



بررسی عددی اختلاط در میکرومیکسرهای T شکل دوگانه و چندگانه با ورودی های همراستا و ناهمراستا

عرفان نعمت الهی، محمد سفید*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۰۳

بازنگری: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵

پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۲۰

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۲-۲۴

کلمات کلیدی:

بررسی عددی
T میکرومیکسرهای دوگانه و چندگانه
شاخص اختلاط
ناهمراستا
افت فشار

خلاصه: در این پژوهش عددی، رفتار اختلاط دو سیال آب و اتانول با چگالی و لزجت متفاوت در پنج گونه T میکرومیکسر مطالعه شده است. هندسه های پژوهش شامل هندسه های ۱ و ۲ که به ترتیب T میکرومیکسرهای چندگانه با ورودی های همراستا در یک و دو صفحه و هندسه های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب T میکرومیکسر چندگانه، T میکرومیکسر دوگانه و T میکرومیکسر می شوند. کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلونت به منظور شبیه سازی فرآیند اختلاط، در عدد اشمیت ۷۵۲/۲۶ و در محدوده ی اعداد رینولدز ۱ تا ۲۰۰ استفاده شده است. در میکرومیکسرهای دوگانه و چندگانه به ترتیب دو و سه نوع ترتیب قرارگیری برای دو سیال در ورودی ها بررسی و نتایج مقایسه شده است. اعتبارسنجی پژوهش حاضر با مطالعه کورتس کی روش و همکاران انجام شده است. نتایج اختلاط به ازای انواع جریان خاص در میکرومیکسرهای چندگانه و دوگانه با تنها نوع جریان در T میکرومیکسر مقایسه شده است. نتایج بیانگر است که شاخص اختلاط و افت فشار علاوه بر تعداد ورودی های میکرومیکسر، تابع نحوه قرارگیری آن ها و نیز به ازای هندسه های دارای بیش از دو ورودی تابع ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی ها است. مقدار $0/4878$ حداکثر شاخص اختلاط به ازای جریان نوع ۱ و عدد رینولدز ۱ در T میکرومیکسر چندگانه مشاهده شده است.

۱- مقدمه

بر بزرگ ترین مقیاس حرکت حاکم است اشاره دارد. اختلاط میکرو، اختلاط در اندازه کوچک ترین مقیاس حرکت سیال و حرکت مولکولی است. اختلاط مسو در مقیاسی میان ماکرو و میکرو قرار دارد. انواع مختلف میکرومیکسرها اولین بار توسط نگوین و وو عنوان شد [۳]. میکرومیکسرها شامل دو تقسیم بندی منفعل و فعال می باشند که در میکرومیکسرهای منفعل بدون نیاز به منبع انرژی خارجی و تنها با استفاده از انرژی پمپاژ اختلاط صورت می گیرد [۴]. میکرومیکسرهای منفعل که همچنین میکرومیکسرهای استاتیک نامیده می شوند، به منظور افزایش پخش مولکولی و جابه جایی نامنظم برای اختلاط کارآمد بر اساس ساختار میکروکانال ها به کار می روند [۳].

میکرومیکسرها تأثیر قابل توجهی بروی کارایی و حساسیت بروی دستگاه های میکروسیالی دارند که یکی از بااهمیت ترین مؤلفه های این دستگاه ها است [۱]. کاربردهای اختلاط در میکرومیکسرها می توان به ترکیب مذاب پلیمرها، ردیابی آلاینده ها در رودخانه های بزرگ، ترکیب جریان های جوی اشاره نمود [۲]. اختلاط فرآیند اصلی است که در اکثر دستگاه های میکروسیالی از قبیل تشخیص های پزشکی، توالی یابی ژنتیکی^۱، تولیدات شیمیایی، کشف داروها کاربرد دارد. در اختلاط سه اصطلاح به کار برده می شود: ۱. اختلاط مسو^۱، ۲. اختلاط ماکرو^۲، ۳. اختلاط میکرو^۳، اختلاط ماکرو به ترکیبی که

افزل و کیم [۵] بررسی اختلاط سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی را در هندسه های میکرومیکسر T شکل و میکروکانال های مارپیچ ارائه کردند همچنین آن ها از مدل های ویسکوزیته خون غیر نیوتونی کارنو

- 1 Genetic Sequencing
- 2 Meso
- 3 Macro
- 4 Micro

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mhsefid@yazd.ac.ir



T میکرومیکسر بررسی‌ها پایا بوده است. مهوب و همکاران [۷] یک پژوهش عددی و همچنین کار تجربی روی دو میکرومیکسر با هندسه T شکل و میکرومیکسر صلیبی شکل انجام داده‌اند، انتقال جرم درون میکرومیکسر با هندسه T شکل و میکرومیکسر با هندسه صلیبی شکل را با روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین روش تجربی میکروسکوپی لیزری هم کانون^۱ بررسی کرده و از پروفیل‌های غلظت بر اساس رژیم‌های جریان مختلف برای مقایسه دو هندسه استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که میکرومیکسر صلیبی شکل در نرخ‌های پایینی جریان، تمایل بیشتری به تشدید اختلاط در مقایسه با میکرومیکسر T شکل دارد. آن‌ها در مدل‌سازی عددی از فلونت با ۶/۲ استفاده کردند.

ربانی و طالبی [۸] شبیه‌سازی عددی اثر لایه‌بندی در میکرومیکسر با هندسه T شکل به همراه ورودی‌های ناهمراستا بوده است. به‌منظور شبیه‌سازی میدان جریان از روش شبکه‌بندی بولتزمن استفاده کردند و به‌منظور شبیه‌سازی انتقال جرم از روش تفاضل محدود بالادست مرتبه دوم استفاده کردند. مطالعه آن‌ها در محدوده اعداد رینولدز ۱۰ تا ۷۰ انجام شده که بیشترین شاخص اختلاط برای لایه‌بندی عمودی و نامتقارن در رینولدز ۷۰ و برابر ۰/۶۸۹ و کمترین شاخص اختلاط برای لایه‌بندی افقی و نامتقارن در رینولدز ۱۰ برابر ۰/۱۹۸ بوده است. تفاوت پژوهش ربانی و طالبی با پژوهش انصاری و همکاران [۹] در لایه‌بندی در ورودی میکرومیکسر است. اگرچه استفاده از ورودی‌های ناهمراستا دارای پیچیدگی بیشتری نسبت به حالت دیگر است ولی این مدل منجر به افزایش فضای مابین دو سیال و تولید گردابه در ترکیبات^۲ (برخورد) جریان دو سیال می‌شود. هافمن و همکاران [۱۰] در پژوهشی به‌صورت تجربی یک میکرومیکسر T شکل ساده با مقاطع مستطیلی مورد مطالعه قرار داده‌اند که یک تقریب خوب را برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی‌های عددی ارائه می‌کند، اگرچه بررسی آن‌ها در محدوده اعداد رینولدز پایین و بدون حضور جریان مغشوش بوده است ولی میکرومیکسر T شکل خود باعث ایجاد ساختارهای گردابی می‌شود. هدف از پژوهش آن‌ها این است که باوجود شرایط جریان آرام، طول‌های کوتاه نفوذ به منظور ارزیابی مکانیزم‌ها و شرایط موردنیاز قابل‌دستیابی خواهد بود. به‌منظور محاسبه کیفیت اختلاط و همچنین نواحی تماسی مابین میدان غلظت به‌وسیله القای لیزر

