بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده مهندسی مکانیک

# مدلسازی جریان دو سیال در میکرومخلوط کننده‌ها با روش *SPH*

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

**علی جعفریان**

اساتید راهنما

**دکتر احمدرضا پیشه‌ور**

**دکتر محمد سعید سعیدی**

**۱۳۸۸**

تشکر و قدردانی

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتـکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

تقدیم به

## فهرست مطالب


**عنوان**.....**صفحه**

فهرست مطالب.....هشت

چکیده.....۱

**۱- فصل اول: مقدمه** .....**۱.۱**.....

۱-۱- میکرومخلوط کننده‌ها .....۱.۱.....

۱-۲- روشهای بدون شبکه .....۱.۲.....

۱-۳- کارهای انجام شده .....۱.۴.....

۱-۴- هدف از انجام این پروژه .....۱.۵.....

۱-۵- مطالب فصلهای بعد .....۱.۵.....

**۲- فصل دوم: میکرومخلوط کننده‌ها** .....**۱.۷**.....

۲-۱- مقدمه .....۱.۷.....

۲-۲- میکرومیکسرهای غیر فعال .....۲.۰.....

۲-۲-۱- میکرومیکسرهای چند شاخه‌ای موازی .....۲.۰.....

۲-۲-۲- میکرومیکسرهای چند شاخه‌ای سری .....۲.۲.....

۲-۲-۳- میکرومیکسرهای تزریقی .....۲.۳.....

۲-۲-۴- میکرومیکسر با همرفت مغشوش .....۲.۴.....

۲-۲-۵- میکرومیکسرهای قطره‌ای .....۲.۸.....

۲-۳- میکرومیکسرهای فعال .....۲.۸.....

۲-۳-۱- میکرومیکسرهای فعال با اغتشاش میدان فشاری .....۲.۹.....

۲-۳-۲- اغتشاش الکتروهیدرودینامیک .....۳.۰.....

۲-۳-۳- اغتشاش دی‌الکتروفورتیک .....۳.۰.....

۲-۳-۴- اغتشاش الکتروسینتیک .....۳.۱.....

۲-۳-۵- اغتشاش مگنتوهیدرودینامیک .....۳.۱.....

۲-۳-۶- اغتشاش آکوستیک .....۳.۱.....

۲-۳-۷- اغتشاش حرارتی .....۳.۲.....

۲-۴- شرایط عملکرد .....۳.۲.....

۲-۴-۱- میکرومیکسرهای چندشاخه‌ای موازی .....۳.۲.....

۲-۴-۲- میکرومیکسرهای چند شاخه‌ای سری ..... ۳۳
۲-۴-۳- میکرومیکسرهای همرفت مغشوش ..... ۳۴
۲-۴-۴- میکرومیکسرهای فعال ..... ۳۴

**۳- فصل سوم: معادلات حاکم ..... ۳۶**

۳-۱- مقدمه ..... ۳۶
۳-۲- معادلات حاکم ..... ۳۶
۳-۳- مکانیزم انتقال جرم ..... ۳۷
۳-۴- معادله حالت(EOS) ..... ۳۸

**۴- فصل چهارم: روش عددی SPH ..... ۴۰**

۴-۱- درون‌یابی ..... ۴۰
۴-۱-۱- درونیابی گسسته ..... ۴۴
۴-۱-۲- تقریب گسسته برای چگالی ..... ۴۵
۴-۱-۳- تقریب معادله مومنتم ..... ۴۷
۴-۱-۴- گسسته سازی معادله لزجت ..... ۴۷
۴-۱-۵- گسسته سازی معادله پخش جرمی ..... ۴۷
۴-۲- ابزارهای عددی ..... ۴۸
۴-۲-۱- لزجت مصنوعی ..... ۴۸
۴-۲-۲- سرعتهای XSPH ..... ۴۹
۴-۲-۳- دوباره مقدار دهی میدان چگالی(DFR) ..... ۴۹
۴-۳- روش انتگرال‌گیری ..... ۵۱

**۵- فصل پنجم: شرایط مرزی در SPH ..... ۵۳**

۵-۱- شرایط مرزی بر روی مرز جامد ..... ۵۳
۵-۲- ذرات در SPH ..... ۵۴
۵-۲-۱- ذرات سیال ..... ۵۴
۵-۲-۲- ذرات جامد ..... ۵۵
۵-۳- شرط ورودی و خروجی ..... ۶۱
۵-۳-۱- شرط مرزی پریودیک ..... ۶۱
۵-۳-۲- شرط ورودی و خروجی غیر پریودیک ..... ۶۲
۵-۴- جمع‌بندی ..... ۶۵

