



## اثر موقعیت موانع و تزریق جریان بر اختلاط جریان دوگازی در میکروکانال

الیاس لکزیان<sup>\*</sup>، حمیدرضا فرشی فصیح

دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

### کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو

طول اختلاط

موقعیت موانع

نسبت انسداد

تزریق جریان

**خلاصه:** در پژوهش حاضر، به منظور بررسی اثر تعداد، موقعیت موانع و تزریق جریان بر اختلاط جریان در میکروکانال با طول ۱۶ میکرومتر و ارتفاع ۱ میکرومتر از روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو استفاده شده است. از معیار طول اختلاط که برابر با طولی است که در آن دو گونه کاملاً با یکدیگر مخلوط می‌شوند، برای بررسی اختلاط جریان استفاده شده است. هشت نمونه با نسبت انسداد مختلف برای بررسی اثر موانع در نظر گرفته شده است. نسبت انسداد، بیانگر کاهش سطح مقطع عبوری جریان از داخل کانال با اضافه شدن موانع است. در همه موارد دو گونه گازی کربن مونواکسید و نیتروژن توسط یک صفحه که تا یک سوم طول کانال کشیده شده از هم جدا می‌شوند. با افزایش نسبت انسداد، طول اختلاط تا ۱۰٪ کاهش و دبی جرمی نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین تزریق جریان به داخل کانال با در نظرگیری چهار نمونه بررسی شد. نمونه‌ها عبارتند از: نمونه اول فاقد تزریق، نمونه دوم با تزریق جریان عرضی، نمونه سوم با تزریق جریان خلاف جهت و نمونه چهارم با تزریق عرضی از داخل مانع. طول اختلاط در نمونه دوم و سوم به ترتیب ۱۷٪ و ۵٪ افزایش یافت. در نمونه چهارم به دلیل وجود مانع، طول اختلاط ۲٪ کاهش یافت.

### ۱- مقدمه

در ابعاد میکرو انجام شود که اکنون جزء زمینه‌های جذاب تحقیقاتی است. از جمله مطالعات اولیه در این زمینه در میکرومجارای توسط یان و فاروک [۱۳] انجام شده است. مدل آنها شامل یک کانال است که ورودی آن توسط یک صفحه جداکننده جریان به دو قسمت تقسیم شده است. از بخش بالا جریان گاز اکسیژن و از بخش پایینی جریان گاز هیدروژن وارد می‌شود. صفحه جداکننده تا یک سوم طول کانال ادامه یافته و سپس دو جریان با هم ترکیب می‌شوند. یان و فاروک نشان داده‌اند که طول اختلاط با افزایش اختلاف فشار ورود و خروج از کانال، افزایش می‌یابد. ونگ و لی [۱۴] تحقیق مشابهی انجام داده‌اند اما به منظور حذف اثرات تفاوت جرم مولکولی ذرات، از گاز نیتروژن و کربن مونواکسید به عنوان گازهای ورودی استفاده نموده‌اند. مشاهدات آنها نشان داده است که طول اختلاط با عکس عدد نادسن و دمای گاز متناسب بوده و با عدد ماخ رابطه مستقیم دارد. مرجع [۱۵] اختلاط گاز نیتروژن و کربن مونواکسید را در یک کانال  $T$ -شکل بررسی کرده است. نتایج مرجع [۱۵] نشان می‌دهد که در رژیم‌های جریان با

پیشرفت چشمگیر در ساخت ابزارآلات میکروالکترومکانیکی<sup>۱</sup> و برتری این ابزارآلات در ابعاد میکرو نسبت به مقیاس بزرگ آنها سبب استفاده از این وسایل به ویژه در زمینه‌هایی چون اختلاط [۴-۱] جریان شده است. به دلیل اینکه اختلاط در ابعاد میکرو به کندی صورت می‌گیرد و بیشتر بر اساس نفوذ<sup>۲</sup> ذرات است، تحقیقات زیادی در زمینه ساخت میکرومیکسرهایی شده است که در آن اختلاط جریان در این ابعاد سریعتر انجام شود [۵ و ۶]. به طور کلی اختلاط در ابعاد میکرو به دو دسته کلی تقسیم می‌شود: اختلاط غیرفعال [۹-۷] و اختلاط فعال [۱۰ و ۱۱]. در اختلاط غیر فعال، مخلوط شدن دو جریان از طریق تغییر در ساختار کانال انجام می‌گیرد و در اختلاط فعال، اختلاط از طریق ابزارآلاتی نظیر میکروپمپ تسریع می‌شود [۱۲]. اختلاط جریان می‌تواند به صورت اختلاط جریان‌های گازی

- 1 Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS)
- 2 Diffusion

<sup>\*</sup> نویسنده عهده‌دار مکاتبات: e.lekzian@semnan.ac.ir



شبهه‌سازی‌ها از یک رایانه با ۷ هسته و مقدار رم ۳۲ گیگابایت استفاده شده است و زمان هر یک از شبهه‌سازی‌ها به طور متوسط ۷۲ ساعت می‌باشد. طول اختلاط بر اساس کسر جرمی گونه‌های ورودی تعریف می‌شود و با تعریف پارامتر نسبت انسداد، اثر موقعیت، و تعداد موانع بر اختلاط جریان بررسی می‌شود. همچنین اثر تزریق یک جریان عرضی و معکوس در میکروکانال بر طول اختلاط بررسی می‌شود.

## ۲- مدل عددی و شرایط مرزی حلگر

### ۲-۱- معادلات کلی

رفتار جریان گاز در ابعاد میکرو با رفتار گاز در ابعاد مزو و ابعاد بزرگ کاملاً متفاوت است. در ابعاد میکرو، فرض پیوستگی جریان سیال دیگر معتبر نیست [۲۱]. بنابراین روش‌های معمول مانند سی‌اف‌دی<sup>۱</sup> برای تحلیل جریان در این ابعاد به اندازه کافی دقیق به نظر نمی‌رسند. یکی از روش‌های شناخته شده برای چنین ابعادی روش شبهه‌سازی مستقیم مونت‌کارلو یا دی‌اس‌ام‌سی<sup>۲</sup> است که حل عددی معادلات بولتزمن<sup>۳</sup> را ارائه می‌کند. در ابعاد میکرو و نانو، معادلات بولتزمن می‌توانند تحلیل دقیقی از رفتار جریان ارائه دهند. معادله بولتزمن به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(nf) + c \cdot \frac{\partial}{\partial r}(nf) + F \cdot \frac{\partial}{\partial c}(nf) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^{2\pi} n^2 (f^* f_1^* - ff_1) c_r \sigma d\Omega dc_1 \quad (1)$$

که در رابطه فوق،  $f$  تابع توزیع سرعت،  $F$  نیروی بین دو ذره،  $c$  سرعت ذره است.  $n$  چگالی عددی،  $\sigma$  سطح مقطع برخورد و  $c_r$  سرعت نسبی بین دو ذره است. سایر پارامترها در بخش علائم توضیح داده شده‌اند. همچنین در یک مخلوط گازی که شامل  $s$  گونه مختلف می‌باشد، برای هرگونه، تابع توزیع مجزایی در نظر گرفته می‌شود. در این حالت معادلات بولتزمن به یک سری  $s$  معادله‌ای تبدیل می‌شوند و هر یک از گونه‌ها با زیروند  $p$  یا  $q$  نمایش داده می‌شوند. معادله بولتزمن برای گونه  $p$  در یک مخلوط به صورت زیر

عدد نادسن بالاتر، طول اختلاط کاهش یافته و افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی منجر به افزایش طول اختلاط می‌شود. ریحانیان و همکاران [۱۶] اختلاط جریان گاز نیتروژن و کربن‌مونواکسید را در کانالی با صفحه جداکننده و با قرار دادن دو مانع به فاصله ۰/۳ میکرومتر از انتهای صفحه جداکننده بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که طول اختلاط با افزایش ارتفاع موانع کاسته شده، اما منجر به کاهش ۰/۱۴ درصدی دبی جرمی نیز می‌شود. دربنندی و صبوری [۱۷] به بررسی اثر کاهش قطر گلوگاه در یک نانوکانال با طول ۲ میکرومتر و عرض ۰/۴ میکرومتر پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با کاهش قطر گلوگاه، طول اختلاط کاهش یافته است. آن‌ها همچنین نشان داده‌اند که کاهش قطر گلوگاه کانال منجر به کاهش دبی جرمی می‌شود، اما اثر کاهش طول اختلاط کمتر از کاهش دبی جرمی است. در تحقیقی دیگر، دربنندی و لکزیان [۱۸] اختلاط جریان را در یک کانال بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با افزایش اختلاف فشار ورودی و خروجی، طول اختلاط افزایش یافته و همچنین افزایش نسبت فشار گونه‌های ورودی، طول اختلاط را کاهش می‌دهد. دربنندی و همکاران به بررسی اثر زوایای ورود جریان و همچنین ارتفاع کانال ورودی گونه‌ها بر اختلاط جریان در یک میکرومیکسر پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که با کاهش ارتفاع ورودی کانال، اختلاط تسریع می‌یابد و با افزایش زاویه جریان ورودی، طول اختلاط کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر، هوآنگ و همکاران [۱۹] به صورت آزمایشگاهی اختلاط جریان نیتروژن و اکسیژن را در یک کانال  $T$ -شکل مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها مشاهده کرده‌اند که با افزایش عدد رینولدز جریان و همچنین افزایش اختلاف فشار، طول اختلاط افزایش می‌یابد. اخیراً و در تحقیقی دیگر هوآنگ و همکاران [۲۰] به صورت آزمایشگاهی به بررسی اختلاط سه نوع گاز نیتروژن، آرگون و هلیوم با گاز اکسیژن در یک کانال  $T$ -شکل پرداخته‌اند. مشاهدات آنها نشان داده است که در سرعت‌های پایین‌تر از ۳۰ متر بر ثانیه، اختلاط نیتروژن-اکسیژن سریع‌تر از آرگون-اکسیژن و هلیوم-اکسیژن است و در سرعت‌های بالاتر از ۳۰ متر بر ثانیه اختلاط آرگون-اکسیژن سریع‌تر از نیتروژن-اکسیژن و هلیوم-اکسیژن است.