یاسودا و کاسن جهت حصول مشخصه‌های غیرنیوتونی استفاده کردند. معادلات ناویر استوکس با مدل جابه‌جایی یا انتقال انتشار برای غلظت گونه‌ها در تجزیه و تحلیل جریان و اختلاط حل شده است. در شرایط اعمالی مشابه دینامیک جریان و اختلاط میان سیال آب به‌عنوان سیال نیوتونی و خون با استفاده از مدل غیرنیوتونی کارئو یاسودا مقایسه شده است. برای نرخ جریان جرمی کمتر از ۰/۰۱ کیلوگرم بر ساعت، عملکردهای اختلاط دو سیال تقریباً معادل بوده و با نرخ جریان کاهش می‌یابد. اختلاط با آب با افزایش نرخ جریان به طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. اگرچه با استفاده از مدل کارئو یاسودا برای خون تغییر ناچیزی در عملکرد اختلاط مشاهده شد. بررسی‌ها در محدوده گسترده‌ای از نرخ‌های جریان انجام شده است. زارع و طالبی [۳] در یک مطالعه عددی میکرومیکسری L شکل را به‌منظور بررسی رفتار اختلاط و مشخصه‌های جریان سیال در اعداد رینولدز مختلف مدل‌سازی کردند. آن‌ها سه پارامتر هندسی بی‌بعد طول نرمال، نسبت طول و نسبت ابعاد برای اعداد رینولدز در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ در نظر گرفته‌اند که از یک شاخص اختلاط برای ارزیابی رفتار سیال در میکروکانال استفاده شده است. شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار فلونت و در عدد اشمیت ۹۰۰/۱۸ بوده است. کورتس کی‌روش و همکاران [۶] پژوهشی عددی بروی دو هندسه شامل T میکرومیکسر ناهمراستا و همچنین T میکرومیکسر انجام داده‌اند. ابعاد طول‌های کانال مساوی و همچنین مقاطع عرضی و نرخ‌های یکسان جریان در نظر گرفته‌اند. نتایج حاصل از بررسی جریان بیانگر آن است که در هندسه T میکرومیکسر ناهمراستا به علت آن‌که ساختارهای گردابی جریان به‌سرعت تشکیل می‌شوند، این ساختارها باعث افزایش قابل‌توجه خطوط اتصال سیالات و افزایش اختلاط می‌شوند که میکرومیکسر بررسی‌شده افزایش قابل‌توجه‌ای از اختلاط و همچنین افت فشار کمتری و سطح یکسانی از تنش برشی را در مقایسه با T میکرومیکسر نشان می‌دهد. برای الگوهای جریان محدوده اعداد رینولدز موردبررسی از ۱۰۰ تا ۵۰۰ بوده است و محدوده کل اعداد رینولدز در بازه ۷۵ تا ۷۰۰ قرار داشته است. شبیه‌سازی‌های مربوط به هندسه با ورودی‌های ناهمراستا در حالت‌پایا و برای هندسه T میکرومیکسر، در دو عدد رینولدز ۵۰۰ و ۷۰۰ جهت رسیدن به همگرایی به‌صورت ناپایا بوده است اما در سایر اعداد رینولدز در هندسه

1 Confocal Laser Scanning Microscopy Methods

2 Confluences

برای هندسه‌های دارای شش ورودی سه ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها و برای هندسه T میکرومیکسر دوگانه که دارای چهار ورودی می‌باشد دو ترتیب برای قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها بررسی شده است. در پدیده پخش جرم از قانون فیک^۵ که در حل معادلات انتقال جرم با داشتن ضریب پخش مولکولی در محاسبه شار پخش مولکولی گونه i به کار می‌رود استفاده شده است [۳].

۲-۱- معادلات و شرایط مرزی

در این مدل‌سازی برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی، از روش بالادست مرتبه دوم^۶ و به منظور کوپلینگ میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل‌سی^۷ استفاده شده است. معادلات انتقال جرم، بقای مومنتوم، بقای جرم در سه بعد و با دقت دو برابر حل شده است. همچنین دقت همگرایی باقی‌مانده‌ها^۵ ۱۰^{-۵} در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، شرط مرزی عدم لغزش و عدم نفوذ در دیواره‌ها اعمال شده است. توزیع سرعت در ورودی‌های میکرومیکسرها به صورت یکنواخت اعمال شده و جریان به صورت غیرقابل تراکم و پایا و لزج و هم‌دما در حالت سه‌بعدی در نظر گرفته شده است. به ترتیب معادلات بقای جرم و بقای مومنتوم و انتقال جرم در روابط (۱) تا (۳) بیان می‌شود.

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

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\tau}), \quad \bar{\tau} = \mu \left[\left(\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla} \vec{V}^T \right) - \frac{2}{3} \vec{\nabla} \cdot \vec{V} I \right] \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} C_i) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_i, \quad \vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \vec{\nabla} C_i \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی سیال، P فشار، $\bar{\tau}$ تانسور تنش، μ لزجت مولکولی، I تانسور تنش واحد، C_i کسر جرمی گونه، $D_{i,m}$ ضریب پخش مولکولی می‌باشد.

به منظور یافتن چگالی مخلوط که شامل دو یا چند سیال می‌باشد از رابطه (۴) استفاده می‌شود [۳].

میکروفلورسنت^۱ و برای محاسبه میدان سرعت به وسیله سرعت‌سنج تصویری میکروذره^۲ استفاده شده است. رسولی و همکاران [۱۱] یک پژوهش عددی دو طرح مختلف از میکرومیکسر منفعل T شکل با موانع مستطیل شکل و همچنین طرحی با شیارهای ایجاد شده در کانال اختلاط به منظور بررسی و نظارت بر بازده اختلاط را بررسی و مشاهده کردند در حالتی که عدد رینولدز کمتر از ۲ باشد بازده اختلاط در حالت موانع مستطیلی ۳۷/۲ درصد و در حالت شیارهای ایجاد شده ۴۳/۸ درصد عملکرد اختلاط را افزایش می‌دهد. این بررسی عددی در محیط چند فیزیکی کامسل^۳ انجام شده است. گابی و همکاران [۱۲] در پژوهشی از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه‌سازی و مطالعه مشخصه‌های اختلاط استفاده شده است در پژوهش آن‌ها از مخلوط‌کننده در مقیاس میکرو برای جریان گازی به عنوان پارامترهای طراحی استفاده شده است. این طرح‌ها بر مبنای پیکربندی T شکل و گازها با ویسکوزیته مختلف به کار برده شده است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که طول اختلاط با توجه به نسبت ابعاد و سرعت سیال افزایش می‌یابد. تغییر زاویه اختلاط در ورودی کانال‌ها تغییر قابل توجهی بر عملکرد اختلاط نمی‌گذارد ولی باعث مهار کردن (اختناق)^۴ سیال به صورت قابل توجهی می‌شود که این منجر به کاهش طول اختلاط می‌شود نتایج این پژوهش با پیش‌بینی‌های عددی فوریه مقایسه شده است. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که تغییر زوایای ورودی محدودیت‌های مفیدی در طراحی اولیه هندسه ایجاد می‌کند. اختلاط با زوایای منفی منجر به ایجاد نواحی سکون (ایستا) می‌شود درحالی‌که برای تغییر زوایای مثبت این گونه نیست.

۲- بررسی عددی با استفاده از روش حجم محدود

در پژوهش حاضر رفتار اختلاط دو سیال در پنج هندسه سه‌بعدی به صورت عددی و با استفاده از کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلونت ۱۸ انجام شده است. همچنین هنگامی که تعداد ورودی‌های میکرومیکسر بیشتر از دو ورودی باشد می‌توان بررسی کرد که از کدام ورودی سیال اول و کدام ورودی سیال دوم وارد شود تا میزان اختلاط بالاتری حاصل شود. در پژوهش حاضر

- 1 Micro Laser-Induced Fluorescence
- 2 Micro Particle Image Velocimetry
- 3 COMSOL Multiphysics Environment
- 4 Throttling

5 Fick's Law
6 Secend Order Upwind
7 SIMPLEC

۲-۲- خواص سیالات

در پژوهش حاضر به منظور شبیه‌سازی رفتار اختلاط از دو سیال آب و اتانول که نسبت به یکدیگر دارای چگالی و لزجت متفاوت هستند، استفاده شده است. ضریب نفوذ جرمی دو سیال نسبت به یکدیگر $1/2 \times 10^{-9} \text{ s}^2 \text{ m}^{-1}$ در نظر گرفته شده است. خواص این دو سیال در جدول ۱ نشان داده شده است [۱۳].

