

## بررسی عددی کارآیی میکرومیکسرهای غیر فعال با هندسه‌های مختلف توسط دینامیک سیالات محاسباتی

علیرضا پور پروانه<sup>۱</sup>، مجید مهدویان<sup>۲</sup>

alireza.pourparvaneh@gmail.com

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان

۲- استادیار دانشگاه، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان

### چکیده

میکرومیکسرهای یکی از نمونه‌های کاربردی دستگاه‌های میکروسیالی هستند. 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 میکرومیکسرهای می‌توان به زاویه برخورد، تقارن در سطح مقطع، قطر هیدرولیکی، میدان سرعت، ضریب نفوذ دو سیال در یکدیگر و خواص دو سیال اشاره نمود. در این مطالعه به بررسی و شبیه سازی جریان و آمیختگی دو سیال تراکم‌ناپذیر در شش میکرومیکسر T\_شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط و میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط، برای اعداد رینولدز و اشمیت مختلف در مخلوط‌هایی با خواص ثابت و متغییر پرداخته شده است. همچنین تغییرات درجه اختلاط بر حسب زمان در خروجی میکرومیکسر و درجه اختلاط در طول کانال خروجی بر حسب فاصله از انشعاب برای تمامی میکرومیکسرهای بررسی و با هم مقایسه شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی و میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال، اختلاط را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهند و میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال نه تنها باعث بهبود اختلاط نمی‌شوند، بلکه اختلاط را نیز نسبت به میکرومیکسر T\_شکل ساده کمتر می‌کنند.

واژگان کلیدی: میکرومیکسر، ضریب نفوذ، عدد پکلت، غلظت.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۰۶/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۸/۲۶

## ۱- مقدمه

کانال‌ها بر حسب اندازه و یا به عبارت بهتر قطر هیدرولیکی به کانال همرفتی، مینی کانال، میکروکانال، کانال گذرا و کانال مولکولی تقسیم می‌شوند [۱]. دستگاه‌های میکروسیالی به دستگاه‌هایی اطلاق می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن دارای مقیاس میکرومتر می‌باشد [۲]. این دستگاه‌ها بر اساس ساختمان‌های مداری شکل می‌باشند که به عنوان تراشه‌های میکروسیالی شناخته می‌شوند. برای این سیستم‌ها مقدار اندکی از مواد مورد نیاز است که علاوه بر اینکه باعث کاهش هزینه می‌شود، ایمنی بیشتری را در سیستم‌ها (به دلیل مواد عبوری کمتر و کنترل بهتر) ایجاد می‌کند [۳]. از نمونه‌های کاربرد دستگاه‌های میکروسیالی می‌توان به میکرومیکسرها<sup>۱</sup> اشاره نمود. به دلیل کاربردهای وسیع میکرومیکسرها در همگن سازی، واکنش شیمیایی، پراکنده‌سازی و امولسیون سازی، بازده اختلاط در این دستگاه‌ها برای دستیابی به عملکرد بهتر کلی فرایند بسیار مهم است. در اختلاط میکرو، مولکول‌ها به جای گردابه‌ها نقش اصلی را در اختلاط ایفا می‌کنند. به عبارت دیگر نفوذ در مقیاس مولکولی انجام می‌گیرد [۴-۵]. 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. اختلاط مؤثر در این دستگاه‌ها اساساً به وسیله طراحی هوشمندانه هندسه کانال می‌باشد، که برای افزایش مناطق تماس دو سیال با یکدیگر در نرخ‌های بالا به دست می‌آید. اختلاط مؤثر در میکروکانال‌ها برای بسیاری از مایعات در اعداد پکلت<sup>۲</sup> بالا و رینولدز پایین مشاهده می‌باشد. بسیاری از واکنش‌های شیمیایی دارای ضریب پخش پایین می‌باشند، بنابراین بدون آشفتگی، زمان واکنش ممکن است به شدت طولانی شود. خواص سیال مانند دانسیته، ویسکوزیته و ضریب پخش با تغییر در متغیرهایی مانند دما و کسر جرمی اجزاء تغییر می‌کند؛ از این رو این تغییرات باید وقتی در نظر گرفته شود که ارزیابی مخلوط دو سیال مد نظر باشد [۳، ۶ و ۷].

میکرومیکسرها به دو دسته اصلی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در میکرومیکسرها<sup>۱</sup> فعال، اختلاط توسط یک عامل خارجی مانند میدان الکتریکی، مغناطیسی، نوسانات فشار<sup>۲</sup>،

امواج صوتی و غیره صورت می‌گیرد، در حالی که در میکرومیکسرها<sup>۱</sup> غیرفعال، اختلاط از تعامل جریان اصلی با هندسه کانال که به طور خاص طراحی شده است (مانند کانال‌های متقاطع، زیگزاگی، مانع‌دار) و بدون هیچ گونه انرژی خارجی صورت می‌گیرد [۸] و [۹].

وینسترا و همکاران در سال ۱۹۹۹، میکرومیکسری با سطح مقطع بسیار باریک طراحی کردند که دو جریان مایع بسیار نزدیک به یکدیگر وارد آن می‌شوند و در نتیجه اختلاط در زمان کوتاه‌تری روی می‌دهد [۱۰].

گابی و همکاران در سال ۲۰۰۱، مشخصه‌های اختلاط دو گاز مختلف در میکسرها<sup>۱</sup> T\_ شکل را به کمک روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی شبیه‌سازی کردند که در آن تأثیرات سرعت جریان، نسبت اضلاع میکروکانال، زاویه بین جریان‌های ورودی بر روی طول اختلاط مورد بررسی قرار گرفت [۱۱]. بیبه و همکاران در سال ۲۰۰۱، یک میکرو میکس پیچ در پیچ از جنس PDMS ساختند تا با افزایش بی‌نظمی در جریان، اختلاط را افزایش دهند [۱۲].

برتچ و همکاران در سال ۲۰۰۱، دو نمونه میکرومیکسرها<sup>۱</sup> طراحی کردند. آن‌ها این دو نمونه میکرومیکسرها<sup>۱</sup> بر اساس نمونه‌هایی در مقیاس معمولی طراحی کردند. نمونه اول مخلوط کننده استاتیک با کانال متقاطع در بالا و المان‌های حلزونی در پایین، نمونه دوم مخلوط کننده با ساختار داخلی و مجرای عبور سیال چند برابر می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه سازی CFD نشان داد که مخلوط کننده نوع اول کارایی بهتری نسبت به نوع دوم دارد. آن‌ها دریافتند که کانال با ساختار داخلی مارپیچی دلیل افزایش کارایی می‌باشد [۱۳]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴، قابلیت استفاده از میکرومیکسرها<sup>۱</sup> T\_ شکل از جنس سیلیکون را به عنوان یک وسیله اختلاط سریع برای تعیین کارایی اختلاط مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با از بین رفتن تقارن جریان و به وجود آمدن گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه در تقاطع در اعداد رینولدز بالا، کارایی اختلاط افزایش چشمگیری دارد [۱۴].

