



دانشگاه یزد
دانشکده فنی مهندسی

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

عنوان
ارزیابی عملکرد یک نوع میکرومیکسر H شکل

استاد راهنما
دکتر شهرام طالبی

استاد مشاور
دکتر محمد سفید

پژوهش و نگارش
نسرین علی یاری

بهمن ماه ۱۳۹۵

پیشکش به:

دستان پر مھر ترگل

تشکر و قدردانی:

با درود فراوان به روح پرفتوح پدر بزرگوارم؛
و سپاس بیکران بر همدلی و همراهی و همگامی مادر و لسوز و مهربانم که سجدی ایشان گل محبت
را در وجودم پروراند و دامن گهربارش لحظه‌های مهربانی را به من آموخت؛
و با تقدیر و تشکر از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای و کتر شهرام طالبی که با نکته‌های
دلایز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه‌گشای بنده در اتمام
و اكمال پایان نامه بوده است.

" معلما مقامت ز عرش برتر باد همیشه تو سن اندیشه ات مظفر باد "

از استاد صبور و با تقوا، جناب آقای و کتر محمد سفید که زحمات مشاوره این پایان نامه را
منتقل شدند و از استادان فرزانه جناب آقای و کتر علی و حقان و جناب آقای و کتر محمد رضا نظری
که زحمات داری این پایان نامه را منتقل شدند و از دوستانم به پاس محبت‌های بی دریغشان که
هرگز فروکش نمی‌کند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده:

گسترش ابزار مربوط به فناوری میکروسیالی موضوع مهمی در صنعت تلقی می‌شود. سیستم-های میکروسیالی مزیت‌های زیادی از قبیل مصرف مواد کمتر، زمان واکنش کوتاه‌تر، مصرف انرژی کمتر، هزینه کمتر و قابلیت جابجایی، نسبت به روشهای متداول دارند. همچنین میکرومیکسرها المانهای کلیدی در فناوری میکروسیالی هستند که در تعداد زیادی از تحقیقات به آنها اشاره شده است. حل عددی اختلاط جریانهای سیال در سه میکرومیکسر سه بعدی (میکرومیکسر متوازن H شکل، میکرومیکسر نامتوازن طولی و میکرومیکسر نامتوازن مقطعی) توسط نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ انجام شده است. تحلیل عددی جریان با فرض جریان سه بعدی، آرام، تراکم ناپذیر، دائم انجام شده است. شرط عدم لغزش بر روی تمام دیواره‌ها اعمال گردیده است. سیالهای ورودی آب و اتانول و اعداد رینولدز مورد بررسی ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ انتخاب شده‌اند. تاثیر عدد رینولدز و نوع و میزان نامتوانی بر شاخص اختلاط و افت فشار بررسی شده است. نتایج نشان داده است که در هر سه نوع میکرومیکسر افزایش عدد رینولدز باعث افزایش میزان شاخص اختلاط می‌شود به طوری که در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی شاخص اختلاط در عدد رینولدز ۱۰۰ به بالای ۹۰ درصد (۹۳ درصد) رسیده است. همچنین ایجاد نامتوانی جریانی به هر دو صورت مقطعی و طولی باعث افزایش شاخص اختلاط می‌گردد و اینکه نامتوانی مقطعی تاثیر بیشتری بر شاخص اختلاط نسبت به نامتوانی طولی دارد. به گونه ای که حداکثر افزایش شاخص اختلاط نسبت به میکرومیکسر متوازن H شکل، مربوط به میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در عدد رینولدز ۱۰۰ و به میزان ۳۰ درصد است. از نتایج مهم به دست آمده تاثیر عدد رینولدز و نامتوانی بر افت فشار است. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش افت فشار در هر سه نوع میکرومیکسر می‌گردد. مقایسه نتایج نشان داده است که افت فشار در میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی برابر و در تمامی اعداد رینولدز تقریباً ۲۵ درصد کمتر از افت فشار میکرومیکسر نامتوازن مقطعی است.

فهرست نشانه‌های اختصاری

کسر جرمی	φ
شاخص اختلاط	MI
ضریب نفوذ ملکولی	D
ضریب افت فشار	k
واریانس کسر جرمی	σ
ماکزیمم واریانس کسر جرمی	σ_{max}
لزجت	μ
چگالی	ρ
عدد پکله	Pe
عدد رینولدز	Re
عدد اشمیت	Sc
سرعت متوسط	U
بردار سرعت	\vec{V}
مولفه سرعت در راستای X	u
مولفه سرعت در راستای Y	v
مولفه سرعت در راستای Z	w
عرض مقطع کانال اختلاط	W
ارتفاع مقطع کانال اختلاط	H
قطر هیدرولیکی	d
طول میکرو میکسر	L
فشار	P
شتاب جاذبه	g

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه	۱
. اهمیت موضوع و کاربردهای آن	۲
. آشنایی با انواع میکرومیکسرها	۳
. میکرومیکسره‌های انفعالی	۳
. صفحه صفحه کردن موازی	۴
. صفحه صفحه کردن متوالی	۴
. تقسیم متوالی دو جریان	۵
. قطعه قطعه کردن جریان از طریق تزریق یکی از دو نمونه	۶
. تمرکز جریان اختلاط	۶
. ایجاد جابجایی بینظم در جریان اختلاط	۷
. میکرومیکسره‌های فعال	۷
. میکرومیکسر الکتروهیدرودینامیک	۸
. میکرومیکسره‌های فشاری	۹
فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین و تعریف مساله	۱۱
. مروری بر پژوهش‌های پیشین انجام شده در زمینه ی میکرومیکسره‌های انفعالی	۱۲
. صفحه صفحه کردن موازی	۱۲
. صفحه صفحه کردن متوالی	۱۳
. تقسیم متوالی دو جریان	۱۵
. قطعه قطعه کردن جریان از طریق تزریق یک از دو نمونه	۱۵
. تمرکز جریان	۱۵
. ایجاد جابجایی بی نظم در جریان اختلاط	۱۶
. قرار دادن موانعی بر سر را جریان و ایجاد جریانهای عرضی و ثانویه	۱۶

۱۷.....	ایجاد هندسه های سه بعدی متناوب در میکروکانال و منحرف کردن جریان اصلی
۲۵.....	ایجاد جریانهای مارپیچی با ایجاد دندانههای مورب بر کف میکروکانال
۲۵.....	تعریف مساله
۲۸	فصل سوم معادلات حاکم و حل آنها
۲۹.....	معادلات حاکم
۳۰.....	رابطه بین چگالی و لزجت مخلوط با کسر جرمی
۳۳.....	هندسه و شرایط مرزی
۳۴.....	روش حل
۳۴.....	نحوه محاسبه شاخص اختلاط
۳۵.....	بررسی صحت و دقت نتایج
۳۵.....	استقلال حل از شبکه
۳۷.....	اعتبار سنجی نتایج
۴۱.....	فصل چهارم نتایج مساله
۴۲.....	مقدمه
۴۳.....	تاثیر هندسه بر شاخص اختلاط و افت فشار
۵۲.....	تاثیر عدد رینولدز بر شاخص اختلاط و ضریب افت فشار
۵۶.....	مقایسه نتایج
۵۶.....	مقایسه شاخص اختلاط در طول کانال
۵۹.....	شاخص اختلاط در مقطع خروجی
۵۹.....	مقایسه میزان افت فشار
۶۲.....	فصل پنجم جمع بندی نتایج و پیشنهادها
۶۴.....	پیشنهادها

پیوست ۱ ۶۶

پیوست ۲ ۶۷

فهرست منابع ۷۰

فهرست شکل ها

شکل (۱-۱) شکل یک آزمایشگاه روی تراشه [۱] ۲

شکل (۲-۱) مراحل اختلاط به روش صفحه صفحه کردن متوالی [۱] ۵

شکل (۳-۱) طریقه پیاده نمودن روش تقسیم متوالی جریان در یک میکروکانال [۲] ۵

شکل (۴-۱) نمای کلی از روش قطعه قطعه کردن جریان [۲] ۶

شکل (۵-۱) میکرومیکسر فشاری [۴] ۹

شکل (۱-۲) شماتیکی از کانال طراحی شده توسط هلمهولتز و همکارانش [۵] ۱۲

شکل (۲-۲) میکرومیکسر طراحی شده توسط هسل و همکارانش [۶] ۱۳

شکل (۳-۲) نمایی از کانال طراحی شده توسط شانفیلد و همکارانش [۸] ۱۴

شکل (۴-۲) صفحه صفحه کردن متوالی [۹،۱۰،۱۱] ۱۴

شکل (۵-۲) میکرومیکسر طراحی شده توسط نایت و همکارانش [۱۵] ۱۵

شکل (۶-۲) کانال پیشنهادی توسط لین و همکارانش [۱۷] ۱۶

شکل (۷-۲) میکرومیکسر بیضی شکل [۱۸] ۱۷

شکل (۸-۲) کانال پیشنهادی توسط هانگ و همکارانش [۱۹] ۱۸

شکل (۹-۲) کانال پیشنهادی توسط لیو و همکارانش [۲۰] ۱۸

شکل (۱۰-۲) میکرومیکسر برای اختلاط زیرچند میلی ثانیه [۲۱] ۱۹

شکل (۱۱-۲) الف: کانال اصلی در یک سمت محور X ، ب: کانال اصلی انتقال داده شده [۲۲] ۲۱

شکل (۲-۱۲) الف: تاثیر آرایش کانال اصلی بر شاخص اختلاط میکرومیکسر لوزی شکل. ب: تاثیر آرایش کانال اصلی بر شاخص اختلاط میکرومیکسر دایره‌های شکل. پ: تاثیر نسبت پهناي کانالها بر افت فشار. ت: تاثیر نسب پهناي کانالها بر شاخص اختلاط [۲۲]..... ۲۱

۲۱

شکل (۲-۱۳) میکرومیکسر پسیو با دیواره های همگرا و واگرای سینوسی شکل [۲۳]..... ۲۱
شکل (۲-۱۴) الف: تاثیر دامنه نوسان بر شاخص اختلاط. ب: تاثیر دامنه نوسان بر افت فشار [۲۳]..... ۲۲
شکل (۲-۱۵) تاثیر تعداد سیکل ها بر شاخص اختلاط الف: با افزایش دامنه نوسان ب: با افزایش عدد رینولدز [۲۳]..... ۲۲

شکل (۲-۱۶) الف: میکرومیکسر T شکل ب: میکرومیکسر با ساختار موجی [۲۴]..... ۲۳
شکل (۲-۱۷): میکرومیکسر های نامتوازن لوزی شکل دو شاخه ای و سه شاخه ای [۲۵]..... ۲۴
شکل (۲-۱۸) الف: T میکرومیکسر ب: O میکرومیکسر ت: H میکرومیکسر [۲۶]..... ۲۴
شکل (۲-۱۹) میکرومیکسر T شکل همراه با زائده های بال مانند [۲۷]..... ۲۵
شکل (۲-۲۰) الف: میکرومیکسر H شکل متوازن ب: نامتوازن طولی پ: نامتوازن مقطعی..... ۲۶

۳۲

شکل (۳-۱) نمودار لزجت بر حسب کسر جرمی اتانول..... ۳۲
شکل (۳-۲) نمودار چگالی بر حسب کسر جرمی اتانول و رابطه بین آنها..... ۳۲
شکل (۳-۳) هندسه و شرایط مرزی میکرومیکسر H شکل متوازن الف) نمای دو بعدی ب) نمای سه بعدی..... ۳۳
شکل (۳-۴) نمودار شاخص اختلاط در طول کانال اختلاط برای شبکه‌های متفاوت..... ۳۶
شکل (۳-۵) شبکه بندی نهایی مساله..... ۳۶

- شکل (۳-۶) هندسه و ابعاد T میکرومیکسر شبیه سازی شده در اعتبار سنجی [۲۸]..... ۳۷
- شکل (۳-۷) مقایسه تغییرات شاخص اختلاط در طول میکرومیکسر T شکل در شبیه سازی انجام شده و مقاله اصلی ۳۹
- شکل (۴-۱) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل متوازن ۴۳
- شکل (۴-۲) جزییات ساختار میکرومیکسر H شکل الف: قسمت های مختلف میکرومیکسر ب: صفحه صفحه کردن متوالی در حین عبور از میکرومیکسر [۲۶] ۴۴
- شکل (۴-۳) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نا متوازن طولی ۴۴
- شکل (۴-۴) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نا متوازن مقطعی ۴۵
- شکل (۴-۵) کانتور سرعت در صفحه XY، نمای عمودی میکرومیکسر H شکل الف) متوازن ب) نامتوازن مقطعی (پ) نامتوازن طولی. ۴۸
- شکل (۴-۶) توزیع کسر جرمی اتانول در عدد رینولدز ۱۰۰ روی صفحه خروجی میکرومیکسر H شکل الف) متوازن ب) نامتوازن طولی (پ) نامتوازن مقطعی. ۴۹
- شکل (۴-۷) کانتور مولفه X ورتیسیتته در عدد رینولدز ۱۰۰ در خروجی اولین واحد جداسازی و ترکیب میکرومیکسرهای H شکل الف) متوازن ب) نامتوازن طولی (پ) نامتوازن مقطعی. ۵۱
- شکل (۴-۹) کانتور مولفه X ورتیسیتته در خروجی اولین واحد جداسازی و ترکیب میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز الف) ۲۰ ب) ۵۰ پ) ۱۰۰ ۵۴
- شکل (۴-۱۰) تغییرات شاخص اختلاط با طول در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز متفاوت ۵۵
- شکل (۴-۱۱) نمودار شاخص اختلاط بر حسب فاصله از ورودی کانال اختلاط در اعداد رینولدز متفاوت... ۵۸
- شکل (۴-۱۲) شاخص اختلاط بر حسب عدد رینولدز در خروجی میکرومیکسر ها ۵۹
- شکل (۴-۱۳) مقایسه افت فشار سه میکرومیکسر ۶۰

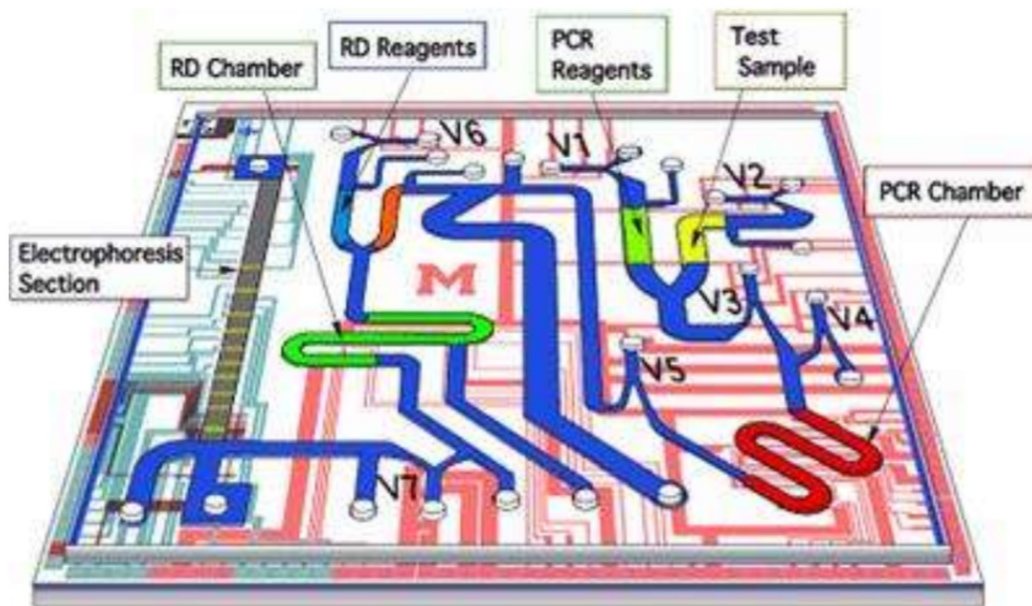
فهرست جدول ها

- جدول (۳-۱) مقادیر چگالی و لزجت مخلوط آب و اتانول در دمای 20°C [۲۹] ۳۱
- جدول (۳-۲) مشخصات تعداد گره و سلولها در استقلال حل از شبکه ۳۵
- جدول (۱-۴) ابعاد میکرومیکسرها ۴۶
- جدول (۴-۲) اندازه مولفه X ورتیسیتته در صفحه خروجی از اولین واحد جداسازی و ترکیب در عدد رینولدز ۱۰۰ ۵۱
- جدول (۴-۳) ضریب افت فشار در عدد رینولدز ۱۰۰ ۵۲
- جدول (۴-۴) اندازه مولفه X ورتیسیتته در صفحه خروجی از اولین واحد جداسازی و ترکیب در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز مختلف ۵۴
- جدول (۴-۵) ضریب افت فشار در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز مختلف ۵۶
- جدول (۴-۶) تاثیر نامتوانی در افزایش شاخص اختلاط نسبت به میکرومیکسر متوازن H شکل ۶۰

فصل اول مقدمه

اهمیت موضوع و کاربردهای آن

آزمایشگاه بر روی تراشه^۱ به سیستم‌هایی در ابعاد میکرونی اطلاق می‌گردد که با بهره‌گیری از تعدادی اجزا میکرونی، آزمایش شناسایی را بر روی نمونه مورد نظر انجام می‌دهند. برخی از این آزمایش‌ها شامل شناسایی باکتری‌ها، ویروس‌ها، سرطان‌ها، تهیه نمونه خون و انجام تست‌های مربوطه، شکستن سلول‌ها برای استخراج دی‌ان‌ای^۲، بررسی بیوشیمیایی و ... است. نمونه‌ای از ساختمان و اجزای کلی این دستگاه‌ها در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱) شکل یک آزمایشگاه روی تراشه [۱]

نحوه عملکرد این سیستم‌ها از این قرار است که نمونه مورد آزمایش و واکنش دهنده از طریق دو ورودی به‌وسیله یک توزیع کننده با نسبت غلظت مورد نیاز به داخل یک میکروکانال تزریق می‌شوند. در مرحله بعد به جهت سهولت در انجام واکنش در یک محفظه اختلاط با هم مخلوط شده و بعد از انجام واکنش بوسیله یک توزیع کننده، شناساگر را با نسبت غلظت معین به محصول واکنش تزریق می‌کنند. در نهایت فرآیند تجزیه و شناسایی را روی نمونه انجام می‌دهند [۱].

¹ Lab on a chip

² DNA

دستگاه‌های مورد نظر فواید بیشماری دارند که از جمله آن می‌توان به مصرف حجم بسیار کمی از سیال، کاهش مصرف شناساگر، کاهش میزان دور ریز، کاهش هزینه و سرعت تحلیل بالا اشاره نمود که همگی این موارد سبب شده است که توجه فراوان محققین به سمت این دستگاه جلب شود [۱]. در کنار فواید این سیستم‌ها، معایبی نیز وجود دارد که مهمترین آنها غالب بودن پدیده‌های سطحی در مقیاس کوچک است که سبب می‌شود طراحی و ساخت در این مقیاس‌ها با مشکلاتی همراه باشد.

بر اساس شکل (۱-۱) یکی از قسمت‌های این دستگاه میکرومیکسر^۱ هستند که از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند چرا که لازمه انجام هرگونه آزمایش بر روی نمونه‌ها، ترکیب و اختلاط مناسب آن‌ها در مدت زمان کوتاه است. در مقیاس میکرونی به دلیل غالب بودن نیروی ناشی از لزجت و کوچک بودن ابعاد مساله، پدیده توربولانس که در مقیاس ماکرو به عنوان ابزاری در بهبود اختلاط استفاده می‌شود، در این مقیاس غیر عملی است و تنها پدیده موثر در اختلاط نفوذ ملکولی است [۲]. بر این اساس اختلاط در مقیاس میکرونی، نیاز به پیاده کردن روش‌های کارآمد دارد تا بتواند از منظر کمی و کیفی بهبود یابد.

آشنایی با انواع میکرومیکسرها

میکرومیکسرها به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شود:

میکرومیکسرهای انفعالی^۲

این نوع میکرومیکسرها بدون استفاده از قطعات مکانیکی متحرک، تنها با استفاده از تغییرات در هندسه میکرومیکسر، شدت اختلاط را افزایش می‌دهند. پارامترهای هندسی با تاثیر گذاری در دو اصل که تاثیر بسزایی در اختلاط دارند، شدت اختلاط را افزایش می‌دهند:

۱- افزایش نفوذ ملکولی

۲- افزایش سطح مشترک تماس

¹ Micromixer

² Passive micromixers

این نوع میکرومیکسرها خود به دسته‌های متنوعی تقسیم می‌شوند که در ادامه، مطالب به معرفی برخی از مدل‌های ارائه شده از این نوع میکرومیکسرها و اساس کار آنها اختصاص یافته است.

. صفحه صفحه کردن موازی^۱

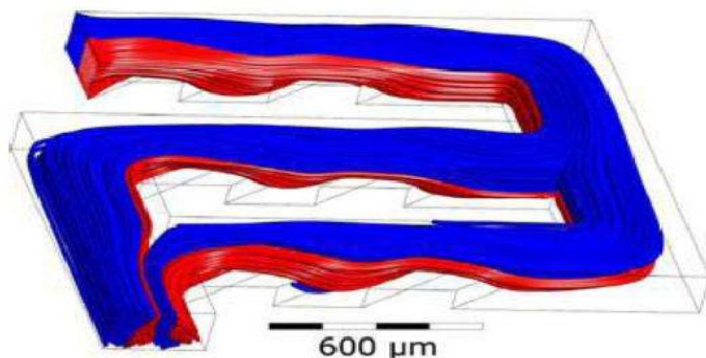
در این روش هرکدام از دو نمونه که قرار است باهم مخلوط شوند به n جریان جداگانه تقسیم می‌شوند و هرکدام از این n زیر جریانها به طور جداگانه ای باهم مخلوط می‌شوند و نهایتاً در انتهای مرحله اختلاط مجدداً بهم می‌پیوندند. در این روش به دلیل افزایش سطح مشترک بین دو سیال، اختلاط بهبود می‌یابد [۲].

