دانشکده مهندسی، گروه مکانیک، آزمایشگاه میکرو- نانوفلوئیدیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تجربی و عددی پدیده اختلاط در میکرومیکسرها

نگارش:

سید علی کاظمی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

استاد راهنما:

دکتر محمد پسندیده‌فرد

شهریور ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به:

پدر عزیزم

و روان شاد مادرم

که همواره بهترین مشوق من در تمام دوران تحصیلم بوده اند.

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: سید علی کاظمی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر محمد پسندیده فرد امضاء تاریخ

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

پایان‌نامه حاضر تحت عنوان:

بررسی تجربی و عددی پدیده اختلاط در میکرومیکسرها

که توسط آقای **سید علی کاظمی** تهیه و به هیات داوران ارائه گردیده است به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته در گرایش تبدیل انرژی، مورد تایید کمیته تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی, دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: ۱۳۹۱/۰۶/۲۹ نمره : ۲۰ درجهٔ ارزشیابی: عالی

اعضای هیات داوران:

نام و نام‌خانوادگی	هیات داوران	مرتبه علمی	امضاء
دکتر محمد پسندیده‌فرد	استاد راهنما	دانشیار	
دکتر حمید نیازمند	استاد دفاع	دانشیار	
دکتر محسن کهرم	استاد دفاع	استاد	
دکتر حمید نیازمند	نماینده تحصیلات تکمیلی	دانشیار	

تشکر و قدردانی

اکنون که به یاری پروردگار و عنایت عالمانه و پر مهر اساتید گرانقدر، توفیق نگارش این پایان نامه به دست آمده است، فرصت را مغتنم شمرده و سپاس قلبی و بی پایان خود را از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد پسندیده فرد به خاطر راهنمایی‌های دلسوزانه و مدبرانه برای انجام این پژوهش ابراز می‌دارم.

تشکر ویژه‌ای از تک تک اعضای خانواده عزیزم دارم که با حمایت‌های بی دریغ و دلسوزانه خویش نقش عمده‌ای در به ثمر رساندن این پژوهش ایفا نمودند.

همچنین بر خود لازم می‌دانم از تمامی دوستان عزیزم که بنده را در انجام این پژوهش یاری نموده اند تقدیر و تشکر نمایم.

فرم چکیده پایان‌نامه تحصیلی دوره تحصیلات تکمیلی **دفتر مدیریت تحصیلات تکمیلی**

نام خانوادگی دانشجو: **کاظمی** نام: **سید علی**

استاد راهنما: **دکتر محمد پسندیده فرد**

دانشکده: **مهندسی** رشته: **مکانیک** گرایش: **تبدیل انرژی** مقطع: **کارشناسی ارشد**

تاریخ دفاع: **شهریورماه** ۱۳۹۱ تعداد صفحات: ۱۴۸

عنوان پایان‌نامه: بررسی تجربی و عددی پدیده اختلاط در میکرومیکسرها

واژه‌های کلیدی: میکرومیکسر غیرفعال، جابجایی نامنظم، پردازش تصویر، پدیده انگلفمنت

چکیده:

همگام با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی طراحی و ساخت قطعات در ابعاد میکرون، وسایلی با قابلیت انتقال سیال در ابعاد خیلی کوچک طراحی و ساخته شده است که امروزه از آنها تحت عنوان وسایل میکروفلوئیدیک یاد می‌شود. میکرومیکسر و پروسه اختلاط در آن به عنوان یکی از بخش‌های مهم و اساسی سیستم‌های میکروفلوئیدیک محسوب شده و دارای کاربردهای بسیاری در عرصه‌های متفاوت شیمی، بیو شیمی، پزشکی و داروسازی می‌باشد. به خاطر ضریب نفوذ پایین مایعات، اختلاط کامل در ابعاد کوچک به آسانی امکان‌پذیر نمی‌باشد؛ علاوه بر آن، در هندسه‌های کوچک اثرات لزجتی سیال غالب می‌باشد و اساساً رژیم جریان در ناحیه آرام باقی می‌ماند. بنابراین، در غیاب جریان درهم که مؤثرترین مکانیزم اختلاط در ابعاد بزرگ محسوب می‌شود، بهترین روشِ اختلاط در ابعاد کوچک، کاهش طول نفوذ مولکولی است که عمدتاً با تغییر هندسه مجرا به وجود می‌آید. طرح-های بسیار متنوعی در این زمینه، در سال‌های اخیر گزارش شده است. در این پژوهش، به بررسی تجربی و عددی پدیده اختلاط در میکرومیکسر T شکل با هندسه‌های مختلف پرداخته شده است.

