

# بررسی عددی افزایش میزان اختلاط در میکرومیکسر فعال توسط دو استوانه‌ی دوّار

سعید محمدباقری (دانشجوی کارشناسی)

محمد وجدی\* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی، دانشگاه محقق اردبیلی

میکرومیکسرهای یکی از اجزاء مهم سیستم‌های میکروسیالاتی هستند که برای اختلاط دو سیال در فازهای مایع یا گاز به کار می‌روند. از آنجا که مقیاس این دستگاه‌ها در حدود میلی‌متر است و جریان سیال نیز در رینولدزهای پایین صورت می‌گیرد، لذا استفاده از هندسه‌های مناسب برای تسریع روند اختلاط در طول مسیر کانال ضروری است. برای افزایش میزان اختلاط از دو استوانه در مسیر جریان با سرعت‌های دورانی مختلف استفاده شده که روشی فعال برای اختلاط است. شبیه‌سازی اختلاط و جریان سیال با روش‌های عددی و اجزای محدود انجام شده است. برای حل معادلات از نرم‌افزار کامسول استفاده شده و نتایج به‌صورت کانتورهای جریان و غلظت ارائه شده است. نتایج به دست آمده تطابق قابل قبولی با کارهای قبلی داشته و نشان می‌دهد که استفاده از استوانه‌های دوّار باعث افزایش اختلاط نسبت به حالت استوانه‌های ساکن می‌شود.

واژگان کلیدی: میکرومیکسر، روش فعال، اختلاط، استوانه مدوّر، شبیه‌سازی عددی، روش اجزای محدود.

## ۱. مقدمه

ناشی از ویژگی‌های جریان آشفته است. تأثیر پخش مولکولی در رژیم‌های جریان آشفته را می‌توان نادیده گرفت، زیرا اختلاط جریان آشفته‌ی پارامتر غالب بر پخش مولکولی است.<sup>[۱]</sup> ولی اختلاط در مقیاس میکرو فرایند پیچیده‌تری است که علت آن رژیم جریان آرام<sup>۲</sup> است که در آن اختلاط با انتشار مولکولی بسیار کم برای بسیاری از محلول‌های شیمیایی و زیست‌شناختی انجام می‌شود.<sup>[۸]</sup> اورنگا کاسانو<sup>[۸]</sup> در سال ۲۰۱۶ به بررسی عددی افزایش راندمان اختلاط در رینولدزهای پایین طی یک روش فعال توسط یک سیلندر مربعی نوسان‌کننده پرداخت. او پس از مطالعه‌ی ۷ فرکانس و ۵ دامنه‌ی مختلف نتیجه گرفت که میزان اختلاط ۱۰ برابر بیشتر از زمانی است که اختلاط در کانالی با سیلندر مربعی ثابت قرار می‌گیرد. علاوه بر آن یک فرکانس جذب بهینه برای هر دامنه‌ی نوسان یافت که برای آن راندمان اختلاط بیشتر می‌شود. شمس‌الدینی و همکاران<sup>[۹]</sup> با بررسی عددی عملکرد میکسرهای دایروی و دوقلوی پره‌دار - که یک روش فعال است - و با استفاده از روش هیدروپنایمیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر، دریافته‌اند که محفظه‌ی دوقلو با دوران هم‌جهت پره‌ها می‌تواند عملکرد اختلاط را نسبت به محفظه‌ی دایروی تا ۶۰٪ بهبود بخشد. قنبری و همکاران<sup>[۱۰]</sup> نیز به بررسی عددی اختلاط دو سیال با چگالی و لزجت متفاوت در یک میکروکانال دوبعدی مجهز به استوانه‌ی نوسان‌کننده و پره‌ی نوسان‌کننده در محدوده‌ی نسبت لگاریتمی لزجت و نسبت چگالی، در فرکانس‌های مختلف تحریک‌کننده پرداختند. نتایج این بررسی که در دسته روش‌های فعال قرار می‌گیرد، حاکی از آن است که

اخیراً کاربرد میکرومیکسرهای<sup>۱</sup> در صنایع بیوشیمی، بیومکانیک، توزیع دارو در صنایع پزشکی و ... بیش از پیش اهمیت یافته است.<sup>[۱]</sup> میکرومیکسرها و میکرومیکسرها از نمونه‌های پرکاربرد دستگاه‌های میکروسیالاتی هستند. در مورد میکرومیکسرها کارهای فراوان انجام شده است ولی در میکرومیکسرها جای کار بسیار است. کانال‌ها برحسب اندازه و مقیاس به کانال همرفتی، مینی‌کانال، میکروکانال، کانال گذرا و کانال مولکولی تقسیم می‌شوند.<sup>[۲]</sup> از طرفی میکرومیکسرها به دو دسته‌ی کلی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود. در میکرومیکسرهای فعال اختلاط توسط عوامل خارجی مانند نوسانات فشار، امواج صوتی، میدان الکتریکی، نیروی مکانیکی و ... انجام می‌گیرد. در میکرومیکسرهای غیرفعال، اختلاط از طریق برخورد جریان اصلی با هندسه‌ی کانال و بدون هیچگونه نیروی خارجی صورت می‌گیرد.<sup>[۳]</sup> تعداد زیادی از دستگاه‌های میکرومیکسری اخیراً به خوبی توسعه داده شده است که اغلب آنها میکرومیکسرهای غیرفعال‌اند، اما تعداد محدودی از میکرومیکسرهای فعال با قابلیت اختلاط کافی گزارش شده است.<sup>[۴]</sup> میکرومیکسرهای غیرفعال برای بررسی سیستم‌های میکروکل و بیوشیمی کاربرد مناسبی دارند، اما از جمله محدودیت‌هایی که برای بهبود عملکرد اختلاط به آن نیاز دارند، زمان است.<sup>[۶]</sup> در سیستم‌های مقیاس ماکرو، اختلاط عمدتاً

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۰/۹/۱۳۹۷، اصلاحیه ۱۵/۳/۱۳۹۸، پذیرش ۱۱/۴/۱۳۹۸.