. صفحه صفحه کردن متوالی^۲

در این روش بعد از تزریق کردن دو جریان در یک کانال مشترک، مخلوط وارد یک کانال هندسی سه بعدی پیچیده‌ای می‌شود که در این کانال سه بعدی جریان سیال با عبور از توری‌هایی که در جهات افقی و عمودی تعبیه شده‌اند، اصطلاحاً شکسته شده و مجدداً در انتهای کانال بهم می‌پیوندند که مجموعه این اعمال سبب ایجاد یک مخلوط کاملاً همگن در خروجی کانال می‌شوند. به دلیل پیچیدگی‌های هندسی این کانال سه بعدی، ساخت آن نیاز به فناوری پیشرفته‌ای دارد [۲].
نمایی از این میکرومیکسرها در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

¹ Parallel lamination

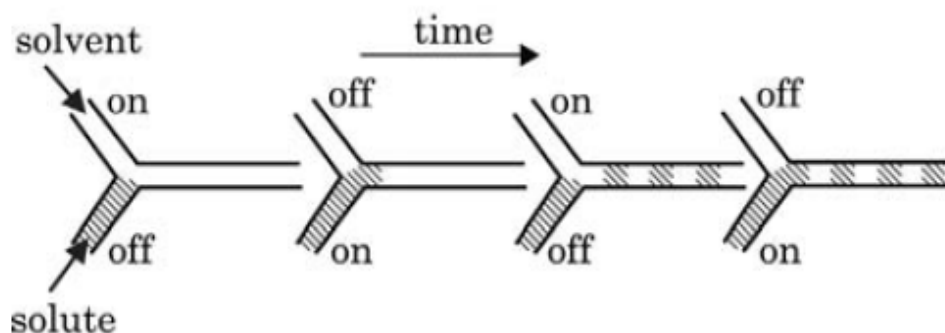
² Sequential lamination



شکل (۲-۱) مراحل اختلاط به روش صفحه صفحه کردن متوالی [۱]

تقسیم متوالی دو جریان^۱

در این روش، با طراحی یک سیستم پالسی برای تزریق نمونه‌ها، دو نمونه را با یک پریود زمانی معین و یکسان با اختلاف فاز مشخص نسبت به یکدیگر، به درون یک میکروکانال واحد تزریق می‌کنند. در نهایت با بهره‌گیری از اثر مثبت گرادیان‌های غلظت در این میکروکانال، شار نفوذ جرمی و به تبع آن شدت اختلاط افزایش می‌یابد. شکل (۳-۱) نمای کلی سیستم‌هایی که به این طریق عمل می‌کنند را نشان می‌دهد [۲].

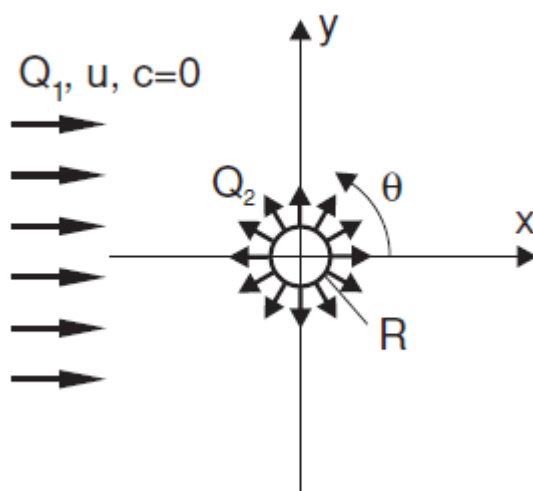


شکل (۳-۱) طریقه پیاده نمودن روش تقسیم متوالی جریان در یک میکروکانال [۲]

^۱ Sequential segmentation

قطعه قطعه کردن جریان از طریق تزریق یکی از دو نمونه^۱

در این روش یکی از دو نمونه‌ای که قرار است باهم مخلوط شوند از طریق یک نازل به جریان نمونه دوم تزریق می‌شود. در شکل (۴-۱) نمای کلی این روش نشان داده شده است. با استفاده از مفهوم سطح تماس مشترک بین دو نمونه، اختلاط افزایش می‌یابد [۲].



شکل (۴-۱) نمای کلی از روش قطعه قطعه کردن جریان [۲]

تمرکز جریان اختلاط^۲

یکی دیگر از راه‌حلهای کاهش مسیر اختلاط و در نتیجه کاهش زمان اختلاط، استفاده از مفهوم تمرکز جریان اختلاط است. تمرکز جریان می‌تواند بر اساس دو ایده‌ی کلی ایجاد شود:

- تمرکز هندسی
- تمرکز جریانی

در ایده‌ی اول، با استفاده از یک هندسه همگرا این تمرکز ایجاد می‌شود و در ایده‌ی دوم از طریق ایجاد جریان جانبی، جریان اصلی اختلاط متمرکز می‌شود. البته در این روش باید دو جریان فرعی با جریان اصلی اختلاط، غیر قابل اختلاط باشند [۲].

¹ Segmentation based on injection

² Focusing of mixing streams

۱. ایجاد جابجایی بی‌نظم در جریان اختلاط^۱

این نوع میکرومیکسرها بر اساس ایجاد کردن جریان‌های ثانویه در جریان اصلی، باعث بوجود آوردن بی‌نظمی در جریان می‌شوند. نتیجه این بی‌نظمی اختلاط سریع‌تر و کارآمدتر است. بی‌نظمی - ها به طور کلی از سه روش کلی ایجاد می‌شوند:

در روش اول در محدوده‌ی اعداد رینولدز ($10 < Re < 100$) با قرار دادن موانعی بر سر راه جریان، جریانهای عرضی و ثانویه‌ای ایجاد می‌شود. این جریانها با بی‌نظم کردن مسیر اصلی اختلاط میزان نفوذ ملکولی و شار نفوذی را افزایش می‌دهند. در این محدوده عدد رینولدز، قرار دادن مانع بر سر راه جریان اصلی، تغییر جهت جریان سیال را در اثر نیروی اینرسی بدنبال دارد که باعث پیدایش جریان‌های ثانویه می‌شود. این جریانهای ثانویه عموماً ماهیتی گردابه‌ای دارند و می‌توانند تاثیر بسزایی در افزایش شدت اختلاط بگذارند. [۳]

در روش دوم که در محدوده اعداد رینولدز ($10 < Re < 100$) کاربرد دارد از طریق ایجاد هندسه‌های سه بعدی متناوب در میکروکانال، جریان اصلی به صورت یک جریان مارپیچی منحرف می‌شود. مارپیچی شدن جریان، اختلاط مناسبی را نتیجه می‌دهد. [۳]

روش سوم مربوط به محدوده اعداد رینولدز پایین ($Re < 1$) است. چون در این حالت سرعت جریان سیال کم است، قرار دادن مانع و یا مارپیچی کردن جریان سیال به دلیل ضعیف بودن نیروهای اینرسی ناکارآمد هستند. در این حالت با ایجاد دندانهای مورب بر کف میکروکانال، جریانهای مارپیچی ایجاد می‌شود که نقش موثری را در ایجاد بی‌نظمی و بهبود اختلاط ایفا می‌کنند. [۳]

۲. میکرومیکسرهای فعال^۲

این نوع میکرومیکسرها با بهره‌گیری از یک منبع خارجی، جریانهای ثانویه‌ای را به جریان اصلی تحمیل می‌کنند که باعث بروز بی‌نظمی در جریان اصلی می‌شوند. در نتیجه این بی‌نظمی با بهم زدن یا پیچاندن خطوط جریان، دو سیال با یکدیگر مخلوط می‌شوند. بر اساس فیزیک پدیده و

¹ Chaotic advection in flow

² Active micromixers

منبع مورد استفاده جهت ایجاد چنین جریانهایی، این نوع میکرومیکسرها را دسته بندی می کنند.

برخی از پدیده‌های فیزیکی مورد استفاده در این نوع میکرومیکسرها عبارت‌اند از [۲]:

- ایجاد جریانهای ثانویه توسط محرک فشاری
- ایجاد جریانهای ثانویه توسط پدیده الکتروهیدرودینامیکی
- ایجاد جریان ثانویه توسط پدیده الکترومغناطیس
- ایجاد جریان ثانویه توسط امواج صوتی
- ایجاد جریانهای ثانویه با بهره‌گیری از گرادیان‌های دمایی

. میکرومیکسر الکتروهیدرودینامیک

این نوع از زمره میکرومیکسرهایی هستند که از پدیده‌های الکتریکی در بهبود اختلاط بهره می‌برند و بطور کلی شامل سه دسته زیر هستند.

نوع اول در مواردی استفاده می‌شود که عامل بوجود آورنده‌ی جریان در کانال، پدیده‌های الکتریکی است و در آنها ضریب رسانایی الکتریکی دو سیالی که در کانال به موازات هم حرکت می‌کنند باهم متفاوت است. در نتیجه همیشه در سطح مشترک دو سیال بارهای باقی مانده آزادی وجود دارد که در اثر اعمال میدان الکتریکی قابلیت حرکت دارند. در صورتی که این میدان الکتریکی همراستا با سطح مشترک دو سیال باشد، یک تنش برشی مماسی و به تبع آن یک نیروی مماسی را ایجاد می‌کند که باعث تقویت و یا تضعیف جریان سیال می‌شود. هیچ یک از این دو حالت کمکی به اختلاط نمی‌کنند ولی چنانچه این میدان ایجاد شده در جهت عمود بر سطح مشترک دو سیال باشد، نیروی برشی ایجاد شده در جهت عمود بر جریان اصلی سیال می‌شود که سبب ایجاد جریان‌های ثانویه در سیال می‌گردد و اصطلاحاً خطوط جریان سیال را می‌کشد و می‌پיچاند که افزایش شدت و کاهش زمان مورد نیاز برای اختلاط را بدنبال دارد. معمولاً محدوده‌ی پتانسیل الکتریکی اعمالی برای ایجاد دائم میدان‌ها از ۷ تا ۲۷ ولت متغیر است. نکته مهمی که در ارتباط با این نوع اغتشاشات وجود دارد این است که جریانهای ثانویه ای که در آنها بوجود می‌آید پیوسته است [۲].

نوع دوم برخلاف حالت قبل، جریانه‌ی ثانویه‌ای نیز وجود دارند که به صورت دوره و متناوب و با استفاده از جریانهای متناوب الکتروسینتیکی، در جریان اصلی ایجاد می‌شوند. بدین ترتیب که با

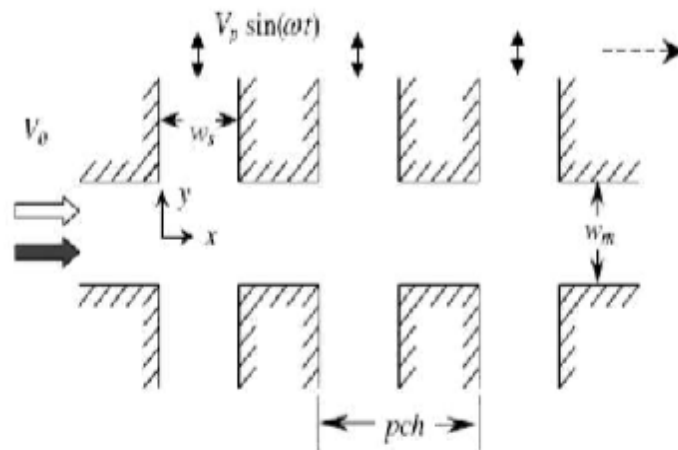
قرار دادن الکترودهای اضافه بر الکترودهای اصلی در محل‌های مناسب از کانال و اعمال پتانسیل دوره‌ای به آنها میدان الکتریکی‌ای با جهت و اندازه متغیر در کانال ایجاد می‌شود. تعامل بین این میدان و میدان اصلی موجود در کانال سبب پیدایش جریان‌های ثانویه‌ای در کانال می‌شود که ماهیتی متغیر با زمان دارند و باعث بروز بی‌نظمی‌های جریانی می‌شوند. این بی‌نظمی‌ها اصطلاحاً تحت عنوان جابجایی آشوبناک الکتروسینتیکی شناخته می‌شود [۲].

نوع سوم از اثر ناپایداری الکتروسینتیکی در اختلاط دو سیال استفاده می‌شود. هنگامی که ولتاژ اعمالی دو الکتروود مورد استفاده برای اختلاط، بیشتر از یک کیلو ولت باشد ناپایداری الکتروسینتیکی بوجود می‌آید. همان‌طور که در ابتدا اشاره شد هرچند از نقطه نظر فیزیکی محدوده اعداد رینولدز در جریان‌های میکرو، پایین است و از نظر تئوری اثر توربولانسی در این نوع جریانها وجود ندارد اما این پدیده ماهیتی شبیه به ماهیت توربولانسی دارد [۲].

میکرومیکسرهای فشاری

در میکرومیکسرهای فشاری سرعت‌های متناوب سیال باعث ایجاد بی‌نظمی در سیال می‌شود.

این نوع دستگاه شامل یک کانال اصلی و کانال‌های کوچک ترجانبی است. سیالی که در



شکل (۱-۵) میکرومیکسر فشاری [۴]

کانال اصلی حرکت می‌کند با نمونه دیگری از سیال که از کانال‌های جانبی وارد می‌شود تماس پیدا می‌کند و مخلوط می‌شود. انبساط و انقباض حاصل شده در سیال در کانال اصلی موجب ایجاد بی‌نظمی و بهبود اختلاط می‌شود، شکل [(۵-۱)]، [۴].

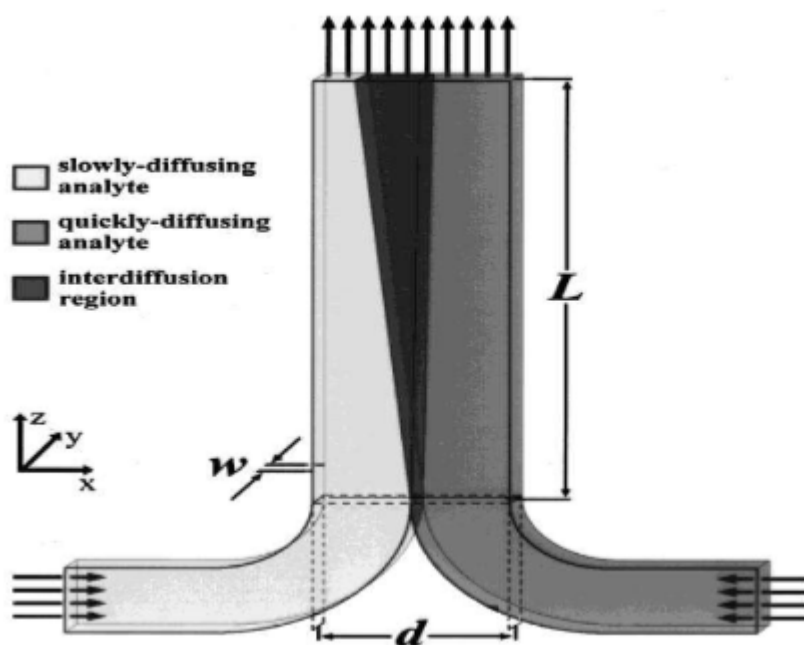
فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین و تعریف
مساله

مروری بر پژوهش‌های پیشین انجام شده در زمینه ی میکرومیکسرهای انفعالی

در فصل یک درمورد تمامی روشهای ذکر شده در این فصل به طور کامل توضیح داده شد. در این فصل به طور خاص فقط به پژوهش‌های انجام شده توسط محققین در هر زمینه اشاره می‌شود.

صفحه صفحه کردن موازی

هلمهولز و همکارانش^۱ [۵] برای اولین بار در سال ۱۹۹۹ با ارائه ساده‌ترین هندسه یعنی یک میکروکانال T شکل که دارای دو ورودی بود، توانست به مفهوم قطعه قطعه کردن موازی جریان در این میکروکانال‌ها دست پیدا کند. نمایی از این میکرومیکسر پیشنهادی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



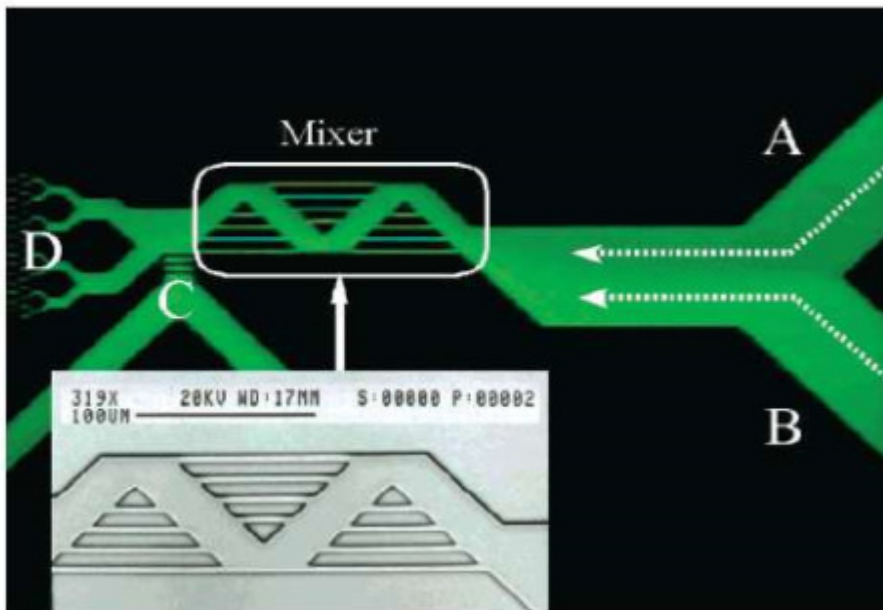
شکل (۱-۲) شماتیکی از کانال طراحی شده توسط هلمهولز و همکارانش [۵]

در سالهای بعد این مفهوم توسط سایر محققین دنبال شد و منجر به ساخت میکروکانال‌های پیچیده با ورودی‌های متعدد گردید. شکل (۲-۲) میکرومیکسر طراحی شده توسط هسل و همکارانش^۲ [۶] را که از این مفهوم در افزایش شدت اختلاط استفاده کردند، را نشان می‌دهد.

¹ Kamholz

² Hessel

سال‌های بعد لاب و همکارانش^۱ [۷] توانستند با استفاده از مفهوم تمرکز هیدرودینامیکی پیشرفته به ۱۳۸ ریز جریان دست پیدا کنند. در این میکرومیکسرای که توسط آنها پیشنهاد شد، جریان‌ها از طریق ۱۳۸ ورودی تزریق می‌شوند و نهایتاً بعد از اختلاط در یک کانال اصلی به یکدیگر می‌پیوندند.



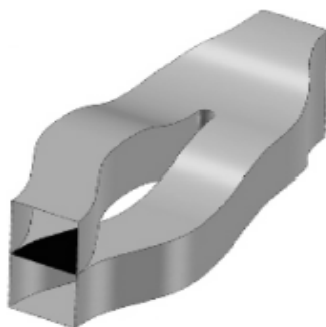
شکل (۲-۲) میکرومیکسر طراحی شده توسط هسل و همکارانش [۶]

صفحه صفحه کردن متوالی

مانند صفحه صفحه کردن موازی، صفحه صفحه کردن متوالی نیز با جداسازی و ترکیب لایه‌های سیال باعث تسریع اختلاط می‌گردد. در این روش سیالهای ورودی در ابتدا به صورت افقی و سپس به صورت عمودی به یکدیگر می‌پیوندند، [شکل (۲-۴، الف)]. بعد از طی m مرحله جداسازی و ترکیب 2^m لایه سیال، صفحه صفحه می‌شود و به اندازه 4^{m-1} برابر، زمان اختلاط کاهش می‌یابد، [۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱].

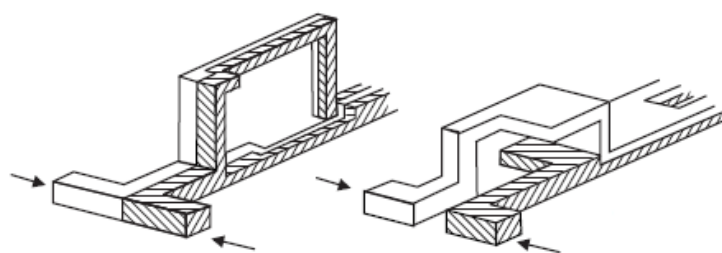
¹ Lob

از جمله افرادی که در طراحی میکرومیکسر از این مفهوم استفاده کردند، می‌توان به شانفیلد^۱ و همکارانش [۸] اشاره نمود که با ساختن یک میکروکانال سه بعدی که نمایی از آن در شکل (۲-۲) نشان داده شده است توانست به یک اختلاط کامل در اعداد رینولدز پایین دست یابند.



شکل (۲-۳) نمایی از کانال طراحی شده توسط شانفیلد و همکارانش [۸]

برانبرگ^۲ [۹] شاسینگر^۳ [۱۰] و گری^۴ [۱۱] از محققین دیگری بودند که در این زمینه فعالیت کرده‌اند. میکرومیکسرهایی با مواد سیلیکونی که تا حداکثر ۲۰ مرحله جداسازی و ترکیب را پوشش داده و در اعداد رینولدز پایین شاخص اختلاط بالایی را سبب می‌شوند. شکل (۲-۴، ب) میکرومیکسرهای ارائه شده توسط این محققین را به تصویر می‌کشد.



شکل (۲-۴) صفحه صفحه کردن متوالی [۹،۱۰،۱۱]

¹ Schoenfeld
² Branbjerg
³ Schwesinger
⁴ Gray

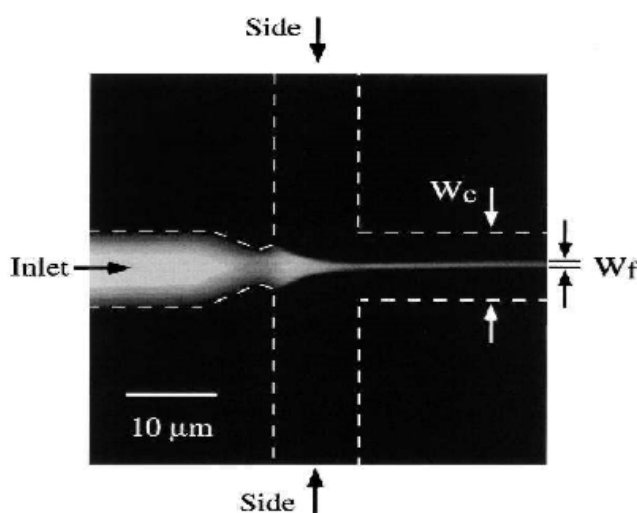
تقسیم متوالی دو جریان

تان و همکارانش^۱ [۱۲] از جمله افرادی بودند که این روش را توسعه دادند و جهت ایجاد جریان پالسی از یکسری کار اندازه‌های پیزوالکتریک استفاده نمودند. قطعه قطعه کردن جریان از طریق تزریق یک از دو نمونه

میاک و همکارانش^۲ [۱۳] یک میکرو مخلوط کننده را که بر اساس این مفهوم کار می‌کرد ارائه کردند که در آن از ۴۰۰ نازل در یک آرایش مربعی جهت تزریق یکی از نمونه‌ها استفاده کردند. سالهای بعد لارسن و همکارانش^۳ [۱۴] نیز توانستند میکرومیکسری شبیه میکرومیکسر فوق ارائه دهند که تنها در شکل نازل‌ها و نحوه آرایش با مدل میاک و همکارانش [۱۳] متفاوت بود.

تمرکز جریان

نایت و همکارانش^۴ [۱۵] از جمله افرادی بودند که در این زمینه فعالیت کرده‌اند. آن‌ها توانستند در یک هندسه متقاطع که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است، جریان اصلی را توسط دو جریان فرعی متمرکز نمایند. آنها با این روش توانستند مدت زمان مورد نیاز برای اختلاط را به چند میکروثانیه کاهش دهند.



