



دانشگاه صنعتی اراک
معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی

دانشکده فنی مهندسی

گروه آموزشی مهندسی مکانیک

پایان نامه برای دریافت درجه‌ی کارشناسی ارشد
رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

بررسی فرایند اختلاط دو سیال قابل امتزاج در یک کانال مینیاتوری با استفاده از روش غیر فعال

پژوهشگر:

توحید دهقانی

استاد راهنما:

دکتر فرهاد صادق مغانلو

استاد مشاور:

دکتر هادی ولادی

بهمن ۱۳۹۶

عنوان و نام پدیدآور:	بررسی فرایند اختلاط دو سیال قابل امتزاج در یک کانال مینیاتوری با استفاده از روش غیر فعال / توحید دهقانی
استاد راهنما:	دکتر فرهاد صادق مغانلو
استاد مشاور:	دکتر هادی ولادی
تاریخ دفاع:	۱۳۹۶/۱۱/۱۰
تعداد صفحات:	۱۱۵
شماره پایان نامه:	مهندسی مکانیک / ۲۳۹۰۴۷۰

چکیده:

همگام با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی طراحی و ساخت قطعات در ابعاد میکرومتر، وسایلی با قابلیت انتقال سیال در ابعاد خیلی کوچک طراحی و ساخته شده است که امروزه از آنها تحت عنوان وسائل میکروفلوئیدیک یاد می‌شود. میکرومیکسرها دستگاه‌های بسیار کوچکی می‌باشند که برای اختلاط حداقل دو فاز استفاده می‌شوند. میکرومیکسر و پروسه اختلاط در آن به عنوان یکی از بخش‌های مهم و اساسی سیستم‌های میکروفلوئیدیک محسوب شده و دارای کاربردهای بسیاری در عرصه‌های متفاوت شیمی، بیوشیمی، پزشکی و داروسازی می‌باشد. در هندسه‌های با ابعاد کوچک، عدد رینولدز کوچک بوده و رژیم جریان اساساً آرام است. اختلاط جریان در جریان آرام عمدتاً از نوع پخش مولکولی می‌باشد که فرآیندی بسیار کند است بنابراین لازم است تا با استفاده از روش‌هایی اختلاط سیالات بهبود یابد. در این پژوهش، به بررسی تجربی و عددی پدیده‌ی اختلاط در میکرومیکسر Y شکل با سه هندسه‌ی متفاوت در اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است. با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی هندسه کانال، شکل مطلوب موانع هندسی داخل مجرای کانال تولید شده و انتقال سیال و اختلاط آنها در هندسه‌های تولید شده بررسی گردیده است. در این پایان‌نامه با استفاده از فناوری میکروفلوئیدیک به طراحی و ساخت ریزتراشه‌هایی برای استفاده در فناوری میکروکانال نظیر ریزتراشه میکرومیکسر پرداخته شده است. تاثیر عدد رینولدز و همچنین تاثیر ضریب پخش دو سیال در میکروکانال‌های بدست آمده از توپولوژی بررسی شده است. نتایج هر سه میکروکانال بررسی شده نشان می‌دهد که با افزایش ضریب پخش در سرعت‌های مختلف میزان اختلاط افزایش می‌یابد. همچنین افزایش عدد رینولدز ابتدا سبب کاهش میزان اختلاط می‌شود سپس افزایش آن را سبب می‌شود. دلیل این رفتار متفاوت در سرعت‌های پائین غلبه نیروی اینرسی بر نیروی ویسکوز سیال است و نفوذ مکانیزم غالب برای اختلاط است. با افزایش عدد رینولدز گردابه‌هایی پس از مانع‌ها تشکیل می‌شود. این گردابه‌های تشکیل شده حرکت توده‌ای و بی‌نظمی را در برابر نفوذ مولکولی تقویت می‌کند و این افزایش عدد رینولدز گردابه‌های تولید شده را قوی‌تر می‌کند و بی‌نظمی و حرکت توده‌ای ذرات بیشتر شده و اختلاط افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: میکرومیکسر، جریان آرام، روش غیر فعال، بهینه‌سازی هندسی، فرآیند اختلاط

فهرست مطالب

۱- کلیات پژوهش

- ۱-۱- مقدمه ۱۸
- ۱-۲- مایکروفوئیدیک چیست؟ ۱۸
- ۱-۳- کاربرد مایکروفوئیدیک ۱۹
- ۱-۴- تاریخچه پیدایش مایکروفوئیدیک ۲۰
- ۱-۵- مزایای سیستم‌های مایکروفوئیدیک ۲۱
- ۱-۶- آزمایشگاه روی تراشه (Lab-on-chip) ۲۲
- ۱-۷- اختلاط ۲۴
- ۱-۸- پدیده ی اختلاط و کاربرد های آن ۲۶
- ۱-۹- اهمیت اختلاط در ابعاد میکرو ۲۶
- ۱-۱۰- میکرومیکسر ۲۷
- ۱-۱۱- طبقه بندی میکرو میکسرها ۲۹
- ۱-۱۱-۱. میکرومیکسر فعال ۲۹
- ۱-۱۱-۲. میکرومیکسر غیر فعال ۲۹
- ۱-۱۲- میکرومیکسرها ی غیر فعال و پدیده نفوذ مولکولی و پدیده جابجایی نامنظم ۳۰
- ۱-۱۳- پیشینه پژوهش ۳۱

۲- مبانی نظری پژوهش

- ۲-۱- مقدمه ۴۰
- ۲-۲- روش بهینه‌سازی ۴۰
- ۲-۳- طراحی میکرومیکسر ۴۳
- ۲-۳-۱. ابعاد هندسی طرح اول ۴۳
- ۲-۳-۲. ابعاد هندسی طرح دوم ۴۵
- ۲-۳-۳. ابعاد هندسی طرح سوم ۴۶
- ۲-۴- معادلات حاکم ۴۸
- ۲-۵- معادلات حاکم بر بهینه‌سازی ۴۹
- ۲-۶- معادلات حاکم بر اختلاط ۵۰

۵۰.....	۱-۶-۲. معادله بقای جرم.....	۵۰.....
۵۱.....	۲-۶-۲. معادله بقای مومنتوم.....	۵۱.....
۵۱.....	۳-۶-۲. معادله همرفت-نفوذ ذرات.....	۵۱.....
۵۳.....	۷-۲- خواص سیال.....	۵۳.....
۵۳.....	۸-۲- شرایط مرزی.....	۵۳.....
۵۴.....	۹-۲- شبکه بندی.....	۵۴.....

۳- مواد و روش تجربی

۵۵.....	۱-۳- مقدمه.....	۵۵.....
۵۶.....	۲-۳- روش لیتوگرافی نرم.....	۵۶.....
۵۷.....	۳-۳- مراحل کلی ساخت.....	۵۷.....
۵۸.....	۴-۳- طراحی ماسک.....	۵۸.....
۵۸.....	۵-۳- ساخت قالب.....	۵۸.....
۵۹.....	۱-۵-۳. ساخت قالب با استفاده از فیلم فتو رزیست فیلم خشک.....	۵۹.....
۶۰.....	۲-۵-۳. ساخت قالب با استفاده از SU-8.....	۶۰.....
۶۴.....	۳-۶-۳- پروسه قالب گیری.....	۶۴.....
۶۴.....	۱-۶-۳. آماده سازی پلیمر.....	۶۴.....
۶۷.....	۲-۶-۳. پیوند دادن زیر لایه به ریز کانال.....	۶۷.....
۷۳.....	۷-۳- فرایند ساخت میکرومیکسرهاى ارائه شده.....	۷۳.....
۷۸.....	۸-۳- نتیجه گیری.....	۷۸.....