به منظور بررسی تجربی پدیده اختلاط، یک دستگاه آزمایش متشکل از سیستم تأمین دبی و فشار مورد نیاز برای جریان سیال، طراحی و به کار گرفته شده است. همچنین، مدل‌های مختلف میکرومیکسر در ابعاد متفاوت توسط برش لیزر دی‌اکسیدِ کربن روی صفحات شفاف پلیمری ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته اند. جهت استخراج داده‌های مورد نیاز از سیستم، روش عکس‌برداری به همراه پردازش تصویر به کار گرفته شده است. برای این منظور، یک برنامه با استفاده از جعبه‌ابزار پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب، برای هندسه‌های مختلف و با ابعاد هندسی گوناگون، نوشته شده است. میکرومیکسر T شکل ساده، و سه مدل میکرومیکسر T شکل با کانال‌هایی به شکل مربعی، مارپیچ و زیگزاگ در آزمایش‌های تجربی مقایسه شده اند. نتایج هر سه مدل اشاره شده دارای راندمان اختلاط بالاتری نسبت به مدل T شکل ساده هستند و در این بین مدل مربعی بالاترین راندمان اختلاط را دارا می‌باشد.

جهت شبیه‌سازی عددی فرآیند اختلاط درون میکرومیکسرها به صورت گذرا، برنامه‌ای در مختصات دوبعدی و استوانه‌ای با قابلیت حل معادلات ناویر ـ استوکس برای جریان سیال تراکم‌ناپذیر، توسعه داده شده است. به علاوه، برای بررسی پدیده‌ی اختلاط، معادله جابجایی ـ پخش گونه به برنامه موجود اضافه شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در اعداد رینولدز پایین، مطابقت خوبی بین نتایج وجود داشت اما مشخص شد که در اعداد رینولدز بالا، این پدیده باید به صورت سه‌بعدی شبیه سازی شود. بنابراین، جهت شبیه‌سازی سه‌بعدی و مقایسه با نتایج تجربی، نرم‌افزار فلوئنت مورد استفاده قرار گرفته است که نتایج حاصله دارای مطابقت خوبی با نتایج تجربی می‌باشند. همچنین با استفاده از کد عددی توسعه یافته، پدیده اختلاط در کانال T شکلِ دارای موانع مورد بررسی قرار گرفته و یک میکرومیکسر متقارن محوری جدید ارائه شده است که به طور قابل ملاحظه‌ای راندمان اختلاط بالاتری نسبت به مدل T شکل ساده دارد.

امضای استاد راهنما

فهرست

عنوان صفحه

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مطالعه‌ای مختصر روی پدیده اختلاط ۳

۱-۲-۱ اختلاط و کاربردهای آن ۳

۱-۳ کاربردهای اختلاط در ابعاد میکرو ۴

۱-۳-۱ میکروفلوئیدیک و نیازهای اختلاط در ابعاد میکرو ۴

۱-۳-۲ اهمیت اختلاط در ابعاد میکرو ۵

۱-۴ فرآیند اختلاط در ابعاد کوچک ۶

۱-۵ طبقه بندی میکرومیکسرها ۸

۱-۵-۱ میکرومیکسرهای فعال ۸

۱-۵-۲ میکرومیکسرهای غیرفعال ۱۰

۱-۶ میکرومیکسرهای غیر فعال و پدیده نفوذ مولکولی ۱۰

۱-۷ میکرومیکسرهای غیرفعال و پدیده جابجایی نامنظم ۱۳

۱-۷-۱ میکرومیکسرهای جابجایی نامنظم در اعداد رینولدز پایین ۱۴

۱-۷-۲ میکرومیکسرهای جابجایی نامنظم در اعداد رینولدز متوسط و بالا ۱۶

۱-۸ دورنمای این پایان‌نامه ۲۱

فصل دوم: روش تجربی ۲۶

۲-۱ مقدمه ۲۶

۲-۲ مراحل ساخت ۲۷

۲-۲-۱ مواد مصرفی ۲۷

۲-۲-۲ روش ساخت ۲۷

۲-۳ ابعاد هندسی طرح‌ها ۲۹
۲-۴ فرآیند آزمایش ۳۲
۲-۴-۱ سیستم جریان و تنظیم دبی ۳۲
۲-۴-۲ روش جمع‌آوری داده‌ها ۳۶
۲-۵ شیوه‌های توصیف کیفیت اختلاط ۴۰
۲-۵-۱ روش‌های محاسباتی ۴۰
۲-۵-۲ روش‌های آزمایشگاهی ۴۱
۲-۶ روش پردازش تصاویر ۴۴
فصل سوم: روش عددی و معادلات حاکم ۵۰
۳-۱ مقدمه ۵۰
۳-۲ فرضیات و معادلات حاکم ۵۱
۳-۲-۱ فرضیات ۵۱
۳-۲-۲ معادلات حاکم ۵۱
۳-۳ شرایط مرزی جریان ۵۳
۳-۴ روش مدل‌سازی عددی ۵۴
۳-۵ مدل‌سازی انتقال جرم ۵۷
۳-۵-۱ معادله جابجایی- پخش گونه ۵۷
۳-۵-۲ شرایط مرزی ۵۷
۳-۶ روش عددی و گسسته سازی معادلهٔ جابجایی- پخش گونه ۵۸
۳-۷ ملاحظات پایداری ۶۱
۳-۸ شبیه‌سازی سه‌بعدی پدیده اختلاط ۶۱
فصل چهارم: ارائه نتایج ۶۴
۴-۱ مقدمه ۶۴
۴-۲ بررسی پدیده اختلاط در میکرومیکسر T شکل ساده ۶۵

