



بررسی عددی اختلاط دو سیال با چگالی و لزجت متفاوت در یک میکروکانال مجهز به همزن نوسانی اجباری

سجاد قنبری¹، محمد سفید^{2*}، رحیم شمس‌الدینی³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان

* یزد، صندوق پستی 89195-741، mhfefid@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 28 اردیبهشت 1395
پذیرش: 26 تیر 1395
ارائه در سایت: 24 مرداد 1395

کلید واژگان:

اختلاط

مخلوط‌کننده

میکروکانال

چگالی

لزجت

چکیده

در این پژوهش، اختلاط دو سیال تراکم‌ناپذیر مخلوط‌شونده با چگالی و لزجت متفاوت، در یک میکروکانال دو بعدی مجهز به همزن (پره) نوسان‌کننده، در فرکانس‌های تحریک‌کننده مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود این که اکثر مطالعات صورت گرفته در زمینه اختلاط، به بررسی عملکرد یک مخلوط‌کننده، با هدف اختلاط دو سیال کاملاً یکسان پرداخته‌اند می‌توان گفت که اختلاط دو سیال زمانی مفهوم پیدا می‌کند که دو سیال مخلوط‌شونده دارای ناپیکنوختی از قبیل دما، غلظت و یا خواص متفاوت نسبت به هم باشند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تفاوت در خواص دو سیال حل‌شونده، بر عملکرد مخلوط‌کننده و میزان اختلاط است. شبیه‌سازی در عدد رینولدز 50 و عدد اشمیت 10، در محدوده‌ی عدد استروهال بین 0.1 تا 1 با روش حجم محدود مبتنی بر المان، توسط کد تجاری CFX صورت گرفته است. عملکرد مخلوط‌کننده در سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت: اختلاط دو سیال یکسان، اختلاط دو سیال با چگالی متفاوت و اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که یکسان نبودن خواص دو سیال، منجر به تغییر عملکرد مخلوط‌کننده می‌گردد، و در هر یک از حالات بررسی شده مخلوط‌کننده عملکرد متفاوتی دارد. در حالتی که لزجت و چگالی دو سیال متفاوت باشد علاوه بر این که سیال‌ها تمایل کمتری به مخلوط‌شدن نشان می‌دهند، مشاهده می‌شود عدد استروهال تأثیر کمتری بر تغییر شاخص اختلاط دارد بیشینه‌ی تغییرات شاخص اختلاط در حالت چگالی و لزجت متفاوت به ترتیب 54.01 و 51.15 درصد می‌باشد در صورتی که این مقدار برای دو سیال یکسان به 577.94 درصد می‌رسد.

Numerical Analysis of two-fluid mixing with various Density and Viscosity in a microchannel with forced oscillating stirrer

Sajad Ghanbari¹, Mohammad Sefid^{1*}, Rahim Shamsoddini²

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, mhsefid@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 17 May 2016
Accepted 16 July 2016
Available Online 14 August 2016

Keywords:

Mixing
Mixer
Microchannel
Density
Viscosity

ABSTRACT

In the present study, the mixing of two incompressible miscible fluids with different density and viscosity has been investigated in a two-dimensional microchannel equipped with an oscillating stirrer in different excitation frequencies. Although most studies in the field of fluid mixing have studied the mixer performance when the two fluids were absolutely identical, the mixing makes sense when two fluids have non-uniformity such as different temperature, concentration or properties. The aim of this study is to evaluate the effect of various properties of the fluids in mixer performance and mixing value. Simulation has been performed in $Re=100$ and $Sc=10$, between 0.1 and 1 Strouhal number by using element based finite volume method by means of commercial code CFX. Mixer performance has been evaluated in three different modes: mixing of two identical fluids, mixing of two fluids with different density and mixing of two fluids with different viscosity. The results show that, mixing of the fluids with different properties leads to change in mixer performance, and has unique performance in each case. In comparison with similar properties fluids, mixing of fluids with different viscosity and density show lesser tendency in mixing. It has been shown that variation of Strouhal number has lesser effect on mixing index changes. The ratio of maximum mixing index changes to base mixing index in the case of different density and viscosity is 54.01 and 51.15 percent, respectively, while the value is 577.94 percent for the mixing of similar fluids.

