونه‌های ردوکس 38
1-4- مقدمه 39
2-4- معادلات حاکم بر جریان سیال، انتقال جرم و شرایط مرزی 39
1-2-4- مدل ریاضی برای حرکت سیال 40
2-2-4- مدل ریاضی برای انتقال جرم چند یون 40
3-2-4- شرایط مرزی 41
1-3-2-4- شرایط مرزی معادله مومنتوم 41
2-3-2-4- شرایط مرزی معادله نرست پلانک 42
3-4- کمیتهای بی‌بعد 42
1-3-4- عدد پکلت 43

4-3-2- عدد رینولدز 43
4-3-3-عدد اشمیت 43
فصل پنجم:حل عددی معادلات حاکم 45
5-1-مقدمه 46
5-2- روش بدست آوردن معادله انفصال 46
5-2-1- روش‌های انفصال 47
5-2-2- معادلۀ دیفرانسیل کلی 47
5-2-3- شکل تفاضل محدود معادلۀ کلی ϕ 49
5-2-4- بدست آوردن معادله انفصال با استفاده از طرح‌های مختلف 49
5-2-4-2- طرح بالادست 51
5-2-4-3- طرح پیوندی 52
5-2-4-4- طرح قائده توانی 52
5-2-5- تکمیل معادله انفصال 53
5-3-حل معادلات حاکم بر جریان 53
5-3-1- شبکه جابجا شده 54
5-3-2- الگوریتم سیمپلر 54
5-3-3- نحوه اعمال شرایط مرزی 55
5-3-3-1- شرایط مرزی معادله سرعت 55
5-3-3-2- شرایط مرزی معادله انتقال گونه‌ها 57
5-3-4- نحوه حل دستگاه معادلات خطی 58
5-3-4-1- الگوریتم ماتریس سه قطری 58
5-4- برنامه کامپیوتری 58
فصل ششم: بررسی و تحلیل نتایج 60
6-1-مقدمه 61
6-2- انتخاب شبکه مناسب 61
6-3-بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری برای سیال نیوتنی(آب) 62
6-4- بررسی وتحلیل نتایج 64
6-4-1- جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس به عنوان تقویت کننده جریان سیال 64
6-4-2- جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس به عنوان عامل محرک جریان سیال 73
فصل هفتم: جمع بندی و ارائه پیشنهادات 78
7-1- مقدمه 79
7-2- جمع بندی 79
7-3- پیشنهادات 80
منابع و مراجع 81

فهرست شکل‌ها

عنوان صفحه

شکل1-1: پروفیل سرعت در جریان MHD در میکروکانال‌ها..... 4

شکل 1-2: تعامل بین شار جریان و میدان مغناطیسی و جهت نیروی ایجاد شده..... 4

شکل 1-3: هندسه حل..... 7

شکل 2-1: نمایش قانون اهم برای (الف) رسانای ساکن (ب) رسانای متحرک..... 14

شکل 2-2: نمایش قانون فارادی (الف) تولید نیروی محرکه ی الکتریکی به واسطه ی حرکت رسانا

(ب) تولید نیروی محرکه ی الکتریکی به واسطه ی میدان مغناطیسی وابسته به زمان..... 15

شکل 2-3 : نمایش قانون آمپر بر روی یک سیم حامل جریان الکتریکی..... 15

شکل 2-4: نیروی وارد بر ذره ی باردار متحرک در حضور یک میدان مغناطیسی..... 16

شکل 2-5: مسیر بسته ی ساکن در حضور یک میدان مغناطیسی وابسته به زمان..... 20

شکل3-1: یک سلول الکتروشیمیایی مربوط به روی و مس..... 30

شکل 5-1: حجم کنترل برای حالت دوبعدی..... 49

شکل 5-2: مکانهای جابجا شده برای u، v [28]..... 54

شکل 5-3:حجم کنترل سرعت u در مجاورت دیوار پایینی محفظه..... 56

شکل 5-4: توزیع سرعت نزدیک دیوارهٔ پایینی محفظه..... 56

شکل 5-5: نمایش روش خط به خط [28]..... 58

شکل6-1: شبکه نقاط 381×201 با ضریب انبساط 1/08 در جهت عمودی..... 62

شکل6-2: نمودار شار جریان بر حسب طول آند برای مقایسه بین نتایج کار حاضر با نتایج مرجع[18]..... 63