شکل (۲-۵) میکرومیکسر طراحی شده توسط نایت و همکارانش [۱۵]

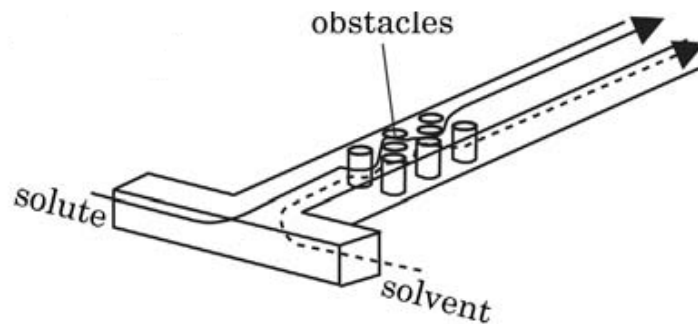
- 1 Tan
- 2 Miyake
- 3 Larsen
- 4 Knight

ایجاد جابجایی بی نظم در جریان اختلاط

این نوع میکرومیکسرها بر اساس ایجاد کردن جریان‌های ثانویه در جریان اصلی اختلاط باعث بوجود آوردن هرج و مرج در جریان می‌شوند که نتیجه این هرج و مرج اختلاط سریع‌تر و کارآمدتر است. بی‌نظمی‌ها به طور کلی از سه روش کلی ایجاد می‌شوند.

قرار دادن موانعی بر سر راه جریان و ایجاد جریان‌های عرضی و ثانویه

از جمله تحقیقات ارائه شده در این زمینه توسط وانگ و همکارانش^۱ [۱۶] انجام شده است که به صورت عددی نقش قرار دادن ستون‌های استوانه‌ای را در کانال اختلاط بررسی نموده‌اند. نتایج تحقیقاتشان نشان داده است که حضور موانع، اختلاط را به طور قابل ملاحظه‌ای در محدوده رینولدز $10 < Re < 100$ بهبود می‌بخشد. از جمله افرادی که توانستند نمونه‌ای از این نوع میکرومیکسرها را بسازند لین و همکارانش^۲ [۱۷] بودند که با طراحی میکروکانالی با هفت پایه استوانه‌ای شکل در سر راه جریان، اختلاط را تا حد قابل توجهی بهبود دادند. نمای کلی این محفظه در شکل (۲-۶) نمایش داده شده است.



شکل (۲-۶) کانال پیشنهادی توسط لین و همکارانش [۱۷]

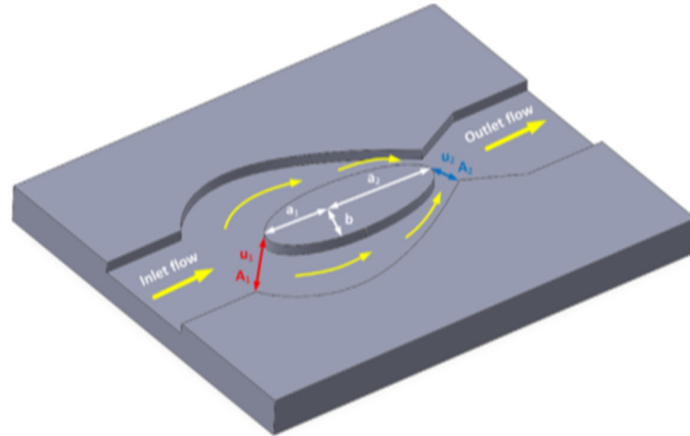
کارلسن^۳ و همکارانش [۱۸] یک نوع از میکرومیکسرها را پیوسته برای مسطح کارآمد برای اعداد رینولدز پایین و به شکل بیضی برای اختلاط پیوسته خون ارائه داده‌اند، [شکل (۲-۷)]. با استفاده از فرایند جداسازی و ترکیب و شکل هندسی بخصوص این نوع از میکرومیکسرها فاصله نفوذ سیال‌ها کاهش

¹ Wang

² Lin

³ Karlsen

یافته و بنابر این فضای مورد استفاده هم کاهش یافته است. تحلیل عددی این میکرومیکسر با استفاده از نرم افزار کامسول^۱ انجام شده و ارزیابی این میکرومیکسر و میکرومیکسر T شکل برای مقایسه عملکرد آنها در جریان آرام در $Re < 1$ انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد میکرومیکسر بیضی شکل در $Re < 1$ دارای شاخص اختلاط بالای ۸۰٪ و بالطبع عملکردی بالاتر از میکرومیکسرهای T شکل دارند و نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و با یکدیگر سازگارند.

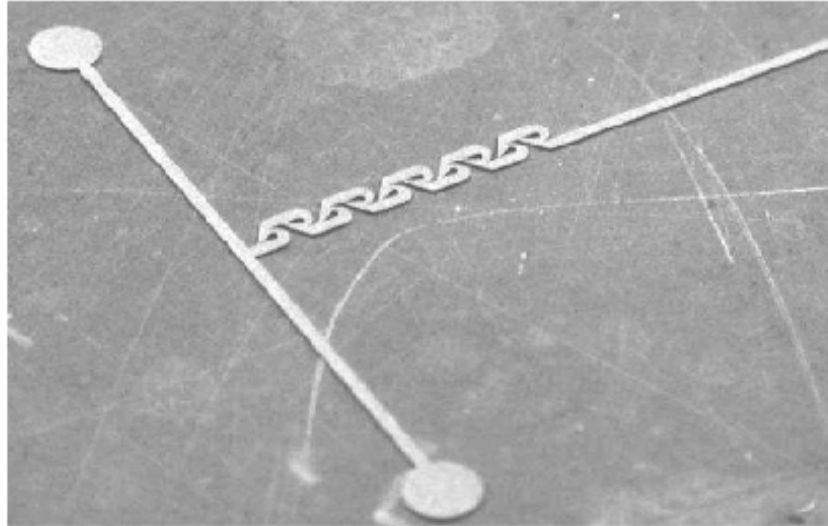


شکل (۲-۷) میکرومیکسر بیضی شکل [۱۸]

. ایجاد هندسه‌های سه بعدی متناوب در میکروکانال و منحرف کردن جریان اصلی هانگ و همکارانش^۲ [۱۹] میکرومیکسرهایی را پیشنهاد دادند که جهت بهبود اختلاط از میکروکانال‌های سه بعدی به هندسه متوالی L شکل بهره بردند. شکل (۲-۱۰) نمای کلی از این میکروکانال را نشان می‌دهد.

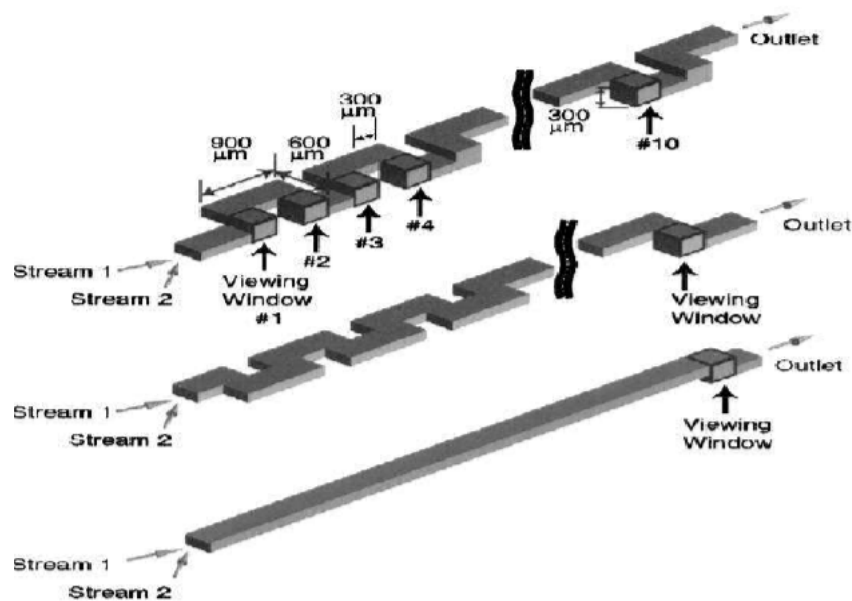
^۱ Comsol

^۲ Hong



شکل (۲-۸) کانال پیشنهادی توسط هانگ و همکارانش [۱۹]

لیو و همکارانش^۱ [۲۰] کاری شبیه به هانگ را انجام دادند با این تفاوت که به جای استفاده از کانال‌های L شکل برای بهبود اختلاط، از کانال‌های C شکل که نمای کلی آنها در شکل (۲-۹) نیز نشان داده شده است استفاده نمودند.



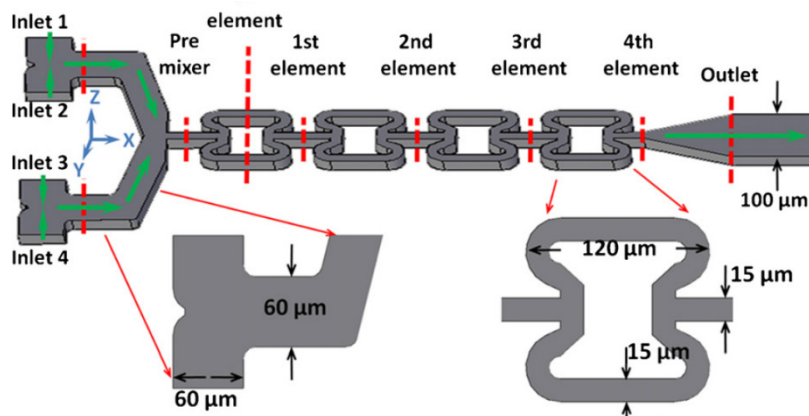
شکل (۲-۹) کانال پیشنهادی توسط لیو و همکارانش [۲۰]

لو و همکارانش^۲ [۲۱] یک وسیله ی اختلاط جدید برای اختلاط چند میلی ثانیه ای را به صورت عددی بررسی کرده‌اند. این وسیله شامل دو میکرومیکسر T شکل برای پیش اختلاط و

¹ Liu

² mohammad

۴ کانال پروانه ای شکل است، [شکل (۲-۱۰)]. شاخص اختلاط میکرومیکسر با استفاده از ترکیبات رنگی و سوسپانسیون های نانوذرات ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد که ساختار اختلاط در میکرومیکسر به طور موثری سیال را بهم میزند و جریانهای ثانویه و گردابه در میکروکانال تشکیل می شوند و به طور قابل توجهی شاخص اختلاط را افزایش می دهد. با افزایش المانهای پروانه ای اختلاط کامل حتی در دبی جریان پایین هم اتفاق می افتد ولی زمان اختلاط افزایش می یابد.



شکل (۲-۱۰) میکرومیکسر برای اختلاط زیرچند میلی ثانیه [۲۱]

انصاری^۱ و وانگ^۲ [۲۲] میکرو میکسرهای پسیو نامتوازن با کانال های لوزی شکل و دایره ای شکل دو شاخه ای را به صورت عددی برای تحلیل اختلاط و دامنه ی جریان بررسی کرده اند تا بهترین شرایط برای شاخص اختلاط بالا را برای محدوده ی اعداد رینولدز ۸۰-۱ به دست آورند، [شکل (۲-۱۱)]. مقایسه عملکرد اختلاط به وسیله محاسبه شاخص اختلاط انجام شد. همچنین محل قرارگیری کانال های اصلی و تاثیر آن روی شاخص اختلاط در دو حالت بررسی شده است. در حالت اول کانال اصلی فقط در یک سمت محور X و در حالت دوم به صورت متغیر در دو سمت محور قرار می گیرد. نتایج نشان داده که در حالتی که کانال اصلی انتقال پیدا می کند شاخص اختلاط افزایش می یابد، [شکل (۲-۱۲)، الف و ب]. در کانالهای لوزی شکل بیشترین عملکرد در نسبت پهناهای ۳ یا ۴ (وابسته به عدد رینولدز) بدست آمده است. در حالی که در کانال های دایره ای بیشترین عملکرد مربوط به نسبت پهنا ۲ می شد. کمترین کارایی مربوط به کانال های

¹ Ansari

² Kwang

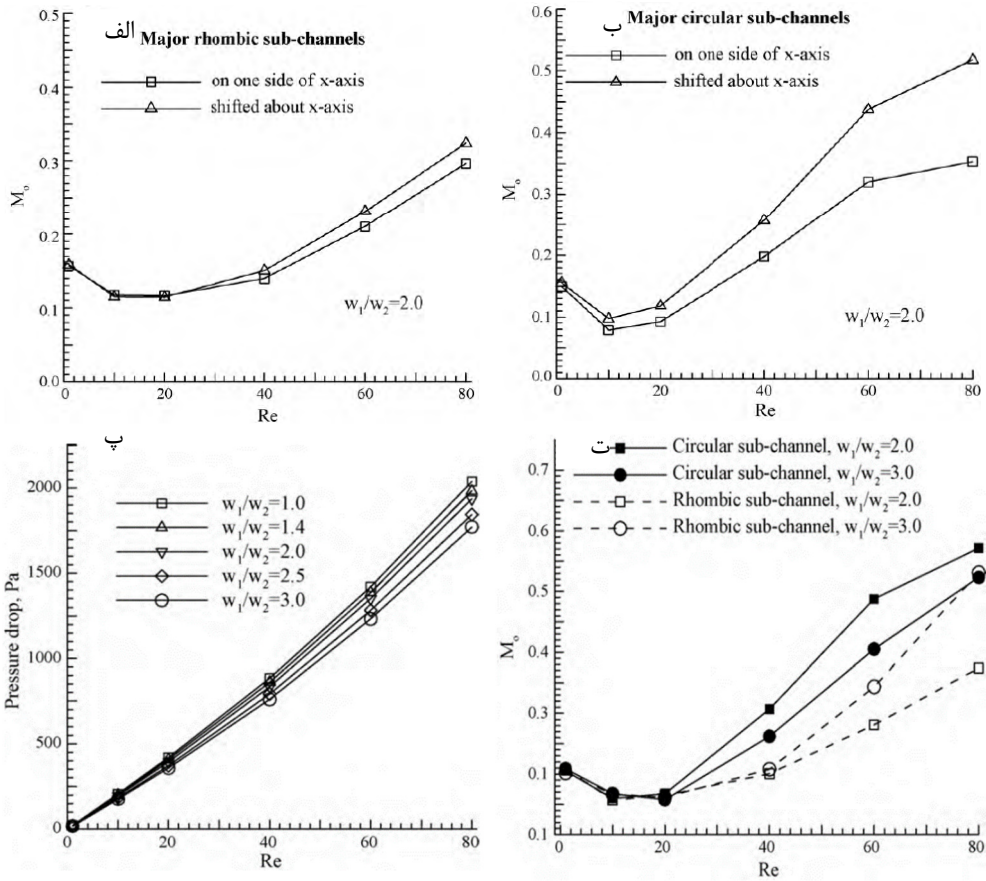
متوازن برای هر دو نمونه و در تمام محدوده‌ی اعداد رینولدز بود. در مقایسه‌ی دو نوع هندسه کانال‌های دایره‌ای شکل با نسبت پهنای ۲ دارای بیشترین شاخص اختلاط بودند، [شکل (۲-۱۲)، ت]. این نمونه نامتوازن از میکرومیکسرها افت فشار کمتری نسبت به میکرومیکسرهای متوازن داشته‌اند، [شکل (۲-۱۲)، پ].

افضل^۱ و وانگ [۲۳] یک میکرومیکسر انفعالی با دیواره‌های همگرا و واگرای سینوسی شکل را به صورت عددی و در محدوده‌ی اعداد رینولدز ۷۰-۱۰ بررسی کرده‌اند، [شکل (۲-۱۳)]. تاثیرات عدد رینولدز و دامنه نوسان دیواره‌ی سینوسی و نسبت اضلاع کانال روی عملکرد اختلاط بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که در دامنه‌های بالا افت فشار کاهش می‌یابد، [شکل (۲-۱۴)، ب]. در اعداد رینولدز بالا ورتکس-های دوگانه ایجاد شده در گلوگاه و جریانهای ثانویه‌ی ایجاد شده در کانالها به علت نیروی گریز از مرکز، تاثیرات قابل توجه‌ای روی شاخص اختلاط داشته‌اند. همچنین افزایش دامنه نوسان باعث افزایش اختلاط می‌گردد، [شکل (۲-۱۴)، الف]. با افزایش نسبت اضلاع سطح مقطع، اختلاط افزایش و افت فشار کاهش می‌یابد. همچنین تاثیر تعداد سیکلها بر شاخص اختلاط در اعداد رینولدز و دامنه نوسانهای مختلف بررسی شده است، [شکل (۲-۱۵)، الف و ب].



شکل (۲-۱۱) الف: کانال اصلی در یک سمت محور x، ب: کانال اصلی انتقال داده شده [۲۲]

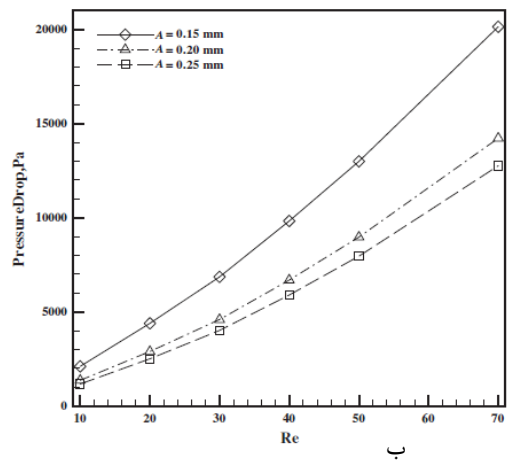
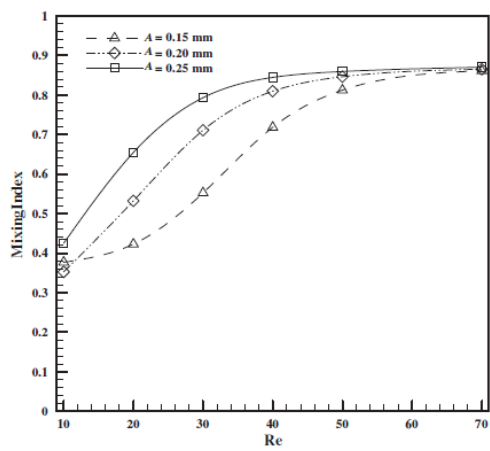
¹ Afzal



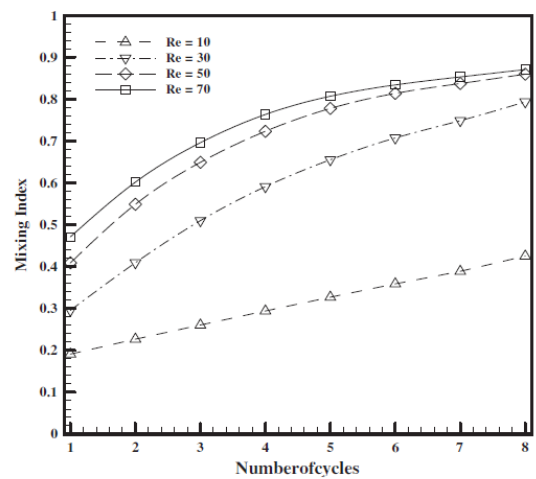
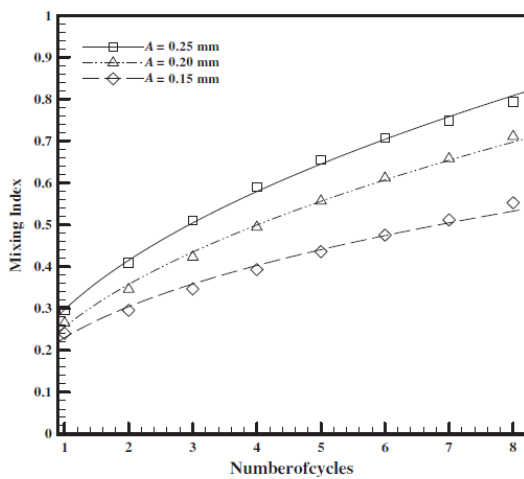
شکل (۲-۱۲) الف: تاثیر آرایش کانال اصلی بر شاخص اختلاط میکرومیکسر لوزی شکل. ب: تاثیر آرایش کانال اصلی بر شاخص اختلاط میکرومیکسر دایره‌ای شکل. پ: تاثیر نسبت پهناهای کانالها بر افت فشار. ت: تاثیر نسب پهناهای کانالها بر شاخص اختلاط [۲۲]



شکل (۲-۱۳) میکرومیکسر پسیو با دیواره های همگرا و واگرای سینوسی شکل [۲۳]

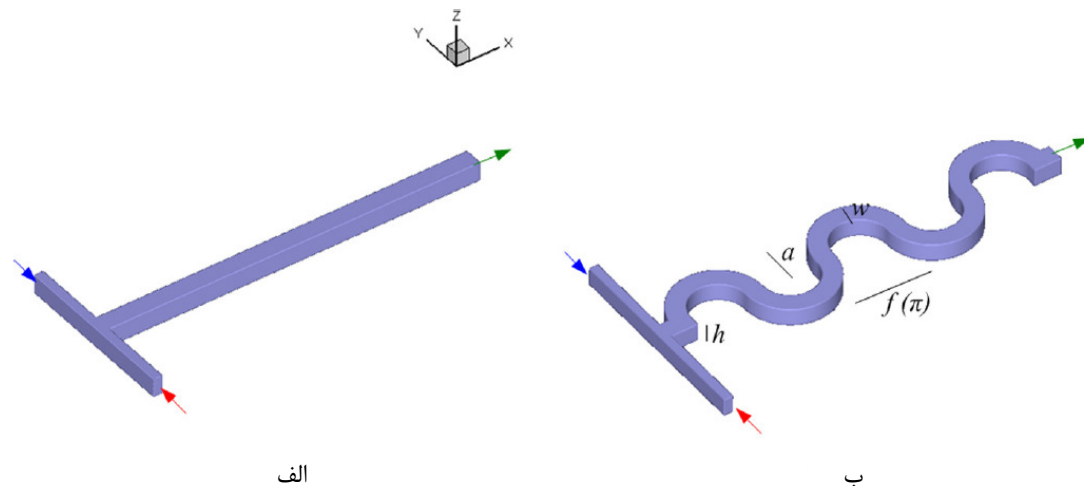


شکل (۲-۱۴) الف: تاثیر دامنه نوسان بر شاخص اختلاط. ب: تاثیر دامنه نوسان بر افت فشار [۲۳]



شکل (۲-۱۵) الف: با افزایش دامنه نوسان ب: با افزایش عدد رینولدز [۲۳]

سولهاتی و همکارانش^۱ [۲۴] شاخص اختلاط در میکرومیکسرهای T شکل با ساختار موجی را به صورت عددی با نرم افزار فلوینت و با تعداد دو میلیون گره بررسی و آن را با میکرومیکسرهای T شکل مقایسه کرده‌اند، [شکل (۲-۱۶)]. در این نوع میکرومیکسر به علت ساختار موجی جریانهای ثانویه ایجاد شده و اختلاط تسریع می‌گردد. در این تحقیق چندین روش گسسته سازی و مش بندی برای اطمینان از دقیق و قوی بودن نتایج تست و مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که کیفیت اختلاط و شاخص عملکرد به طور قابل توجهی در این میکرومیکسر نسبت به میکرومیکسرهای T شکل افزایش پیدا می‌کند. در مواردی که شاخص اختلاط و فرآیند ساخت و هزینه پارامترهای مهمی هستند، برای مثال صنعت داروسازی و فرایندهای شیمیایی، این نوع میکرومیکسر برتری دارد.



