



دانشگاه تبریز

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان

تأثیر جریان‌های ورودی نوسانی بر الگوهای جریان و انتقال حرارت در  
میکرومیگسره‌های غیر فعال

استاد راهنما: دکتر سیما باهری اسلامی

استاد مشاور: دکتر سید اسماعیل رضوی

پژوهشگر: سلمان احمدی

شهریور ۱۳۹۲

سلامی

تقدیم بہ

پدر و مادر عزیزم

بہ پاس زحمت بی دریغشان،

محبت بیکرانہشان،

و پستیانی ہای دلسوزانہشان

## تشکر و قدردانی

جادارد از زحمات صمیمانه می خانم دکتر سیما باهری اسلامی به عنوان استاد راهنمای اینجانب که هدایت این پایان نامه را به عهده داشته اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم، همچنین مراتب سپاس و تشکر خود را از جناب آقای دکتر سید اسماعیل رضوی که به عنوان استاد مشاور این پایان نامه وقت خویش را در اختیار بنده گذاشته و راهنمایی های ارزنده ایشان مورد توجه قرار گرفته است ابراز دارم.

از تمام دوستان عزیزم بخصوص مهندس آرمان خانی، مهندس ناصر شوکتی، مهندس آرمان کیانپور، مهندس صلاح رستمی، مهندس سامان صالحی، مهندس معود حسینی و مهندس احسان حیدری صمیمانه تشکر می کنم.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: ادبیات و پیشینه تحقیق .....
۲	۱-۱- مقدمه .....
۳	۲-۱- دسته بندی میکرومیکسرها .....
۴	۱-۲-۱- ساختارهای مختلف میکرومیکسرها ی غیر فعال: .....
۴	۱-۱-۲-۱- میکرومیکسر چند لایه ای .....
۷	۲-۱-۲-۱- میکرومیکسر جداساز و ترکیب دوباره .....
۸	۳-۱-۲-۱- میکرومیکسر حرکت نامنظم (حرکت توده ای) .....
۱۰	۴-۱-۲-۱- میکرومیکسر تزریقی .....
۱۱	۵-۱-۲-۱- میکرومیکسر قطره ای .....
۱۱	۲-۲-۱- ساختارهای مختلف میکرومیکسرها ی فعال .....
۱۱	۱-۲-۲-۱- میکرومیکسر فشار نوسانی (سرعت نوسانی) .....
۱۲	۲-۲-۲-۱- میکرومیکسر هیدروالکتریکی .....
۱۲	۳-۲-۲-۱- میکرومیکسر هیدرومغناطیسی .....
۱۳	۴-۲-۲-۱- میکرومیکسر امواج صوتی .....
۱۴	۵-۲-۲-۱- میکرومیکسر گرمایی .....
۱۴	۳-۱- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه میکرومیکسر با سرعت های ورودی نوسانی .....
۱	فصل دوم: مواد و روش ها .....
۲۰	۱-۲- مفاهیم .....
۲۰	۱-۱-۲- جریان در میکروکانال ها .....
۲۱	۲-۱-۲- ساز و کارهای انتقال جرم .....
۲۴	۳-۱-۲- کمیت های بی بعد مؤثر در میکروکانال ها .....
۲۵	۴-۱-۲- شرایط عملکرد میکرومیکسرها .....
۲۶	۵-۱-۲- رژیم های جریان در میکرومیکسرها .....

۲۸	۲-۲- معادلات حاکم .....
۲۸	۲-۲-۱- معادله نفوذ مولکولی .....
۳۰	۲-۲-۲- معادله پیوستگی و انتقال جرم .....
۳۲	۲-۲-۳- معادله مومنتم .....
۳۲	۲-۲-۴- معادله انرژی .....
۳۳	۲-۲-۵- کمیت‌های میزان اختلاط و انتقال حرارت .....
۳۳	۲-۳- بیان مسأله و روش حل عددی .....
۳۴	۲-۳-۱- هندسه و شرایط فیزیکی .....
۳۶	۲-۳-۲- شبکه‌بندی و روش حل عددی .....
۳۶	۲-۳-۳- شرایط مرزی .....
۱	فصل سوم: نتایج .....
۳۹	۳-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی .....
۳۹	۳-۲- اعتبار سنجی .....
۴۲	۳-۳- بررسی دو بعدی میکرومیکسرها و انتخاب هندسه مناسب .....
۴۲	۳-۳-۱- نحوه عملکرد سرعت‌های ورودی نوسانی .....
۴۳	۳-۳-۲- تأثیر سرعت‌های ورودی نوسانی بر هندسه‌های مختلف میکرومیکسر .....
۵۲	۳-۳-۳- بررسی کمیت‌های مختلف بر عملکرد میکرومیکسر I و انتخاب مناسب‌ترین حالت .....
۵۲	۳-۳-۳-۱- تاثیر زاویه راس .....
۵۳	۳-۳-۳-۲- تاثیر استفاده از کانال‌های ورودی متقابل و موانع .....
۵۵	۳-۳-۳-۳- اختلاف فاز نود درجه .....
۵۶	۳-۴- بررسی سه بعدی میکرومیکسر انتخابی .....
۵۷	۳-۴-۱- استقلال نتایج از شبکه از نظر اختلاط و توزیع دما .....
۵۷	۳-۴-۲- بررسی اختلاط .....
۵۶	۳-۴-۲-۱- تاثیر عدد رینولدز .....
۶۶	۳-۴-۲-۲- تاثیر عدد استروهل .....