۴-۲-۱ بررسی تجربی ۶۵
۴-۲-۲ رژیم‌های جریانِ آرام درون میکرومیکسرها ۷۱
۴-۲-۳ عدد مشخصه جریان در میکرومیکسرها ۷۴
۴-۲-۳-۱ عدد مشخصه در بررسی تجربی اختلاط در کانال Tشکل ساده ۷۵
۴-۲-۴ پارامترهای بدون بعد مهم در اختلاط ۷۶
۴-۲-۵ محاسبه ضریب نفوذ دو جزئی مایعات ۷۶
۴-۲-۶ شبیه‌سازی عددی ۷۸
۴-۲-۶-۱ اعتبار سنجی نتایج عددی ۷۸
۴-۲-۷ مقایسه نتایج تجربی با نتایج عددی ۸۱
۴-۲-۸ شبیه‌سازی سه بعدی پدیده اختلاط درون کانال T شکل ۸۱
۴-۳ بررسی تجربی اختلاط درون کانال‌های دارای تغییر شکل هندسی ۸۵
۴-۳-۱ نتایج تجربی ۸۶
۴-۳-۱-۱ کانال مربعی ۸۶
۴-۳-۱-۲ کانال زیگزاگ و مارپیچ ۸۹
۴-۳-۲ نتایج شبیه سازی سه بعدی ۹۲
۴-۳-۲-۱ بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی ۹۲
۴-۳-۲-۲ نتایج عددی ۹۵
۴-۳-۳ مقایسه نتایج تجربی و عددی ۹۷
۴-۴ شبیه‌سازی پدیده اختلاط با ایجاد موانع روی دیواره کانال ۱۰۸
۴-۴-۱ شبیه‌سازی دوبعدی ۱۰۸
۴-۴-۱-۱ تأثیر پارامترهای هندسی روی طول اختلاط ۱۱۰
۴-۴-۱-۲ بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی ۱۱۲
۴-۴-۲ مدل تقارن محوری ۱۱۲

فصل پنجم: جمع بندی و پیشنهاد کار برای آینده ۱۱۶

۵-۱ جمع‌بندی ۱۱۶
۵-۲ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۱۱۷

مراجع **۱۲۱**

پیوست **۱۲۶**

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ نمایی از یک آزمایشگاه روی تراشه [۷] ۵

شکل ۱-۲ الف) میکرومیکسر فعال با تحریک کننده PZT [۱۶]، ب)میکرومیکسر فعال الکتروهیدرودینامیکی [۱۷]، ج) میکرومیکسر فعال مغناطیسی [۱۸] ، د) میکرومیکسر فعال با پرتوربیشن فشاری [۱۹] ۹

شکل ۱-۳ الف) نمونه‌ای از یک میکرومیکسر Y شکل ب) میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی [۲۲] ۱۱

شکل ۱-۴ میکرومیکسر غیر فعال مدور دارای خاصیت خودگردشی جریان همراه با هشت مجرای ورودی [۲۳] ۱۲

شکل ۱-۵ میکرومیکسر غیر فعال ترکیب مجدد (SAR) [۲۴] ۱۲

شکل ۱-۶ نمونه‌ای از میکرومیکسر جابجایی نامنظم در اعداد رینولدز پایین الف) میکرومیکسر ساخته شده با کانال‌های متقاطع ب) میکرومیکسر ساخته شده با کانال‌های مارپیچ [۲۹] ۱۴

شکل ۱-۷ نمونه‌ای از یک میکرومیکسر SHM [۳۱] ۱۵

شکل ۱-۸ الف) ایجاد جابجایی نامنظم درون قطره در کانال خمیده ب)چگونگی تغییر گردابه‌های داخلی در مجرا [۳۲] ۱۶

شکل ۱-۹ میکرومیکسر غیرفعال با استفاده از موانع الف) در مسیر جریان [۳۳] ب) روی دیواره کانال [۱۴] ۱۷