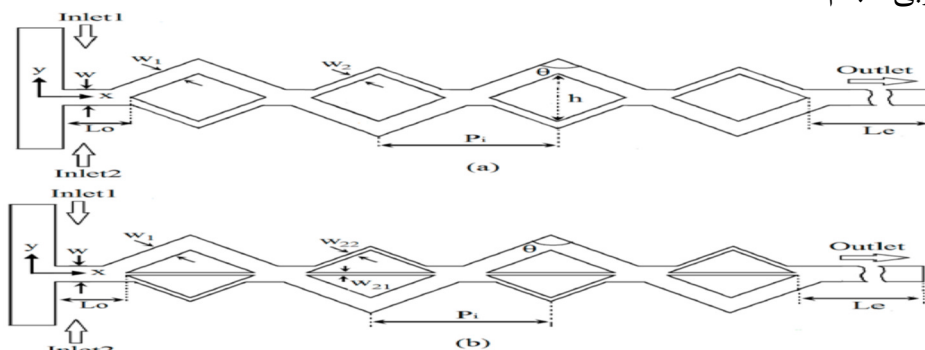
شکل (۲-۱۶) الف: میکرومیکسر T شکل ب: میکرومیکسر با ساختار موجی [۲۴]

حسین^۲ و وانگ [۲۵] میکرومیکسرهای انفعالی با کانالهای سه شاخه لوزی شکل، [شکل (۲-۱۷)] را به طور عددی با استفاده از انسیس و تعدادگره های حدود ۱٫۵ میلیون، بررسی کرده‌اند. در این مقاله شاخص اختلاط و افت فشار ارزیابی و با نتایج مربوط به میکرومیکسر لوزی شکل دو شاخه ای در محدوده‌ی اعداد رینولدز ۱۲۰-۰٫۱ مقایسه شده است. همچنین اثرات پهنای زیر شاخه-ها و زاویه لوزی بررسی شده و اینکه کمترین عرض زیر شاخه دارای بیشترین شاخص اختلاط می‌باشد و بجز در اعداد رینولدز پایین، زاویه ۹۰ درجه دارای بیشترین شاخص اختلاط است. افت فشار در سه شاخه‌ای از افت فشار در دو شاخه ای بزرگتر است ولی این اختلاف نسبی کمتر از ۱۶٫۸٪ است

¹ Solehati

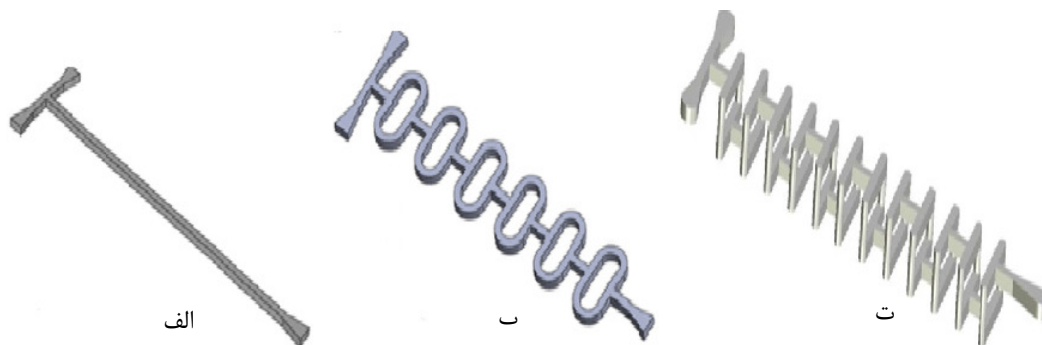
² Hossein

که نشان می‌دهد در محدوده‌ی اعداد رینولدز ۸۰-۳۰، میکرومیکسر سه شاخه ای شاخص اختلاط بالاتری دارد بدون اینکه افزایش زیادی در افت فشار ایجاد شود. در این مقاله مقایسه بین نتایج عددی و تجربی انجام نشده است.



شکل (۲-۱۷): میکرومیکسر های نامتوازن لوزی شکل دو شاخه ای و سه شاخه ای [۲۵]

نیمافر و همکارانش^۱ [۲۶] یک نوع جدید از میکرومیکسر ها را به نام میکرو میکسر H شکل معرفی و به صورت عددی و تجربی بررسی و شاخص اختلاط آن را با دو میکرومیکسر T شکل و O شکل مقایسه کرده است، [شکل (۲-۱۸)]. در طول محاسبات رژیم جریان آرام، سیال نیوتونی و بدون لغزش فرض شده است و اختلاط به علت طبیعت آرام جریان به نفوذ محدود است. محدوده‌ی اعداد رینولدز بررسی شده ۰٫۴-۰٫۸/۱۶ بوده و از روشهای عکس برداری برای بررسی تجربی و از نرم افزار متلب وانسیس فلونت ۱۶ برای حل عددی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در تمام سرعت‌های تست شده، میکرومیکسر H شکل نسبت به T شکل و O شکل دارای شاخص اختلاط بالاتری است و افزایش عدد رینولدز باعث کاهش شاخص اختلاط می‌شود. به طوری که در رینولدز بین ۰-۱ شاخص اختلاط بالاتر از میزان آن در اعداد رینولدز بین ۱-۵ است

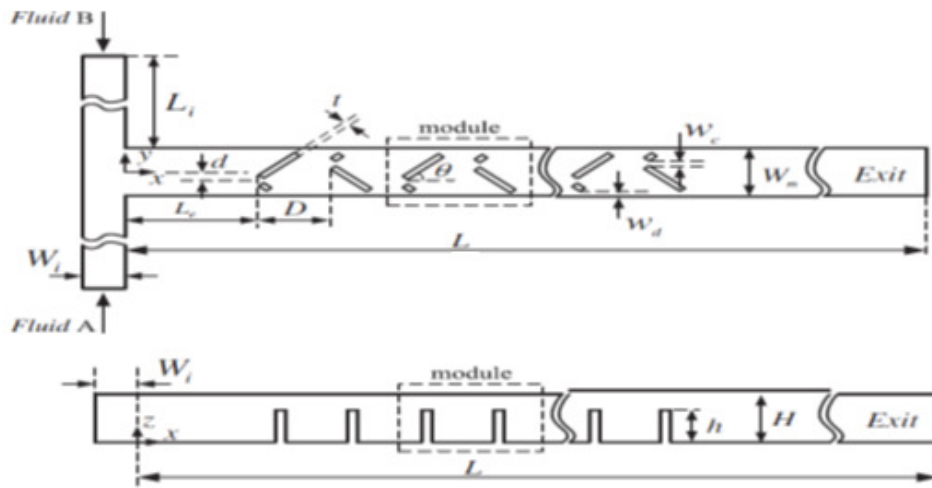


شکل (۲-۱۸) الف: T میکرومیکسر ب: O میکرومیکسر ت: H میکرومیکسر [۲۶]

¹ Nimafar

ایجاد جریان‌های مارپیچی با ایجاد دندان‌های مورب بر کف میکروکانال

هوانگ^۱ و همکارانش [۲۷] اختلاط سیال را در یک میکروکانال T شکل با زائده‌های بال مانند کرده‌اند، [شکل (۲-۱۹)]. تاثیر پارامترهای هندسی روی عملکرد این نوع از میکرومیکسرها را به وسیله‌ی حل عددی تحقیق شده و با نتایج تجربی اعتبارسنجی شده است. نتایج به دست آمده برای گستره وسیعی از اعداد رینولدز نشان می‌دهد که عملکرد میکرومیکسرهای همراه با بالچه‌های واگرا در دو حالت جابجایی غالب و نفوذ غالب، بزرگتر از میکرومیکسرهای بدون بالچه‌های واگراست.

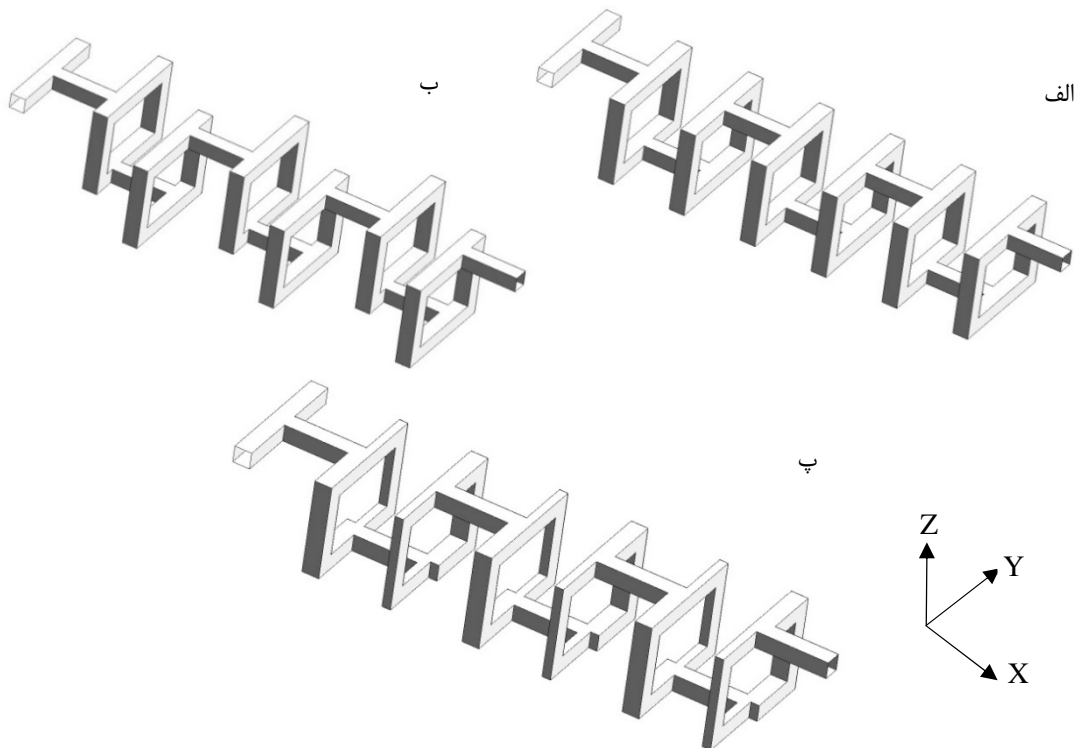


شکل (۲-۱۹) میکرومیکسر T شکل همراه با زائده‌های بال مانند [۲۷]

تعریف مساله

میکرومیکسر H شکل نوع جدیدی از میکرومیکسرهای انفعالی است که علاوه بر شاخص اختلاط بالا، افت فشار کمتری دارد. در این پایان نامه به بررسی میکرومیکسر H شکل و بهبود عملکرد این نوع میکرومیکسر با ایجاد تغییراتی در هندسه آن پرداخته ایم. به طور کلی اختلاط در سه هندسه سه بعدی در تحقیق حاضر به طور عددی تحلیل شده است. تحلیل عددی جریان با فرض جریان سه بعدی، آرام، تراکم ناپذیر و دائم انجام شده است. شرط عدم لغزش بر روی تمام دیوارها اعمال گردیده است. جریان عبوری از کانال اختلاط به صورت توسعه یافته است. در شکل (۲-۲۰) نمای هر یک از این هندسه‌ها نشان داده شده است.

¹ Huang



شکل (۲-۲۰) الف: میکرومیکسر H شکل متوازن ب: نامتوازن طولی پ: نامتوازن مقطعی

جریان سیال‌های اتانول و آب به ترتیب در جهات Y و $-Y$ وارد کانال‌های ورودی می‌شوند. پس از طی طول ورودی جهت توسعه یافته شدن جریان‌ها، دو سیال در یک تقاطع T شکل به یکدیگر برخورد می‌کنند و وارد کانال اختلاط در جهت $+X$ می‌شوند. در جریانهای با ابعاد میکرو به دلیل غالب بودن رژیم جریان آرام، اختلاط فقط به نفوذ ملکولی بین سیالات محدود می‌شود. اما همان‌طور که در این فصل اشاره شد، روشهای متفاوتی جهت تسهیل و تسریع اختلاط در میکرومیکسرهای انفعالی وجود دارد. در این پایان‌نامه، از روش ایجاد هندسه‌های متناوب در مسیر جریان و اصل جداسازی و ترکیب برای افزایش شاخص اختلاط استفاده شده است.

در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی، شاخه‌های واحد جداسازی و ترکیب در اندازه سطح مقطع متفاوت هستند، به طوری که سطح مقطع بزرگتر دوبرابر سطح مقطع کوچکتر است. در میکرومیکسر نامتوازن طولی، شاخه‌های واحد جداسازی و ترکیب دارای طول متفاوت هستند. به طوری که اندازه طول شاخه بزرگتر، سه برابر شاخه کوچکتر است.

از جمله تفاوت‌های پایان‌نامه حاضر با تحقیقات پیشین، طراحی هندسه‌های جدید بر پایه هندسه میکرومیکسر H شکل می‌باشد که افزایش قابل توجه شاخص اختلاط را به دنبال دارد.

همچنین در این پایان نامه رابطه‌ی تجربی و واقعی بین خواص مخلوط آب و اتانول و کسر جرمی اتانول به جای رابطه پیش فرض نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ استفاده می‌شود که تاثیر بسزایی بر کانتورها و نتایج دارد. بررسی میزان اختلاط دو سیال با خواص فیزیکی متفاوت در میکرومیکسر H شکل در اعداد رینولدز بالا نیز از جمله تفاوت‌های این تحقیق با تحقیقات پیشین است.

در این پایان نامه به بررسی تاثیر عدد رینولدز بر میزان شاخص اختلاط در طول کانال و همچنین در مقطع خروجی کانال پرداخته شده است. تاثیر نامتوازنی طولی و مقطعی را بر شاخص اختلاط بررسی شده و نتایج با مقادیر به دست آمده از میکرومیکسر متوازن H شکل، مقایسه شده است. همچنین تاثیر نامتوازنی‌های طولی و مقطعی بر کانتور سرعت و گردابه‌های ایجاد شده در هر هندسه با یکدیگر مقایسه شده است. افت فشار در هر هندسه برای اعداد رینولدز مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شده است. در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده، میکرومیکسری با شاخص اختلاط بیشتر پیشنهاد شده است.

فصل سوم معادلات حاکم و حل آنها

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت دائم شامل پیوستگی (بقای جرم) و بقای مومنتم است:

معادله پیوستگی

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1-3)$$

معادله مومنتم

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \mathbf{g} \quad (2-3)$$

که در آن \vec{V} بردار سرعت،

$$\vec{V} = (u, v, w) \quad (0-3)$$

و $\vec{\tau}$ تانسور تنش برشی و به صورت معادله (3-4) تعریف می شود:

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T) - \frac{2}{3} \delta (\nabla \cdot \vec{V}) \right] \quad (4-3)$$

با حل این معادلات متغیرهای سرعت و فشار به دست می آیند. این معادلات برای ترکیبهای همگن تک فاز بوده و در سیستمهای میکروسیالی که حاوی یک یا بیشتر از یک نمونه هستند، برای بیان پدیده انتقال جرم به معادله دیگری نیاز است. برای تعیین غلظت یا دما از معادله نفوذ جابجایی استفاده می شود.

$$\rho \vec{V} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot (\rho D \nabla \phi) \quad (5-3)$$

در اینجا \vec{V} ، ρ ، ϕ ، D ، μ ، g و P به ترتیب نشانگر بردار سرعت، چگالی سیال، کسر جرمی یکی از سیالات ورودی، ضریب نفوذ، لزجت سیال، شتاب جاذبه و فشار هستند. متغیرهای ρ ، μ فقط تابعی از کسر جرمی هستند (در دمای ثابت) و وابستگی آنها به فشار قابل چشم پوشی است [28].
توصیف ویژگیهای جریان با اعداد بدون بعد رینولدز، پکله و اشمیت (Re ، Pe و Sc) بیان می گردد:

$$Re = \frac{Ud}{\nu}; \quad Pe = \frac{Ud}{D} = Re Sc; \quad Sc = \frac{\nu}{D}$$

که U سرعت متوسط و d قطر هیدرولیکی است که به عنوان طول مشخصه سیال در نظر گرفته شده است که برای یک کانال با مقطع مستطیلی $(W*H)$:

. رابطه بین چگالی و لزجت مخلوط با کسر جرمی

$$d = \frac{2WH}{(W+H)} \quad (۶-۳)$$

مهمترین بخش این شبیه سازی مربوط به ارتباط بین خواص مخلوط آب و اتانول، چگالی و لزجت، با ترکیب مخلوط، کسر جرمی یکی از سیالات (در اینجا اتانول) است. می دانیم که $\rho(\varphi)$ و $\mu(\varphi)$ با رابطه خطی پیش فرض درانسیس فلونت ۱۶ کاملاً متفاوت هستند. برای مثال زمانی که چگالی به صورت معکوس حجم مخصوص باشد، به طور کلی داریم [۲۸]:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varphi}{\rho_A} + \frac{1-\varphi}{\rho_B} + \Delta v_{mix}(\varphi) \quad (۷-۳)$$

که در آن ρ_B و ρ_A چگالی سیال های خالص ورودی و $\Delta v_{mix}(\varphi)$ حجم اختلاط هستند. حجم اختلاط به حجم بر واحد جرمی گفته می شود که در طی فرآیند اختلاط دو سیال با کسر جرمی مشخص، به مخلوط اضافه می شود یا از آن کم می شود. صفر بودن مقدار $\Delta v_{mix}(\varphi)$ ، برای مثال زمانی که مخلوط رفتاری شبیه به سیال های اندروالس دارد، به معنای بقاء حجم است. گرچه این موضوع، بقاء حجم، در مورد مخلوط آب و اتانول صادق نیست. برای مثال زمانی که ۱ لیتر آب و ۱ لیتر اتانول با یکدیگر مخلوط می شوند، حجم حاصل برابر با ۱٫۹۱ لیتر است که متناظر با ۰٫۵٪ کاهش حجم می باشد [۲۸].

می دانیم که در مورد لزجت به عنوان مقاومت سیال در برابر پخش مومنوم، برای یک اختلاط

ایده آل داریم [۲۸]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{\varphi}{\mu_A} + \frac{1-\varphi}{\mu_B} \quad (۸-۳)$$

که در آن μ_B و μ_A لزجتهای سیال های خالص ورودی هستند. ولی برای اختلاط غیر ایده آل:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{\varphi}{\mu_A} + \frac{1-\varphi}{\mu_B} + \Delta f_{mix}(\varphi) \quad (۹-۳)$$

که $\Delta f_{mix}(\varphi)$ نشان دهنده غیر ایده‌آل بودن اختلاط است. این جمله به طور خاص در مطالعه ما بسیار مهم است، زیرا که دردمای 20°C مخلوطی از آب و اتانول با $0.3 < \varphi < 0.6$ لزجتی تقریباً سه برابر لزجت آب خالص دارد. چنین رفتار مشابه‌ای برای بسیاری از مخلوط‌های چندگانه با حلال-های ارگانیک دیده می‌شود [۲۹]. جدول (۳-۱) مقادیر چگالی و لزجت مخلوط آب و اتانول را در دمای 20°C برای کسرهای جرمی متفاوت نشان می‌دهد. با استفاده از اطلاعات تجربی موجود در جدول (۳-۱)، نمودارهای مربوط به ارتباط چگالی و لزجت مخلوط آب و اتانول به کسر جرمی اتانول رسم شده است، شکل [۳-۱ و ۳-۲]. توابع چند جمله‌ای درجه ۴ برای هر دو خاصیت فیزیکی به صورت UDF در قسمت خواص مربوط به مخلوط درانسیس فلونت ۱۶ بارگذاری شده است.