۷۰	..... تأثیر دامنه ۳-۲-۴-۳
۷۳	..... بررسی توزیع دما ۵-۳
۷۳	..... تأثیر عدد رینولدز ۱-۵-۳
۷۶	..... تأثیر عدد استروهال ۲-۵-۳
۷۹	..... تأثیر دامنه ۳-۵-۳
۸۳	..... نتیجه گیری ۶-۳
۸۴	..... پیشنهادات برای ادامه کار ۷-۳
۸۵	..... مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: میکرومیکسر Y شکل (a) +۴۵ درجه (b) -۴۵ درجه (c) -۴۵ درجه دارای گلوگاه [1] ..... ۴
- شکل ۲-۱: میکرومیکسر چند لایه ای موازی [9] ..... ۵
- شکل ۳-۱: میکرومیکسر چند لایه ای سری [9] ..... ۵
- شکل ۴-۱: میکرومیکسر مدور [10] ..... ۵
- شکل ۵-۱: میکرومیکسر صفحه شطرنجی [11] ..... ۶
- شکل ۶-۱: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی دارای سه کانال ورودی [12] ..... ۶
- شکل ۷-۱: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی با بیش از سه کانال ورودی [13] ..... ۷
- شکل ۸-۱: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی فوق العاده [14] ..... ۷
- شکل ۹-۱: شماتیک میکرومیکسر جداساز و ترکیب دوباره [15] ..... ۸
- شکل ۱۰-۱: جریان دین در کانال های منحنی [18] ..... ۹
- شکل ۱۱-۱: طرح هایی از میکرومیکسر در اعداد رینولدز بالا [21] ..... ۹
- شکل ۱۲-۱: طرح هایی از میکرومیکسر در اعداد رینولدز متوسط [21] ..... ۱۰
- شکل ۱۳-۱: طرح هایی از میکرومیکسر در اعداد رینولدز پایین [21] ..... ۱۰
- شکل ۱۴-۱: میکرومیکسر تزریقی [24] ..... ۱۱
- شکل ۱۵-۱: میکرومیکسر قطره ای (a) ساختار T شکل (b) ساختار تمرکز هیدرودینامیکی [26] ..... ۱۱
- شکل ۱۶-۱: میکرومیکسر با سرعت نوسانی [28] ..... ۱۲
- شکل ۱۷-۱: میکرومیکسر الکترواستاتیک [29] ..... ۱۲
- شکل ۱۸-۱: میکرومیکسر هیدرومغناطیسی (a) دو الکترومگنت (b) یک الکترومگنت [30] ..... ۱۳
- شکل ۱۹-۱: میکرومیکسر امواج صوتی [31] ..... ۱۳
- شکل ۲۰-۱: میکرومیکسر گرمایی [33] ..... ۱۴
- شکل ۲۱-۱: میکرومیکسر مرجع [36] ..... ۱۵
- شکل ۲۲-۱: میکرومیکسرهای مرجع [39] ..... ۱۵
- شکل ۲۳-۱: میکرومیکسرهای مرجع [40] ..... ۱۶
- شکل ۲۴-۱: میکرومیکسر با دیواره موج دار [42] ..... ۱۶
- شکل ۲۵-۱: میکرومیکسر مغناطیسی (b) پاسخ زمانی متناوب به الکترومگنت ها [43] ..... ۱۷
- شکل ۲۶-۱: میکرومیکسر T شکل [44] ..... ۱۷
- شکل ۲۷-۱: میکرومیکسر واگرا [46] ..... ۱۸
- شکل ۲۸-۱: نمای کلی مربوط به میکرومیکسر تحت اعمال میدان الکتریکی [47] ..... ۱۸
- شکل ۱-۲: [51] ..... ۲۱
- شکل ۲-۲: نمودار Pe-Re در میکرومیکسرها [53] ..... ۲۶
- شکل ۳-۲: رژیم جریان مستقیم در داخل میکرومیکسر T شکل [54] ..... ۲۶
- شکل ۴-۲: رژیم جریان گردابی در داخل میکرومیکسر T شکل [54] ..... ۲۷



