

## میکرومیکسرهای ریزسیالی قابل ساخت

**چکیده:** میکرومیکسرها به طور گسترده در صنایع مهندسی، زیستی و پزشکی کاربرد دارند. تا کنون انواع متنوعی از میکرومیکسرهای طراحی و ساخته شده است. ساختار، عملکرد، بازده و نمونه های قابل اختلاط در میکرومیکسرها با هم متفاوت است. مقاله حاضر به بررسی انواع میکرومیکسرها با اولویت مقالات تجربی و طرح های قابل ساخت پرداخته است. این دستگاه ها بر اساس راهکارهایی که برای بهبود اختلاط در آنها به کار رفته است، دسته بندی و مزایا و معایب هر کدام بررسی می شود. میکرومیکسرها به طور کلی به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم بندی می شوند. در انواع غیرفعال، فرآیند اختلاط بر اساس اصول دینامیک سیالاتی با استفاده از مسیرهای منحنی، قرار دادن موانع در مسیر جریان و شکل های هندسی پیچیده انجام می شود. در انواع فعال از میدان مغناطیسی، الکتریکی و امواج صوتی برای اختلاط استفاده می کنند. در مقایسه با نمونه های غیرفعال، عملکرد اختلاط سیستم های فعال بهتر است ولی فرآیند ساخت آنها به دلیل نیاز به محرک خارجی برای تولید میدان یا امواج پیچیده تر، زمان بر و گران تر است. بعلاوه اختلاط فعال برای برخی نمونه ها مثلاً سیالات غیرمغناطیسی یا زیستی مناسب و کاربردی نیست. مقاله حاضر اطلاعات جامع و مفیدی را برای انتخاب میکرومیکسری مناسب بر اساس مزایا، معایب و عملکرد این ریزتراشه ها فراهم می کند.

**واژه های راهنما:** میکروفلوئیدیک، میکرومیکسر، اختلاط فعال، اختلاط غیر فعال، بازده اختلاط

### هاجر مقدس\*

استادیار،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه یاسوج،  
یاسوج

مقاله مروری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۳۰

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۹/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸

### Hajar Moghadas\*

Assistant Professor,  
Faculty of Mechanical  
Engineering  
Yasouj University,  
Yasouj

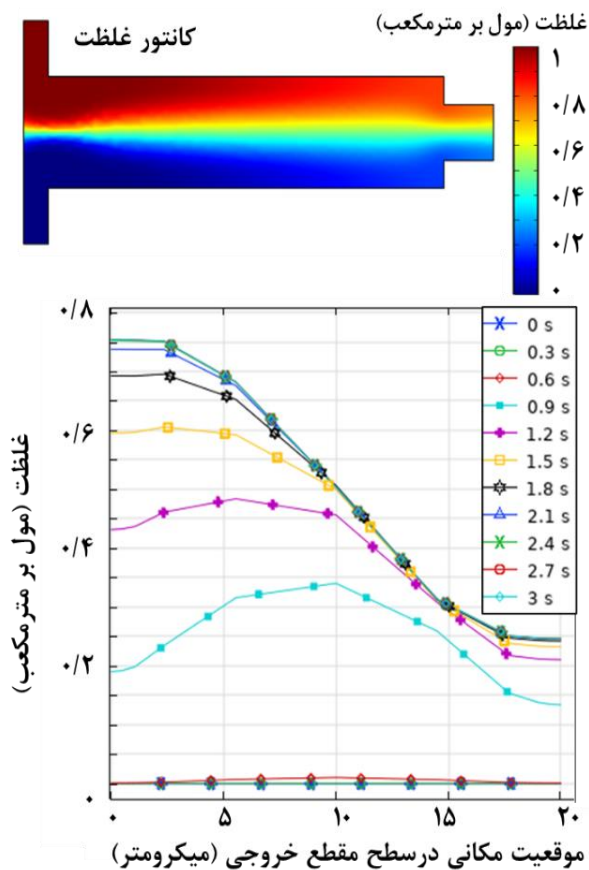
## The microscale mixing in the micromixer

**Abstract:** Micromixers are widely utilized in the engineering, biology, and medical industry. So far, various types of micromixers are designed and manufactured with different structure, efficiency, and mixable samples. This article reviews the micromixers, focusing on experimental studies and manufacturable designs. Micromixers are divided into two categories: passive and active. Passive micromixers rely on fluid dynamics principles, utilizing curved paths, obstacles in the flow, and complex shapes. In contrast, active micromixers employ magnetic, electric, or acoustic fields. While active systems typically offer superior mixing performance, their manufacturing is more complex, time-consuming, and costly due to the necessity of an external stimulus. Furthermore, active mixing may not be suitable for certain samples, such as non-magnetic or biological fluids. This article provides comprehensive and valuable information for selecting the appropriate micromixer based on the advantages, disadvantages, and performance.

**Keywords:** Microfluidic, Micromixer, Passive mixing, Active mixing, Mixing efficiency

## ۱- مقدمه

بازده اختلاط کمی دارد. به عنوان مثال در شکل (۱) اختلاط دو سیال با رنگ‌های متفاوت در یک میکروکانال ساده نشان داده شده است [۲۴]. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این ریزتراشه اختلاط تنها در لایه نازکی در سطح مشترک دو سیال با نرخ پایین و عمق نفوذ کم اتفاق می‌افتد. برای غلبه بر این مشکل، روش‌های متنوعی برای افزایش اختلاط در میکرومیکسرها ارائه شده است [۲۵-۲۷]. این روش‌ها را به‌طور کلی می‌توان به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم کرد. در روش غیرفعال، میکروکانال‌ها به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که ساختار هندسی ریزتراشه منجر به ایجاد آشوبناکی و جریان‌های ثانویه شده و در نتیجه اختلاط بهبود می‌یابد [۲۸]. این درحالی است که در روش فعال، از یک نیروی خارجی برای افزایش اختلاط استفاده می‌شود [۲۹]. به‌طور کلی در مقایسه با ماکرومیکسرها، میکرومیکسرها با طراحی و ساختار پیچیده‌تر، نیازمند روش‌های خاص برای افزایش کیفیت و کاهش زمان اختلاط می‌باشند [۳۰].



شکل ۱ میکرومیکسر ساده با دو ورودی و یک کانال اصلی اختلاط. سیال آبی‌رنگ از ورودی (۱) و سیال قرمز از ورودی (۲) وارد و در کانال افقی بواسطه نفوذ مولکولی مخلوط می‌شوند. شیب تند توزیع غلظت در سطح مقطع خروجی نشان‌دهنده کیفیت نامناسب اختلاط است. هرچه مخلوط یکنواخت‌تر باشد، شیب خط ملایم‌تر است [۲۴]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

توسعه فناوری نانو و میکرو با معرفی دستگاه‌های ریزتراشه سیالی تحول بزرگی در عرصه‌های مختلف مهندسی و پزشکی ایجاد کرده است [۱-۲]. میکرومیکسرهای سیالی، دستگاه‌های کوچکی هستند که امکان اختلاط دو یا چند ماده را در ابعاد میکرومتر فراهم می‌کنند [۳]. این ریزتراشه‌ها به دلیل قابلیت آزمایش با نمونه‌های کم حجم، کنترل‌پذیری بیشتر در انجام فرآیند، پاسخ سریع‌تر و هزینه کمتر توجه پژوهشگران زیادی در حوزه‌های مختلف را به خود جلب کرده‌اند. این ریزدستگاه‌ها در تهیه انواع مخلوط‌های همگن، غیرهمگن و کلوییدی [۴] در پزشکی [۵]، زیست‌پزشکی [۶]، بیوشیمی [۷]، پلیمریزاسیون [۸]، آنالیز پروتئین [۹]، سنتز نانو ذرات [۱۰]، آزمایشگاه بر روی تراشه [۱۱] و شناسایی نشانگرهای زیستی [۱۲] نتایج مطلوبی را ارائه داده‌اند.

به علت گستردگی کاربرد و انواع متنوع این ریزتراشه‌ها، مقالات متعددی این دستگاه‌ها را از جنبه‌های مختلف مرور و بررسی کرده‌اند [۱۳]. محققان پیشین کاربرد میکرومیکسرها در زیست‌پزشکی [۱۴]، واکنش‌های بیوشیمیایی [۱۵]، پدیده‌های اختلاط در سنتز نانوذرات [۱۶]، فیزیک جریان و اختلاط [۱۷]، راهبردهای اصلی افزایش اختلاط [۱۸] و تأثیر نیروهای خارجی بر عملکرد میکرومیکسرها بررسی کرده‌اند [۱۹].