1- مقدمه

غیریکنواخت به یک سیستم یکنواخت است. اختلاط، به عنوان یک رشته تکامل‌یافته، در دهه 1950 پایه‌ریزی شد و در انتشار آثار یوهل و گری و ناگاتا،

اختلاط، قابل بیان به هرگونه عملیات مورد استفاده، برای تغییر یک سیستم

Please cite this article using:

S. Ghanbari, M. Sefid, R. Shamsoddini, Numerical Analysis of two-fluid mixing with various Density and Viscosity in a microchannel with forced oscillating stirrer, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 109-119, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کخ و همکاران [10]، در یک کار تجربی با استفاده از تصویرسازی جریان و با استفاده از جوهرهای قرمز و سبز حل‌شونده در اتانول به آزمایش یک میکرومخلوط‌کننده افقی پرداختند. در این آزمایش از فنول‌فتالین¹³ استفاده شد و رنگ نهایی اختلاط، فقط به مقدار PH بستگی داشت. تمام این تکنیک بر پایه شاخص PH فنول‌فتالین، استوار بود. لیو و همکاران [11]، با استفاده از محلول فنول‌فتالین و محلول سدیم هیدرواکسید¹⁴ در یک آزمایش تجربی، به بررسی عملکرد یک مخلوط‌کننده مارپیچی سه بعدی در رینولدز 6 تا 70 پرداختند و نشان دادند با افزایش عدد رینولدز قابلیت اختلاط در کانال افزایش پیدا می‌کند. لیو و همکاران [7]، به بررسی عددی اختلاط دو سیال آب خالص و محلول آب گلیسرول¹⁵ در دو میکرومخلوط‌کننده سه بعدی مارپیچی و مخلوط‌کننده شطرنجی جناقی¹⁶ در اعداد رینولدز 1 و 10 پرداختند و آن‌ها یک عدد رینولدز بحرانی (Re=1)، مشاهده کردند. و مشاهده کردند که در این عدد رینولدز بحرانی، عملکرد هر دو مخلوط‌کننده به طور معکوس در ارتباط با میزان گلیسرول است. دو سیال استفاده شده در مطالعه فوق برای بررسی عملکرد یک مخلوط‌کننده چرخشی¹⁷، توسط جین و همکاران [12]، مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت جرمی گلیسرول در آب، میزان اختلاط کاهش پیدا می‌کند. آن و همکاران [13]، اختلاط دو سیال یکسان در یک میکرومخلوط‌کننده مجهز به پره نوسان‌کننده و دوران‌کننده اجباری را مورد بررسی قرار دادند. جهت بررسی عملکرد مخلوط‌کننده، یک شاخص اختلاط جدید مناسب برای جریان‌های وابسته به زمان و تکرار شونده، معرفی کردند و نشان دادند که در تمام حالات، عملکرد حالت نوسانی بهتر از حالت دورانی است. کیم و همکاران [14]، با اختلاط دو سیال یکسان به تحلیل عددی یک میکرومخلوط‌کننده مجهز به سیلندر استوانه‌ای ثابت و پره نوسانی پرداختند و نشان دادند، اختلاطی که در آن ترکیبی از پره متحرک و سیلندر استوانه‌ای استفاده شود، به میزان 27 درصد کارایی مخلوط بالاتر از حالتی است که از پره متحرک، به تنهایی استفاده شده است. پارک و همکاران [5]، ریو و همکاران [15]، به طراحی بهینه برای یک میکرومخلوط‌کننده فعال، با همزن نوسانی به منظور اختلاط دو سیال یکسان پرداختند. به منظور دستیابی به اختلاط موثر به پیش‌بینی شاخص اختلاط مؤثر، به ترتیب براساس روش تاگوچی¹⁸ و روش کریگینگ¹⁹ همراه با الگوریتم ژنتیک²⁰ پرداختند. آن‌ها توانستند مدلی ارائه کنند که کارایی مخلوط‌کننده میکرو را نسبت به مدل اولیه، به ترتیب تا میزان 85.59 و 71.79 درصد افزایش می‌داد. شمس‌الدینی و همکاران [16]، یک میکرومخلوط‌کننده مجهز به پره را به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر²¹، شبیه‌سازی کردند و عملکرد مخلوط‌کننده را از لحاظ بازده مخلوط، در چهار حالت پره ضربدری نوسان‌کننده، پره ضربدری دوران‌کننده، پره مستقیم نوسان‌کننده و پره مستقیم دوران‌کننده مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که عملکرد پره ضربدری بهتر از پره مستقیم است.

در پژوهش حاضر، به بررسی عددی اختلاط دو سیال با چگالی و لزجت متفاوت، در یک میکرومخلوط‌کننده دو بعدی مجهز به پره نوسانی از روش

به اوج خود رسید. در طول 30 سال گذشته، بسیاری از اصول طراحی مهندسی توسعه یافتند و طراحی تجهیزات مخلوط‌کن‌ها، برای رسیدن به فرآیندهای مطلوب ممکن شد [1]. اختلاط می‌تواند با توجه به ترکیب‌های مختلف بین فازهای گاز، مایع و جامد صورت گیرد؛ مانند مخلوط جامد-جامد، مخلوط جامد-مایع، مخلوط مایع-مایع و مخلوط گاز-مایع. مخلوط مایع-مایع قابل بیان به اختلاط دو مایع مخلوط‌شدنی¹ یا غیرمخلوط‌شدنی² است. حل‌پذیر بودن وابسته به خواص مواد است، که به آنها اجازه می‌دهد تا با یکدیگر مخلوط شوند و یک فاز همگن را تشکیل دهند. در اختلاط سیالات مخلوط‌شدنی، نفوذ ملکولی کمک می‌کند تا سیستم در حال اختلاط، به نهایت همگنی برسد [3,2].