**۶- فصل ششم: نتایج ..... ٦٦**

۶-۱- مقدمه ..... ۶۶

۶-۲- جریان کوئت بین دو صفحه موازی ..... ۶۶

۶-۳- جریان پوازیل بین دو صفحه موازی ..... ۶۷

۶-۳-۱- جریان بین دو صفحه موازی با شرط مرزی پریودیک ..... ۶۷

۶-۳-۲- جریان بین دو صفحه موازی با شرط ورود و خروج غیرپریودیک ..... ۶۹

۶-۴- مدلسازی فرآیند اختلاط دو سیال در محفظه بسته ..... ۷۰

۶-۴-۱- محفظه‌ی بسته بدون میکروهم‌زن ..... ۷۲

۶-۴-۲- حالت چرخش اول و سرعت $\omega$ = ۲۰۰ rpm ..... ۷۳

۶-۴-۳- حالت چرخش اول و سرعت زاویه‌ای $\omega$= ۴۰۰ rpm ..... ۷۵

۶-۴-۴- حالت چرخش اول و سرعت زاویه‌ای $\omega$= ۶۰۰ rpm ..... ۷۸

۶-۴-۵- حالت چرخش دوم و سرعت زاویه‌ای $\omega$= ۴۰۰ rpm ..... ۸۰

۶-۴-۶- حالت چرخش سوم و سرعت $\omega$= ۴۰۰ rpm ..... ۸۲

۶-۵- میکرومیکسر افقی ..... ۸۵

۶-۵-۱- جریان در میکرومیکسر بدون میکروهم‌زن در عدد Re = ۵۰ ..... ۸۶

۶-۵-۲- جریان در عدد Re= ۵۰ ..... ۸۶

۶-۵-۳- جریان در عدد Re= ۱۰۰ ..... ۸۷

۶-۵-۴- جریان در عدد Re= ۳۰ ..... ۸۹

6-5-5- نوسان میکروهم‌زن در عدد Re = ۵۰ ..... ۹۱

۶-۶- میکرومیکسر Y شکل ..... ۹۳

۶-۷- جمع بندی ..... ۹۵

**۷- فصل هفتم: نتیجه گیری ..... ۹٦**

۷-۱- نتیجه گیری ..... ۹۶

۷-۲- پیشنهادات ..... ۹۷

**۸- مراجع ..... ۹۸**

**چکیده**

در این پایان نامه جریان دو سیال در میکرومخلوط‌کننده‌های فعال مدلسازی شده است .در این مدلسازی از روش لاگرانژی و مبنا ذره ای $SPH$ برای حل معادلات پیوستگی، مومنتوم و دیفیوژن جرمی استفاده شده است .برای اتصال میدان سرعت و فشار از فرض تراکم پذیری مصنوعی استفاده شده است. انواع شرایط مرزی بر روی دیواره، همچنین در ورودی و خروجی از کانال مورد بررسی قرار گرفته است و به منظور حصول اطمینان از کد نوشته شده، جریان پوازیل با شرط مرزی پریودیک و غیر پریودیک و جریان کوئت با شرط مرزی پریودیک مدلسازی شده است. سپس جریان دو سیال در محفظه‌ی بسته با نه عدد میکروهم‌زن شبیه سازی شده و نحوه‌ی اختلاط دو سیال مورد بررسی قرار گرفته است. در انتها میکرومخلوط‌کننده‌هایی با آرایش $Y$ شکل و کانال مستقیم مدلسازی شده و پارامترهای مؤثر بر اختلاط مورد بررسی قرار گرفته اند و حالت بهینه ی طراحی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی**

$SPH$، میکرومیکسر، روش های مبنا ذره ای، میکروهم‌زن

# فصل اول: مقدمه

## ۱ ـ۱ -میکرومخلوط کننده‌ها

در عصر حاضر شاهد پیشرفت و جهش سریع در علوم مختلف به ویژه علوم پزشکی هستیم. این پیشرفت نیازمند توسعه‌ی وسایل و ابزار مورد نیاز این علم می‌باشد، از این رو علوم مکانیک و الکترونیک نیز در علم پزشکی ادغام شدند و ابزار لازم برای این رشد را در اختیار آنها قرار دادند و دانشمندان این امر با ترکیب علوم مختلف خدمات زیادی را به بشر و توسعه‌ی علم ارائه داده‌اند.

با توجه به کوچک بودن ابعاد سلولها و سایر بخشهای تشکیل دهنده‌ی بافت‌های بکار رفته در بدن موجودات زنده، باید ابزاری فراهم شود تا بتوان به سادگی این بافت‌ها را مورد بررسی و آنالیز قرار داد. پس ورود سیستم‌هایی که در مقیاس‌های میکرو و نانو هستند به این شاخه از علم امری بدیهی می‌نمود.

