



دانشکده فنی مهندسی مکانیک  
گروه مهندسی مکانیک

پایان‌نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی  
مکانیک- تبدیل انرژی

عنوان

استفاده از جریان‌های ثانویه در افزایش درجه اختلاط  
سیالات غیرنیوتنی در میکرومیکسرها

استاد راهنما

دکتر سیما باهری‌اسلامی

استاد مشاور

دکتر حبیب امین‌فر

پژوهشگر

مرضیه خضولو

شهریور ۱۳۹۳



نام خانوادگی: خضریلو	نام: مرضیه
استاد راهنما: دکتر سیما باهری اسلامی	استاد مشاور: دکتر حبیب امین فر
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته تحصیلی: مهندسی مکانیک
گرایش: تبدیل انرژی	دانشگاه: تبریز
دانشکده: مهندسی مکانیک	تاریخ فارغ التحصیلی: شهریور ۹۳
تعداد صفحه: ۱۲۳	

عنوان: استفاده از جریان های ثانویه در افزایش درجه اختلاط سیالات غیرنیوتنی در میکرومیکسرها

کلید واژه: درجه اختلاط، سیالات غیرنیوتنی، میکرومیکسر، حرکت بی نظم، جریان ثانویه  
چکیده:

در سال های اخیر فن آوری مربوط به سیستم های میکروفلوئیدی به سرعت در حال گسترش بوده و کاربردهای وسیعی در صنایع شیمیائی و بیوتکنولوژی پیدا کرده است. یکی از این سیستم ها، سیستم آنالیز کلی میکرو که  $\mu\text{TAS}$  نامیده می شود، می باشد. این تجهیزات که به صورت یک آزمایشگاه تراشه ای می باشند شامل وسایل جریان سیال در ابعاد میکرو و سنسورهای گوناگون هستند و برای فرآیندهای مختلفی چون اختلاط، واکنش شیمیائی، جدایش و استخراج به کار می روند. به علت کوچک بودن ابعاد، اعداد رینولدز این تجهیزات بسیار پائین است بنابراین در فرآیندی چون اختلاط، جریان هیچ گاه متلاطم نمی شود و کارائی اختلاط بسیار ضعیف است، زیرا در این رژیم، اختلاط فقط در نتیجه پخش مولکولی است و بنابراین برای رسیدن به یک درجه اختلاط مناسب، به یک مسیر طولانی و زمان بالا نیاز است. یکی از راه های افزایش اختلاط در این وضعیت استفاده از میکرومیکسرها است. میکرومیکسرها به دو دسته اصلی فعال و غیرفعال تقسیم می شوند. میکرومیکسر فعال نیاز به انرژی ورودی خارجی چون اعمال میدان الکتریکی، مغناطیس، نوسانات سرعت و ... دارد در حالیکه اختلاط در میکرومیکسر غیرفعال از تعامل جریان اصلی با هندسه کانال، که به شکل خاصی طراحی شده است، بدون هیچ گونه انرژی خارجی صورت می گیرد. میکرومیکسر فعال عملکرد بهتری دارد ولی در اکثر موارد هزینه ساخت آن بالاست و یا حرارت تولید شده به نمونه های بیولوژیکی طی فرآیند آسیب می رساند. در بسیاری از میکرومیکسرهای غیرفعال برمبنای دیفیوژن مولکولی، پدیده جابجایی در امتداد جریان اصلی است، بنابراین پدیده انتقال در جهت عرضی فقط از طریق نفوذ مولکولی است در حالی که اگر بتوان با روشی جریان های ثانویه ای در جهت عرضی ایجاد کرد، اختلاط به طور قابل توجهی بهبود می یابد و می توان با هندسه های ساده تر به درجات اختلاط بالاتری رسید. گردابه های عرضی در مقطع کانال های منحنی مثالی برای این روش است که باعث می شود فصل مشترک بین دو سیال تحت اختلاط افزایش یافته و اختلاط بهبود پیدا کند. طرح اصلی در این روش ایجاد مکانیزم انتقال جابجایی علاوه بر انتقال مولکولی، از طریق کشیده شدن، پیچش و شکست المان های سیال در جریان لایه ای است. با اینکه اکثر مواد شیمیائی و بیولوژیکی در سیستم های  $\mu\text{TAS}$  سیالات غیرنیوتنی هستند، اما اختلاط جریان سیالات غیرنیوتنی در این نوع میکرومیکسرها به ندرت به صورت عددی بررسی شده است.