در پژوهش حاضر با استفاده از زبان برنامه‌نویسی در نرم‌افزار فرتن ۹۰ روش دی‌اس‌ام‌سی پیاده‌سازی شده است و به بررسی اثرات موانع در جریان، به منظور بهبود عملکرد میکسر پرداخته می‌شود. برای

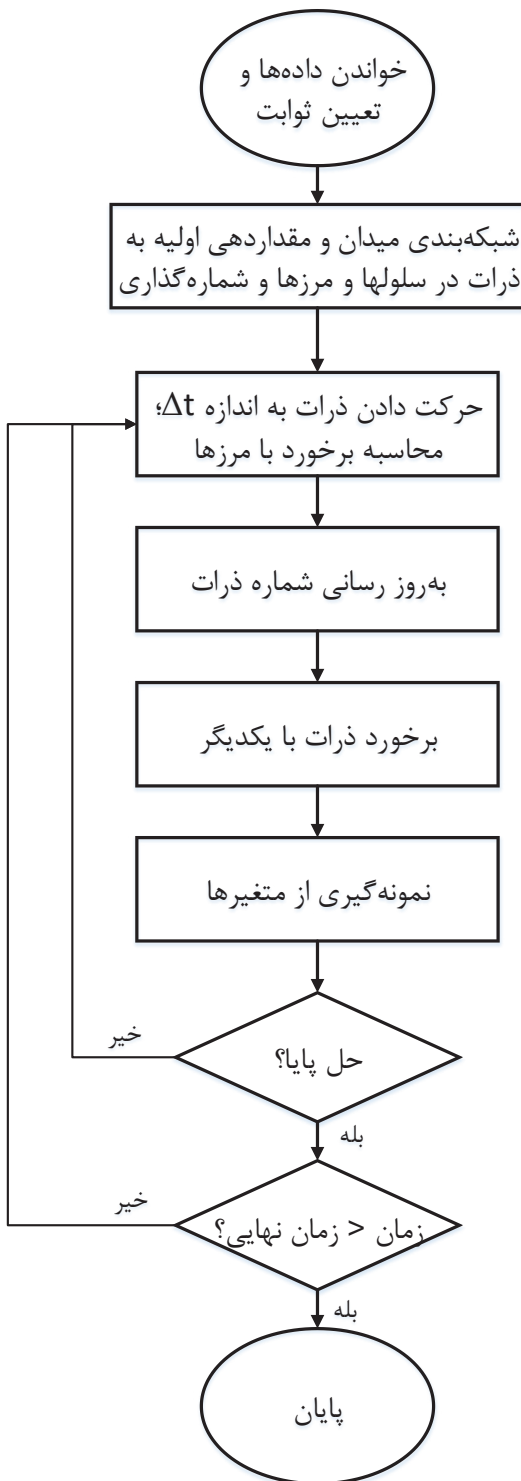
1 Computational Fluid Dynamics (CFD)  
2 Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)  
3 Boltzmann

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_p f_p) + c_p \cdot \frac{\partial}{\partial r}(n_p f_p) + F \cdot \frac{\partial}{\partial C}(n_p f_p) = \sum_{q=1}^s \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n_p n_q (f_p^* f_{1q}^* - f_p f_{1q}) c_{pq} \sigma_{pq} d\Omega dc_{1q} \quad (2)$$

در این مقاله معادلات به صورت پایا بررسی می‌شوند، لذا جمله مشتق زمانی از سمت چپ معادلات (۱) و (۲) حذف خواهد شد.

## ۲-۲- الگوریتم حل روش دی‌اس‌ام‌سی

روش مونت کارلو معادلات (۱) و (۲) را به صورت عددی حل می‌کند. پایه روش مونت کارلو بر اساس محاسبه حرکت ذرات و سپس برخورد آنها می‌باشد. به منظور کاهش هزینه محاسباتی، میدان مورد بررسی، توسط یک شبکه به سلول‌هایی تقسیم‌بندی می‌شود. اندازه این سلول‌ها متناسب با متوسط طول پویس آزاد مولکولی انتخاب می‌شود. در هر سلول تعداد مشخصی ذره قرار می‌گیرد. سپس روش مونت کارلو که شامل چهار مرحله اصلی است، اعمال می‌شود: حرکت ذرات، شماره‌گذاری ذرات، شبیه‌سازی برخورد، نمونه‌گیری از متغیرهای ماکروسکوپی میدان. ذرات در داخل میدان حرکت داده می‌شوند. به هر یک از ذرات شماره‌ای تخصیص داده می‌شود تا موقعیت مکانی و همچنین برخورد آن با دیگر ذرات مشخص باشد. سپس برخورد ذرات با یکدیگر و با دیواره‌های میدان شبیه‌سازی می‌شود. از شرایط مرزی، ذرات ورودی و یا خروجی اخذ و شماره‌گذاری می‌شوند. برخورد ذرات با استفاده از مدل‌های نیرویی (که در این مقاله مدل کره سخت متغیر می‌باشد) شبیه‌سازی می‌شود. در مدل کره سخت متغیر، دو ذره برخوردی به صورت کره در نظر گرفته شده و سطح مقطع برخورد وابسته به دما می‌گردد. پس از برخورد و مشخص نمودن مجدد موقعیت هر یک از ذرات، متغیرهای ماکروسکوپی مانند فشار، دما، و سرعت با استفاده از سرعت ذرات، نمونه‌گیری می‌شوند. نمودار الگوریتم حل این روش در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. الگوریتم حل روش دی‌اس‌ام‌سی

Fig. 1. DSMC method solution algorithm

، چگالی عددی در هر سلول است. منظور از  $m$  وزن مولکولی هر ذره است. در صورت کسر، مقدار  $p$  فقط شامل یکی از گونه‌هاست (مثلاً  $p = 1$  یعنی گونه اول) و در مخرج کسر  $p$  برای تمامی گونه‌ها محاسبه می‌شود. در این مقاله  $p = 1$  یعنی گاز نیتروژن و  $p = 2$  یعنی گاز کربن مونواکسید. بر اساس رابطه (۶)، هنگامی که مقدار  $\xi < 0.102$  شود، جریان کاملاً مخلوط شده در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲ تغییرات  $\xi$  را در راستای طول کانال نشان داده و با مرجع [۱۶] مقایسه می‌کند. اختلاف ناچیزی در پروفیل تغییرات  $\xi$  در مقاله حاضر با نتایج ریحانیان و همکاران دیده می‌شود که اولاً ناشی از تعریف محدوده اختلاط کامل است که توسط ریحانیان و همکاران بر اساس چگالی در نظر گرفته شده است و ثانیاً ناشی از طبیعت آماری روش دی‌اس‌ام‌سی است.

#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- تعریف مساله (نمونه مبنا)

با استفاده از تعریف طول اختلاط، اختلاط دو جریان نیتروژن و کربن مونواکسید برای یک کانال به طول ۱۶ میکرومتر و ارتفاع ۱ میکرومتر مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۳). از بخش بالایی کانال، کربن مونواکسید و از بخش پایین نیتروژن وارد می‌شود. دو جریان ورودی، توسط یک جداکننده که تا یک سوم طول کانال کشیده شده است از هم جدا می‌شوند. صفحه جداکننده در میانه ارتفاع کانال قرار گرفته است. به منظور کاهش اثرات افزایش سرعت جریان در انتهای صفحه اسپلیتر (جلوگیری از ایجاد یک پله جریان)، ضخامت صفحه اسپلیتر ناچیز در نظر گرفته می‌شود. طول کانال نیز برابر با ۱۶ میکرومتر در نظر گرفته می‌شود تا اختلاط دو جریان به طور کامل صورت گیرد. مقدار فشار ورودی برای هر دو گونه ۱۰۰ کیلوپاسکال و فشار خروجی به قدری پایین در نظر گرفته می‌شود که جریان برگشتی در کانال به وجود نیاید. همچنین دمای ورودی هر دو گونه ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته می‌شود. اما شرایط مرزی دیواره‌های جانبی پریودیک در نظر گرفته می‌شوند تا در راستای محور  $Z$  گرادیان تغییرات وجود نداشته باشد و شبیه‌سازی دوبعدی باشد. در نظرگیری راستای محور  $Z$  به دلیل تأمین تعداد ذرات کافی و افزایش دقت نمونه‌گیری در هر سلول انجام شده است. برخورد ذرات با دیواره‌های بالا و پایین و همچنین صفحه اسپلیتر به صورت دیفیوژو در نظر گرفته می‌شود که تابعی از دمای سطح برخورد است [۳۲].

محاسبه می‌شود ( $k$  ثابت بولتزمن است) و برابر با  $\lambda = 0.06 \mu\text{m}$  است. به منظور اجرای یک شبیه‌سازی دقیق بایستی اندازه سلول، در راستای گرادیان تغییرات، کمتر از طول پویش آزاد مولکولی در نظر گرفته شود تا جابجایی هر ذره در هر گام زمانی از یک سلول به سلول مجاور در نظر گرفته شود [۲۴]. به منظور اطمینان از دقت شبکه‌بندی، مرجع [۲۵] اندازه مناسب سلول را کمتر از یک سوم طول پویش آزاد مولکولی در نظر می‌گیرد و در این مطالعه، این معیار در نظر گرفته می‌شود. بنابراین ۵۰۰ سلول در راستای طول کانال و ۵۰ سلول در راستای ارتفاع کانال در نظر گرفته می‌شود. همچنین به منظور تمایز حرکت از برخورد، گام زمانی کمتر از متوسط زمان برخورد مولکولی انتخاب می‌شود که در این نمونه، متوسط زمان برخورد مولکولی برابر با  $4/4 \times 10^{-9}$  ثانیه است. معیار حداقل تعداد ۲۰ ذره در هر سلول بایستی در نظر گرفته شود تا انتخاب صحیح جفت ذره برخوردی به درستی انجام گیرد [۲۶].