DOI:10.24200/J40.2019.52118.1488

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{\nabla} C) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} C) \quad (3)$$

که در آنها  $\rho$  چگالی،  $\mu$  لزجت دینامیکی،  $\vec{V}$  بردار سرعت،  $C$  کسر جرمی و  $D$  ضریب پخش مولکولی است. اعداد بی بعد رینولدز، عدد اشویت و عدد پکلت هم به ترتیب به صورت  $Re = \rho u d / \mu$ ،  $Sc = \mu / \rho D$  و  $Pe = Re \cdot Sc$  است که بر مبنای مجرای ورودی آب تعریف شده است.<sup>[۲۰]</sup> سرعت متوسط جریان سیال و  $d$  قطر ورودی کانال اختلاط است. در انتها برای بررسی قابلیت میکرومیکسر در اختلاط دو سیال، کمیتی با عنوان درجه اختلاط مطرح می‌شود، که در آن برای هر مقطعی از کانال اختلاط می‌توان طبق معادله‌ی ۴ محاسبه شود:<sup>[۲۱]</sup>

$$DM = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2} \quad (4)$$

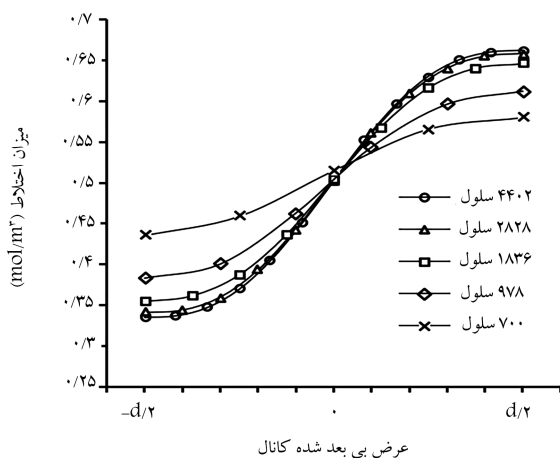
که در آن  $N$  تعداد نودهای مقطع،  $C_i$  غلظت در هر نقطه و  $\bar{C}$  غلظت در خروجی است که در میکرومیکسر ایده‌آل برابر ۰/۵ است.

### ۳. روش عددی

برای شبیه‌سازی اختلاط دو سیال در میکرومیکسر، دو فیزیک مجزا (اختلاط و دوران) به‌صورت هم‌زمان حل شده است. شبیه‌سازی تمامی مراحل در نرم‌افزار کامسول صورت گرفته که روش حل بر پایه اجزای محدود است. همچنین از خطای نسبی پیش‌فرض نرم‌افزار کامسول برابر با  $10^{-6}$  به عنوان معیار همگرایی استفاده شده است.

### ۴. استقلال از شبکه

هندسه‌ی مورد بررسی با استفاده از سلول‌های مربعی و مثلثی شبکه‌بندی شده و برای دقت بیشتر جواب، در نواحی تیز و دوار، از دستور ریفاینمنت<sup>۶</sup> برای افزایش مش در آن ناحیه استفاده شده است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی ۵ شبکه منظم و یکنواخت با اندازه و تعداد مش متفاوت مورد استفاده قرار گرفته است. محل مبدا مختصات مرکز شکل در نظر گرفته شده است و مقدار عرض کانال از  $d/2$  تا  $d/2$  متغیر است. شاخص اختلاط در خروجی کانال برای شبکه‌بندی‌های مختلف در شکل ۱ برای حالت اول نمایش داده شده است. چنان‌که از شکل ۱ برمی‌آید به



شکل ۱. بررسی استقلال از شبکه‌بندی.

اختلاط دو سیال با چگالی و لزجت یکسان یک حالت ایده‌آل است و همچنین افزایش اندازه پره منجر به بهتر شدن اختلاط خواهد شد. گانش ناتاراجان و همکاران<sup>[۱۱]</sup> در سال ۲۰۱۷ به بررسی عملکرد اختلاط در کانال‌های T شکل با دنده‌های انحنادار پرداختند. نتایج به دست آمده نشان داد که کانال با موانع دارای زاویه‌ی ۶۰ درجه اختلاط را ۴۵٪ افزایش می‌دهد؛ همچنین با افزایش تعداد دنده‌ها اختلاط نیز بیشتر می‌شود. باهری اسلامی و احمدی<sup>[۱۲]</sup> به بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف بر میزان اختلاط در ۹ میکرومیکسر منفعل با سرعت‌های نوسانی جریان ورودی پرداختند و نشان دادند که شاخص اختلاط در میکرومیکسرهایی که جریان در کانال اختلاط را به چند دسته تقسیم می‌کنند، مانند میکرومیکسرهای لوزی شکل بیشتر و در هندسه‌هایی با موانعی روی دیواره‌ی کانال کمتر است. ویرک و همکاران<sup>[۱۳]</sup> در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار کامسول،<sup>۳</sup> اختلاط دو سیال را در اعداد رینولدز پایین در میکرومیکسرهای T شکل شبیه‌سازی کردند و اثرات سرعت و ابعاد میکرومیکسر را بر غلظت خروجی بررسی کردند.