در این مطالعه، میکرومیکسرهای منحنی که از مکانیزم یاد شده برای افزایش اختلاط استفاده می کنند به صورت عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند و کارائی اختلاط انواع میکرومیکسرهای منحنی در اختلاط جریان سیالات غیرنیوتنی ارزیابی شد. همچنین الگوهای جریان های ثانویه و نقش آن ها در بهبود اختلاط مورد بررسی قرار گرفت و تفاوت ساختار آن ها با سیالات غیرنیوتنی ارائه شد. تاثیر پارامترهای جریان و پارامترهای ویسکوزیته سیالات غیرنیوتنی در درجه اختلاط ارزیابی بهترین هندسه از میان هندسه های مورد مطالعه ارائه شد. نتایج بررسی ها نشان داد که با کاهش مقدار شاخص توانی سیال، درجه اختلاط در تمامی میکرومیکسرها کاهش و افت فشار بی بعد افزایش می یابد. برای تمامی مقادیر  $n$  با افزایش عدد رینولدز جریان، کاهش افت فشار بی بعد در میکرومیکسرها مشاهده شد. همچنین

نتایج یک سیر کاهش‌ی - افزایشی را برای درجه اختلاط تمامی سیالات با افزایش عدد رینولدز نشان داد. به عنوان یک نتیجه مهم می‌توان گفت تعبیه‌ی شیار در کف میکرومیکسر تاثیر مثبت روی افت فشار بی‌بعد و درجه اختلاط میکرومیکسر دارد.

با احترام تقدیم به ...

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم ...

به پدرم، استوارترین تکیه‌گاهم، بزرگواری که الفبای زندگی را از او آموختم.

به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

به استادم خانم دکتر باهری، او که آموخت مرا تا می‌آموزم ...

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بگویم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانان را پاس توانم گفت.

ره آوردی گران‌سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان شاکر کنم، باشد که حاصل تلاشم نیم‌کوزه غبار حقیقتان را بزداید.

بوسه بردستان پر مهرتان

### مشکر و سپاس خدا را که بزرگترین امید و یاور در محطه‌ی زندگیست...

راست گفته‌اند که هر انسانی دو آموزنده دارد: یکی روزگار و دیگری آموزگار، یکی به بهای زندگی و آن یکی به بهای زندگیش. بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بخارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفتابش را تا این می‌گذرد بر حسب وظیفه و از باب "من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عز و جل"؛

از استاد بزرگوارم، سرکار خانم دکتر سیما باهری اسلامی که در کمال سه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از بیچ‌کلی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهمبانی این تحقیق را بر عهده گرفتند، مشکر می‌کنم. از استاد مشاور گرامی ام، جناب آقای دکتر حبیب امین فرسپاسگزارم که بی‌شک بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید. از استاد فرزانه و دلنواز، جناب آقای دکتر محمد تقی شروانی تبار که زحمت دایره‌ی و بازخوانی این مجموعه را منتقل شده‌اند، کمال تقدیر و قدردانی را دارم. از استاد گرامی جناب آقای دکتر رضا غرانی خسروشاهی که در انجام پایان‌نامه از راهمبانی‌ها و کمک‌هایشان بهره‌فراوان برده‌ام، مشکر می‌نمایم. همچنین از اساتید محترمی که در طول دوران تحصیلی ام، جهت آموزش و ارتقای علمی بنده، زحمت کثیفه‌اند بی‌نهایت سپاسگزارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوشایی و درستی من، قلم عفو کشیده و گریانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور می‌باشند. بی‌چشم‌داشت برای من بوده‌اند، سپاسگزارم.

از همه‌ی خوبانی که با همکاری و همراهی‌شان این تحقیق به نتیجه رسید، مشکر می‌نمایم.

# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۲	۱-۱ مقدمه .....
۳	۲-۱ انواع میکرومیکسرها .....
۳	۱-۲-۱ میکرومیکسره‌های غیرفعال .....
۴	۱-۱-۲-۱ میکرومیکسره‌های T یا Y شکل .....
۵	۲-۱-۲-۱ میکرومیکسره‌های چندلایه‌ای موازی .....
۵	۳-۱-۲-۱ میکرومیکسره‌های چندلایه‌ای متوالی .....
۷	۴-۱-۲-۱ میکرومیکسر حرکت بی‌نظم .....
۹	۵-۱-۲-۱ میکرومیکسر تزریقی .....
۱۰	۶-۱-۲-۱ میکرومیکسر قطره‌ای .....
۱۱	۷-۱-۲-۱ تمرکز جریان .....
۱۲	۲-۲-۱ میکرومیکسره‌های فعال .....
۱۳	۱-۲-۲-۱ نوسانات میدان فشار .....
۱۴	۲-۲-۲-۱ اغتشاش ناشی از دی‌الکتروفورتیک .....
۱۴	۳-۲-۲-۱ ارتعاش الکترووتینگ .....
۱۵	۴-۲-۲-۱ اغتشاش ناشی از الکترو-سنتیک .....
۱۵	۵-۲-۲-۱ اغتشاش ناشی از امواج فراصوت .....
۱۶	۶-۲-۲-۱ اغتشاش ناشی از مگنتوهیدرودینامیک .....
۱۷	۷-۲-۲-۱ اغتشاش ناشی از نیروی گریز از مرکز .....
۱۸	۳-۱ مروری بر مطالعات انجام‌شده در زمینه میکرومیکسره‌های منحنی شکل .....
۲۵	۴-۱ مروری بر مطالعات انجام‌شده در زمینه اختلاط سیالات غیرنیوتنی در انواع میکرومیکسرها .....