۳-۲- هندسه‌های مورد مطالعه

در پژوهش حاضر اختلاط دو سیال آب و اتانول در داخل پنج هندسه مختلف بررسی شده است. هندسه ۱ مورد بررسی یک T میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهمراستا در یک صفحه می‌باشد، هندسه ۲، T میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهمراستا در دو صفحه است و هندسه ۳ نیز یک T میکرومیکسر چندگانه می‌باشد. هندسه ۴، T میکرومیکسر دوگانه و هندسه ۵، T میکرومیکسر است. طول کل میکروکانال اختلاط $3000 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است. سطح مقطع ورودی‌ها به ازای هر پنج هندسه $10000 \mu\text{m}^2$ می‌باشد. شکل ۱ طرح هندسه‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

۳- استقلال حل از شبکه‌بندی

به منظور بررسی استقلال حل از شبکه محاسباتی، پنج شبکه‌بندی مختلف به صورت غیریکنواخت با عناصر شش‌وجهی بررسی شده است. در شکل ۲ به ازای تعداد سلول‌های مورد استفاده در شبکه‌بندی غیریکنواخت شاخص اختلاط برای هندسه ۱ در طول میکروکانال اختلاط به ازای شبکه‌بندی‌های مختلف رسم شده است. در این شکل شاخص اختلاط در مقاطع عرضی به ازای تعداد المان‌های شبکه‌بندی ۴۳۲۶۳۳۶ در مقایسه با شاخص اختلاط در مقاطع عرضی با تعداد المان‌های ۳۸۵۷۱۱۲ می‌توان گفت که شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های ۳۸۵۷۱۱۲ در هندسه ۱ برای حل مسئله کافی می‌باشد. جدول ۲ بیانگر تعداد گره‌ها و المان‌های

جدول ۱: خواص سیالات در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد [۱۳]

Table 1: Properties of fluids at 20°C

سیال	چگالی (kgm^{-3})	لزجت ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
آب	۹۹۷	۰/۰۰۰۹
اتانول	۷۸۹	۰/۰۰۱۲

$$\rho = \frac{l}{\sum_i C_i / \rho_i} \quad (4)$$

که در آن C_i کسر جرمی گونه و چگالی گونه در یک مخلوط شامل دو سیال که کسر جرمی گونه اول از رابطه (۵) قابل محاسبه است [۲].

$$C_l = \frac{m_l}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

که در رابطه (۵) m_l جرم گونه ۱ و m_2 جرم گونه ۲ می‌باشد. به منظور محاسبه لزجت یک مخلوط شامل دو سیال از رابطه (۶) با استفاده از یک تابع نمایی تعریف می‌شود [۳].

$$\mu(C_l) = \mu_2 \exp\left(-C_l \ln \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \quad (6)$$

دو عدد بی‌بعد رینولدز و اشمیت و رابطه آن‌ها با عدد بی‌بعد پکلت در رابطه (۷) آورده شده‌اند [۱۰].

$$Re = \frac{\rho V d_h}{\mu}, \quad SC = \frac{\mu}{\rho D}, \quad SC = \frac{Pe}{Re} \quad (7)$$

دو عدد بی‌بعد بر اساس مجرای ورودی آب تعریف شده‌اند که V سرعت متوسط جریان، d_h قطر هیدرولیکی کانال اختلاط که از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

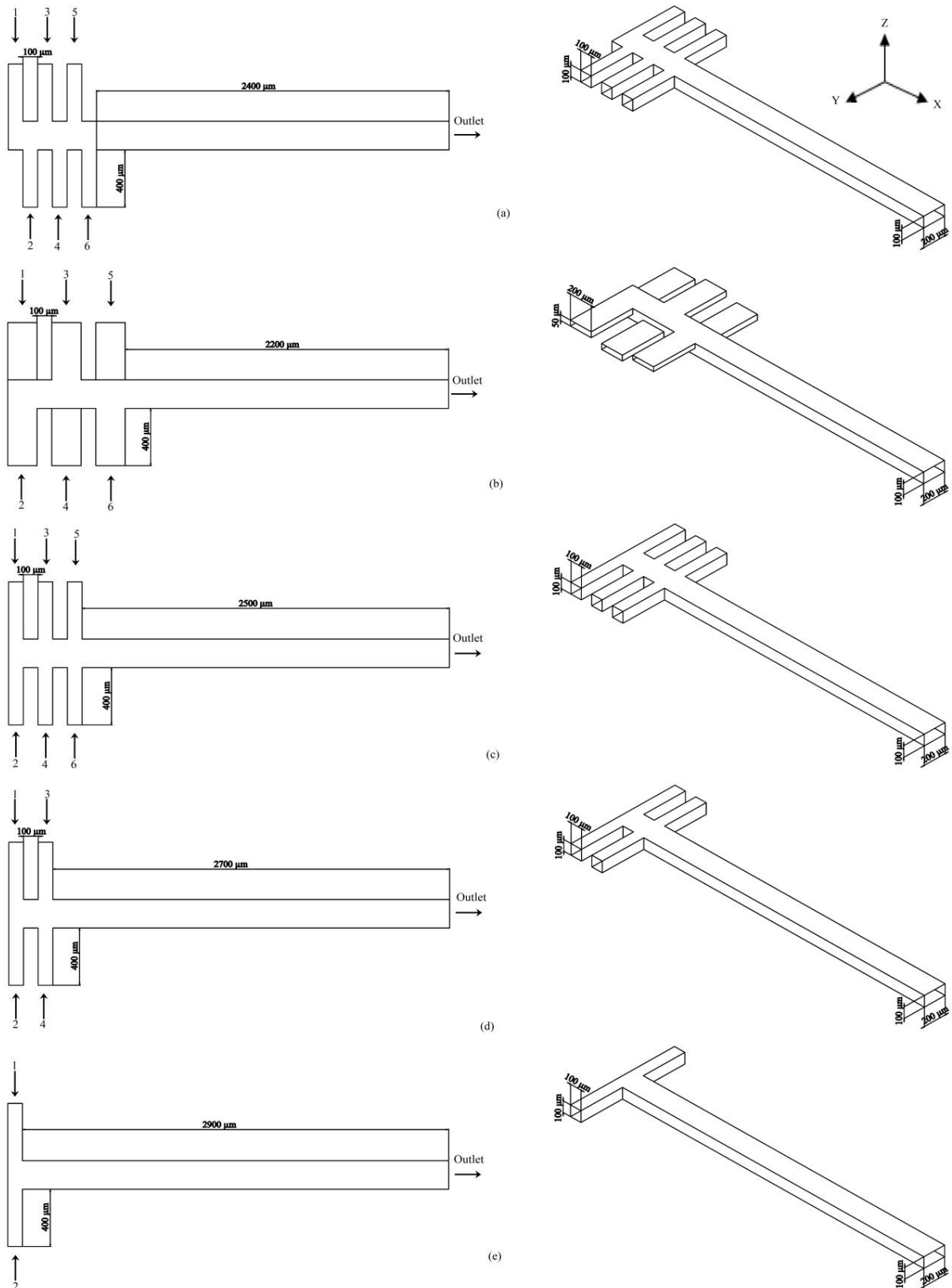
$$d_h = \frac{2WH}{(W+H)} \quad (8)$$

که W پهنای کانال اختلاط و H ارتفاع کانال اختلاط می‌باشند [۱۰].

به منظور محاسبه میزان اختلاط حاصل شده در کانال اختلاط از شاخص اختلاط استفاده می‌شود که به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود [۶].

$$Mi = 1 - \sqrt{\frac{\int (C - \bar{C})^2 dA}{A \bar{C}(1 - \bar{C})}} \quad (9)$$

که در رابطه (۹)، C توزیع غلظت یا کسر جرمی و \bar{C} مقدار متوسط میدان غلظت یا کسر جرمی متوسط روی هر سطح و A نیز مساحت سطح مقطع می‌باشد.



شکل ۱: شماتیک میکرومیکسرها (a) هندسه ۱، میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهمراستا در یک صفحه (b) هندسه ۲، میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهمراستا در دو صفحه (c) هندسه ۳، میکرومیکسر چندگانه (d) هندسه ۴، دوگانه (e) هندسه ۵.

Fig. 1: Schematic of the T-shaped micromixers (a) Geometry No. 1, multiple with non-aligned inputs in one plane (b) Geometry No. 2, multiple with non-aligned inputs in two planes (c) Geometry No. 3, multiple, (d) Geometry No. 4, Double, (e) Geometry No. 5.

هر هندسه را با نوع یکسان شبکه‌بندی به کار برده شده نشان می‌دهد. به‌منظور درک صحیح از شبکه‌بندی مورد استفاده در هندسه‌ها، شکل ۱ نوع یکسان شبکه‌بندی را در هندسه ۱ نشان می‌دهد.