۴- نتایج و یافته های پژوهش

۷۹.....	۱-۴- مقدمه.....	۷۹.....
۷۹.....	۲-۴- اعتبار سنجی.....	۷۹.....
۸۱.....	۳-۴- خطوط جریان.....	۸۱.....
۸۵.....	۴-۴- غلظت.....	۸۵.....
۹۹.....	۵-۴- شاخص اختلاط.....	۹۹.....

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۰۵.....	۱-۵- نتیجه گیری.....	۱۰۵.....
۱۰۶.....	۲-۵- پیشنهادات.....	۱۰۶.....

فهرست علایم

مفهوم یا توضیح	علامت اختصاری
غلطت جرمی	C

ضریب نفوذ جرمی دو سیال	D
عدد دارسی	Da
نیروی حجمی وارد بر سیال	f
شتاب گرانش زمین	g
طول میکروکانال	L
ریز تراشه‌های آزمایشگاهی	LOC
شاخص اختلاط	Mi
فشار	P
عدد بدون بعد پکلت	Pe
عدد بدون بعد رینولدز	Re
زمان	t
سرعت سیال در جهت محور X	u
بردار سرعت	V
نفوذ پذیری محیط متخلخل	α
متغیر بهینه سازی	γ
ویسکوزیته دینامیکی	μ
چگالی	ρ
نرخ مولی تولید یا مصرف هر جز ذره آرام	ω_j
منطقه طراحی	Ω_D
منطقه بدون طراحی	Ω_N
نرخ جرمی تولید یا مصرف ذره آرام	τ_j
جرم مولکولی ذره آرام	M_j
دبی جرمی ذره آرام	I_j
قطر هیدرولیکی	d_h

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱ - ۲: پارامترهای طراحی هندسی میکرومیکسر طرح اول..... ۴۴
- جدول ۲ - ۲: پارامترهای طراحی هندسی میکرومیکسر طرح دوم..... ۴۶
- جدول ۳ - ۲: پارامترهای طراحی هندسی میکرومیکسر طرح سوم..... ۴۸
- جدول ۱ - ۳: ویژگی‌های فیزیکی فتورزیست SU-8..... ۶۱

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱ - ۱: نمونه‌هایی از تجهیزات مایکروفلوئیدیک..... ۱۹
- شکل ۲ - ۱: فرآیند حرکت به سمت مایکروفلوئیدها..... ۲۰
- شکل ۳ - ۱: میکرومیکسر با مانع‌های تیغه‌ای..... ۲۸
- شکل ۴ - ۱: میکرومیکسر T شکل..... ۲۸
- شکل ۵ - ۱: میکرومیکسر زیگزاگی..... ۲۸
- شکل ۶ - ۱: میکرومیکسر Y شکل با مانع‌های مختلف..... ۳۲
- شکل ۷ - ۱: میکرومیکسر با مارپیچ‌های مربعی..... ۳۳
- شکل ۸ - ۱: میکرومیکسر بیضوی با مانع‌های بیضوی شکل..... ۳۵
- شکل ۹ - ۱: اختلاط در میکرومیکسر با سرعت‌های ورودی نوسانی..... ۳۷
- شکل ۱۰ - ۱: میکرومیکسر با ساختار درونی متفاوت..... ۳۸
- شکل ۱ - ۲: (الف) شماتیک بخش‌های طراحی و اعمال یک نقطه برای مینیمم کردن سرعت در داخل میکروکانال. (ب) شکل مانع به‌دست آمده از مینیمم کردن سرعت در یک نقطه داخل میکروکانال..... ۴۱
- شکل ۲ - ۲: (الف) شماتیک بخش‌های طراحی و اعمال دو نقطه در فاصله یکسان برای مینیمم کردن سرعت در داخل میکروکانال. (ب) شکل مانع به‌دست آمده از مینیمم کردن سرعت در دو نقطه یکسان داخل میکروکانال..... ۴۲
- شکل ۳ - ۲: (الف) شماتیک بخش‌های طراحی و اعمال دو نقطه در فاصله متفاوت برای مینیمم کردن سرعت در داخل میکروکانال. (ب) شکل مانع به‌دست آمده از مینیمم کردن سرعت در دو نقطه متفاوت داخل میکروکانال..... ۴۳
- شکل ۴ - ۲: هندسه به‌دست آمده برای طرح اول و پارامترهای هندسی. (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی..... ۴۴
- شکل ۵ - ۲: هندسه به‌دست آمده برای طرح دوم و پارامترهای هندسی. (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی..... ۴۵
- شکل ۶ - ۲: هندسه به‌دست آمده برای طرح سوم و پارامترهای هندسی. (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی..... ۴۷
- شکل ۷ - ۲: قسمتی از شبکه بندی مثلثی برای میکرومیکسر سوم..... ۵۴
- شکل ۸ - ۲: نمودار استقلال از شبکه برای میکرومیکسر سوم..... ۵۴
- شکل ۱ - ۳: مراحل لیتوگرافی نرم..... ۵۶

- شکل ۲ - ۳: مراحل کلی ساخت ریز تراشه..... ۵۷
- شکل ۳ - ۳: (الف) فتورزیست SU-8 (ب) ساختار شیمیایی SU-8..... ۶۱
- شکل ۴ - ۳: مراحل ساخت قالب SU-8..... ۶۳
- شکل ۵ - ۳: تصویر میکروسکوپی تز قالب ریز کانال ساخته شده با استفاده از SU-8..... ۶۴
- شکل ۶ - ۳: (الف) Sylgard184 (ب) ساختار شیمیایی PDMS..... ۶۵
- شکل ۷ - ۳: نمونه‌هایی از قالب Plexiglass ساخته شده به وسیله برش لیزری..... ۶۶
- شکل ۸ - ۳: حباب گیری از پلیمر قالب گیری شده توسط دستگاه دسیکاتور..... ۶۶
- شکل ۹ - ۳: قالب PDMS ساخته شده..... ۶۷
- شکل ۱۰ - ۳: پیوند دو سطح فعال شده PDMS..... ۶۸
- شکل ۱۱ - ۳: (الف) دستگاه کرونا (ب) تخلیه الکتریکی ایجاد شده جهت فعال سازی..... ۶۸
- شکل ۱۲ - ۳: ریز تراشه با لوله‌های scalp vein..... ۶۹
- شکل ۱۳ - ۳: پمپ‌های سرنگی استفاده شده..... ۷۰
- شکل ۱۴ - ۳: نحوه اتصال میکرومیکسر و پمپ‌های سرنگی..... ۷۱
- شکل ۱۵ - ۳: نحوه قرار گیری میکروسکوپ و پمپ های سرنگی برتی فیلمبرداری..... ۷۱
- شکل ۱۶ - ۳: حرکت مایع درون میکرومیکسر..... ۷۲
- شکل ۱۷ - ۳: میکرومیکسرهای طرح شده، (الف) میکرومیکسر طرح اول (ب) میکرومیکسر طرح دوم (ج) میکرومیکسر طرح سوم..... ۷۳
- شکل ۱۸ - ۳: قالب نهایی به دست آمده برای میکرومیکسر اول پس از رفع تیزی..... ۷۴
- شکل ۱۹ - ۳: قالب نهایی به دست آمده برای میکرومیکسر دوم پس از رفع تیزی..... ۷۴
- شکل ۲۰ - ۳: مرحله اول: قالب ساخته شده با فتورزیست..... ۷۵
- شکل ۲۱ - ۳: مرحله دوم: قالب گیری با PDMS..... ۷۵
- شکل ۲۲ - ۳: مرحله سوم: وصل کردن نازل‌های ورودی و خروجی به میکرومیکسر..... ۷۶
- شکل ۲۳ - ۳: نحوه فیلمبرداری و وصل لوله ها به میکروپمپ ها..... ۷۷
- شکل ۲۴ - ۳: نحوه حرکت دو سیال در داخل میکرومیکسر..... ۷۷
- شکل ۱ - ۴: مقایسه کیفی نتایج شبیه سازی عددی با تجربی در عدد رینولدز ۴۰..... ۸۰
- شکل ۲ - ۴: مقایسه کیفی نتایج شبیه سازی عددی با تجربی در عدد رینولدز ۸۰..... ۸۰
- شکل ۳ - ۴: خطوط جریان در رینولدزهای مختلف برای میکرومیکسر اول..... ۸۲
- شکل ۴ - ۴: خطوط جریان در رینولدزهای مختلف برای میکرومیکسر دوم..... ۸۳
- شکل ۵ - ۴: خطوط جریان در رینولدزهای مختلف برای میکرومیکسر سوم..... ۸۴
- شکل ۶ - ۴: توزیع غلظت در میکرو میکسر برای طرح اول در ضریب پخش 5×10^{-9} ۸۶
- شکل ۷ - ۴: توزیع اختلاط در سطح مقطع‌های مختلف برای میکرومیکسر طرح اول در ضریب