## فصل دوم: مواد و روش‌ها

۲۹	۱-۲ سیالات غیرنیوتنی
۳۳	۲-۲ تئوری آشوب و حرکت بی نظم
۳۵	۳-۲ معادلات حاکم
۳۶	۴-۲ اعداد بی بعد و کمیت‌های موثر
۳۶	۱-۴-۲ عدد رینولدز
۳۷	۲-۴-۲ عدد دین
۳۹	۳-۴-۲ مشخصه درجه اختلاط
۴۰	۱-۳-۴-۲ مطالعات تجربی
۴۲	۲-۳-۴-۲ مطالعات عددی
۴۴	۵-۲ بیان مساله و روش حل عددی
۴۵	۶-۲ معرفی اجمالی نرم افزار OpenFOAM
۴۷	۷-۲ خواص سیالات مورد بررسی
۴۸	۸-۲ هندسه و شرایط مرزی

## فصل سوم: نتایج و بحث

۵۵	۱-۳ بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی
۵۵	۲-۳ اعتبارسنجی
۵۸	۳-۳ ویسکوزیته سیالات بررسی شده
۵۹	۴-۳ بررسی میکرومیکسرها و انتخاب هندسه مناسب
۵۹	۱-۴-۳ بررسی براساس هندسه میکرومیکسر
۵۹	۱-۱-۴-۳ درجه اختلاط
۶۳	۲-۱-۴-۳ افت فشار در طول عبور سیال از میکرومیکسرها
۶۶	۲-۴-۳ بررسی براساس شاخص قانون توانی
۶۶	۱-۲-۴-۳ درجه اختلاط



۶۹	.....	۲-۲-۴-۳ افت فشار جریان در عبور از میکرومیکسرها
۷۳	.....	۳-۴-۳ بررسی بردارهای سرعت و توزیع غلظت جز سیالی
۸۸	.....	۴-۴-۳ انتخاب هندسه‌ی مناسب
۹۰	.....	۵-۴-۳ بررسی توزیع سرعت
۹۳	.....	۵-۳ ارائه تصحیحات هندسی به منظور بهبود عملکرد میکرومیکسر
۹۴	.....	۱-۵-۳ درجه اختلاط
۹۵	.....	۲-۵-۳ افت فشار جریان در عبور از میکرومیکسر
۱۰۴	.....	۳-۵-۳ انتخاب هندسه‌ی مناسب
۱۰۵	.....	۶-۳ بررسی اختلاط دو سیال با مقادیر $m$ و $n$ متفاوت
۱۱۶	.....	نتیجه گیری
۱۱۸	.....	پیشنهادات برای ادامه‌ی کار
۱۱۹	.....	مراجع