معمولاً اختلاط در سه مقیاس صورت می‌گیرد: اختلاط ماکرو³، اختلاط مسو⁴ و اختلاط میکرو⁵. اختلاط میکرو، ترکیبی است که در اندازه کوچکترین مقیاس‌های حرکت سیال و حرکت مولکولی می‌باشد. به علت حاکمیت اثرات لزجت، جریان مغشوش در ابعاد میکرو امکان‌پذیر نیست و برای بسیاری از کاربردها سرعت سیال در ابعاد میکروسکوپی، نمی‌تواند بیش از حد زیاد باشد. عدد رینولدز در این ابعاد معمولاً کمتر از 100 می‌باشد. در دامنه میکروسکوپی از قبیل میکروکانال، پخش آشفته رخ نمی‌دهد زیرا فقط جریان آرام در رینولدز پایین توسعه می‌یابد [6,4,1].

میکرومخلوط‌کننده‌ها در فرآیندهای مختلف بیومکانیکی⁶ و بیوشیمی⁷ که شامل اختلاط دو سیال است و همچنین خالص‌سازی DNA، واکنش زنجیره‌ای پلیمرایز⁸، واکنش آنزیمی و ترکیب پروتئینی مورد استفاده قرار می‌گیرد که عملکرد چنین فرآیندهایی متکی بر سریع بودن و موثر بودن اختلاط نمونه‌ها و واکنش‌گرها است [7].

میکرومخلوط‌کننده‌ها معمولاً با توجه به هندسه کانال به گونه‌ای طراحی می‌شوند که طول اختلاط کاهش و مساحت سطح تماس افزایش پیدا کنند. با توجه به این دو اصل اساسی متفاوت مورد استفاده برای ایجاد اختلاط بهتر در ابعاد میکرو، میکرومخلوط‌کننده‌ها معمولاً به دو دسته فعال⁹ (اجباری)، غیرفعال¹⁰ (غیراجباری) تقسیم شده‌اند. میکرومخلوط‌کننده‌های غیرفعال با تکیه بر طراحی خاص کانال، زمینه افزایش اختلاط را فراهم می‌کنند، اما میکرومخلوط‌کننده‌های فعال با تکیه بر چشمه انرژی خارجی و با استفاده از اجسام جریان‌بند¹¹ متحرک و یا گردایان فشار و ... منجر به افزایش اختلاط می‌گردند [8,7]. با توجه به انرژی خارجی مورد استفاده برای ایجاد نوسان اجباری بر جسم جریان‌بند، پژوهش حاضر در دسته مخلوط‌کننده‌های فعال قرار می‌گیرد. مطالعات تجربی و محاسباتی بر روی نوسانات هارمونیک اجسام جریان‌بند، بعد از انتشار نتایج مطالعات تجربی استروهاال بر روی صوت‌های بادی¹² در سال 1878، آغاز شد [9].

اختلاط دو سیال زمانی مفهوم پیدا می‌کند که دما، غلظت و یا خواص دو سیال نسبت به هم، متفاوت باشند اما مطالعات بسیار کمی به بررسی اختلاط دو سیال با خواص متفاوت پرداخته شده است و به سختی می‌توان در این زمینه در دسته مخلوط‌کننده‌های فعال کاری پیدا کرد.

¹ Miscible

² Immiscible

³ Macro

⁴ Meso

⁵ Micro

⁶ Biomechanic

⁷ Biochemical

⁸ Polymerase

⁹ Active

¹⁰ Passive

¹¹ Bluff body

¹² Aeolian tones

¹³ Phenolphthalein

¹⁴ Sodium hydroxide

¹⁵ Glycerol

¹⁶ Staggered herringbone

¹⁷ Swirl

¹⁸ Taguchi

¹⁹ Kriging

²⁰ Genetic

²¹ Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics

الگوریتم حل و جزئیات کامل گسسته‌سازی معادلات را می‌توان در مرجع [17] مشاهده کرد.