- پخش 5×10^{-9} ۸۸
- شکل ۸ - ۴: توزیع غلظت در میکرو میکسر برای طرح دوم در ضریب پخش 5×10^{-10} ۹۰
- شکل ۹ - ۴: توزیع غلظت در میکرو میکسر برای طرح دوم در ضریب پخش 7×10^{-9} ۹۱
- شکل ۱۰ - ۴: توزیع اختلاط در سطح مقطع‌های مختلف برای میکرومیکسر طرح دوم در ضریب پخش 5×10^{-10} ۹۳
- شکل ۱۱ - ۴: توزیع اختلاط در سطح مقطع‌های مختلف برای میکرومیکسر طرح دوم در ضریب پخش 4×10^{-9} ۹۴
- شکل ۱۲ - ۴: توزیع غلظت در میکرو میکسر برای طرح سوم در ضریب پخش 5×10^{-9} ۹۶
- شکل ۱۳ - ۴: سطح مقطع‌های انتخاب شده برای مقایسه در میکرومیکسر سوم ۹۷
- شکل ۱۴ - ۴: توزیع اختلاط در سطح مقطع‌های مختلف برای میکرومیکسر طرح سوم در ضریب پخش 5×10^{-9} ۹۸
- شکل ۱۵ - ۴: نمودار شاخص اختلاط برای میکرومیکسر اول ۱۰۰
- شکل ۱۶ - ۴: الف) نمودار شاخص اختلاط برای میکرومیکسر روم و در رینولدزهای بین $0.2 - 100$ ب) نمودار شاخص اختلاط برای میکرومیکسر روم و در رینولدزهای بین $0.2 - 5$ ۱۰۱
- شکل ۱۷ - ۴: نمودار شاخص اختلاط برای میکرومیکسر سوم ۱۰۳
- شکل ۱۸ - ۴: نمودار شاخص اختلاط در رینولدزهای مختلف در طول میکرومیکسر سوم ۱۰۴

۱- کلیات پژوهش

۱-۱- مقدمه

امروزه با رشد فناوری ساخت در ابعاد کوچک، کاربرد تجهیزات در ابعاد میکرو و نانو در صنایع مختلف نظیر پزشکی، بیومکانیک، بیوشیمی و صنایع شیمیایی رشد چشمگیری یافته است [۱-۳] میکروفلوئیدیک یک زمینه چند رشته ای و تا حدود زیادی بین رشته می باشد که در زمینه های مختلف مهندسی و رشته های مختلفی چون فیزیک، شیمی، بیوشیمی، نانو تکنولوژی و بیوتکنولوژی با تکیه بر کاربردهای عملی برای طراحی سیستم های سیالاتی با حجم و اندازه کوچک که قابلیت حمل داشته باشند به کار می رود. یکی از قسمت های تاثیر گذار در تجهیزات سیالاتی در ابعاد میکرو که وظیفه اختلاط سیالات قبل از واکنش یا آماده سازی ترکیب دارویی را بر عهده دارند، میکرو میکسرها هستند. هر چقدر قطر هیدرولیکی مجرای عبور سیال کوچکتر شود نسبت سطح در تماس سیال به حجم احاطه شده افزایش می یابد در نتیجه میل به سمت مجراهای با ابعاد کوچکتر علاوه بر اشغال فضای کم، سبب بهبود فرآیندهای انتقال از قبیل انتقال گرما و انتقال جرم می شود. هدف از ساخت میکرو میکسرها، بدست آوردن یک اختلاط کامل در خروجی در مقیاس کوچک با سرعت معین است.

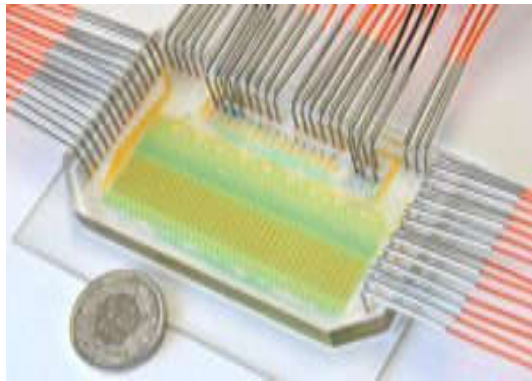
۱-۲- مایکروفلوئیدیک چیست؟

مایکروفلوئیدیک شاخه ای از سیستم های میکروالکترومکانیکی^۱ است که با رفتار، کنترل دقیق و کاربرد سیالات در مقیاس حجمی میکرومتر سر و کار دارد. تجهیزات مایکروفلوئیدیک از بخش های مختلفی ساخته می شوند که برخی از این اجزا عبارتند از: میکروپمپها، میکروکانالها، میکرومخلوط کننده ها^۲، میکرو حسگرها، مخازن سیالات و

^۱ MEMS

^۲ Micromixers

دریچه‌ها که معمولا در مقیاس میکرونی ساخته می‌شود. میکروکانال‌های توزیع سیال برای عبور سیال در شاخه‌های مختلف سیستم‌های میکروفلوئیدیک استفاده می‌شوند و کاربردهای وسیعی دارند. جریان سیال در این کانال‌ها بین چند صد نانولیترا تا چند میکرولیتر بر دقیقه می‌باشد. این نوع کانال‌ها معمولا طولی در حدود چند صد میکرون تا چند ده میلیمتر و عمق و عرضی به ترتیب در حدود ۲ تا چند صد میکرون دارند [۴]. سامانه‌هایی که از اجزای فوق ساخته می‌شوند اصولا سطحی حدود چند سانتی‌متر اشغال می‌کنند (شکل ۱-۱).



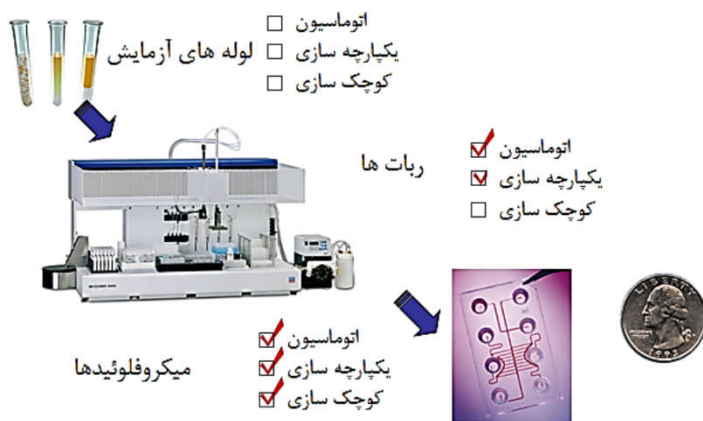
شکل ۱-۱: نمونه‌هایی از تجهیزات میکروفلوئیدیک

۱-۳- کاربرد میکروفلوئیدیک

میکروفلوئیدیک کاربردهای فراوانی دارد که از جمله کاربرد های آن تا به امروز می‌توان سنتز نانو ذرات، سنتز میکرو ذرات، سنتز پروتئین، جدا سازی ذرات مختلف با سایز های خیلی کوچک که در حالت عادی با روش‌های معمول قابل جداسازی نیستند (برای مثال جداسازی گلبول قرمز از گلبول سفید در خون)، کشت سلولی، تولید قطرات میکرونی، شکل گیری ذرات و کپسول‌ها در صنایع مواد غذایی و داروسازی، تشخیص انواع بیماری‌ها در مراحل اول بیماری، تولید مواد جدید با ویژگی‌های جدید، پزشکی و تجزیه و تحلیل DNA را نام برد.