امروزه سیستم‌های میکروسیالی کاربرد گسترده‌ای در آنالیز $DNA$ و پروتئین، آرایش سلولها، واکنش شیمیایی، مکانیزم‌های رساندن دارو، واکنش‌های آنزیمها و ترکیبات اسیدهای نوکلئیک یافته است. در سال‌های اخیر

تکنولوژی میکرو برای ساخت دستگاه‌هایی در مقیاس میکرو بکار گرفته شده است و سیستم‌های مناسبی طراحی و ساخته شده‌اند.

در بین پروسه‌های مختلف در علم مهندسی، میکسرها نقش مهمی ایفا می‌کنند. میکرومخلوط کننده‌ها دارای پتانسیل بالایی در فعالیت‌های صنعتی مانند ایجاد اختلاط، هم‌زنها، ایجاد مخلوط‌های امولسیون و سوسپایسون، رآکتورها و مبدل‌های حرارتی می‌باشند(۲). عوامل مختلفی نظیر نرخ انتقال حرارت و انتقال جرم، هزینه و زمان انجام آزمایش، و کارکرد دستگاه و نیز کیفیت محصول، به طور مستقیم به میزان اختلاط وابسته می‌باشد.

اخیراً استفاده از میکرومخلوط کننده‌ها در صنایع مختلف بسیار رایج شده است و مدلهای بسیار زیادی برای هندسه آنها ارائه شده است. باید اذعان داشت که اغلب مدل‌های ارائه شده در سالهای اخیر مربوط به کارهای آزمایشگاهی بوده و به علت پیچیدگی و اندازه کوچک این وسایل مدل‌سازی عددی و ساخت آزمایشگاهی آنها بسیار مشکل می‌باشد

مدلسازی عددی و بررسی پارامترهای مؤثر بر کارکرد و راندمان وسایل مختلف، امکان پیش بینی مشکلات اساسی در کارکرد و نیز امکان بهینه کردن عملکرد این وسایل را برای ما فراهم می‌کند.

از این رو با توجه به هزینه‌ی بالای پروسه‌های ساخت این نوع وسایل،– که به تکنولوژی پیشرفته برای ساخت نیازمند است– انجام مدلسازی عددی و بهینه کردن پارامترهای مؤثر ضروری می‌نماید.

در میان روش‌های عددی متنوع، روش عددی $SPH$[1] ، یک روش لاگرانژی و بدون شبکه است و این روش قابلیت مدلسازی هندسه‌های پیچیده با مرزهای متحرک را دارا می‌باشد. در این پایان نامه از روش فوق به منظور شبیه‌سازی میکرومخلوط کننده‌ی فعال[2] استفاده شده است.

### ۱ ۲ -روشهای بدون شبکه

امروزه تمایل محققین به توسعه روش‌های بدون شبکه، که شاخه‌ای جدید در روش‌های محاسباتی می‌باشد رو به افزایش است و این روشها در بسیاری از موارد دارای برتری‌های زیادی نسبت به روش‌های متداول مانند تفاضل محدود می‌باشد. هدف اصلی روش‌های بدون شبکه، ارائه‌ی حل دقیق و پایدار برای معادلات انتگرالی و $PDE$[3] با تمام شرایط مرزی ممکن و با استفاده از یک سری نقاط ( ذرات) که ارتباط بین آنها توسط یک شبکه معین تعیین نشده است، می‌باشد.

---

[1] Smoothed Particle Hydrodynamics

[2] Active Micromixer

[3] Partial differential equation

استفاده از روش‌های متداول مانند تفاضل محدود و المان محدود در مسائلی که دارای جریان‌های سطح آزاد، مرزهای تغییر شکل پذیر، سطح تماس متحرک، تغییر شکل‌های بزرگ هستند و همچنین مسائلی که دارای هندسه‌های پیچیده که مستلزم تولید شبکه پیچیده می‌باشند مشکل می‌باشد. از این رو اخیراً روش‌های بدون شبکه متعددی برای حل مسائل مربوط به جریان‌های سیال و نیز مسائل مربوط به مکانیک جامدات پیشنهاد شده اند.

در روش‌های متداول در $CFD$ کلاسیک، به منظور حل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای پیچیده‌ی حاکم بر مسأله، قلمرو حل به وسیله شبکه گسسته می‌شود. در روش تفاضل محدود معمولاً به شبکه، نقاط[1]، در روش حجم محدود به شبکه، سلول[2]و در روش المان محدود به شبکه المان گفته می‌شود. در این روش ها معادلات دیفرانسیل حاکم، پس از گسسته سازی بر روی شبکه به تعدادی معادله جبری تبدیل می‌شوند و درنهایت با حل دستگاه معادلات جبری می‌توان به حل مناسب برای سیستم دست یافت و رفتار سیستم را مورد بررسی قرار داد.