## فهرست شکل‌ها

### شکل

### صفحه

- شکل ۱-۱: میکرومیکسر T شکل با دو سیال ورودی. ۴
- شکل ۲-۱: انواع میکرومیکسرهای چندلایه‌ای موازی. ۶
- شکل ۳-۱: میکرومیکسر چندلایه‌ای متوالی، میکرومیکسر استاتیک با کانال متقاطع (بالا) و المان‌های مارپیچ (پائین). ۷
- شکل ۴-۱: طرح‌های مسطح برای میکرومیکسرهای حرکت بی‌نظم در اعداد رینولدز بالا، (الف) موانع داخل کانال [۱۳]، (ب) موانع روی دیوار [۱۵]، (ج) کانال زیگ-زاگ. ۸
- شکل ۵-۱: چند نوع از هندسه‌های میکرومیکسر حرکت بی‌نظم برای اعداد رینولدز متوسط، (الف) اتصال L شکل خارج از صفحه [۱۶]، (ب) L شکل [۱۶]، (ج) C شکل [۱۷]، (د) ساختار اصلاح یافته تسلا. ۹
- شکل ۶-۱: کانال‌های اختلاط اصلاح شده برای حرکت بی‌نظم در اعداد رینولدز پائین، (الف) شیارهای دوطرفه، (ب) شیارهای مایل، (ج) ریب‌های مایل. ۹
- شکل ۷-۱: نوعی میکرومیکسر تزریقی. ۱۰
- شکل ۸-۱: میکرومیکسر قطره‌ای (الف) اختلاط در میکروقطرات جریان در میکروکانال، جریان چرخشی ایجاد شده در کانال مستقیم، (ب) و (ج) الگوی جریان ایجاد شده در میکروکانال پیچ‌دار، (د) نتایج تجربی ایجاد حرکت بی‌نظم در قطرات میکرو. ۱۱
- شکل ۹-۱: تمرکز جریان (الف) میکسر تمرکز هیدرودینامیکی، (ب) تاثیر نسبت فشار جریان جانبی به فشار جریان میانی روی پهنای جریان متمرکز (به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۱، ۱/۲). ۱۲
- شکل ۱۰-۱: (الف) میکرومیکسر T شکل با ورودی سرعت نوسانی، (ب) و (ج) کانتور غلظت ارائه شده برای میکرومیکسر ترکیبی. ۱۵
- شکل ۱۱-۱: اختلاط با میکروجریان صوتی، (الف) میکرومیکسر، (ب) اختلاطی در غیاب امواج صوت مشاهده نمی‌شود. ۱۱
- (ج) اختلاط سریع در حضور امواج صوتی حاصل می‌شود. (د) منحنی غلظت در پایین دست حباب هوا، (و) منحنی غلظت در بالا دست حباب هوا. ۱۷

- شکل ۱-۱۲: (الف) میکرومیکسر توزیع مغناطیس، (ب) تغییر شکل جریان سیال در نتیجه نیروی حجمی لورنتس و تولید گردابه‌های متناظر. ۱۷
- شکل ۱-۱۳: میکرومیکسر گریز از مرکز، (الف) میکرومیکسر و اجزای آن، (ب) شبیه‌سازی فرآیند اختلاط و نمایش تاثیر شبه نیروی کریولیس در تاشدن فصل مشترک دو سیال و تاثیر نیروی گریز از مرکز در حرکت سیال به سمت خروجی کانال. ۱۸
- شکل ۱-۲: انواع سیالات غیرنیوتنی. ۲۹
- شکل ۲-۲: منحنی تنش-نرخ کرنش انواع سیالات غیرنیوتنی مستقل از زمان. ۳۱
- شکل ۲-۳: طرح کلی نمایش رفتار رقیق شوندگی. ۳۲
- شکل ۲-۴: جریان عرضی دین در لوله‌ی منحنی شکل. ۳۸
- شکل ۲-۵: جریان دین در نرخ‌های بالای جریان. ۳۸
- شکل ۲-۶: تصویربرداری از نمای بالا. ۴۰
- شکل ۲-۷: عکس با استفاده از نمای بالا، (الف) تصویر دیجیتالی جریان محلول‌های آبی به رنگ‌های زرد و آبی، (ب) تصویر مقیاس خاکستری که ناحیه مخلوط شده را نشان می‌دهد و نمای بسته اندازه‌گیری عرض کانال و عرض ناحیه مخلوط شده دو جریان. ۴۱
- شکل ۲-۸: نمونه‌ای از شبکه محاسباتی، میکرومیکسر - a. ۴۹
- شکل ۲-۹: طرحواره‌ی میکرومیکسرها، تصویر روی صفحه‌ی میانی ( $y=0$ ): (الف) میکرومیکسر - a، (ب) میکرومیکسر - b، (پ) میکرومیکسر - c، (ج) میکرومیکسر - d، (د) میکرومیکسر - e، (ر) میکرومیکسر - f، (و) میکرومیکسر - g، تصویر از پائین: (م) میکرومیکسر - h، (ی) میکرومیکسر - i. ۵۰
- شکل ۳-۱: پروفیل سرعت بی‌بعد در اولین چرخش  $\theta = 90^\circ$  میکرومیکسر a برای شبکه‌های مختلف. ۵۵
- شکل ۳-۲: (الف) هندسه‌ی مورد بررسی مرجع [۴۹]، (ب) مقایسه‌ی نتایج برای توزیع درجه اختلاط در مقابل عدد رینولدز. ۵۶
- شکل ۳-۳: هندسه‌ی مورد بررسی مرجع [۶۲]. ۵۷
- شکل ۳-۴: مقایسه نتایج برای (الف) تغییرات درجه اختلاط در طول کانال، (ب) پروفیل سرعت بی‌بعد در  $x/H = 0.5$ . ۵۷
- شکل ۳-۵: مقایسه‌ی نتایج برای پروفیل سرعت بی‌بعد در ناحیه‌ی ورودی جریان‌های برخوردی سیال رقیق‌شونده. ۵۸
- شکل ۳-۶: ویسکوزیته ظاهری سیالات غیرنیوتنی، (الف) در  $y=0$   $90^\circ$  پیچ اول، (ب) در  $y=0$  خروجی، میکرومیکسر ۵۹