میکروسیستم‌ها همچنین بخش مهمی از سامانه های کنترل دقیق در خودروهای مدرن را تشکیل می‌دهند و در صنایع هوافضا، تغذیه و نیمه‌هادی‌ها کاربردهای اساسی دارند. میکروفلوئیدیک‌ها کاربرد اساسی در عملی ساختن ایده، Lab-on-chip دارند که

در آن چند عملیات شیمیایی روی یک مدار مجتمع مینیاتوری انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر یک آزمایشگاه با ابعاد بزرگ در فضایی بسیار کوچک تجمع می‌شود که طی یک سری فرآیندهای موازی نتایج یک سری آزمایشات شیمیایی با دقت بسیار بالا و در زمان بسیار کم بدست می‌آید. در شکل (۱-۲) انگیزه حرکت به سمت میکروفلوئیدیک به خوبی نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: فرآیند حرکت به سمت میکروفلوئیدها

۱-۴- تاریخچه پیدایش میکروفلوئیدیک

چهار عامل را می‌توان منشأ پیدایش فناوری میکروفلوئیدیک دانست که هر کدام سهمی در ایجاد و پیشرفت این فناوری داشته‌اند. قدیمی‌ترین عامل مربوط به پیدایش روش‌های میکروآنالیز همچون کروماتوگرافی مایع با فشار بالا است، که توانست انقلابی در روش‌های آنالیز شیمیایی ایجاد کند. به کارگیری این روش‌ها، حساسیت و قدرت تفکیک بالایی را در آنالیز مقادیر جزئی نمونه‌ها ممکن نموده است. موفقیت این روش‌ها کاربردهای تازه‌ای برای آن‌ها در علوم شیمی و زیست‌شناسی ایجاد کرده است. دومین محرک از زیست‌شناسی مولکولی ایجاد شد زمانی که در دهه ۷۰ میلادی یک افزایش انفجاری در داده‌های ژنومیک رخ داد که ایجاد روش‌های میکروآنالیزی مرتبط با زیست‌مولکولی را به دنبال داشت. این روش‌ها نیاز به ابزارهایی با کارکرد بالاتر و حساسیت و قدرت تفکیک بیشتر نسبت به ابزارهای قدیمی داشتند. فناوری میکروفلوئیدیک راه حل بسیار مناسبی برای غلبه بر این مشکلات بود.

سهام سوم مربوط به صنایع میکروالکترونیک است. اولین امیدواری‌ها برای ساخت تراشه های میکروفلوئیدیک، لیتوگرافی و فناوری‌های مرتبط با آن بود، که به صورت موفقیت آمیزی در ساخت تراشه‌های میکروالکترونیک به کار گرفته شده بود. این فناوری ها به صورت مستقیم در میکروفلوئیدیک قابل استفاده هستند.

آخرین محرک ایجاد این فناوری در بخشی کاملاً مجزا به وجود آمد. زمانی که پس از جنگ سرد سلاح های شیمیایی و بیولوژیکی در صنایع نظامی کاربرد پیدا کردند، وزارت دفاع ایالات متحدهی آمریکا با ایجاد یک مرکز تحقیقاتی (DARPA)^۱، سرمایه گذاری در بخش سیستم‌های میکروفلوئیدی را افزایش داد تا از قدرت این فناوری در بخش نظامی سود ببرد.

توسعه میکروفلوئیدها به طور قابل توجه از سال ۱۹۸۰ به بعد بوده است. از لحاظ تاریخی اولین کاربردهای میکروفلوئیدها به استفاده از آن‌ها در پرینترهای جوهرافشان بر می‌گردد [۵]. دیگر کاربرد آن به میکروموتورها مربوط می‌شود. اما امروزه کاربردها در حوزه بیوتکنولوژی رو به افزایش است. در واقع میکروفلوئیدیک اساس بیشتر توسعه های بیوتکنولوژی است زیرا به طور ساده می‌توان گفت که نمونه‌های زیستی در حالت مایع هستند و محل زندگی آن‌ها محیط آبدار است.

۱-۵- مزایای سیستم های میکروفلوئیدیک

کاهش اندازه در فرآیندهای میکروفلوئیدیک، ویژگی‌های جذاب زیادی را فراهم می‌کند؛ برای مثال باعث استفاده‌ی بسیار کمتری از حجم نمونه‌ها و واکنش دهنده‌ها (از میلی‌لیتر و یا میکرولیتر به نانولیتتر یا پیکولیتتر) می‌شود که در نتیجه تولید ضایعات بسیار کمتر در پی خواهد داشت (لازم به ذکر است که برخی ضایعات شیمیایی بسیار خطرناک هستند). نسبت سطح در تماس سیال به حجم احاطه شده افزایش می‌یابد در نتیجه میل به سمت مجراهای با ابعاد میکرو علاوه بر اشغال فضای کم، سبب بهبود فرآیند انتقال جرم می‌شود. از طرفی کوچک‌تر شدن ابعاد استفاده از مواد گران قیمت و یا خطرناک را به شکل امن و ارزان امکان‌پذیر می‌کند. اندازه گیری‌ها و زمان تجزیه و تحلیل در این مقیاس به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (صرفه جویی در زمان) و هم چنین دقت بیشتر و امکان تکرارپذیری بیشتر آزمایشات را فراهم می‌کند. با استفاده از سیستم های میکروفلوئیدیک می‌توان یک یا چند فرآیند آزمایشگاهی را (از نمونه برداری تا

¹ Defense Advanced Research Projects Agency

بازخوانی مستقیم و تجزیه و تحلیل خروجی) روی یک تراشه کوچک انجام داد. در واقع یک آزمایشگاه قابل حمل را می‌توان تصور کرد که کوچک تر از یک تلفن همراه است و از آن به عنوان «سیستم تجزیه و تحلیل کلی میکرونی» یا «آزمایشگاه روی یک تراشه» یاد می‌شود. با استفاده از این تراشه‌ها نیروی انسانی و هزینه‌ها نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

۱-۶- آزمایشگاه روی تراشه (Lab-on-chip)

یک دستگاه میکروفلوئیدیک، تراشه‌ای از جنس سیلیکون، شیشه یا الاستومر است که لوله‌هایی با ابعاد میکرونی در آن تعبیه شده و سیالات درون این لوله‌ها جریان پیدا می‌کنند. بر اساس نیاز می‌توان تراشه‌هایی طراحی کرد که عملیات مورد نظر در آزمایش‌های معمول زیستی و پزشکی را در ابعاد کوچک انجام دهد. با توجه به مزایای فراوان سیستم‌های میکروفلوئیدیک و همچنین انعطاف‌پذیری بالای آنها برای تولید ساختارهای جدید، آشنایی و ایجاد این فناوری در کشور امری ضروری به نظر می‌رسد. امروزه با پیشرفت سریع علم و تمایل روزافزون برای رشد در زمینه‌های پزشکی، زیست فناوری، نانو فناوری، تحقیقات دارویی و حتی نظارت و کنترل بر محیط زیست، دنیای امروزی به طور قابل توجهی به تحلیل‌ها، آنالیزها و سنتزهای شیمیایی وابسته شده است. به ویژه با موفقیت در پروژه ژنوم انسان^۱، ادوات و سیستم‌ها و تراشه‌های مبتنی بر ریزسیالات و ریزتراشه‌های آزمایشگاهی^۲ جایگاه خاصی در مطالعات، تحقیقات، صنعت و تجارت پیدا کرده‌اند. بر اساس مطالعه‌ای که در دانشگاه MIT در سال ۲۰۰۴ صورت گرفته بود، فناوری میکروفلوئیدیک به عنوان یکی از ۱۰ علم در حال پیشرفتی که در آینده جهان را متحول خواهد کرد، معرفی گردید [۶].