تعاریف مختلفی برای بررسی اختلاط ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به راندمان اختلاط و طول اختلاط اشاره نمود [۳۱-۲۷] در این مقاله از یک رابطه ساده و دقیق برای محاسبه طول اختلاط به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\xi = \frac{\max [C_m(i, y) - C_{m,\infty}(i, y)]}{C_{m,\infty}(i, y)} \quad (6)$$

در رابطه فوق، کسر جرمی گونه  $i$  در حالت تعادلی و  $C_m(i, y)$  کسر جرمی گونه جرمی  $i$  در یک مقطع دلخواه از ورودی در راستای  $y$  است که معمولاً دورترین نقطه از خط مرکزی کانال است. عبارت کسر جرمی  $C_m$  برابر با نسبت زیر است:

$$C_m = \frac{\int (n_p m_p) dA}{\sum_{p=1}^S \int (n_p m_p) dA} \quad (7)$$

منظور از  $\sum_{p=1}^S n_p m_p$  چگالی کل گونه‌ها (از گونه اول تا  $S$  -م است) و منظور از  $n_p m_p$  چگالی گونه  $p$ -م است. به دلیل دوبعدی بودن جریان، انتگرال روی سطح اعمال می‌شود. منظور از  $n$



## ۲-۳- شرایط مرزی

در مقاله حاضر، به منظور شبیه‌سازی سینتیک برخورد ذرات، از مدل کره سخت متغیر استفاده می‌شود. در تمامی موارد، شرط انعکاس دیفیوزیو<sup>۱</sup> برای دیواره‌های بالا و پایین در نظر گرفته می‌شوند. در برخورد دیفیوزیو ذره با سطح، ذره با سطح برخورد می‌کند. سپس در یک جهت اتفاقی، با سرعت و انرژی درونی‌ای که تابعی از دمای سطح است منعکس می‌شود. شرایط مرزی برای دیواره‌های جانبی پریودیک<sup>۲</sup> در نظر گرفته می‌شود که یک شبیه‌سازی دوبعدی را ایجاد می‌کند. در شرط مرزی پریودیک، هر ذره که وارد دامنه حل می‌شود، ذره‌ای در سمت مخالف و با همان مقدار و جهت سرعت از آن خارج می‌شود. شرط مرزی فشار در ورود و خروج برای یک جریان زیر صوت با انجام اصلاحاتی برگرفته از مرجع [۲۲] است. در شرایط مرزی ورودی، فشار ورودی تنظیم می‌شود و بر اساس آن مقادیر سرعت محاسبه می‌شود:

$$(u_{in})_j = u_j + \frac{P_{in} - P_j}{\rho_j a_j} \quad \text{(الف)} \quad (۳)$$

$$(v_{in})_j = v_j + \frac{P_{in} - P_j}{\rho_j a_j} \quad \text{(ب)}$$

$$(w_{in})_j = w_j \quad \text{(ج)}$$

اگر شرایط مرزی ورودی در راستای محور افقی وجود داشته باشد، از معادله (۳-الف) و (۳-ج) استفاده شده و در راستای محور عمودی شرط  $(v_{in})_j = v_j$  و اگر شرط مرزی ورودی در راستای عمودی باشد، سرعت ورودی از معادله (۳-ب) و (۳-ج) محاسبه شده و مؤلفه افقی سرعت از رابطه  $(u_{in})_j = u_j$  محاسبه می‌شود.

با فرض یک توزیع تعادلی ماکسول-بولتزمن، شار ذره در یک راستای معین به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲ و ۲۳]:

$$\dot{n} = \frac{n\sqrt{2RT}}{2\sqrt{\pi}} \left( \exp\left\{-\left(\frac{U}{\sqrt{2RT}}\right)^2\right\} \cos^2 \theta + \sqrt{\pi} \frac{U}{\sqrt{2RT}} \cos \theta \left\{1 + \operatorname{erf}\left(\frac{U}{\sqrt{2RT}} \cos \theta\right)\right\} \right) \quad (۴)$$

شرط مرزی جریان در خروج از میدان تنها با اعمال فشار خروجی حاصل می‌شود. بنابراین چگالی، دما، و سرعت در خروجی میدان به صورت زیر به دست می‌آید. مقدار چگالی خروجی، از شار عددی ذرات در هر سلول قابل محاسبه است.

$$(u_e)_j = u_j + \frac{P_j - P_e}{\rho_j a_j} \quad \text{(الف)} \quad (۵)$$

$$(v_{in})_j = v_j \quad \text{(ب)}$$

$$(T_e)_j = \frac{P_e}{(\rho_e)_j R} \quad \text{(ج)}$$

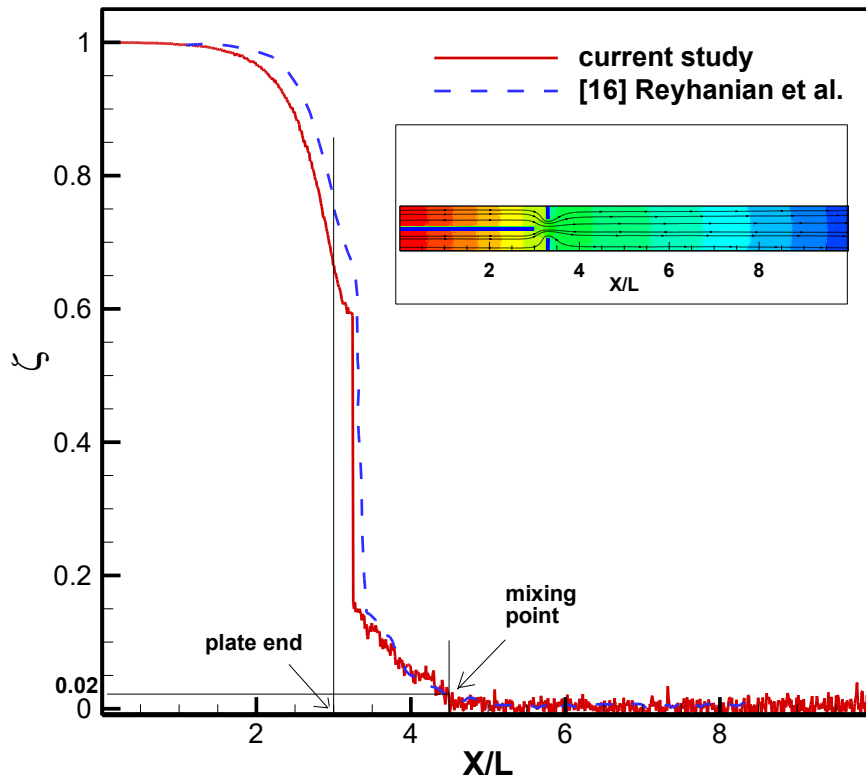
محدوده اعتبار روابط فوق برای رژیم جریان‌های لغزشی و انتقالی است [۲۳].

## ۳- اعتبارسنجی

میدان مورد بررسی شامل یک کانال است که از دو ورودی مجزا تشکیل شده است. گاز ورودی اول کربن مونواکسید و گاز ورودی دوم، نیتروژن است. طول کانال ۱۰ میکرومتر و ارتفاع کانال ۱ میکرومتر است. بیشینه فشار در ورودی میدان اتفاق می‌افتد که مقدار آن  $P = 150 \text{ kPa}$  است. همچنین دمای ورودی  $T = 300 \text{ K}$  کلین است. در نظر گرفته می‌شود. دو جریان پس از گذشت ۳ میکرومتر از طول کانال با یکدیگر مخلوط می‌شوند. دو مانع به فاصله ۳/۳ میکرومتر از شروع کانال در بالا و پایین کانال قرار دارند و ارتفاع آنها برابر با ۰/۳ میکرومتر است.

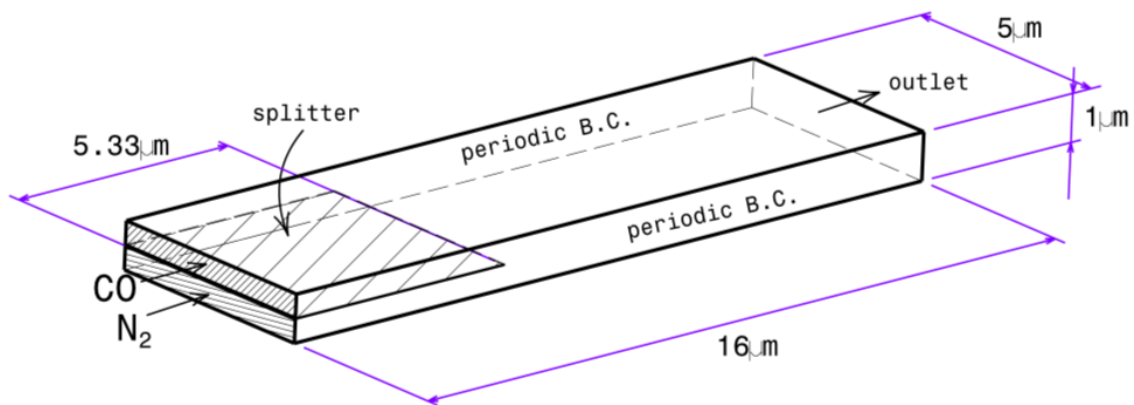
قطر ذرات نیتروژن و کربن مونواکسید به ترتیب برابر با  $10^{-10}$  و  $4/11 \times 10^{-10}$  متر است. کمترین طول پویس آزاد مولکولی در شرایطی است که فشار بیشینه باشد (ورودی میدان حل). مقدار طول پویس آزاد مولکولی از رابطه  $\lambda = kT / \sqrt{2} \pi d^2 P$