شکل ۱-۱۰ ایجاد جریان ثانویه عرضی در کانال‌های دارای انحنا ۱۸

شکل ۱-۱۱ نمایی از یک میکرومیکسر غیرفعال مارپیچ سه‌بعدی [۳۶] ۱۹

شکل ۱-۱۲ الف) مجرای ساده ب) موانع دایره‌ای در مسیر جریان ج) انبساط و انقباض کانال د) کانال زیگزاگ [۳۷] ۱۹

شکل ۱-۱۳ نمودار راندمان اختلاط بر حسب طول‌کانال در طرح‌های مورد بررسی توسط ژئون و همکاران [۳۷] ۲۰

شکل ۱-۱۴ اثر کواندا در میکرومیکسر به‌شکل تسلا [۳۸] ۲۱

شکل ۲-۱ نمایی از دستگاه برش لیزر دی‌اکسید کربن مورد استفاده در این تحقیق ۲۸

شکل ۲-۲ الف) سه لایه مختلف تشکیل‌دهنده هر طرح میکرومیکسر ب) طرح نهایی پس از چسباندن صفحات به هم ۲۹

شکل ۲-۳ پارامترهای هندسی طرح ۳۰

شکل ۲-۴ ابعاد هندسی و نمای شماتیک مدل‌های مورد استفاده در بررسیِ تجربی الف) مربعی ب) زیگزاگ ج) مارپیچ ۳۱

شکل ۲-۵ دو مخزن حاوی محلول رنگی جهت تأمین دبی و فشار مورد نیاز داخل مجرای میکرومیکسر ۳۳

شکل ۲-۶ نمایی از سیستم جریان و شیرآلات مورد استفاده در آن ۳۴

شکل ۲-۷ نمایی نزدیک از شیرآلات مورد استفاده در آزمایش‌ها به همراه شاخص استفاده شده در زیر هر شیر به عنوان یکی از معیارهای سنجش دبی یکسان ۳۴

شکل ۲-۸ استوانه‌های مدرج مورد استفاده به منظور اندازه‌گیری دبی جریان ۳۵

شکل ۲-۹ مقادیر زمانی اندازه‌گیری شده توسط زمان‌سنج دیجیتال به منظور محاسبه دبی ۳۵

شکل ۲-۱۰ نمایی از سیستم اولیه نورپردازی مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها ۳۷

شکل ۲-۱۱ نمایی از محافظ چوبی ساخته شده جهت ثابت ماندن موقعیت افقی کانال‌ها و همچنین مورد استفاده جهت قرارگیری سیستم نورپردازی روی‌آن ۳۷

شکل ۲-۱۲نمایی از سیستم نورپردازی نهایی مورد استفاده در آزمایش‌ها ۳۸

شکل ۲-۱۳ نمایی از پایه استاندارد دوربین جهت ایجاد شرایط ثابت در آزمایش‌ها ۳۸

شکل ۲-۱۴ نمایی کلی از سیستم مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های مختلف ۳۹