با توجه به کاربردهای گسترده‌ای که این ریزتراشه‌های سیالی در زمینه‌های مختلف فناوری‌های نوین دارند و همچنین توجه ویژه محققان داخل کشور در سال‌های اخیر به استفاده از این ریزتراشه‌ها به‌صورت آزمایشگاهی و کاربردی [۲۰-۲۱] در کار حاضر به بررسی مقالات پیشین با تمرکز بر مقالات تجربی چاپ شده از سال ۲۰۲۰ به بعد و طرح‌های قابل ساخت پرداخته شده است. انتخاب و ساخت یک میکرومیکسر مناسب نیازمند داشتن اطلاعات جامعی از چگونگی عملکرد این ریزتراشه‌ها است. به همین دلیل در این مقاله انواع مختلف میکرومیکسرها بر حسب مکانیزم‌هایی که برای افزایش بازده اختلاط به کار برده‌اند به‌همراه چالش‌ها، مزایا و معایب بررسی خواهد شد.

رفتار سیالات و پدیده اختلاط در ابعاد میکرو با ماکرو کاملاً متفاوت است. در ابعاد ماکرو اینرسی و تلاطم جریان باعث اختلاط می‌شود. ماکرومیکسرها معمولاً ساختار ساده‌ای دارند و از پره یا تیغه‌های بزرگ برای ایجاد آشفتگی در جریان و افزایش اختلاط استفاده می‌کنند [۲۲-۲۳]. در مقیاس میکرو به دلیل سرعت بسیار پایین و غالب بودن نیروی لزجت بر رفتار جریان، اختلاط از طریق نفوذ مولکولی صورت می‌پذیرد که به‌طور طبیعی

تولید کپسول‌های لیپوزومی و مزدوج‌های زیستی نانو به عنوان حامل دارو ساخته شد [۳۴]. ایجاد مسیر مارپیچ منجر به افزایش تعامل دو سیال و در نتیجه بهبود اختلاط می‌شود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد بازده کپسوله‌سازی این ریزتراشه با افزایش سرعت جریان به ۸۰ درصد می‌رسد. در شکل (۲-ب) تصاویر آزمایشگاهی و عددی اختلاط در هندسه‌های متفاوت با گوشه‌های تیز و منحنی با یکدیگر مقایسه شده است [۳۱]. طراحی این میکرومیکسر به گونه‌ای است که انحنای میکروکانال منجر به تشکیل گردابه‌های متقاطع با مسیر اصلی جریان و در نتیجه بهبود عملکرد اختلاط می‌شود. آزمایشات با آب مقطر و فلورسئین ایزوتیوسیانات رقیق شده انجام شد. مراحل اختلاط بوسیله دوربین میکروسکوپی تصویربرداری شده است. نتایج آن

تحقیق نشان داد که محل اختلاط کامل به عدد رینولدز و شعاع انحنای بستگی دارد. پژوهش‌های متعددی تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد میکرومیکسر را بررسی و تایید کرده‌اند [۳۵]. شکل (۲-ج) میکرومیکسری با مسیر انقباضی-انبساطی با ساختارهای پله‌ای بر روی دیواره‌ها را نشان می‌دهد [۳۶]. در آن تحقیق طرح‌های مختلف متقارن و غیرمتقارن شبیه‌سازی و اثر پارامترهای هندسی در آنها بررسی شد. در نهایت طرح بهینه‌ای بدست آمد که به صورت تجربی ساخته شد. بازده اختلاط برای میکرومیکسر بهینه در محدود رینولدز ( $0.13 \leq Re \leq 13$ ) مقدار ۸۰ درصد گزارش شد. پیش‌بینی اثر پارامترهای موثر و طراحی بهینه با شبیه‌سازی عددی به میزان قابل توجهی هزینه‌های مالی و زمانی پروژه‌ها را کاهش می‌دهد.

فرآیند ساخت میکرومیکسر با مسیر غیرمستقیم در مقایسه با انواع دیگر ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر است. با این حال بازده اختلاط آنها کمتر و طول اختلاط کامل در آنها بیشتر است. این دسته از میکرومیکسرها عموماً برای اختلاط سیال‌های رقیق مناسب هستند. از انواع مختلف ریزتراشه‌ها با مسیر مارپیچ برای جداسازی ذرات زیستی مانند سلول‌های در گردش در خون استفاده شده و برای این کاربرد عملکرد مناسبی دارند [۳۷]. به‌طور کلی انواع مسیرهای غیرمستقیم بازده اختلاط میکرومیکسر را افزایش می‌دهد. با این حال برای انتخاب هندسه و طراحی مناسب می‌بایست به کارکرد مورد نظر توجه داشت. به عنوان مثال اگرچه گوشه‌های تیز با ایجاد گردایان شدید سرعت منجر به بهبود اختلاط می‌شوند؛ ولی از آنجایی که گوشه‌های تیز موجب افزایش تنش موضعی در جریان می‌شود، این نوع ساختار برای نمونه‌های زیستی زنده مناسب نیست. آزمایشات نشان داده که تنش‌های بزرگ می‌توانند به غشای سلول زنده آسیب زده، باعث از هم گسیختگی و حتی مرگ سلول شود [۳۸].

برای بررسی عملکرد میکرومیکسرها در آزمایشگاه معمولاً از سیال‌هایی با رنگ‌های متفاوت استفاده می‌شود. در مواردی که سیال‌های مخلوط شونده هم‌رنگ باشند، از جوهر یا ذرات فلورسانس برای رنگ‌آمیزی یکی از سیال‌ها استفاده می‌کنند. پس از تصویربرداری، بازده اختلاط با اندازه‌گیری انحراف استاندارد توزیع شدت رنگ در هر تصویر به صورت کمی تعیین می‌شود [۳۱]. در شبیه‌سازی‌های عددی بازده اختلاط به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۲]:

$$M = \left( 1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i - C_m}{C_m} \right)^2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

در اینجا  $M$  بازده اختلاط،  $n$  تعداد نقاط نمونه‌گیری در سطح مقطع خروجی،  $C_i$  غلظت در نقاط نمونه‌گیری و  $C_m$  غلظت متوسط است. شاخص اختلاط عددی بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ است که مقدار ۱۰۰٪ مربوط به اختلاط کامل می‌باشد.

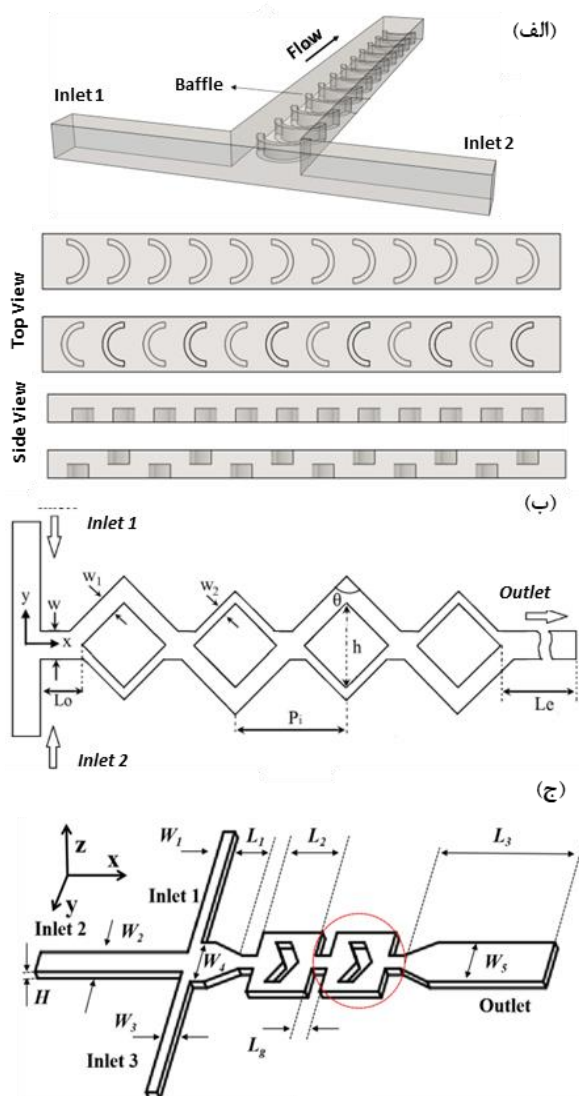
## ۱-۱- میکرومیکسرهای غیرفعال

به طور کلی روش‌های غیرفعال از ساختارهای هندسی مانند مسیرهای منحنی شکل، ایجاد موانع در مسیر اصلی جریان، دیواره‌های غیرمسطح و گوشه‌های تیز برای ایجاد جریان‌های ثانویه، تولید گردابه‌های نامنظم و آشوبناکی جریان استفاده می‌کنند. بدین ترتیب شرایطی برای افزایش اختلاط ایجاد شود. در ادامه میکرومیکسرهای غیرفعال بر اساس مکانیزم هندسی که برای افزایش آشوبناکی جریان در آنها به کار گرفته شده دسته‌بندی و اثربخشی، مزایا و معایب آنها بررسی می‌شود. این دسته‌بندی به صورت میکرومیکسر با مسیر غیرمستقیم، میکرومیکسر با مانع در مسیر جریان و میکرومیکسرهای پیچیده و سه‌بعدی ارائه می‌شود.