- شکل ۲-۵: رژیم جریان پیچشی در داخل میکرومیکسر T شکل [54]..... ۲۷
- شکل ۲-۶: تغییرات درجه اختلاط با عدد رینولدز [55]..... ۲۷
- شکل ۲-۷: نفوذ مولکولی در یک محلول دو جزئی..... ۲۹
- شکل ۲-۸: یک عنصر هندسی سیال..... ۳۰
- شکل ۲-۹: انواع هندسه های مختلف میکرومیکسر، a: هندسه T شکل ساده b: هندسه با مانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط c: هندسه با مانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط d: هندسه با چهار کانال ورودی متقابل e: هندسه با دو کانال ورودی موازی و دو کانال ورودی متقابل f: هندسه ساده بدون مانع در وسط g: با مانع دایره ای در وسط کانال اختلاط h: هندسه با مانع مثلثی در وسط کانال اختلاط i: هندسه لوزی شکل..... ۳۵
- شکل ۲-۱۰: نمونه ای از شبکه محاسباتی ( میکرومیکسر a )..... ۳۶
- شکل ۳-۱: نمونه ای از استقلال نتایج از شبکه بر اساس درجه اختلاط ۲ میلی متر بعد از انشعاب،  $t=4\text{ s}$ ..... ۳۹
- شکل ۳-۲: طرحواره لوله دارای اتساع [58]..... ۴۰
- شکل ۳-۳: پروفیل سرعت محوری الف)  $x=0$  و  $t=2.2\text{ s}$  و  $x=11.25\text{ mm}$  و  $t=1\text{ s}$ ..... ۴۰
- شکل ۳-۴: طرحواره میکرومیکسر T شکل [59]..... ۴۱
- شکل ۳-۵: درجه اختلاط در موقعیت های مختلف انقباض..... ۴۱
- شکل ۳-۶: مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج مرجع [41] برای میکرومیکسر T شکل ساده، الف) تغییرات درجه اختلاط بر حسب فاصله از انشعاب، ب) توزیع غلظت..... ۴۲
- شکل ۳-۷: جریان در میکرومیکسر T شکل الف) تغییرات زمانی سرعت جریان در دو ورودی ب) خطوط جریان در زمان a) ج) خطوط جریان در زمان b) د) خطوط جریان در زمان c) ل) خطوط جریان در زمان d) م) خطوط جریان در زمان e)..... ۴۳
- شکل ۳-۸: خطوط جریان در حالت سرعت های ورودی یکنواخت  $Re=0.17$ ، a: هندسه T شکل ساده b: هندسه با مانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط c: هندسه با مانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط d: هندسه با چهار ورودی متقابل e: هندسه با دو کانال ورودی موازی و دو کانال ورودی متقابل f: هندسه ساده بدون مانع در وسط کانال اختلاط g: هندسه با مانع دایره ای در وسط کانال اختلاط h: هندسه با مانع مثلثی در وسط کانال اختلاط i: هندسه لوزی شکل..... ۴۴
- شکل ۳-۹: توزیع غلظت در میکرومیکسرها با سرعت های ورودی ثابت  $Re=0.17$ ، a: هندسه T شکل ساده b: هندسه با مانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط c: هندسه با مانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط d: هندسه با چهار کانال ورودی متقابل e: هندسه با دو کانال ورودی موازی و دو کانال ورودی متقابل f: هندسه ساده بدون مانع در وسط کانال اختلاط g: هندسه با مانع دایره ای در وسط کانال اختلاط h: هندسه با مانع مثلثی در وسط کانال اختلاط i: هندسه لوزی شکل..... ۴۷
- شکل ۳-۱۰: توزیع غلظت در میکرومیکسرها با سرعت های ورودی نوسانی  $Re=0.17$ ، a: هندسه T شکل ساده b: هندسه با مانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط c: هندسه با مانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط d: هندسه با چهار کانال ورودی متقابل e: هندسه با دو کانال ورودی موازی و دو کانال ورودی متقابل f: هندسه ساده بدون مانع در وسط کانال اختلاط g: هندسه با مانع دایره ای در وسط کانال اختلاط h: هندسه با مانع مثلثی در وسط کانال

- اختلاط i: هندسه لوزی شکل ..... ۵۰
- شکل ۱۱-۳: تغییرات کسر جرمی در خروجی میکرومیکسرها بعد از گذشت ۱۵s ..... ۵۰
- شکل ۱۲-۳: تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسرها بر حسب فاصله از انشعاب بعد از گذشت ۱۵s ..... ۵۲
- شکل ۱۳-۳: پروفیل غلظت میکرومیکسرها در زمان ۱۵ ثانیه، الف: زاویه رأس  $60^\circ$ ، ب: زاویه رأس  $120^\circ$  درجه، ج: دایروی ..... ۵۳
- شکل ۱۴-۳: انواع هندسه i ..... ۵۴
- شکل ۱۵-۳: تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسرها بر حسب فاصله از انشعاب بعد از گذشت ۱۵s ..... ۵۵
- شکل ۱۶-۳: پروفیل غلظت بعد از گذشت ۱۵ ثانیه الف)  $\phi = 0$  ب)  $\phi = 90$  ج)  $\phi = 180$  ..... ۵۶
- شکل ۱۷-۳: هندسه میکرومیکسر سه بعدی m ..... ۵۶
- شکل ۱۸-۳: استقلال نتایج از شبکه میکرومیکسر سه بعدی بر اساس DM و DMT ..... ۵۷
- شکل ۱۹-۳: تغییرات درجه اختلاط در طول کانال اختلاط در زمان  $t=10s$  برای الف)  $St=0$  ب)  $St=0.051$  ج)  $St=0.102$  د)  $St=0.204$  ل)  $St=0.408$  م)  $St=0.612$  ..... ۶۰
- شکل ۲۰-۳: تغییرات درجه اختلاط در خروجی میکرومیکسر با عدد رینولدز در استروهاالهای مختلف در زمان  $t=10s$  ..... ۶۱
- شکل ۲۱-۳: خطوط جریان در  $Re=0.156$  در زمان  $t=10s$  برای الف)  $St=0.102$  ب)  $St=0.204$  ج)  $St=0.408$  د)  $St=0.612$  ..... ۶۲
- شکل ۲۲-۳: خطوط جریان در  $Re=0.78$  در زمان  $t=10s$  برای الف)  $St=0.102$  ب)  $St=0.204$  ج)  $St=0.408$  د)  $St=0.612$  ..... ۶۲
- شکل ۲۳-۳: خطوط جریان در  $Re=1.56$  در زمان  $t=10s$  برای الف)  $St=0.102$  ب)  $St=0.204$  ج)  $St=0.408$  د)  $St=0.612$  ..... ۶۳
- شکل ۲۴-۳: تغییرات درجه اختلاط در طول کانال اختلاط در اعداد استروهاال مختلف الف)  $Re=0.156$  ب)  $Re=0.78$  ج)  $Re=1.56$  ..... ۶۷
- شکل ۲۵-۳: تغییرات درجه اختلاط در خروجی میکرومیکسر با عدد استروهاال در رینولدزهای مختلف ..... ۶۷
- شکل ۲۶-۳: توزیع غلظت سیال ۱ در  $Re=0.156$  در زمان  $t=10s$  الف)  $st=0.025$  ب)  $st=0.051$  ج)  $st=0.102$  د)  $st=0.204$  ل)  $st=0.408$  م)  $st=0.612$  ن)  $st=0.816$  ..... ۷۰
- شکل ۲۷-۳: تغییرات درجه اختلاط با دامنه در خروجی میکرومیکسر الف)  $St=0.102$  ب)  $St=0.204$  ..... ۷۱
- شکل ۲۸-۳: توزیع غلظت سیال ۱ در  $Re=0.78$  و  $f=20$  الف)  $A=8$  ب)  $A=16$  ج)  $A=22$  د)  $A=28$  ..... ۷۲
- شکل ۲۹-۳: توزیع غلظت در سطح مقطع  $x=0.5mm$  الف)  $A=8$  ب)  $A=16$  ج)  $A=22$  د)  $A=28$  ..... ۷۳
- شکل ۳۰-۳: تغییرات DMT در طول کانال اختلاط برای الف)  $St=0$  ب)  $St=0.051$  ج)  $St=0.102$  د)  $St=0.204$  ل)  $St=0.408$  م)  $St=0.612$  ..... ۷۶
- شکل ۳۱-۳: تغییرات DMT در خروجی میکرومیکسر با عدد رینولدز در اعداد استروهاال مختلف ..... ۷۶
- شکل ۳۲-۳: تغییرات DMT در طول کانال اختلاط در اعداد استروهاال مختلف (a)  $Re=0.156$  (b)  $Re=0.78$  (c)  $Re=1.56$  ..... ۷۸