پیش از این، تجزیه و تحلیل‌ها و سنتزهای شیمیایی در آزمایشگاه‌های مرکزی و تخصصی صورت می‌گرفت، زیرا این کار نیازمند افراد کارآموده و متخصص در این زمینه و همچنین تجهیزات تخصصی می‌بود. در همین راستا گرایش و تمایل فراوانی برای ساده‌سازی تجهیزات مربوط به تجزیه و تحلیل‌های شیمیایی به منظور امکان‌سازی برای کاربرانی که هیچگونه تجربه‌ی کار با وسایل و تجهیزات آزمایشگاهی نداشته‌اند، همواره

¹ Human Genome Project

² Lab on chip

وجود داشته است. به عنوان نمونه، امروزه آزمایشات متداول و ساده‌ای نظیر آزمایش بارداری، آزمایش گلوکز خون برای بیماران دیابتی و سنتز نمونه‌های مختلف آب می‌تواند در فروشگاه‌ها یا منازل به وسیله‌ی افراد عادی و غیر متخصص به وقوع بپیوندد. برای دستیابی به این مهم، تجهیزات سنتز و تجزیه تحلیل شیمیایی و بیولوژیکی نیازمند کوچک‌سازی، قابلیت حمل، کاربری آسان، سادگی راه‌اندازی و قابلیت اطمینان بالا می‌باشند. از این رو فناوری Lab-on-chip برای تحقق این اهداف معرفی گردید.

Lab-on-chip وسیله‌ای است که در آن یک یا چند تابع، کار، وسیله یا تجهیزات آزمایشگاهی بر روی یک تراشه به ابعاد چند میلی متر تا چند سانتی متر مجتمع شده است. Lab-on-chip با حجم بسیار کوچک سیالات و مایعات سر و کار دارد (حتی کمتر از پیکولیتتر). در واقع این دستگاه، کوچک‌سازی شده‌ی یک یا چند وسیله‌ی آزمایشگاهی برای تشخیص، شناسایی و بازخوانی یک یا چند نمونه شیمیایی بر روی یک ریز تراشه می‌باشد. یکی از اهداف مهم در فناوری Lab-on-chip سادگی و قابل فهم بودن و اعتبار نتایج تست‌های بیولوژیکی و شیمیایی و همچنین ساخت ریزتراشه‌های کاملاً خودکار که تمامی قسمت‌های آن از جمله تجزیه و تحلیل‌های شیمیایی و پردازش داده‌ها به صورت خودکار عمل کند، می‌باشد [۷ و ۸].

حجم توانایی تحلیل، آنالیز و پردازش موازی در یک تراشه مبتنی بر ریزسیالات باعث افزایش کارایی و سرعت پاسخ‌دهی، بازده و نمایش اطلاعات متعدد در محدوده‌ی وسیع گردیده است، چرا که کامپیوترهای امروزی معمولاً تا ۲۰ پردازشگر موازی دارند در حالی که تراشه‌های مبتنی بر ریزسیالات تا چندین ۱۰۰ عدد ظرفیت پردازش موازی را دارا هستند. این حجم عظیم پردازش موازی در این تراشه‌ها، در کاربردهای پزشکی به ویژه تشخیصات مبتنی بر DNA، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در زیر مواردی چند از مزیت‌های فناوری Lab-on-chip و تراشه‌های مبتنی بر ریزسیالات به اختصار بیان می‌شود [۹].

مقدار کم نمونه‌ی مورد نیاز از شناساگر، سیال و یا محلول. (استفاده‌ی بهینه از مواد چه در مرحله‌ی ساخت و چه در مرحله‌ی استفاده از تراشه)
سهولت تولید انبوه و گروهی.

مقرون به صرفه بودن و هزینه‌ی ساخت نسبتاً پایین.
افزایش کارایی، دقت و حساسیت سیستم حتی در ابعاد میکرو.
افزایش کنترل بر شرایط واکنش.

قابلیت حمل و جابجایی.
افزایش سرعت تجزیه تحلیل، آنالیز و پاسخ‌دهی.
اندازه‌گیری، انجام تست و تحلیل داده‌ها به صورت کاملاً خودکار.
رابط کاربر پسند^۱.

پردازش موازی با ظرفیت بالا.

انطباق‌پذیری با فناوری IC.

Lab-on-chip و فناوری مبتنی بر میکروفلوئیدیک کاربرد بسیار گسترده و فراوانی در زمینه‌ی پزشکی از جمله تشخیص بیماری، تشخیص انواع سلول‌های زیستی، انواع پروتئین‌ها، لیپیدها و... و همچنین انواع سلول‌های سرطانی، PCR، شمارش و جداسازی انواع ذرات و اجزای تشکیل دهنده‌ی خون و ... دارند. یکی از بخش‌های بسیار اساسی Lab-on-chip، میکرومیکسرها هستند که طی آن چندین بخش از یک سیال باید اختلاط یابند. در ادامه به بررسی پدیده اختلاط و اهمیت آن در سیستم‌های میکروفلوئیدیک می‌پردازیم.

۱-۷-۱- اختلاط^۲

اختلاط به معنای مخلوط شدن مواد مختلف جهت به دست آوردن فازی همگن است که از لحاظ فیزیکی مشابه باشند. میکرومیکسرها یکی از بخش‌های اساسی دستگاه‌های میکروفلوئیدیک می‌باشند که برای اختلاط حداقل دو فاز مختلف از نمونه‌های سیالی استفاده می‌شود. ابعاد بسیار کوچک میکرومیکسرها سبب می‌شود که عدد رینولدز^۳ جریان بسیار کم بوده و جریان اساساً آرام باشد. در جریان آرام مکانیزم اختلاط اساساً از نوع پخش مولکولی می‌باشد که در این مورد قانون فیک^۴ حاکم است. مطابق با قانون مشهور فیک، انتقال جرم به ضریب نفوذ و تفاوت گرادیان غلظت وابسته است. این دستگاه‌ها با افزایش سطح فصل مشترک سیالات و گرادیان غلظت موجب افزایش میزان اختلاط می‌شوند. هر چقدر قطر هیدرولیکی مجرای عبور سیال کوچکتر شود نسبت سطح در تماس سیال به حجم احاطه شده افزایش می‌یابد در نتیجه میل به سمت مجراهای با