بوت و همکاران در سال ۲۰۰۶، میکرومیکسرها<sup>۱</sup> با ابعاد کوچکتر و دامنه عدد رینولدز بزرگتر را بررسی کردند. آن‌ها

<sup>3</sup> Pressure Perturbation

<sup>1</sup> Micromixers

<sup>2</sup> Peclet Number

$$\frac{P}{\rho} = \beta = a^2 \quad (2)$$

در معادله (۲)، فشار  $P$  و ضریب تراکم پذیری مصنوعی است که معمولاً بین عدد ۳ تا ۱۰ تغییر می‌کند. بنابراین معادله پیوستگی به وسیله نرخ زمانی فشار به معادلات اندازه حرکت خطی مرتبط می‌شود.

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \beta \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (3)$$

معادلات اندازه حرکت خطی با توجه به فرضیات اساسی صورت گرفته به صورت معادله (۴) می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \rho V = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla V) \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است خواص فیزیکی مخلوط با مکان تغییر می‌کند که برای یافتن مقدار آن در هر نقطه باید معادلات انتقال جرم هر ذره را حل نمود.

نسبت جرمی هر ذره به صورت نسبت جرم ذره به جرم مخلوط توسط معادله (۵) توصیف می‌شود:

$$m_j = \frac{\rho_j}{\rho} \quad (5)$$

همچنین رابطه بین نسبت‌های جرمی در یک مخلوط دوتایی برابر است با:

$$\sum_{j=1}^n m_j = 1 \Rightarrow m_1 + m_2 = 1 \quad (6)$$

معادله انتقال جرم در یک مخلوط دوتایی به صورت زیر می‌باشد:

$$G_{diffusion} = -\rho D \nabla m \quad (7)$$

در معادله (۷)،  $D$  ضریب نفوذ ( $m^2/s$ ) می‌باشد. همچنین برای توصیف نفوذ دو سیال در یکدیگر از قانون فیک<sup>۱</sup> استفاده شده است. قانون نفوذ فیک نشان می‌دهد که شار نفوذ بر خلاف جهت گرادیان نسبت جرمی عمل می‌کند. با به کارگیری این مفاهیم، معادله انتقال جرم هر ذره به صورت معادله (۸) توصیف می‌شود [۲۱]:

$$\frac{\partial \rho m_j}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho m_j V) = \frac{1}{Pe} \nabla \cdot (\rho \nabla m_j) \quad (8)$$

همچنین معادلات اندازه حرکت خطی به صورت معادله (۹) توصیف می‌شود:

$$\frac{\partial \rho V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) \rho V = -\nabla P + \frac{1}{Re} \nabla \cdot (\mu \nabla V) \quad (9)$$

که در آن‌ها اعداد بی بعد رینولدز، اشمیت و پکلت به صورت زیر تعریف می‌شوند:

فرایند اختلاط را به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند [۱۵].

ویرک و همکاران در سال ۲۰۱۰، با استفاده از نرم‌افزار کامسول، اختلاط دو سیال را در اعداد رینولدز پایین در میکرومیکسر T\_ شکل شبیه‌سازی و اثرات سرعت و ابعاد میکرومیکسر را بر غلظت خروجی بررسی کردند [۱۶].

اکی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی اختلاط در میکروکانال‌های مختلف پرداختند. با توجه به نتایج آزمایشگاهی به دست آمده یک رابطه برای میکروکانال‌ها طراحی شد که بدون ایجاد افت فشار و یا کاهش اندازه کانال به عملکرد بهتری از اختلاط دست یابد [۱۷].

اوسی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به بررسی اختلاط آب-اتانول در میکرومیکسرهای T\_ شکل پرداختند. آن‌ها نشان دادند که در اعداد رینولدز پایین (کمتر از ۱۰۰) در میکرومیکسر گردابه ایجاد نمی‌شود. همچنین آن‌ها دریافتند که اختلاط در آب-اتانول بهتر از آب-آب صورت می‌گیرد [۱۸].

کالادو و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی تغییرات مربوط به خصوصیات جریان سیال نیوتنی در میکرومیکسرهای T\_ شکل پرداختند. آن‌ها دریافتند که عدم تقارن باعث بهبود اختلاط می‌شود [۱۹].

مطالعه حاضر به منظور بررسی هندسه‌های مختلف با موانع متفاوت در میکرومیکسرهای T\_ شکل به منظور دستیابی به بهترین عملکرد از لحاظ اختلاط موثرتر توسط دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است.

## ۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

برای بررسی کارایی اختلاط، معادلات جریان به همراه معادله پخش باید به صورت همزمان در هندسه‌های مورد نظر حل گردند. با فرض جریان آرام، دائمی و دو بعدی یک مخلوط دو جزئی از سیالات لزج و تراکم ناپذیر، معادلات حاکم ساده می‌گردند. برای شبیه‌سازی پدیده اختلاط، باید میدان جریان دو سیال همراه با معادلات انتقال جرم به صورت همزمان حل گردند. برای مرتبط نمودن معادلات پیوستگی و اندازه حرکت خطی از مفهوم تراکم پذیری مصنوعی استفاده می‌گردد [۲۰].

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

که در آن  $\tilde{\rho}$  چگالی مصنوعی می‌باشد که به وسیله سرعت مصنوعی  $a$  به فشار مرتبط می‌شود:

<sup>1</sup> Fick's Law

باریک روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط و میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط پرداخته شده است. در شکل (۱) می‌توان شش میکرومیکسر طراحی شده را مشاهده نمود. لازم به ذکر است که اعداد نوشته شده در شکل (۱) دارای ابعاد میلی‌متر می‌باشند.

همچنین در این مطالعه پهنای کانال ورودی برای هر شش میکرومیکسر ۰/۲۵ mm، سرعت ورودی ۰/۰۴ m/s و عدد رینولدز متوسط در ورودی برابر ۱۰ در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، سیال ورودی از کانال بالا، سیال اول و سیال ورودی از کانال پایین سیال دوم نامیده شده است. برای ورودی بالایی کسر جرمی سیال اول، برابر صفر و برای ورودی پایینی کسر جرمی سیال دوم، برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

علاوه بر این، برای هندسه‌های طراحی شده از مش‌بندی با المان‌های مثلثی به صورت نامنظم با تراکم بیشتر در نزدیکی مرزها و گوشه‌ها استفاده شده است. تعداد المان‌های مش‌بندی برای هندسه T-شکل ساده، ۱۳۹۶۰ عدد، برای میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط، ۲۱۶۳۴ عدد، برای میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط، ۱۹۶۷۲ عدد، برای میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط، ۲۰۸۴۸ عدد، برای میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط، ۲۳۶۴۰ و برای میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط، ۲۱۷۱۴ عدد می‌باشد.