شکل ۳-۳۳: تغییرات DMT با عدد استروهال در اعداد رینولدز مختلف ..... ۷۸

شکل ۳-۳۴: تغییرات درجه اختلاط با دامنه در خروجی میکرومیکسر الف)  $St=0.102$  ب)  $St=0.204$  ..... ۷۹

شکل ۳-۳۵: تغییرات DMT در طول کانال اختلاط در دامنه های مختلف الف)  $Re=0.156, st=0.102$  ب)  $Re=0.156, st=0.104$  ج)  $Re=0.78, st=0.102$  د)  $Re=0.78, st=0.104$  ل)  $Re=1.56, st=0.102$  م)  $Re=1.56, st=0.104$  ..... ۸۲

## فهرست جداول

جدول ۱-۳: درجه اختلاط میانگین در خروجی میکرومیکسرها، افت فشار در کانال اختلاط و نسبت درجه اختلاط به افت فشار بعد از رسیدن به حالت پایا .....	۵۱
جدول ۲-۳: اثر شکل میکرومیکسر 1 بر درجه اختلاط .....	۵۳
جدول ۳-۳: درجه اختلاط در انواع میکرومیکسره‌های لوزی شکل با تعداد مانع ها و کانال های ورودی مختلف .....	۵۴
جدول ۴-۳: پارامترهای مختلف استفاده شده برای جریان های ورودی نوسانی .....	۵۷

فصل اول

ادبیات و پیشینه تحقیق

## ۱-۱- مقدمه

استفاده از مخلوط کننده‌ها در آزمایشگاه‌ها برای مخلوط کردن سیالات گوناگون کاری معمول و متداول است. مخلوط کردن مواد مختلف در ابعاد میکرو با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علم و وارد شدن تکنولوژی‌های میکرو و نانو در علوم مختلف یک نیاز اساسی است. نمونه آن ایجاد شرایط مناسب برای کشت و رشد بافت‌ها و سلول‌های زنده است. این بافت‌ها و سلول‌ها نسبت به محیطی که در آن رشد پیدا می‌کنند حساسیت فراوانی دارند، بطوری‌که با تغییری جزئی در محیط نسبت به آن واکنش نشان داده و سیر تکاملی و رشد خود را تغییر می‌دهند. به همین دلیل فراهم آوردن شرایط مناسب برای بافت اهمیت فوق العاده‌ای دارد. در چنین سیستم‌هایی نحوه مخلوط شدن سیالات، میزان مخلوط شوندگی و سرعت آن از اهمیت بالایی برخوردار است. در دهه‌های اخیر اختلاط توسط سیستم‌های میکروسیالی توجه علوم و صنایع مختلف را به خود جلب کرده است. میکرومیکسرهای یکی از دستگاه‌های میکروسیالی می‌باشند که برای اختلاط حداقل دو سیال که می‌توانند مایع، گاز و یا جامد باشند، به کار می‌روند. این دستگاه‌ها با هندسه‌هایی از کانال طراحی می‌شوند که باعث کوتاه شدن مسیر اختلاط و با افزایش لایه مشترک سیالات و گرا دیان غلظت موجب افزایش میزان اختلاط می‌شوند.