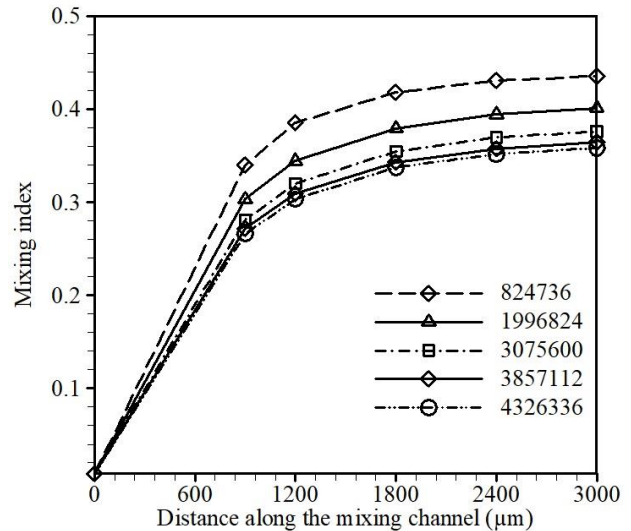
۴- اعتبارسنجی

در کار حاضر به‌منظور اطمینان از صحیح بودن روش عددی مورد استفاده از پژوهش کورتس کی‌روش و همکاران [۶] استفاده شده است. برای هندسه دارای ورودی‌های ناهمراستا نتایج میزان اختلاط در مقطع خروجی کانال اختلاط در هفت عدد رینولدز بررسی شده است که در شکل ۴ هندسه با ورودی‌های ناهمراستا در کار کورتس کی‌روش و همکاران نشان داده شده است. در شکل ۵ نتایج کار حاضر با پژوهش کورتس کی‌روش و همکاران مقایسه شده که تطابق خوبی میان نتایج کار حاضر و پژوهش آن‌ها مشاهده می‌شود. شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در مرجع [۶] مطالعه پایای هندسه دارای ورودی‌های ناهمراستا بوده است. تعداد المان‌های شبکه‌بندی غیریکنواخت به کار رفته در پژوهش آن‌ها، ۴۳۱۵۲۷۹ عدد بوده است و در کار حاضر جهت مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج پژوهش [۶]، از شبکه‌بندی با ۴۱۷۴۶۹۲ المان استفاده شده است.

۵- تحلیل نتایج

۱-۵- بررسی ترتیب قرارگیری سیال در ورودی‌ها

در هندسه‌های ۱ تا ۴ که تعداد ورودی‌ها بیش از دو ورودی



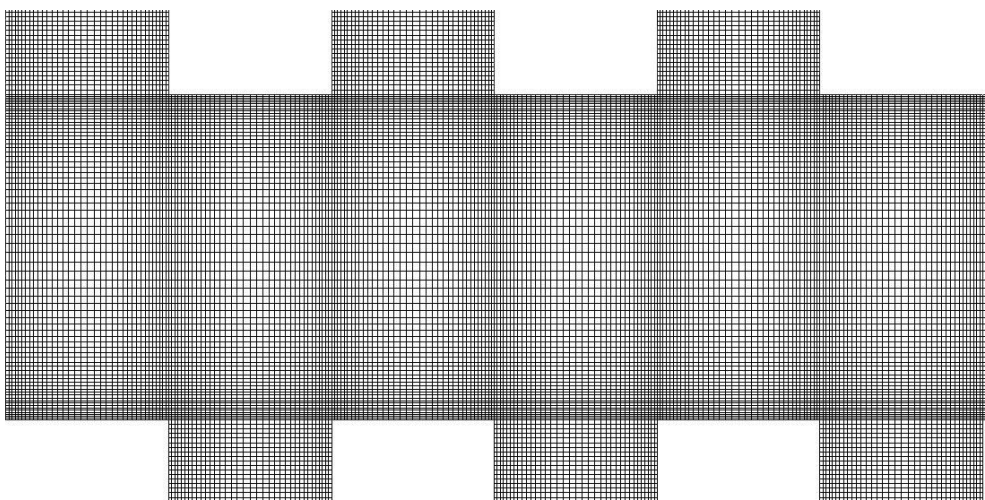
شکل ۲: شاخص اختلاط در مقاطع عرضی در طول کانال اختلاط برای شبکه‌بندی‌های مختلف در عدد رینولدز ۲۰۰ (هندسه ۱)

Fig. 2: Mixing index at cross sections along the mixing channel for different grids at Re=200 (geometry No. 1)

جدول ۲: اطلاعات نوع یکسان شبکه‌بندی استفاده شده در هندسه‌ها

Table 2: The same type of information used in grid geometry

گره	المان	هندسه
۴۰۳۸۴۰۲	۳۸۵۷۱۱۲	۱
۴۰۲۹۵۵۲	۳۸۳۴۰۰۰	۲
۴۰۳۸۴۰۲	۳۸۵۷۱۱۲	۳
۳۶۴۶۸۶۸	۳۴۸۶۴۵۶	۴
۳۲۵۵۳۳۴	۳۱۱۵۸۰۰	۵



شکل ۳: نمای قسمتی از ورودی‌ها و کانال اختلاط در صفحه (x-y) از شبکه‌بندی استفاده شده (هندسه ۱)

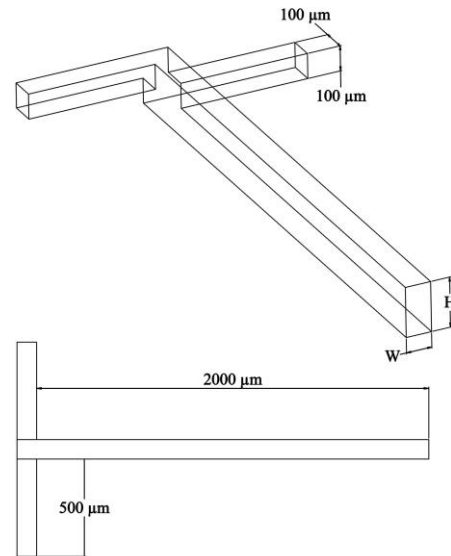
Fig. 3: Partial view of inputs and mixing channel in (x-y) plane view of grid used (Geometry No. 1)

قرار گرفته است، در هندسه ۴ با چهار ورودی دو ترتیب قرارگیری سیال در ورودی‌ها قابل تعریف می‌باشد. با هدف سهولت مقایسه و بیان نتایج، برای ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها برای هر یک از ۳ ترتیب قرارگیری سیال‌ها در ورودی‌ها، یک شماره جریان در نظر گرفته شده است. این نام‌گذاری به این صورت می‌باشد که برای ترتیب اول قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها نام‌گذاری جریان ۱، و برای ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها نام‌گذاری جریان ۲ و برای ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها نام‌گذاری جریان ۳ انتخاب شده است. در مورد هندسه ۵ که T میکرومیکسر ساده است که این نام‌گذاری شامل آن نمی‌شود به این دلیل که فقط یک ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها می‌توان در نظر گرفت.

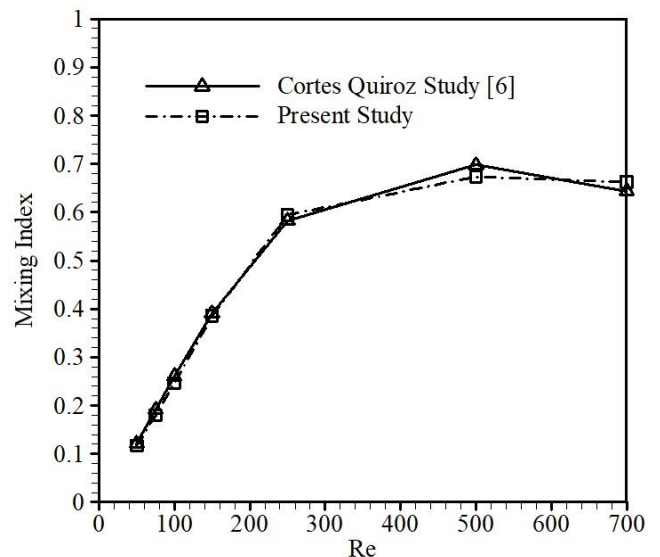
به ازای جریان ۱ در هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ در ورودی‌های ۱، ۵ و ۴ سیال آب وارد کانال اختلاط می‌شود و از سایر ورودی‌ها سیال اتانول وارد می‌شود و همچنین به ازای این نوع جریان برای هندسه ۴ که دارای چهار ورودی می‌باشد، از ورودی‌های ۱ و ۴ آب وارد کانال اختلاط شده و از دو ورودی دیگر سیال اتانول وارد می‌شود. به ازای جریان ۲ در هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ در ورودی‌های ۱، ۳ و ۶ سیال آب و از سه ورودی دیگر سیال اتانول وارد می‌شود. جریان ۲ برای هندسه ۴ به دلیل وجود چهار ورودی تعریف نمی‌شود. به ازای جریان ۳ در هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ در ورودی‌های ۱، ۳ و ۵ سیال آب وارد کانال اختلاط شده و از سه ورودی دیگر سیال اتانول وارد می‌شود. به ازای جریان ۳ در هندسه دارای چهار ورودی از ورودی‌های ۱ و ۳ سیال آب و از دو ورودی دیگر سیال اتانول وارد می‌شود.