در شکل (۲) می‌توان اندازه و تراکم المان‌های مش‌بندی را در محل انشعاب شش میکرومیکسر مشاهده نمایید. همچنین در شکل (۳) می‌توان کیفیت و تراکم المان‌های مش‌بندی شش میکرومیکسر را مشاهده نمود. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، در نزدیکی مرزها و گوشه‌ها، تراکم مش‌بندی بالا و اندازه المان‌های مش‌بندی کوچک‌تر می‌باشد.

$$Re = \frac{\bar{\rho} \bar{u} l}{\mu}, Sc = \frac{\mu}{\rho D}, Pe = Re.Sc \quad (10)$$

در معادله (۱۰)،  $l$  طول مشخصه (در اینجا پهنای کانال ورودی) می‌باشد. در غیاب مکش و دمش از دیواره و واکنش شیمیایی، شرط مرزی روی دیوار برای معادلات انتقال جرم به صورت معادله (۱۱) بیان می‌شود [۲۲]:

$$G_{wall} = -\rho D \nabla m_j = 0 \quad (11)$$

بر اساس غلظت نیز انتقال جرم به صورت ثابت در ورودی طبق معادله (۱۲) توصیف می‌شود.

$$C_{in} = \begin{cases} C_0 & x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

در خروجی، شرایط انتقال جرم معادله (۱۳) حاکم می‌باشد.

$$n \cdot (-D_i \nabla c_i) = 0 \quad (13)$$

با توجه به معادله (۱۳) می‌توان دریافت که گرادیان غلظت در مرز خروجی قابل چشم‌پوشی می‌باشد. در بقیه مرزها طبق معادله (۱۴) شرایط عایق در نظر گرفته می‌شود.

$$n \cdot (-D_i \nabla c_i + c_i u) = 0 \quad (14)$$

در معادله (۱۴)،  $n$  شماره مرز می‌باشد.

همچنین روی دیواره کانال‌ها شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده است.

در انتها برای بررسی قابلیت میکرومیکسر در اختلاط دو سیال، کمیتی با عنوان درجه اختلاط<sup>۱</sup> مطرح می‌شود، که در هر مقطعی از کانال اختلاط می‌توان طبق معادله (۱۵) محاسبه گردد [۲۳]:

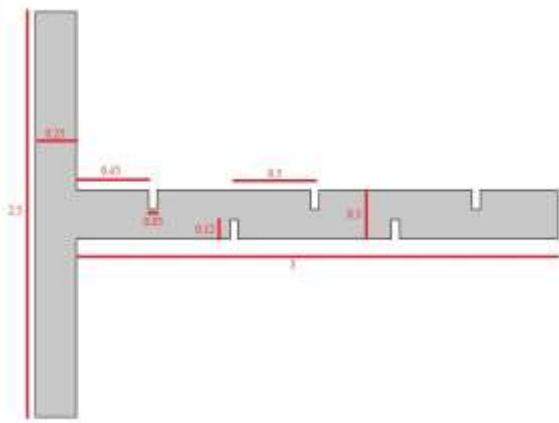
$$DM = 1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{c_i - \bar{c}}{\bar{c}} \right)^2} \quad (15)$$

در معادله (۱۵)،  $c_i$  غلظت اجزا در خروجی که مقدار غلظت از صفر تا یک تغییر می‌کند. مقدار صفر نشان دهنده عدم وجود جرم در آن نقطه و یک نشان دهنده این است که جرم تمام محل مورد نظر را فراگرفته است،  $\bar{c}$  غلظت خروجی در میکرومیکسر ایده‌آل (که برابر ۰/۵ است) و  $N$  تعداد ورودی‌ها می‌باشد. درجه اختلاط بر حسب درصد از صفر تا صد درصد تقسیم می‌شود. هرچه این مقدار بیشتر باشد اختلاط کامل‌تری رخ می‌دهد و بالعکس، هرچه این مقدار کمتر باشد، اختلاط ناقص‌تری رخ می‌دهد.

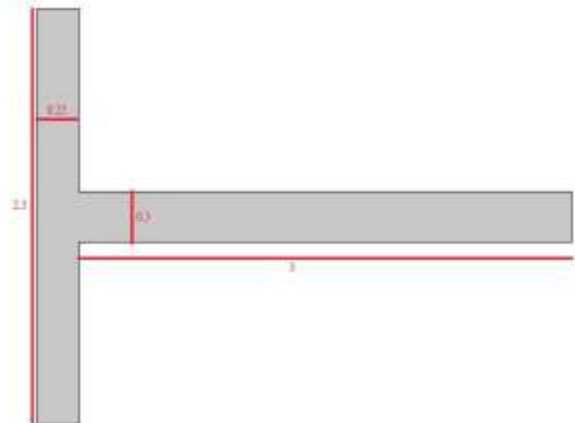
### ۳- بیان مسئله

در این مطالعه به بررسی و شبیه‌سازی اثر اختلاط در شش میکرومیکسر T\_شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی

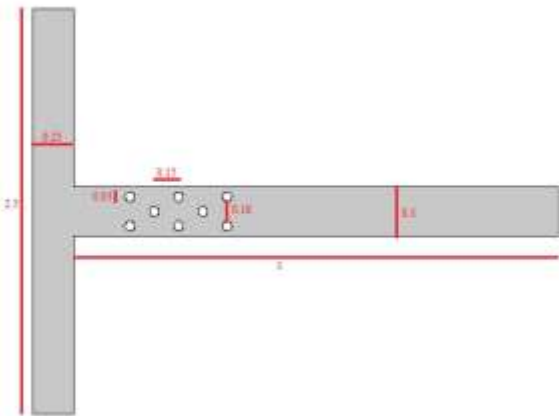
<sup>۱</sup> Mixing Degree



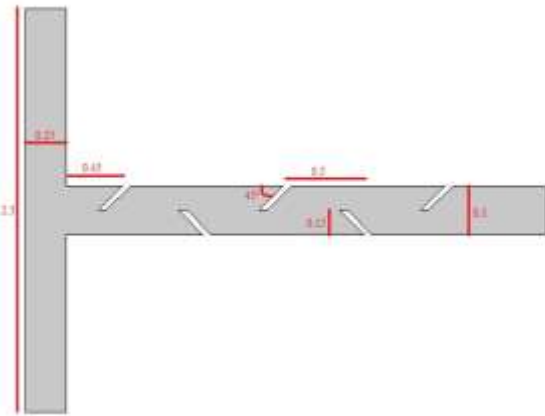
ب: میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال  
اختلاط



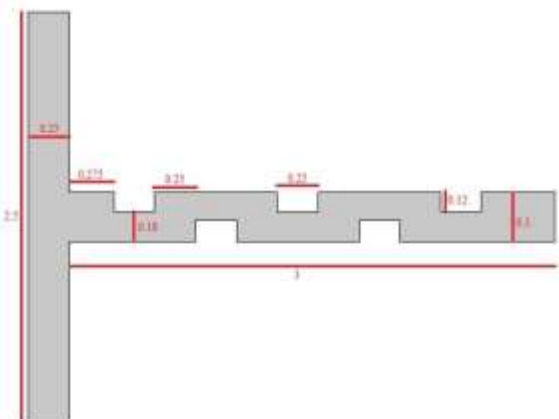
الف: میکرومیکسر T\_شکل ساده



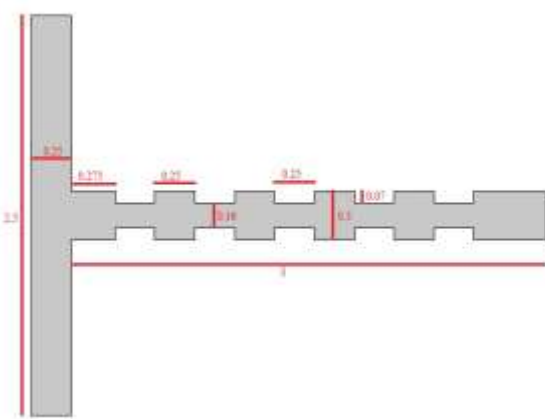
د: میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط



ج: میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال  
اختلاط

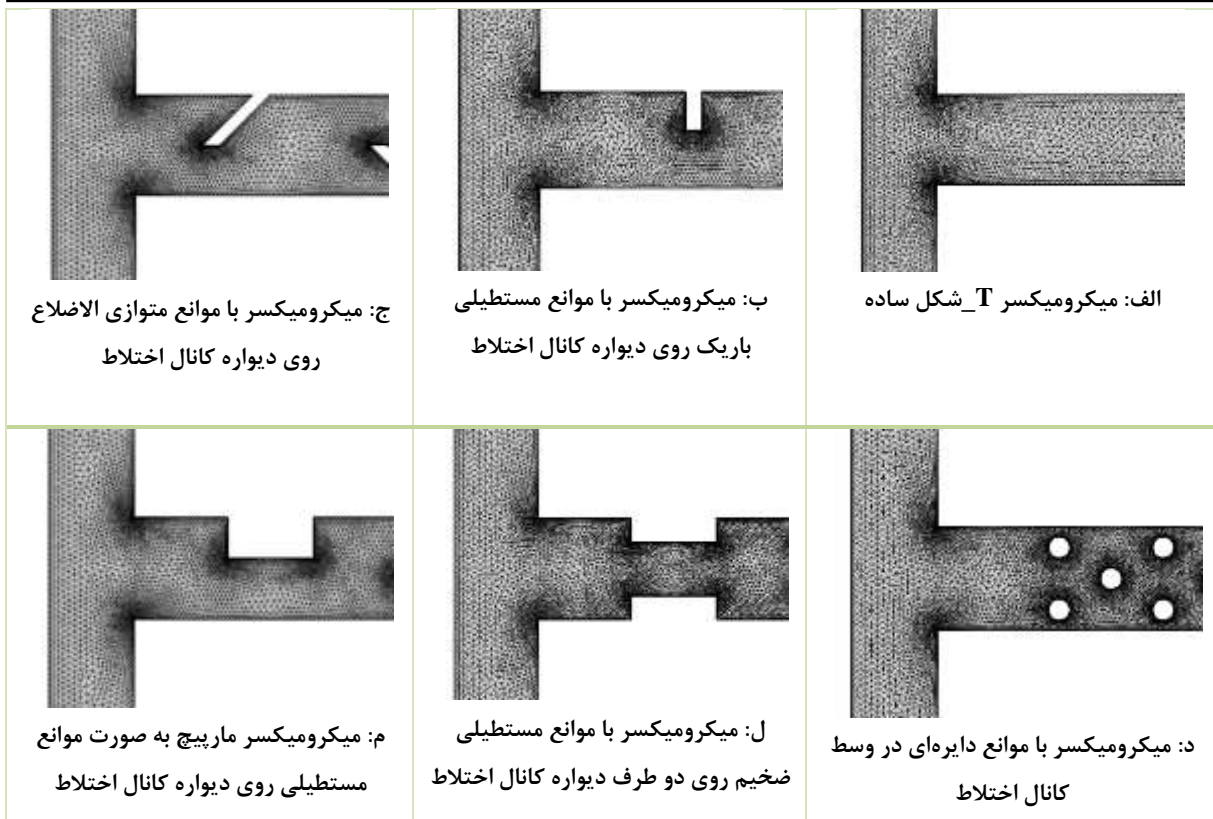


م: میکرومیکسر ماریچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره  
کانال اختلاط

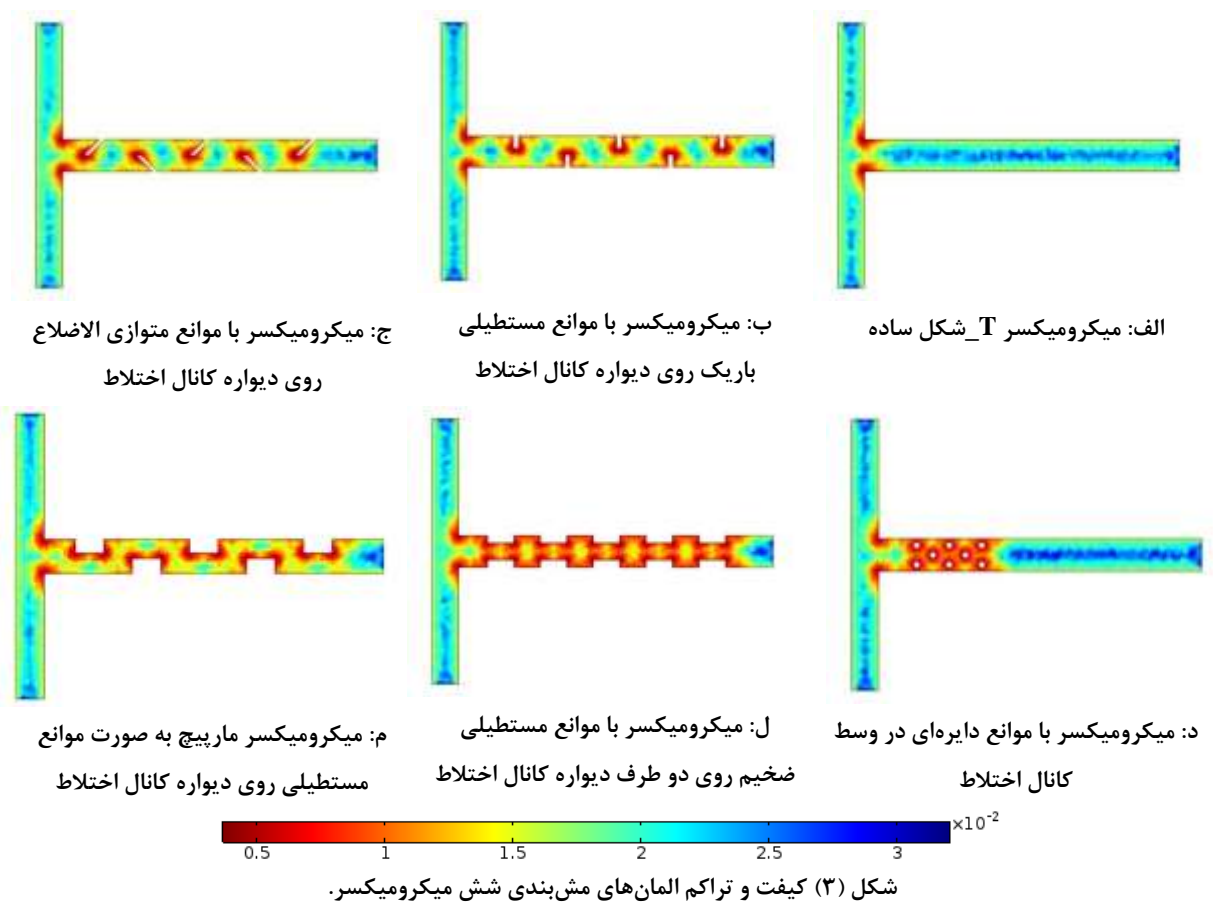


ل: میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره  
کانال اختلاط

شکل (۱) انواع هندسه‌های مختلف میکرومیکسر (ابعاد میلی‌متر).



شکل (۲) اندازه و تراکم المان‌های مش‌بندی در محل انشعاب شش میکرومیکسر .