¹ User-friendly interface

² Mixing

³ Reynolds number

⁴ Fick Law

ابعاد میکرو علاوه بر اشغال فضای کم، سبب بهبود فرآیند انتقال جرم می‌شود. هدف از ساخت میکرومیکسرها، بدست آوردن یک اختلاط کامل در خروجی در مقیاس کوچک با سرعت معین است. با توجه به ابعاد کوچک تجهیزات در ابعاد میکرو، جریان در چنین دستگاه‌هایی از نوع آرام می‌باشد که در این صورت فرآیند اختلاط عموماً از نوع پخش مولکولی^۱ می‌باشد این نوع مکانیزم انتقال جرم مخصوصاً در اعداد پکلت^۲ بالا بسیار ضعیف بوده و این امر سبب افزایش زمان و طول فرآیند اختلاط می‌شود. چون در ابعاد ماکرو میتوان جریان را به راحتی آشفته نمود، آشفتگی‌های بدست آمده سبب افزایش راندمان اختلاط می‌شود و پخش مولکولی نقش کمی در فرآیند اختلاط دارد. ابعاد کوچک میکرومیکسرها و بالطبع پائین بودن عدد رینولدز مربوطه سبب کاهش اثر اختلاط در نتیجه آشفتگی جریان خواهد شد بنابراین لازم است با استفاده از روش‌هایی فرآیند اختلاط در میکرو میکسرها بهبود یابد. هدف از این پایان نامه، طراحی یک میکرومیکسر غیرفعال^۳ می‌باشد، به طوری که با رینولدزهای کم کار کند و بازده اختلاط بالایی داشته باشد. همچنین باید این میکرومیکسر با هزینه‌ای کم و فرآیندهایی آسان قابل ساخت باشد. برای طراحی این میکرومیکسر ابتدا با روش بهینه‌سازی^۴ هندسه چیدمان مناسب موانع بدست آمد سپس ساختار نهایی میکرومیکسر طراحی شد. برای بررسی میدان‌های سرعت و غلظت در این میکرومیکسر، هندسه نهایی توسط نرم‌افزار کتیا طراحی و سپس با استفاده از نرم‌افزار کامسول مش بندی و در رینولدزهای ورودی ۰.۲ تا ۱۰۰ شبیه‌سازی شد. فرآیندهای اختلاط همراه واکنش شیمیایی دارای کاربردهای وسیعی در صنعت و علوم زیستی می‌باشد. شناخت اثر هر یک از دو پدیده اختلاط و واکنش شیمیایی و مدل‌سازی چگونگی تقابل این دو با یکدیگر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. همگام با پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی طراحی و ساخت قطعات در ابعاد میکرون، وسایلی با قابلیت انتقال سیال در ابعاد خیلی کوچک طراحی و ساخته شده است که امروزه از آنها تحت عنوان وسائیل مایکروفلوئیدیک^۵ یاد می‌شود. میکرومیکسر و پروسه اختلاط در آن به عنوان یکی از بخش‌های مهم و اساسی سیستم‌های مایکروفلوئیدیک محسوب شده و دارای کاربردهای بسیاری در عرصه‌های

¹ Molecular diffusion

² Peclet Number

³ Passive

⁴ Optimization method

⁵ Microfluidic

متفاوت می باشد.

۸-۱- پدیده‌ی اختلاط و کاربردهای آن

اختلاط به معنای مخلوط شدن مواد مختلف جهت به دست آوردن خواص فیزیکی یکسان در سیال جهت انجام فرآیندهای بعدی می باشد. از دیدگاه مهندسی، اختلاط پدیده‌ای است که در بسیاری از صنایع ظاهر می شود و بر کیفیت محصولات تاثیر می گذارد. اختلاط در فرآیندهای صنعتی و عملیات مربوط به آنها نقش عمده‌ای دارد و همیشه برای رسیدن به یک مخلوط همگن صورت می گیرد. عمل اختلاط در فرآیندهای شیمیایی مختلف، برای یک دست کردن و همگن کردن سیستم به کار می رود و همچنین باعث کاهش اختلاف غلظت و سایر خواص سیستم در مکان‌های مختلف شده (کاهش گرادیان) و در سیستم‌های چند فازی سطح تماس سیستم را افزایش می دهد. همچنین اختلاط سبب بهینه شدن پدیده‌های انتقال جرم، حرارت و مومنتوم می گردد. فرآیند اختلاط، در اکثر واحدهای تولیدی که با سیالات سروکار دارند مشاهده می شود از جمله می توان به صنایع لبنیات، واحدهای فرآیندی در پالایشگاه‌ها و پتروشیمی‌ها، صنایع داروسازی، راکتورهای شیمیایی و تجهیزات مهندسی پزشکی اشاره نمود.

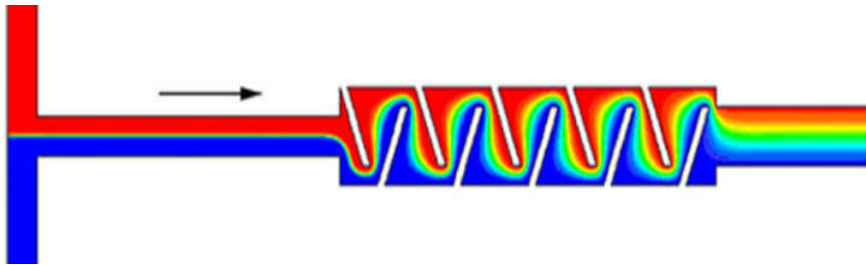
۹-۱- اهمیت اختلاط در ابعاد میکرو

بهبود فرآیند اختلاط سبب خواهد شد تا مخلوط مورد نظر با درصد اختلاط مطلوب در زمان کوتاه‌تر و طول مسیر کوتاه‌تری بدست آید. این دو هدف سبب خواهد شد تا ابعاد تجهیزات ساخته شده کوچک‌تر شده و در نتیجه هزینه‌های اقتصادی اولیه و جاری مرتبط کاهش یابد. از طرفی کوچک‌تر شدن دستگاه‌های مرتبط با فرآیند اختلاط سبب کاهش ماده مصرفی اولیه برای تولید آن و در نتیجه کاهش تولید آلاینده‌های زیست محیطی خواهد شد. از طرف دیگر به دلیل این که در حوزه‌ی زیست‌شناسی و پزشکی آزمایش‌های تحقیقاتی و تشخیصی فراوانی وجود دارد که در آنها نمونه‌ها و مواد محلول طی عبور از میکرو میکسرها باید با سیالات و محلول‌های از پیش تعیین شده مخلوط گردند که نتیجه فرآیند مذکور منجر به سنتز اسیدهای نوکلئیک، بررسی عکس‌العمل آنزیم‌ها و تجزیه و تحلیل DNA موجودات زنده خواهد شد [۱۰-۱۲]. اگرچه کار در ابعاد

میکرو متضمن در نظر گرفتن مسائل و پدیده‌هایی می‌باشد که ممکن است اصلاً در مقیاس‌های ماکرو اهمیتی نداشته باشند اما ابعاد در نظر گرفته شده سیستم هنوز تا حدی می‌باشد که بتوان فرض پیوستگی جریان را در اکثر موارد قابل قبول دانست. بنابراین لازم است که شناخت کافی از اختلاط سیالات در ابعاد ریز داشت و متناسب با فرآیند مورد نظر تجهیزات مورد نیاز را طراحی نمود.