اوسی و همکاران<sup>[۱۴]</sup> در سال ۲۰۱۳ به بررسی اختلاط آب - اتانول در میکرومیکسرهای T شکل پرداختند. آنها نشان دادند که در رینولدزهای پایین (کمتر از ۱۰۰) در میکرومیکسر گردابه تشکیل نمی‌شود. همچنین آنها دریافتند که اختلاط در آب - اتانول بهتر از آب - آب صورت می‌گیرد. کالادو و همکاران<sup>[۱۵]</sup> در سال ۲۰۱۶ به بررسی تغییرات مربوط به خصوصیات جریان سیال نیوتنی در میکرومیکسرهای T شکل پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که عدم تقارن باعث بهبود اختلاط می‌شود. دیانا و همکاران<sup>[۱۶]</sup> در سال ۲۰۱۲، شبیه‌سازی عددی دستگاه‌های میکروسایالی را با استفاده از نرم‌افزار کامسول بررسی کردند. آنها پس از بررسی، میزان اختلاط  $0.7 \mu\text{m/s}$  را مشاهده کردند. ژوون و همکاران<sup>[۱۷]</sup> در سال ۲۰۰۹ طراحی و شبیه‌سازی اختلاط منفعل در میکروسایال‌ها را بررسی کردند. نتایج تجربی و عددی همخوانی خوبی با هم داشت. همچنین افت فشار در میکرومیکسرهای کوچک و ساختار آنها مناسب برای ادغام با سیستم‌های آزمایشگاهی روی تراشه یا سیستم‌های میکروکل بود.

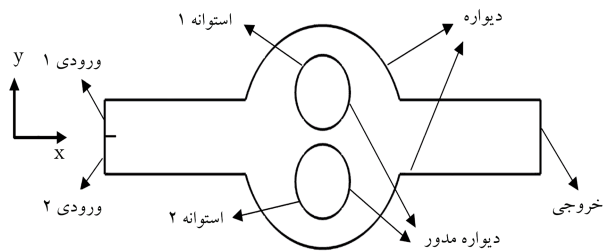
مرور کارهای پیشین نشان‌گر اهمیت میکرومیکسرهاست. کارهای زیادی برای میکسرهای غیرفعال صورت گرفته اما روش‌های فعال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از هندسه‌های پرکاربرد در میکرومیکسر غیرفعال، استوانه‌های ساکن است. ایجاد موانع در صورتی که باعث ایجاد گردابه شود باعث افزایش اختلاط خواهد شد و لذا در این تحقیق از استوانه‌ها استفاده شده است؛ اگر این استوانه‌ها ساکن باشند تأثیر مثبتی بر اختلاط نخواهد داشت.<sup>[۱۸]</sup> لذا در این تحقیق با توجه به ماهیت دورانی استوانه و تأثیر آن بر شکل‌گیری گردابه، میکرومیکسرهای فعال با دو استوانه‌ی دوار بررسی شده و میزان اختلاط با روش‌های عددی تعیین شده است که پیش‌تر، در کارهای تحقیقاتی به آن پرداخته نشده است.

### ۲. معادلات حاکم

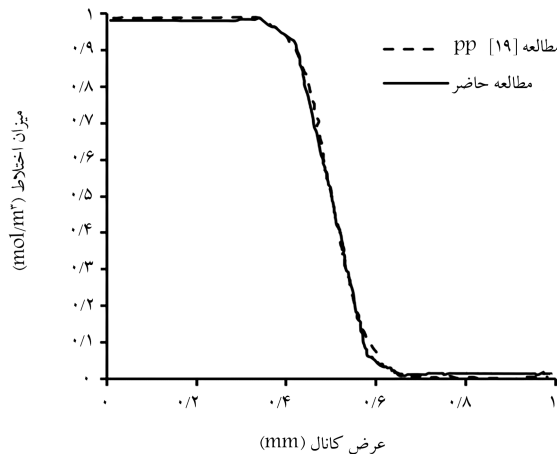
در مطالعه‌ی حاضر جریان سیال به‌صورت لزج،<sup>۴</sup> تراکم ناپذیر،<sup>۵</sup> هم‌دما، آرام و دائم در نظر گرفته شده است. معادلات پیوستگی، بقای مومستوم و انتقال جرم به ترتیب به‌صورت روابط ۱ تا ۳ است:<sup>[۱۹]</sup>

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} \vec{V}) \quad (2)$$



شکل ۴. شماتیک میکرومیکسر.



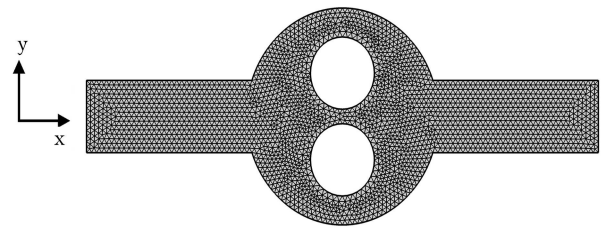
شکل ۵. مقایسه نمودار شاخص اختلاط در خروجی مطالعه‌ی حاضر با مطالعات قبلی [۱۹].

لغزش با سرعت دورانی برابر است. سایر جداره‌ها با شرط دیوار بدون لغزش و ساکن مدل شده‌اند. در ورودی، پروفیل سرعت توسعه یافته‌ی جریان آرام به شکل سهمی مورد استفاده قرار گرفته است.