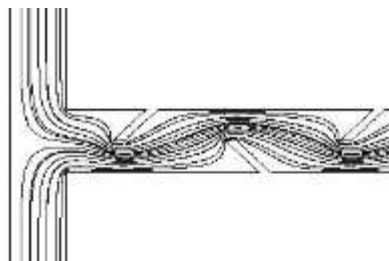


پدیده نفوذ مولکولی<sup>۱</sup> می‌باشد. همانطور که مشخص است خطوط جریان دقیقاً پس از انشعاب مستقیم و موازی با یکدیگر هستند و خمیدگی‌های سطوح را به آرامی دنبال می‌کنند. این نشان می‌دهد میکرومیکسرهای غیر فعال در رینولدزهای پایین قابلیت چندانی برای اختلاط جریان نخواهند داشت. بنابراین استفاده از روش‌های اختلاط فعال ضروری می‌باشد. در شکل (۵) تغییرات غلظت هندسه‌های مختلف در  $Pe = 10$  پس از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه قابل مشاهده می‌باشد. در شکل (۶) تغییرات غلظت هندسه‌های مختلف در  $Pe=100$  پس از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه قابل مشاهده می‌باشد. در شکل (۷) تغییرات غلظت هندسه‌های مختلف در  $Pe=1000$  پس از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه قابل مشاهده می‌باشد. در شکل (۸) می‌توان تغییرات غلظت دو گونه را در عرض کانال اختلاط میکرومیکسر T\_شکل ساده بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe=100$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه مشاهده نمود.

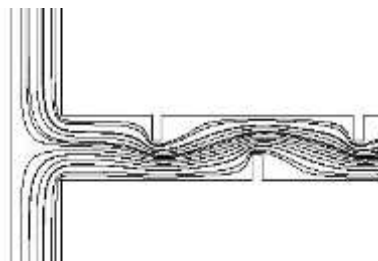
نقاط قرمز دارای مش‌بندی با تراکم زیاد و اندازه المان کوچک‌تر می‌باشد و هرچه به رنگ آبی نزدیک‌تر می‌شویم تراکم کمتر و اندازه المان‌ها بزرگ‌تر می‌شود. همچنین، به منظور اعتبار سنجی نتایج ارائه شده، تغییرات میدان سرعت و تغییرات غلظت در میکرومیکسر T\_شکل ساده را با نتایج حاصل از مطالعه ویرک و همکاران [۱۶] بررسی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد نمونه حاضر همخوانی خوبی با نتایج حاصل از مطالعه ویرک و همکاران دارد.

#### ۴- نتایج و بحث

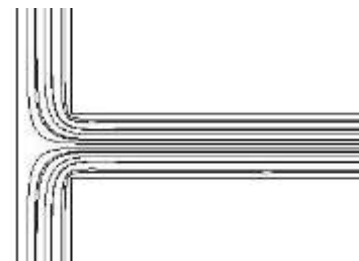
در شکل (۴) خطوط جریان سرعت برای میکرومیکسرهای مورد بررسی در  $Re = 10$  قابل مشاهده می‌باشد. از آنجا که عدد رینولدز در این میکرومیکسرها پایین است، گردابه‌ای در کانال اختلاط دیده نمی‌شود که بتواند اختلاط را بهبود ببخشد. در این حالت نیروی لزجی، نیروی غالب وارد بر جریان سیال بوده و سازوکار غالب در انتقال جرم



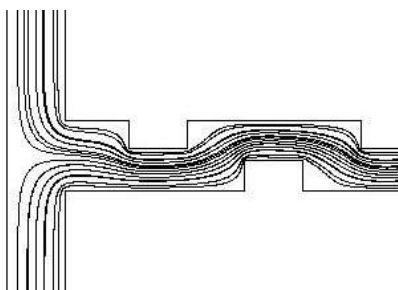
ج: میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط



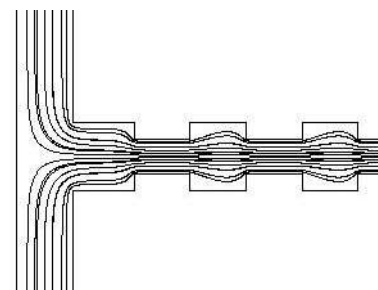
ب: میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط



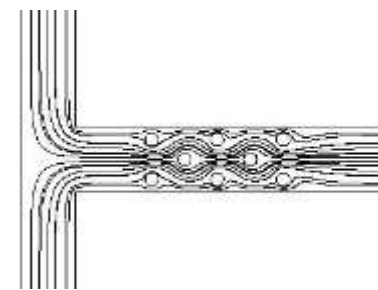
الف: میکرومیکسر T\_شکل ساده



م: میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط



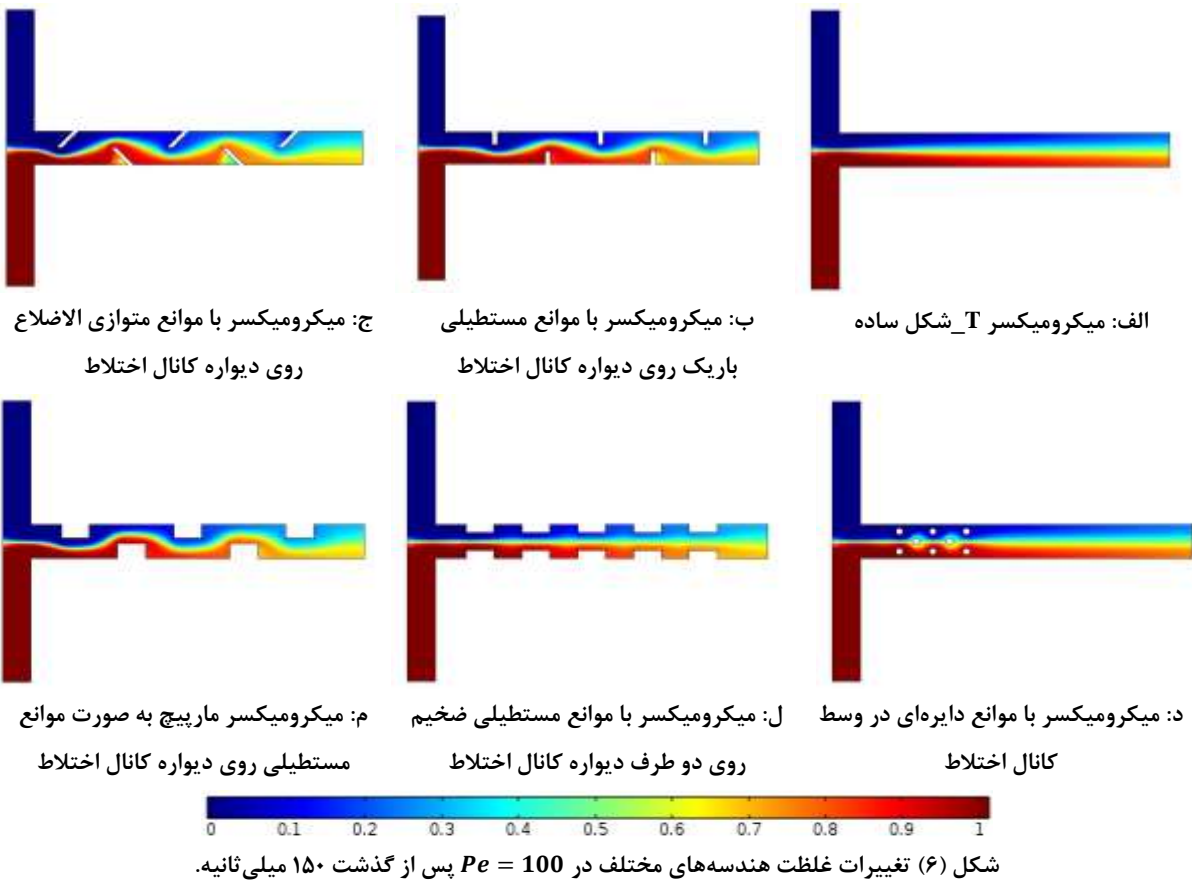
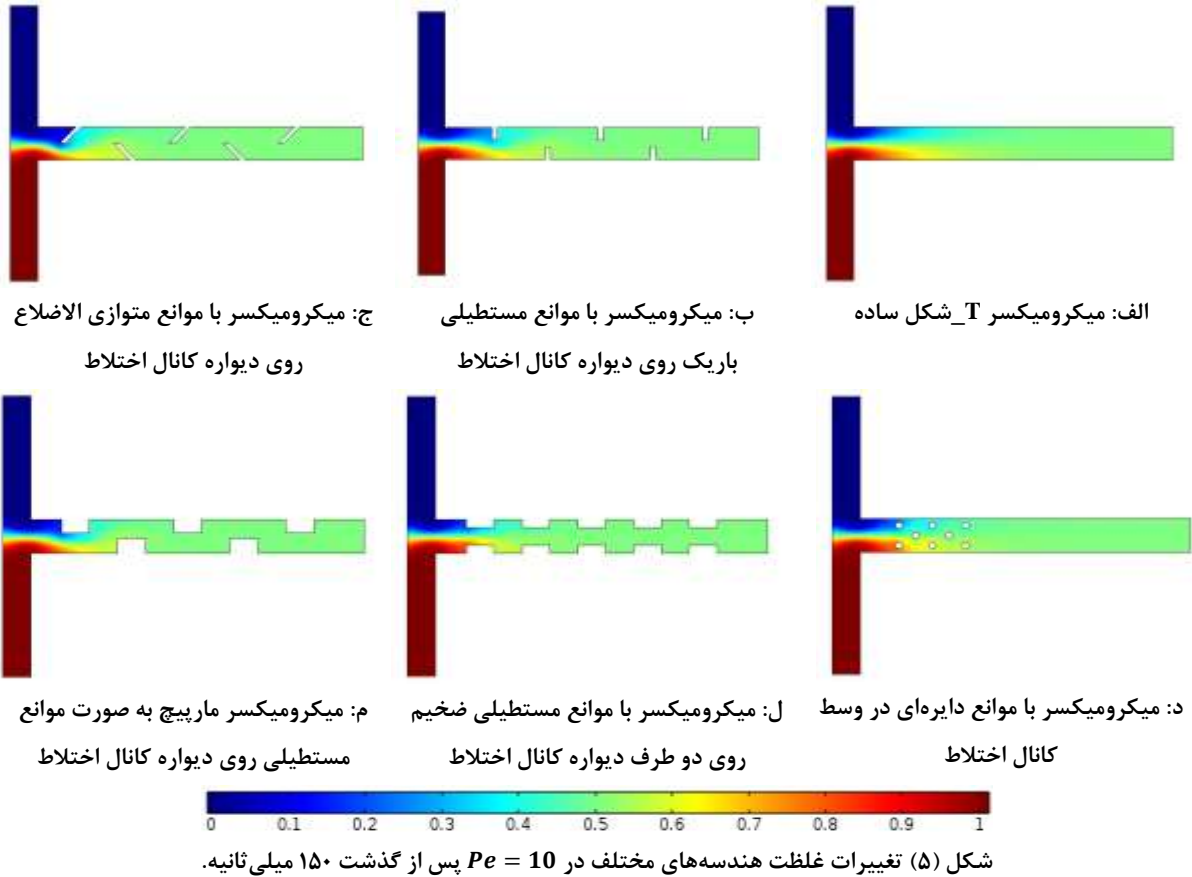
ل: میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط



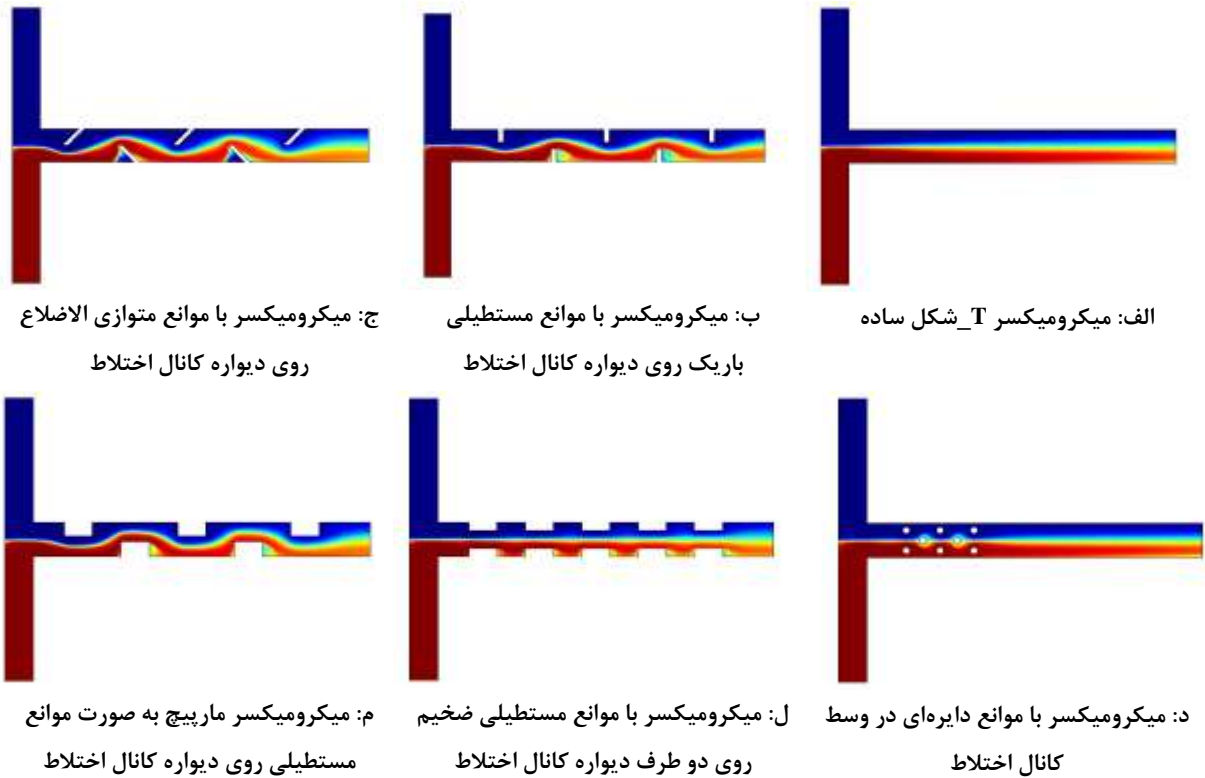
د: میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط

شکل (۴) خطوط جریان سرعت هندسه‌های مختلف در  $Re = 10$ .