شکل6-3: نمودار غلظت گونه‌ها در مقطع میانی میکروکانال برای مقایسه نتایج کار حاضر با مرجع [18]..... 63

شکل6-4: مقایسه کار حاضر با مرجع[29] برای پروفیل سرعت سیال غیر نیوتنی..... 63

شکل6-5: خطوط جریان و کانتور سرعت برای سیال نیوتنی در اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4..... 65

شکل6-6: خطوط جریان و کانتور سرعت برای سیال غیرنیوتنی در اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4..... 66

شکل6-7: نمودار پروفیل سرعت در دو مقطع عرضی کانال ($\bar{X}$=5 و $\bar{X}$=15) برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در $Pe = 10^3$ و $Pe=10^4$..... 67

شکل6-8: مقایسه پروفیل سرعت برای دو سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در مقطع میانی میکروکانال ($\bar{X} = 15$) برای $Pe = 10^3$و10^4 68

شکل6-9: خطوط غلظت ثابت برای سیال نیوتنی در اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4..... 69

شکل6-10: خطوط غلظت ثابت برای سیال غیرنیوتنی در اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4..... 70

شکل6-11: مقایسه خطوط جریان برای سیال نیوتنی(----) و غیر نیوتنی(——) در $Pe=10^4$..... 71

شکل6-12: نمودار $\bar{J}$ بر حسب طول آند در اعداد پکلت 10^3، 5×10^3 و 10^4..... 72

شکل6-13: نمودار پخش غلظت یونهای فعال Fe^{+3} و Fe^{+2} برحسب $\bar{Y}$ در مقطع عرضی $\bar{X} = 15$..... 72

شکل6-14:خطوط جریان برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در اعداد پکلت 10^3و 5×10^3..... 73

شکل6-15: پروفیل سرعت برای سیال غیر نیوتنی در عدد پکلت5×10^3 در دو مقطع عرضی $\bar{X}$=5 و$\bar{X}$=15..... 74

شکل6-16:خطوط غلظت برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در عدد پکلت 10^3..... 75

شکل6-17:خطوط غلظت برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی در عدد پکلت 5×10^3..... 76

شکل6-18: نمودار $\bar{J}$ بر حسب طول آند برای$Pe =5\times 10^3$..... 77

فهرست جدول‌ها

عنوان صفحه

جدول2-1: معادلات الکترودینامیک..... 21

جدول 2-2:معادلات الکترودینامیک نهایی..... 22

جدول5-1: مقادیر $\boldsymbol{\phi}$ و $\boldsymbol{\Gamma}$ برای معادلهٔ دیفرانسیلی کلی حاکم بر جریان سیال و انتقال حرارت..... 48

جدول6-1: مقایسه شار جریان ماکزیمم برای تعداد نقاط شبکه مختلف در $Pe=10^4$..... 62

جدول6-2: مشخصات انتقال مربوط به گونه‌های ردوکس..... 64

جدول6-3: مقایسه سرعت متوسط در دو مقطع عرضی کانال برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در 10^4و$10^3 = Pe$ ٦٨

جدول6-4: مقدار دبی عبوری از میکروکانال در اعداد پکلت 10^3و 5×10^3 برای سیال نیوتنی و غیرنیوتنی..... 74

جدول6-5: مقایسه سرعت ماکزیمم در دو مقطع عرضی کانال برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در 5×10^3 و$10^3 = Pe$..... 75