### ۱-۱-۱- میکرومیکسر با مسیر غیرمستقیم

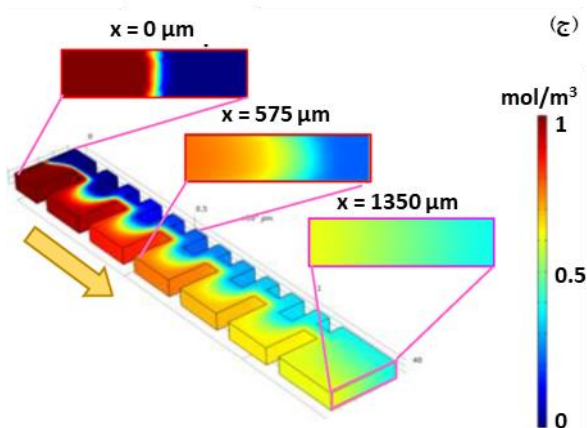
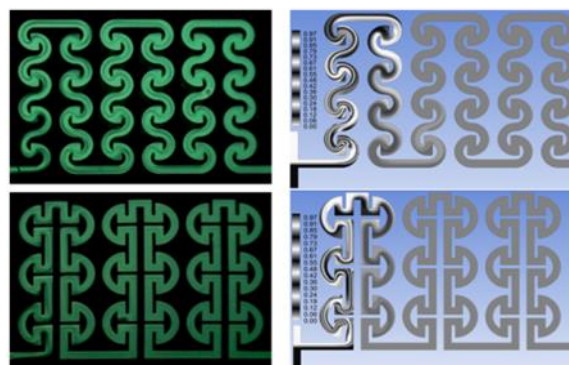
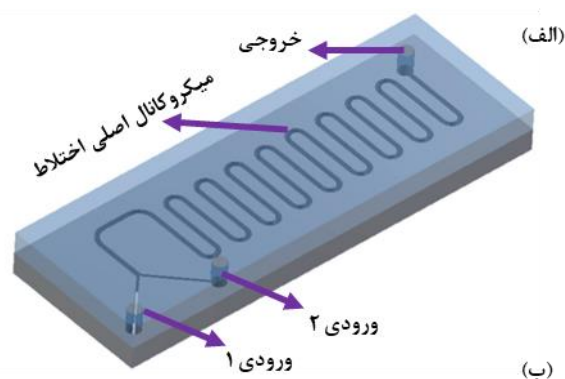
ایجاد انحنای در مسیر جریان با استفاده از هندسه‌های مارپیچ، منحنی و یا پله‌ای باعث چرخش جریان و تولید جریان‌های متقاطع با جهت جریان اصلی می‌شود. این پدیده سبب افزایش اختلاط دو سیال می‌شود. از این خاصیت در طراحی تعداد زیادی از میکرومیکسرها استفاده شده است [۳۳]. شکل (۲) نمونه‌ای از هندسه‌های مختلفی که در آنها برای افزایش بازده از مسیرهای مارپیچ، منحنی و یا پله‌ای در مسیر اصلی اختلاط استفاده شده را نشان می‌دهد. شکل (۲-الف) میکرومیکسری است که برای

به‌طور کلی وجود انواع موانع در مسیر مستقیم منجر به افزایش شاخص اختلاط نسبت به حالت بدون مانع می‌شود و البته کیفیت اختلاط به شکل هندسی موانع بستگی دارد [۴۱].



شکل ۳ مانع در مسیر اصلی جریان؛ الف- میکرومیکسری با مسیر مستقیم و موانع مقعر و محدب در کف و سقف میکروکانال [۴۰]، ب- میکروکانال و موانع لوزی شکلی که در فاصله‌های متفاوت از دیواره قرار دارند [۴۲]، ج- میکسری با سه ورودی که واحد اختلاط آن مستطیل‌هایی با موانع V شکل هستند [۴۳]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

اکثر مقالات از موانع در میکروکانال‌های غیرساده مانند آنچه که شکل (۳-ب) و (۳-ج) نشان داده شده، استفاده کرده‌اند. شکل (۳-ب) میکرومیکسری با مسیر و موانع لوزی شکل را نشان می‌دهد [۴۲]. در آن تحقیق اختلاط آب و اتانول با حل معادلات سه‌بعدی ناویر استوکس و جابجایی- نفوذ مطالعه شد. نتایج بدست آمده نشان می‌داد که این طرح برای اعداد رینولدز ۳۰ تا

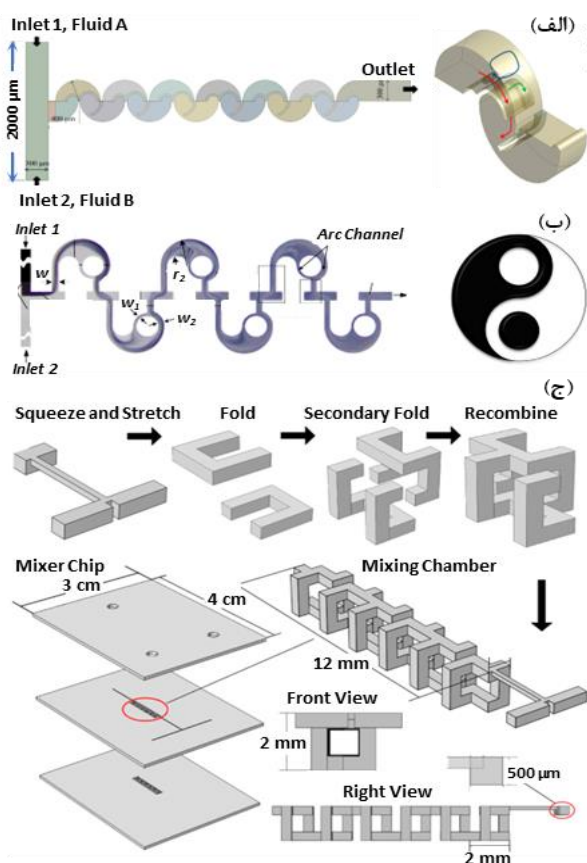


شکل ۲ مسیره‌های منحنی برای افزایش اختلاط؛ الف- تصویر اصلاح شده از منبع [۳۴] شامل ورودی‌ها، خروجی و میکروکانال اختلاط، ب- تصاویر آزمایشگاهی و عددی در مسیره‌های پیچیده [۳۱]، ج- کانتور غلظت میکرومیکسری با موانع نامتقارن عمود بر مسیر جریان [۳۵]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

### ۱-۲- میکرومیکسری با مانع در مسیر جریان

قراردادن موانع گوناگون در مسیر اصلی میکروکانال روش دیگری است که پژوهشگران برای افزایش آشوبناکی جریان و بهبود عملکرد ارائه کردند [۳۹]. در نمونه‌ی شکل (۳-الف) مسیر کانال اصلی مستقیم است و موانع با هندسه‌های مختلف شامل منحنی‌های محدب، مقعر و صفحه تخت در مسیر جریان با چیدمان متنوع در کف و سقف کانال طراحی شده‌اند [۴۰].

گردابه شود و حفره دایره‌ای و کانال قوسی می‌توانند جریان ثانویه ایجاد کنند. برخورد نامتعادل سیال‌ها در خروجی کانال قوسی نیز باعث افزایش اغتشاش بین لایه‌های جریان و در نتیجه افزایش بازده اختلاط می‌شود. در آن پژوهش پس از بررسی عددی اثر پارامترهای مختلف طرحی بهینه با بازده بالا و افت فشار کم بدست آمد که به صورت آزمایشگاهی ساخته و ارزیابی شد. گروه دیگر میکرومیکسرهای پیچیده، ساختارهای سه‌بعدی هستند که در آنها نسبت ابعاد در سه جهت مختصات تقریباً هم مرتبه هستند [۴۹-۵۰]. در شکل (۴-ج) یک میکرومیکسر نعل‌اسبی سه‌بعدی نشان داده شده‌است که در آزمایشات در رینولدز ۱۰، شاخص اختلاط  $91/75\%$  را دارد [۵۱].