شکل ۲-۱۵ استفاده از دو محلول رنگی به منظور بررسی کیفیت اختلاط دو ماده به روش پردازش تصاویر[۴۲] ۴۱
شکل ۲-۱۶ استفاده از واکنشهای شیمیایی به منظور مقایسه میزان اختلاط الف) کانال مستقیم ب) کانال همراه با جریان جابجایی نامنظم [۴۴] ۴۲
شکل ۲-۱۷ تصویر گرفته شده الف) قبل از پردازش تصویر ب) بعد از مرحله تقطیع ۴۴
شکل ۲-۱۸ الف) جداسازی کانال جریان از تصویر زمینه ب) کاهش نویز تصویر ج) کاهش قسمتهای زاید تصویر د) تبدیل سطوح خاکستری به فضای رنگی ۴۶
شکل ۲-۱۹ الف) نمودار هیستوگرام در ابتدای لوله(CR) ب) نمودار هیستوگرام شدت رنگ در انتهای لوله (CR) ۴۷
شکل ۲-۲۰ تست اولیه رنگ جهت نرمال کردن مقادیر شدت رنگ بین صفر و یک ۴۷
شکل ۲-۲۱نمودار راندمان اختلاط برحسب تعداد پیکسل‌ها در طول کانال با استفاده از صفحه رنگ CR در اختلاطِ کامل .. ۴۸
شکل ۳-۱ الف) نمایی از یک شبکه جابجاشده در دو امتداد X و Y ب) محل محاسبه سرعت‌ها و مقادیر فشار و نسبت حجمی سیال در شبکه‌بندی جابه‌جا شده ۵۵
شکل ۳-۲ نمونه‌ای از حجم کنترل برای گسسته‌سازی معادله جابجایی- پخش گونه ۵۸
شکل ۴-۱ ابعاد هندسی میکرومیکسر مورد استفاده در بررسی تجربی ۶۵
شکل ۴-۲ شاخص استفاده شده در طرح میکرومیکسر به عنوان یکی از معیارهای سنجش دبی یکسان ۶۶
شکل ۴-۳ نتایج تجربی پدیده اختلاط در میکرومیکسر Tشکل ساده الف)Re=۲ ب) Re=۵ ج) Re=۱۰ ..... ۶۶
شکل ۴-۴ نتایج حاصل از پردازش تصاویر توسط نرم‌افزار متلب در تحقیق صورت گرفته در دانشگاه مالزی [۵۲] ۶۷
شکل ۴-۵ نمودار راندمان اختلاط برحسب تعداد پیکسل در امتداد کانال (Re = ۲) در صفحه رنگ CB ۶۸
شکل ۴-۶ نمودار راندمان اختلاط برحسب تعداد پیکسل در امتداد کانال (Re = ۲) در صفحه رنگ CR ۶۸
شکل ۴-۷ نتیجه تجربی پدیده اختلاط در میکرومیکسر T شکل ساده برای عدد رینولدز ۴۰۰ ..... ۶۹
شکل ۴-۸ نمودار راندمان اختلاط برحسب تعداد پیکسل‌ها در طول کانال با استفاده از صفحه رنگ CR در Re= ۴۰۰ ..... ۷۰
شکل ۴-۹ نمودار راندمان اختلاط برحسب طول کانال(mm) با استفاده از صفحه رنگ CR در Re= ۴۰۰ ..... ۷۰
شکل ۴-۱۰ نمودار راندمان اختلاط برحسب عدد رینولدز جریان [۵۴] ۷۱
شکل ۴-۱۱ خطوط جریان در ۳رژیم جریان آرام درون میکرومیکسر الف) ناحیه اول ب) ناحیه دوم ج) ناحیه سوم [۵۴] ۷۲
شکل ۴-۱۲ نتایج حاصل از بررسی تجربی الف) ناحیه جریان لایه‌ای آرام (Re = ۵) ب) ناحیه گردابه‌ای (Re = ۶۰) ج) ناحیه جریان انگلفمنت (Re = ۱۵۰) ۷۳
شکل ۴-۱۳نمودار راندمان اختلاط بر حسب عدد رینولدز مربوط به داده‌های تجربی ۷۳
شکل ۴-۱۴ ابعاد هندسی کانال T شکل ساده به منظور شبیه‌سازی عددی [۵۴] ۷۸
شکل ۴-۱۵ توزیع غلظت گونه‌ها در شبیه‌سازی عددی توسط برنامه دوبعدی نوشته شده الف) Re = ۳ ب) Re = ۱۲ ج) Re = ۳۰ د) Re = ۸۰ ه) Re = ۱۰۰ و) Re = ۱۲۰ ..... ۷۹
شکل ۴-۱۶ خطوط مسیر در مجرا الف) Re = ۳۰ ب) Re = ۱۵۰ ..... ۸۰
شکل ۴-۱۷ مقایسه نتایج عددی دوبعدی با نتایج سلیمانی و همکاران [۵۴] ۸۰
شکل ۴-۱۸ مقایسه کیفی نتایج تجربی و عددی در Re = ۲ الف) نتیجه تجربی در ابتدای کانال اختلاط ب) نتیجه تجربی در انتهای کانال اختلاط ج) نتیجه عددی در ابتدای کانال اختلاط د) نتیجه عددی در انتهای کانال اختلاط ۸۱