3- تعریف مسئله و اعتبارسنجی

1-3- فیزیک مسئله و اعداد بدون بعد

در این پژوهش، اختلاط دو سیال حل‌شونده با چگالی و لزجت متفاوت، در یک کانال دوبعدی مجهز به یک همزن اجباری (پره) مطابق "شکل 1" مورد بررسی قرار خواهد گرفت. یک طول واحد به نام D معرفی می‌شود، که تمام اندازه‌ها براساس آن تعیین می‌گردد. اندازه دهانه ورودی کانال و طول کانال به ترتیب برابر با $h = 3D$ و $31D$ در نظر گرفته شده است. پره با ضخامت $t = 0.048D$ ، در فاصله $4D$ از ورودی کانال و در مرکز کانال قرار دارد و حول مرکز خود، تحت زاویه $\pm 45^\circ$ با سرعت ثابت نوسان می‌کند. اندازه پره مقدار $L = 2D$ را به خود اختصاص داده است. سیال اول با خصوصیات $C = 0$ ، μ_1 و ρ_1 و سیال دوم با خصوصیات $C = 1$ ، μ_2 و ρ_2 به ترتیب در $y < 0$ و $y \geq 0$ وارد کانال می‌شوند.

در کل مسئله، خواص سیال 1 ثابت است و فقط چگالی و لزجت سیال 2 تغییر می‌کند. میزان تغییرات چگالی و لزجت سیال 2، براساس دو گروه عدد بی بعد نسبت چگالی (S) و نسبت لگاریتمی لزجت دینامیکی (R) صورت می‌گیرد. نسبت چگالی و نسبت لگاریتمی لزجت دینامیکی دو سیال به صورت روابط (4) و (5) تعریف می‌گردند.

$$S = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (4)$$

$$R = \ln \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (5)$$

که اندیس‌های 1 و 2 به ترتیب نمایانگر سیال 1 و سیال 2 می‌باشد. سایر اعداد بدون بعد مهم استفاده شده در این پژوهش، عبارتند از عدد رینولدز (Re)، عدد پکلت (Pe) و عدد استروهل (St) که همگی براساس سیال 1، طبق روابط (6) تا (8) انتخاب شده‌اند [19-22].

$$Re = \frac{\rho_1 u h}{\mu_1} \quad (6)$$

$$Pe = \frac{h u}{d} = Re Sc \quad (7)$$

$$St = \frac{f L}{u} \quad (8)$$

در جایی که u سرعت متوسط جریان، h اندازه دهانه ورودی کانال، L اندازه طولی پره، f فرکانس نوسانی اجباری اعمال شده به پره، d نفوذ جرمی و Sc عدد بی‌بعد اشمیت می‌باشد. عدد رینولدز و عدد اشمیت به ترتیب مقادیر 50 و 10 را به خود اختصاص داده‌اند. محدوده اعداد استروهل، و مقادیر نسبت چگالی و نسبت لگاریتمی لزجت دینامیکی به ترتیب $0.1 \leq St \leq 1$ ، $S = 2.5$ و $R = 1.5$ می‌باشد. همچنین شرط مرزی عدم لغزش به دیواره‌های کانال و سطح پره اعمال گردیده است. در خروجی کانال فشار

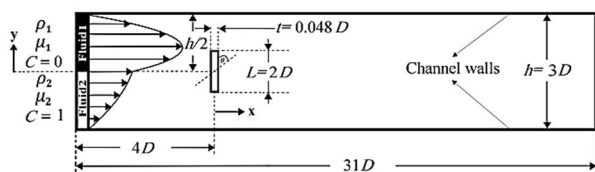


Fig. 1 Schematic view of micro mixer with an oscillating stirrer

شکل 1 طرح شماتیک مخلوط‌کننده میکرو با پره نوسان‌کننده

حجم محدود مبتنی بر المان، توسط نرم‌افزار CFX، پرداخته خواهد شد. و به دنبال بررسی تأثیر تفاوت در چگالی و لزجت دو سیال مخلوط‌شونده نسبت به هم، بر عملکرد مخلوط‌کننده هستیم.

2- معادلات حاکم و روش عددی

در این بخش معادلات حاکم بر جریان و روش عددی انتخاب شده جهت حل جریان اختلاط بیان خواهد شد.

1-2- معادلات حاکم

در جریان‌های دو سیالی مانند مسئله حاضر، که در آن دو سیال حضور دارد اختلاط می‌تواند با حل معادله عمومی انتقال (رابطه (1))، شبیه‌سازی شود:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} C) = \nabla \cdot (\rho d \nabla C) + S_c \quad (1)$$

که ρ چگالی، d نفوذ جرمی، \vec{V} بردار سرعت، C غلظت و S_c جمله چشمه می‌باشد.

معادلات حاکم پیوستگی (رابطه (2)) و مومنتم (رابطه (3)) عبارتند از:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla p + \nabla \cdot (\mu (\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T)) + S_M \quad (3)$$

که در رابطه (3)، S_M جمله چشمه μ و لزجت دینامیکی می‌باشد [17].