Re=100, a

- شکل ۳-۷: تغییرات درجه اختلاط در میکروکانال مستقیم برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف در خروجی میکروکانال. ۶۰
- شکل ۳-۸: تغییرات درجه اختلاط برای میکرومیکسرهای مختلف برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف در خروجی میکرومیکسر. ۶۱
- شکل ۳-۹: تغییرات افت فشار جریان در عبور از میکروکانال مستقیم برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف. ۶۳
- شکل ۳-۱۰: تغییرات افت فشار جریان در عبور از میکرومیکسرها برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف. ۶۴
- شکل ۳-۱۱: تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسرها برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف. ۶۷
- شکل ۳-۱۲: تغییرات افت فشار جریان در عبور از میکرومیکسرها برحسب عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی مختلف. ۷۱
- شکل ۳-۱۳: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای شاخص‌های توانی مختلف، در زاویه  $90^\circ$  شعاع انحنای  $R_2$  میکرومیکسر  $e$ ,  $Re = 50$ . ۷۴
- شکل ۳-۱۴: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای شاخص‌های توانی مختلف، در زاویه  $270^\circ$  میکرومیکسر  $d$  (شعاع انحنای  $R_2$ ),  $Re = 50$ . ۷۵
- شکل ۳-۱۵: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای شاخص‌های توانی مختلف، در زاویه  $90^\circ$  اولین پیچ میکرومیکسر  $b$ ,  $Re = 50$ . ۷۶
- شکل ۳-۱۶: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای جریان‌هایی با رینولدز مختلف، در زاویه  $90^\circ$  شعاع انحنای  $R_2$  میکرومیکسر  $e$ , شاخص توانی  $0.75$ . ۷۷
- شکل ۳-۱۷: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای جریان‌هایی با رینولدز مختلف، در زاویه  $270^\circ$  میکرومیکسر  $d$  (شعاع انحنای  $R_2$ ), شاخص توانی  $0.75$ . ۷۹
- شکل ۳-۱۸: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  برای جریان‌هایی با رینولدز مختلف، در زاویه  $90^\circ$  اولین پیچ میکرومیکسر  $b$ , شاخص توانی  $0.75$ . ۸۰
- شکل ۳-۱۹: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  در شعاع‌های مختلف، میکرومیکسر  $d$ , شاخص توانی  $0.75$  و  $Re = 100$ . ۸۱
- شکل ۳-۲۰: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $Y$  و  $Z$  در شعاع‌های مختلف، میکرومیکسر  $e$ , شاخص توانی  $0.75$  و  $Re = 100$ . ۸۲