شکل ۴-۱۹ ابعاد هندسی و صفحات مورد استفاده در شبیه سازی سه‌بعدی اختلاط درون کانال T شکل ساده [۵۵]..... ۸۲
شکل ۴-۲۰ توزیع غلظت گونه‌ها در مقاطع مختلف الف) جریان لایه‌ای آرام ب) جریان گردابه‌ای ج) جریان انگلفمنت..... ۸۳
شکل ۴-۲۱ خطوط جریان در مقطع ورودی کانالِ اختلاط در صفحه x-z..... ۸۴
شکل ۴-۲۲ توزیع غلظت گونه‌ها در مقطع y = -۱۵۰ µm..... ۸۴
شکل ۴-۲۳ خطوط جریان در صفحه x-y در ورودی کانال اختلاط درون کانال T شکل..... ۸۴
شکل ۴-۲۴ مقایسه تکرار پذیری نتایج در آزمایش‌ها..... ۸۶
شکل ۴-۲۵ نتایج تجربی اختلاط در کانال مربعی در رینولدزهای متفاوت الف) Re = ۱ ب) Re = ۳ ج) Re = ۱۲ د) Re = ۲۸ ه) Re = ۴۵ و) Re = ۷۸..... ۸۸
شکل ۴-۲۶ پدیده نفوذ مولکولی در جریان خزشی درون کانال به شکل زیگزاگ..... ۸۹
شکل ۴-۲۷ بررسی صحت و تکرار پذیری آزمایش‌ها در محلولهای رنگی متفاوت..... ۸۹
شکل ۴-۲۸ نتایج تجربی اختلاط در کانال زیگزاگ در رینولدزهای متفاوت الف Re = ۵ ب) Re = ۲۳ ج) Re = ۳۰ د) Re = ۴۷ ه) Re = ۸۶ و) Re = ۱۲۴..... ۹۰
شکل ۴-۲۹ نتایج تجربی اختلاط در کانال مارپیچ در رینولدزهای متفاوت الف Re = ۳ ب) Re = ۱۰ ج) Re = ۲۳ د) Re = ۳۸ ه) Re = ۱۰۰ و) Re = ۱۴۵..... ۹۱
شکل ۴-۳۰ نمایی از هندسه‌های شبکه بندی شده مورد بررسی در شبیه سازی سه‌بعدی..... ۹۳
شکل ۴-۳۱ راندمان اختلاط بر حسب طول در کانال مربعی به ازای مقادیر متفاوت گره در سطح مقطع عرضی کانال..... ۹۴
شکل ۴-۳۲ بزرگی سرعت در مقطع عرضی y = ۵ mm درون کانال اختلاط به ازای تعداد گره‌های متفاوت..... ۹۴
شکل ۴-۳۳ توزیع غلظت گونه‌ها در عدد رینولدز ۱۰ الف) مدل مربعی ب) مدل کانال T شکل ساده..... ۹۵
شکل ۴-۳۴ توزیع کسر جرمی گونه‌ها حاصل از شبیه‌سازی سه‌بعدی درون کانال مارپیچ به ازای رینولدزهای متفاوت الف) Re = ۲ ب) Re = ۱۸ ج) Re = ۴۵ د) Re = ۷۸..... ۹۶
شکل ۴-۳۵ مقایسه نتایج تجربی و عددی اختلاط درون کانال مربعی در رینولدز ۷۰ الف) نتایج تجربی ب) نتایج عددی..... ۹۷
شکل ۴-۳۶ مقایسه تجربی و عددی اختلاط درون کانال زیگزاگ در عدد رینولدز ۵ الف) مدل تجربی ب) مدل عددی..... ۹۸
شکل ۴-۳۷ توزیع کسر جرمی گونه‌ها در عدد رینولدز ۷ در کانال الف) زیگزاگ ب) مارپیچ ج) مربعی..... ۹۹
شکل ۴-۳۸ نمودار راندمان اختلاط بر حسب طول کانال در Re = ۷..... ۹۹
شکل ۴-۳۹ نتایج تجربی اختلاط در عدد رینولدز ۷..... ۱۰۰
شکل ۴-۴۰ توزیع غلظت گونه‌ها در ۳ مدلِ مورد بررسی در رینولدز ۲۸ برای صفحات میانی در امتداد عمق کانال..... ۱۰۱
شکل ۴-۴۱ نمودار راندمان اختلاط بر حسب طول کانال در عدد رینولدز ۲۸..... ۱۰۱
شکل ۴-۴۲ توزیع کسر جرمی گونه‌ها در صفحات مختلف در عمق کانال الف) z = ۰ ب) z = ۰/۵ ج) z = ۱..... ۱۰۲
شکل ۴-۴۳ توزیع کسر جرمی گونه‌ها در عدد رینولدز ۴۵ الف) مدل مارپیچ ب) مدل زیگزاگ ج) مدل مربعی..... ۱۰۳
شکل ۴-۴۴ نمودار راندمان اختلاط بر حسب طول کانال در عدد رینولدز ۴۵..... ۱۰۳
شکل ۴-۴۵ بردارهای سرعت درون کانال زیگزاگ [۶۰]..... ۱۰۴
شکل ۴-۴۶ بردارهای سرعت و نواحی چرخش جریان در شبیه‌سازی انجام شده در پژوهش حاضر (Re = ۷۸)..... ۱۰۴
شکل ۴-۴۷ مقایسه نتایج تجربی اختلاط درون کانال زیگزاگ الف) Re = ۴۵ ب) Re = ۷۸..... ۱۰۵
شکل ۴-۴۸ نتایج عددی اختلاط در رینولدز ۷۸..... ۱۰۵