همانند روش‌های متداول در $CFD$ ، در روش‌های بدون شبکه نیز هدف، تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای به دستگاه معادلات جبری می‌باشد. همچنین برای بدست آوردن دستگاه معادلات جبری از گسسته سازی معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط پیوسته استفاده می‌شود، با این تفاوت که نقاط گسسته شده در این روش‌ها فاقد هر گونه توزیع منظم و ارتباط از پیش تعیین شده می‌باشند. در این روش دسته‌ای از نقاط بر روی مرزها قرار می‌گیرند که تشکیل مرز را می‌دهند و دسته‌ای از آنها در داخل قلمرو حل، محیط مورد نظر را تشکیل می‌دهند. روش‌های بدون شبکه متداول که در مدلسازی‌های مختلف بکار گرفته شده‌اند عبارتند از[۱]:

روش گالرکین بدون شبکه ($EFG$[3])

روش پتروف گالرکین بدون شبکه ($MLPG$[4])

روش درونیابی نقطه‌ای ($PIM$[5])

روش $SPH$

روش $RKPM$[6]

در تمامی روش‌های فوق ارتباط ثابت و از پیش تعیین شده‌ای بین نقاط وجود ندارد. شاخه‌ای از روش‌های بدون شبکه را روش‌های مبنا ذره‌ای تشکیل می‌دهند. روش‌های مبناذره‌ای به دامنه‌ی گسترده‌ای از مسائل فیزیکی و در

[1] Node
[2] Cell
[3] Element Free Galerkin Method
[4] Meshless Local Petrov Galerkin Method
[5] Poin Interpolation Method
[6] Reproducing Kernel Particle Method

مقیاس‌های گوناگون اعمال شده‌اند. روش‌های ابداع شده در مقیاس‌های نانو، میکرو، مزو و ماکرو به‌کار گرفته شده‌اند و مسائل گوناگونی توسط این روش‌ها مدل شده‌اند. برخی از این روش‌ها عبارتند از:

روش دینامیک مولکولی[۱] در ابعاد اتمی و مولکولی

روش $DPD$[۲] در ابعاد مزو

روش های $SPH$، $PIC$[۳] و $FLIC$[۴] در ابعاد ماکروسکوپیک

با توجه به تفاوت‌های ذکر شده در کاربرد برخی از این روش‌ها در مقیاس‌های گوناگون، این نکته حائز اهمیت است که روش‌های مبنا ذره‌ای عموماً دارای دیدگاه لاگرانژی هستند و یک ذره معرف یک سیستم فیزیکی می‌باشد و خواص یک ذره در اثر اندرکنشهای داخلی و خارجی تکامل می‌یابد. از این‌رو مدلسازی تغییر شکل‌های بزرگ و جریان‌های سطح آزاد و هندسه‌های پیچیده در این روش‌ها به آسانی صورت می‌پذیرد.

از دیگر خواص این روش‌ها می‌توان به انتگرال‌گیری صریح برای تکامل معادلات در زمان اشاره کرد و نیز در اکثر روش‌های مبنا ذره‌ای خود ذرات به عنوان مختصات محاسباتی برای تقریب متغیرها بکار می‌روند.

در روش $SPH$ از تعدادی ذره به منظور بیان حالت و حرکت سیستم استفاده می‌شود. هر ذره دارای خواص مشخص مانند جرم، حجم، چگالی و . . . می‌باشد و می‌تواند به تنهایی معرف جسم ویا قسمتی از محیط پیوسته باشد. در ابتدا این روش، به منظور مدلسازی حرکت و رفتار سیارات و ستاره‌ها در کهکشانها مورد استفاده قرار گرفت که در این شبیه سازی هر کدام از سیارات و قمرهایش را می‌توان به عنوان یک ذره معرفی کرد و کل مجموع ذرات را می‌توان بصورت سیستم و یا کهکشان فرض نمود. در مثالی دیگر می‌توان حرکت توده‌ی شکر یا خاک را تصور نمود که هر یک از ذرات را می‌توان به صورت یک المان مدلسازی شده در نظر گرفت. حال با توجه به مقدمه‌ی ذکر شده و توضیح جایگاه روش $SPH$ به بررسی نحوه‌ی تکامل این روش و کاربردهای آن، با توجه به منابع موجود می‌پردازیم.