- شکل ۳-۲۱: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه عمود بر جریان در سه مقطع -  $90^\circ$  پیچ دوم، وسط پیچ دوم و  $Re = 100$ ،  $0.75$ ، شاخص توانی  $a$ ، میکرومیکسر سوم،  $90^\circ$  پیچ سوم، میکرومیکسر  $a$ ، شاخص توانی  $0.75$ ،  $Re = 100$ .
- شکل ۳-۲۲: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه عمود بر جریان در سه مقطع -  $90^\circ$  پیچ دوم، وسط پیچ دوم و سوم،  $90^\circ$  پیچ سوم، میکرومیکسر  $b$ ، شاخص توانی  $0.75$ ،  $Re = 100$ .
- شکل ۳-۲۳: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه عمود بر جریان در سه مقطع -  $90^\circ$  پیچ دوم، وسط پیچ دوم و سوم،  $90^\circ$  پیچ سوم، میکرومیکسر  $c$ ، شاخص توانی  $0.75$ ،  $Re = 100$ .
- شکل ۳-۲۴: مقایسه توزیع غلظت و بردارهای سرعت میکرومیکسر  $a$  و  $f$  شاخص توانی  $0.85$ ،  $Re = 100$ .
- شکل ۳-۲۵: توزیع بزرگی سرعت برای اعداد رینولدز مختلف، وسط میکرومیکسر  $d$ ، شاخص توانی  $0.75$ .
- شکل ۳-۲۶: توزیع بزرگی سرعت برای شاخص‌های توانی مختلف، وسط میکرومیکسر  $d$ ،  $Re=50$ .
- شکل ۳-۲۷: توزیع غلظت در خروجی میکرومیکسرهای مختلف،  $Re = 1$ ،  $n = 0.6$ .
- شکل ۳-۲۸: تغییرات درجه اختلاط در خروجی میکرومیکسرهای  $a$ ،  $g$ ،  $h$  و  $i$  در مقابل عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی  $0.6$  و  $0.49$ .
- شکل ۳-۲۹: تغییرات افت فشار بی‌بعد جریان در عبور از میکرومیکسرهای  $a$ ،  $g$ ،  $h$  و  $i$  در مقابل عدد رینولدز برای شاخص‌های توانی  $0.6$  و  $0.49$ .
- شکل ۳-۳۰: خطوط جریان در پیچ سوم میکرومیکسر  $g$  در صفحه‌ی میانی، (الف)  $Re=1$ ، (ب)  $Re=50$ ، (ج)  $Re=20$ ، (د)  $Re=300$ ، شاخص توانی  $0.6$ .
- شکل ۳-۳۱: توزیع غلظت و بردارهای سرعت در صفحه‌ی  $YZ$  زاویه‌ی  $90^\circ$  انحنای اول سه میکرومیکسر  $a$ ،  $h$  و  $i$ ، شاخص توانی  $0.6$  در اعداد رینولدز مختلف.
- شکل ۳-۳۲: توزیع غلظت روی مقاطع عمود بر جریان در میکرومیکسرهای  $a$ ،  $g$ ،  $h$  و  $i$  شاخص توانی  $0.6$ ،  $Re=1$ .
- شکل ۳-۳۳: توزیع غلظت در خروجی میکرومیکسرهای  $a$ ،  $g$ ،  $h$  و  $i$  شاخص قانون توانی  $0.6$ ،  $Re=1$ .
- شکل ۳-۳۴: تغییرات درجه اختلاط دو سیال با غلظت‌های  $0$  و  $0.5$  در طول میکرومیکسرهای مختلف برای دبی جرمی  $10^{-6} \times 13/89$  کیلوگرم بر ثانیه.
- شکل ۳-۳۵: تغییرات درجه اختلاط دو سیال با غلظت‌های  $0$  و  $0.5$  در طول میکرومیکسرهای مختلف برای دبی جرمی  $10^{-6} \times 37/39$  کیلوگرم بر ثانیه.
- شکل ۳-۳۶: توزیع غلظت در زاویه‌ی  $90^\circ$  اولین پیچ از میکرومیکسر  $a$  و دبی جرمی  $10^{-6} \times 13/89$  کیلوگرم بر ثانیه،

(الف) سیالی با غلظت ۰ نزدیک به مرکز انحنای کانال، (ب) سیالی با غلظت ۰/۵ نزدیک به مرکز انحنای کانال.

شکل ۳-۳۷: توزیع غلظت در زاویه‌ی ۹۰° اولین پیچ از میکرومیکسر a و دبی جرمی  $۳۷/۳۹ \times 10^{-۶}$  کیلوگرم بر ثانیه، ۱۱۲

(الف) سیالی با غلظت ۰ نزدیک به مرکز انحنای کانال، (ب) سیالی با غلظت ۰/۵ نزدیک به مرکز انحنای کانال.

شکل ۳-۳۸: تغییرات درجه اختلاط دو سیال با غلظت‌های ۰/۷ و ۰/۵ در طول میکرومیکسرهای مختلف برای دبی ۱۱۳

جرمی  $۱۳/۸۹ \times 10^{-۶}$  کیلوگرم بر ثانیه.

## فهرست جداول

صفحه	جدول
۳۷	جدول ۱-۲: پارامتر هندسی بی‌بعد ارائه شده توسط دل‌پلیس و لئولیت.
۴۸	جدول ۲-۲: پارامترهای ویسکوزیته سیال قانون توانی.
۸۸	جدول ۱-۳: نسبت پارامتر بی‌بعد $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکرومیکسرهای منحنی شکل به مقدار $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکروکانال مستقیم.
۱۰۴	جدول ۲-۳: نسبت پارامتر بی‌بعد $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکرومیکسرهای تصحیح شده به مقدار $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکروکانال مستقیم.
۱۰۵	جدول ۳-۳: نسبت پارامتر بی‌بعد $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکرومیکسرهای تصحیح شده به مقدار $\frac{M}{\Delta P/\rho U_m^2}$ برای میکرومیکسر a.
۱۰۶	جدول ۴-۳: راهنمای نمودارهای درجه اختلاط گزارش شده در بخش ۳-۶ برای تعیین موقعیت جزهای ورودی.