اختلاط تنها یک فرآیند طبیعی نیست بلکه در بسیاری از فرآیندهای ساخت دست بشر مهمترین مرحله به شمار می‌آید. اختلاط موثر، پایه و اساس فرآیندهای شیمیایی، صنایع غذایی، آنالیزهای شیمیایی، موتورهای احتراق و ... می‌باشد. در سال‌های اخیر، اختلاط مقدار کمی از مایعات توسط سیستم‌های میکروسیالی، سیستم‌های آنالیز میکرو و سیستم‌های سنتز و آنالیز میکرو مورد توجه بسیاری از علوم و صنایع مختلف قرار گرفته است. فواید استفاده از این سیستم‌های میکروسیالی در مقایسه با ابعاد ماکرو این است که حمل آن آسان، هزینه‌اش پایین، فرآیند سنتز و آنالیز را همزمان انجام می‌دهند، مقدار کمی واکنش دهنده مصرف می‌کنند و میزان محصولات فرعی و مصرف انرژی آن‌ها بسیار پایین می‌باشد. میکرومیکسرهای کوچک نه تنها در مطالعات سینتیکی و واکنش‌های شیمیایی کاربرد دارند بلکه بخشی جدا نشدنی در فرآیندهای بیولوژیکی و شیمیایی و حسگرهای شیمیایی می‌باشند.

برای انجام واکنش‌های شیمیایی مختلف در آزمایشگاه‌های تراشه‌ای قسمت‌های گوناگونی مورد نیاز است که یکی از این قسمت‌ها میکرومیکسرها هستند. طول مشخصه کانال اختلاط میکرومیکسرها در محدوده چند میلیمتر می‌باشد. عرض میکروکانال‌های معمولی در محدوده ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر می‌باشد. ارتفاع میکروکانال نیز از مرتبه عرض میکروکانال و یا کوچکتر از آن است. حجم داخلی میکرومیکسر از مرتبه میکرولیتر و یا میلی لیتر می‌باشد. در این دستگاه‌های کوچک، نسبت سطح به حجم سیالات اختلاط افزایش می‌یابد. در مقایسه با اندازه‌های مولکولی، ابعاد و حجم میکرومیکسرها بسیار بزرگتر است. این واقعیت موجب ایجاد دو مشخصه کلیدی در میکرومیکسرها می‌شود. اولاً امکان طراحی میکرومیکسرها را بر اساس دستکاری لایه مجازی بین سیالات اختلاط توسط هندسه کانال و یا اختلال خارجی می‌دهد و ثانیاً فرآیندهای مولکولی مانند سینتیک واکنش‌ها در میکرومیکسر بدون تغییر باقی می‌ماند.

میکرومیکسرها به صورت گسترده‌ای در سیستم‌های بیوشیمیایی (آنالیزهای شیمیایی، بیولوژیکی، ترکیب داروهای مختلف، انحلال دارو در خون و ...)، در میکروآکتورها برای واکنش‌های شیمیایی و به عنوان MEMS<sup>1</sup> و

<sup>1</sup>. Micro Electro Mechanical systems

وسيله های آزمایشگاه تراشه ای<sup>۱</sup> استفاده می شوند. تقریباً هر آزمایش شیمیایی نیازمند اختلاط معرف ها با نمونه می باشند. از کاربردهای میکرومیکسرها که تاکنون در مقالات و تحقیقات علمی از آن ها نام برده شده است، می توان به اندازه گیری غلظت نمونه مورد نظر، مطالعه سینتیک واکنش های شیمیایی، حس گرهای محیط زیستی ( به عنوان مثال کشف آمونیاک در محلول های آبی)، آماده سازی مخلوط قبل از واکنش شیمیایی، پخش کردن دو فاز غیر قابل امتزاج در یکدیگر و جداسازی ذرات بر اساس میزان ضریب نفوذ آنها اشاره کرد [1-5].

اختلاط شامل دو مکانیسم انتقال جرم می باشد:

۱- نفوذ مولکولی<sup>۲</sup>

۲- حرکت توده<sup>۳</sup>

در ابعاد ماکرو، جریان آشفته موجب تولید گردابه می شود و این گردابه ها باعث کاهش ضخامت و افزایش سطح مشترک بین سیال ها می شوند. در فواصل دور از دیواره کانال اختلاط، سرعت این مکانیسم بسیار بالاتر از سرعت مکانیسم نفوذ مولکولی می باشد. در ابعاد میکرو اختلاط بسیار مشکل تر از ابعاد ماکرو می باشد. در این ابعاد عدد رینولدز کوچک و جریان آرام می باشد. در این حالت نفوذ مولکولی بسیار موثر است. در غیاب جریان آشفته و همزن، مکانیسم های نفوذ گردابی و حرکت توده در این ابعاد وجود ندارد. اختلاط سیالات منحصر بر اساس مکانیسم نفوذ مولکولی نیازمند زمانی بسیار طولانی می باشد. برای غلبه بر این مشکل محققان به ساخت میکرومیکسرهاى متعددی روی آوردند.

## ۱-۲- دسته بندی میکرومیکسرها

به طور کلی میکرومیکسرها به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم بندی می شوند. میکرومیکسرهاى فعال برای افزایش اختلاط نیازمند انرژی خارجی می باشند. این انرژی توسط امواج فراصوتی، میدان فشاری، حرارتی، مغناطیسی، الکتريکی و ... می تواند تامین شود. در میکرومیکسرهاى غیر فعال سعی می شود با استفاده از هندسه خاص این دستگاه ها که شامل زانو و کانال های منحنی وار است، لایه مجازی بین سیالات اختلاط دستکاری می شود و میزان اختلاط افزایش می یابد [6-8].