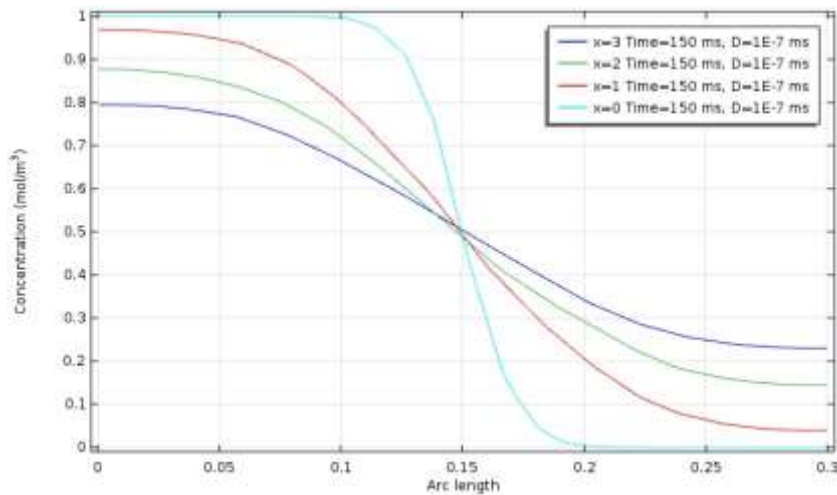
<sup>1</sup> Molecular Diffusion







شکل (۷) تغییرات غلظت هندسه‌های مختلف در  $Pe = 1000$  پس از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه.



شکل (۸) غلظت دو گونه در عرض کانال اختلاط میکرومیکسر T\_شکل ساده بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe = 100$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه.

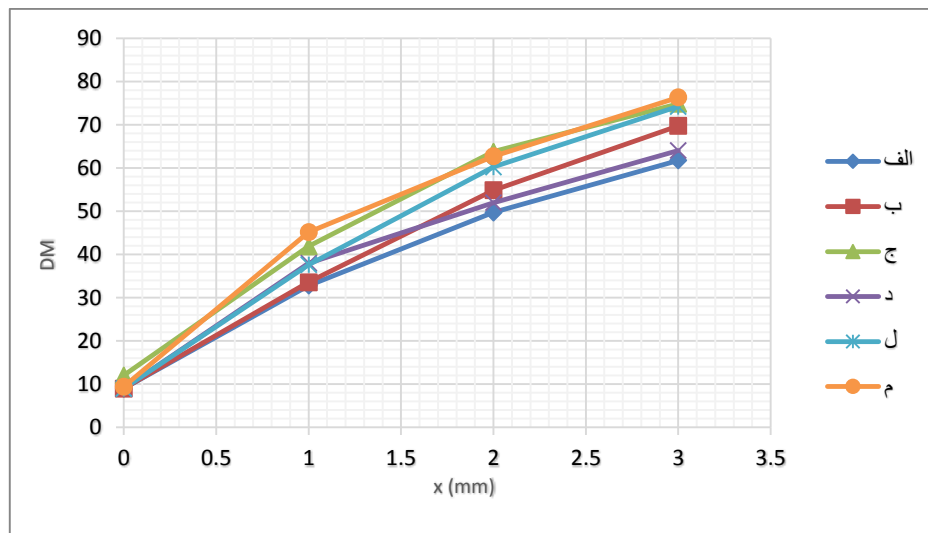
همانطور که در شکل (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط دارای بیشترین درجه اختلاط می‌باشد و پس از آن به ترتیب میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر T\_شکل ساده و در انتها میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط قرار گرفته‌اند.

با توجه به نتایج می‌توان دریافت که هندسه‌های به صورت مارپیچ و با موانع در دیواره، اختلاط را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهند و هندسه‌های با موانع در وسط کانال نه تنها باعث بهبود اختلاط نمی‌شوند، بلکه اختلاط را نیز نسبت به هندسه ساده‌تر کمتر می‌کنند.

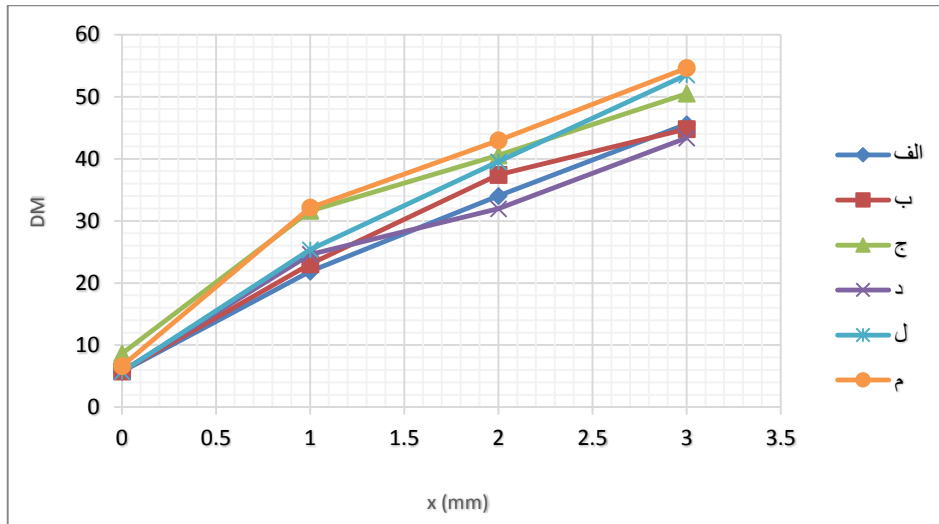
علاوه بر این باید به این نکته نیز توجه کرد که میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع، میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی و میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط دارای بیشترین افت فشار می‌باشند و در مواردی که تغییرات فشار پارامتر تعیین کننده می‌باشد باید از هندسه‌های ساده‌تر استفاده نمود تا افت فشار کمتری را مشاهده نمود.

همانطور که در شکل (۸) قابل مشاهده می‌باشد، هرچه به انتهای طول کانال اختلاط نزدیکتر می‌شویم، تغییرات غلظت دو گونه در عرض کانال به یکدیگر نزدیکتر می‌شود. در ابتدای کانال اختلاط (آبی کمرنگ) دو گونه نفوذ آنچنانی در یکدیگر نداشته‌اند و همان مقادیر غلظت‌های اولیه می‌باشند، اما در انتهای کانال (آبی پررنگ)، بر اثر نفوذ گونه‌ها در یکدیگر مشاهده می‌شود که غلظت دو گونه به یکدیگر نزدیکتر شده و نشان دهنده اختلاط بهتر می‌باشد (در شکل (۸)،  $x=0$  نشان دهنده ابتدای کانال انشعاب،  $x=1$  دو گونه ۳۳ درصد از طول کانال انشعاب،  $x=2$  دو گونه ۶۶ درصد از طول کانال انشعاب و در  $x=3$  دو گونه ۹۹ درصد از طول کانال انشعاب را طی نموده‌اند). لازم به ذکر است اگر غلظت دو گونه در طول کانال اختلاط به صورت خط افقی در بیاید، نشان دهنده اختلاط کامل می‌باشد، یعنی در عرض کانال دو گونه دارای اختلاط  $0.15 \text{ (mol/m}^3\text{)}$  می‌باشند.