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
غلظت گونه‌ها(M)	C
غلظت بی بعد گونه‌ها	$\bar{C}$
ضریب پخش(m^2/s)	D
ضریب پخش بی بعد	$\bar{D}$
ثابت فارادی(C/mol)	F
ارتفاع کانال(mm)	H
دانسیته جریان الکتریکی(A/mm^2)	J
دانسیته جریان الکتریکی بی بعد	$\bar{J}$
ثابت نرخ واکنش رفت	k_a
ثابت نرخ واکنش برگشت	k_d
طول میکروکانال(mm)	L
تعداد الکترونهای جابجا شده	N
فشار(Pa)	P
عدد پکلت(u_0h/D)	Pe
ثابت گازها(J/Kg.K)	R
عدد رینولدز($\rho\ u_0h/\mu$)	Re
عدد اشمیت(ν/D_0)	Sc
دمای با بعد(K)	T
مولفه‌های سرعت در جهت‌های x و y	u,v
سرعت‌های بی بعد	$\bar{U},\bar{V}$
مختصات مکانی با بعد(mm)	x,y
مختصات مکانی بی بعد	$\bar{X},\bar{Y}$
تعداد بار یونها	Z
علائم یونانی	
ضریب انتقال بار	α
ویسکوزیته دینامیکی(N.m/s)	μ
دانسیته(Kg/m^3)	ρ
ویسکوزیته سینماتیک(m^2/s)	ν
پتانسیل اعمالی به الکترودها	η
پتانسیل بی بعد	$\bar{\eta}$

فصل اول

مقدمه

1 - 1 - پیشگفتار

در سال‌های اخیر، کوچک سازی در بیشتر تحقیقات و در اکثر علوم، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. مقیاس‌های کوچک می‌توانند بهبود در میزان حساسیت و همچنین طرح دیدگاه‌های جدید برای حل مسائل مهندسی، پزشکی و سایر علوم را عرضه کنند. از جمله سیستم‌های با مقیاس کوچک، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی[1] است که یک تکنولوژی سریعا در حال رشد می‌باشد که در آن دستگاه-های با مقیاس میکرون، توسط روش‌های ساخت میکروالکترونیکی ساخته می‌شوند. دستگاه‌های زیادی نظیر سنسورهای جریان، شیرهای تنظیم فشار گاز، سیستم‌های پیچیده‌ی شامل میکروکانال‌ها، میکروپمپ‌ها و دیگر وسایل، در حال توسعه می‌باشند. کاربرد این سیستم‌ها در حوزه‌های صنعتی و پزشکی رو به افزایش می‌باشد. میکرو پمپ‌های حرارتی[2]، میکرو موتورهای حرارتی[3]، میکرو مبدل‌های حرارتی[4] جهت خنک‌کاری مدارهای الکترونیکی، میکرو روبات‌ها، شتاب‌سنج‌ها، میکروسکوپ‌های الکترونی، رآکتورهای جداسازی سلول‌های زیستی، آنالیزگرهای خون[5] و همچنین سیستم‌های دارو رسان[6]، نمونه‌های کمی از این سیستم‌ها می‌باشند. یکی از زمینه‌های مورد توجه دانشمندان در مقیاس-های میکرو و نانو استفاده از این تکنولوژی در مبحث انتقال جرم با استفاده از روش‌های گوناگون در چند سال گذشته بوده است. در ادامه با بیان تاریخچه‌ای مختصر، به اهمیت این موضوع و کاربردهای آن اشاره شده است.

1 - 2 - مروری بر تحقیقات گذشته

از موارد بسیار مهم که می‌توان به آن اشاره نمود کاربردهای زیست شناختی (بیولوژیکی) در مهندسی است که یک زمینه مطالعاتی برای گروه‌های تحقیقاتی مختلف را ایجاد کرده است. کاربردهای مختلفی از جمله گردش نمونه‌های خون، تست کردن بیولوژیکی نمونه‌ها و کشف کردن وجود زنجیرهای DNA و RNA قابل ذکر است[1-6].