در میکرومیکسرهاى فعال، طول، زمان اختلاط کامل و فضای اشغال شده کمتر از میکرومیکسرهاى غیر فعال و هندسه این نوع میکرومیکسرها ساده تر می باشد. اما ساخت این نوع میکرومیکسرها با فرآیندهای پیچیده ای صورت می گیرد و پر هزینه می باشد و همچنین کنترل آنها مشکل و هزینه بر است و به سختی با دیگر دستگاه های میکروسیالی هماهنگ می شوند. برخی از انرژی های خارجی مورد استفاده در این میکرومیکسرها مانند بهره گیری از امواج فراصوتی و گرادیان دمایی بالا باعث آسیب دیدگی سیال های بیولوژیکی می شوند و از این میکرومیکسرها در هر فرآیند بیولوژیکی نمی توان استفاده کرد.

در میکرومیکسرهاى غیر فعال به دلیل اینکه از انرژی خارجی استفاده نمی شود طول اختلاط و حجم اشغال شده توسط این میکرومیکسرها بیشتر و هندسه شان پیچیده تر از میکرومیکسرهاى فعال می باشد. اما این میکرومیکسرها با روش های ساده تر ساخته می شوند، هزینه شان کمتر است، فرآیندها ایمن تر می باشند و با دیگر

<sup>2</sup>. Lab on Chips

<sup>2</sup>. molecular diffusion

<sup>3</sup>. advection

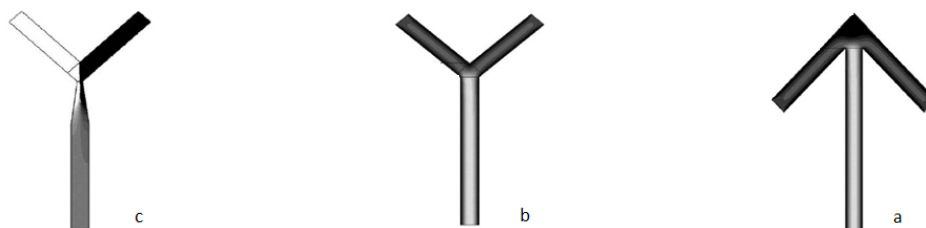
دستگاه‌های میکروسیالی به خوبی هماهنگ می‌شوند.

## ۱-۲-۱- ساختارهای مختلف میکرومیکسرهای غیر فعال:

### ۱-۲-۱-۱- میکرومیکسر چند لایه ای<sup>۱</sup>

طراحی پایه این میکرومیکسرها دو ورودی دارد که به آن میکرومیکسر Y شکل گویند. به حالت خاصی از میکرومیکسر Y شکل که ورودی‌ها عمود بر کانال اختلاط باشند، میکرومیکسر T شکل گویند. در شکل ۱-۱-۱ طرحواره میکرومیکسر Y شکل نشان داده شده است. میکرومیکسرهای چند لایه ای ورودی‌ها را به n زیر جریان تقسیم می‌کند و به صورت یک جریان چند لایه ای وارد میکرومیکسر می‌شوند. در این میکرومیکسرها، سیالات اختلاط به صورت تناوبی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند.

گویی و همکاران [1] در تحقیقی طول اختلاط را در ساختارهای مختلف میکرومیکسر Y شکل به صورت تجربی بدست آوردند. میکرومیکسر Y شکل سه نوع ساختار دارد: میکرومیکسر Y شکل با زاویای ۴۵+ درجه، میکرومیکسر Y شکل با زاویای ۴۵- درجه و میکرومیکسر Y شکل دارای گلوگاه.



شکل ۱-۱: میکرومیکسر Y شکل (a) ۴۵+ درجه (b) ۴۵- درجه (c) ۴۵- درجه دارای گلوگاه [1]

طبق تحقیق آن‌ها در این ساختارها، طول اختلاط (طولی از کانال اختلاط که اختلاط کامل صورت گرفت) در ساختار میکرومیکسر Y شکل دارای گلوگاه، کمترین و در ساختار میکرومیکسر Y شکل با زاویای ۴۵- درجه بیشترین مقدار می‌باشد.

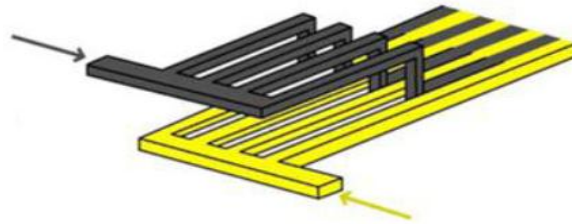
میکرومیکسر چند لایه ای پنج ساختار دارند:

### ۱- موازی<sup>۲</sup>

در این نوع میکرومیکسرها دو سیال بطور موازی در کانال اختلاط با هم در تماس هستند، که در شکل ۲-۱-۱ نمای کلی این میکرومیکسر نشان داده شده است. محدوده عدد رینولدز در این نوع میکرومیکسرها ۰/۰۰۵ تا ۱۰۰۰ می‌باشد.

<sup>1</sup>. Lamination  
<sup>2</sup>. Parallel

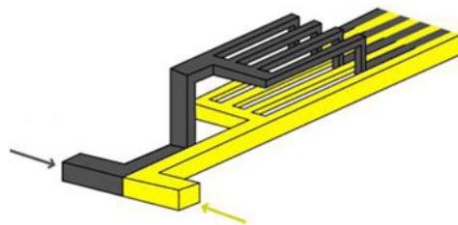




شکل ۲-۱: میکرومیکسر چند لایه ای موازی [9]

۲- سری<sup>۱</sup>

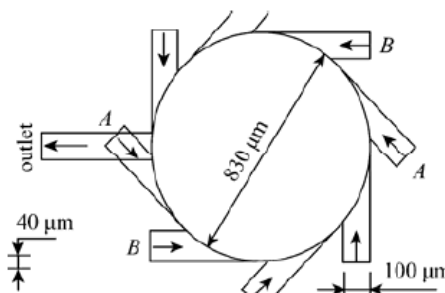
در این نوع میکرومیکسرها دو سیال بطور پی در پی با هم اختلاط پیدا می کنند که در شکل زیر چند نوع از طراحی این میکرومیکسرها نشان داده شده است. محدوده عدد رینولدز در این نوع میکرومیکسرها ۰/۰۰۲ تا ۱ می باشد.