1 Diffusive  
2 Periodic



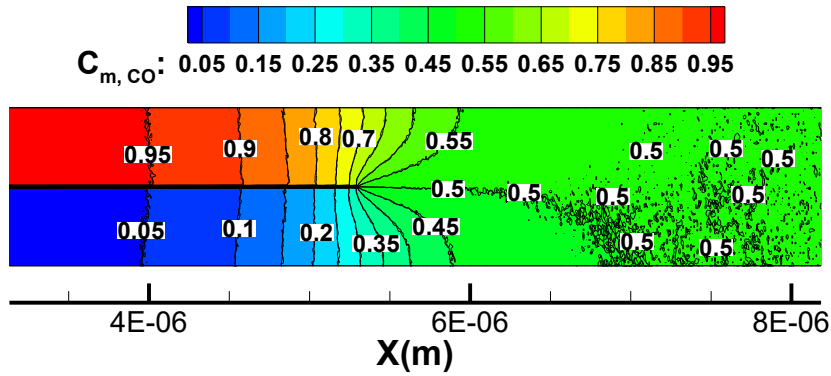
شکل ۲. نحوه محاسبه طول اختلاط

Fig. 2. Mixing length calculation procedure

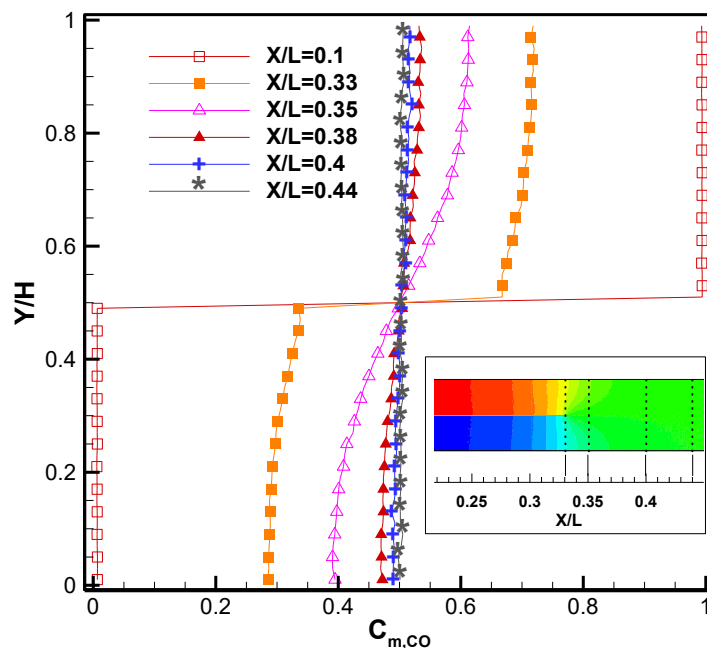


شکل ۳. مشخصات کانال اختلاط جریان

Fig. 3. Specifications of flow mixing channel



الف- کانتورهای کسر جرمی  
a) Mass fraction contours



ب- توزیع کسر جرمی در مقاطع مختلف کانال  
b) Mass fraction distribution at different sections of channel

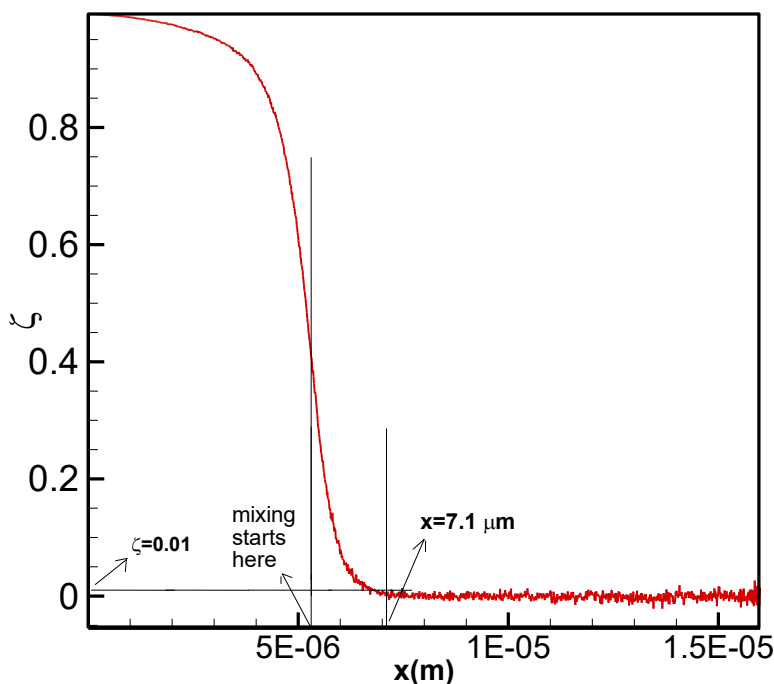
شکل ۴. مقادیر کسر جرمی گونه کربن مونواکسید در کانال اختلاط

Fig. 4. Mass fraction of carbon monoxide in mixing channel

۴-۲- طول اختلاط نمونه مینا

دیگر را گونه نیتروژن تشکیل می‌دهد ( $C_{m,CO} = C_{m,N_2} = 0.5$ ). برای محاسبه دقیق طول اختلاط از رابطه ضریب اختلاط استفاده می‌شود (رابطه ۶). مقدار ضریب اختلاط در صورت اختلاط کامل بایستی صفر در نظر گرفته شود اما به دلیل ماهیت آماری روش دی‌اس‌ام‌سی، در این مقاله، هرگاه مقدار این ضریب به ۰/۰۱ برسد، اختلاط کامل در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس مقدار طول اختلاط برابر با ۷/۱ میکرومتر محاسبه می‌شود (شکل ۵).

کانتورهای کسر جرمی گونه کربن مونواکسید در شکل ۴-الف نشان داده شده است. همچنین در فواصل مختلف از ورودی کانال، توزیع کسر جرمی گونه کربن مونواکسید در راستای عرض کانال نشان داده شده است (شکل ۴-ب). با توجه به شکل ۴-ب در نقاطی که کسر جرمی حول خط مرکزی کانال متقارن می‌شود، اختلاط کامل است. در این شرایط نیمی از کسر جرمی را گونه کربن مونواکسید و نیم



شکل ۵. طول اختلاط (کانال با طول ۱۶ میکرومتر و عرض ۱ میکرومتر)

Fig. 5. Mixing Length (Channel with 16  $\mu\text{m}$  length and 1  $\mu\text{m}$  height)

که در رابطه فوق،  $A_i$  مساحت هر مانع،  $l$  طول کل بخش موانع در هر ردیف و  $H$  ارتفاع کانال است.

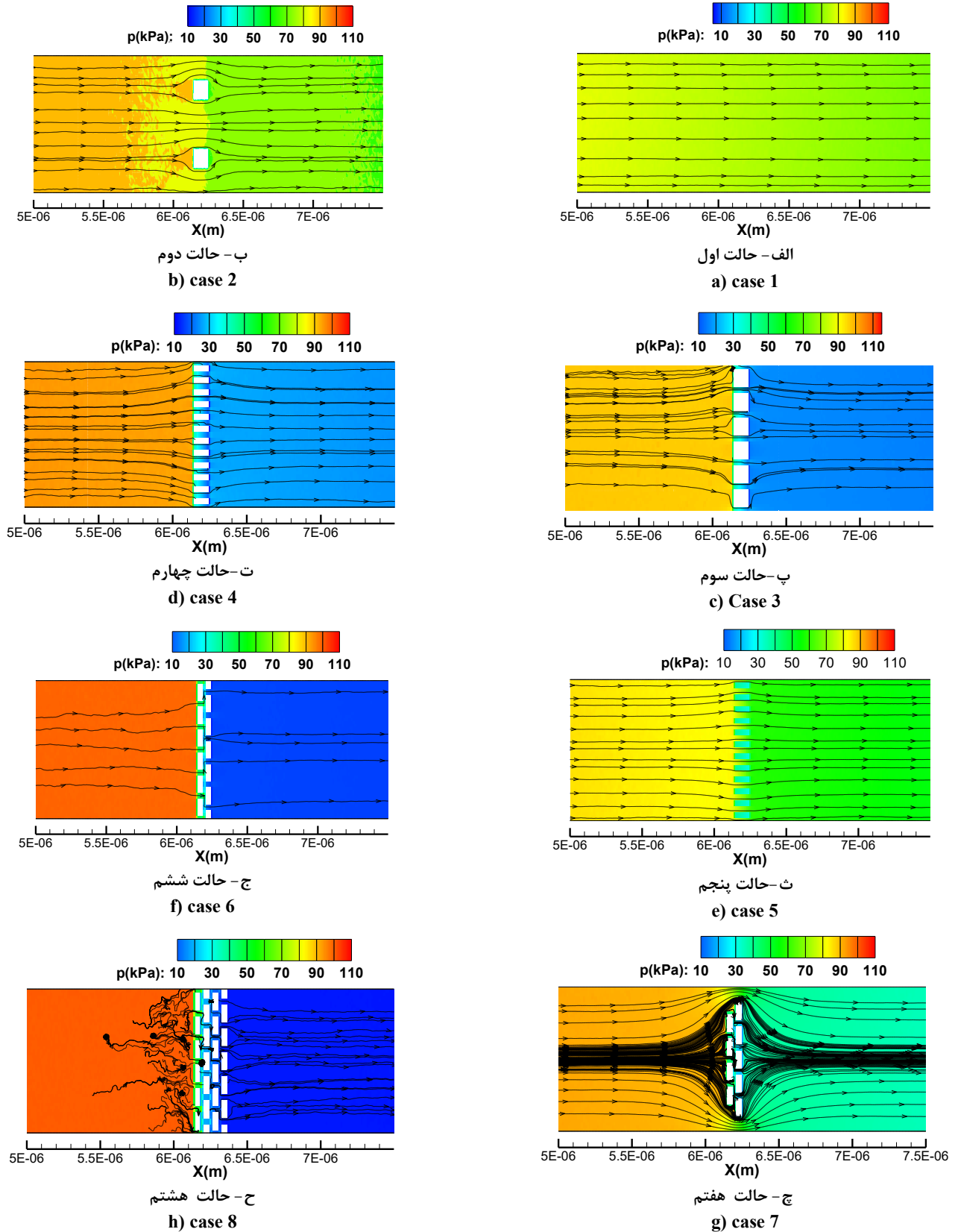
داده‌های ضریب اختلاط و نسبت انسداد در جدول ۱ لیست شده است. تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین حالت سوم و حالت پنجم مشاهده می‌شود. همانطور که انتظار می‌رود با کاهش نسبت انسداد، طول اختلاط در حالت پنجم افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. افزایش نسبت انسداد اثرات سرعت‌های نفوذ را که عامل اصلی اختلاط در ابعاد میکرو هستندند افزایش داده و منجر به کاهش طول اختلاط می‌شود. در حالت ششم، بیشترین میزان انسداد و کمترین طول اختلاط اتفاق افتاده است که ناشی از کاهش سرعت‌های انتقالی جریان در اثر افت فشار بالای جریان در محل موانع است.