تابع مربوط به چگالی:

$$\rho = 72.3 \varphi^4 - 131.2 \varphi^3 - 11.1 \varphi^2 - 136.2 \varphi + 996.9 \quad (۱۰-۳)$$

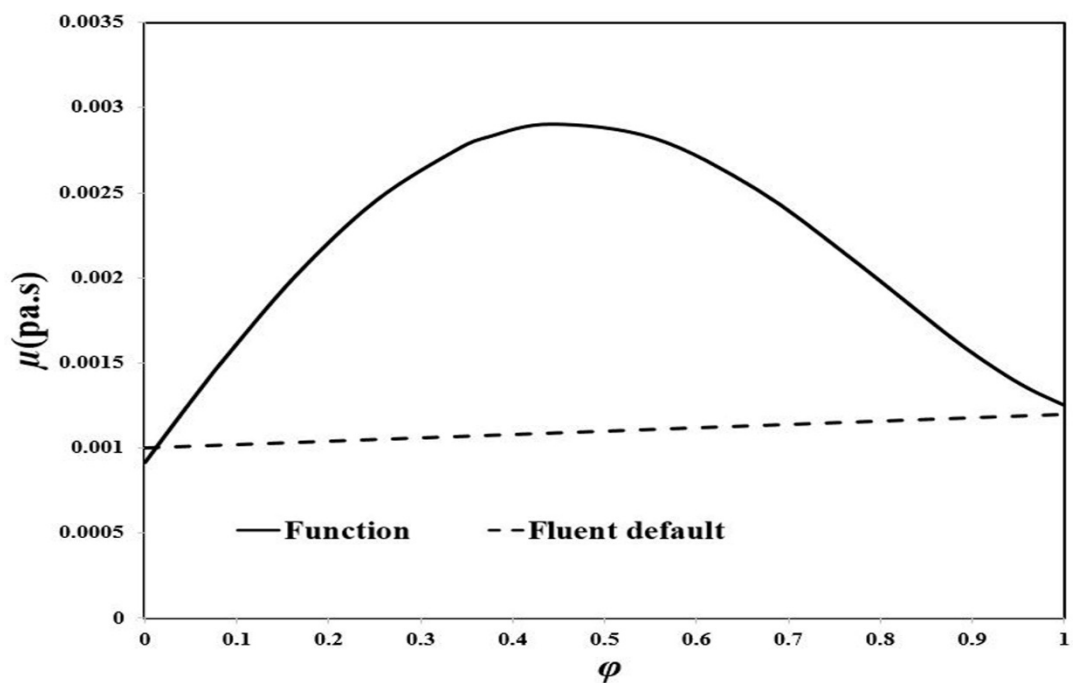
تابع مربوط به لزجت:

$$\mu = 0.010151 \varphi^4 - 0.01578 \varphi^3 - 0.0013323 \varphi^2 + 0.007299 \varphi + 0.0009145$$

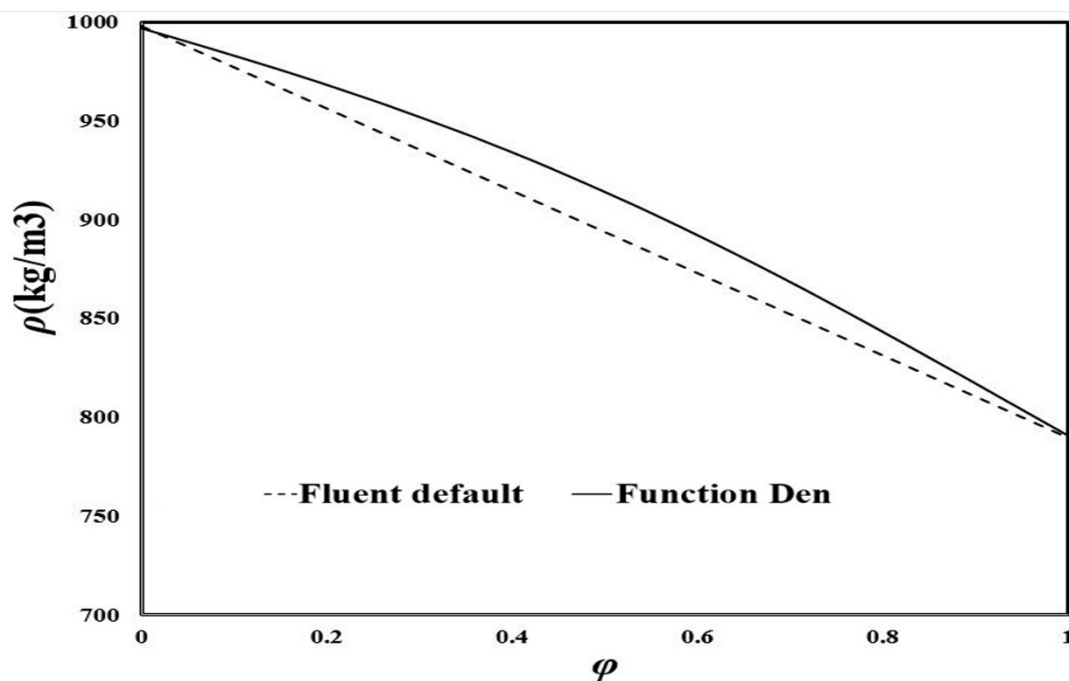
(۱۱-۳)

جدول (۳-۱) مقادیر چگالی و لزجت مخلوط آب و اتانول در دمای 20°C [۲۹]

Mass Fraction Of Ethanol	Mixture Viscosity(pa.s)	Mixture Density(kg,m3)
0	0.00103	998.2
0.0175	0.00107	995.2
0.035	0.00116	992
0.046	0.00123	989.8
0.065	0.00131	987.1
0.0812	0.00141	984.3
0.1638	0.00192	973.1
0.252	0.00242	961
0.341	0.00274	946.2
0.373	0.00281	939.9
0.442	0.00284	926
0.554	0.00276	901.1
0.666	0.00246	875.6
0.765	0.00212	852.3
0.875	0.00173	824.5
0.925	0.00154	811.4
0.962	0.00138	801
1	0.00121	789.5



شکل (۳-۱) نمودار لزجت بر حسب کسر جرمی اتانول



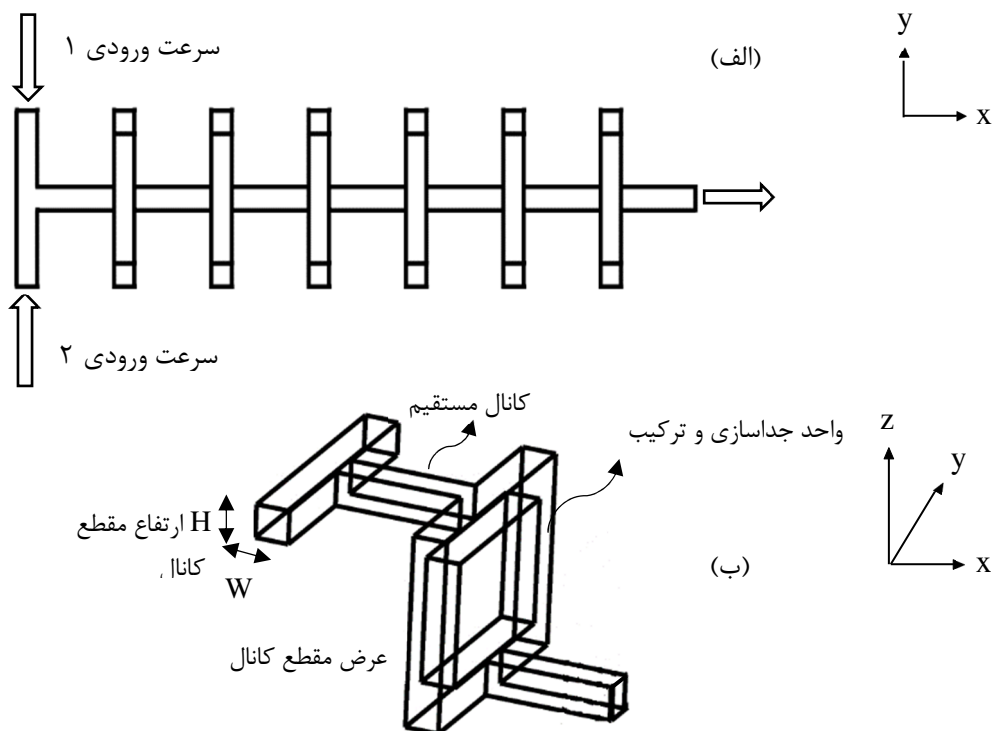
شکل (۳-۲) نمودار چگالی بر حسب کسر جرمی اتانول و رابطه بین آن‌ها

با توجه به شکل (۳-۱) درمی‌یابیم که تفاوت زیادی بین نتایج تجربی و واقعی میزان لزجت مخلوط با مقادیر پیش فرض درانسیس فلونت ۱۶ وجود دارد و درستی نتایج منوط بر در نظر گرفتن

این مقادیر واقعی در جریان حل می‌باشد. نکته بسیار قابل توجه در این شکل این است که لزجت مخلوط تقریباً در بیش از ۹۰٪ محدوده کسر جرمی بیش‌تر از لزجت هر دو سیال خالص ورودی است. شکل (۲-۳) تفاوت اندکی میان نتایج تجربی و واقعی میزان چگالی مخلوط و مقادیر پیش فرض انسیس فلونت ۱۶ را نشان می‌دهد که می‌توان گفت استفاده از تابع پیش فرض انسیس فلونت ۱۶ بلامانع است. در تحقیق حاضر این میزان اندک اختلاف نیز اعمال شده است. برخلاف لزجت، مقادیر چگالی مخلوط در تمام محدوده کسر جرمی مقاداری مابین چگالی اتانول و آب دارد.

هندسه و شرایط مرزی

هندسه و شرایط مرزی میکرومیکسر H شکل در شکل (۳-۳) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، دو شرط مرزی سرعت ورودی جهت ورودی‌های آب و اتانول و یک شرط مرزی جریان خروجی جهت خروج سیال مخلوط شده اعمال شده است. سایر مرزها دیواره محسوب می‌شوند. کانال اختلاط مستقیم و واحدهای جداسازی و ترکیب هم بر روی شکل مشخص شده‌اند.



شکل (۳-۳) هندسه و شرایط مرزی میکرومیکسر H شکل متوازن (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی

روش حل

برای فعال سازی معادله نفوذ-جابجایی از گزینه Species transport استفاده شده است. در این قسمت از نرم افزار بایستی سیالات و ضریب نفوذ مابین آنها و همچنین نحوه محاسبه خواص مخلوط سیالات در نرم افزار بارگذاری گردد. بدین منظور UDF های مربوط به چگالی و لزجت مخلوط آب و اتانول که بر اساس توابع (۳-۱۰) و (۳-۱۱) نوشته شده است با کامپایلر داخلی انسیس فلونت ۱۶ بارگذاری شده است. شرایط مرزی شامل دو شرط مرزی سرعت ورودی (برای دو سیال مخلوط شونده، در هر ورودی فقط یک سیال و با کسر جرمی وارد می شود) و یک شرط مرزی جریان خروجی (برای خروج سیال مخلوط شده، تمام جریان ورودی از این مرز خارج می شود) و شرط مرزی دیواره می باشد. شرط عدم لغزش و شار نفوذی صفر بر روی دیواره اعمال شده است. معادله انرژی به دلیل دما ثابت بودن فرآیند حل نشده است [۲۸، ۳۰، ۳۱]. میکرومیکسرها همگی به صورت افقی قرار گرفته اند، بنابر این شتاب جاذبه در راستای محور Z اعمال شده است. کوپلینگ سرعت و فشار با روش simplec و جهت کاهش نوسانات گسسته سازی فشار با روش standard و جهت افزایش دقت پاسخ گسسته سازی معادلات مومنتم و نفوذ-جابجایی با روش Quick صورت گرفته است. حل همگرا زمانی به دست می آید که میزان باقیمانده ها کمتر از $10^{-6} * 1$ شود.

نحوه محاسبه شاخص اختلاط

در اکثر مطالعات صورت گرفته، کیفیت اختلاط توسط مربع واریانس متوسط کسر جرمی در هر مقطع عمود بر جهت جریان ارزیابی می گردد که به صورت معادله (۳-۱۲) تعریف می شود [۲۸، ۳۰، ۳۱].

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{s} \int_s [\phi(x, y, z) - \bar{\phi}(x)]^2 dydz = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2 \quad (۳-۱۲)$$

که در آن $r=(x,y,z)$ و N تعداد نقاط نمونه هر مقطع با مساحت s و ϕ_i کسر جرمی سیال اتانول در نقطه i در سطح مقطع و $\bar{\phi}(x)$ کسر جرمی متوسط در سطح مقطع عرضی با مکان x است و به صورت معادله (۳-۱۳) تعریف می گردد.

$$\bar{\phi}(x) = \int_s \phi(r) dydz = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \phi_i \quad (۳-۱۳)$$

و نهایتاً نحوه محاسبه شاخص اختلاط (MI) به صورت معادله (۳-۱۴) است.

$$MI = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{max}}, \quad \sigma_{max} = \sqrt{\bar{\phi}(x)(1 - \bar{\phi}(x))} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن σ و σ_{max} به ترتیب واریانس و حداکثر واریانس کسر جرمی در سطح مقطع عرضی با مکان x است.

بررسی صحت و دقت نتایج

در روش‌های عددی، یکی از مباحث مهم تاثیر اندازه شبکه بر نتایج است. همچنین بدست آوردن نتایج مستقل از شبکه از اهداف هر تحقیق عددی است. شبکه تولید شده و تعداد حجم کنترل‌های به‌وجود آمده تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج بدست آمده و مدت زمان اجرای برنامه کامپیوتری دارند. با افزایش تعداد حجم‌های کنترل و کوچکتر نمودن ابعاد حجم کنترل‌ها، به‌ویژه در مناطق با گرادیان زیاد، می‌توان رفتار جریان را به‌طور دقیق‌تر بررسی نمود. به‌دنبال رسیدن به توصیف رفتار دقیق‌تر جریان، مدت زمان اجرای برنامه نیز افزایش چشم‌گیری خواهد داشت. بایستی با ارزیابی صحیح میزان افزایش دقت، توصیف رفتار جریان در کنار افزایش مدت زمان اجرای برنامه، بتوان به جواب‌های قابل قبولی برای پارامترهای مختلف جریان دست یافت.

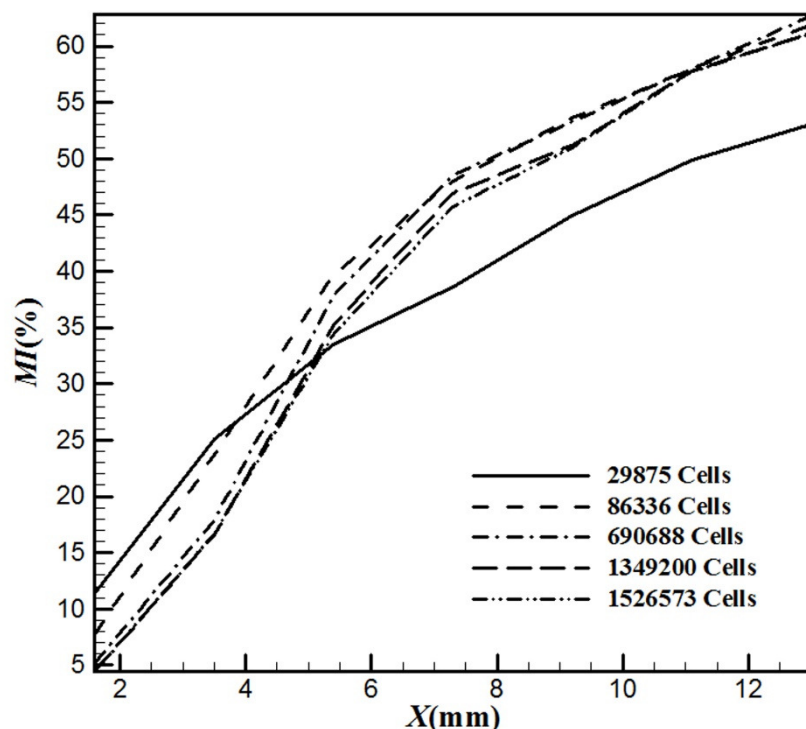
استقلال حل از شبکه

برای بررسی استقلال حل از شبکه، شاخص اختلاط در فواصل مختلف از ورودی کانال اختلاط در میکرومیکسر H شکل به ازای عدد رینولدز ۵۰ در شبکه‌های متفاوت بررسی شده است. مشخصات شبکه‌بندی‌های متفاوت در جدول (۳-۲) ارائه گردیده است.

جدول (۳-۲) مشخصات تعداد گره و سلولها در استقلال حل از شبکه

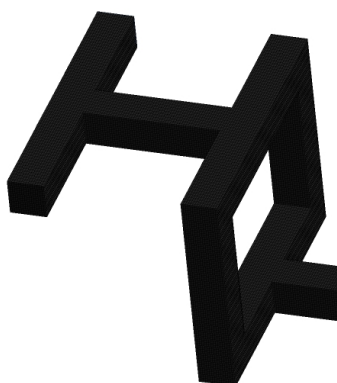
	شبکه بندی ۱	شبکه بندی ۲	شبکه بندی ۳	شبکه بندی ۴	شبکه بندی ۵
گره	۴۴۵۸۸	۱۰۸۸۶۴	۷۷۸۲۷۷	۱۴۸۵۲۸۸	۱۷۲۱۰۴۵
سلول	۲۹۸۷۵	۸۶۳۳۶	۶۹۰۶۸۸	۱۳۴۹۲۰۰	۱۵۲۶۵۷۳

شبكة بندی میکرومیکسر H شکل با روش *sub map* و با سلولهای مکعبی شکل سازمان یافته صورت گرفته است. نمودار شاخص اختلاط بر حسب فواصل مختلف از ورودی کانال اختلاط به ازاء شبکه‌های مختلف در عدد رینولدز ۵۰ در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) نمودار شاخص اختلاط در طول کانال اختلاط برای شبکه‌های متفاوت

با توجه به شکل (۳-۴) درمی‌یابیم که ریز کردن شبکه از ۱۳۴۹۲۰۰ به ۱۵۲۶۵۷۳ تاثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. بنابر این شبکه بندی به ازای تعداد گره ۱۴۸۵۲۸۸ و تعداد سلول ۱۳۴۹۲۰۰ به عنوان شبکه بندی نهایی و بهینه مساله انتخاب می‌شود، [شکل (۳-۵)].



شکل (۳-۵) شبکه بندی نهایی مساله

نکته قابل توجه در تمام مراحل حل در این پایان نامه، نحوه محاسبه عدد رینولدز است. در این پایان نامه عدد رینولدز بر مبنای خواص فیزیکی سیال آب و در ورودی آب تعریف می‌شود و دو برابر سرعت کانال ورودی آب به عنوان سرعت مورد استفاده در محاسبه عدد رینولدز انتخاب شده است [۲۶، ۲۸]. برای مثال نحوه محاسبه سرعت ورودی متناظر با عدد رینولدز ۵۰ برای کانال ورودی با مقطع مربعی ($W = H = 0.4 * 10^{-3} m$) به صورت زیر است.

محاسبه قطر هیدرولیکی:

$$d = \frac{2W}{W+H} = \frac{2*0.4*0.4*10^{-6}}{0.8*10^{-3}} = 0.4 * 10^{-3} m \quad (\text{قطر هیدرولیکی})$$

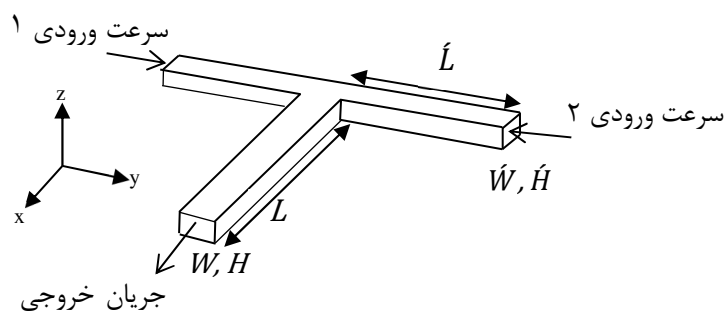
محاسبه سرعت ورودی کانالها:

$$Re = \frac{\rho(2U)d}{\mu} \rightarrow 2U = \frac{Re \cdot \mu}{d \cdot \rho} \rightarrow 2U = \frac{50 * 0.00089}{998 * 0.4 * 10^{-3}} = 0.1115 m/s$$

$$\rightarrow \text{سرعت ورودی کانالها} = \frac{0.1115}{2} = 0.05574 m/s$$

اعتبار سنجی نتایج .

جهت اعتبار سنجی روش شبیه سازی در این تحقیق، از مساله T میکرومیکسر شبیه سازی شده توسط گلتی و همکاران [۲۸] استفاده شده است. گلتی و همکارانش به بررسی عددی اختلاط غیر ایده آل آب و اتانول در میکرومیکسر T شکل در اعداد رینولدز متفاوت پرداخته‌اند. شکل (۳-۶) هندسه T میکرومیکسر شبیه سازی شده و ابعاد آن را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶) هندسه و ابعاد T میکرومیکسر شبیه سازی شده در اعتبار سنجی [۲۸]

کانال اختلاط دارای سطح مقطع مستطیلی با نسبت اضلاع ۲:۱ (عرض سطح مقطع $W=2H$ و ارتفاع) و طولی معادل با $L=5H$ است. هردو کانال ورودی دارای مقطع مربعی و با اندازه ی ضلع $W'=H$ و طولی برابر با $L'=5H$ هستند. همه ابعاد در میکرومیکسر T شکل بر اساس مقدار $H=100\mu m$ محاسبه شده‌اند. محاسبه عدد رینولدز در این مقاله بر مبنای خواص فیزیکی آب، سرعت آب در کانال ورودی و ابعاد کانال اختلاط انجام شده است [۲۸].

شبکه بندی T میکرومیکسر با روش sub map و با سلولهای مکعبی سازمان یافته به تعداد ۵۰۰ هزار سلول صورت گرفته است.

شرایط مرزی و ترمودینامیکی:

شرط عدم لغزش و همچنین شار نفوذی برابر با صفر بر روی دیواره‌های کانال اختلاط

- شرط مرزی out flow در خروجی
- پروفایل سرعت توسعه یافته در ورودی‌ها
- مقادیر چگالی آب و اتانول در دمای $20^{\circ}C$ به ترتیب برابر با $998 \frac{kg}{m^3}$ و $789 \frac{kg}{m^3}$ در نظر گرفته شده است.
- مقادیر لزجت آب و اتانول در دمای $20^{\circ}C$ به ترتیب برابر با $0.001pa.s$ و $0.0012pa.s$ در نظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر ارائه شده در [۲۸].
- مقادیر چگالی و لزجت مخلوط توسط معادلات $(3-10)$ و $(3-11)$ محاسبه شده است. شتاب جاذبه برابر با $9/81$ در جهت Z - اعمال شده است.

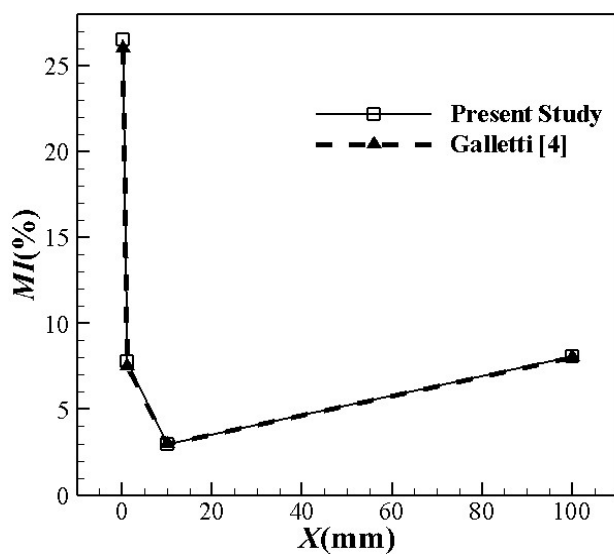
چهار عدد رینولدز بررسی شده در این مقاله به منظور اعتبار سنجی، اعداد رینولدز 0.1 ، 1 ، 10 و

100 هستند. شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسر T شکل شبیه سازی شده با نتایج بدست

آمده توسط گلتی و همکاران در نمودار شکل (۷-۳) آورده شده است. در عدد رینولدز 0.1 شاخص

اختلاط مقدار بیشتری نسبت به اعداد رینولدز 1 ، 10 و 100 به خود اختصاص داده است. در اعداد

رینولدز پایین به دلیل عدم وجود جریان‌های گردابه‌ای، اختلاط به نفوذ محدود می‌شود. در عدد رینولدز ۰٫۱ زمان مجاورت سیال بسیار بیشتر از اعداد رینولدز مورد بررسی دیگر است و سیالات فرصت کافی جهت نفوذ در یکدیگر را دارند. با افزایش عدد رینولدز تا عدد رینولدز ۱۰ در کنار عدم وجود جریان‌های گردابه‌ای، زمان مجاورت و نفوذ سیالات نیز کاهش می‌یابد، در نتیجه شاهد کاهش شاخص اختلاط هستیم. با افزایش عدد رینولدز از ۱۰ تا ۱۰۰ نمودار افزایش شاخص اختلاط را نشان می‌دهد که دلیل این امر را می‌توان شروع تشکیل جریان‌های گردابه‌ای و شرکت آن‌ها در فرآیند اختلاط دانست. شکل (۳-۷) نتایج حاصل از اعتبارسنجی را نشان می‌دهد. همخوانی نتایج شبیه سازی و مقاله اصلی بیانگر صحت نحوه‌ی شبیه سازی این مقاله است.