برای انجام بعضی از عمل‌ها یک تکنولوژی جدید به وجود آمده است. این تکنولوژیLOC [7] نام دارد. LOC می‌تواند در انجام بسیاری از کارها در آزمایشگاه‌های واقعی از جمله در پاک کردن، مخلوط

---

1. Micro-Electronic-Mechanical-Systems (MEMS)
2. Micro-heat-pumps
3. Micro-heat-engines
4. Micro-heat-exchangers
5. Blood analyzer
6. Drug Delivery System
7. lab on a chip

کردن و جدا سازی مورد استفاده قرار گیرد. بعضی از کارها توسط بودیچر[7] بررسی شده است. او یک LOC جدید برای کشف باکتری‌ها طراحی و ساخته است. ترائو[8] یک وسیله LOC برای کشف DNA کروموزومی مجرد تست کرده است. LOC از یک شبکه میکرو و نانو کانال ترکیب شده است، بنابراین نمونه‌های کوچک از قبیل خون و بزاق نمی‌توانند رقیق شوند. بر اساس این واقعیت در فرآیند طراحی برای LOC با دو چالش روبرو هستیم: ایجاد چرخش در کانال و تولید یک نیروی بزرگ مقاوم. میکرو و نانو کانالها به نیروی پمپاژ زیادی احتیاج دارند چرا که نیروهای حجمی در ابعاد کوچک به شدت زیاد می‌شوند. برای غلبه بر مشکل پمپ کردن گروه‌های زیادی تشکیل شده، مطالعات زیادی انجام و روش‌های مختلفی برای ساختن جریان داخل کانال طراحی شده است. نیتیز[9] یک میکروپمپ بر اساس گرادیان فشار طراحی و تولید کرد. این پمپ به گرادیان فشار توسعه یافته بین ورودی و خروجی کانال وابسته است. این روش گران و غیر قابل اطمینان بود. اخیراً ایده استفاده از نیروهای الکتروسینتیک (علم استفاده از برق برای حرکت) برای پمپ کردن سیالات در کانال‌های کوچک مورد بررسی قرار گرفته است. دو روش مهم برای پمپ کردن سیالات با استفاده از وسایل الکتروسینتیکی وجود دارد: الکترواسمز(حرکت یک سیال از بین یک غشا به دلیل تأثیر یک جریان الکتریکی) و الکتروفورز(حرکت ذرات معلق در مایع بوسیله یک میدان الکتریکی).

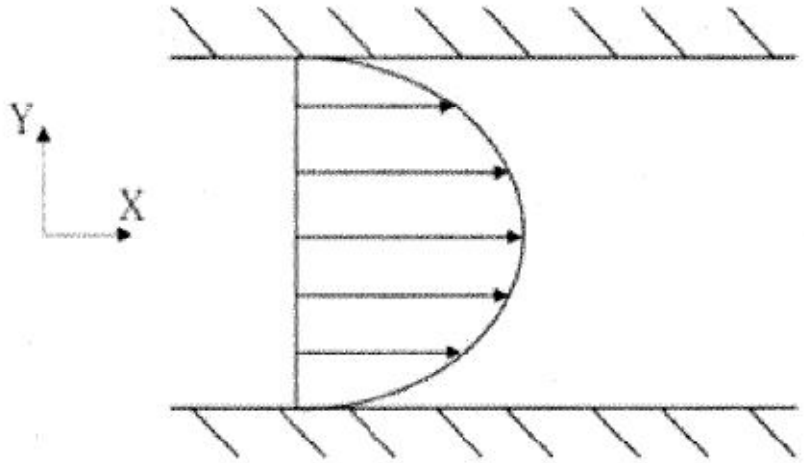
در جریان الکترواسمزی جریان بطور اساسی با تشکیل یک لایه الکتریکی دو گانه بین سطح کانال و محلول الکترولیت شروع می‌شود. معمولاً سطح کانال باردار شده است. یون‌ها از محلول الکترولیت به سمت دیوار باردار روبرو جابجا خواهند شد. با اعمال یک اختلاف پتانسیل در سرتاسر ورودی و خروجی کانال یونها به سمت الکترود باردار مقابل جریان خواهند یافت و این حرکت توسط نیروهای برشی به لایه‌های داخلی سیال منتقل می‌شود و بنابراین یک جریان ساخته می‌شود.