با توجه به شکل ۶-ح در حالت هشتم، به وضوح اثرات انسداد کامل جریان با مشاهده خطوط جریان‌های برگشتی در بالادست موانع ملاحظه می‌گردد. این مساله اهمیت انتخاب تعداد مناسب موانع به منظور کاهش طول اختلاط را مشخص می‌کند. در حالت ششم (شکل ۶-ج) اگرچه نسبت انسداد جریان بالاتر از حالت هشتم است اما اثرات تداخلی موانع ردیف سوم و چهارم در نمونه هشتم به کلی خطوط جریان را منحرف نموده و جریان بازگشتی به بالادست جریان تا

۴-۳- اثر تعداد و موقعیت موانع بر اختلاط جریان

در این بخش اثر تعداد و موقعیت موانع جریان بر طول میکسینگ بررسی می‌شود. همچنین تنظیمات دقت حل شامل اندازه سلول، تعداد ذره در هر سلول و انتخاب گام زمانی با توجه به فرکانس برخورد مولکولی، در نظر گرفته می‌شود تا شبیه‌سازی از دقت بالایی برخوردار باشد. برخورد ذرات با تمام دیواره‌ها و سطوح از نوع دیفیوزیو در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۶، هشت حالت مختلف اختلاط در کانال در نظر گرفته می‌شود. حالت اول، کانال اختلاط بدون مانع است. در حالت دوم دو مانع، در حالت سوم ۶ مانع، در حالت چهارم و پنجم ۱۲ مانع به فاصله ۶/۱۵ میکرومتر از ورودی کانال قرار گرفته‌اند. در حالت ششم و هفتم دو ستون مانع و در حالت هشتم چهار ستون مانع به فاصله ۶/۱۵ میکرومتر از ورودی قرار گرفته‌اند. در تمامی حالت‌ها، فشار ورودی ۱۰۰ کیلوپاسکال، دمای ورودی ۳۰۰ کلوین و فشار خروجی تا حد امکان پایین در نظر گرفته می‌شود. برای تمام حالت‌های پیش‌گفته، نسبت انسداد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i}{l \times H}} \quad (8)$$



شکل ۶. حالت‌های مختلف کانال با چیدمانی مختلف موانع

Fig. 6. Different configurations of channel by different layouts of obstacles

جدول ۱. مقادیر ضریب اختلاط و نسبت انسداد

Table 1. Mixing length and blockage ratio values

نسبت انسداد (b)	تعداد ستون مانع	طول مانع ( $\mu\text{m}$ )	طول اختلاط $\xi$ ( $\mu\text{m}$ )	موقعیت مانع $x_b$ ( $\mu\text{m}$ )	#
صفر	---	---	۷/۱	---	حالت اول
۰/۴۳	۱	۰/۱	۶/۹	۶/۱۵	حالت دوم
۰/۸۵	۱	۰/۱	۶/۳	۶/۱۵	حالت سوم
۰/۸۳	۲	۰/۱	۶/۳۵	۶/۱۵	حالت چهارم
۰/۵	۲	۰/۱	۶/۸	۶/۱۵	حالت پنجم
۰/۹۵	۲	۰/۰۴	۶/۲۵	۶/۱۵	حالت ششم
۰/۸۳	۲	۰/۰۴	۶/۳۵	۶/۱۵	حالت هفتم
۰/۹۳	۴	۰/۰۴	۶/۲۸	۶/۱۵	حالت هشتم

باریک‌تری تبدیل می‌کنند که پروفیل سرعت سهموی خود را دارند. همچنین ملاحظه می‌شود که جریان در محل موانع با افزایش سرعت، کاهش دبی جرمی را تا حدی جبران می‌کند. در صورتیکه متوسط عدد ماخ هر مقطع (که در جدول ۲ بیان شده است) بیانگر آن است که (به جز نمونه هفتم)، وجود موانع به طور کلی باعث کاهش عدد ماخ جریان می‌گردد. در واقع موانع کانال باعث کاهش مومنتوم جریان و افزایش اتلافات شده و متوسط عدد ماخ را کاهش می‌دهند.

در نمونه هفتم، عدد ماخ موضعی بالایی که در نزدیکی دیواره رخ داده است، سبب تقویت سرعت‌های لغزشی نزدیک دیواره شده و متوسط عدد ماخ را افزایش می‌دهد. نمونه چهارم و هفتم نسبت انسداد یکسانی دارند، اما تقویت سرعت لغزشی منجر به افزایش دبی جرمی و همچنین طول اختلاط در نمونه هفتم شده است. این مساله نشان می‌دهد که بهتر است چیدمان موانع به نحوی باشد که سرعت‌های لغزشی کناره دیواره‌ها را تقویت نکند.

به منظور بررسی دقیق‌تر جریان، افت فشار در محل موانع نیز مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه می‌شود که جریان در محل موانع، دچار افت فشار موضعی می‌گردد. در نسبت‌های انسداد بالاتر، افت فشار جریان بیشتر است. نمونه سوم، ششم و هشتم، بیشترین افت فشار را دارند. همچنین در نمونه چهارم و هفتم که نسبت انسداد یکسانی دارند، نمونه چهارم، افت فشار بالاتری را تجربه می‌کند. نمونه‌های اول، دوم و پنجم، کمترین افت فشار و کمترین میزان انسداد را دارند

ورودی میدان ادامه پیدا کرده است. در حالت ششم، نسبت بالای انسداد، موجب انحنای خطوط جریان شده است اما جریان بازگشتی ملاحظه نمی‌شود.

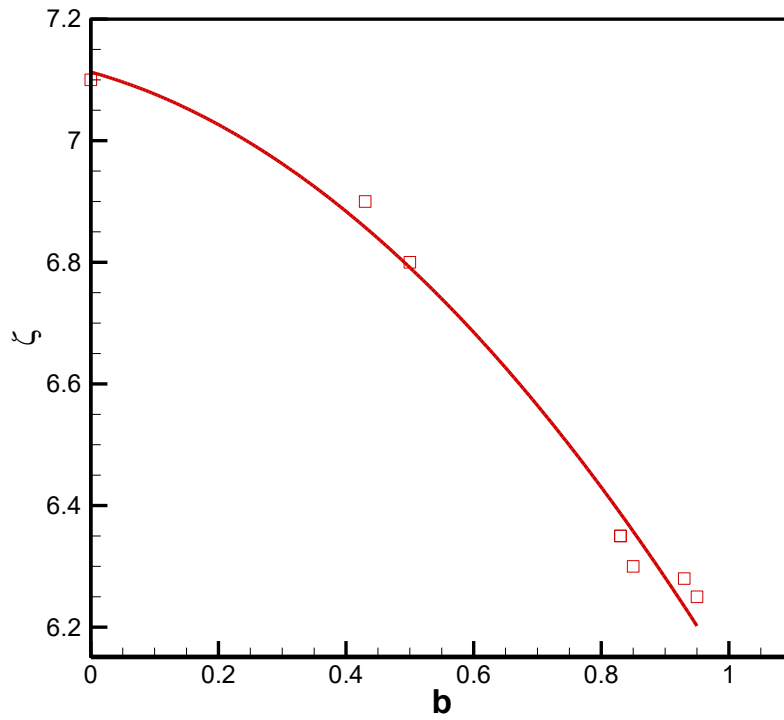
شکل ۷ نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش نسبت انسداد، طول اختلاط کاهش می‌یابد.

دبی جرمی هر حالت نیز با استفاده از رابطه  $\dot{m} = \int_{dA} \rho_i u_i dA_i$  محاسبه شده است. مقدار دبی جرمی برای نمونه اول تا هشتم به ترتیب برابر با ۳۲، ۲۹، ۵/۶، ۹/۲، ۲۳/۷، ۲/۳، ۱۳/۸، و ۰/۸ میکروگرم بر ثانیه محاسبه شده است. با افزایش نسبت انسداد، دبی جرمی کاهش یافته و افزایش نسبت انسداد باعث کاهش طول اختلاط می‌شود؛ بنابراین پدیده اختلاط با افزایش نسبت انسداد تسریع یافته درحالی‌که دبی جرمی کانال نیز کاهش می‌یابد.

به منظور مطالعه اثرات انتقالی جریان، کانتورهای عدد ماخ برای هشت نمونه بررسی شده‌اند (شکل ۸). در تمامی نمونه‌ها در پایین دست هر مانع یک ناحیه با سرعت کم تشکیل می‌شود که اثرات انتقالی را کاهش داده و موجب تقویت نفوذ و اختلاط می‌شود. همچنین با بیشتر شدن نسبت انسداد، سرعت جریان در بالادست موانع، بیشتر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر فشار خروجی کانال، کمتر بر بالادست موانع اثرگذار خواهد بود.