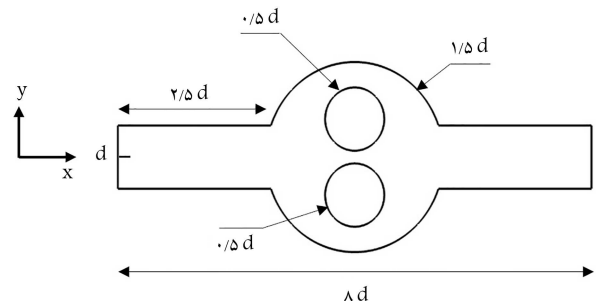
## ۶. اعتبارسنجی

در استفاده از روش عددی، به منظور اطمینان از صحت کار انجام یافته و نتایج به دست آمده، باید نتایج تحلیل حاضر با نتایج پژوهش‌های پیشین اعتبارسنجی شود. در این پژوهش از نتایج بررسی تأثیر شکل کانال و موانع موجود در آن بر میزان اختلاط در شش میکرومیکسر با هندسه‌های مختلف [۱۸] استفاده شده است. به منظور اطمینان بیشتر از صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کار قبلی، دو هندسه از کار مرجع که بیشترین میزان شباهت را با کار حاضر دارد شبیه‌سازی شده است. ابتدا اختلاط کانال ساده‌ی T شکل مشابه تحقیق انجام شده‌ی قبل [۱۸] بررسی شده و سپس میکرومیکسر با موانع استوانه‌یی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل عددی در شرایط پایا و جریان آرام صورت گرفته است. در شکل ۵ توزیع میزان اختلاط در خروجی میکرومیکسر نشان داده شده است. همان‌طور که از روی نمودار شکل ۵ پیداست، توزیع اختلاط بر روی مرز خروجی کانال تطابق قابل قبولی با نتایج مرجع دارد.

در شکل ۶ نمونه‌یی دیگر از هندسه‌ی کار مرجع با موانع استوانه‌یی نشان داده شده است. طبق نمودار شکل ۷ که میزان درصد اختلاط را در طول میکرومیکسر نشان می‌دهد، می‌توان اطمینان حاصل کرد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روش عددی به‌کار رفته با دقت قابل قبولی با نتایج کار مرجع [۱۸] هم‌خوانی دارد.



شکل ۲. نمایی کلی از شبکه‌ی محاسباتی.



شکل ۳. ابعاد میکرومیکسر.

جدول ۱. حالت‌های مختلف دوران.

حالت‌های دوران	سیلندر بالا	سیلندر پایین
حالت ۱	ساعت‌گرد	ساعت‌گرد
حالت ۲	پاد ساعت‌گرد	پاد ساعت‌گرد
حالت ۳	ساعت‌گرد	پاد ساعت‌گرد
حالت ۴	پاد ساعت‌گرد	ساعت‌گرد

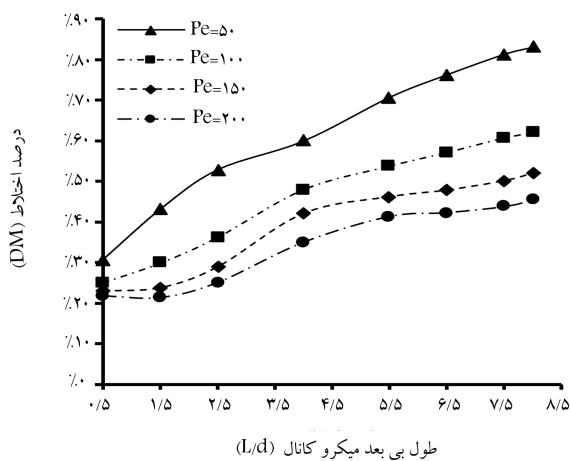
ازای تعداد مش بیشتر از ۴۴۰۲، نتایج تحلیل مستقل از شبکه است. شکل ۲ نمایی کلی از شبکه محاسباتی استفاده شده در شبیه سازی آورده شده است. مشاهده می‌شود که تراکم مش در نقاط مختلف شکل تقریباً یکنواخت است.

## ۵. بیان مسئله

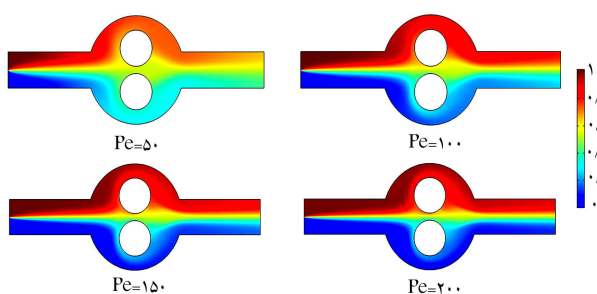
میکرومیکسر مطالعه شده در این پژوهش در شکل ۳ نمایش داده شده است. یک معیار طول برای نمایش بی‌بعد ابعاد کانال به نام  $d$  تعریف شده است که بقیه‌ی مقادیر نیز بر اساس آن تعیین می‌شود. اندازه‌ی طول کل کانال  $L = 8d$ ، شعاع استوانه‌ی بزرگ مرکزی  $R = 1/5d$  و شعاع دو استوانه‌ی کوچک  $r = 0/5d$  است. هر دو استوانه حول محور خود در حال دوران‌اند؛ جهت دوران این استوانه‌ها چهار حالت ممکن را به وجود آورده است (جدول ۱).

مقادیر سرعت ورودی در میکرومیکسر برای هر دو غلظت، یکسان و مقدار آن  $u$  است؛ از اثر جاذبه در شبیه‌سازی صرف نظر شده و مقادیر فشار روی مرزهای خارجی ثابت فرض شده است. همچنین فشار نسبی در خروجی کانال معادل صفر در نظر گرفته شده است. محلول نوع اول با غلظت  $C = 1$  از نیمه‌ی بالایی مجرای کانال وارد و همزمان حلال نوع دوم با غلظت  $C = 0$  از نیمه‌ی پایینی وارد کانال شده و فرایند اختلاط صورت می‌گیرد [۲۲].