در جریان الکتروفورز، ذرات باردار در الکترودهای باردار مقابل هم جذب شده‌اند. حرکت آنها لایه‌های سیال را می‌کشد و بنابراین جریان به وجود می‌آید. گروه‌های زیادی از الکتروسینتیک برای بهره برداری جریان در میکروکانال استفاده کرده‌اند[10]. اثبات شده است که این روش به میدان پتانسیل زیادی برای عمل کردن احتیاج دارد و نسبتاً یک نرخ جریان پایینی به دست می‌آید.

از آنجایی که هیدرودینامیک مغناطیسی بر اساس ردوکس بسیار قابل اطمینان است، وسایلی که بر این اساس کار می‌کنند یکی از مهمترین وسایل برای پمپ کردن سیال در میکروکانال شده است. این روش به اجزاء محرک خارجی احتیاج ندارد و زیر یک ولتاژ پایین کار می‌کند.

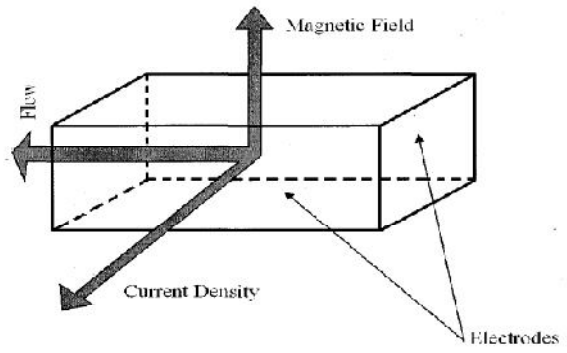
هیدرودینامیک مغناطیسی بر اساس ردوکس یک روشی است که به ایجاد نیروی پیش برنده لورنتز در داخل سیال وابسته است. این نیرو بین گرادیان فشار و نیروی ویسکوزیته داخل کانال تعادل ایجاد

خواهد کرد. پروفیل سرعت در جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس بر اساس فرض جریان توسعه یافته، دائم و غیر قابل تراکم سهمی است (شکل(1-1)).



شکل1-1: پروفیل سرعت در جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در میکروکانال‌ها

در این وسایل باید یک جفت الکترود برای ایجاد نیروی لورنتز در دیوارهای مقابل میکروکانال قرار داده شود. این الکترودها با یک میدان پتانسیل الکتریکی متصل شده‌اند. شار جریان بین دو الکترود آغاز خواهد شد. تعامل بین شار جریان و میدان مغناطیسی نیرویی خواهد ساخت که بر هر دو بردار عمود است. شکل (1-2) این نیرو را نشان می‌دهد. با به کار بردن قانون دست راست جهت جریان مشخص خواهد شد.



شکل 1-2: تعامل بین شار جریان و میدان مغناطیسی و جهت نیروی ایجاد شده.

پمپ کردن سیالات با این روش مزیت‌های منحصر به فردی دارد: یک روش ارزان است، به یک میدان پتانسیل پایین احتیاج دارد، به اجزاء متحرک نیاز ندارد، نرخ جریان جرمی بالایی را پمپ می‌کند، قابل اطمینان است، نیروی کمی را مصرف می‌کند و جریان به راحتی قابل کنترل است[13-11].

دو چالش برای جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس وجود دارد. یکی از آنها این است که وقتی ولتاژ زیادی به کار می‌رود جریان افزایش خواهد یافت. زمانی که در حضور یون‌ها جریان افزایش می‌یابد، عمل الکترولیز شروع خواهد شد و بنابراین حباب‌ها ایجاد می‌شوند که جریان آهسته خواهد شد. چالش دوم داشتن عمر کوتاه الکترودهاست، بنابراین باید در زمان مناسب تعویض شوند.