۵-۲- بررسی تأثیر محدوده اعداد رینولدز بر جریان آرام

در مطالعه حاضر شش عدد رینولدز در محدوده‌ای از اعداد رینولدز ۱ تا ۲۰۰ در نظر گرفته شده است که این محدوده از اعداد رینولدز شامل جریان آرام خزشی نیز می‌شود که در جریان خزشی علت غالب اختلاط میان دو سیال مورد بررسی، غلبه نیروی لزجت بر نیروی اینرسی می‌باشد. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز برابر با ۱، که در محدوده جریان خزشی قرار دارد، بخش عمده‌ای از میزان اختلاط حاصل‌شده ناشی از تأثیرات نیروی لزجت می‌باشد. با افزایش اعداد رینولدز و به‌تبع آن افزایش سرعت که موجب بی‌نظمی بیشتر در جریان می‌شود، تأثیرات لزجت تا عدد رینولدز بحرانی کاهش می‌یابد



شکل ۴: شماتیک T میکرومیکسر با ورودی‌های ناهمراستا [۶]
Fig. 4: Schematic geometry with non-aligned inputs



شکل ۵: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به اعداد رینولدز مختلف در مقطع خروجی کانال اختلاط

Fig. 5: Comparison of the mixing index versus different Reynolds numbers at the outlet mixing channel

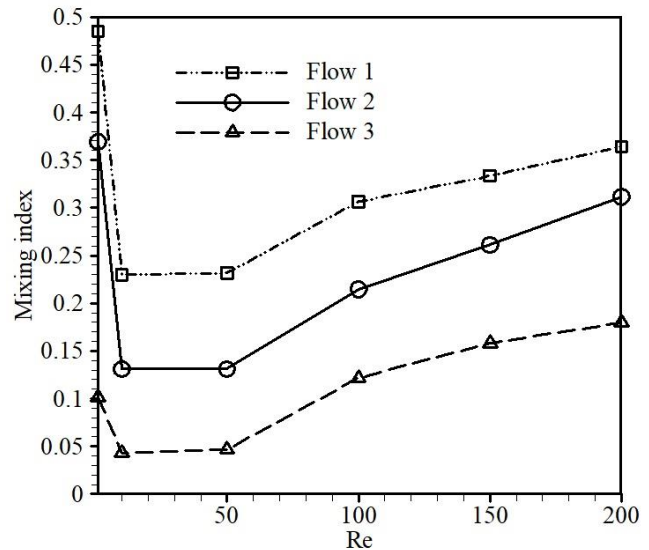
می‌باشد، ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها اهمیت دارد و در هندسه ۵ که تنها دارای دو ورودی می‌باشد، تنها یک ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها تعریف می‌شود.

در مطالعه حاضر برای هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ که دارای شش ورودی هستند، سه ترتیب قرارگیری برای دو سیال، مورد بررسی

جریان دیگر داراست، جریان ۲ در این هندسه نیز نسبت به جریان ۳ در تمامی اعداد رینولدز میزان اختلاط بهتری را از خود نشان می‌دهد. شکل ۷ که شاخص اختلاط برحسب رینولدز مربوط به هندسه ۲ می‌باشد، در این هندسه نیز میزان اختلاط به ازای سه نوع جریان ۱، جریان ۲ و جریان ۳ بررسی شده است که نتایج به دست آمده بیانگر آن است که به ازای جریان ۱ در این هندسه، همانند هندسه ۱ نسبت به دو جریان دیگر میزان اختلاط بیشتری را نشان می‌دهد و در مقایسه جریان ۲ با جریان ۳ در هندسه ۲ می‌توان این‌گونه بیان کرد که جریان ۳ از میان شش رینولدز مورد بررسی در دو عدد رینولدز ۱۵۰ و ۲۰۰ میزان اختلاط بالاتری را نسبت به جریان ۲ نشان می‌دهد، در جریان ۳ تأثیرات افزایش سرعت به سبب افزایش عدد رینولدز، در دو عدد رینولدز ۱۵۰ و ۲۰۰ منجر به اختلاط بهتری نسبت به جریان ۲ برای این هندسه شده است. در واقع میزان بی‌نظمی و گردابه‌های ایجاد شده و همچنین گردش^۱ ایجاد شده در جریان ۳ در این دو عدد رینولدز مورد بررسی بیشتر از جریان ۲ بوده است. شکل ۸ نشان‌دهنده نتایج تغییرات شاخص اختلاط سه نوع جریان مورد بررسی برای هندسه ۳ می‌باشد که در این هندسه نیز ترتیب نتایج حاصل از سه نوع جریان مورد بررسی همانند هندسه ۱ بوده است. شکل ۹ مربوط به هندسه ۴ می‌باشد که برای این هندسه فقط دو نوع جریان ۱ و نوع جریان ۳ قابل تعریف می‌باشد که جریان ۱ میزان اختلاط بهتری را در این هندسه دارد.

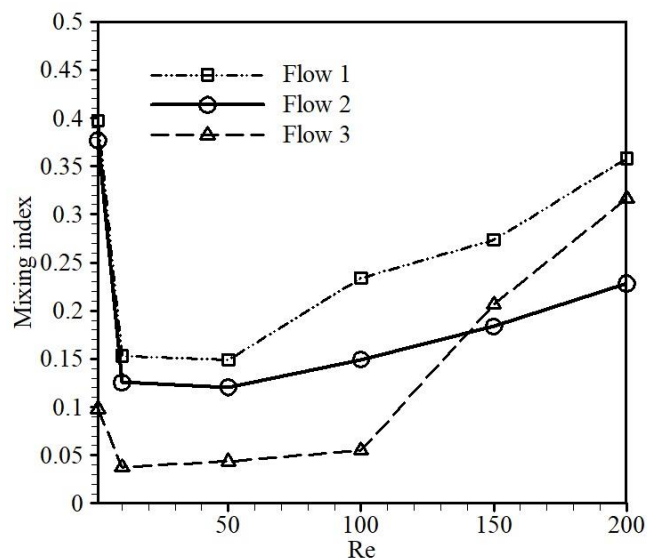
۵-۱- تأثیر تعداد ورودی‌ها و نحوه قرارگیری آن‌ها

مقایسه تأثیرات هندسه‌ها به ازای اعمال یک نوع جریان در ورودی‌ها نیز انجام شده است و با توجه به این موضوع که هندسه ۵، T میکرومیکسر ساده بوده و تنها دارای یک نوع قرارگیری جریان در ورودی‌ها می‌باشد. بنابراین می‌توان نتایج آن را با هر سه نوع جریان مقایسه کرد. در شکل ۱۰ مقایسه‌ای میان هندسه‌های مورد بررسی در شاخص اختلاط به ازای اعداد رینولدز مختلف در جریان ۱ نمایش داده شده است. در مقایسه عملکرد هندسه‌هایی که ورودی‌های متقابل دارند به ازای جریان ۱ که شامل هندسه‌های ۳، ۴ و ۵ می‌شود، تفاوت این سه هندسه با یکدیگر در تعداد ورودی‌های آن‌ها می‌باشد. هندسه ۳ از دو هندسه دیگر میزان اختلاط بالاتری را دارد و هندسه ۴ نیز



شکل ۶: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به اعداد رینولدز مختلف در مقطع عرضی خروجی (هندسه ۱)

Fig. 6: Comparison of the mixing index versus different Reynolds numbers at the outlet section (geometry No. 1).

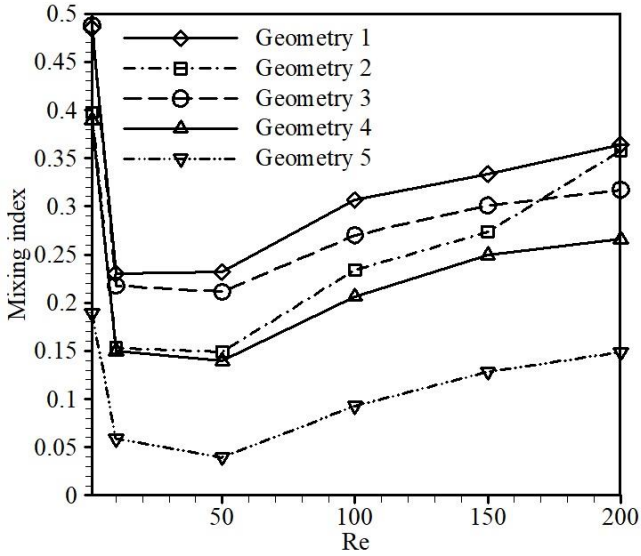


شکل ۷: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به اعداد رینولدز مختلف در مقطع عرضی خروجی (هندسه ۲)

Fig. 7: Comparison of the mixing index versus different Reynolds numbers at the outlet section (geometry No. 2).