شکل (۳-۷) مقایسه تغییرات شاخص اختلاط در طول میکرومیکسر T شکل در شبیه سازی انجام شده و مقاله اصلی

فصل چهارم نتایج مساله

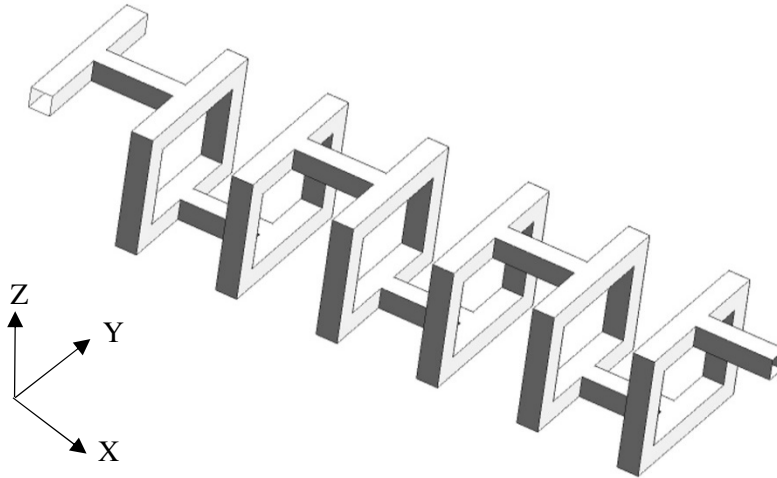
. مقدمه

میکرومیکسرها پتانسیل‌های کاربردی وسیعی در صنعت دارند. در تکنولوژی میکرو، میکرومیکسرها کاربردهایی از قبیل سیستم‌های بیولوژی، میکروآکتورها برای واکنش‌های شیمیایی و آزمایشگاه بر روی تراشه و ... دارند و این به این معناست که امروزه جامعه علمی و مهندسی در ارتباط زیادی با سیستم‌های میکروسیالی هستند. بنابر این طراحی و ساخت میکرومیکسرها با شاخص اختلاط بالا و افت فشار پایین از اهداف اصلی محققان است. همان طور که در فصل یک بیان گردید، یکی از روش‌های اصلی افزایش شاخص اختلاط در یک میکرومیکسر، ایجاد هندسه‌های متناوب در مسیر جریان جهت ایجاد گردابه‌های جریانی و اختلاط سریع‌تر دو جریان اصلی است. یکی از اصول پرکاربرد در این روش، اصل جداسازی و ترکیب^۱ جریان در طول کانال اختلاط می‌باشد. به این صورت که کانال اختلاط در طول مسیر به دو یا چند شاخه تقسیم شده و جریان را تقسیم می‌کند و شاخه‌های جریان پس از طی یک مسیر به یکدیگر می‌پیوندند. این اصل باعث افزایش سطح تماس جریانهای دو سیال گردیده و در نتیجه افزایش شاخص اختلاط را به جهت تسهیل فرآیند نفوذ، در پی دارد [۲۲]. این تحقیق نیز بر پایه‌ی روش ایجاد هندسه متناوب در طول کانال و اصل کاربردی و مهم جداسازی و ترکیب بنا شده است و تاثیرات قابل توجه آن را بر اختلاط بررسی می‌کند. در ادامه اختلاط میکرومیکسر H شکل در سه حالت متوازن، نامتوازن طولی و نامتوازن مقطعی در سه عدد رینولدز (۲۰، ۵۰، ۱۰۰) بررسی شده است.

¹ Split and Recombination

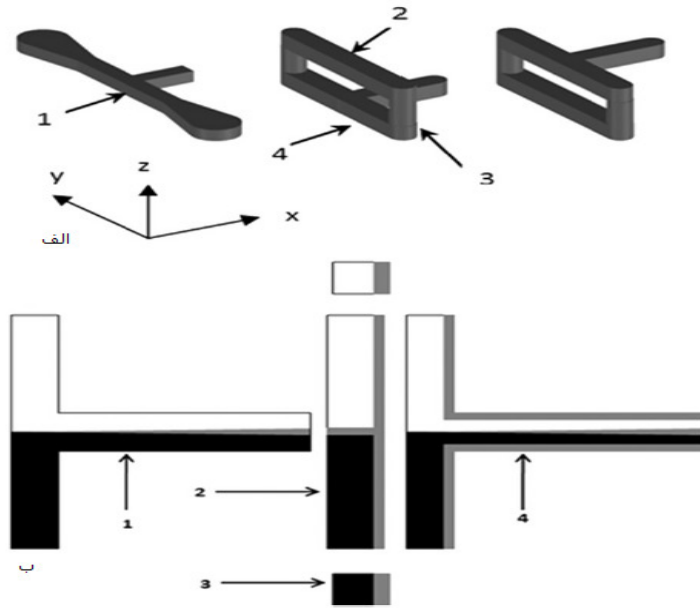
تأثیر هندسه بر شاخص اختلاط و افت فشار

هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل متوازن در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۴-۱) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل متوازن

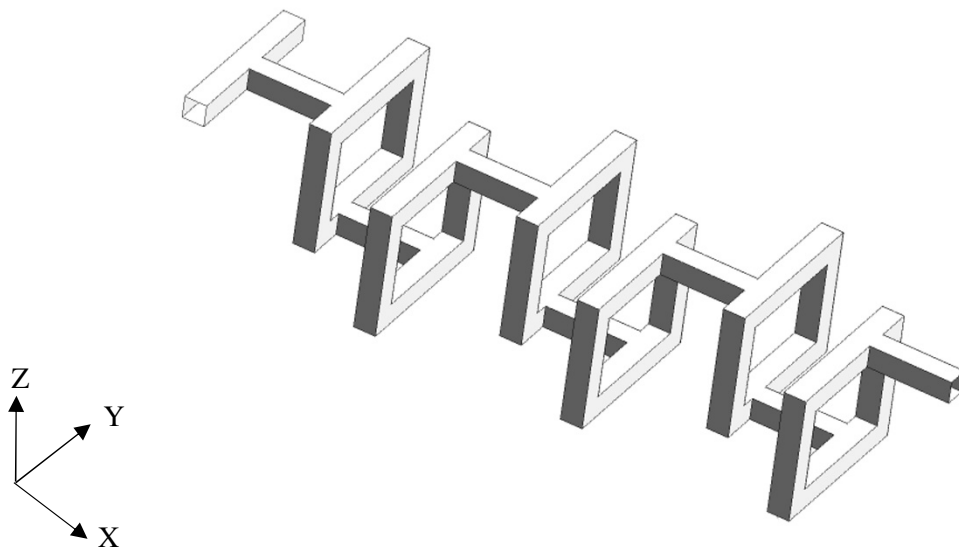
همان طور که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود، میکرومیکسر H شکل دارای دو کانال ورودی و یک کانال خروجی و کانالهای اختلاط با ابعاد یکسان است. سیال‌های خالص از دو ورودی مجزا و با سرعت‌های یکسان وارد کانالهای ورودی شده و در یک تقاطع T شکل بهم برخورد کرده و وارد کانال اختلاط مستقیم می‌گردند. کانال اختلاط مستقیم به دو شاخه یکسان هم از نظر طولی و هم از نظر مقطعی تقسیم شده است. جریان به طور متوازن به شاخه‌های واحد جداسازی و ترکیب اول هدایت می‌شود. متوازن بودن شاخه‌های کانال اختلاط به معنای برابر بودن سرعت‌های سیال در هریک از شاخه‌هاست. دو خط جریان پس از طی مسیری مشابه، به هم می‌پیوندند. در نهایت پس از طی شش واحد جداسازی و ترکیب مشابه، جریان مخلوط شده از مقطع خروجی به بیرون هدایت می‌شود. در واقع مزیت مهم این نوع میکرومیکسر، توانایی جابجایی سیال‌های مجاور دیواره به قسمت مرکزی کانال اختلاط جهت مشارکت بیشتر در فرآیند نفوذ است. شکل (۴-۲) نحوه حرکت و اختلاط سیال‌ها در میکرومیکسر H شکل متوازن را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۲) جزییات ساختار میکرومیکسر H شکل الف: قسمت های مختلف میکرومیکسر ب: صفحه صفحه کردن متوالی در حین عبور از میکرومیکسر [۲۶]

همان طور که مشاهده می شود، سیال های مجاور دیواره نیز در حین مسیر به قسمت مرکزی کانال اختلاط جابجا شده و فرآیند اختلاط را بهبود می بخشند.

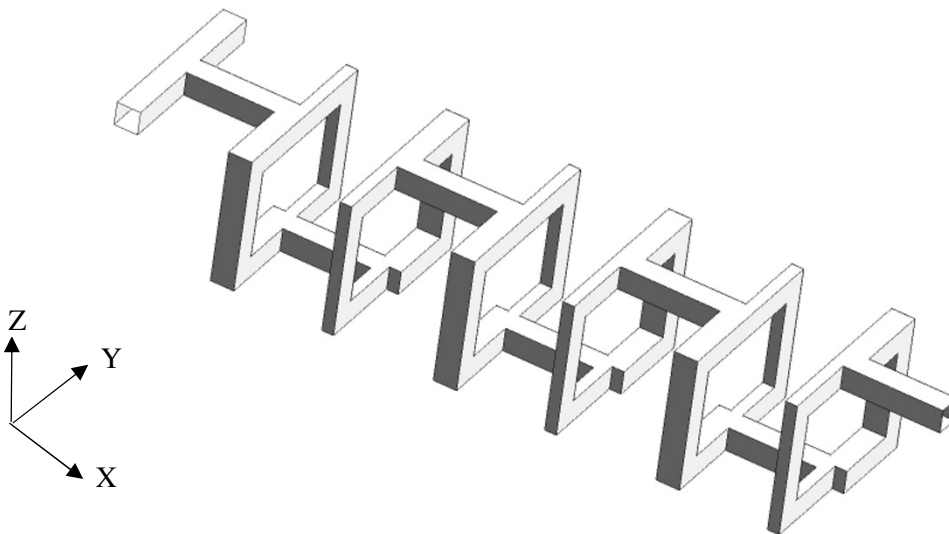
هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نا متوازن طولی در شکل (۴-۳) نشان داده شده است.



شکل (۴-۳) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نا متوازن طولی

در این نوع جدید از میکرومیکسرها، نامتوازنی طولی باعث ایجاد نامتوازنی جریان می‌گردد. به این معنا که مقدار جریان عبوری از مسیری با طول کمتر بیشتر است. به دلیل متفاوت بودن دبی جریان در هر شاخه، سرعت سیال در هر شاخه متفاوت است. اختلاف سرعت دو جریان باعث نفوذ دو جریان در یکدیگر در محل تقاطع شاخه‌ها شده و به تبع آن فرآیند نفوذ تسریع می‌گردد. در نظر داشته باشید که نامتوازنی طولی در جهات y ، $-y$ از هر واحد جداسازی و ترکیب واحد بعد، به طور متناوب جابجا می‌شود. به عنوان مثال، در واحد اول شاخه سمت راست دارای طول $650\ \mu\text{m}$ و شاخه سمت چپ دارای طول $1950\ \mu\text{m}$ است. این در حالی است که در واحد دوم شاخه سمت راست و چپ به ترتیب طولی برابر با $1950\ \mu\text{m}$ و $650\ \mu\text{m}$ دارند. نسبت نامتوازنی طولی در این پایان نامه $3:1$ است بدین معنا که طول شاخه بزرگتر سه برابر طول شاخه کوچکتر است.

هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نامتوازن مقطعی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.



شکل (۴-۴) هندسه سه بعدی میکرومیکسر H شکل نامتوازن مقطعی

در این میکرومیکسر کانال اختلاط به دو زیرشاخه تقسیم شده است که دارای عرض‌های متفاوت هستند. زیرشاخه با عرض بیشتر، زیر شاخه اصلی و زیر شاخه با عرض کمتر، زیرشاخه فرعی نامیده شده است. میکرومیکسر به طور کلی دارای شش واحد جداسازی و ترکیب است. دلیل اصلی ایجاد زیرشاخه‌های نامتقارن ایجاد برخوردهای غیرمتعادل به دلیل تفاوت در اینرسی جریان‌های سیالی دو زیرشاخه و افزایش میزان اختلاط است. با توجه به مطالعات پیشین [۲۲]، که نشان

می‌دهند انتقال دادن زیرشاخه اصلی به دو طرف محور X شاخص اختلاط بیشتری را نسبت به ثابت نگه داشتن آن در یک طرف محور به دنبال دارد، در اینجا زیرشاخه اصلی به دو طرف محور X انتقال داده شده است.

ابعاد میکرومیکسرهای H شکل متوازن، نامتوازن طولی و نامتوازن مقطعی در جدول (۴-۱)

آورده شده است. لازم به ذکر است که اعداد همگی در واحد میکرومتر هستند.

جدول (۴-۱) ابعاد میکرومیکسرها

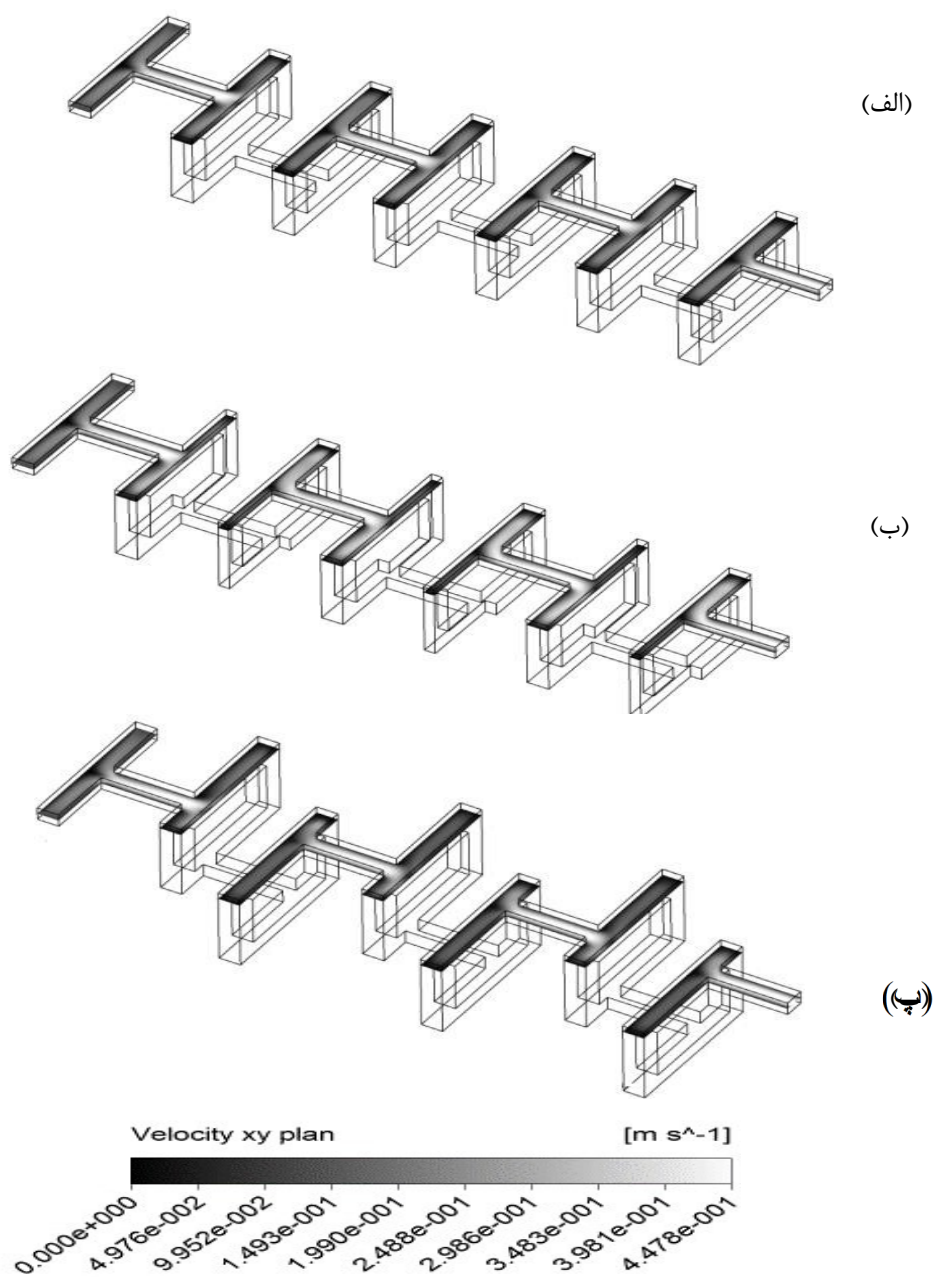
نامتوازن مقطعی		نامتوازن طولی		متوازن		ابعاد	
طول	مقطع	طول	مقطع	طول	مقطع		
۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	مستقیم	کانال
۱۳۰۰	۴۰۰×۲۰۰	۶۵۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۳۰۰	۴۰۰×۴۰۰	راستای y	اختلاط
۱۳۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۹۵۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۳۰۰	۴۰۰×۴۰۰	راستای -y	
۱۵۰۰	۴۰۰×۲۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	راستای z	
۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۵۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۱۳۰۰	۴۰۰×۴۰۰	کانال	ورودی

از روشهای افزایش شاخص اختلاط در میکرومیکسرهاى انفعالی ایجاد هندسه‌های متناوب در مسیر جریان و القای بی‌نظمی در جریان سیالات جهت کشاندن و بهم پیچاندن خطوط جریان است. از اصول پرکاربرد در این روش می‌توان به اصل جداسازی و ترکیب اشاره کرد که با تسهیل فرآیند نفوذ باعث کاهش طول مسیر لازم برای اختلاط میگردد. در این تحقیق با ایجاد نامتوازنی در واحدهای جداسازی و ترکیب دو هندسه جدید بر پایه هندسه میکرومیکسر H شکل طراحی و تاثیر ترکیب این دو روش بر شاخص اختلاط و افت فشار بررسی و با نتایج مربوط به میکرومیکسر H شکل متوازن مقایسه شده است.

همان طور که اشاره شد، ایجاد نامتوازنی در مسیر جریان، باعث تقسیم غیر یکسان جریان در شاخه‌های واحدهای جداسازی و ترکیب میشود. از آن جهت که جریان سیال تمایل به عبور از

مسیری با مقاومت کمتر دارد، در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی و میکرومیکسر نامتوازن طولی جریان سیال به ترتیب تمایل به عبور از شاخه با سطح مقطع بزرگتر و طول کمتر دارد. تقسیم نابرابر جریان باعث ایجاد نابرابری در سرعت سیالات در هر یک از شاخه‌ها می‌شود.

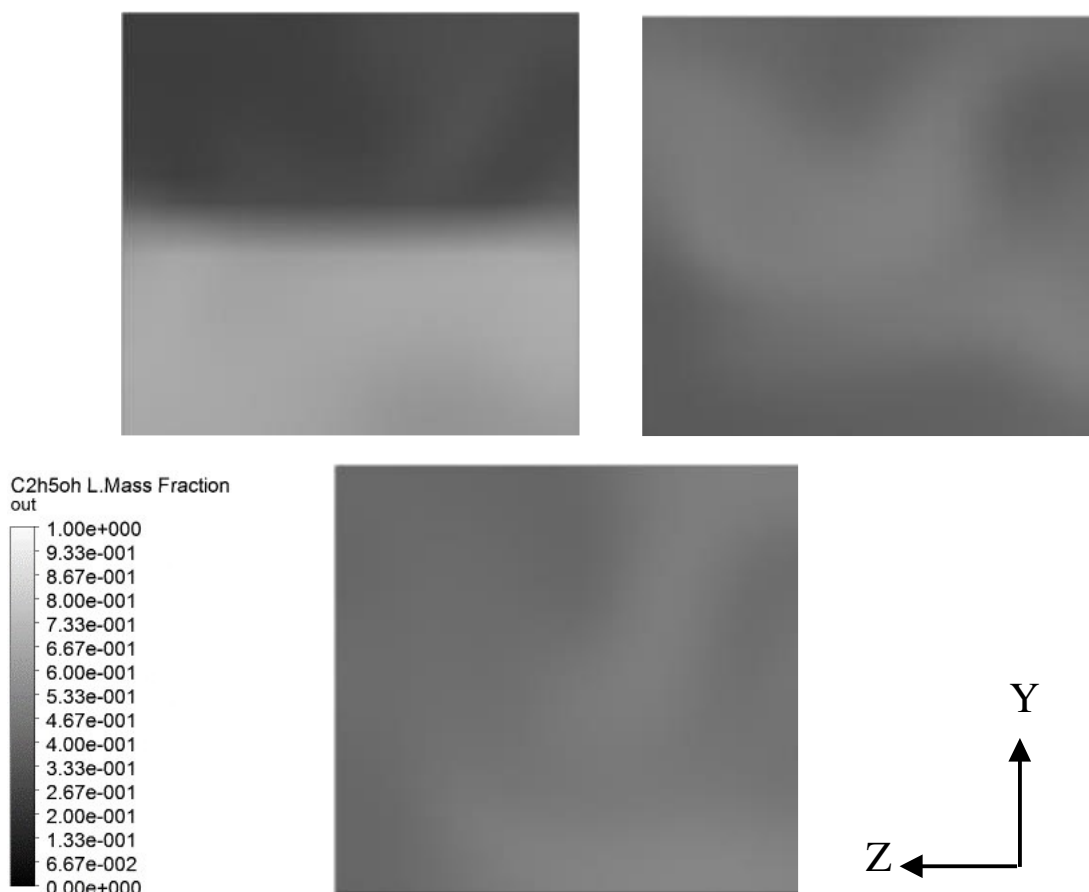
در شکل (۴-۵) نحوه‌ی تغییر مسیر سیال و تفاوت سرعت در شاخه‌های واحد جداسازی و ترکیب در میکرومیکسرها دیده می‌شود به این صورت که در میکرومیکسره‌های نامتوازن طولی و مقطعی به ترتیب شاخه‌های کوتاه‌تر و با سطح مقطع بزرگتر سرعت و حجم عبوری سیال بیشتری دارد، در حالی که در میکرومیکسر متوازن تغییر مسیر و تفاوت سرعتی مشاهده نمی‌گردد.



شکل (۴-۵) کانتور سرعت در صفحه xy، نمای عمودی میکرومیکسر H (شکل الف) متوازن (ب) نامتوازن مقطعی (پ) نامتوازن طولی.

تفاوت سرعت در شاخه‌ها و در محل تقاطع باعث افزایش سطح تماس، درهم رفتگی و در نتیجه افزایش نفوذ سیالات در یکدیگر می‌گردد.