### فهرست علائم

مولفه‌های مختصات دکارتی	$x, y, z$	$x, y, z$ راستای به ترتیب در	بردارهای سرعت به ترتیب در راستای $x, y, z$	$u, v, w$
ویسکوزیته	$\mu$		فشار	$P$
ضریب سازگاری	$m$		غلظت جرمی	$C$
شاخص قانون توانی	$n$		ضریب نفوذ جرمی	$D$
تانسور نرخ برش	$\bar{\gamma}$		بردار سرعت	$V$
اندازه‌ی تانسور نرخ برش	$\dot{\gamma}$		خطوط جریان	$\psi$
تانسور تنش برشی	$\bar{\tau}$		عدد رینولدز	$Re$
چگالی	$\rho$		عدد دین	$De$
عرض میکروکانال	$W$		درجه اختلاط	$M$
ارتفاع میکروکانال	$H$		شدت اختلاط	$MI$
شعاع انحنای میکروکانال	$R$		انحراف معیار	$\sigma$
قطر هیدرولیکی	$D_h$		تعداد کل المان‌های سطح	$N$
پارامتر هندسی	$\delta$		درجه اختلاط مربوط به ردیابی ذرات	$COV$
فاصله	$s$		پارامتر بی‌بعد هندسی	$\xi$
			طول محوری میکرومیکسر	$l$

### فهرست زیرنویس‌ها

ناحیه مخلوط شده	$mix$	مقدار مربوط به هر سلول	$i$
کانال	$ch$	متوسط	$m$
		ظاهری	$app$



فصل اول

پیشینه‌ی پژوهش

در دو دهه‌ی اخیر تکنولوژی آزمایشگاه تراشه‌ای<sup>۱</sup> باعث پیشرفت چشمگیر توسعه میکروسیستم‌ها به ویژه در زمینه‌های شیمیایی، بیولوژیکی و کاربردهای پزشکی شده است. تکنولوژی آزمایشگاه تراشه‌ای به طور گسترده در فرآیندهایی مانند کریستالیزاسیون نانوذرات، استخراج، پلیمریزاسیون، سنجش‌های آلی، سنجش آنزیمی، تا خوردگی پروتئین، غربالگری بیولوژیکی، تجزیه‌های سلولی، بهینه‌سازی فرآیندهای زیستی و انتقال دارو کاربرد دارد. از طرفی با کوچک شدن انواع سیستم‌های سیالی، وسایل میکروسیالی مانند میکروپمپ‌ها، میکروسوپاپ‌ها، میکرومیکسرها و ... بسیار پرکاربرد شده‌اند [۱]. بسیاری از وسایل میکروسیالی نیاز به اختلاط دو یا تعداد بیشتری سیال دارند از این رو واحد مخلوط کننده مهم‌ترین واحد در سیستم‌ها میکروسیالی است. میکرومیکسرها به طور گسترده در سیستم‌های بیوشیمیایی، راکتورها و .. استفاده می‌شوند. از کاربردهای میکرومیکسرها می‌توان به اندازه گیری غلظت نمونه موردنظر، مطالعه سینتیک واکنش‌های شیمیایی، حس‌گرهای زیستی، آماده سازی مخلوط قبل از واکنش شیمیایی، پخش دو فاز غیرقابل امتزاج در یکدیگر و جداسازی ذرات براساس میزان نفوذ آن‌ها اشاره کرد [۲]. دو مکانیزم اصلی اختلاط، نفوذ مولکولی و حرکت بی‌نظم در جریان است. در ابعاد ماکرو آشفتگی جریان باعث ایجاد گردابه‌هایی در جریان می‌شود که در نتیجه این گردابه‌ها فرآیند اختلاط انجام می‌گیرد ولی در ابعاد میکرو به دلیل پائین بودن سرعت جریان و غلبه‌ی نیروهای ویسکوز به نیروهای جابجایی، نفوذ مولکولی مکانیزم غالب است در نتیجه برای رسیدن به اختلاط با کیفیت بالاتر نیاز به کانال طولانی و زمان زیادی است. برای کاهش زمان اختلاط در میکرومیکسرها چندین روش وجود دارد، در هر کدام از این روش‌ها از پدیده‌ی خاصی برای بهبود اختلاط در میکرومیکسرها استفاده شده است. در مورد انواع میکرومیکسرها در ادامه بحث خواهد شد. از طرفی اکثر مواد بیولوژیکی و شیمیایی در سیستم‌های میکروسیالی سیالات غیرنیوتنی هستند، از این رو بررسی اختلاط در میکرومیکسرهایی با سیال‌های غیرنیوتنی بسیار پراهمیت است.