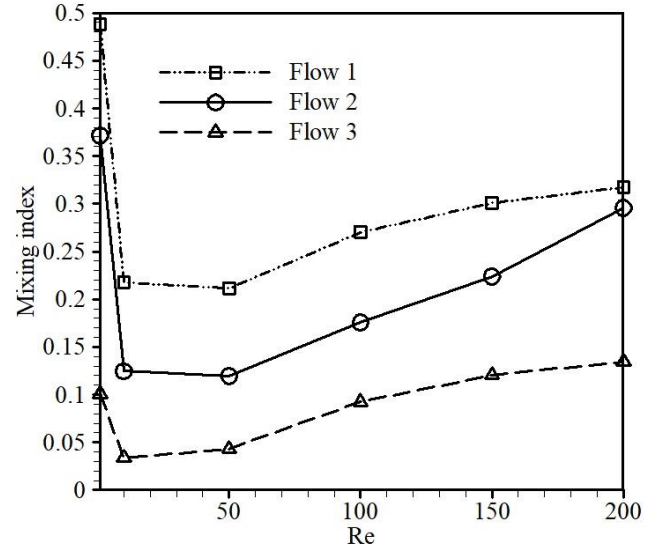
و پس از آن تأثیرات اینرسی و جریان بی‌نظم بر لزجت غلبه می‌کنند و عامل اصلی میزان اختلاط می‌شوند.

در شکل ۶ شاخص اختلاط برای هندسه ۱ به ازای سه نوع جریان ۱، جریان ۲ و جریان ۳ نشان داده شده است و نوع جریان ۱ در تمامی اعداد رینولدز مورد بررسی میزان اختلاط بهتری را در مقایسه با دو



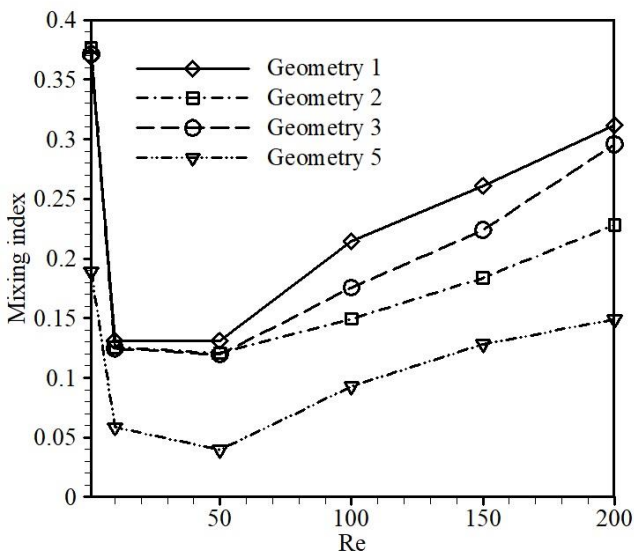
شکل ۱۰: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع عرضی خروجی (جریان ۱ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه)

Fig. 10: Comparison of the mixing index versus Reynolds numbers at the outlet section (Flow type 1 in double and multiple geometries)



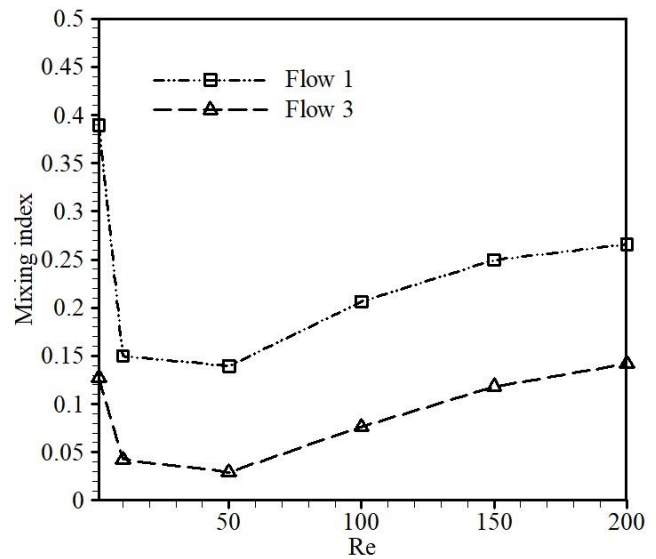
شکل ۸: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به اعداد رینولدز مختلف در مقطع عرضی خروجی (هندسه ۳)

Fig. 8: Comparison of the mixing index versus different Reynolds numbers at the outlet section (geometry No. 3).



شکل ۱۱: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع عرضی خروجی (جریان ۲ در هندسه‌های چندگانه)

Fig. 11: Comparison of the mixing index versus Reynolds numbers at the outlet section (Flow type 2 in multiple geometries)

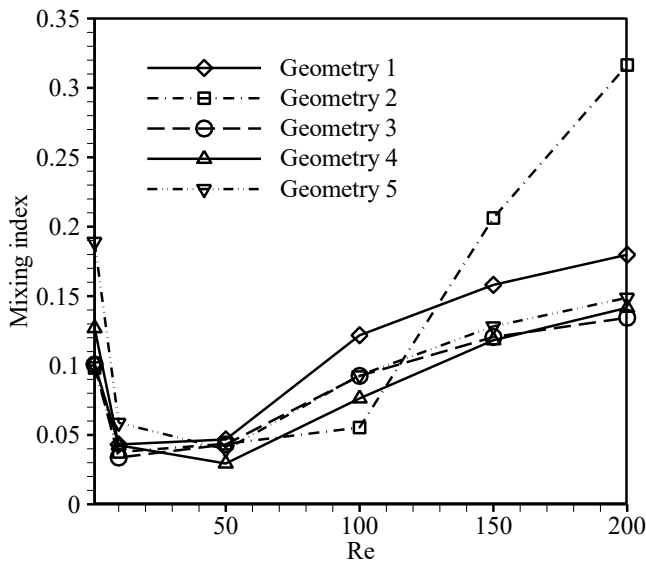


شکل ۹: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به اعداد رینولدز مختلف در مقطع عرضی خروجی (هندسه ۴)

Fig. 9: Comparison of the mixing index versus different Reynolds numbers at the outlet section (geometry No. 4).

نشان می‌دهد و این بیانگر این است که در عدد رینولدز ۲۰۰ میزان افزایش سرعت ایجاد شده سبب ایجاد بی‌نظمی بیشتر در هندسه ۲ در مقایسه با هندسه ۳ می‌شود. در جریان ۱ همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، هندسه ۱ در عدد رینولدز ۱ با اختلاف بسیار اندک

نسبت به هندسه ۵ میزان اختلاط بالاتری را نشان می‌دهد. طبق شکل ۱۰ در عدد رینولدز ۲۰۰، در مقایسه میزان اختلاط دو هندسه ۲ و ۳، هندسه ۲ میزان اختلاط بالاتری را دارد. در صورتی که در سایر رینولدزهای مورد بررسی هندسه ۳ میزان اختلاط بهتری را



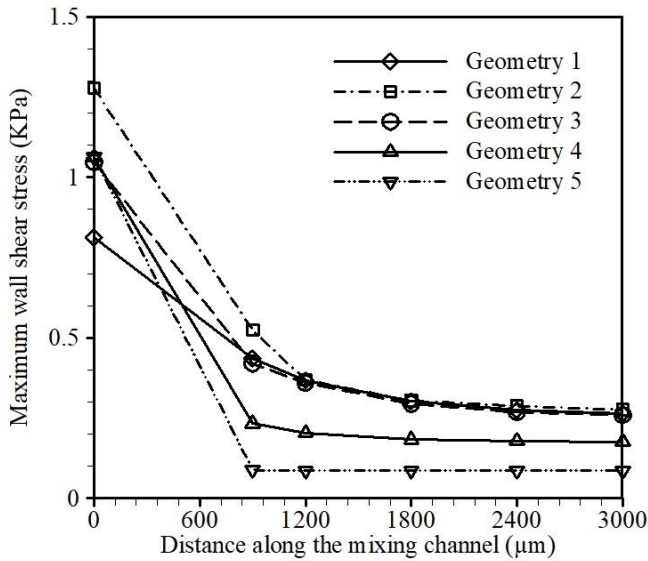
شکل ۱۲: مقایسه شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع عرضی (جریان ۳ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه)
Fig. 12: Comparison of the mixing index versus Reynolds numbers at the outlet section (Flow type 3 in double and multiple geometries)