توزیع عدد ماخ در فاصله  $X/L = 0/4$  (یعنی دقیقاً بعد از موانع) در راستای ارتفاع کانال برای تمامی نمونه‌های فوق در شکل ۹ نشان داده شده است. موانع موجود در کانال، جریان را به کانال‌های





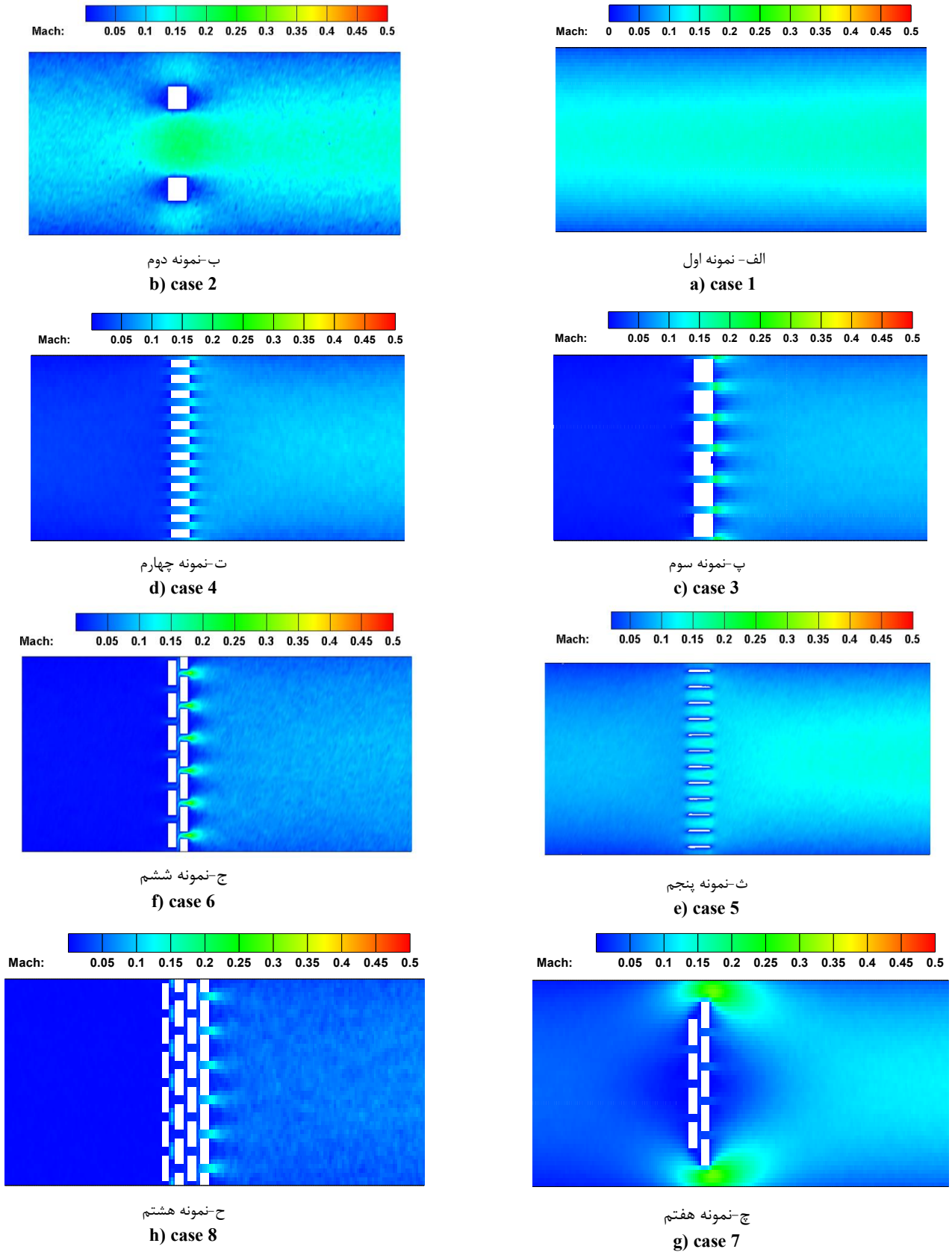
شکل ۷. تغییرات طول اختلاط با نسبت انسداد

Fig. 7. Variation of mixing length with blockage ratio

جدول ۲. مقادیر دبی جرمی و متوسط عدد ماخ

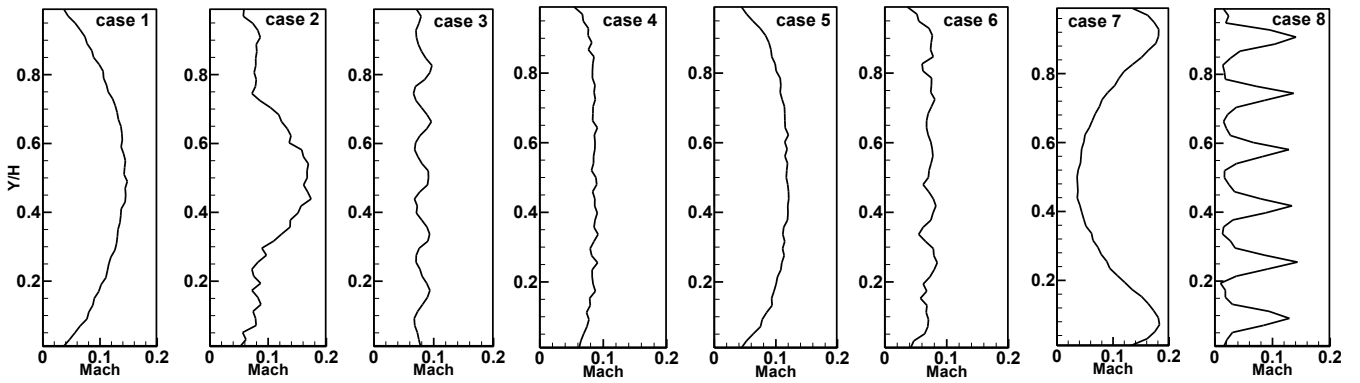
Table 2. Mass flow and average of Mach number values

دبی جرمی (میکروگرم بر ثانیه)	متوسط عدد ماخ در $X/L=0.4$	تعداد موانع				حالت
		ستون چهارم	ستون سوم	ستون دوم	ستون اول	
۳۲	۰/۱	---	---	---	---	حالت اول
۲۹	۰/۰۹	---	---	---	۲	حالت دوم
۵/۶	۰/۰۸۱	---	---	---	۶	حالت سوم
۹/۲	۰/۰۸۱	---	---	---	۱۲	حالت چهارم
۲۳/۷	۰/۰۸۹	---	---	---	۱۲	حالت پنجم
۲/۳	۰/۰۶۷	---	---	---	۶	حالت ششم
۱۳/۸	۰/۱۲	---	---	۵	۴	حالت هفتم
۰/۸	۰/۰۷۴	۶	۶	۶	۶	حالت هشتم



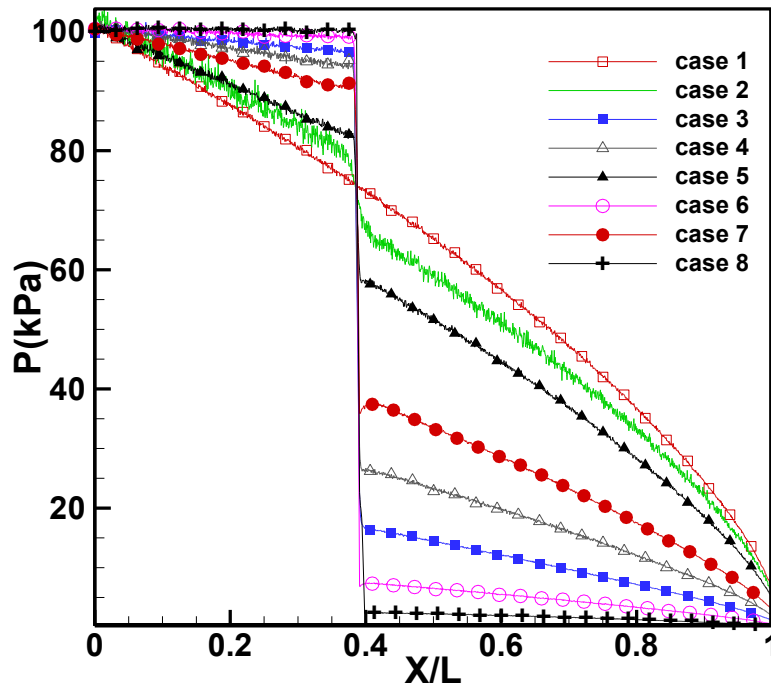
شکل ۸. کانتورهای عدد ماخ برای هشت نمونه مورد بررسی

Fig. 8. Mach number contours for eight case studies



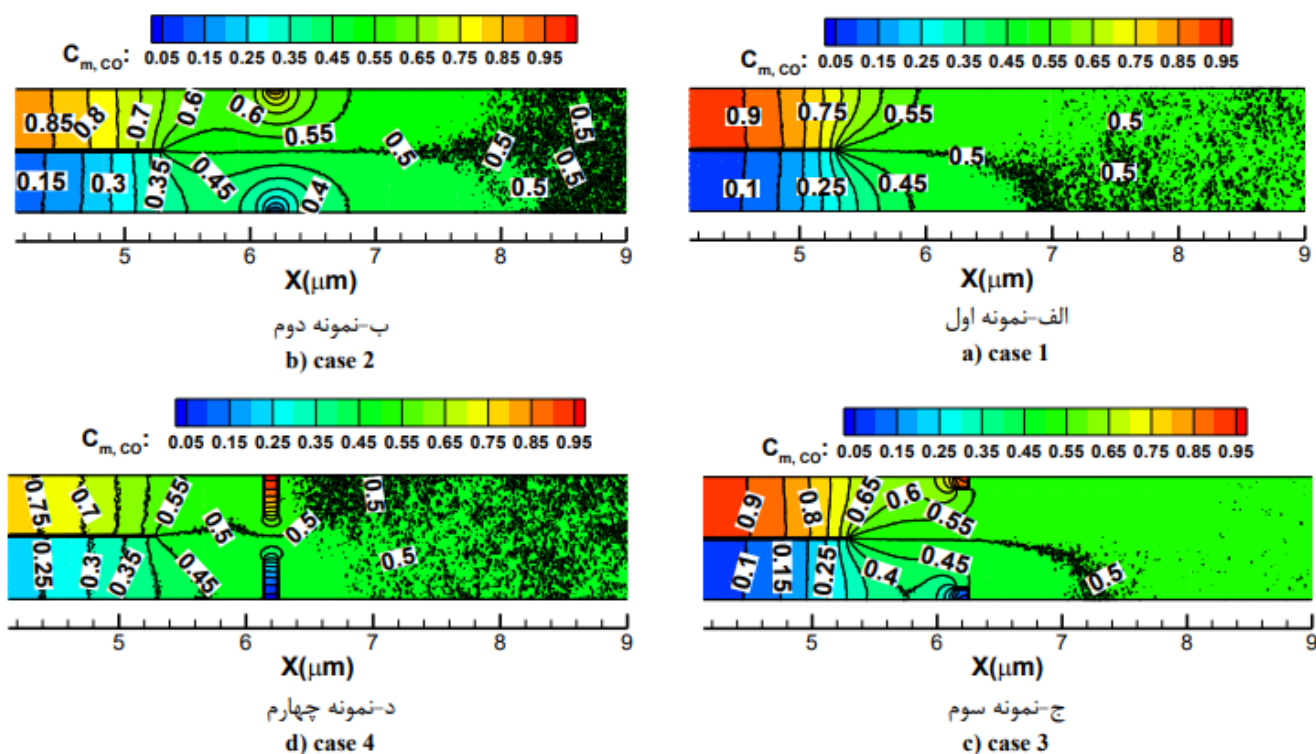
شکل ۹. توزیع عدد ماخ در  $X/L = 0.4$  در راستای ارتفاع کانال