### ۱ ۳ -کارهای انجام شده

در ذیل به مروری بر روند توسعه روش $SPH$ می‌پردازیم:

روش $SPH$ اولین بار توسط گینگلد[۵] و موناقان[۶] و به طور جداگانه توسط لوسی[۱] در سال ۱۹۷۷ ابداع شد [۱،۲]. در سال‌های ۱۹۷۸، ۱۹۷۹ و ۱۹۸۰ گینگلد و موناقان این روش را برای بررسی جوشش و ناپایداری‌های دوگانه

[1] Moulecular Dynamics
[2] Dissipative Particle Dynamics
[3] Particle In Cell
[4] Fluid In Cell
[5] -Gingold
[6] -Monaghan

فرمولبندی کردند[۳،۵،۴]. از آنجا که اولین نسخه *SPH* اصل پایستگی مومنتوم خطی و زاویه‌ای را ارضا نمی‌کرد، در سال ۱۹۸۲ گینگلد و موناقان الگوریتم اولیه آن را با استفاده از لاگرانژین متناظر ذرات بهبود بخشیدند تا برای سیال تراکم‌پذیر نامضمهل، پایستگی مومنتوم خطی و زاویه‌ای ارضا شود[۶]. در سال ۱۹۹۵ موناقان برای اولین بار با استفاده از فرض تراکم پذیری مصنوعی، *SPH* را برای حل جریان سیال تراکم ناپذیر بکار برد[۷]. در سال ۱۹۹۷ موریس[۲] و همکاران فرمولبندی جدید برای نیروهای اصطکاکی و شرط مرزی جامد ارائه کردند و به مدلسازی جریان سیال تراکم‌ناپذیر در داخل لوله پرداختند[۸] و در سال ۱۹۹۹ اسکلتر به مدلسازی جریان حول استوانه پرداخت[۹]. در سال ۲۰۰۲ لو[۳] و همکاران میکرومیکسر فعال را با روش عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند[۱۰]. در سال ۲۰۰۵ هو[۴]و آدامز[۵]روشی را برای مدلسازی کشش سطحی ارائه کردند[۱۱] و سپس در سال ۲۰۰۷ هو و آدامز به مدلسازی جریان سیال چندفازی پرداختند[۱۲]. در سال ۲۰۰۷ لوبووسکی[۶] و.ویمر[۷] جریان داخل لوله با شرط غیر پریودیک را مدل کردند[۱۳]. در همین سال پارک[۸]و همکاران به بررسی عملکرد جریان دو سیال داخل میکرومیکسر فعال با روش شبکه بولتزمن پرداختند[۱۴].

### ۱ ٤ -هدف از انجام این پروژه

با توجه به ویژگی‌هایی که برای روش *SPH* برشمردیم از قبیل قابلییت آن در مدلسازی هندسه‌های پیچیده و همچنین توانایی این روش در مدلسازی مرزهای متحرک، این روش می‌تواند در مدلسازی مسائل فیزیکی که شرایط فوق را دارا هستند بکار گرفته شود. همچنین به دلیل پیچیدگی هندسه در میکرومیکسرها و وجود مرز جامد متحرک در میکرومیکسرهای فعال، روش *SPH* می‌تواند یک روش مناسب برای مدلسازی این هندسه باشد. لذا هدف این پایان‌نامه مدلسازی شرایط فیزیکی مورد نظر در میکرومیکسرها می‌باشد.

### ۱ ٥ -مطالب فصلهای بعد

مطالب ارائه شده در فصل‌های بعد به شرح زیر می‌باشد:

---

[1] -Lucy
[2] Morris
[3] Lu
[4] Hu
[5] Ádams
[6] Lobovsky
[7] Vimmr
[8] Park

در فصل دوم به معرفی میکرومیکسرها پرداخته و نوع و کاربرد آن ها شرح و بسط داده شده است. در فصل سوم معادلات حاکم بر محیط سیال و شرایط اعمال این معادلات مورد بررسی قرار گرفته است و در فصل چهارم روش‌های درونیابی در روش $SPH$ معرفی شده و معادلات حاکم بر سیال نیز به شکل $SPH$ گسسته شده‌اند و روش‌های انتگرال‌گیری و تکنیک‌های عددی لازم به منظور همگرایی حل معرفی شده‌اند.

فصل پنجم به ارائه‌ی شرایط مرزی می‌پردازد و در این فصل نحوه‌ی اعمال شرایط مرزی اساسی یعنی شرط مرزی جامد و نیز شرایط مرزی ورودی و خروجی در $SPH$ معرفی و بسط داده شده‌اند و در انتها در فصل ششم نمونه مسائل مدلسازی شده در $SPH$ و نتایج بدست آمده ارائه شده است.

# فصل دوم: میکرومخلوط کننده‌ها

## ۲ ـ۱ ـمقدمه

سیستم‌های مینیاتوری در مطالعه‌ی آنالیز شیمیایی و نیز علوم زیست شناسی گسترش زیادی یافته اند. کاربرد سیستمهای میکروسیالی[1] در صنعت و در علوم به علت خواص و مزیت های زیرقابل توجه می باشد[۱۵].