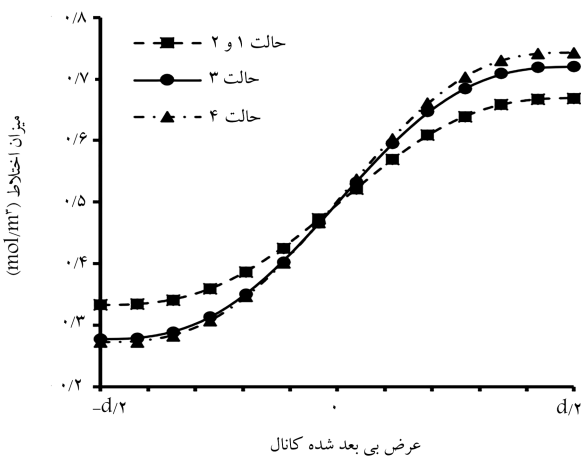
شرایط مرزی به کار رفته در تحلیل میکرومیکسر در شکل ۴ مشاهده می‌شود. شرط مرزی روی دیواره‌های دورانی (استوانه‌های بالا و پایین) از نوع دیواره‌ی بدون



شکل ۸. درصد اختلاط در طول میکروکانال با استوانه‌های غیردوار در پکلت‌های مختلف.



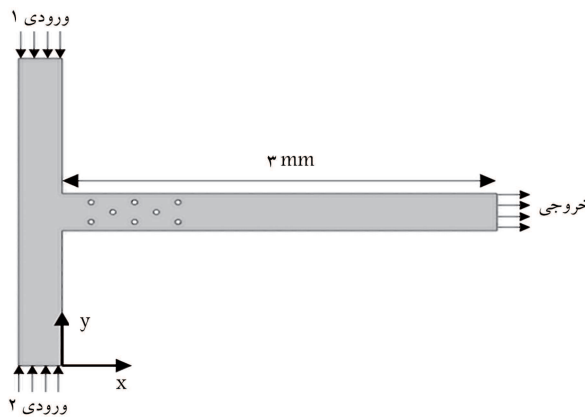
شکل ۹. کانتور غلظت در پکلت‌های مختلف برای حالت استوانه‌های ثابت.



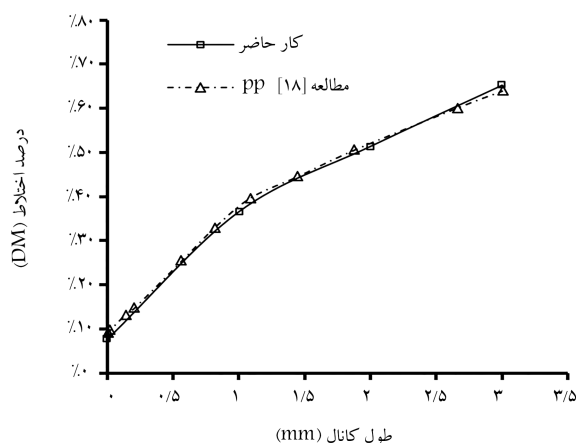
شکل ۱۰. شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسر برای چهار حالت مختلف دوران استوانه‌ها در  $Pe = 100$ .

داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود میزان اختلاط با افزایش عدد پکلت رفته رفته کاهش می‌یابد. بر این اساس می‌توان دریافت که بیشترین میزان اختلاط در غیاب دوران استوانه‌ها در پکلت‌های پایین انجام می‌گیرد. به همین منظور از کانتور غلظت با عدد پکلت ۵۰ به عنوان مبنای سنجش تأثیر دوران استوانه‌ها استفاده شده است.

از شبیه‌سازی انجام گرفته با استوانه‌های دوار در چهار حالت مختلف، میزان اختلاط در خروجی میکروکانال را در  $Pe = 100$  می‌توان بیان کرد (شکل ۱۰)؛ و می‌توان نتیجه گرفت مطابق شکل ۱۰، حالت‌های دورانی ۱ و ۲ بهترین



شکل ۶. یک نمونه از هندسه کار مرجع [۱۸].



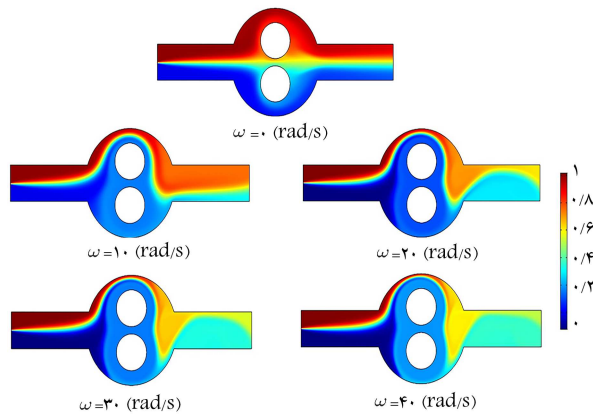
شکل ۷. مقایسه‌ی درصد اختلاط در طول کانال بین مطالعه‌ی حاضر با نتایج کار مرجع [۱۸].