2-2- روش عددی

به منظور شبیه‌سازی اختلاط دو سیال مسئله در نرم‌افزار CFX، با استفاده از مدل مخلوط ترکیب متغیر¹ جریان چند مولفه‌ای تک فاز، شبیه‌سازی گردیده است. در مدل مخلوط ترکیب متغیر، نسبت هر جزء موجود، ممکن است با زمان یا مکان متغیر باشد که این ممکن است توسط تبدیل یک جزء به دیگری، از طریق یک واکنش شیمیایی مانند احتراق و یا توسط پخش، ایجاد شده باشد. جریان‌های چند مؤلفه‌ای، جریان‌هایی با مؤلفه‌های مجزا هستند که هر کدام می‌توانند خواص فیزیکی مشخصی داشته باشند. در این حالت لایه‌ی میانی بین مؤلفه‌ها وجود ندارد. مقادیر متوسط این خواص در هر حجم کنترل، محاسبه می‌شود. این مقادیر متوسط، به خواص و نسبت وجود هر مؤلفه در حجم کنترل بستگی دارد. در جریان‌های چند مؤلفه‌ای فرض بر این است که مؤلفه‌ها در سطح مولکولی مخلوط می‌شوند. متوسط مقادیر سرعت، فشار و دمای یکسانی دارند و انتقال جرم توسط جابه‌جایی و پخش انجام می‌شود [18].

گسسته‌سازی معادلات حاکم (روابط (1) تا (3)) در نرم‌افزار CFX از یک روش ترکیبی به نام حجم محدود مبتنی بر المان²، صورت گرفته است به منظور حل معادلات، حوزه سیال به مجموعه محدودی از حجم‌های کنترل گسسته‌سازی می‌شود. در این روش از توابع شکل برای توصیف تغییر متغیرها روی یک المان استفاده می‌شود. حجم‌های کنترلی اطراف هر گره به وسیله اتصال مراکز هندسی المان‌ها تشکیل می‌گردند. همانند روش حجم‌محدود، معادلات بقاء به فرم انتگرالی به این حجم‌های کنترل اعمال می‌شود. همچنین شارهای عبوری از مرزهای حجم کنترل و جملات چشمه نیز براساس المان محاسبه می‌شوند. الگوریتم گسسته‌سازی جملات زمان‌مند براساس طرح مرتبه دوم پس‌رو اولری³ انتخاب گردیده است [17]. اطلاعات بیشتر در مورد

¹ Variable Composition Mixture

² Element Based Finite Volume

³ Second Order Backward Euler

بر روی همدیگر بلغزند. با استفاده از تکنیک لغزش صفحات بر روی همدیگر، حل گر می‌تواند اطلاعات را بین شبکه‌های غیرمتصل مبادله کند. در "شکل 2"، نمایی از کل شبکه محاسباتی برای پره و در "شکل 3"، نمایی از جزئیات تغییر شکل شبکه محاسباتی، در چهار زمان مختلف در یک دوره تناوب $(T = T_s)$ نوسان پره نشان داده شده است. در "شکل 4"، نمودار اثر تعداد المان‌های شبکه محاسباتی بر معیار اختلاط در عدد رینولدز 50، عدد اشمیت 10 و عدد استروهال 1 در حالتی که دو سیال کاملاً یکسان هستند، مورد بررسی قرار گرفته است. می‌توان در نمودار فوق مشاهده کرد که بعد از اینکه، تعداد المان‌های شبکه 53876 عدد، انتخاب می‌شود افزایش تعداد المان‌ها به مقدار 69848 عدد، تغییر بسیاری کمی (کمتر از 0.5 درصد اختلاف) در شاخص اختلاط دارد. بنابراین شبکه با تعداد 53876 المان به عنوان شبکه نهایی جهت انجام محاسبات، انتخاب شده است. به منظور انتخاب گام زمانی مناسب کد تجاری CFX این امکان را می‌دهد که گام زمانی منطبق بر عدد کورانت انتخاب گردد. گام زمانی به گونه‌ای انتخاب گردید که حداکثر عدد کورانت 5 و مقدار ریشه میانگین مربعات عدد کورانت کمتر از 1 باشد.