۱-۱-۱۰- میکرومیکسر

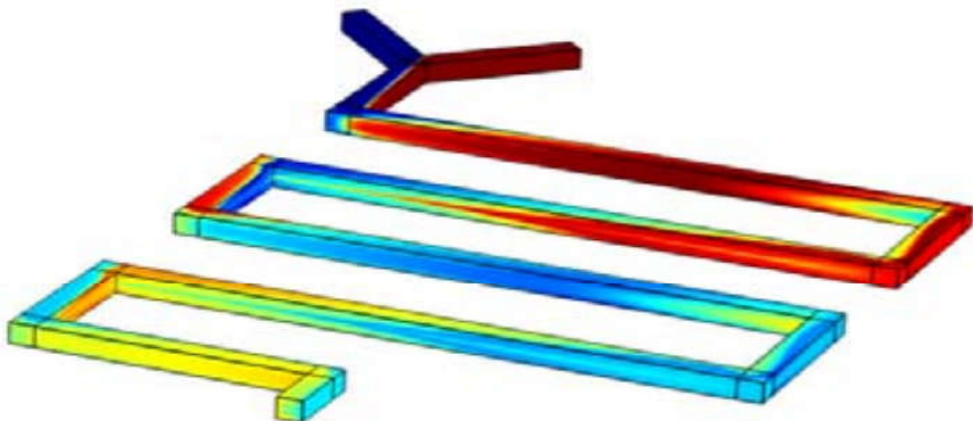
میکرومیکسرها بخشی از سیستم مایکروفلوئیدیک هستند که در آن دو یا چند سیال باهم مخلوط می‌شوند. در حقیقت میکرومیکسر ها از کانال‌هایی در ابعاد میکرومتر تشکیل شده اند که حاوی سیالات مختلف می‌باشند. کانال‌ها بر حسب اندازه و یا به عبارت بهتر قطر هیدرولیکی به کانال‌های متعارف، مینی کانال، میکروکانال، کانال گذار و کانال مولکولی تقسیم می‌شوند [۱۳]. دستگاه‌های مایکروفلوئیدیک به دستگاه‌هایی اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن دارای مقیاس میکرومتر می‌باشد [۱۴]. طول کانال اختلاط در 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 میلی‌لیتر می‌باشد. در تجهیزات مایکروفلوئیدیک، به دلیل ابعاد بسیار کوچک، عدد رینولدز بسیار پایین بوده و جریان آرام برقرار است. ابعاد کوچک میکروکانال تشکیل گردابه جریان را محدود می‌کند. اختلاط در سیستم‌های میکرو به دلیل اعداد رینولدز پائین جریان که ناشی از ابعاد کانال می‌باشد به صورت یک چالش درآمده است. ناتوانی برای ایجاد جریان‌های آشفته در این سیستم‌ها منجر به استفاده از راه کارهای دیگری جهت افزایش اختلاط در آن‌ها شده است. با توجه به غالب بودن جریان آرام در مقیاس میکرو، ایجاد یک مخلوط یکنواخت در میکروکانالها مشکل است و همین امر سبب کند شدن روند اختلاط می‌گردد. از عوامل مهم در تعیین بهترین عملکرد میکرومیکسرها می‌توان به زاویه برخورد، تقارن در سطح مقطع، قطر هیدرولیکی، میدان سرعت، ضریب نفوذ دو سیال در یکدیگر و خواص دو سیال اشاره نمود [۱۵]. در شکل‌های (۱-۳) تا (۳-۳) اختلاط در میکرومیکسر نشان داده شده است [۱۶ و ۱۷].



شکل ۳-۱: میکرومیکسر با مانع‌های تیغه‌ای



شکل ۴-۱: میکرومیکسر T شکل



شکل ۵-۱: میکرومیکسر زیگزاگی

۱-۱۱-۱- طبقه‌بندی میکرومیکسرها

به منظور بهبود فرآیند اختلاط در میکرومیکسرها و کاهش طول اختلاط و نیز زمان اختلاط اجزا مخلوط شونده از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. این روش‌ها به دو دسته کلی روش‌های فعال و روش‌های غیر فعال تقسیم بندی می‌شوند. در ادامه به معرفی این دو روش و نیز چند میکرومیکسر مربوطه پرداخته می‌شود.

۱-۱۱-۱- میکرومیکسر فعال :

در میکرومیکسرها، فعال عامل تحریک خارجی موجب ایجاد اغتشاش نمونه می‌شود و برای انجام فرآیند اختلاط، به انرژی خارجی نیاز است. طول زمان اختلاط کامل و فضای اشغال شده کمتر از میکرومیکسرها، غیرفعال و هندسه این نوع میکرومیکسرها ساده‌تر می‌باشد. ساخت میکرومیکسرها، فعال با فرآیندهای پیچیده‌ای همراه است و هزینه‌بر می‌باشد و همچنین کنترل آن‌ها مشکل بوده و به سختی با دیگر دستگاه‌های مایکروفلوئیدیک هماهنگ می‌شود. میکرومیکسرها، فعال به طور معمول از تکنیک‌های آکوستیک/اولتراسونیک، اختلاف فشاری، هیدرودینامیک الکتریکی و تکنیک‌های حرارتی استفاده می‌کنند [۱۸].

۱-۱۱-۲- میکرومیکسر غیرفعال:

میکرومیکسرها، غیرفعال برای انجام فرآیند اختلاط احتیاج به انرژی خارجی ندارند و به این دلیل، طول اختلاط و دارای حجم اشغال شده بیشتر بوده و هندسه‌شان پیچیده‌تر از میکرومیکسرها، فعال می‌باشد. به طور کلی در میکرومیکسرها، غیرفعال برای افزایش بازده اختلاط از دو روش افزایش سطح تماس بین دو ماده یا افزایش بی‌نظمی در جریان هندسه استفاده می‌شود. سطح تماس و زمان تماس گونه‌ها بر اساس طراحی خاص شکل میکروکانال‌ها افزایش می‌یابد در نتیجه مسیر پخش را کوتاه می‌کند. در واقع اختلاط در این نوع میکرومیکسرها از تعامل جریان اصلی با هندسه کانال که به طور خاص طراحی می‌شود صورت می‌گیرد. یکی دیگر از روش‌های بهبود اختلاط در میکرومیکسرها، غیرفعال استفاده از سرعت‌های ورودی نوسانی است که دارای اختلاف فاز نسبت به یکدیگر می‌باشند. این مفهوم، اولین بار توسط والپرت و همکاران [۱۹] ارائه

شد. این روش اغلب برای جریان‌های با عدد رینولدز پایین استفاده می‌شود [۲۰].

۱-۱۲- میکرومیکسرهای غیرفعال و مکانیزم‌های اختلاط

به دلیل آرام بودن جریان در میکرومیکسرهای غیرفعال مکانیزم‌های متعددی پیشنهاد شده است. در ابعاد ماکرو، جریان آشفته موجب تولید گردابه می‌شود و این گردابه‌ها باعث کاهش ضخامت و افزایش سطح مشترک بین سیال‌ها می‌شوند. در فواصل دور از دیواره کانال اختلاط، سرعت این مکانیزم بسیار بالاتر از سرعت مکانیزم نفوذ مولکولی می‌باشد. در ابعاد میکرو اختلاط بسیار مشکل‌تر از ابعاد ماکرو می‌باشد. در این ابعاد عدد رینولدز کوچک و جریان آرام می‌باشد. در این حالت نفوذ مولکولی بسیار موثر است و این مکانیزم بسیار آهسته و زمان‌بر می‌باشد. اختلاط سیالات منحصراً بر اساس مکانیزم نفوذ مولکولی نیازمند زمانی بسیار طولانی می‌باشد. در کنار نفوذ، حرکت توده‌ای یکی از مهم‌ترین روش‌های انتقال جرم می‌باشد. یکی از روش‌های معمول در میکرومیکسرهای رایج که ایجاد حرکت توده‌ای می‌کند، استفاده از همزن می‌باشد. در مورد میکرومیکسرهای غیرفعال، سوال اساسی این است که چگونه می‌توان در غیاب همزن با تولید حرکت توده‌ای میزان اختلاط را افزایش داد. روش دیگر برای ایجاد حرکت توده‌ای، استفاده از کانال‌های انحنادار و زیگ‌زاگ می‌باشد. در این کانال‌ها در محل‌های تغییر جهت کانال، گردابه‌هایی در سطح مقطع آن ایجاد می‌شود که به این گردابه‌ها، گردابه دین^۱ گفته می‌شود [۲۱]. در جریان آرام درون یک لوله صاف، اختلاط عمدتاً توسط پخش مولکولی بدست می‌آید که به تنهایی قادر به اختلاط مناسب در میکرومیکسرهای غیرفعال نیست اما مکانیزم‌هایی وجود دارند که می‌توان اختلاط کامل را در جریان آرام بدست آورد. یکی از این راهبردها بی‌نظم کردن خط مسیر ذرات جریان یا اصطلاحاً ایجاد جریان همرفت^۲ پرفرج و مرج است و کاربرد بسیار زیادی در صنایع غذایی و دارویی دارد. خط مسیر ذرات جریان منظم در جریان که اختلاط در آنها تنها از طریق پخش مولکولی بدست می‌آید، در جریان همرفت پرفرج و مرج کاهش می‌یابند. بنابراین اختلاط در جریان پرفرج و مرج بیشتر از جریان منظم (یا معمولی) است. در نتیجه برای بدست آوردن اختلاط کامل، کانال طولانی لازم است که با توجه به کوچک‌سازی وسیله ناممکن

¹ Dean

² Chaotic Advection

است. در مطالعه حاضر نیز مکانیزم پر هرج و مرج کردن جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ابعاد ماکرو جریان سیال به راحتی می‌تواند در ناحیه توربولانت قرار گیرد که آشفتگی جریان باعث ایجاد گردابه‌هایی در جریان می‌شود که در نتیجه این گردابه‌ها فرآیند اختلاط به خوبی 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 زمانی زیاد 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.