## ۷. نتایج و تحلیل

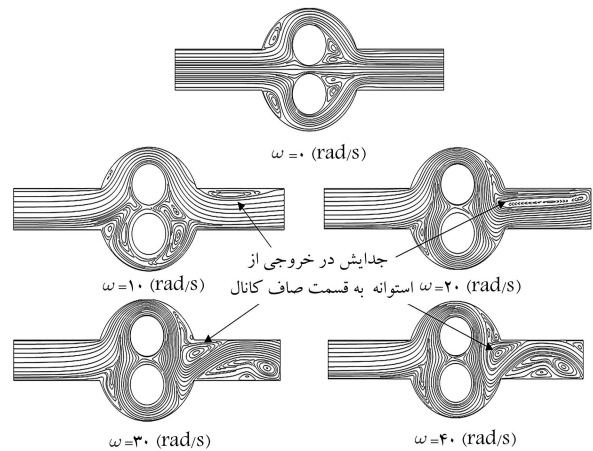
پس از بررسی استقلال از شبکه و اعتبارسنجی روش عددی بر مبنای بخش پیشین، به بررسی عددی میکرومیکسر در حالت‌های مختلف دوران پرداخته‌ایم. باید در نظر داشت که میکرومیکسری که در کوتاه‌ترین طول بتواند به درجه‌ی اختلاط مورد نظر یا بالاترین اختلاط ممکن دست یابد، مناسب‌ترین میکرومیکسر است. [۲۳، ۲۴]

درصد اختلاط به عنوان یک شاخص معیار برای بررسی تأثیر استوانه‌های دوار در نظر گرفته شده و اختلاط همه‌ی حالات دورانی نسبت به حالت غیر دورانی سنجیده خواهد شد. مطالعه‌ی این قسمت به منظور نشان دادن تأثیر و اهمیت دوران استوانه‌ها بر میزان اختلاط در خروجی میکروکانال است. ابتدا اختلاط در میکرومیکسر با استوانه‌های غیردوار بررسی شده و نتایج آن در نمودار شکل ۸ آورده شده است. نمودار شکل ۸ درصد اختلاط در مقطع‌های مشخصی از میکروکانال را در پکلت‌های مختلف نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، میزان اختلاط در مقاطع اولیه‌ی میکروکانال کمتر است ولی در مقاطع انتهایی کانال بیشترین مقدار را دارد. با توجه به ماهیت آرام جریان و این که در جریان آرام پدیده‌ی پخش مولکولی پدیده‌ی غالب در اختلاط است، بیشترین میزان اختلاط در خروجی میکروکانال نیز در پکلت‌های کمتر که مدت زمان حرکت جریان در داخل میکرومیکسر بیشتر است، اتفاق می‌افتد.

در شکل ۹ کانتور غلظت برای چهار پکلت مختلف با استوانه‌های ثابت نشان



شکل ۱۳. مقایسه‌ی کانور غلظت در  $Pe = 200$  برای چهار سرعت دورانی مختلف در حالت ۱.

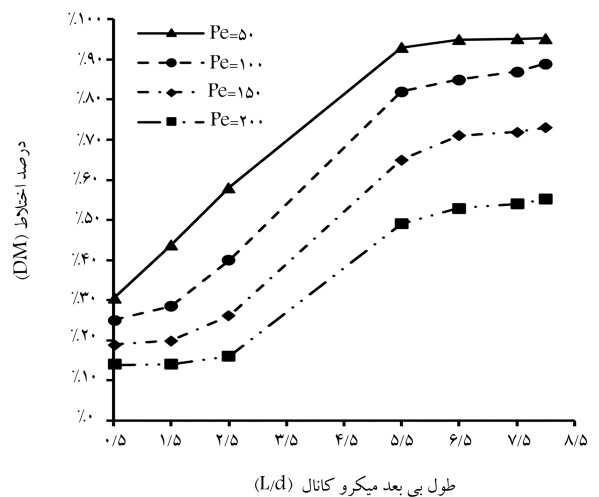


شکل ۱۴. مقایسه‌ی کانور جریان در  $Pe = 200$  برای چهار حالت مختلف دوران استوانه‌ها.

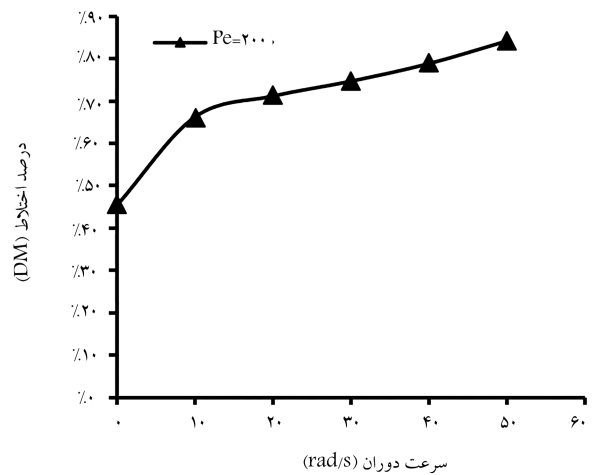
لزجی باعث نفوذ سیال به داخل سیال دیگر شده و در نتیجه اختلاط افزایش می‌یابد.

مطابق کانور غلظت که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، افزایش سرعت دوران استوانه‌ها تأثیر خوبی بر شاخص اختلاط خروجی میکرومیکسرها داشته است. کانور غلظت پایه (حالت غیر دورانی استوانه‌ها) نشان می‌دهد که در خروجی اختلاط خوبی صورت نگرفته است. با دوران استوانه‌ها و همچنین افزایش سرعت دوران، مشاهده می‌شود که درصد اختلاط در خروجی به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است. چنان‌که از کانورها برمی‌آید هر قدر رنگ کانور غلظت در خروجی به رنگ سبز نزدیک‌تر باشد نشان‌گر اختلاط بهتر است.