الف- صرفه جویی در مواد اولیه و نمونه مورد آزمایش

ب- انجام آزمایش در زمان کوتاه

ج- هزینه کم و بازده زیاد

از جمله سیستمهای میکروسیالی، می توان به میکروکانالها، میکروپمپ‌ها، میکرومبدل‌ها، میکرومیکسرها و. . . اشاره کرد. در کنار میکروپمپ‌ها، میکرومیکسرها یکی از شاخه‌های مهم سیستم‌های میکروسیالی می باشند.

در گذشته اهمیت میکرومیکسرها به درستی درک نشده بود و گروه های تحقیقاتی کمی در این زمینه فعالیت می کردند و در حقیقت اکثر تحقیقات انجام گرفته در این زمینه مربوط به ده سال اخیر می‌باشد[۱۶].

اختلاط سریع در بسیاری از سیستم‌های میکروسیالی که در آنالیزهای بیوشیمی[2]، تحویل دارو[3]،تجزیه و تحلیل اسیدهای نوکلئیک[4]، کاربرد دارند ضروری می‌باشد. پروسه‌های بیولوژیکی مانند فعال‌سازی سلول‌ها، واکنش آنزیم‌ها

[1] Micro Fluidic Systems
[2] Biochemical
[3] Drug Delivery
[4] Synthesis of Nucleic Acids

آنزیم‌ها و تجزیه پروتئین‌ها اغلب شامل واکنشهایی می‌شود که در آنها مواد اولیه باید ابتدا به صورت مخلوط باشند. همچنین به منظور برقراری واکنش شیمیایی بر روی صفحات *(LOC)*[۱] ایجاد اختلاط ضروری می‌نماید، از این رو میکسرها می‌توانند به عنوان جزئی از یک سیستم میکروسیالی و یا یک دستگاه مجزا بکار گرفته شوند. علاوه بر این، تحقیق بر روی میکرومیکسرها می‌تواند بنیانی برای درک بهتر پدیده‌های انتقال در مقیاس میکرو باشد.

میکرومیکسرها به دو دسته میکرومیکسرهای فعال[۲] و میکرومیکسرهای غیرفعال[۳] تقسیم بندی می‌شوند. میکرو میکسرهای غیرفعال، در پروسه‌ی اختلاط نیازی به نیروی خارجی ندارند و فرایند اختلاط کاملاً با تکیه بر فرایندهای پخش[۴] یا همرفتِ مغشوش[۵] صورت می‌گیرد. میکرومیکسرهای غیر فعال را همچنین در تقسیم بندی‌های بعدی می‌توان با توجه به نحوه‌ی اختلاط فازهای مخلوط شونده، به چند شاخه‌ایِ موازی[۶]، چند شاخه‌ایِ سری[۷]، تزریقی[۸]، قطره‌ای[۹] و همرفت مغشوش طبقه بندی کرد. میکسر های فعال از اغتشاش ایجاد شده توسط یک میدان خارجی به منظور ایجاد اختلاط استفاده می‌کنند و با توجه به اثر میدان اغتشاشی خارجی مانند فشار، دما، الکتروهیدرودینامیک[۱۰]، دی الکتروفورتیک[۱۱]، الکتروسینتیک[۱۲]، مگنتوهیدرودینامیک[۱۳] و آکوستیک[۱۴]، طبقه بندی می‌شوند. اجزای سازنده میکرومیکسرهای فعال، اغلب با توجه به میدان خارجی و ابزار مربوط به اعمال این نیرو، دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشند و ساختن آنها با دشواری‌های خاص خود همراه است. علاوه بر این در این سیستم‌ها به منبع انرژی خارجی برای بکار انداختن میکرومیکسر نیاز می‌باشد. بنابراین، ساختن میکرومیکسر فعال هم پرهزینه می‌باشد و هم به تکنولوژی پیشرفته نیازمند است. از طرفی در میکرومیکسرهای غیر فعال به عملگرهای خارجی، مگر در موارد مربوط به رساندن سیال به میکرومیکسر ، نیازی نمی‌باشد[۱۷].

در مقیاس ماکروسکپی، ایجاد اغتشاش روشی متداول برای ایجاد اختلاط می‌باشد. در جریان توربولانس، حرکت ذرات سیال نامنظم می‌شوند. بنابراین فشار، سرعت و سایر پارامترها ماهیت تصادفی به خود می‌گیرند و این حرکت‌های تصادفی سریعاً المان‌های مخلوط شونده را پخش می‌کنند.