تاکنون میکروپمپهای زیادی که بر اساس هیدرودینامیک مغناطیسی کار می‌کنند طراحی و تولید شده اند. یانگ[14] یک میکروپمپ که با ولتاژ پایین کار می‌کرد را ساخته است. لموف[15] یک سنسور که برای کنترل فرایند پمپ کردن بر اساس هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس استفاده می‌شد را تولید نموده است.

میکروپمپ‌های که بر اساس هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس کار می‌کنند می‌توانند تحت هر دو جریان مستقیم (DC) و غیر مستقیم (AC) عمل کنند.

علاوه بر تولید، محققان زیادی برای ارائه یک مدل ریاضی برای جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در حضور گونه‌های ردوکس در میکروکانال‌ها تلاش کرده‌اند[16و17]. بائو و همکاران یکی از اساسی‌ترین تحقیقات مربوط به جریان هیدرودینامیک مغناطیسی با گونه‌های ردوکس را در سال 2005 انجام داده-اند[18]. آنها یک مدل دو بعدی در نظر گرفتند و به صورت عددی آن را حل کرده‌اند. مدل آنها شامل حل معادلات ناویر استوکس و نرست پلانک بود که به واسطه برهمکنش بین میدان جریان و میدان مغناطیسی، نیرویی به نام نیروی لورنتز به وجود آمده که باعث حرکت سیال می‌شود. قابل ذکر است که معادلات یاد شده به واسطه میدان جریان و سرعت با هم کوپل بوده و باید همزمان حل شوند. آنها توزیع غلظت ذرات مختلف، توزیع شار جریان و حرکت سیال در حضور و غیاب گرادیان فشار را محاسبه نمودند. آنها برای حل معادلات خود از نرم افزاری به نام فملب[1] که نام آن به کمسول[2] تغییر یافته است استفاده کردند. دو سال بعد شیزی و همکاران در یک تحقیق جدید همین جریان را در یک میکروکانال سه بعدی و با استفاده از نرم افزار یاد شده بررسی و نتایج آن را ارائه نموده‌اند[19]. نتایج مطالعات آنها تطابق بسیار مناسبی با نتایج تجربی داشت. آنها اثرات اختلاف ولتاژ بر سرعت متوسط و جریان را برای غلظتهای مختلف گونه‌ها مورد مطالعه قرار دادند. آنها دریافتند که در یک اختلاف ولتاژ با افزایش غلظت گونه‌ها جریان بیشتری در الکترولیت به وجود خواهد آمد.

1. FEMLAB
2. COMSOL

در سال 2010 کین و بائو[20] جریان هیدرودینامیک مغناطیسی بر اساس گونه‌های ردوکس را بررسی و با جریان فشاری مقایسه کرده‌اند. آنها تعادل بین جریان هیدرودینامیک مغناطیسی و جریان فشاری در شرایط معین و متفاوت و درون یک میکروکانال مستطیلی را بررسی و اثبات کردند. آنها در این تحقیق، پروفیل سرعت و کارآیی پمپ هیدرودینامیک مغناطیسی را بر اساس انتقال بار در محلول الکترولیت محاسبه نمودند. همچنین شرح دادند که چگونه از داده‌های در دسترس جریان فشاری می‌توان برای مطالعه جریان‌های هیدرودینامیک مغناطیسی متفاوت استفاده نمود.

یکی از جدیدترین تحقیقات در این زمینه توسط ایساک و همکاران[21] در سال 2011 انجام شده است. آنها جریان هیدرودینامیک مغناطیسی الکتروشیمیایی را به صورت گذرا و بر روی یک الکترود در یک سلول الکتروشیمیایی بررسی کردند. آنها در کار خود از مدل باتلر-ولمر برای شرایط مرزی استفاده نمودند و اثر فعل و انفعال نیروی لورنتز، جابجایی و پخش غلظت گونه‌های ردوکس را مطالعه نمودند. همچنین به مطالعه پارامترهایی همچون ثابت نرخ استاندارد، ویسکوزیته الکترولیت، شدت شار مغناطیسی و غلظت گونه‌های ردوکس و تأثیر آنها بر رفتار سیستم پرداختند.