شکل ۴ الف- میکرومیکسری با شش واحد اختلاط نیم‌دایره [۴۷]، ب- طرح تای-چی با میکروکانال‌های گوشه‌دار و حفره دایره‌ای [۴۸] و ج- میکرومیکسر سه‌بعدی نعل‌اسبی [۵۱]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر

در مقایسه با دو گروه قبلی، میکرومیکسرهای پیچیده و سه‌بعدی بازده اختلاط بیشتری را در مسافت کوتاه‌تری ایجاد می‌کنند. با این حال بازده اختلاط، طول اختلاط کامل و افت فشار در این نوع میکسرهای تابعی از پارامترهای هندسی و عدد رینولدز است. در بسیاری از این نمونه‌ها با تنظیم پارامترهای

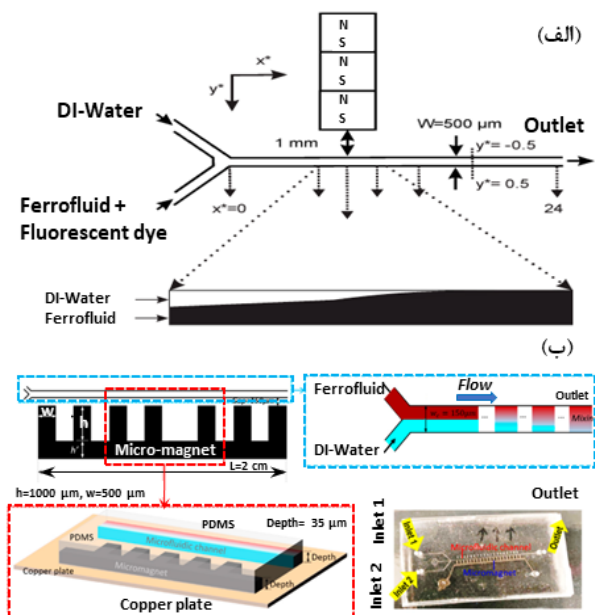
۸۰ کارآمد است. شاخص اختلاط و افت فشار درون میکروکانال متناسب با طول بافل و نسبت طول به عرض موانع هستند. بافل‌های بلندتر، نسبت طول به عرض مانع بزرگتر، عرض شکاف باریکتر و ساختار متقارن‌تر شاخص اختلاط و افت فشار را افزایش می‌دهند. شکل (۳-ج) میکرومیکسری با موانع ۷ شکل را نشان می‌دهد که باعث ایجاد گردابه می‌شود [۴۳]. در آن پژوهش اثر ابعاد و پارامترهای هندسی و همچنین تعداد واحدهای اختلاط بررسی شد. نمونه آزمایشگاهی بر اساس ابعاد بهینه ساخته شد. برای این نمونه در رینولدز  $0/5$  اختلاطی با بازده ۸۰ درصد و طول اختلاط ۲۸۰۰ میکرومتر گزارش شد.

وجود موانع در مسیر اصلی جریان از یک طرف با کاهش سطح مقطع عرضی باعث بهبود عملکرد اختلاط می‌شود و از طرف دیگر باعث افزایش افت فشار می‌شود. این نکته در طراحی میکرومیکسرهایی که قرار است قسمتی از یک ساختار آزمایشگاه بر روی تراشه باشند حائز اهمیت است؛ زیرا افت فشار بیش از حد در یک قسمت از یک مجموعه بهم پیوسته چند قسمتی مطلوب نیست و برای برقراری جریان پیوسته و آنالیز برخط داده‌ها اختلال ایجاد می‌کند. فرآیند ساخت این نوع میکسرها به دلیل اتصالات متعدد با ابعاد کوچک که بواسطه وجود موانع در طراحی ایجاد می‌شود، پیچیده می‌شود [۴۴]. این پیچیدگی با کوچک شدن فواصل بین موانع و دیواره‌ها و همچنین افزایش نسبت ابعاد افزایش می‌یابد [۴۵]. تولید نسبت ابعاد بالا در دستگاه‌های میکرونی مسئله‌ای چالشی است که نیازمند روش‌های خاص، دستگاه‌های گران، فرآیند پیچیده و زمان‌بر مانند اچینگ و لیتوگرافی است [۴۶].

### ۳-۱-۱- میکرومیکسرهای پیچیده

تعداد زیادی از محققان میکرومیکسرهایی با هندسه‌های پیچیده ارائه کرده‌اند که برخی از آنها در شکل (۴) نشان داده شده‌است. در ساختار میکرومیکسر شکل (۴-الف) شش واحد اختلاط نیم‌دایره‌ای با موانع قوسی شکل طراحی شده است [۴۷]. ارتفاع موانع از کانال اصلی کوتاه‌تر است و بنابراین جریان می‌تواند به‌طور همزمان از کناره و بالای موانع عبور کند. بدین ترتیب جریانی عمود بر مسیر حرکت اصلی سیال‌ها ایجاد می‌شود که سبب آشوبناکی و اختلاط بیشتر می‌شود. نمونه نشان داده شده در شکل (۴-ب) طراحی برگرفته شده از نماد تای-چی است که از چندین واحد اختلاط شامل یک کانال گوشه‌دار بلند، یک حفره دایره‌ای، یک کانال قوسی و یک کانال گوشه‌دار کوتاه تشکیل شده است [۴۸]. وجود کانال گوشه‌دار می‌تواند منجر به تولید

چرخشی پیوسته و غیرپیوسته، در عدد رینولدز ۵ اختلاط ۹۰ درصدی را ایجاد کرده است [۵۹]. شکل (۶-ب) میکرومیکسری با میکروآهنربای ساخته شده از پودر نئودیمیم و پی دی ام اس را نشان می‌دهد [۶۰]. در آن کار اثر سرعت جریان، غلظت فروسیال و نسبت جرم بر عملکرد اختلاط به صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان می‌داد که در دبی‌های کمتر و غلظت فروسیال بیشتر، بازده اختلاط بیشتر است.



شکل ۶ القای میدان مغناطیسی؛ الف- آهن‌ربا برای القای میدان مغناطیسی و حرکت عرضی فروسیال به سمت آهنربا [۵۸]، ب- کانال میکروسیال و آهنربای میکرونی [۶۰]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

میکرومیکسرها مغناطیسی باعث افزایش سرعت و کاهش چشم‌گیر زمان اختلاط می‌شوند [۶۱]. از دیدگاه تولید و ساخت، تعبیه آهنربا و ادوات ایجاد میدان مغناطیسی منجر به پیچیدگی این نوع دستگاه‌ها می‌شود. همچنین القای میدان مغناطیسی موجب افزایش دمای سیستم و سیال‌های مخلوط شونده می‌شود که ممکن است فرآیند اختلاط را تسریع یا مختل کند. علاوه بر این نوع سیستم‌ها فقط در مواردی که حداقل یکی از سیال‌ها خاصیت مغناطیسی داشته باشند کاربرد دارند. هرچه خاصیت مغناطیسی سیال بیشتر باشد، بازده اختلاط نیز بیشتر است.

## ۲-۱-۲ میکرومیکسر با میدان الکتریکی

بر خلاف مقیاس‌های ماکرو در مقیاس میکرو، اثر اینرسی سیال ناچیز است. القای جریان الکتریکی می‌تواند منجر به ایجاد

هندسی در جهت افزایش بازده اختلاط یا کاهش طول اختلاط، متعاقباً افت فشار نیز افزایش می‌یابد که باید به آن توجه شود. علاوه بر چالش‌ها و محدودیت‌های ساخت برای این نوع میکرومیکسرها نسبت به دو گروه قبلی بیشتر است. تعداد زیادی از مقالاتی که برای میکرومیکسرها پیچیده و سه‌بعدی ارائه شده‌اند تنها شامل شبیه‌سازی عددی هستند. اگرچه نتایج عددی عملکرد خوبی را برای این نوع میکسرها گزارش می‌کند با این حال بدون اعتبارسنجی آزمایشگاهی نمی‌توان به کاربردی بودن این هندسه‌ها اطمینان کرد. علاوه بر این ساخت هندسه‌های پیشنهادی و عملیاتی کردن طرح‌های ارائه شده با محدودیت‌های موجود در فناوری ساخت میکرونی بررسی شود. روش چاپ سه‌بعدی می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای تولید میکرومیکسرها پیچیده باشد [۵۲-۵۴].