مطابق شکل ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که تا قبل از رسیدن جریان‌ها به محل استوانه‌های موجود در مجرا، اختلاط بسیار کم است و این ناشی از جریان آرام و تأثیر پخش مولکولی است. در ناحیه‌ی قبل استوانه‌ها گردابه‌ی وجود نداشته و اختلاط فقط به دلیل پدیده‌ی پخش مولکولی است که سهم خیلی کمی در اختلاط دارد. با رسیدن جریان به استوانه‌ها و به‌خصوص استوانه‌های دورانی، جریان با گردابه‌های حاصل از دوران استوانه‌ها یا جدایش جریان مواجه شده و نفوذ سیال در یکدیگر افزایش می‌یابد. به همین دلیل در خروجی کانال اختلاط بهتری برای حالت استوانه‌ی دوار دیده می‌شود. با افزایش هرچه بیشتر سرعت دورانی، پخش



شکل ۱۱. درصد اختلاط در طول میکروکانال در اثر دوران استوانه‌ها با سرعت ثابت  $30 \text{ rad/s}$  در پیکلت‌های مختلف.



شکل ۱۲. شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسرها برای سرعت‌های دورانی مختلف در  $Pe = 200$ .

اختلاط و حالت‌های ۳ و ۴ بدترین اختلاط را دارند. بنابراین برای دستیابی به اختلاط بهتر در تحلیل‌های بعدی از حالت ۱ استفاده می‌شود. همچنین با توجه به تقارن شکل، منطبق شدن نمودار حالت ۱ و ۲ بر هم قابل پیش بینی بوده است.

به منظور بررسی تأثیر دوران استوانه‌ها بر میزان اختلاط در مسیر کانال در پیکلت‌های مختلف، مقدار سرعت دورانی ثابت  $30 \text{ rad/s}$  در نظر گرفته شده و بر همین اساس نمودار شکل ۱۱ حاصل شده است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین میزان اختلاط در پیکلت ۵۰ و در قسمت خروجی کانال رخ می‌دهد. دلیل عمده‌ی این اتفاق بر هم زدن جریان آرام سیال توسط استوانه‌ها و در نتیجه نفوذ دو ماده در یکدیگر است.

با توجه به تأثیر قابل توجه اثر دوران استوانه‌ها بر درصد اختلاط، در شکل ۱۲ تأثیر سرعت دورانی استوانه‌ها بر اختلاط به ازای عدد پیکلت ثابت  $200$  آورده شده است. می‌توان استدلال کرد که با افزایش سرعت دورانی استوانه‌ها، میزان اختلاط بیشتر شده و دلیل آن تأثیر دیواره‌ی دورانی و لزجت سیال است. به دلیل شرط عدم لغزش، هر کدام از سیال‌ها به دیواره‌ی استوانه چسبیده و با نیروی

و در نتیجه اختلاط بهتر شده که به وضوح در کانتورهای اختلاط قابل مشاهده است.

به منظور تحلیل دلیل افزایش اختلاط با افزایش سرعت دورانی، خطوط جریان به ازای پکلت ثابت برای حالت ۱ در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در خطوط جریان هرچه گردابه‌ها بیشتر باشد، میزان اختلاط جریان بهتر خواهد بود، چرا که پدیده‌ی انتقال را تشدید می‌کند.

در حالت استوانه‌های ساکن گردابه‌هایی متقارن در اطراف استوانه‌ها تشکیل شده، اما با شروع چرخش استوانه‌ها، مطابق شکل ۱۲، میزان اختلاط افزایش قابل توجهی داشته است، چرا که ابعاد گردابه در اطراف استوانه‌ی پایین بزرگتر شده و از طرف دیگر جدایش جریان در لبه‌ی خروجی استوانه به قسمت صاف کانال مشاهده می‌شود و منجر به افزایش میزان اختلاط خواهد شد.

با افزایش هرچه بیشتر سرعت دورانی به مقدار ۲۰ رادیان بر ثانیه، شدت جدایش در گوشه‌ی نشان داده شده تشدید شده که منجر به جابه‌جایی سیال از کناره‌ها به مرکز جریان است و به عبارتی اختلاط را افزایش می‌دهد. با رسیدن سرعت دورانی به مقادیر ۳۰ و ۴۰ رادیان بر ثانیه، گردابه‌های بیشتری در قسمت خروجی کانال شکل گرفته که ناشی از جدایش در لبه‌ی پایین این قسمت بوده و باعث تشدید اختلاط شده است.

## ۸. نتیجه‌گیری

بررسی عددی میکرومیکسر فعال با استوانه‌های دوار برای چهار حالت مختلف دورانی با استفاده از روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار کامسول انجام و با حالت استوانه‌های ثابت مقایسه شد. پروفیل سرعت جریان ورودی، آرام، دائم و توسعه یافته در نظر گرفته شده است. برای سرعت دورانی استوانه‌ها ۵ مقدار متفاوت و برای جریان ورودی ۴ پکلت مختلف در نظر گرفته شده و نتایج برای تمامی حالات با یکدیگر و حالت پایه مقایسه شده است. اهم نتایج به دست آمده عبارت است از:

- میزان اختلاط در استوانه‌های دوار در مقایسه با استوانه‌های غیردوار به مقدار قابل توجهی افزایش یافته است.