1 - 3 - تحقیق حاضر

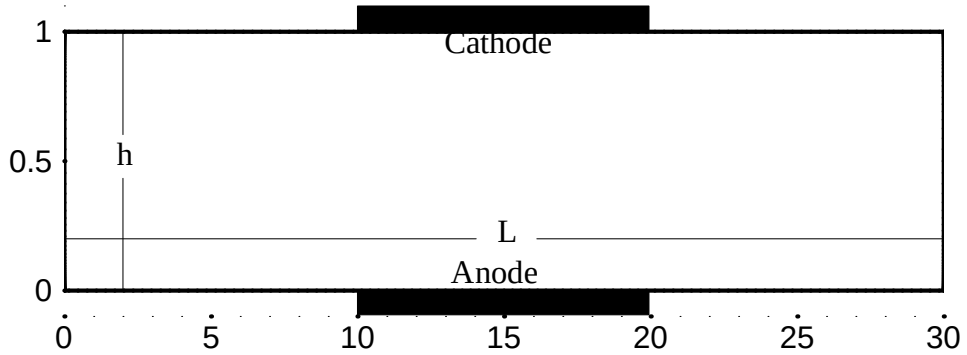
در این بخش هدف از انجام تحقیق حاضر بیان و سپس به طریقه انجام تحقیق و روش عددی به کار رفته پرداخته می‌شود.

1 - 3 - 1 - نوآوری، هدف و موضوع تحقیق

با توجه به اهمیت مبحث انتقال جرم در علوم بیولوژیکی و پزشکی و با توجه بر مرور انجام گرفته در متون علمی قابل دسترس، دیده شد که بحث انتقال جرم با استفاده از گونه‌های ردوکس و در حضور میدان مغناطیسی برای سیالات غیرنیوتنی که خون یک نمونه قابل توجه از این نوع سیالات است انجام نشده است. این روش فقط برای سیالات نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به گستره‌ی زیاد سیالات غیر نیوتنی و اهمیت انتقال آنها در مقیاس‌های کوچک و حساس، در تحقیق حاضر این روش برای سیالات غیر نیوتنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پروژه با استفاده از معادلات حاکم بر جریان که معادلات مومنتوم و معادله نرست پلانک هستند و با ساده سازی روابط و انجام تحلیل ابعادی، مکانیزم انتقال ذرات یعنی گونه‌های ردوکس، شار جریان بوجود آمده در اثر گرادیان غلظت و تاثیر آن بر معادله مومنتوم مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پس از تعیین معادلات دیفرانسیل حاکم بر مسأله و همچنین شرایط مرزی، کد کامپیوتری موجود که برای حل جابجائی آزاد داخل محفظه است، برای حل معادلات مورد نظر

اصلاح و آماده می‌گردد. پس از اطمینان از صحت عملکرد برنامه کامپیوتری، با اجرای برنامه برای حالتهای مختلف نتایج عددی بصورت خطوط جریان و خطوط غلظت ارائه و تاثیر ولتاژ الکترودها بر جریان و تاثیر اعداد بدون بعدی مانند عدد رینولدز و پکلت و شاخص سیال غیر نیوتنی بر میدان جریان و انتقال جرم مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در شکل (1-3) هندسهٔ مورد نظر نشان داده شده است. در این شکل طول و عرض میکروکانال و موقعیت الکترودها نشان داده شده است. شرایط مرزی مربوطه در فصل چهارم به طور مفصل توضیح داده می‌شود.



شکل 1-3: هندسه حل.