شکل ۳-۱: میکرومیکسر چند لایه ای سری [9]

۳- مدور<sup>۲</sup>

در میکرومیکسرهای مدور سیال ها از چند قسمت وارد یک محفظه مدور می شوند. این محفظه مدور با نیرویی که از ورود سیال ها ایجاد می شود (مومنتم)، شروع به چرخش می کند. این چرخش موجب تولید گردابه و افزایش اختلاط حتی در اعداد رینولدز کم می شود. ژاو و همکاران [10] چانگ و همکاران، ساندارام و تافتی و لین و همکاران، تحقیقات گسترده ای در مورد این نوع از میکرومیکسرها انجام داده اند. در شکل ۴-۱ شماتیک میکرومیکسر مدور نشان داده شده است.

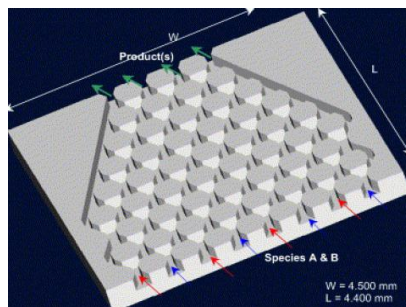


شکل ۴-۱: میکرومیکسر مدور [10]

۴- صفحه شطرنجی<sup>۱</sup>

<sup>1</sup>. Serial  
<sup>2</sup>. Circular

در میکرومیکسر صفحه شطرنجی، آرایش متناوبی از سیالات حلال و حل شونده تشکیل می شود. این میکرومیکسر باعث افزایش سطح تماس بین دو سیال می شود. ادیسون و همکاران [11] اولین میکرومیکسر صفحه شطرنجی را در سال ۲۰۰۶ ساختند. طول اختلاط کامل در این میکرومیکسر ۱۴۰۰ میکرومتر گزارش شد. که در شکل زیر نمای کلی این میکرومیکسر نشان داده شده است.

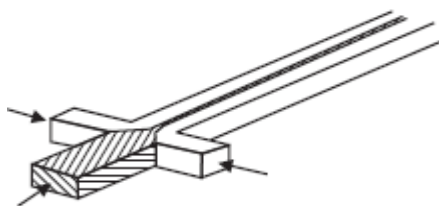


شکل ۱-۵: میکرومیکسر صفحه شطرنجی [11]

#### ۵- تمرکز هیدرودینامیکی<sup>۲</sup>

طراحی پایه ی میکرومیکسرهای تمرکز هیدرودینامیکی میکرومیکسرهای موازی است که دو ساختار دارند:

۱- میکرومیکسر دارای سه کانال ورودی می باشد. سیال حل شونده از کانال وسط و سیال حلال با دبی بالاتر از سیال حل شونده از کانال های طرفین وارد می شود. در این میکرومیکسر سیال حل شونده توسط سیال حلال احاطه شده و سپس وارد کانال اختلاط می شوند. در این حالت به دلیل نیروی برشی که سیال حلال به سیال حل شونده اعمال می کند، سیال مرکزی به صورت لایه ای با ضخامت چند میکرومتر در می آید. در شکل زیر طرحواره این میکرومیکسر نشان داده شده است.

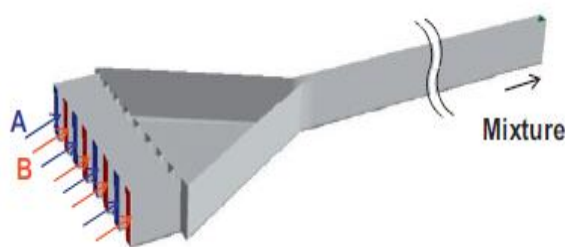


شکل ۱-۶: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی دارای سه کانال ورودی [12]

۲- در این حالت سیالات اختلاط به صورت لایه های متناوبی وارد میکرومیکسر می شوند. این لایه ها سپس وارد کانال اختلاط که بسیار تنگ می باشد، می شوند. در این حالت به دلیل کاهش عرض کانال ، ضخامت لایه ها کم و میزان انتقال جرم نفوذی بین آن ها افزایش می یابد. شکل ۱-۷ طرحواره این نوع از میکرومیکسرهای تمرکز هیدرودینامیکی را نشان می دهد.