می‌باشد و این به علت نوع قرارگیری ورودی شماره ۲ در این هندسه می‌باشد که با فاصله طولی ۱۰۰ میکرومتر از مقطع عرضی ابتدای کانال اختلاط قرار دارد و این باعث کاهش بیشترین تنش برشی روی مقطع عرضی ابتدای کانال اختلاط در هندسه ۱ می‌شود. شکل ۱۵ کانتورهای کسر جرمی اتانول در عدد رینولدز ۲۰۰ در مقطع عرضی خروجی به ازای سه نوع جریان بررسی شده در هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ و برای هندسه ۴ به ازای نوع جریان ۱ و ۳، همچنین برای هندسه ۵ به ازای تنها نوع جریان قابل تعریف در ورودی‌های آن را نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ برای هندسه ۱ به ازای نوع جریان ۱ در مقایسه با دو جریان دیگر آن فصل مشترک میان دو سیال بیشتر بوده و افزایش تاشدن^۱ و کشیده شدن^۲ و در این هندسه نسبت به دو جریان دیگر منجر به افزایش شاخص اختلاط می‌شود. برای هندسه ۲ گردابه‌ها و به تبع آن گردش ایجاد شده در نوع جریان ۱ در مقایسه با دو جریان دیگر سطح تماس بیشتری میان دو سیال ایجاد کرده که منجر به افزایش شاخص اختلاط می‌شود. در کانتورهای کسر جرمی هندسه ۳ به ازای جریان ۱ نسبت به دو جریان دیگر بی‌نظمی و برخورد و

(۵۷۷/۰ درصد) میزان اختلاط کمتری نسبت به هندسه ۲ دارد، اما در سایر اعداد رینولدز میزان اختلاط آن از تمامی هندسه‌ها بالاتر می‌باشد. به ازای تنها جریان قابل تعریف برای هندسه ۵ در مقایسه با نوع جریان ۱ در سایر هندسه‌ها، کمترین شاخص اختلاط را در مقایسه با سایر هندسه‌ها دارد. طبق شکل ۱۱ در بررسی شاخص اختلاط به ازای جریان ۲ برای میکرومیکسرها متقابل که این نوع جریان برای هندسه ۴ تعریف نمی‌شود، هندسه ۳ در مقایسه با تنها نوع جریان هندسه ۵ میزان اختلاط بالاتری دارد. طبق شکل ۱۱، به ازای جریان ۲ در عدد رینولدز ۱، مربوط به محدوده جریان خزشی، هندسه ۳ در مقایسه با سایر هندسه‌ها بالاترین میزان اختلاط را دارد و البته اختلاف آن با هندسه‌های ۱ و ۲ اندک است و در سایر اعداد رینولدز هندسه ۱ بالاترین هندسه‌ها در مقایسه با تنها نوع جریان خود دارد. مقایسه میزان اختلاط ایجاد شده به سبب اعمال جریان ۳ در شکل ۱۲ نشان داده شده است که در مقایسه هندسه‌های دارای ورودی‌های متقابل در عدد رینولدز ۱ و عدد رینولدز ۲۰۰ بالاترین شاخص اختلاط را به ازای تنها جریان خود در مقایسه با سایر هندسه‌های ورودی متقابل (۳ و ۴) دارد و در سایر اعداد رینولدز مورد بررسی روند شاخص اختلاط هر یک از این سه هندسه متقابل، طبق شکل ۱۲ مشخص می‌باشد. هندسه ۲ به ازای نوع جریان ۳ در دو عدد رینولدز ۱۵۰ و ۲۰۰ شاخص اختلاط بالاتری را نسبت به سایر هندسه‌ها نشان می‌دهد.

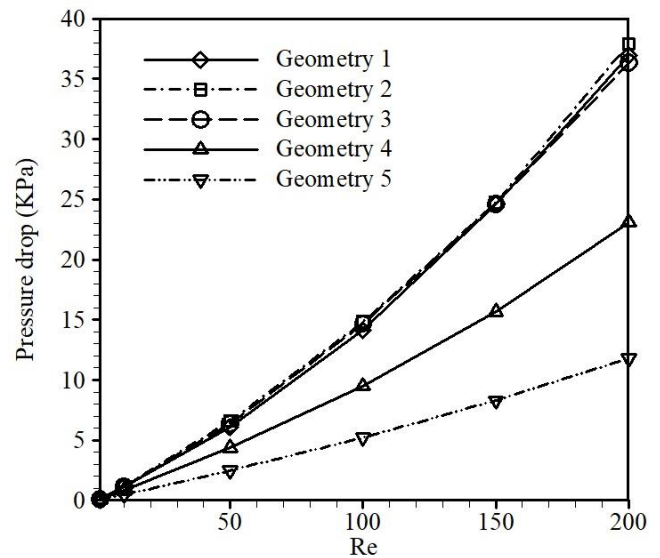
در شکل ۱۳ مقایسه افت فشار به ازای نوع جریان ۱ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه و تنها نوع جریان در هندسه ۵ در اعداد رینولدز مختلف آورده شده است که افت فشار با تعداد ورودی‌ها رابطه مستقیم داشته و با افزایش تعداد ورودی‌ها افت فشار افزایش یافته است. در مقایسه افت فشار میان سه هندسه دارای شش ورودی به ازای عدد رینولدز ۱، میزان افت فشار یکسان بوده اما در سایر اعداد رینولدز هندسه ۳ بیشترین میزان افت فشار را دارد و هندسه ۱ کمترین میزان افت فشار را دارد. در شکل ۱۴ نیز مقایسه‌ای از بیشترین تنش برشی روی دیواره به ازای جریان ۱ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه و تنها نوع جریان ۵ هندسه در عدد رینولدز ۱۵۰ نشان داده شده است که در هندسه ۱ بیشترین تنش برشی روی دیواره در مقطع عرضی ابتدای کانال اختلاط ($x=0$) کمتر از چهار هندسه دیگر

1 Fold
 2 Stretch



شکل ۱۴: مقایسه بیشترین تنش برشی روی دیواره در طول کانال اختلاط (جریان ۱ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه)

Fig.14: Comparison of the maximum wall shear stress along the mixing channel (flow type 1 in double and multiple geometries)



شکل ۱۳: مقایسه افت فشار نسبت به عدد رینولدز در مقطع عرضی (جریان ۱ در هندسه‌های دوگانه و چندگانه)