1 - 3 - 2 - روش انجام تحقیق

همانطور که ذکر شد، روش حل در این تحقیق، روش عددی می باشد. حل معادلات حاکم بر جریان در هندسه مورد نظر با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن انجام می گیرد. ابتدا یک شبکه غیریکنواخت از نقاطی که در نزدیکی دیواره‌ها دارای تمرکز بیشتری است بر میدان حل منطبق گردیده و سپس معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود (با انتگرال گیری بر روی شبکه منطبق شده) منفصل می‌شود. برای انفصال جملات جابجایی از طرح پیوندی استفاده می‌شود. جملهٔ مجهول فشار در معادلات مومنتوم نیز به کمک الگوریتم سیمپلر پاتنکار طوری محاسبه می‌شود که معادلهٔ پیوستگی ارضا شود. برای حل دستگاه معادلات جبری بدست آمده، از روش ضمنی خط به خط و الگوریتم توماس استفاده می‌شود. معیار همگرایی طوری انتخاب می شود که مجموع باقیمانده های مومنتوم در راستای محور X و مومنتوم در راستای محور y، و جرم کمتر از مقدار مورد نظر شود. برای جلوگیری از واگرایی از ضرایب زیر تخفیف مناسب استفاده می‌شود. انتخاب ضریب زیر تخفیف مناسب برای باقیمانده‌های انتقال جرم امری ضروری است. به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از کد کامپیوتری، برنامه برای

چند حالت مختلف که نتایج آن در متون قبلی بصورت عددی موجود می‌باشد، اجرا شده و نتایج مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

فصل دوم

توصیف هیدرودینامیک مغناطیسی

و کاربردهای آن

2 - 1 - مقدمه

هیدرودینامیک مغناطیسی (MHD) شاخه‌ای نسبتاً جدید ولی مهم از دینامیک سیالات می‌باشد. این مبحث با اثر متقابل سیالات هادی الکتریسته و میدانهای الکترومغناطیسی سرو کار دارد. زمانی که سیال هادی الکتریسیته در حضور میدان مغناطیسی حرکت می‌نماید، میدان الکتریکی و در نتیجه جریانی ممکن است ایجاد شود و اثر متقابل این جریان و میدان مغناطیسی باعث اعمال نیروی جسمی بر سیال می‌شود. این چنین تأثیرات در طبیعت و تجهیزات جدید ساخت بشر رخ می‌دهد. به عنوان مثال می‌توان جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در خورشید، داخل زمین، یونیسفر، ستارگان و اتمسفر آنها را ذکر نمود. در آزمایشگاه، بسیاری از دستگاه‌های جدید که اثرات هیدرودینامیک مغناطیسی در آن‌ها کاربرد مستقیم دارد از قبیل واحدهای رانش و مولدهای توان، یا دستگاههایی که درگیر تأثیرات متقابل سیال و میدان‌های الکترومغناطیسی هستند، مثل پرتو افکن، لوله‌های موج متحرک، تخلیه‌های الکتریکی و خیلی موارد دیگر ساخته شده‌اند.

در این بخش ابتدا توصیف مختصری از مبحث هیدرودینامیک مغناطیسی بیان می‌شود و پارامترهای مهم در این مبحث شناخته می‌شوند. تاریخچه‌ای مختصر از هیدرودینامیک مغناطیسی بیان می‌شود و سپس قوانین اصلی الکترودینامیک به طور خلاصه گفته شده و در پایان کاربردهایی از هیدرودینامیک مغناطیسی در بخش‌های مختلف بیان می‌شود. مطالب این بخش از مرجع [22] آورده شده است.

2 - 2 - هیدرودینامیک مغناطیسی چیست؟

امروزه در اکثر صنایع مهم، میدان‌های مغناطیسی بطو گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه، در صنعت تولید مواد، از این میدان‌ها به منظور گرمایش، پمپاژ، همزدن و شناورسازی فلزات مذاب و همچنین تضعیف جریان‌های جابجایی آزاد درون مذاب و همچنین تقویت جریان درون کانال‌ها با ابعاد کوچک و حتی ایجاد جریان درون میکروکانال‌ها استفاده می‌شود. در صنایع نظامی و صنعت هوا فضا، سیستم‌های رانش و پیشرانش هیدرودینامیک مغناطیسی بطور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. همچنین میدان‌های مغناطیسی در مرکز زمین که بواسطه حرکت سیالات در هسته زمین ایجاد می‌شود لکه‌ها و گدازه‌های خورشیدی که مربوط به میدان مغناطیسی خورشید می‌شوند و میدانهای