در کنار مدل‌های متنوعی که برای میکرومیکسرها غیرفعال ارائه شده‌است، میکرومیکسرها فعالی ساخته شده‌اند که با صرف انرژی بازده اختلاط را افزایش می‌دهند. در ادامه به معرفی و بررسی این دسته از میکرومیکسرها پرداخته می‌شود.

## ۱-۲-۱ میکرومیکسرها فعال

در میکرومیکسرها فعال از محرک‌های خارجی مانند میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی و آکوستیک برای ایجاد جریان ثانویه، آشوبناکی، گردابه و در نتیجه افزایش اختلاط استفاده می‌شود.

### ۱-۱-۲ میکرومیکسر با میدان مغناطیسی

تحقیقات نشان می‌دهد که نیروی مغناطیسی در فضاهای کوچک می‌تواند جریان‌های متقاطع با جهت اصلی جریان سیال ایجاد کند [۵۵-۵۷]. شکل (۶-الف) نمونه‌ای از یک میکرومیکسر مغناطیسی را نشان می‌دهد [۵۸]. فروسیال رقیق شده و آب دیونیزه (به عنوان سیال غیرمغناطیسی) از طریق ورودی‌های مجزا به میکروکانالی مستقیم وارد می‌شوند. یک آهنربای دائمی که در کنار میکروکانال (در سمت جریان آب) قرار دارد، میدان مغناطیسی غیریکنواختی را ایجاد می‌کند. گرادیان مغناطیسی تولید شده، فروسیال را به سمت آهنربا می‌کشاند و بدین ترتیب جریان عرضی فروسیال منجر به اختلاط سریع دو سیال می‌شود. بازده اختلاط در این نمونه بیشتر از ۸۸ درصد گزارش شده است. در پژوهشی دیگر میکرومیکسر مغناطیسی قابل برنامه‌ریزی که محرک آن یک میکروتوپ فولادی ضدزنگ است با حرکت

در این پژوهش اثر عدد رینولدز، ولتاژ و فرکانس متناوب اعمال شده و نسبت رسانایی دو سیال بر بازده اختلاط بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که طول اختلاط با کاهش عدد رینولدز، افزایش ولتاژ و یا کاهش فرکانس کوتاه‌تر می‌شود. همچنین هرچه نسبت رسانایی بیشتر باشد، اختلاط بهتر می‌شود. میکرومیکسر شکل (۷-ب) بر اساس گردابه‌های تولید شده با پتانسیل زتای غیریکنواخت است که با قطبیت یکسان تحت میدان الکتریکی جریان مستقیم کار می‌کند. در قسمت انتهایی کانال خروجی، پتانسیل زتای کمتری نسبت به سایر قسمت‌ها طراحی شده است [۶۳]. القای میدان الکتریکی در سیال گردابه‌های الکتروکینتیک را بوجود می‌آورد که منجر به بهبود عملکرد اختلاط می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که برای آنها حتی پتانسیل کمی اعمال شده است نیز در مقایسه با حالت بدون جریان الکتریکی، اختلاط بهبود یافته است.

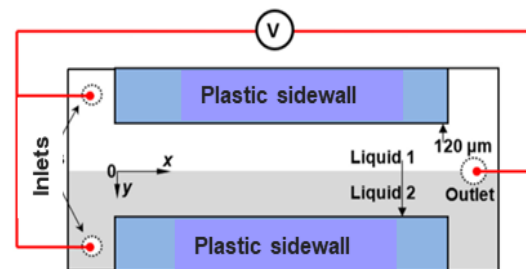
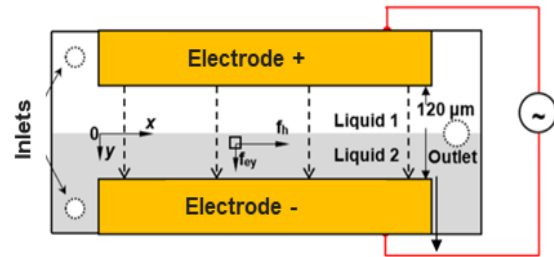
ریزتراشه‌های مبتنی بر میدان الکتریکی نسبت به نمونه‌های میدان مغناطیسی، دارای ساختار ساده‌تر و فرآیند ساخت آسان‌تر می‌باشند. الکترودها در این نوع سیستم‌ها بر خلاف آهنرباها در سیستم‌های مغناطیسی متحرک نیستند و نصب آنها راحت‌تر است.

### ۲-۱-۳- میکرومیکسر آکوستیک

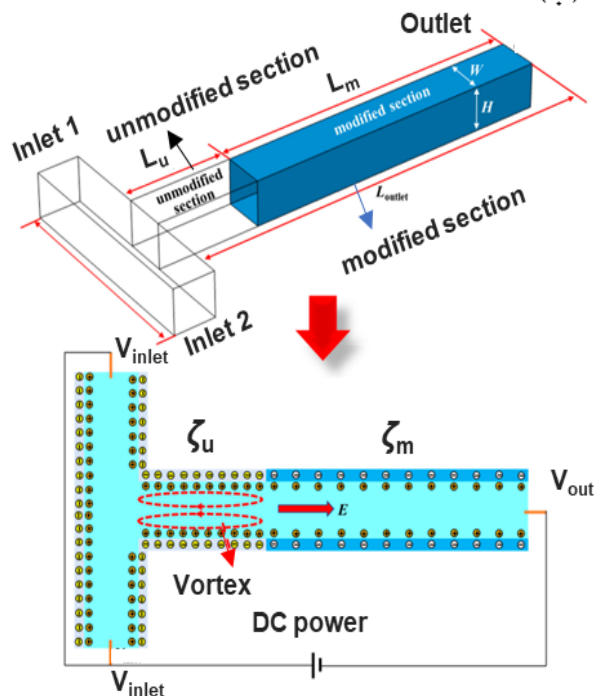
تحقیقات نشان می‌دهد که امواج صوتی قابلیت ایجاد تغییرات در جریان سیال‌های مختلف را دارند و از این خاصیت برای کاربردهای متعددی در دستگاه‌های میکروسایالی استفاده شده است [۶۴-۶۵]. موج الاستیک اولتراسونیک تحریک‌شده الکتریکی که به درون میکروکانال منتقل می‌شود منجر به ایجاد نوسان در فشار سیال می‌شود. نوسانات فشاری در سیال باعث تولید حفره‌های توخالی در سیال می‌شود. برهم‌کنش حفره‌های توخالی با نوسان فشار صوتی منجر به ایجاد اختلال و آشوبناکی در جریان می‌شود. میکرومیکسر مبتنی بر موج صوتی توده‌ای با مبدل بین دیجیتالی در دو طرف کانال به همراه تصاویر آزمایشگاهی توالی زمانی اختلاط در شکل (۸-الف) نشان داده شده است [۶۶]. شکل (۸-ب) نیز تصاویر میکروسکوپی یک ریزتراشه سیالی که در آن از امواج صوتی سطحی استفاده شده است را نشان می‌دهد [۶۷]. در این کار از مبدل‌های بین دیجیتالی مخروطی برای تولید امواج صوتی سطحی تحریک‌پذیر با فرکانس‌های مختلف استفاده شد. این نوع مبدل می‌تواند با تغییر مسیر صوت، موقعیت جت سیال القا شده را تغییر دهد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که اختلاط در این ریزتراشه به‌طور

آشفتنگی و گردابه درون جریان سیال شود. شکل (۷-الف) میکرومیکسر مبتنی بر الکتروکینتیک را نشان می‌دهد که الکترودها در دیواره‌های جانبی آن تعبیه شده‌اند [۶۲]. رسانایی الکتریکی متفاوت دو سیال باعث می‌شود که به محض تماس دو سیال، جهشی در هدایت الکتریکی در سطح مشترک آنها ایجاد شود که منجر به حرکت عرضی سیال‌ها می‌شود.