به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج عددی به دست آمده می‌بایست روش حل عددی انتخاب شده اعتبارسنجی شود. اعتبارسنجی مسئله پره نوسان‌کننده اجباری، با مسئله شمس‌الدینی و همکاران [16] (شکل 5)، در مقادیر بدون بعد معرفی شده در جدول 1 انجام شده است. شاخص اختلاط مقایسه شده در مسئله حاضر با مسئله شمس‌الدینی و همکاران را می‌توان،

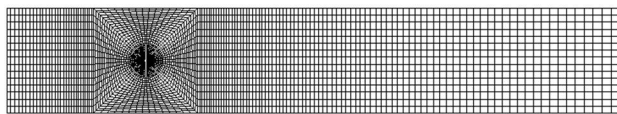


Fig. 2 Overview of computational mesh

شکل 2 نمایی کلی از شبکه محاسباتی

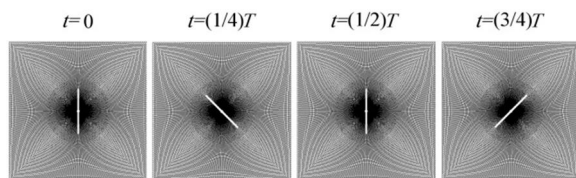


Fig. 3 View of mesh deformation at 4 different times

شکل 3 نمایی از تغییر شکل شبکه محاسباتی در چهار زمان مختلف

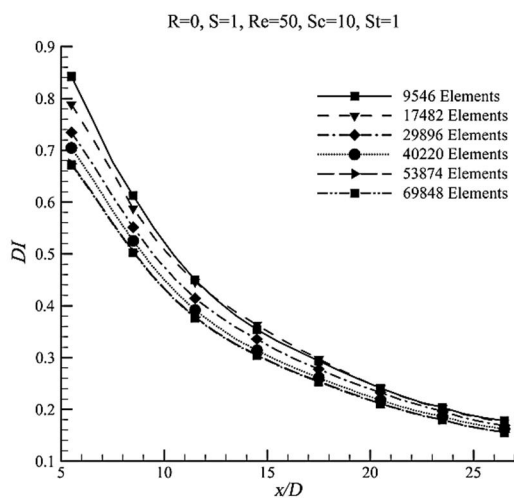


Fig. 4 Diagram of mixing index at number of various elements

شکل 4 نمودار شاخص اختلاط در تعداد المان‌های مختلف

استاتیک صفر در نظر گرفته شده است به ورودی کانال، پروفیل سرعت توسعه یافته اعمال شده است.

2-3- شاخص اختلاط

برای بررسی رفتار جریان اختلاط و میزان انتقال جرم، به شاخص مناسب برای سنجش میزان اختلاط رخ داده، نیاز است. شاخص اختلاطی که در این-جا مورد استفاده قرار گرفته است، به صورت رابطه (9) است:

$$M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i - C_{\text{mean}}}{C_{\text{mean}}} \right)^2} \quad (9)$$

که N تعداد نقاط در یک مقطع عرضی کانال، C_i غلظت هر نقطه و C_{mean} غلظت متوسط است که مقدار غلظت متوسط، برابر با 0.5 می‌باشد. این شاخص در بازه 0 تا 1 قرار دارد. در اختلاط کامل، مقدار این شاخص به سمت صفر میل می‌کند و زمانی که هیچ اختلاطی صورت نپذیرد، این شاخص دارای مقدار 1 است. زمانی که این مقدار کمتر از 0.2 باشد، اختلاط به میزان کافی صورت پذیرفته است. در مسائلی مانند مسئله حاضر که جریان وابسته به زمان است نیاز است که شاخص اختلاط برای یک دوره تناوب محاسبه گردد، که شاخص اختلاط وابسته به زمان، به صورت رابطه (10) می‌باشد [23].

$$DI = \frac{1}{T} \int_T M dt \quad (10)$$

که T ، بازه زمانی نمونه‌گیری شده می‌باشد که برابر با یک یا چند دوره تناوب نوسان پره می‌باشد. درصد افزایش یا کاهش میزان اختلاط (η) ، برای شاخص اختلاط در خروجی کانال (DI_{out}) ، نسبت به شاخص اختلاط پایه (DI_{st}) ، از رابطه (11) به دست می‌آید.

$$\eta = \frac{DI_{\text{st}} - DI_{\text{out}}}{DI_{\text{st}}} \times 100\% \quad (11)$$

3-3- اعتبارسنجی

در روش‌های عددی یکی از مباحث مهم تأثیر اندازه شبکه بر نتایج است. همچنین بدست آوردن نتایج مستقل از شبکه، از اهداف هر تحقیق عددی است. شبکه تولید شده و تعداد حجم کنترل‌های به وجود آمده تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج به دست آمده و مدت زمان اجرای برنامه کامپیوتری دارند. با افزایش تعداد حجم کنترل‌ها و کوچک‌تر نمودن ابعاد حجم کنترل‌ها، خصوصاً در نزدیکی مرزهای جامد، می‌توان رفتار جریان را بطور دقیق‌تر و به همراه جزئیات بیشتر، بررسی و مطالعه نمود. به دنبال رسیدن به توصیف رفتار دقیق‌تر جریان، مدت زمان اجرای برنامه نیز افزایش چشمگیری خواهد داشت. بایستی با ارزیابی صحیح، میزان افزایش دقت توصیف رفتار جریان در کنار افزایش مدت زمان اجرای برنامه، به یک حالت بهینه رسید. حالتی که در کمترین مدت زمان اجرای برنامه، بتوان به جواب‌های قابل قبولی برای پارامترهای مختلف جریان دست یافت.