۱-۱۳- پیشینه پژوهش

یکی از بخش‌های بسیار مهم که وظیفه‌ی اختلاط سیالات را برعهده دارند، میکرومیکسرها می‌باشند. در زمینه اختلاط سیالات در میکرومیکسرها مطالعات متعددی صورت گرفته است.

ریو^۱ و همکاران [۲۲] اختلاط آب و اتانول را داخل یک میکرومیکسر با قابلیت ساخت سه بعدی تناوبی به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. نتایج عددی نشان داد که شکل موجی مربعی باعث ایجاد جریان گردابه‌ای آرام و شیارها باعث کشیدگی جریان می‌شوند که این دو پدیده باعث ایجاد اغتشاش سه بعدی در جریان شده و درجه اختلاط را نسبت به حالت بدون وجود این ساختارها، به طور چشمگیری در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز افزایش می‌دهد. آن‌ها با تغییر مکان شیار مکعبی، بهترین حالت را از نظر درجه اختلاط و افت فشار با استفاده از شبیه سازی عددی پیدا کردند.

آوکی^۲ و همکاران [۲۳] از روش وایلر ماکس^۳ / دوشمن^۴ استفاده کرده و تاثیر هندسه یا برخورد دو جریان و خمیدگی را بر روی اختلاط سیال آشکار کردند. آن‌ها ثابت کردند که ترکیب اتصال دو جریان و خمیدگی می‌تواند عملکرد اختلاط را بهبود بخشد. علاوه بر این آن‌ها دریافتند که هیچ تفاوت مهمی بین اختلاف فشار لایه بیرونی در صورت وجود خمیدگی یا عدم وجود آن، وجود ندارد.

¹ Ryu

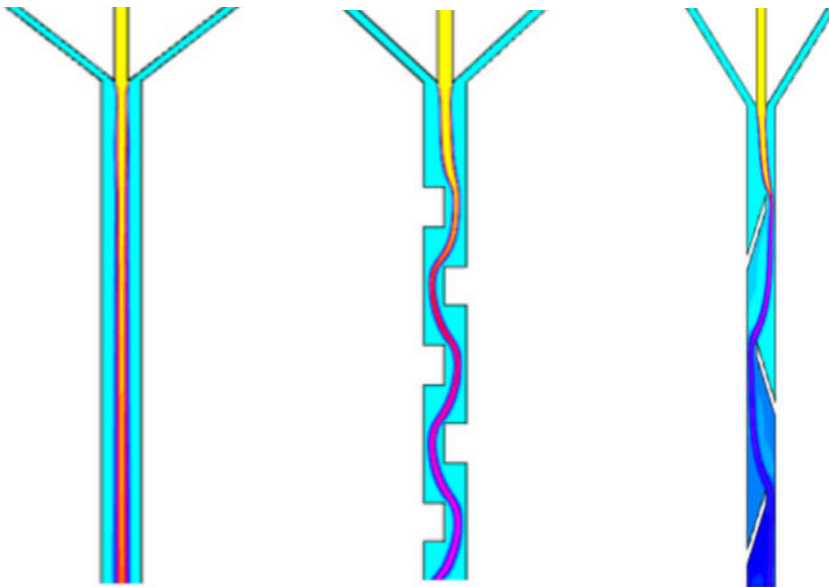
² Aoki

³ Wailer Max

⁴ Doshman

پترسون^۱ و همکاران [۲۴] به بررسی عددی و تجربی یک میکرومیکسر همراه با موانع، برای اختلاط در اعداد رینولدز پایین پرداختند. در این کار موانع لوزوی، دایروی، مثلثی و لوزی پله دار برای جداسازی و اختلاط مجدد جریان‌ها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که وجود موانع به خصوص موانع دایروی بهترین کارایی را در افزایش درجه اختلاط دارند، همچنین افت فشار بر واحد طول به دست آمده در این میکرومیکسر کم می‌باشد. آنها ادعا کردند که به دلیل ساختار صفحه‌ای این نوع میکرومیکسر و سادگی ساخت، می‌توان از این نوع میکرومیکسر در آزمایشگاه‌های تراشه‌ای استفاده کرد.

ناهر^۲ و همکارانش [۲۵] جریان سیال را با روش دینامیک سیالات محاسباتی در سه کانال مورد بررسی قرار دادند. آنها بازده اختلاط را در میکرومیکسر Y شکل که یکی از سیال‌ها از دو ورودی از طرفین سیال دیگر با یک ورودی با مانع‌های مختلف محاسبه کردند که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. نتایج نشان داد که شکل کانال به شدت بر روی حرکت سیال در میکروکانال و همچنین اختلاط در آن موثر است.



شکل ۶-۱: میکرومیکسر Y شکل با مانع‌های متفاوت [۲۵]

¹ Peterson

² Naher

Title and **Mixing investigation through a miniaturized channel by means of passive method / Tohid Dehgani**

Author:

Supervisor: **Farhad Sadegh Moghanlou**

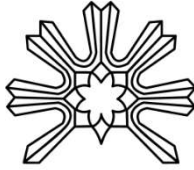
Graduation date:

Number of pages:

Abstract

Advances in manufacturing in micrometer size, make it possible to produce new devices with a very small size for fluid transferring called microfluidic devices. Micromixers are very small devices that are used to mix at least two different species. Micromixers and mixing process are considered as one of the important parts of microfluidic systems and have many applications in various fields such as chemistry, biochemistry, medicine and pharmacy. In small geometries, the Reynolds number is too low and the flow regime is generally laminar. In laminar flows mixing is mainly based on molecular diffusion, which is a very time consuming, therefore it is necessary to enhance mixing. In this research, the mixing phenomenon in a Y-shaped micromixer with different geometries in different Reynolds numbers is investigated. Utilizing topology optimization, optimal shape of the baffles through the channel generated and effect of Reynolds number and diffusion coefficient on mixing is investigated. Results of three studied microchannels show that in all Reynolds numbers, increasing the diffusion coefficient causes increase in mixing efficiency. It is also observed that, increasing Reynolds number initially reduces the mixing efficiency and then increases it. In low Reynolds numbers, molecular diffusion is the dominant mechanism of mixing therefore increasing the velocity reduce the residence time and consequently diffusion effects. More increasing of Reynolds number cause formation of vortexes just behind of obstacles. These generated vortexes enhance chaotic advection mechanism against diffusion mechanism. Increasing Reynolds number intensify vortex and increases mixing efficiency.

Keywords: Micromixer; Laminar flow, Passive method; Topology optimization



University of Mohaghegh Ardabili
Faculty of Engineering
Department of Mechanical Engineering

Thesis submitted in partial fulfillment for the degree of
M.Sc. In Mechanical Engineering-Energy conversion

Mixing investigation through a miniaturized channel by means of passive method

By:
Tohid Dehgani

Supervisor:
Farhad Sadegh Moghalou

Advisor:
Hadi Veladi

February 20