(الف)



(ب)



شکل ۷ میدان الکتریکی؛ الف- الکترودها در دیواره‌های جانبی، دو سیال در کانال اصلی تحت تاثیر میدان قرار می‌گیرند [۶۲]، ب- پتانسیل زتای غیریکنواخت با قطبیت یکسان تحت میدان الکتریکی جریان مستقیم [۶۳]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

جدول ۱ دسته‌بندی، مزایا و معایب انواع میکرومیکسرها

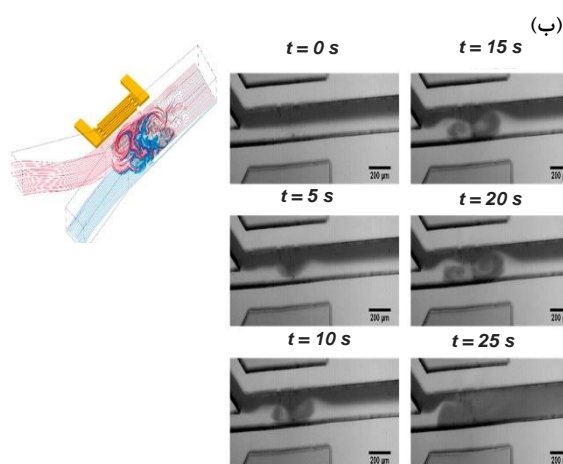
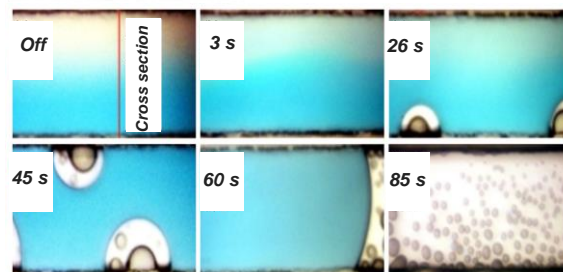
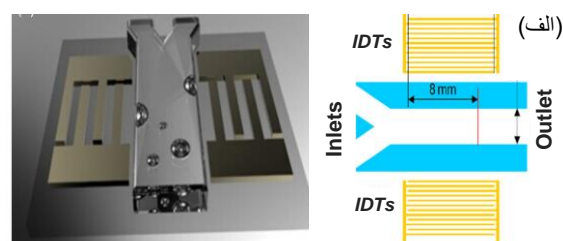
معایب	مزایا	راهکار افزایش اختلاط
<b>میکرومیکسر غیرفعال</b>		
- بازده اختلاط کم - طول اختلاط بیشتر	ساخت ساده، سریع و ارزان	انحنای مسیر
- افزایش افت فشار - ساخت پیچیده، زمان‌بر و گران	بهبود اختلاط	مانع در مسیر جریان
- حساسیت بیشتر به هندسه - ساخت پیچیده و گران‌تر	- افزایش بازده - کاهش طول اختلاط	هندسه پیچیده
<b>میکرومیکسر فعال</b>		
- پیچیدگی ساختار دستگاه - افزایش دمای سیستم و سیال - نیاز به خاصیت مغناطیسی سیال	- کاهش زمان اختلاط - قابلیت کنترل فرآیند	میدان مغناطیسی
- پیچیدگی ساخت - نیاز به رسانایی الکتریکی سیال	- ساختار ساده‌تر - تعبیه آسان‌تر الکتروود - عدم قطعات متحرک	میدان الکتریکی
- پیچیدگی ساختار دستگاه - هزینه ساخت بالا	- اختلاط سریع - قابلیت کنترل فرآیند	آکوستیک

## ۲- نتیجه‌گیری

این مقاله به معرفی انواع مختلف میکرومیکسرها پرداخته است. اختلاط در ابعاد میکرو با ابعاد ماکرو کاملاً متفاوت است. در حالت کلی می‌توان میکرومیکسرها را برحسب مکانیزم اختلاط به دو دسته غیرفعال و فعال تقسیم‌بندی کرد. دسته غیرفعال با به‌کارگیری اصول دینامیک سیالات بر اساس هندسه میکروکانال، ایجاد انحنا و تعبیه موانع در محفظه اختلاط، آشوبناکی جریان را با ایجاد جریان متقاطع و گردابه‌ها افزایش می‌دهند. میکرومیکسرهای فعال از میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی و آکوستیک برای ایجاد جریان متقاطع با جریان اصلی استفاده کرده و از این طریق فرآیند اختلاط را بهبود می‌بخشند. میکرومیکسرهای مبتنی بر اختلاط غیرفعال دارای بازده اختلاط و حداکثری در حدود ۹۰ درصد هستند. مدت زمان اختلاط و همچنین مسیر اختلاط مورد نیاز برای دستیابی به اختلاط کامل در آنها طولانی است. از طرفی فرآیند ساخت آنها ساده‌تر و ارزان‌تر بوده و به راحتی در میکروسیستم‌های یکپارچه قابل استفاده هستند. برای میکرومیکسرهای مبتنی بر اختلاط فعال بازده اختلاط تا ۹۸ درصد نیز گزارش شده است. زمان و طول اختلاط در آنها به‌طور چشمگیری کوتاه‌تر از دسته اول است. در عین حال فرآیند ساخت آنها پیچیده‌تر و گران‌تر است. بعلاوه

سریع و قابل‌کنترلی انجام می‌شود. کیفیت اختلاط به توان امواج صوتی، شار حجمی و ویسکوزیته سیال بستگی دارد. انرژی مصرفی مخلوط شدن فعال به نوع میکرومیکسر، دبی جریان و پارامترهای مختلف دیگر بستگی دارد. به عنوان مثال در میکرومیکسری که زنگ و همکاران با لبه‌های تیز ساخته بودند ولتاژ مصرفی برای مبدل‌های پیزوالکتریک تولید کننده امواج صوتی در محدود ۱۰ تا ۵۵ ولت گزارش شده است [۶۸]. شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که طراحی گوشه‌های تیز در میکرومیکسرهای مبتنی بر آکوستیک منجر به افزایش قابل توجه کیفیت و کاهش طول اختلاط می‌شود [۶۹]. این درحالی است که فرآیند ساخت گوشه‌های تیز با دقت مطلوب در ابعاد میکرومتر مسأله‌ای چالشی است.

دسته‌بندی، مزایا و معایب انواع میکرومیکسرها در جدول (۱) خلاصه شده است.



شکل ۸ آکوستیک؛ الف- مبدل‌های بین دیجیتال در دو طرف کانال و اختلاط در زمان‌های مختلف [۶۶]. ب- اختلاط دو سیال با اعمال جریان صوت سطحی و توالی زمانی فرآیند اختلاط [۶۷]؛ تصاویر با مجوز باز نشر با اندکی تغییر.

- [6] P. Gopinathan et al., "Exploring circulating tumor cells in cholangiocarcinoma using a novel glycosaminoglycan probe on a microfluidic platform," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 9, no. 10, p. 1901875, 2020. <https://doi.org/10.1002/adhm.201901875>.
- [7] H. S. Santana et al., "Design, optimization and scale-up of a new micromixer design based on plate column for organic synthesis," *Chemical Engineering Journal*, vol. 446, p. 137159, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137159>.
- [8] L. Xiang, M. Qiu, M. Shang, and Y. Su, "Continuous synthesis of star polymers with RAFT polymerization in cascade microreactor systems," *Polymer*, vol. 222, p. 123669, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123669>.
- [9] Z. Li, R. Hu, T. Li, J. Zhu, H. You, Y. Li, B. F. Liu, C. Li, Y. Li, and Y. Yang, "A TeZla micromixer for interrogating the early and broad folding landscape of G-quadruplex via multistage velocity descending," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 121, no. 4, p. e2315401121, 2024. <https://doi.org/10.1073/pnas.23154011>.
- [10] M. Sarsfield, A. Roberts, K. A. Streletzky, P. S. Fodor, and C. R. Kothapalli, "Optimization of gold nanoparticle synthesis in continuous-flow micromixers using response surface methodology," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 44, no. 4, pp. 622-630, 2021. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000314>.
- [11] Z. Chen, L. Shen, X. Zhao, H. Chen, Y. Xiao, Y. Zhang, X. Yang, J. Zhang, J. Wei, and N. Hao, "Acoustofluidic micromixers: From rational design to lab-on-a-chip applications," *Applied Materials Today*, vol. 26, p. 101356, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101356>.
- [12] B. Liu, B. Ran, C. Chen, L. Shi, Y. Liu, H. Chen, and Y. Zhu, "A low-cost and high-performance 3D micromixer over a wide working range and its application for high-sensitivity biomarker detection," *Reaction Chemistry & Engineering*, vol. 7, no. 11, pp. 2334-2347, 2022. <https://doi.org/10.1039/d2re00103a>.
- [13] S. R. Bazaz, A. Sayyah, A. H. Hazeri, R. Salomon, A. A. Mehrizi, and M. E. Warkiani, "Micromixer research trend of active and passive designs," *Chemical Engineering Science*, p. 120028, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120028>.
- [14] C.-Y. Lee and L.-M. Fu, "Recent advances and applications of micromixers," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 259, pp. 677-702, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.12.034>.