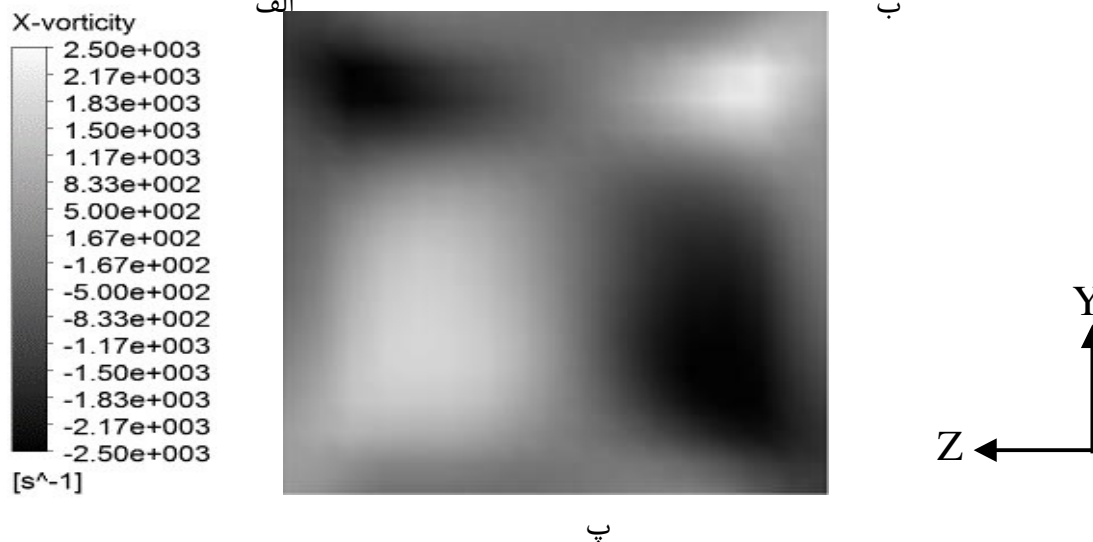
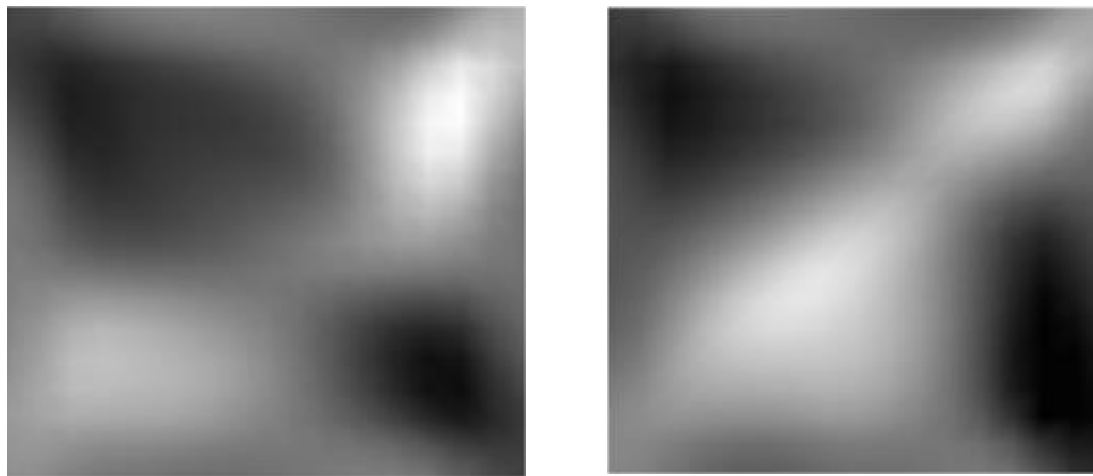
شکل (۴-۶) کانتور توزیع کسر جرمی اتانول در مقطع خروجی هر سه میکرومیکسر در عدد رینولدز ۱۰۰ را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۶) توزیع کسر جرمی اتانول در عدد رینولدز ۱۰۰ روی صفحه خروجی میکرومیکسر H شکل (الف) متوازن ب) نامتوازن طولی پ) نامتوازن مقطعی.

در میکرومیکسر متوازن کانتور کسر جرمی در خروجی کاملاً غیر یکنواخت است (شاخص اختلاط برابر با 63 درصد)، در صورتی که در میکرومیکسر نامتوازن طولی و در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی کانتور کسر جرمی در خروجی تقریباً یکنواخت است که به معنای اختلاط مناسب در خروجی این نوع میکرومیکسر است. دلیل این امر (تفاوت میزان اختلاط در هر هندسه) را می

توان تفاوت در نوع و قدرت گردابه‌های تشکیل شده در هریک از هندسه‌های مورد نظر دانست. شکل (۴-۷) تاثیر نامتوازنی‌های ایجاد شده بر شکل گردابه‌ها در هر هندسه را در عدد رینولدز ۱۰۰ نشان می‌دهد. ورتیسیتته به صورت کرل بردار سرعت تعریف میشود و بیانگر پیچش المانهای سیال است [۳۲]، بنابر این میتواند به عنوان معیار مناسبی برای نمایش جریانهای ثانویه در این بررسی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل (۴-۷) کانتور مولفه X ورتیسیتته در سطح مقطع خروجی از اولین واحد جداسازی و ترکیب رسم شده است. در میکرومیکسر متوازن گردابه‌های ایجاد شده تقریباً متقارن هستند. در حالی که در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی و میکرومیکسر نامتوازن طولی، گردابه‌های ایجاد شده در سمت شاخه اصلی بزرگتر است. با توجه به مقادیر متوسط ورتیسیتته X در جدول ۲-۴، اندازه ورتیسیتته در میکرومیکسرهای نامتوازن طولی و نامتوازن مقطعی نیز تقریباً ده برابر ورتیسیتته در میکرومیکسر متوازن است. این اختلاف توجیه مناسبی برای افزایش شاخص اختلاط در این دو نوع میکرومیکسر است زیرا که ورتیسیتته با اندازه بزرگتر، قدرت بیشتری برای پیچاندن و کشیدن خطوط جریان دارد و باعث افزایش اختلاط می‌گردد.

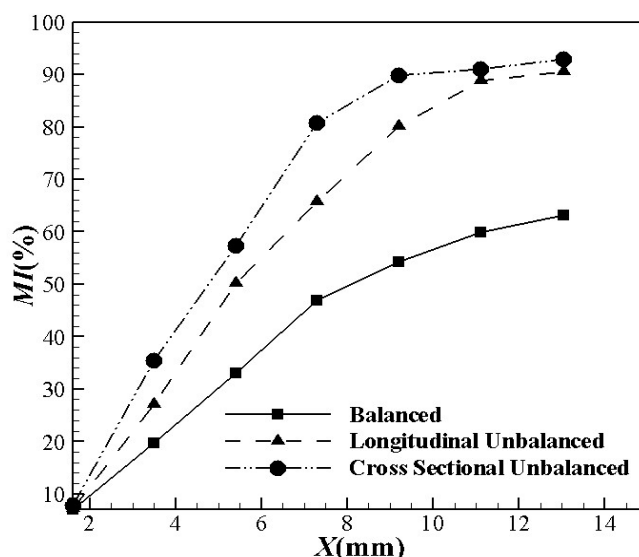


شکل (۴-۷) کانتور مولفه x ورتیسیتته در عدد رینولدز ۱۰۰ در خروجی اولین واحد جداسازی و ترکیب میکرومیکسرهای H (شکل الف) متوازن ب) نامتوازن طولی پ) نامتوازن مقطعی.

جدول (۴-۲) اندازه مولفه X ورتیسیتته در صفحه خروجی از اولین واحد جداسازی و ترکیب در عدد رینولدز ۱۰۰.

Type	Balanced	Cross sectional Unbalanced	Longitudinal Unbalanced
$(s^{-1})\omega_x$	6.4×10^{-5}	3.5×10^{-4}	2.2×10^{-4}

شکل (۴-۸) نموداری از شاخص اختلاط بر حسب طول کانال اختلاط در عدد رینولدز ۱۰۰ است که نشان می‌دهد میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در تمام مسیر دارای شاخص اختلاط بیشتری نسبت به هر دو میکرومیکسر نامتوازن طولی و متوازن است.



شکل (۴-۸) تغییرات شاخص اختلاط با طول میکرومیکسرها در عدد رینولدز ۱۰۰.

در جدول (۴-۳) مقدار ضریب افت فشار در سه نوع میکرومیکسر در عدد رینولدز ۱۰۰ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول، در اعداد رینولدز یکسان، ضریب افت فشار در میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی تقریباً یکسان و کمتر از مقدار آن در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی است. ضریب افت فشار بیشتر در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی علاوه بر نامتوانی، به اصطکاک سیال در گوشه‌های تیز ایجاد شده در محل تقاطع سیال‌های جدا شده بر می‌گردد.

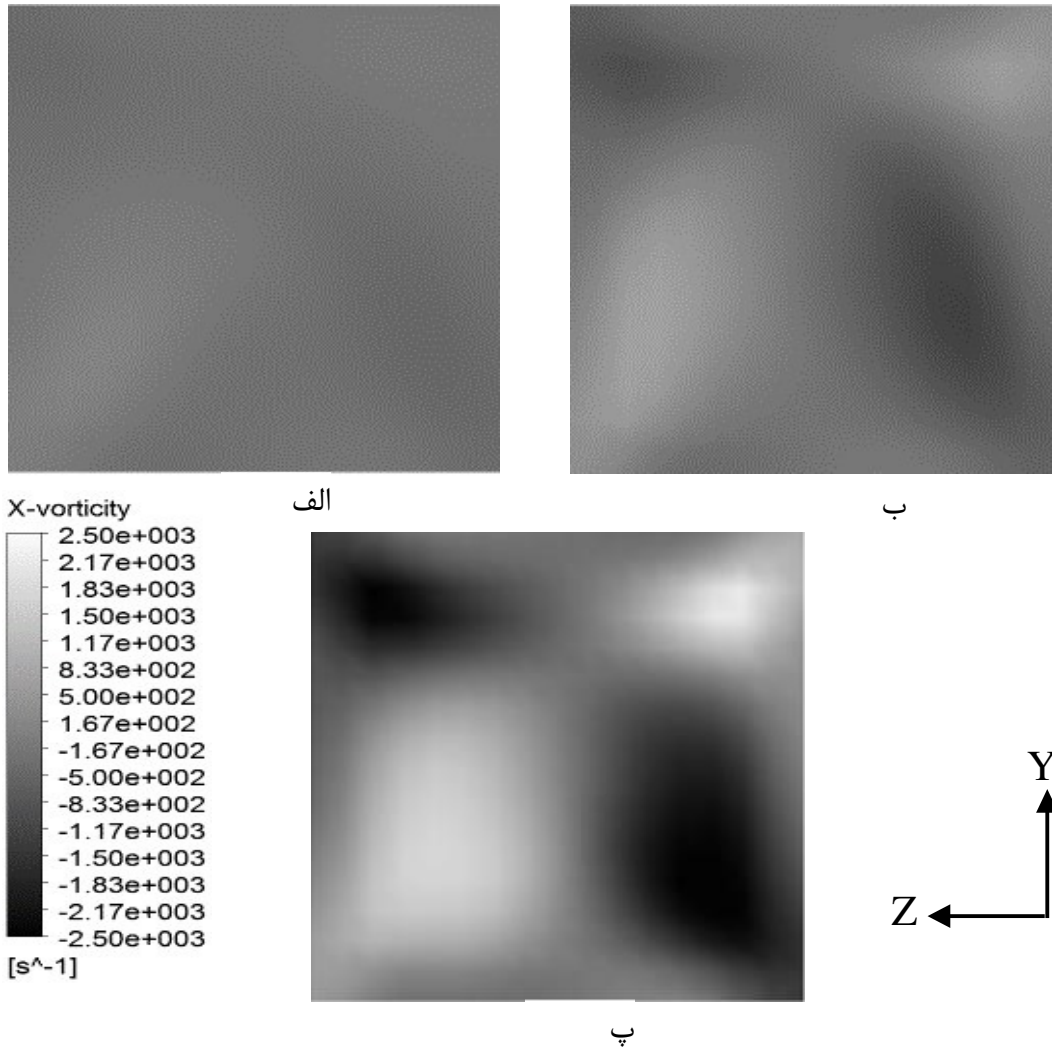
جدول (۴-۳) ضریب افت فشار در عدد رینولدز ۱۰۰

Type	Balanced	Cross sectional Unbalanced	Longitudinal Unbalanced
Pressure drop co.	0.0036	0.0037	0.0055

. تاثیر عدد رینولدز بر شاخص اختلاط و ضریب افت فشار

در شکل (۴-۹) کانتور مولفه X ورتیسیتیته در خروجی اولین واحد جداسازی و ترکیب میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ رسم شده است. همان طور که قبلاً

اشاره شد، نامتوازنی جریان باعث ایجاد اختلاف سرعت در شاخه‌ها می‌شود. در مورد میکرومیکسرهای نامتوازن مقطعی می‌توان گفت، جریان حین تقسیم شدن به دو شاخه، تمایل بیشتری برای عبور از شاخه اصلی دارد زیرا که سطح مقطع شاخه اصلی بزرگتر از شاخه فرعی است. بنابر این بیشتر جرم سیال از شاخه اصلی عبور کرده و به تبع آن سرعت در این شاخه بیشتر است. همان طور که در شکل (۴-۹) نمایان است، در رینولدز پایین (۲۰) گردابه‌های تشکیل شده از جریان اصلی بسیار قوی‌تر از گردابه‌های ایجاد شده از جریان فرعی است به نحوی که می‌توان گفت تقریباً جریان فرعی قادر به ایجاد گردابه نبوده است. دلیل این امر غلبه جریان عبوری از زیرشاخه اصلی بر جریان عبوری از زیرشاخه فرعی می‌باشد. این در حالی است که با افزایش عدد رینولدز، ماکزیمم مقدار سرعت به مرور به سمتی از مقطع متمایل می‌شود که منتهی به جریان اصلی است. از طرفی، قدرت گردابه‌های ایجاد شده از جریان فرعی به مرور افزایش یافته اما همچنان مغلوب قدرت گردابه‌های ایجاد شده توسط جریان اصلی است. در نهایت می‌توان گفت ایجاد بی‌نظمی بیشتر در طول جریان با گردابه‌های نامتقارن باعث تسریع فرآیند اختلاط می‌گردند. افزایش قدرت ورتیسیتیته‌های ایجاد شده با افزایش عدد رینولدز در این شکل نمایان است. در عدد رینولدز ۲۰ با توجه به کانتور ورتیسیتیته، گردابه‌های بسیار ضعیفی نسبت به دو عدد رینولدز دیگر ایجاد شده است. مقادیر متوسط اندازه ورتیسیتیته آورده شده در جدول (۴-۴) نیز به صورت منطقی این روند افزایشی را تایید می‌کنند. به گونه‌ای که در عدد رینولدز ۱۰۰ مقدار متوسط ورتیسیتیته تقریباً ۴ برابر مقدار متوسط ورتیسیتیته در عدد رینولدز ۵۰ و ۱۰ برابر مقدار ورتیسیتیته متوسط در عدد رینولدز ۲۰ است.



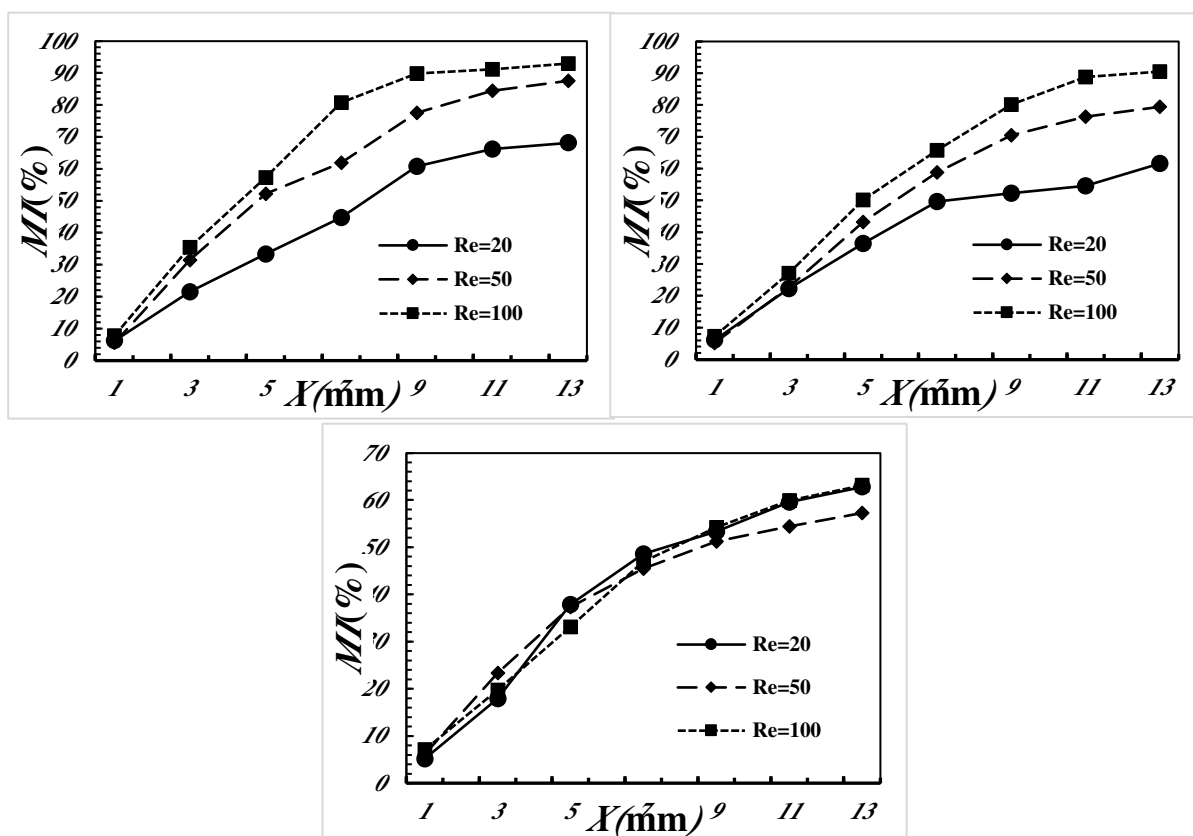
شکل (۹-۴) کانتور مولفه x ورتیسیتته در خروجی اولین واحد جداسازی و ترکیب میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز (الف) ۲۰ (ب) ۵۰ (پ) ۱۰۰

جدول (۴-۴) اندازه مولفه X ورتیسیتته در صفحه خروجی از اولین واحد جداسازی و ترکیب در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز مختلف

Re	100	50	20
$\bar{\omega}_x$	3.5×10^{-4}	8×10^{-5}	2.4×10^{-5}

در شکل (۴-۱۰) نمودار شاخص اختلاط بر حسب طول کانال اختلاط هر سه میکرومیکسر در اعداد رینولدز متفاوت آورده شده است. نمودار شکل (۱۰-۴) افزایش شاخص اختلاط بر حسب طول کانال را برای اعداد رینولدز متفاوت به خوبی نشان می‌دهد. بنابر این با افزایش تعداد واحدهای H شکل (افزایش زمان نفوذ) می‌توان به شاخص اختلاط حداکثر در انتهای میکرومیکسر دست یافت. از طرفی در شکل (۱۰-۴) میبینیم که در ابتدای میکرومیکسر متوازن اعداد رینولدز کمتر

دارای شاخص اختلاط بیشتر هستند اما با پیشروی در کانال اختلاط، شاخص اختلاط برای اعداد رینولدز بالاتر مقدار بیشتری دارد. همان طور که می‌دانیم زمانی که زمان مجاورت دو سیال بیشتر باشد فرآیند نفوذ بیشتر اتفاق می‌افتد. در اعداد رینولدز پایین به دلیل سرعت پایین سیالات، نفوذ بیشتری صورت می‌گیرد. در ابتدای کانال اختلاط فرآیند نفوذ نقش بیشتری در اختلاط ایفا می‌کند بنابراین بدیهی است که اختلاط در اعداد رینولدز پایین بیشتر باشد اما با پیشروی در کانال اختلاط به دلیل اینکه واحدهای جداسازی و ترکیب باعث ایجاد جابجایی بی‌نظم در جریان سیالها می‌شوند، نقش اصلی در اختلاط را گردابه‌های ایجاد شده ایفا می‌کنند. در این صورت بدیهی است که شاخص اختلاط در اعداد رینولدز بالاتر مقدار بیشتری داشته باشد. دلیل این امر تشکیل گردابه‌های قوی‌تر با افزایش عدد رینولدز است.



شکل (۴-۱) تغییرات شاخص اختلاط با طول در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز متفاوت

یکی از اهداف اصلی در طراحی و بهینه سازی میکرومیکسرها، کاهش افت فشار در حین اختلاط است. بدین منظور در جدول ۴-۵ مقادیر ضریب افت فشار مربوط به میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز متفاوت آورده شده است. مقادیر موجود در این جدول کاهش ضریب افت فشار با افزایش عدد رینولدز را نشان می‌دهد دلیل این امر را می‌توان افزایش فشار دینامیکی بر اثر افزایش سرعت سیال دانست.

جدول (۴-۵) ضریب افت فشار در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در اعداد رینولدز مختلف

Re	100	50	20
Pressure drop co.	0.0055	0.0097	0.0212

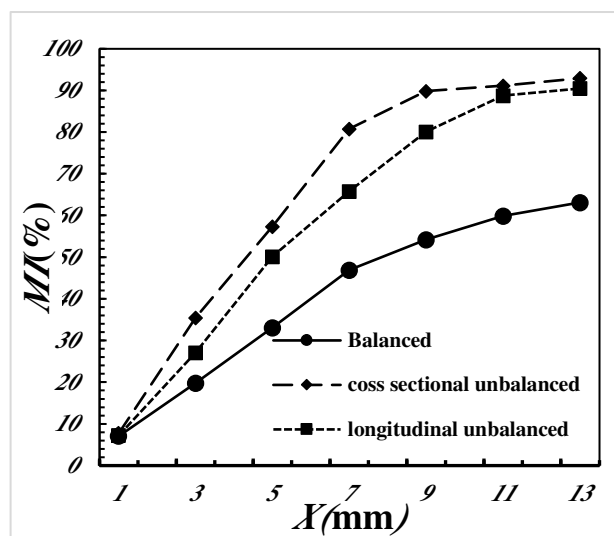
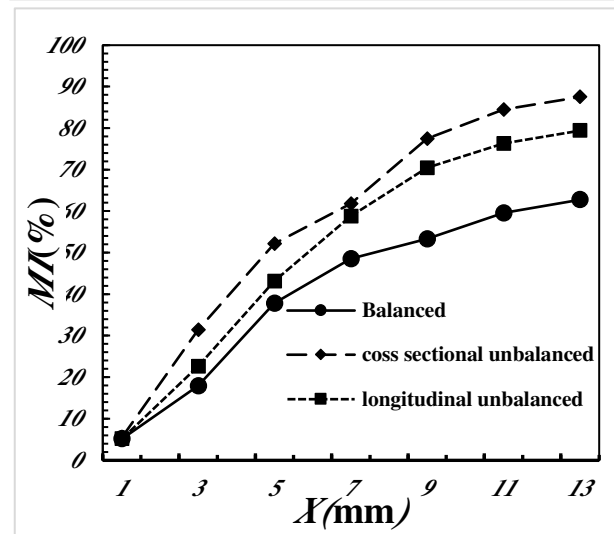
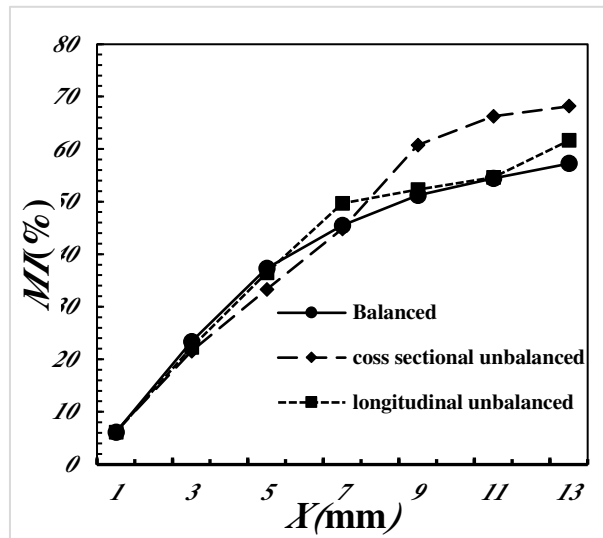
. مقایسه نتایج

در این بخش از پایان نامه، نتایج حاصل از تحلیل سه میکرومیکسر معرفی شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. جهت بررسی و مقایسه میکرومیکسر H شکل متوازن و میکرومیکسر نامتوازن طولی و میکرومیکسر نامتوازن مقطعی، شاخص اختلاط در طول کانال، شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسر ها و افت فشار بررسی شده‌اند. در نهایت تاثیر درصد نامتوانی طولی و مقطعی بر افزایش شاخص اختلاط نسبت به میکرومیکسر H شکل متوازن تعیین گردیده است.