شبکه مورد استفاده برای پره نوسان‌کننده، شبکه سازمان‌یافته لغزشی است. پره در دامنه $\pm 45^\circ$ نوسان می‌کند و هرگونه نوسان در پره، منجر به لغزیدن شبکه اطراف پره، بر روی شبکه مجاور خود می‌شود. در صورتی که سیستم‌های با اجزای چرخان را به کمک روش‌های تغییر شکل شبکه مورد بررسی قرار دهیم، ممکن است شبکه دچار کشیدگی‌ها و انحراف‌های زیادی شود. این مسئله، احتمال ایجاد خطاهای محاسباتی زیاد و حجم‌های منفی را بالا می‌برد. برای غلبه بر این مشکل می‌توان اجازه داد تا صفحات میانی شبکه

در "شکل 6" مشاهده کرد. همانطور که مشاهده می‌شود شاخص اختلاط هر دو شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند و میزان اختلاف کمتر از 3 درصد می‌باشد.

4- بحث و بررسی نتایج

در ابتدا نحوه به‌دست آوردن پروفیل سرعت توسعه‌یافته اعمال شده به ورودی کانال، در نسبت‌های چگالی و لزجت مختلف ارائه خواهد شد. جهت بررسی تأثیر، متفاوت بودن چگالی و لزجت دو سیال، بر عملکرد مخلوط‌کننده، سه حالت دو سیال ثابت، دو سیال با چگالی متفاوت و دو سیال با لزجت متفاوت مورد مقایسه قرار خواهد گرفت و نشان داده خواهد شد که این تفاوت، چه تأثیری بر عملکرد مخلوط‌کننده خواهد گذاشت.

4-1- پروفیل سرعت توسعه یافته

همان‌طور که بیان شد سرعت در ورودی، به صورت پروفیل توسعه یافته اعمال می‌گردد. از آن‌جا که چگالی و لزجت دو سیال متفاوت است، پروفیل

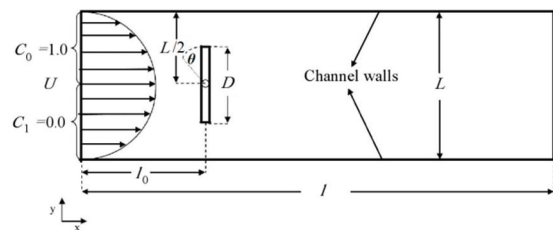


Fig. 5 Schematic view of Shamsoddini et al problem [16]

شکل 5 طرح شماتیک مسئله شمس‌الدینی و همکاران [16]

جدول 1 مقادیر اعداد بدون بعد به کار رفته در مسئله شمس‌الدینی و همکاران [16]

Table 1 Value of non-dimensional numbers were used in Shamsoddini et al [16] problem

Sc	Re	St	$\frac{l_0}{L}$	$\frac{l}{D}$	$\frac{L}{D}$	اعداد بدون بعد
10	2.629	2.629	2.036	30	1.6	مقادیر

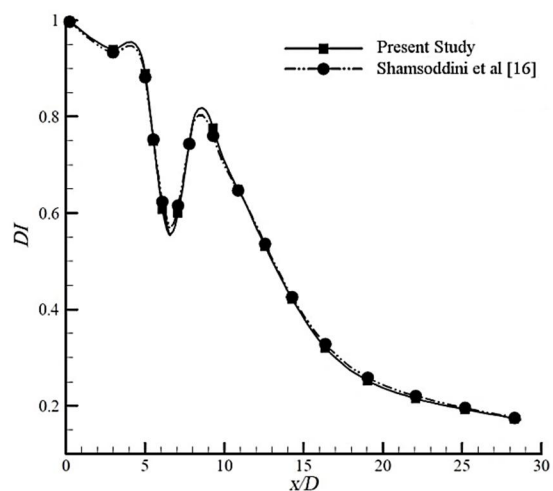


Fig. 6 Comparison of the diagram of mixing index between present study and Shamsoddini et al [16] results

شکل 6 مقایسه نمودار شاخص اختلاط بین مطالعه حاضر با نتایج شمس‌الدینی و همکاران [16]

$$U(y) = \begin{cases} U_0 \left(1 + A \frac{y}{h/2} - B \left(\frac{y}{h/2} \right)^2 \right), & y \geq 0 \\ U_0 \left(1 + \hat{A} \frac{y}{h/2} - \hat{B} \left(\frac{y}{h/2} \right)^2 \right), & y \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