شکل ۴-۴۹ نمودار راندمان اختلاط بر حسب طول در رینولدز ۷۸ ..... ۱۰۶
شکل ۴-۵۰ مقایسه نتایج تجربی و عددی اختلاط درون میکرومیکسرهای مربعی، مارپیچ و زیگزاگ ۱۰۶
شکل ۴-۵۱ نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز در سه مدل مربعی، مارپیچ و زیگزاگ ۱۰۷
شکل ۴-۵۲ نمایی شماتیک از کانال T شکل دارای موانع، مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی دوبعدی ۱۰۸
شکل ۴-۵۳ نتایج شبیه‌سازی دوبعدی یک مدل گذرا از انتقال گونه‌ها در طی فرآیند اختلاط در میکرومیکسر T شکلِ دارای موانع در عدد رینولدز ۳۰ ..... ۱۰۹
شکل ۴-۵۴ بررسی اثر تغییر فاصله موانع روی طول اختلاط الف) S = ۴۰۰ µm ب) S = ۶۰۰ µm ج) S = ۸۰۰ µm د) S = ۱۰۰۰ µm ۱۱۱
شکل ۴-۵۵ بررسی اثر ارتفاع موانع روی طول اختلاط الف) H = ۰ µm ب) H = ۱۰۰ µm ج) H =۲۰۰ µm ۱۱۱
شکل ۴-۵۶ بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی برای نتایج حاصل از برنامه عددی دوبعدی ۱۱۲
شکل ۴-۵۷ نمایی شماتیک از میکرومیکسر متقارن محوری دارای موانع ۱۱۳
شکل ۴-۵۸ توزیع غلظت گونه‌ها در میکرومیکسر متقارن محوری الف) بدون موانع ب) دارای موانع ۱۱۳
شکل ۴-۵۹ نمودار تغییرات راندمان اختلاط بر حسب تغییر ارتفاع موانع ۱۱۴
شکل ۴-۶۰ نمودار تغییرات راندمان اختلاط بر حسب طول به ازای فواصل متفاوت موانع ۱۱۴
شکل ۵-۱ بررسی عددی اثر تزریق قطرات مایع به مخلوط گازی ۱۱۹
شکل ۵-۲ مقایسه کمی نتایج راندمان اختلاط برحسب طول کانال در دو مدل عددی ارائه شده به منظور افزایش راندمان اختلاط در میکرومیکسر T شکل ساده ۱۱۹

فهرست نمادها

مساحت(m^2)	A
غلظت گونه (mol/m^3)	C
ضریب نفوذ مولکولی بین دو گونه (m^2/s)	D
عدد بدون بُعد دین (Dean)	De
طول مشخصه/قطر هیدرولیکی (m)	D_h
نیروهای حجمی (N)	$\vec{F}_b$
شدت جدایش (Intensity of Segregation)	I_d
شار جرم (پخشی) بر واحد سطح ($mol/m^2.s$)	J
عدد بدون بُعد نشان‌دهنده رژیم جریان در داخل میکرومیکسر	K
جرم مولکولی (kg/kmol)	M
شاخص اختلاط (Mixing Index)	MI
فشار (Pa)	P
عدد بدون بُعد پِکلِت (Péclet)	Pe
دبی حجمی جریان (m^3/s)	Q
نرخ واکنش در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه)	R
عدد بدون بُعد رینولدز (Reynolds)	Re
عدد بدون بُعد اشمیت (Schmidt)	Sc
دما (K)	T
سرعت متوسط (m/s)	$\bar{V}$
بردار سرعت (m/s)	$\vec{V}$
بردار سرعت میانی پس از مرحله اول روش تجزیه دومرحله‌ای (m/s)	$\vec{\tilde{V}}$
نسبت حجمی سیال	f
شتاب جاذبه (m/s^2)	$\vec{g}$
بردار عمود بر سطح	$\hat{n}$
تابع پله بر اساس شار سرعت در جهت افقی $\boldsymbol{x}$	s_u
تابع پله بر اساس شار سرعت در جهت عمودی $\boldsymbol{y}$	s_v
زمان (s)	t
بردار مماس با سطح	$\hat{t}$
مؤلفه افقی سرعت در جهت $\boldsymbol{x}$ (m/s)	u
مؤلفه عمودی سرعت در جهت $\boldsymbol{y}$ (m/s)	v

تانسور نرخ کرنش	$\vec{z}$

نمادهای یونانی

نشانگر تغییرات پارامتر	Δ
اندازه گام زمانی (s)	Δt
اندازه گام مکانی در جهت افقی $\boldsymbol{x}$	Δx
اندازه گام مکانی در جهت عمودی $\boldsymbol{y}$	Δy
پارامتر موجود در گسسته‌سازی جملات جابجایی	α
ضریب نفوذ برای فازهای گاز و مایع (m^2/s)	D_g, D_l
نشانگر نوع مختصات (متقارن محوری یا دوبعدی)	δ
انحنای سطح	κ
ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)	μ
ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s)	ν
چگالی (kg/m^3)	ρ
ضریب کشش سطحی (N/m)	σ
تانسور تنش	$\vec{\tau}$
ضریب هم‌پیوندی	φ
حجم مولی در نقطه جوش معمولی ($m^3/kmol$)	ϑ
حجم (m^3)	$\forall$