- مقایسه‌ی حالت‌های مختلف دوران نشان می‌دهد که حالت‌های ۱ و ۲ نسبت به حالت‌های ۳ و ۴ و به ازای پکلت و سرعت دوران برابر، اختلاط بهتری دارند.
- با افزایش سرعت دورانی استوانه‌ها اختلاط افزایش یافته است.
- با افزایش عدد پکلت در محدوده‌ی جریان آرام، میزان اختلاط به دلیل حرکت سریع جریان در داخل کانال و عدم فرصت کافی برای پدیده‌ی پخش مولکولی، کاهش یافته است.

## پانوشته‌ها

1. micro mixers
2. laminar Flow
3. COMSOL
4. viscose
5. incompressible
6. refinement

## منابع (References)

1. Schwalbe, T., Autze, V. and Wille, G. "Chemical synthesis in microreactors", *Chimia-Zurich*, **56**(11), pp. 636-646 (2002).
2. Yarin, L.P., Mosyak, A. and Hetsroni, G. "Fluid flow, heat transfer and boiling in micro-channels", Springer Science & Business Media (2008).
3. Nguyen, N.T. and Wu, Z. "Micromixers-a review", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **15**(2), R1-R16 (2005).
4. Evans, J., Liepmann, D. and Pisano, A.P. "Planar laminar mixer. In Proc", *IEEE MEMS Workshop*, **10**, pp. 96-101 (January 1997).
5. Fujii, T., Hosokawa, K., Shoji, S. and et al. "Development of a microfabricated biochemical workbench-improving the mixing efficiency-", *In Micro Total Analysis Systems*, **98**, Springer, Dordrecht, pp. 173-176 (1998).
6. Choi, J.W. and Ahn, C.H. "Active microfluidic mixer for mixing of microparticles and liquids", *In Microfluidic*

*Devices and Systems III*, **4177**, International Society for Optics and Photonics, pp. 143-151 (August 2000).

7. Demirel, E. and Aral, M.M. "Unified analysis of multi-chamber contact tanks and mixing efficiency evaluation based on vorticity field. part II: transport analysis", *Water*, **8**(11), p. 537 (2016).
8. Okuducu, M.B. and Aral, M.M. "Performance analysis and numerical evaluation of mixing in 3-D T-Shape passive micromixers", *Micromachines*, **9**(5), p. 210 (2018).
9. Shamsoddini, R., Sefid, M. and Fatehi, R. "Numerical investigation of the mixing performance of two-blade twin and circular mixers by using an improved weakly compressible smoothed particle hydrodynamics", *Modares Mechanical Engineering*, **14**(11) (2015).
10. Ghanbari, S., Sefid, M. and Shamsoddini, R. "Numerical analysis of two-fluid mixing with various density and viscosity in a microchannel with forced oscillating stirrer", *Modares Mechanical Engineering*, **16**(8), pp. 109-119 (2016).
11. Borgohain, P., Dalal, A., Natarajan, G. and et al. "Numerical assessment of mixing performances in cross-T microchannel with curved ribs", *Microsystem Technologies*, **24**(4), pp. 1949-1963 (2018).
12. Baheri Islami, S. and Ahmadi, S. "Numerical investigation on the effect of various geometries on mixing efficiency of passive micromixers with oscillatory inlet velocities", *Modares Mechanical Engineering*, **14**(7), pp. 27-34 (2014).
13. Virk, M.S. and Holdø, A.E. "Numerical analysis of fluid mixing in T-Type micro mixer", *The International Journal of Multiphysics*, **2**(1), pp.107-127 (2016).

14. Orsi, G., Roudgar, M., Brunazzi, E. and et al. "Water-ethanol mixing in T-shaped microdevices", *Chemical Engineering Science*, **95**, pp. 174-183 (2013).
15. Calado, B., dos Santos, A. and Semiao, V. "Characterization of the mixing regimes of newtonian fluid flows in asymmetrical T-shaped micromixers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, **72**, pp. 218-227 (2016).
16. Hashim, U., Diyana, P.A. and Adam, T. "Numerical simulation of microfluidic devices", *In Semiconductor electronics (ICSE), 2012 10th IEEE International conference on* (pp. 26-29). IEEE (September 2012).
17. Jeon, W. and Shin, C.B. "Design and simulation of passive mixing in microfluidic systems with geometric variations", *Chemical Engineering Journal*, **152**(2-3), pp. 575-582 (2009).
18. pourparvaneh, A. and mahdavian, M. "Numerical investigation of micro-performance passive mixers with different geometries computational fluid dynamics", *Iranian Journal of Marine Technology*, **3**(2), pp. 25-36 (2017).
19. Zare, P. and Talebi, S. "Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance", *Modares Mechanical Engineering*, **17**(3), pp. 293-304 (2017).
20. Karst, C.M., Storey, B.D. and Geddes, J.B. "Laminar flow of two miscible fluids in a simple network", *Physics of Fluids*, **25**(3), p. 033601 (2013).
21. Chung, C.K., Wu, C.Y. and Shih, T.R. "Effect of baffle height and reynolds number on fluid mixing", *Microsystem Technologies*, **14**(9-11), pp. 1317-1323 (2008).
22. Reshadi, M. and Saidi, M.H. "Analytical study of cross stream diffusion for combined electroosmotic and poiseuille flows in rectangular microchannels: inclusion of EDL effect", *Modares Mechanical Engineering*, **15**(4), pp.167-176 (2015).
23. Alam, A. and Kim, K.Y. "Analysis of mixing in a curved microchannel with rectangular grooves", *Chemical Engineering Journal*, **181**, pp. 708-716 (2012).
24. Sudarsan, A.P. and Ugaz, V.M. "Fluid mixing in planar spiral microchannels", *Lab on a Chip*, **6**(1), pp. 74-82 (2006).