Fig. 9. Mach number distribution at  $X/L=0.4$  along channel height



شکل ۱۰. افت فشار جریان در راستای طول کانال در امتداد خط مرکزی

Fig. 10. Pressure drop along channel length at centerline



شکل ۱۱. توزیع کسر جرمی کربن مونواکسید برای چهار نمونه

Fig. 11. Carbon Monoxide mass fraction distribution for four cases

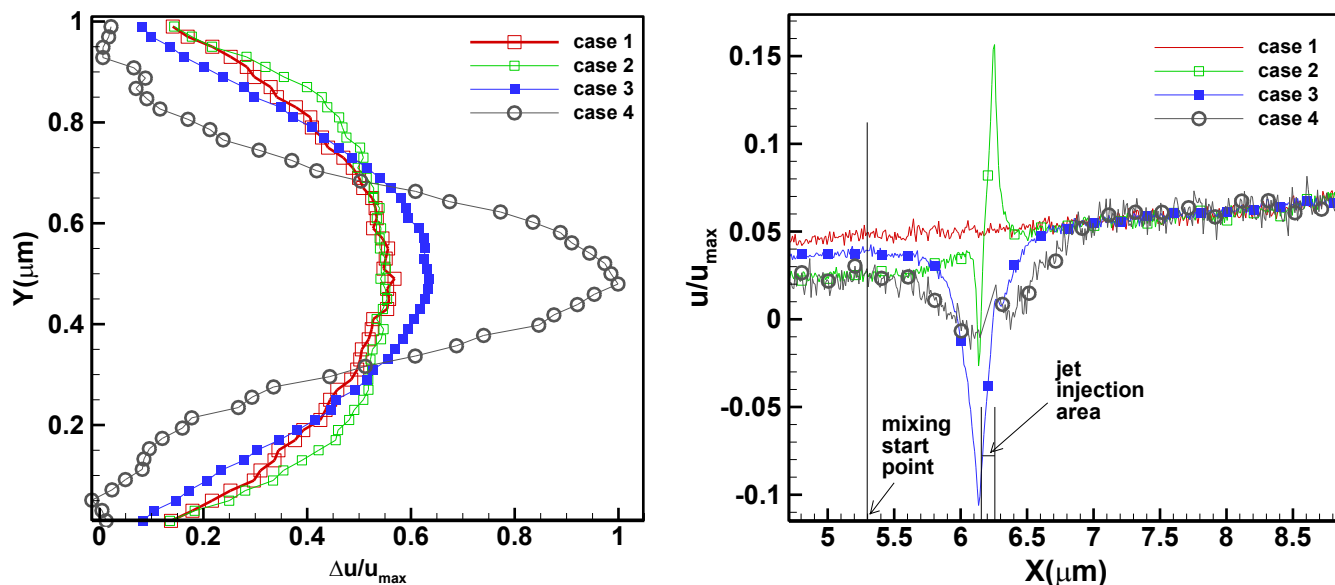
عمودی جریان از داخل یک مجرا که ارتفاع آن  $0.3$  میکرومتر و دمای دیواره‌های آن  $300$  کلوین است، به جریان اصلی تزریق می‌گردد. کانتورهای توزیع کسر جرمی برای چهار نمونه فوق در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. در شرایطی که کسر جرمی هر یک از گونه‌ها برابر با  $0.5$  می‌شود، اختلاط به صورت کامل انجام گرفته است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در نمونه دوم، طول اختلاط افزایش چشمگیری یافته و اختلاط به تأخیر افتاده است.

تغییرات مؤلفه افقی جریان برای نمونه اول تا چهارم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۲-الف جریان در محل تزریق در نزدیکی دیواره رفتار پیچیده‌ای دارد. در نمونه دوم تا چهارم در محل تزریق افت مقدار مؤلفه افقی سرعت مشاهده می‌شود. اینگونه به نظر می‌رسد که تزریق جت جریان در هر سه نمونه، شبیه به یک مانع عمل می‌کند. برای هر سه نمونه، پس از ناحیه تزریق جریان، در نزدیکی دیواره افزایش سرعت مشاهده می‌شود که ناشی از تأثیر مومنتوم توده جریان تزریقی در این نقطه است. بر اساس شکل

۴-۴ اثر تزریق جریان بر طول اختلاط

در ابعاد ماکرو، تزریق جریان جانبی به دلیل ایجاد گردابه‌های ناشی از اثرات مغشوش شدن جریان، منجر به بهبود اختلاط می‌شود [۳۳ و ۳۴]. در ابعاد میکرو به دلیل عدد رینولدز پایین و در نتیجه جریان لمینار در داخل کانال [۳۵]، تزریق جریان جانبی متفاوت با ابعاد بزرگ بوده و بایستی مورد بررسی قرار گیرد.

چهار نمونه برای این بخش بررسی شده است. نمونه اول، جریان بدون تزریق عرضی می‌باشد (حالت معیار). در نمونه دوم، یک جریان جانبی (عمود بر جهت جریان اصلی)، در نمونه سوم، یک جریان افقی مخالف جهت جریان اصلی از فاصله بی بعد  $0.38$  ورودی کانال، و در نمونه چهارم یک جریان از داخل یک مانع به صورت عمودی به جریان اصلی کانال تزریق می‌شود. فشار جریان جانبی و معکوس برای همه نمونه‌ها  $100$  کیلوپاسکال و دمای آن  $300$  کلوین است. در نمونه سوم، جریان از داخل یک مجرا با ارتفاع  $0.1$  میکرومتر به داخل میدان و در خلاف جهت تزریق می‌شود. در نمونه چهارم، تزریق



ب- تغییرات مؤلفه افقی سرعت در راستای عرضی به فاصله  $X/L=0.38$  از ورودی کانال  
**b) variation of vertical velocity along the channel height at  $x/L=0.38$**

الف- تغییرات مؤلفه افقی سرعت در راستای طولی در نزدیکی دیواره  
**a) variation of axial velocity along the channel near the wall**

شکل ۱۲. تغییرات سرعت افقی و عمودی جریان

**Fig. 12. variation of axial and vertical velocity**

جدول ۳. مقادیر دبی جرمی و طول اختلاط

**Table 3. Mass flow rate and mixing length values**

طول اختلاط (میکرومتر)	دبی جرمی (میکروگرم بر ثانیه)		وضعیت تزریق جریان	
	خروجی کانال	ورودی کانال		
۷/۱	۳۲	۳۲	بدون تزریق	نمونه اول
۸/۳	۳۲/۳	۲۶/۸	تزریق عمودی	نمونه دوم
۷/۴۵	۳۲/۳	۲۶/۸	تزریق افقی معکوس	نمونه سوم
۶/۹۵	۲۷/۱	۱۸	تزریق عمودی از داخل مانع	نمونه چهارم

وجود سیالی که از درون مانع به جریان تزریق می‌شود، سرعت افقی افزایش یافته است.

مقادیر طول اختلاط و دبی جرمی برای چهار نمونه فوق در جدول ۳ محاسبه شده‌اند. نمونه دوم و سوم دبی جرمی یکسانی دارند. متوسط سرعت کل در فاصله ۷/۱ میکرومتر از ورودی کانال، برای نمونه دوم ۳۸ متر بر ثانیه و برای نمونه سوم ۳۴ متر بر ثانیه محاسبه

۱۲- متوسط اختلاف سرعت افقی بی‌بعد شده قبل و بعد از تزریق، برای نمونه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۳۷، ۰/۳۶ و ۰/۴۸ است. به دلیل تقارن دامنه حل برای نمونه دوم و سوم، تزریق جریان تاثیری بر متوسط اختلاف سرعت و یا به عبارتی اثرات انتقالی نگذاشته است. همچنین ملاحظه می‌شود که سرعت‌های لغزشی بر متوسط اختلاف سرعت تأثیر چندانی ندارند. در نمونه چهارم، به دلیل

گردید به طوری که طول اختلاط ۱۴٪ افزایش یافت. در شرایط تزریق خلاف جهت (نمونه سوم) نیز طول اختلاط ۵٪ افزایش یافت.