---

1. Lab-On-a-Chip (LOC)

## ۲-۱ انواع میکرومیکسرها

به طور کلی میکرومیکسرها به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. میکرومیکسرهای فعال برای افزایش اختلاط به اعمال انرژی خارجی نیاز دارند، در حالیکه میکرومیکسرهای غیرفعال به انرژی خارجی نیاز ندارند و افزایش بازده آن‌ها با تغییر و اصلاح هندسه‌ها امکان پذیر است. بازده اختلاط میکرومیکسرهای فعال خیلی بهتر از میکرومیکسرهای غیرفعال است ولی چون ساخت آن‌ها مشکل و هزینه‌بر است و به دلیل دخیل بدون نیروهای خارجی امکان تاثیر منفی روی سیال تحت اختلاط وجود دارد به همین دلیل، میکرومیکسرهای غیرفعال پرکاربردتر هستند. همچنین قابل ذکر است که فرآیند ساخت میکرومیکسرهای غیرفعال ساده و کم هزینه است.

### ۱-۲-۱ میکرومیکسرهای غیرفعال

پدیده‌ی انتقال جرم در میکرومیکسرهای غیرفعال توسط مکانیزم نفوذ مولکولی و یا حرکت بی‌نظم<sup>۱</sup> صورت می‌پذیرد. این میکرومیکسرها با هندسه‌هایی مناسبی که سطح تماس بین سیالات مختلف را افزایش می‌دهند و در نتیجه مسیر پخش را کوتاه می‌کنند، طراحی می‌شوند. بهبود در حرکت نامنظم می‌تواند با تغییر در طراحی که موجب دستکاری جریان لایه‌ای داخل کانال می‌شود، تحقق یابد. میکرومیکسرهای غیرفعال در حالت کلی به چند حال تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

- ✓ میکرومیکسرهای T و Y شکل
- ✓ میکرومیکسرهای چندلایه‌ای موازی<sup>۲</sup>
- ✓ میکرومیکسرهای چندلایه‌ای متوالی<sup>۳</sup>
- ✓ میکرومیکسر با تمرکز جریان

---

1. Chaotic advection  
2. Parallel Lamination  
3. Sequential Lamination

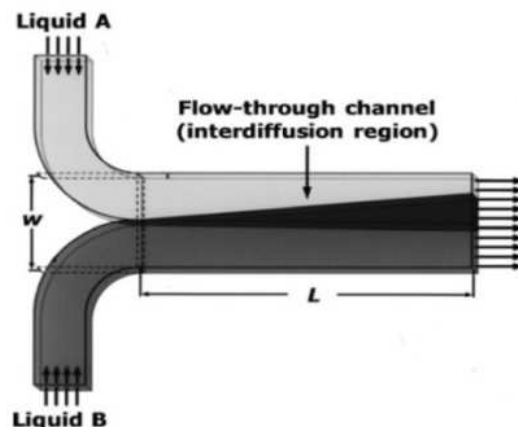
✓ میکرومیکسرهای حرکت بی‌نظم

✓ میکرومیکسر تزریقی

✓ میکرومیکسرهای قطره‌ای

### ۱-۱-۲-۱ میکرومیکسرهای T یا Y شکل

ساده‌ترین و اساسی‌ترین طراحی برای یک میکرومیکسر با کانال‌های T یا Y شکل ارائه شده است. طرحواره‌ی این نوع میکرومیکسرها در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. فرآیند اختلاط در این نوع میکرومیکسرها با هدایت دو سیال تحت اختلاط به داخل کانال اصلی و تماس آن‌ها از طریق جاری شدن در کانال انجام می‌پذیرد. لازم به ذکر است که در طرح‌های پایه‌ای T یا Y شکل، اختلاط فقط وابسته به نفوذ جزها در فصل مشترک بین دو سیال است، بنابراین سرعت اختلاط در این میکرومیکسرها بسیار کم است در نتیجه به کانال اختلاطی با طول بسیار زیاد نیاز است. محققان مختلف با اضافه کردن موانع یا زبری سطح به دیواره‌های کانال، تغییرات جزئی در هندسه این میکرومیکسرها، به منظور بهبود بازده اختلاط پیشنهاد داده‌اند [۳-۵]. وینسترا<sup>۱</sup> و همکاران با ایجاد یک باریک شدن در مسیر کانال اختلاط میکرومیکسر T شکل، طول اختلاط را کاهش دادند [۶].



شکل ۱-۱: میکرومیکسر T شکل با دو سیال ورودی.