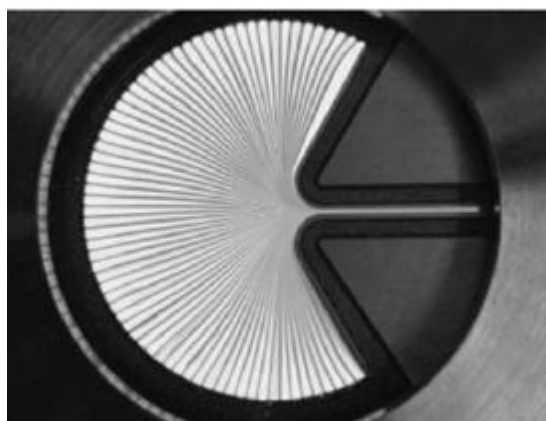
<sup>1</sup>. Chessboard

<sup>2</sup>. hydrodynamic focusing



شکل ۷-۱: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی با بیش از سه کانال ورودی [13]

با توجه به رابطه (۶) میکرومیکسر ایده آل، میکرومیکسری است که تعداد زیادی از لایه های سیال به درون یک کانال اختلاط با نسبت تجمع تا حد امکان بالا هدایت شوند. پارک و همکاران [14] یک میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی جدید به نام میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی فوق العاده ساختند. این میکرومیکسر قادر به انجام اختلاط کامل در کمتر از ۵ میلی ثانیه بود. در شکل ۸-۱ شماتیک میکرومیکسر تجمع هیدرودینامیکی فوق العاده نشان داده شده است.

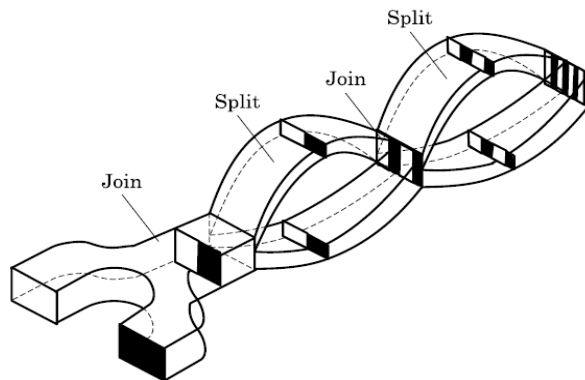


شکل ۸-۱: میکرومیکسر تمرکز هیدرودینامیکی فوق العاده [14]

#### ۲-۱-۲-۱- میکرومیکسر جداساز و ترکیب دوباره<sup>۱</sup>

طراحی پایه این نوع میکرومیکسرها، میکرومیکسرهای سری می باشد. این نوع از میکرومیکسرها، به صورت پی در پی منجر به افزایش تعداد لایه های سیالات می شوند. در این میکرومیکسرها از یک سو سطح تماس افزایش می یابد و از سوی دیگر ضخامت لایه ها کاسته می شود. برای رسیدن به این هدف، سه مرحله در این دستگاه ها وجود دارد: ۱- جداسازی جریان ها، ۲- تغییر جهت جریان های جدید و ۳- ترکیب دوباره جریان ها. در شکل زیر شماتیک میکرومیکسر جداسازی و ترکیب دوباره نشان داده شده است.

<sup>۱</sup>. split-and-recombination



شکل ۹-۱: شماتیک میکرومیکسر جداساز و ترکیب دوباره [15]

در این میکرومیکسرها، بعد از  $m$  مرحله جدایش و ترکیب دوباره،  $2^m$  لایه از سیالات اختلاط تشکیل می شود و  $4^{m-1}$  بار میزان اختلاط افزایش می یابد. سطح مشترک در این میکرومیکسرها به صورت نمایی افزایش می یابد که از این لحاظ شبیه میکرومیکسرهاى حرکت نامنظم عمل می کنند.

برین برگ و همکاران [16] میکرومیکسری جداسازی و ترکیب دوباره سیالات با ساختاری نزدیک به میکسرهایی که در صنایع شیمیایی و غذایی کار می کنند، ساختند.

### ۳-۱-۲-۱- میکرومیکسر حرکت نامنظم (حرکت توده ای)<sup>۱</sup>

در کنار نفوذ، حرکت توده ای یکی از مهمترین روش های انتقال جرم می باشد. یکی از روش های معمول در میکسرهایی رایج که ایجاد حرکت توده ای میکند، استفاده از همزن می باشد. در مورد میکرومیکسرهایی غیر فعال، سوال اساسی این است که چگونه می توان در غیاب همزن با تولید حرکت توده ای میزان اختلاط را افزایش داد. برای طراحی این نوع میکرومیکسرها معمولاً سه محدوده،  $Re > 100$  به عنوان رینولدز بالا،  $10 < Re < 100$  به عنوان رینولدز متوسط و  $Re < 10$  به عنوان رینولدز پایین در نظر می گیرند. محدوده عملکرد این میکرومیکسرها رینولدز ۰/۰۰۱ تا ۵۰۰ می باشد.

در اعداد رینولدز بزرگتر از ۱۰۰، ساده ترین روش قرار دادن موانعی در کانال اختلاط می باشد. وانگ و همکاران [17] تاثیر حضور موانع در کانال اختلاط را بر میدان جریان به صورت عددی بررسی کرد. در این بررسی آنها یافتند که حضور موانع در کانال در اعداد رینولدز کم، تولید جریان گردابی نمی کنند ولی در اعداد رینولدز بالا با ایجاد جریان گردابی موجب بهبود فرآیند اختلاط می شوند.

روش دیگر برای ایجاد حرکت توده ای، استفاده از کانال های انحنادار و زیگ زاگ می باشد در این کانال ها در محل های تغییر جهت کانال، گردابه هایی در سطح مقطع آن ایجاد می شود که به این گردابه ها، گردابه های دین<sup>۲</sup> گویند. این گردابه ها حرکت بی نظم توده سیال را به همراه خواهند داشت. شکل زیر الگوی جریان در کانال انحنادار را در دو سطح مقطع دلخواه، نشان می دهد.

<sup>1</sup>. advection  
<sup>2</sup>. Dean