## ۶- فهرست علائم

### علائم انگلیسی

$a$	سرعت صوت، $ms^{-1}$
$c$	سرعت مولکولی، $ms^{-1}$
$C_m$	کسر جرمی
$c_r$	سرعت مولکولی نسبی، $ms^{-1}$
$d$	قطر مولکولی، $m$
$f$	تابع توزیع سرعت
$H$	عرض کانال، $m$
$L$	طول کانال، $m$
$n$	چگالی عددی، $m^{-3}$
$R_f$	مقداری تصادفی بین صفر و یک
$s$	نسبت سرعت مولکولی
$t$	زمان، $s$
$T$	دما، $K$
$u$	سرعت در راستای محور طولی، $ms^{-1}$
$U$	متوسط سرعت موضعی در راستای محور طولی، $ms^{-1}$
$v$	سرعت در راستای محور عرضی، $ms^{-1}$
$w$	سرعت در راستای محور عمق، $ms^{-1}$

### علائم یونانی

$\lambda$	طول پویس آزاد مولکولی، $m$
$\zeta$	طول اختلاط، $m$
$\sigma$	سطح مقطع برخورد مولکولی، $m^2$
$\theta$	زاویه بین بردار سرعت و عمود بر المان مرزی
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$

### زیرنویس

$e$	خروجی
$i$	شماره گونه
$in$	ورودی
$j$	شماره سلول
$p$	گونه $p$
$q$	گونه $q$
$\infty$	حالت تعادلی

### بالانویس

\* شرایط پس از برخورد

شده است. بنابراین انرژی جنبشی بالاتر جریان در نمونه دوم، منجر به تأخیر در اختلاط شده است. در نمونه چهارم، کاهش دبی جرمی منجر به کاهش طول اختلاط شده است. بنابراین با وجود متوسط سرعت بالاتر در محل موانع، کاهش دبی جرمی نقش مهم‌تری در کاهش طول اختلاط دارد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفت. اختلاط دو گونه گازی در داخل یک میکروکانال و اثرات موانع در داخل کانال بررسی شد. هشت پیکربندی از محل موانع در نظر گرفته شد. نمونه اول به عنوان نمونه پایه فاقد موانع در داخل کانال است و معیار قرار گرفت. برای نمونه‌های دوم و سوم به ترتیب دو و شش مانع، در نمونه‌های چهارم و پنجم دوازده مانع با فواصل مختلف، برای نمونه‌های ششم و هفتم دو ستون مانع با فواصل مختلف و در نمونه هشتم چهار ستون مانع در کانال قرار گرفت. پارامتری به نام نسبت انسداد تعریف گردید که میزان کاهش سطح مقطع عبوری جریان را محاسبه می‌کند. با افزایش نسبت انسداد، طولی که در آن دو گونه با یکدیگر مخلوط می‌شوند، تا ۱۰٪ کاهش یافت. افزایش انسداد، سرعت‌های انتقالی جریان را کاهش داده و فرایند اختلاط را تسریع نمود. در نمونه هشتم به دلیل تأثیرات تداخلی چهار ستون مانع، بالادست موانع دچار جریان‌های بازگشتی گردید. با افزایش نسبت انسداد، دبی جرمی جریان نیز به طور قابل توجهی کاهش پیدا کرد.

همچنین تزریق جریان به صورت عرضی و در خلاف جهت جریان اصلی به داخل کانال انجام شد و اثرات آن بر اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. چهار نمونه مطالعه گردید. در نمونه اول، کانال بدون تزریق است، در نمونه دوم، جریان به صورت عمودی و در نمونه سوم، جریان در خلاف جهت اصلی به کانال تزریق شد. در نمونه چهارم، جریان به صورت عمودی از داخل یک مانع تزریق گردید. نتایج نشان داد که برای همه حالتها، تزریق جریان مانند موانع عمل کرده و دبی جرمی ورودی به کانال کاهش یافت، اما جریان تزریق شده، خود منجر به افزایش دبی خروجی از کانال گردید. اضافه شدن جریان عرضی و خلاف جهت، منجر به افزایش سرعت کل جریان شده و انرژی جنبشی را افزایش می‌دهد. افزایش انرژی جنبشی به ویژه در نمونه دوم باعث افزایش چشمگیر طول اختلاط نسبت به حالت مبنا



- mixing in droplets using passive and active micromixers, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 101(3) (2021) 422-432.
- [12] K. Ward, Fan, Z. H., Mixing in microfluidic devices and enhancement methods, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(9) (2015) 094-103.
- [13] F. Yan, Farouk, B., Numerical simulation of gas flow and mixing in a microchannel using the direct simulation Monte Carlo method, *Microscale thermophysical engineering*, 6(3) (2002) 235-251.
- [14] M. Wang, Li, Z., Gas mixing in microchannels using the direct simulation Monte Carlo method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(9-10) (2006) 1696-1702.
- [15] M. Le, Hassan, I, DSMC simulation of gas mixing in T-shape micromixer, *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15) (2007) 2370-2377.
- [16] M. Reyhanian, Croizet, Cédric, Gagniol, R, Numerical analysis of the mixing of two gases in a microchannel, *Mechanics & Industry*, 14(6) (2013) 453-460.
- [17] M. Darbandi, Sabouri, M., DSMC Study of Gas Mixing Enhancement in Nanoscales Using Throttling Technology, in: *5th International Conference on Nanostructures*, Kish Island, 2014.
- [18] M. Darbandi, Lakzian, E., Mixing enhancement of two gases in a microchannel using DSMC, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, Dubai, 2013, pp. 166-169.
- [19] C.Y. Huang, Wan, S. A., Hu, Y. H., Oxygen and nitrogen gases mixing in T-type micromixers visualized and quantitatively characterized using pressure-sensitive paint, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 111 (2017) 520-531.
- [20] C.Y. Huang, Hu, Y.H., Wan, S.A., Nagai, H., Application of pressure-sensitive paint for the characterization of mixing with various gases in T-type micromixers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156 (2020) 119-131.
- [21] G. Karniadakis, Beskok, A., Aluru, N., *Microflows*
- [1] M.A. Moyet, Hossen, M. R., Ward, A., Adams, O., Mason, M. D., Collins, S. D., Smith, R. L., MEMS Micromixer for Ultra Fast Mixing of Fluids, in: *2020 IEEE 33rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, IEEE, China, 2020, pp. 1137-1140.
- [2] B. Farshchian, Amirsadeghi, A., Choi, J. P., Daniel S., Namwon, P., 3D nanomolding and fluid mixing in micromixers with micro-patterned microchannel walls, *Nano Convergence*, 4(1) (2017) 1-10.
- [3] Y. Su, Chen, G., Kenig, E. Y., An experimental study on the numbering-up of microchannels for liquid mixing, *Lab on a Chip*, 15(1) (2015) 179-187.
- [4] I. Shah, Kim, S. W., Kim, K., Doh, Y. H., Choi, K. H., Experimental and numerical analysis of Y-shaped split and recombination micro-mixer with different mixing units, *Chemical Engineering Journal*, 358 (2019) 691-706.
- [5] H.A. Stone, Kim, S, *Microfluidics: basic issues, applications, and challenges*, American Institute of Chemical Engineers. *AIChE Journal*, 47(6) (2001) 1250-1271.
- [6] A.D. Stroock, Dertinger, Stephan KW, Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H. A., Whitesides, G. M., Chaotic mixer for microchannels, *Science*, 295(5555) (2002) 647-651.
- [7] S.S. Das, Tilekar, S. D., Wangikar, S. S, Patowari, P. K., Numerical and experimental study of passive fluids mixing in micro-channels of different configurations, *Microsystem Technologies*, 23(12) (2017) 5977-5988.
- [8] C.Y. Lee, Wang, W. T., Liu, C. C., Fu, L. M., Passive mixers in microfluidic systems: A review, *Chemical Engineering Journal*, 288 (2016) 146-160.
- [9] X. Shi, S. Huang, L. Wang, F. Li, Numerical analysis of passive micromixer with novel obstacle design, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(3) (2021) 440-456.
- [10] G. Cai, Xue, L., Zhang, H., Lin, J., A review on micromixers, *Micromachines*, 8(9) (2017) 274-281.
- [11] X. Chen, S. Liu, Y. Chen, S. Wang, A review on species

- IOP Publishing, 2019, pp. 12-21.
- [29] C.-Y. Wu, B.-H. Lai, Numerical study of T-shaped micromixers with vortex-inducing obstacles in the inlet channels, *Micromachines*, 11(12) (2020) 1122.
- [30] D. Gobby, P. Angeli, A. Gavriilidis, Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers, *Journal of Micromechanics and microengineering*, 11(2) (2001) 126.
- [31] A. Lobasov, A. Minakov, Analyzing mixing quality in a T-shaped micromixer for different fluids properties through numerical simulation, *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 124(4) (2018) 11-23.
- [32] C.A. Roseman, Argrow, Brian M, Low-Speed DSMC Simulations of Hotwire Anemometers at High-Altitude Conditions, *Fluids*, 6(1) (2021) 20-32.
- [33] A. Uyanwaththa, Malalasekera, W., Hargrave, G., Dubal, M., Large eddy simulation of scalar mixing in jet in a cross-flow, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(6) (2019) 531-542.
- [34] C. Priere, Gicquel, L. Y. M., Kaufmann, P., Krebs, W., Poinso, T., Large eddy simulation predictions of mixing enhancement for jets in cross-flows, *Journal of Turbulence*, 5 (2004) 303-313.
- [35] X. Chu, Zeng, X., Zheng, T., Z., Weihuang, Y., Yifan, Z., Wei, H. Y., Structural design and performance research of methanol steam reforming microchannel for hydrogen production based on mixing effect, *International journal of hydrogen energy*, 45(41) (2020) 0859-0874.
- and nanoflows: fundamentals and simulation, Springer Science & Business Media, 2006.
- [22] N. Shah, Gavasane, A., Agrawal, A., Bhandarkar, U., Comparison of Various Pressure Based Boundary Conditions for Three-Dimensional Subsonic DSMC Simulation, *Journal of Fluids Engineering*, 140(3) (2018) 217-233.
- [23] M. Wang, Z. Li, Simulations for gas flows in microgeometries using the direct simulation Monte Carlo method, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 25(6) (2004) 975-985.
- [24] E. Lekzian, Ebrahimi, A, Parhizkar, H, Performance analysis of microelectromechanical thrusters using a direct simulation Monte Carlo solver, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 232(7) (2018) 1212-1222.
- [25] E. Roohi, Stefanov, S., Shoja-Sani, A., Ejraei, H., A generalized form of the Bernoulli Trial collision scheme in DSMC: Derivation and evaluation, *Journal of Computational Physics*, 354 (2018) 476-492.
- [26] M. Shamseddine, Lakkis, I., A novel spatio-temporally adaptive parallel three-dimensional DSMC solver for unsteady rarefied micro/nano gas flows, *Computers & Fluids*, 186 (2019) 1-14.
- [27] D. Bothe, C. Stemich, H.-J. Warnecke, Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer, *Chemical Engineering Science*, 61(9) (2006) 2950-2958.
- [28] L.T. Rao, S. Goel, S.K. Dubey, A. Javed, Performance Investigation of T-Shaped Micromixer with Different Obstacles, in: *Journal of Physics: Conference Series*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Lekzian, H. R. Farshi Fasih, *Effect of Obstacles Location and Flow Injection on the Mixing of Two-Gaseous Flow in a Microchannel*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(9) (2022) 2139-2156.

DOI: [10.22060/mej.2022.21339.7431](https://doi.org/10.22060/mej.2022.21339.7431)