---

[1] Lab on chip
[2] Active Micro Mixer
[3] Passive Micro Mixer
[4] Diffusion
[5] Chaotic advection
[6] Parallel Lamination
[7] Serial Lamination
[8] Injection
[9] Droplet
[10] Electro Hydrodynamic
[11] Dielectrophoretic
[12] Electrokinetic
[13] Magnetohydrodynamic
[14] Acoustic

هم زدن جریان در اعداد $Re$ پایین عامل بسیار موثری در ایجاد همرفت مغشوش می‌باشد. همچنین، چند شاخه شدن جریان، افزایش طول ناحیه، ایجاد خم در هندسه‌ی جریان و نیز قرار دادن مانع در مسیر جریان می‌تواند در ایجاد اختلاط مناسب نقش مهمی ایفا کند.

در میکرومیکسرها اعداد بی بعد $Re$, $Pe$ و $St$، پارامترهایی هستند که باید مورد توجه قرار بگیرند.

عدد رینولدز:

$$\mathrm{Re}=\frac{UD_h}{\nu} \qquad (۱-۲)$$

$\nu$ مقدار ویسکوزیته سینماتیکی سیال، $U$ مقدار سرعت متوسط جریان و $D_h$ قطر هیدرولیکی کانال می‌باشد. عدد رینولدز بیانگر نسبت نیروهای اینرسی به نیروهای اصطکاکی می‌باشد و قابل ذکر است که اغلب جریانهای میکروسیالی دارای اعداد $Re$ پایین می‌باشند.

عدد پکله :

$$Pe=\frac{UL}{D} \qquad (۲-۲)$$

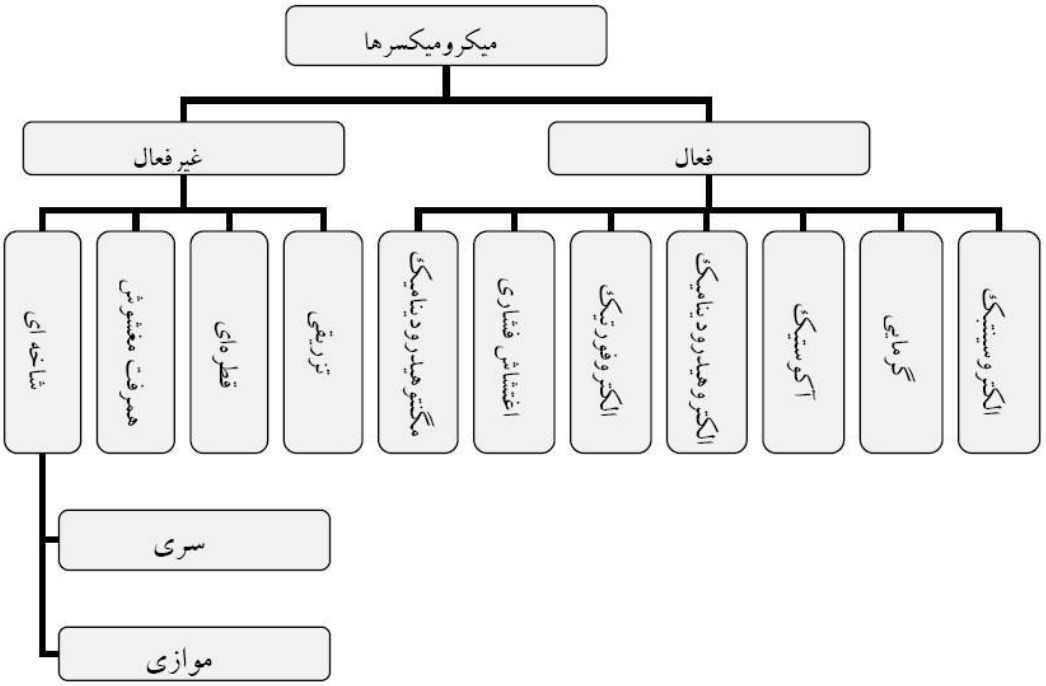
$L$ مقدار طول مشخصه و $D$ ضریب پخش مولکولی می‌باشد و عدد پکله بیانگر نسبت انتقال جرم به روش همرفت به میزان انتقال جرم به وسیله فرایند دیفیوژن مولکولی می‌باشد. در اعداد $Pe$ بالا، انتقال جرم به وسیله همرفت غالب بوده و برعکس، در اعداد $Pe$ پایین میزان انتقال جرم توسط مکانیزم دیفیوژن مولکولی غالب می‌باشد.