برای ایجاد میدان محرک خارجی نیازمند هزینه اضافی بوده و همچنین در حین کار گرمایش حاصل از میدان خارجی بر عملکرد آن اثرگذار است. با این حال تفاوت قابل توجه میکرومیکسرهای فعال و غیرفعال در این است که به دلیل ایجاد فرآیند اختلاط با استفاده از محرک خارجی، قابلیت کنترل بالایی در میکرومیکسرهای فعال وجود دارد. برای انتخاب میکرومیکسر مناسب لازم است به امکانات و محدودیت‌های ساختی، نوع مواد مورد نظر برای مخلوط شدن، زمان و بازده اختلاط توجه شود. در این مقاله بیشتر به بررسی مطالعات آزمایشگاهی جدید ارجاع شده است بدین جهت که دیده جامعی از طراحی و ساختار میکرومیکسرهای ساخته شده و با خروجی قابل اعتماد برای خواننده فراهم شود. تعداد زیادی مقالات عددی در این زمینه وجود دارند که نشان می‌دهد طرح‌های ارائه شده عملکرد میکرومیکسر را افزایش می‌دهند. این درحالی است که عملیاتی کردن این ایده‌ها چالشی است که لازم است به صورت آزمایشگاهی اعتبارسنجی شود.

### ۳- مراجع

- [1] M. Fani, P. Pourafshary, P. Mostaghimi, and N. Mosavat, "Application of microfluidics in chemical enhanced oil recovery: A review," *Fuel*, vol. 315, p. 123225, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123225>.
- [2] M. B. Kulkarni, N. H. Ayachit, and T. M. Aminabhavi, "Biosensors and microfluidic biosensors: from fabrication to application," *Biosensors*, vol. 12, no. 7, p. 543, 2022. <https://doi.org/10.3390/bios12070543>.
- [3] X. Wang, Z. Liu, B. Wang, Y. Cai, and Q. Song, "An overview on state-of-art of micromixer designs, characteristics and applications," *Analytica Chimica Acta*, p. 341685, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2023.341685>.
- [4] Z. Zhu, K. Yao, J. Gao, Q. Liu, J. Feng, C. Chen, and L. Ye., "Continuous preparation of hydro-alcoholic gel with antimicrobial complex nanoparticles via cascaded reactive confined impinging jets micromixing," *Chemical Engineering Science*, p. 120972, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120972>.
- [5] Z. M. Aqsha, B. Basari, M. A. Indianto, R. Irwansyah, M. S. Utomo, and S. F. Rahman, "Simulation of arrow-shaped micromixer with obstacles in blood plasma mixing," in *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 3080, no. 1: AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.0198672>.

- [25] H. Lv and X. Chen, "New insights into the mechanism of fluid mixing in the micromixer based on alternating current electric heating with film heaters," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 181, p. 121902, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121902>.
- [26] Z. Ghorbani Kharaji, M. Bayareh, and V. Kalantar, "A review on acoustic field-driven micromixers," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 19, no. 6, pp. 553-569, 2021. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0188>.
- [27] A. Ganguli, V. Bhatt, A. Yagodnitsyna, D. Pinjari, and A. Pandit, "A Review of Pressure Drop and Mixing Characteristics in Passive Mixers Involving Miscible Liquids," *Micromachines*, vol. 15, no. 6, p. 691, 2024. <https://doi.org/10.3390/mi15060691>.
- [28] S. Mirkarimi, M. Hosseini, and Y. Pahamli, "Numerical investigation of a curved micromixer using different arrangements of cylindrical obstacles," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 79, pp. 135-154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.002>.
- [29] A. Mohammad Jafarpour, A. Rostamzadeh Khosroshahi, M. Hanifi, and F. Sadegh Moghanlou, "A comprehensive study on active mixer performance using liquid metal droplets: an experimental approach," *Chemical Engineering Communications*, vol. 212, no. 2, pp. 184-199, 2025. <https://doi.org/10.1080/00986445.2024.2400985>.
- [30] R. S. Abiev and I. Makusheva, "Effect of macro- and micromixing on processes involved in solution synthesis of oxide particles in microreactors with intensively swirling flows," *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 56, no. 2, pp. 141-151, 2022. <https://doi.org/10.1134/S0040579522020014>.
- [31] G. R. Aguirre, V. Efremov, M. Kitsara, and J. Ducreé, "Integrated micromixer for incubation and separation of cancer cells on a centrifugal platform using inertial and dean forces," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 18, pp. 513-526, 2015. [10.22092/ari.2022.357477.2046](https://doi.org/10.22092/ari.2022.357477.2046).
- [32] Y. Zheng, Y. Liu, C. Tang, B. Liu, H. Zou, W. Li, and H. Zhang, "Mixing Performance Analysis and Optimal Design of a Novel Passive Baffle Micromixer," *Micromachines*, vol. 15, no. 2, p. 182, 2024. <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/2/182>.
- [33] W. Raza, N. Islam, and A. Samad, "Design and analysis of a novel Bi-layer curved serpentine chaotic micromixer for efficient mixing," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 183, p. 109246, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109246>.
- [15] C. Liu, Y. Li, and B.-F. Liu, "Micromixers and their applications in kinetic analysis of biochemical reactions," *Talanta*, vol. 205, p. 120136, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120136>.
- [16] Z. Li, B. Zhang, D. Dang, X. Yang, W. Yang, and W. Liang, "A review of microfluidic-based mixing methods," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 344, p. 113757, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113757>.
- [17] S. M. Saravanakumar and P.-V. Cicek, "Microfluidic mixing: A physics-oriented review," *Micromachines*, vol. 14, no. 10, p. 1827, 2023. <https://doi.org/10.3390/mi14101827>.
- [18] D. Soltani, T. Persoons, and S. Alimohammadi, "Micromixing Strategies for Efficient Mixing Processes: A Comprehensive Review," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ad809a>.
- [19] S. Cai, Y. Jin, Y. Lin, Y. He, P. Zhang, Z. Ge, and W. Yang, "Micromixing within microfluidic devices: Fundamentals, design, and fabrication," *Biomicrofluidics*, vol. 17, no. 6, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0178396>.
- [20] D. Bahrami and M. Bayareh, "Experimental and numerical investigation of a novel spiral micromixer with sinusoidal channel walls," *Chemical Engineering & Technology*, vol. 45, no. 1, pp. 100-109, 2022. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100368>.
- [21] F. Hassani, F. Sadegh Moghanlou, A. Minaei, M. Vajdi, A. Golshani, A. Kouhord, and T. Dehghani, "An efficient framework for controllable micromixer design through the fusion of data-driven modeling and machine learning insights: Numerical and experimental analysis," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 3, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0190888>.
- [22] M. Zheng, W. Yao, L. Tian, S. Zhao, C. Zhou, H. Zheng, and Z. Yan, "Characterization of macromixing and micromixing performance of unbaffled U-shaped mesoscale oscillatory flow reactor," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 145, p. 104852, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104852>.
- [23] L. Xu, Z. Jia, M. Guo, Z. S. Mao, Y. Fan, Q. Zhang, and C. Yang, "Enhancement of macromixing performance of a stirred tank with a novel V-shaped punched baffle," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 62, no. 8, pp. 3733-3746, 2023. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03936>.
- [24] H. Moghadas and A. H. Zanganeh, "Effect of obstacle angle in the flow path on micromixer performance," *fdc2025.pgu.ac.ir*, In Persian, In Press. 2025. <https://fdc2025.pgu.ac.ir/fa/>.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122815>.
- [44] N. Kashaninejad, E. Moradi, and H. Moghadas, "Micro/nanofluidic devices for drug delivery," *Progress in Molecular Biology and Translational Science*, vol. 187, no. 1, pp. 9-39, 2022. <https://doi.org/10.1016/bs.pmbts.2021.07.018>.
- [45] H. Moghadas and S. Seyedjalali, "Fabrication of conical microneedles array using photolithography," 2021. <https://jdc.tums.ac.ir/article-1-5547-en.pdf>.
- [46] H. Moghadas, "Comparison of different methods of fabrication of microneedle arrays," 2023. <http://jdc.tums.ac.ir/article-1-5667-en.html>.
- [47] M. Juraeva and D.-J. Kang, "Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer Based on Curly Baffles," *Micromachines*, vol. 14, no. 9, p. 1795, 2023. <https://doi.org/10.3390/mi14091795>.
- [48] A. Xia et al., "Numerical and Experimental Investigation on a "Tai Chi"-Shaped Planar Passive Micromixer," *Micromachines*, vol. 14, no. 7, p. 1414, 2023. <https://doi.org/10.3390/mi14071414>.
- [49] M. B. Okuducu and M. M. Aral, "Toward the Next Generation of Passive Micromixers: A Novel 3-D Design Approach," *Micromachines*, vol. 12, no. 4, p. 372, 2021. <https://doi.org/10.3390/mi12040372>.
- [50] H. Yang et al., "A three-dimensional double-helical structure microfluidic chip with efficient mixing," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 27, no. 7, p. 48, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10404-023-02658-z>.
- [51] H. Zhang, X. Li, R. Chuai, and Y. Zhang, "Chaotic Micromixer Based on 3D Horseshoe Transformation," *Micromachines*, vol. 10, no. 6, p. 398, 2019. <https://doi.org/10.3390/mi10060398>.
- [52] B. Ongoren, A. Kara, L. Casettari, M. Tiboni, A. Lalatsa, A. Sanz-Perez, E. G. Burgos, A. Romero, A. Juberías, J. Torrado, and D. R. Serrano., "Leveraging 3D-printed microfluidic micromixers for the continuous manufacture of melatonin loaded SNEDDS with enhanced antioxidant activity and skin permeability," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 663, p. 124536, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124536>.
- [53] K. Li, Y. Wang, M. Li, F. Du, C. Wang, J. Fang, L. Sun, X. Wang, D. Ruan, J. Shi, and J. Li, "3D printing cross-scale mold for manufacturing micromixers," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 141, no. 42, p. e56107, 2024. <https://doi.org/10.1002/app.56107>.
- [34] K K. A. Giraldo, J. S. Bermudez, C. E. Torres, L. H. Reyes, J. F. Osmá, and J. C. Cruz, "Microfluidics for multiphase mixing and liposomal encapsulation of nanobioconjugates: passive vs. acoustic systems," *Fluids*, vol. 6, no. 9, p. 309, 2021. <https://doi.org/10.3390/fluids6090309>.
- [35] R. Karimi, S. Rezazadeh, and M. Raad, "Investigation of different geometrical configurations effect on mixing performance of passive split-and-recombine micromixer," *Microfluidics and Nanofluidics*, vol. 25, pp. 1-22, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10404-021-02491-2>.
- [36] D. Natsuhara, R. Saito, S. Okamoto, M. Nagai, and T. Shibata, "Mixing Performance of a Planar Asymmetric Contraction-and-Expansion Micromixer," *Micromachines*, vol. 13, no. 9, p. 1386, 2022. <https://doi.org/10.3390/mi13091386>.
- [37] R. Nasiri, A. Shamloo, J. Akbari, P. Tebon, M. R. Dokmeci, and S. Ahadian, "Design and simulation of an integrated centrifugal microfluidic device for CTCs separation and cell lysis," *Micromachines*, vol. 11, no. 7, p. 699, 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11070699>.
- [38] H. Moghadas. A Microfluidic Device to Apply Uniform Shear Stress to the Cells", "Pathobiology Research, vol. 23, no. 3, 2020, In persion. <http://mjms.modares.ac.ir/article-30-40128-en.html>.
- [39] M. M. A. Alam et al., "Micro T-Mixer with Baffles: Effect of Baffle Height and Setting Angle on Mixing," *Open Journal of Fluid Dynamics*, vol. 13, no. 4, pp. 206-215, 2023. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2023.134015>.
- [40] M. B. Okuducu and M. M. Aral, "Novel 3-D T-Shaped Passive Micromixer Design with Helicoidal Flows," *Processes*, vol. 7, no. 9, p. 637, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7090637>.
- [41] X. Shi, S. Huang, L. Wang, and F. Li, "Numerical analysis of passive micromixer with novel obstacle design," *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 42, no. 3, pp. 440-456, 2021. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1699428>.
- [42] S. Hossain and K.-Y. Kim, "Mixing Analysis of Passive Micromixer with Unbalanced Three-Split Rhombic Sub-Channels," *Micromachines*, vol. 5, no. 4, pp. 913-928, 2014. <https://doi.org/10.3390/mi5040913>.
- [43] S. Yuan, B. Jiang, F. Jiang, D. Drummer, and M. Zhou, "Numerical and experimental investigation of mixing enhancement in the passive planar mixer with bent baffles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 191, p. 122815, 2022.

- Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 183, p. 114973, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114973>.
- [62] F. Yang, W. Zhao, C. Kuang, and G. Wang, "Rapid AC Electrokinetic Micromixer with Electrically Conductive Sidewalls," *Micromachines*, vol. 13, no. 1, p. 34, 2022. <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/1/34>.
- [63] C. Wang, "Liquid Mixing Based on Electrokinetic Vortices Generated in a T-Type Microchannel," *Micromachines*, vol. 12, no. 2, p. 130, 2021. <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/2/130>.
- [64] M. R. Rasouli and M. Tabrizian, "An ultra-rapid acoustic micromixer for synthesis of organic nanoparticles," *Lab on a Chip*, vol. 19, no. 19, pp. 3316-3325, 2019. <https://doi.org/10.1039/c9lc00637k>.
- [65] C. Bai, W. Zhou, S. Yu, T. Zheng, and C. Wang, "A surface acoustic wave-assisted micromixer with active temperature control," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 346, p. 113833, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113833>.
- [66] J. Zhang, T. Zheng, L. Tang, H. Qi, X. Wu, and L. Zhu, "Bubble-Enhanced Mixing Induced by Standing Surface Acoustic Waves (SSAWs) in Microchannel," *Micromachines*, vol. 13, no. 8, p. 1337, 2022. <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/8/1337>.
- [67] C. Westerhausen *et al.*, "Controllable Acoustic Mixing of Fluids in Microchannels for the Fabrication of Therapeutic Nanoparticles," *Micromachines*, vol. 7, no. 9, p. 150, 2016. <https://www.mdpi.com/2072-666X/7/9/150>.
- [68] C. Zhang, P. Brunet, L. Royon, and X. Guo, "Mixing intensification using sound-driven micromixer with sharp edges," *Chemical Engineering Journal*, vol. 410, p. 128252, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128252>.
- [69] V. Kordzadeh-Kermani, H. Dartoomi, M. Azizi, S. N. Ashrafzadeh, and M. Madadelahi, "Investigating the performance of the multi-lobed leaf-shaped oscillatory obstacles in micromixers using bulk acoustic waves (BAW): mixing and chemical reaction," *Micromachines*, vol. 14, no. 4, p. 795, 2023. <https://doi.org/10.3390/mi14040795>.
- [54] J. Hong, S. Lee, H. Park, D. Ahn, J. M. Lee, H. Choe, D. Kim, J. H. Kim, and C. H. Chon, "Size-Controllable and Monodispersed Lipid Nanoparticle Production with High mRNA Delivery Efficiency Using 3D-Printed Ring Micromixers," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 16, no. 35, pp. 46044-46052, 2024. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c08896>.
- [55] J. Wang, Q. Feng, J. Yao, and K. Zhao, "Insights into a T-type micromixer with novel electromagnetic mixing," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 214, p. 124468, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124468>.
- [56] W. Buglie and K. Tamrin, "Enhanced mixing in dual-mode cylindrical magneto-hydrodynamic (MHD) micromixer," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 236, no. 6, pp. 2491-2501, 2022. <https://doi.org/10.1177/09544089221093>.
- [57] C. Barman and A. Bandopadhyay, "A magnetohydrodynamic device with concentric ring electrode configuration for mixing intensification—numerical and experimental investigations," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 11, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0233411>.
- [58] M. Hejazian and N.-T. Nguyen, "A Rapid Magnetofluidic Micromixer Using Diluted Ferrofluid," *Micromachines*, vol. 8, no. 2, p. 37, 2017. <https://www.mdpi.com/2072-666X/8/2/37>.
- [59] T. H. Naghash, A. M. Haghgoo, M. A. Bijarchi, M. Ghassemi, and M. B. Shafii, "Performance of microball micromixers using a programmable magnetic system by applying novel movement patterns," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 406, p. 135403, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2024.135403>.
- [60] R. Zhou, A. N. Surendran, M. Mejulu, and Y. Lin, "Rapid Microfluidic Mixer Based on Ferrofluid and Integrated Microscale NdFeB-PDMS Magnet," *Micromachines*, vol. 11, no. 1, p. 29, 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11010029>.
- [61] K. Zhao, Q. Feng, J. Yao, B. Yang, and J. Wang, "An asymmetric orifice-based active micromixer in the microfluidic chip with 3D microelectrode,"