زیرنویس‌ها

سطح سمت چپ حجم کنترل	$(\ )_L$
سطح سمت راست حجم کنترل	$(\ )_R$
فاز گاز	$(\ )_g$
جهت افقی $\boldsymbol{x}$	$(\ )_i$
جهت عمودی $\boldsymbol{y}$	$(\ )_j$
فاز مایع	$(\ )_l$
مقدار ماکزیمم	$(\ )_{max}$
مقدار مینیمُم	$(\ )_{min}$
نشانگر عمود بر سطح/دیواره	$(\ )_\perp$
نشانگر مماس با سطح/دیواره	$(\ )_\parallel$

بالانویس‌ها

نشانگر گام زمانی قبل در روش عددی	$(\ \ )^{n}$
نشانگر روش ون‌لیر	$(\ \ )^{vl}$

عملگرها

مشتق معمولی	$\frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}$
مشتق جزیی	$\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}$
عملگر دِلتا	$\vec{\nabla}$

نمادهای اختصاری

ترم‌های مربوط به جریان متقارن محوری در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه)	CYL
ترم پخش در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه) در جهت افقی $\boldsymbol{x}$	$DCDXSQ$
ترم پخش در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه) در جهت عمودی $\boldsymbol{y}$	$DCDYSQ$
ترم جابجایی در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه) در جهت افقی $\boldsymbol{x}$	FCX
ترم جابجایی در معادله انتقال جرم گونه‌ها (معادله جابجایی پخش گونه) در جهت عمودی $\boldsymbol{y}$	FCY
یکی از فضاهای رنگ در نرم‌افزار متلب	HSI
مقدار ماکزیمم	max
ماده پلیمری (Poly-methyl-methacrylate)	PMMA
فضای رنگ قرمز-سبز-آبی (Red-Green-Blue)	RGB
ترکیب مجدد (Split and Recombine)	SAR
میکرومیکسر (Staggered herringbone micro-mixer)	SHM
یکی از فضاهای رنگ در نرم‌افزار متلب	YCBCR

فصل اول: مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

تکنولوژی میکروفلوئیدیک[1] موسوم به جریان در ریزمجراها[2] به خاطر کاربردهای گسترده در سیستم‌های زیستی[3] و شیمیایی، در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است. یک موضوع مهم در این بخش، چگونگی اختلاط سیال‌ها در مقیاس‌های بسیار کوچک می‌باشد. در هندسه‌های کوچک، اثرات لزجتی سیال غالب می‌باشد و اساساً رژیم جریان در ناحیه آرام باقی می‌ماند؛ بنابراین در غیاب اغتشاش[4]، اختلاط سیال تماماً وابسته به نفوذ (پخشی) مولکولی[5] خواهد بود که پدیده‌ی مولکولی کندی به شمار می رود. از سوی دیگر، در بسیاری فرآیندهای زیستی و شیمیایی اختلاط سریع و کامل دو سیال، دارای اهمیت به سزایی می‌باشد تا آنجا که میزان اختلاط ممکن است در عملکرد کل سیستم میکروفلوئیدیک نیز اثر گذار باشد. به منظور رفع نیازهای اختلاط در ابعاد کوچک، میکرومیکسرهای[6] متنوعی در سال‌های اخیر گزارش و ساخته شده‌اند. میکرومیکسرهای فعال قادرند اختلاط مؤثرتری را ارائه دهند اما ضمن دارا بودن قطعات متحرک، نیازمند منابع خارجی نیز می‌باشند. در مورد میکرومیکسرهای غیر فعال، بسیاری از یافته‌های قبلی حاکی از وابستگی شدید سیستم به اثرات اینرسی سیال است و بنابراین بسیاری از طرح های ارائه شده فقط در اعداد رینولدز[7] نسبتاً بالا به خوبی کار می‌کنند. تا به امروز اختلاط در میکرومیکسرها همچنان امری چالش برانگیز محسوب شده و کماکان نیاز به مطالعه و بررسی بیشتر در این زمینه وجود دارد. در این پژوهش انواع جدیدی از میکرومیکسرهای غیرفعال با استفاده از مکانیزم جابجایی نامنظم[8] معرفی و به هر دو صورت عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه قرارگرفته است. نتایج حاصله درک بهتری از اختلاط درون ریز مجراها ایجاد نموده و منابعی ارزشمند برای طراحی و بهبود میکرومیکسرها محسوب می‌شود. در این فصل، ضمن بیان پدیده‌ی اختلاط و کاربردهای آن، مروری بر کارهای انجام شده در این زمینه صورت خواهد پذیرفت و در نهایت دورنمای پژوهش حاضر مطرح خواهد شد.

---

[1] Microfluidic
[2] Micro channels
[3] Bio fluidic
[4] Turbulency
[5] Molecular diffusion
[6] Micro-Mixers
[7] Reynolds number
[8] Chaotic advection