. مقایسه شاخص اختلاط در طول کانال

در شکل (۴-۱۱) نمودارهای شاخص اختلاط در طول کانال در اعداد رینولدز متفاوت رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر سه نوع میکرومیکسر افزایش طول کانال و افزایش عدد رینولدز باعث افزایش اختلاط می‌گردند. در رینولدز ۲۰ به دلیل پایین بودن عدد رینولدز و ضعیف بودن گردابه‌های ایجاد شده در محل تقاطع جریان‌های اصلی و فرعی، در ابتدای کانال اختلاط، نامتوانی میکرومیکسرها تاثیر چندانی بر شاخص اختلاط ندارد. این درحالی است که با پیشروی سیال هم میزان زمان نفوذ افزایش یافته و هم نامتوانی تاثیر بسزایی بر میزان اختلاط گذاشته است. از طرفی، نتایج نشان می‌دهد که در اعداد رینولدز بالا، همواره شاخص اختلاط در

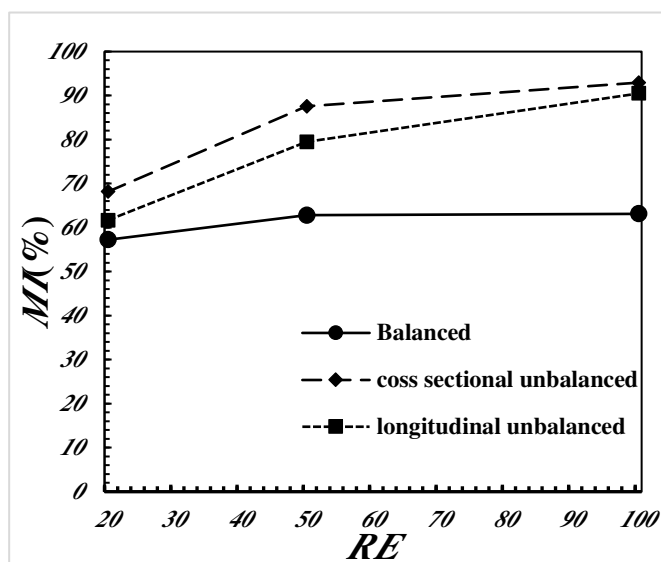
طول کانال در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی دارای مقادیر بیشتری نسبت به میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی است.



شکل (۴-۱۱) نمودار شاخص اختلاط برحسب فاصله از ورودی کانال اختلاط در اعداد رینولدز متفاوت

شاخص اختلاط در مقطع خروجی

در این بخش جهت مقایسه میزان اختلاط نهایی هریک از میکرومیکسرها، نموداری از شاخص اختلاط بر حسب عدد رینولدز در خروجی میکرومیکسرها در شکل (۴-۱۲) آورده شده است.



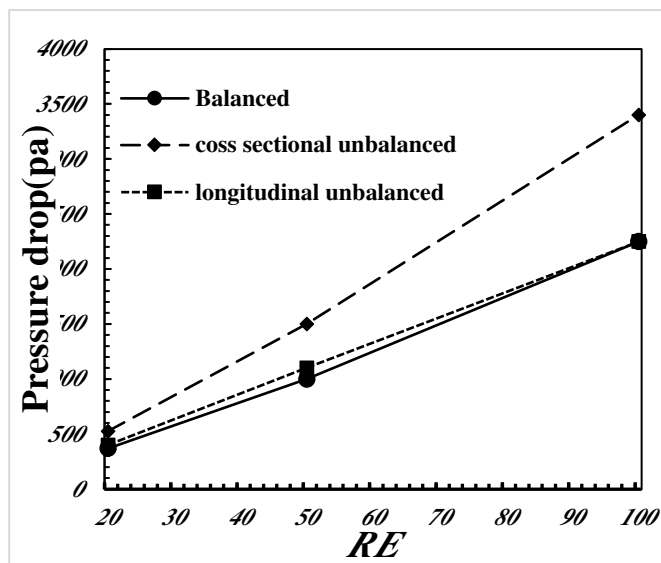
شکل (۴-۱۲) شاخص اختلاط بر حسب عدد رینولدز در خروجی میکرومیکسرها

همان طور که در شکل (۴-۱۲) نمایان است در تمام اعداد رینولدز، شاخص اختلاط در مقطع خروجی میکرومیکسر نامتوازن مقطعی با نسبت پهنای ۲:۱ از دو میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی با نسبت طولی ۳:۱ بیشتر است. بنابر این نتیجه می شود نامتوازنی مقطعی تاثیر بیشتری بر شاخص اختلاط نسبت به نامتوازنی طولی دارد.

مقایسه میزان افت فشار

در نمودار شکل (۴-۱۳) میزان افت فشار در طول کانال برای هر سه میکرومیکسر در سه عدد رینولدز متفاوت رسم شده است. افت فشار در دو میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی تقریباً با یکدیگر

برابرنند. این در حالی است که شاخص اختلاط در میکرومیکسر نامتوازن طولی بیشتر است. از طرفی افت فشار در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی تقریباً ۲۵٪ بیشتر از هر دو میکرومیکسر دیگر است.



شکل (۱۳-۴) مقایسه افت فشار سه میکرومیکسر

در جدول (۴-۶) میزان تاثیر نامتوانی‌ها بر شاخص اختلاط آورده شده است. افزایش شاخص اختلاط نسبت به حالت متوازن محاسبه شده است. همان طور که در جدول دیده می‌شود ایجاد نامتوانی به هر دو صورت باعث افزایش شاخص اختلاط می‌گردد. میزان افزایش شاخص اختلاط در تمام اعداد رینولدز، در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی نسبت به میکرومیکسر نامتوازن طولی بیشتر است. به طوری که در رینولدز ۱۰۰ شاخص اختلاط در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی به میزان ۳۰ درصد افزایش داشته است.

جدول (۴-۶) تاثیر نامتوانی در افزایش شاخص اختلاط نسبت به میکرومیکسر متوازن H شکل

	Re	The increased efficiency
Cross sectional unbalancing	100	30%
	50	25%
	20	11%
Longitudinal unbalancing	100	28%

50	17%
20	5%

فصل پنجم جمع بندی نتایج و پیشنهادات

نتایج بدست آمده در فصل قبل را می‌توان به صورت زیر جمع بندی کرد:

- حل عددی جهت مطالعه میدان جریان و مشخصات اختلاط جریان‌های سیال در سه میکرومیکسر سه بعدی برای حالتی که سیال‌های ورودی آب و اتانول هستند به کار گرفته شده است. نشان داده شد که در هر سه میکرومیکسر میزان اختلاط در طول کانال افزایش یافته اما میزان این افزایش در شاخص اختلاط، در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی بیشتر از هر دو میکرومیکسر دیگر است. به طوری که در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در عدد رینولدز ۱۰۰ شاخص اختلاط برابر با ۹۳٪ (بالای ۹۰٪) بود.
- افزایش عدد رینولدز از ۲۰ تا ۱۰۰ باعث افزایش میزان اختلاط می‌گردد. در اعداد رینولدز کوچکتر (۲۰ و ۵۰) اختلاط توسط نفوذ و به تبع آن زمانی که سیال مخلوط شده سطح مشترک دو سیال را اشغال می‌کند، کنترل می‌شود. در این محدوده شاخص اختلاط با شیب بیشتری افزایش می‌یابد. اما در عدد رینولدز ۱۰۰ زمان نفوذ به دلیل سرعت بالا کاهش می‌یابد. این نفوذ کمتر توسط گردابه‌های ایجاد شده در این عدد رینولدز جبران می‌گردد. از طرفی لایه ویسکوز ایجاد شده در سطح مشترک دو سیال، از ایجاد جریان خروشان جلوگیری کرده و مانع از شکل‌گیری گردابه‌های قدرتمندتری می‌شود. بنابر این شیب افزایش شاخص اختلاط از رینولدز ۵۰ تا ۱۰۰ کاهش می‌یابد.
- نشان داده شد که افت فشار در میکرومیکسرهای متوازن و نامتوازن طولی تقریباً با هم برابر هستند. در حالی که میکرومیکسر نامتوازن طولی در تمام اعداد رینولدز دارای شاخص اختلاط بالاتری نسبت به میکرومیکسر متوازن است. بنابر این میکرومیکسر نامتوازن طولی نسبت به میکرومیکسر متوازن عملکرد بهتری دارد. از طرفی افت فشار در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در تمام اعداد رینولدز تقریباً ۲۵٪ بیشتر از دو میکرومیکسر متوازن و نامتوازن طولی است. در حالی که شاخص اختلاط در این میکرومیکسر از هر دو میکرومیکسر دیگر بیشتر است. بنابر این بسته به

ارجحیت میزان شاخص اختلاط یا افت فشار می توان از میکرومیکسر نامتوازن مقطعی یا نامتوازن طولی استفاده کرد. در اعداد رینولدز بالا ($Re=100$) به دلیل اینکه میزان شاخص اختلاط در میکرومیکسر نامتوازن طولی و مقطعی تقریباً به یک اندازه است، میکرومیکسر نامتوازن طولی عملکرد بهتری نسبت به میکرومیکسر نامتوازن مقطعی دارد (شاخص اختلاط بالا و افت فشار پایین).

- در آخر میزان تاثیر درصد نامتوانی طولی و مقطعی بر میزان افزایش شاخص اختلاط نسبت به شاخص های اختلاط میکرومیکسر متوازن بررسی شد. نشان داده شد که درصد نامتوانی مقطعی و طولی ایجاد شده در این تحقیق به ترتیب 50% و 33% بود که حداقل افزایش شاخص اختلاط (5%) مربوط به عدد رینولدز 20 و در میکرومیکسر نامتوازن طولی و حداکثر افزایش شاخص اختلاط (30%) مربوط میکرومیکسر نامتوازن مقطعی در عدد رینولدز 100 است.

پیشنهادها

برای ادامه این تحقیق می توان موارد زیر را پیشنهاد داد:

- بررسی تاثیر محدوده وسیع تری از اعداد رینولدز (بسیار پایین و بالا) و رفتار سیالها در این محدوده و شاخص اختلاط برای هر سه نوع میکرو میکسر
- بررسی تاثیر نسبت ابعاد سطح مقطع کانالهای ورودی و کانال اختلاط بر شاخص اختلاط (در اینجا نسبت ابعاد کانالهای ورودی و کانال اختلاط مستقیم در همه میکرومیکسر ها یکسان بود)
- بررسی تاثیر درصدهای نامتوانی طولی متفاوت در میکرومیکسر نامتوازن طولی بر شاخص اختلاط
- بررسی تاثیر درصدهای نامتوانی مقطعی متفاوت در میکرومیکسر نامتوازن مقطعی بر شاخص اختلاط

- بررسی تاثیر ابعاد واحدهای جداسازی و ترکیب بر میزان اختلاط (در اینجا واحدهای جداسازی و ترکیب به صورت مستطیلی بود با نسب ۱,۲، مثلاً بررسی واحدهای مربعی شکل یا مستطیلی با طولهای متفاوت)
- بررسی شکل سطح مقطع کانال اختلاط بر شاخص اختلاط برای مثال سطح مقطع دایره‌ای شکل
- بررسی تجربی مساله به جهت مقایسه با حل عددی

پیوست ۱

UDF بارگذاری شده در قسمت خواص مخلوط جهت محاسبه چگالی و لزجت مخلوط در این قسمت

ارائه شده است.

```
*****
**
UDF that specifying a mass fraction dependent density and viscosity

*****
**,
#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity,c,t)
{
    real mu_lam;
    real fi = C_YI(c,t,0);
    mu_lam = 0.010151 *pow(fi,4.0) - 0.01578 *pow(fi,3.0) -0.0013323 *
pow(fi,2.0) + 0.007299 * fi + 0.0009145 ;
    return mu_lam;
}
DEFINE_PROPERTY(cell_density,c,t)
{
    real rho_lam;
    real fi = C_YI(c,t,0);
    rho_lam = 72.3 *pow(fi,4.0) - 131.2 *pow(fi,3.0) - 11.1 * pow(fi,2.0) - 136.2 * fi
+ 996.9;
    return rho_lam;
}
```

پیوست ۲

تنظیمات نرم افزار:

شبه سازی توسط نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ انجام شده است. در این قسمت تنظیمات

وارد شده در نرم افزار انسیس فلونت ۱۶ به صورت مرحله به مرحله ارائه می گردد.

- File Read Mesh
- Mesh Check
- Mesh Change UNITES To mm Scale
- Define General (steady, pressure based)
- Define Models Species Species transpot (on)
- Define Material Choose (ethanol(l) and water(l))
- Define User-defined Function Interpreted Density and viscosity UDFs
- Define Models Species transpot mixture property(Edit)
- Mixture species Water and ethanol
- Mixture density User defined
- Mixture viscosity User defined
- Diffusion coefficient $1.2 * 10^{-9}$
- Define Boundary condition...
- Right inlet & left inlet (velocity inlet), outlet (out flow)
- Define Operating condition Gravity (on) -9.81 (z axis)
- Solve Method Scheme (simplec), Discretization ...Pressure (standard) Momentum & Convection-Diffusion (Quick)
- Solve Control Under Relaxation Factors Default mode
- Solve Monitor Residuals (print, plot) Convergence criteria ($1 * 10^{-6}$)
- Solve Initialization Standard initialization Compute from left inlet
- Run Calculation

فهرست منابع

1. Chih-Chang Chang, Ruely-jen, Yang, *Electrokinetic mixing in microfluidic systems*;2007.
2. S. Hardt, F. Schonfeld, *Microfluidic Technologies for Miniaturized Analysis systems*;2007.
3. N. Nguyen , Z. Wu, Micromixers—a review, *J. Micromech. Microeng. Vol.15*, pp. R1–R16; 2005.
4. X. Niu, Y.K. Lee, Efficient spatial-temporal chaotic mixing in microchannels. *J. Micromech. Microeng. Vol. 13*, pp. 454-462; 2003.
5. A. E. Kamholz, B.H. Weigl , B.A. Finalayson, P. Yager, Quantitative analysis of molecular interactive in microfluidic channel, *the Tensor.Anal Chem.Vol. 71*, pp. 5340-5347; 1999.
6. Hessel, V. Hardt, S. Lowe, H. Schonfeld, Laminar mixing in drfferent interdigital micromixers, I. experimental characterization, *J.AIChE,Vol. 49*. pp.566-577; 2003.
7. P. Lob, K. Drese, V. Hessel, S. Hardt, C. Hofmann, H. Lowe, R. Schenk, F. Schonfeld, B. Werner, Steering of liquid mixing speed in interdigital micro mixers-from very fast to deliberately slow mixing, *J. Cham Eng Technol*,pp. 340–345 ; 2004.
8. Schoenfeld, F. Hessel, V. Hofmann, An optimized split-and-rexombine micromixer with uniform chaotic mixing, *J. Labon on a chip,Vol.4*, pp. 65-69; 2004.
9. J. Branbjerg, Fast mixing by lamination Proc.9th IEEE Int. Workshop Micro Electromechanical System (San Diego, CA), pp 441–44;, 1996.

10. N. Schwesinger, A modular microfluid system with an integrated micromixer *J. Micromech. Microeng.* pp. 99–102; 1996.
11. B. L. Gray, et. al, Novel interconnection technologies for integrated microfluidic systems, *Sensors and Actuators, Vol. 77, pp. 57–65 ; 1999.*
12. T. C. K. L. Tracey, M. C. Davis , J. B. and Johnston, continously variable mixing-ratio micromixer with elastomer valves, *J. Micromechanics and Microengineering, Vol. 15, pp. 1885-1893; 2005 .*
13. R. Miyake, T.S.J. Lammerink, M. C. Elwenspoek, , J.H.J. Fluitman, Micro Mixer with fast diffusion, pp.248-253; 1993.
14. U. D. Larsen, W. Rong , P. Telleman , Design of rapid micromixers using CFD Proc. *Transducers'99, 10th Int.Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Sendai, Japan) pp. 200–203; 1999.*
15. J.B. Knight, A. Vishwanath, J.P. Brody, R.H. Austin, hydrodynamic focusing on a silicon chip, mixing nanoliters in microseconds, *phys Rev let, Vol. 80, pp. 3863-3866; 1998.*
16. H. Wang, P. Ioventi, E. Harvey, Masood, Optimizing layout of obstacels for enhanced mixing in microchannels, *J. Smart materials and structures , Vol. 11, pp. 662-667; 2003.*
17. Y. Lin, G. J. Gerfen, D. L. Rousseau, Yeh, Ultrafast microfluidic mixer and freeze-quenching device, *J. Analytical chemistry, Vol.75, pp. 5381-5386; 2003.*
18. N.T. Minh, T. Dong, F. Karlsen, An efficient passive planar micromixer with ellipse-like micropillars for continuous mixing of human blood, *Computer Methods and Programs in Biomedicine, Vol.117, pp. 20-29; 2014.*

19. C. C. Hong, J. W. Choi, Ahn, A novel in-plane microfluidic mixer with modified tesla structures, *J. Lab on a Chip*, Vol. 4, pp. 109-11; 2004.
20. R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, D. J. Beebe, Passive mixing in a threedimensional serpentine microchannel, *J. Microelectromechanical*; 2000.
21. Z. Lu, J. McMahon, H. Mohamed, D. Barnard, T. R. Shaikh, C.A. Mannella, T. Wagenknecht, T.M. Lu, Passive microfluidic device for submillisecond mixing , *J. sensors and Actuators B:Chemical*, Vol.144, pp. 301-309; 2010.
22. M. A. Ansari, Y. K. Kwang, Mixing performance of unbalanced split and recombine micromixers with circularand rhombic sub-channels, *Chem. Eng. J. Vol.162*, pp. 760-767; 2010.
23. A. Afzal, Y. K. Kwang, Passive split and recombination micromixer with convergent–divergent walls, *Chem. Eng. J. Vol.203*, pp. 182-192; 2012.
24. N. Solehati , J. Bae, A. P. Sasmito, Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure, *J. Computers & fluids*, Vol.96, pp. 10-19; 2014.
25. Sh. Hossain, Y. K. Kwang, Mixing Analysis of Passive Micromixer with Unbalance Three-Split Rhombic Sub-Channels, *Micromachines* ,Vol. 5, pp. 913-928; 2014.
26. M. Nimafar, V. Viktorov, M. Martinelli, .Experimental comparative mixing performance of passive micromixers with H-shaped sub-channels, *Chem. Eng. J. Vol. 76*, pp. 37-44; 2012.
27. Y. H. Kai, Y. W. Chih, T. H. Yi, Fluid mixing in a microchannel with longitudinal vortex generators, *Chem. Eng. J. Vol.235*, pp. 27-36; 2014.

28. G. Orsi, M. Roudgar, E. Brunazzi, C. Galletti, R. Mauri, Water–ethanol mixing in T-shaped microdevices, *Chemical Engineering Science*, Vol.95, pp. 174–183; 2013.
29. M. Dizechi, E. Marschall. Viscosity of some Binary and Ternary Liquid mixtures, *J. Chem. Eng. Data*, Vol. 27, pp. 358-363; 1982.
30. A. Soleymani , E. Kolehmainen, I. Turunen. Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micromixers, *Chemical Engineering Journal*. Vol.135, pp. 219–228; 2008.
31. N. A. Mouheb, T. Henkel, Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers, *J. Chemical Engineering Science* Vol. 68, pp. 278–289; 2012.
32. W. Wang, S. Zhao, T. Shao, Y. Jin, Y. Cheng, Visualization of micro scale mixing in miscible liquids using LIF technique and drug nano-particle preparation in T-shaped micro-channels. *J. Chem. Eng. Vol. 192*, pp.252–261; 2012.
33. D.D. Joseph, K. Nguyen, G. S. Beavers, Non-uniqueness and stability of the configuration of flow of immiscible fluids with different viscosities. *J. Fluid Mech.* Vol. 141, pp. 319–345; 1984.

ABSTRACT

Compared to conventional macroscopic methods, microfluidic devices have the advantages of reduced solvent, reagent and cell consumption, shorter reaction times, portability, low cost and low power consumption. This study propose two novel generation of three Dimensional splitting and recombination passive micromixers (the longitudinal and cross-sectional unbalanced micromixer) that are designed based on the H-shaped balanced micromixer geometry. Numerical simulation were performed to study the mixing dynamics of two miscible liquids(water & ethanol) in all three types of micromixers and results compared with the previous well-known H-shaped balanced micromixer. Laminar flow regime, incompressible, steady and no-slip velocity are Assumptions that govern fluid flow. It was found that mixing index and pressure drop are significantly affected by the unbalancing and depends on Reynolds number (inlet velocities). increasing the Reynolds number will increase mixing index, at $Re=100$ the mixing index of the cross-sectional unbalanced micromixer is more than 90% while at $Re=20$ this is less than 70%. Creating an unbalanced flow will increase mixing index, however, cross-sectional unbalancing is more effective than longitudinal unbalancing, at $Re=100$ the mixing index of the cross-sectional unbalanced micromixer has increased about 30% compared to the H-shaped balanced micromixer. Numerical results show that increasing the Reynolds number will increase pressure drop of all three types of micromixers. Compared with each other, the longitudinal unbalanced micro mixer and the H-shaped balanced micromixer with equal pressure drop, have 25% lower pressure drop than the cross-sectional unbalanced micromixer.

Yazd University

Faculty of Mechanical Engineering

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Master Degree
Mechanical Engineering – Energy Conversion**

**Title
Performance Evaluation Of H-shaped
Micromixer**

**Supervisor
Dr. Sh. Talebi**

**Advisor
Dr. M. Sefid**

**By
Nasrin Aliyari**

Feb 2017