عدد استروهال[1]

$$St=\frac{fD_h}{U} \qquad (۳-۲)$$

f فرکانس نوسان بوده و این عدد بیانگر نسبت سرعت نوسانی به سرعت جریان سیال می‌باشد. حال با توجه به مطالب فوق میکرومیکسرها را می‌توان به صورت زیر طبقه بندی کرد:

[1] Strouhal




شکل ۲-۱ : طبقه بندی میکرومیکسرها

## ۲ ۲ -میکرومیکسرهای غیر فعال

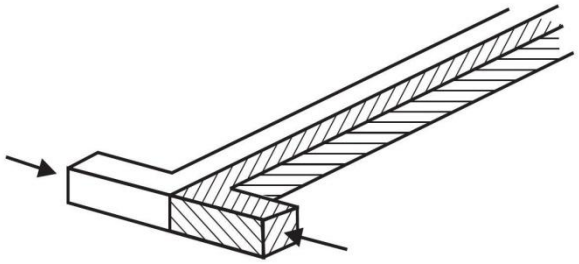
میکرومیکسرهای غیرفعال به علت سادگی مدل‌های اولیه، جزء اولین دستگاه‌های میکروسیالی ابداع شده می‌باشند. به علت غالب بودن جریان آرام در مقیاس میکرو، فرایند اختلاط در میکرومیکسرهای غیرفعال عمدتاً با استفاده از دیفیوژن مولکولی و همرفت مغشوش انجام می‌گیرد.

افزایش سطح تماس بین سیال‌های مخلوط شونده و همچنین کاهش طول دیفیوژن[1] باعث افزایش پخش مولکولی می‌شود ونیز به منظور ایجاد همرفت مغشوش باید تغییراتی را در جریان ایجاد نمود. در ادامه انواع میکرومیکسرهای غیرفعال بررسی خواهند شد.

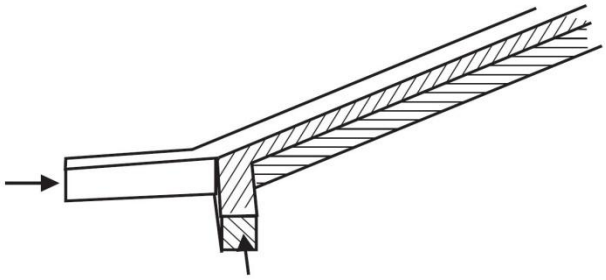
### ۲ ۲ ۱ -میکرومیکسرهای چند شاخه‌ای موازی

همانطور که در بالا ذکر شد، با افزایش سطح تماس و کاهش مسیر اختلاط، اختلاط سریعتری را شاهد خواهیم بود. انشعابات موازی در میکرومیکسر، جریان ورودی را به $n$ قسمت تقسیم می‌کند و سپس آنها را در انتها به یکدیگر مرتبط می‌کند. طرح ابتدایی این میکرومیکسرها به صورت یک میکروکانال بلند با دو ورودی می‌باشد که به آنها میکسرهای $T$ شکل و $Y$ شکل گفته می‌شود[۲۰-۱۸]. شکل ۲-۲وشکل ۲-۳ به ترتیب نشان دهنده‌ی هندسه‌ی این میکرومیکسرها و مسیرهای ورودی و خروجی آن می‌باشند.

[1] Diffusion Length



شکل ۲-۲ : میکرومیکسر چندشاخه‌ای موازی $T$ شکل



شکل ۲-۳ : میکرومیکسر چندشاخه‌ای موازی $Y$ شکل

دو جریان ورودی درمیکرومیکسرهای $T$ شکل به صورت صفحات نازک در یکدیگر می‌پیچند و این پدیده موجب کاهش طول اختلاط می‌شود. به عنوان طرح پایه، میکسرهای $T$ شکل گزینه‌ی ایده‌الی برای مطالعه پدیده‌های انتقال در مقیاس میکرو می‌باشند. به علت آنکه در میکرومیکسرهای $T$ شکل عمل اختلاط تماماً وابسته به دیفیوژن مولکولی می‌باشد، طول اختلاط بلند غیر قابل اجتناب است. همچنین قابل ذکر است که در اعداد رینولدز بسیار بالا، عمل اختلاط در طول کوتاهتری صورت می‌گیرد [۲۲-۲۱] جریان آشفته ایجاد شده در اعداد رینولدز بالا، موجب ایجاد گردابه‌ها و در نتیجه بهبود فرایند اختلاط می‌شود. همچنین افزایش زبری سطح و تنگ کردن دهانه ورودی ناحیه اختلاط می‌تواند موجب افزایش راندمان طرح اولیه در میکسرهای $T$ شکل شود [۲۳]. در اعداد رینولدز بالا، قرار دادن موانع در مسیر جریان موجب ایجاد گردابه‌هایی در کانال و تسهیل امر اختلاط می‌شود.

یک روش ساده برای کاهش مسیر اختلاط، کاهش دادن عرض کانال و استفاده از چندین مسیر جریان موازی می‌باشد، این نوع میکسرها با موفقیت ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل ۲-۴ طرح شماتیکی از هندسه‌ی این نوع میکرومیکسر را نشان می‌دهد.