در شکل (۹) می‌توان تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسر را بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe = 100$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه مشاهده نمود. در شکل (۱۰) می‌توان تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسر را بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe = 1000$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه مشاهده نمود.



شکل (۹) تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسر را بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe = 100$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه.



شکل (۱۰) تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسرها را بر حسب فاصله از انشعاب در  $Pe = 1000$  بعد از گذشت ۱۵۰ میلی ثانیه.

### ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه به بررسی و شبیه سازی جریان و آمیختگی دو سیال تراکم ناپذیر در شش میکرومیکسر T\_ شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی باریک روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع دایره ای در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مستطیلی ضخیم روی دو طرف دیواره کانال اختلاط و میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی روی دیواره کانال اختلاط، برای اعداد رینولدز و اشمیت مختلف در مخلوط‌هایی با خواص ثابت و متغییر پرداخته شده است. همچنین تغییرات درجه اختلاط بر حسب زمان در خروجی میکرومیکسر و درجه اختلاط در طول کانال خروجی بر حسب فاصله از انشعاب برای تمامی میکرومیکسرها بررسی و با هم مقایسه شده است. با توجه به نتایج می‌توان دریافت که میکرومیکسر مارپیچ به صورت موانع مستطیلی و میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع روی دیواره کانال، اختلاط را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهند و میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال نه تنها باعث بهبود اختلاط نمی‌شوند، بلکه اختلاط را نیز نسبت به میکرومیکسر T\_ شکل ساده کمتر می‌کنند.

به طور کلی می‌توان دریافت که افزایش عدد اشمیت و به تبع آن افزایش عدد پکلت، به معنای کاهش ضریب نفوذ دو سیال در یکدیگر می‌باشد و به دلیل اینکه سازوکار اصلی اختلاط در ابعاد میکرو ضریب نفوذ می‌باشد، بنابراین این امر سبب کاهش اختلاط دو سیال می‌گردد. بالعکس کاهش عدد

اشمیت به معنای افزایش ضریب نفوذ بوده و سبب افزایش شدت اختلاط می‌شود. همچنین در جریان آرام، افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد پکلت می‌شود و در نتیجه منجر به کاهش شدت اختلاط دو سیال می‌گردد. در صورتی که افزایش عدد رینولدز به اندازه‌ای باشد که سبب تغییر در رژیم جریان و ناپایدار کردن جریان سیال گردد، با تغییر سازوکار اختلاط، باعث افزایش شدت اختلاط دو سیال می‌شود.

### ۹- مراجع

- [1] Yarin, L. P., Mosyak A., and Gad Hetsroni, "Fluid Flow, Heat Transfer and Boiling in Micro-Channels", Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] Kumar, Vimal, Marius Paraschivoiu, and K. D. P. Nigam, "Single-Phase Fluid Flow and Mixing in Microchannels", Chemical Engineering Science, Vol. 66, No.7, pp.1329-1373, 2011.
- [3] Zimmerman, William BJ, ed., "Microfluidics: History, Theory and Applications", Vol. 466, Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] Baldyga, J., and J. R. Bourne, "The Effect of Micromixing on Parallel Reactions", Chemical Engineering Science, Vol.45, No.4, pp.907-91, 1990.
- [5] Fourcade, E., et al., "The Influence of Micromixing on Molecular Weight Distribution During Controlled Polypropylene Degradation in a Static Mixer Reactor", Chemical Engineering Science, Vol.56, No.23, pp.6589-6603, 2001.
- [6] Liu, Ying Zheng, Byoung Jae Kim, and Hyung Jin Sung, "Two-Fluid Mixing in a Microchannel", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.25, No.6, pp.986-995, 2004.

- [21] Kays, William Morrow, Michael E., "Crawford, and Bernhard Weigand. Convective Heat and Mass Transfer", Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [22] Ozisik, M. Necati., "Heat Transfer: a Basic Approach, 1985.
- [23] Chung, Chen-Kuei, C-Y. Wu, and T. R. Shih., "Effect of Baffle Height and Reynolds Number on Fluid Mixing", *Microsystem Technologies*, Vol.14, No.9, 1317-1323, 2008.
- [7] Liu, Minye, "Computational Study of Convective-Diffusive Mixing in a Microchannel Mixer", *Chemical Engineering Science*, Vol.66, No.10, pp.2211-2223, 2011.
- [8] Lee, C. Y. Chang, C. L. Wang, Y. N. Fu, L. M., "Microfluidic Mixing :A Review, *International Journal of Molecular Sciences*", Vol.12, No.5, pp.3263-3287, 2011.
- [9] Nguyen, N. T., Wu Z., "Micromixers-a Review, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.15, No.2, pp.1-16, 2005.
- [10] Veenstra, T. T., et al., "Characterization Method for a New Diffusion Mixer Applicable in Micro Flow Injection Analysis Systems", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.9, No.2, 1999.
- [11] Gobby, D., P. Angeli, and Asterios Gavriilidis. "Mixing Characteristics of T-type Microfluidic Mixers", *Journal of Micromechanics and microengineering*, Vol.11, No.2, 2001.
- [12] Beebe, David J., et al, "Passive Mixing in Microchannels: Fabrication and Flow Experiments", *Mécanique & industries*, Vol.2, No.4, 343-348, 2001.
- [13] Bertsch, Arnaud, et al., "Static Micromixers based on Large-Scale Industrial Mixer Geometry", *Lab on a Chip*, Vol.1, No.1, pp.56-60, 2001.
- [14] Wong, Seck Hoe, Michael CL Ward, and Christopher W. Wharton. "Micro T-mixer as a Rapid Mixing Micromixer", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.100, No.3, pp. 359-379, 2004.
- [15] Bothe, Dieter, Carsten Stemich, and Hans-Joachim Warnecke, "Fluid Mixing in a T-shaped Micro-Mixer", *Chemical Engineering Science* Vol.61, No.9, pp.2950-2958, 2006.
- [16] Virk, Muhammad S., Arne E. Hold, and S. Kaennakham, "Numerical Analysis of Fluid Mixing in T-shape Micro Mixer", *COMSOL users conference, Grenoble*. 2007.
- [17] Aoki, Nobuaki, Takashi Fukuda, Norihide Maeda, and Kazuhiro Mae, "Design of Confluence and Bend Geometry for Rapid Mixing in Microchannels", *Chemical Engineering Journal* Vol.227, pp.198-202, 2013.
- [18] Orsi, Gianni, Mina Roudgar, Elisabetta Brunazzi, Chiara Galletti, and Roberto Mauri., "Water-Ethanol Mixing in T-shaped Microdevices", *Chemical Engineering Science*, Vol.95, pp.174-183, 2013.
- [19] Calado, Bernardo, Aires dos Santos, and Viriato Semiao, "Characterization of the Mixing Regimes of Newtonian Fluid Flows in Asymmetrical T-Shaped Micromixers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.72, pp.218-227, 2016.
- [20] Chorin, Alexandre Joel, "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems", *Journal of Computational Physics*, Vol.135, No.2, pp.118-125, 1997.