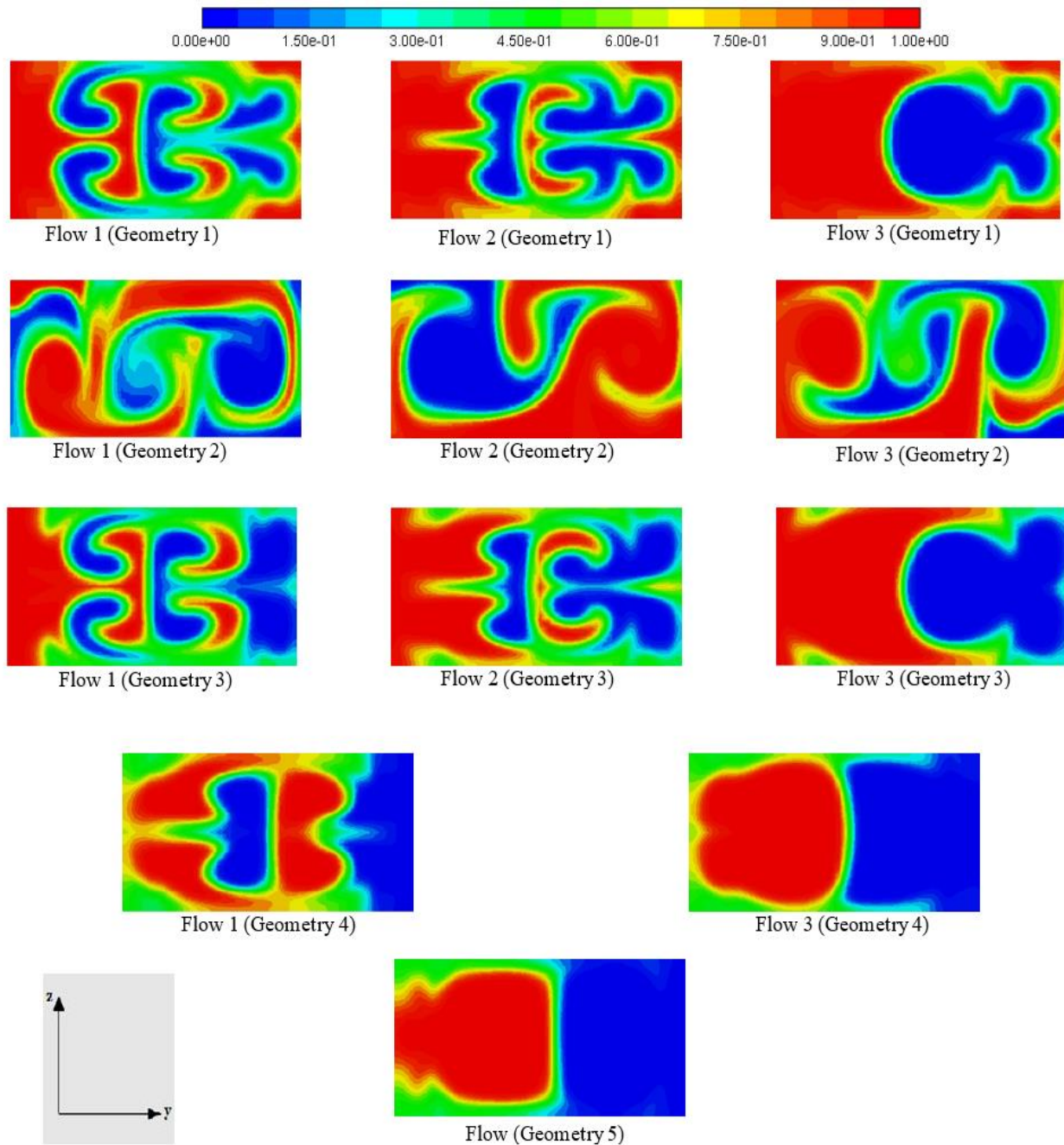
Fig.13: Comparison of the pressure drop versus Reynolds numbers at the outlet section (Flow type 1 in double and multiple geometries)

است. همچنین در هندسه‌های دارای بیش از دو ورودی که شامل هندسه‌های ۱ تا ۴ است، تأثیر ترتیب مختلف قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها بر میزان اختلاط مطالعه شده است. نتایج میزان اختلاط در هندسه‌های شامل T میکرومیکسرهای چندگانه با ورودی‌های ناهمراستا در یک صفحه و دو صفحه و T میکرومیکسر چندگانه (۱، ۲ و ۳) به صورت جداگانه به ازای اعمال جریان ۱ در مقایسه با جریان ۲ و ۳ در این هندسه‌ها بالاتر می‌باشد و همچنین در T میکرومیکسر دوگانه که دو نوع جریان ۱ و ۳ برای آن تعریف می‌شود به ازای اعمال جریان ۱ میزان اختلاط بالاتری در مقایسه با اعمال جریان ۳ در تمامی اعداد رینولدز مشاهده می‌شود. همچنین نتایج میزان اختلاط T میکرومیکسر ساده به ازای تنها ترتیب جریان قابل تعریف آن با سایر نتایج ترتیب قرارگیری جریان‌های مختلف در ورودی‌های هندسه‌های دیگر مقایسه شده است که نتایج بیانگر آن است که در هندسه‌های دارای بیش از دو ورودی ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها بر میزان اختلاط مؤثر می‌باشد. نوع جریان ۱ جریان مناسبی برای هندسه‌های دوگانه و چندگانه می‌باشد. مطالعه افت فشار در هر پنج هندسه بیانگر آن است که افت فشار با تعداد ورودی‌ها رابطه مستقیم دارد و با افزایش تعداد ورودی‌ها افت فشار افزایش می‌یابد.

گردابه‌های بیشتری دو سیال نسبت به یکدیگر داشته‌اند و منجر به شاخص اختلاط بهتری می‌شود. در بررسی کانتورهای کسر جرمی اتانول در هندسه ۴ با دلایل مشابه در هندسه‌های ۱ و ۳ جریان ۱ منجر به شاخص اختلاط بالاتری نسبت به جریان ۳ در این هندسه می‌شود. کانتور کسر جرمی هندسه ۱ به ازای نوع جریان ۱ بیشترین و هندسه ۵ کمترین فصل مشترک را میان دو سیال ایجاد کرده که به ترتیب منجر به بیشترین و کمترین شاخص اختلاط در مقایسه سایر هندسه‌ها به ازای جریان‌های مختلف عملی برای آن‌ها می‌شود. کانتورهای شکل ۱۵ میزان تماس و فرورفتگی و برخورد دو سیال را در هر هندسه و به ازای هر نوع جریان در آن‌ها را نشان می‌دهد که رابطه مستقیم با میزان اختلاط حاصل شده را بیان می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار اختلاط پنج هندسه در سه بعد به ازای دو سیال آب و اتانول در محدوده گسترده‌ای از اعداد رینولدز انجام شده است. به ازای هندسه‌های دارای شش ورودی تأثیر نحوه قرارگیری ورودی‌های ناهمراستا در یک صفحه و ورودی‌های ناهمراستا در دو صفحه، ورودی‌های متقابل، بر میزان اختلاط بررسی شده



شکل ۱۵: کانتور کسر جرمی اتانول در آب در مقطع عرضی خروجی در پنج هندسه در عدد رینولدز ۲۰۰
Fig. 15: Contours of the mass fraction of ethanol in water at the outlet section for five geometries at $Re=200$.

مراجع

- effect of variations of geometrical parameters on its performance, *Modares Mechanical Engineering*, 17(3) (2017) 293-304.) In *PERSION*)
- [4] Y.-T. Huang, C.-Y. Wu, S.-W. Huang, Longitudinal Vortices Mixing in Three-Stream Micromixers with Two Inlets, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronics and Manufacturing*
- [1] G. Cai, L. Xue, H. Zhang, J. Lin, A review on micromixers, *Micromachines*, 8(9) (2017) 274.
- [2] Z. Stone, H. Stone, Imaging and quantifying mixing in a model droplet micromixer, *Physics of Fluids*, 17(6) (2005) 063103.
- [3] P. Zare, S. Talebi, Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the

- micro T-mixer with non-aligned inputs, *Chemical Engineering Journal*, 181 (2012) 846-850.
- [10] M. Hoffmann, M. Schlüter, N. Rübiger, Experimental investigation of liquid-liquid mixing in T-shaped micro-mixers using μ -LIF and μ -PIV, *Chemical engineering science*, 61(9) (2006) 2968-2976.
- [11] M. Rasouli, A. Abouei Mehrizi, A. Lashkaripour, Numerical study on low reynolds mixing oft-shaped micro-mixers with obstacles, *Transp Phenom Nano Micro Scales*, 3(2) (2015) 68-76.
- [12] D. Gobby, P. Angeli, A. Gavriilidis, Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers, *Journal of Micromechanics and microengineering*, 11(2) (2001) 126.
- [13] M.A. Ansari, K.-Y. Kim, K. Anwar, S.M. Kim, A novel passive micromixer based on unbalanced splits and collisions of fluid streams, *Journal of micromechanics and microengineering*, 20(5) (2010) 055007.
- Engineering, 8(7) (2014) 1175-1180.
- [5] A. Afzal, K.-Y. Kim, Flow and mixing analysis of non-Newtonian fluids in straight and serpentine microchannels, *Chemical Engineering Science*, 116 (2014) 263-274.
- [6] C.A. Cortes-Quiroz, A. Azarbadegan, M. Zangeneh, Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 202 (2014) 1209-1219.
- [7] N.A. Mouheb, D. Malsch, A. Montillet, C. Sollic, T. Henkel, Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers, *Chemical engineering science*, 68(1) (2012) 278-289.
- [8] R. Rabani, S. Talebi, M. Rabani, Numerical analysis of lamination effect in a vortex micro T-mixer with non-aligned inputs, *Heat and Mass Transfer*, 52(3) (2016) 611-619.
- [9] M.A. Ansari, K.-Y. Kim, K. Anwar, S.M. Kim, Vortex