که A, B, \hat{A} و \hat{B} ترکیب‌های لزجت و U_0 سرعت در $y = 0$ هستند که از روابط (13) تا (18) به‌دست می‌آید.

$$A = \frac{\mu_2 - \mu_1}{2\mu_1} \quad (13)$$

$$B = \frac{\mu_2 + \mu_1}{2\mu_1} \quad (14)$$

$$\hat{A} = \frac{\mu_2 - \mu_1}{2\mu_2} \quad (15)$$

$$\hat{B} = \frac{\mu_2 + \mu_1}{2\mu_2} \quad (16)$$

$$U_0 = \frac{2u}{E} \quad (17)$$

$$E = 2 + \left(\frac{A - \hat{A}}{2} - \frac{B - \hat{B}}{3} \right) \quad (18)$$

با قرار دادن $R = 0$ پروفیل سرعت توسعه‌یافته برای حالت چگالی متفاوت به‌دست می‌آید. می‌توان در "شکل 7" علاوه بر پروفیل سرعت در $R = 0$ ، مقایسه پروفیل سرعت به‌دست آمده از حل تحلیلی (رابطه (10))، با حل عددی، برای نسبت لزجت 1.5 ($R = 0$) در عدد رینولدز 50 را مشاهده کرد و همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف بین این دو روش، بسیار ناچیز و کمتر از 0.03 درصد می‌باشد.

4-2- اختلاط دو سیال یکسان

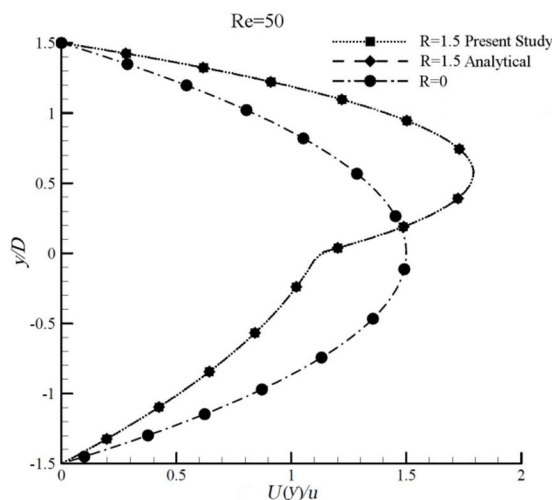


Fig. 7 Developed velocity profile at $R=0$ and comparison of the developed velocity profile for the present study and analytical solution at $R=1.5$

شکل 7 پروفیل توسعه یافته در $R=0$ و مقایسه پروفیل سرعت توسعه‌یافته به‌دست آمده از حل عددی حاضر با حل تحلیلی در $R=1.5$

بود و افزایش عدد استروهال به بیش از این مقدار، منجر به کاهش میزان اختلاط می‌گردد. افزایش عدد استروهال، منجر به افزایش سرعت نوسانی پره می‌گردد و همین عامل تا یک حد منجر به افزایش ریزش گردابه‌ها می‌شود. ریزش گردابه‌ها، منجر به ایجاد نقش‌های قارچی و هلالی شکل می‌شوند. در پی افزایش ریزش گردابه، نقش‌های قارچی و هلالی بیشتر و نزدیک به هم در طول کانال تولید می‌شود. سرعت نوسانی که، منجر به ایجاد نقش‌های قارچی و هلالی بیشتری به همراه افزایش رشد عرضی گردابه‌ها در طول کانال می‌شود، اختلاط بهتری رخ می‌دهد. دو عدد استروهال 0.5 و 0.9 دو نقطه بحرانی برای شاخص اختلاط است و هر کدام یک برتری نسبت به سایر

در این بخش اختلاط دو سیال یکسان، در اعداد استروهال مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت. می‌توان کانتور غلظت و نمودار شاخص اختلاط در 10 عدد استروهال برای حالتی که دو سیال کاملاً یکسان ($S = 1, R = 0$) هستند را در "شکل 8" مشاهده کرد.

در این حالت با افزایش عدد استروهال به مقدار 0.5 میزان اختلاط بهبود یافته و افزایش بیش از این مقدار تا عدد استروهال 0.7، شاهد کاهش میزان اختلاط هستیم. این روند به این صورت ادامه دارد که با افزایش مجدد عدد استروهال، شاهد تغییرات نوسانی، در افزایش و کاهش میزان اختلاط هستیم. با افزایش دوباره عدد استروهال تا مقدار 0.9، شاهد بهبود اختلاط خواهیم

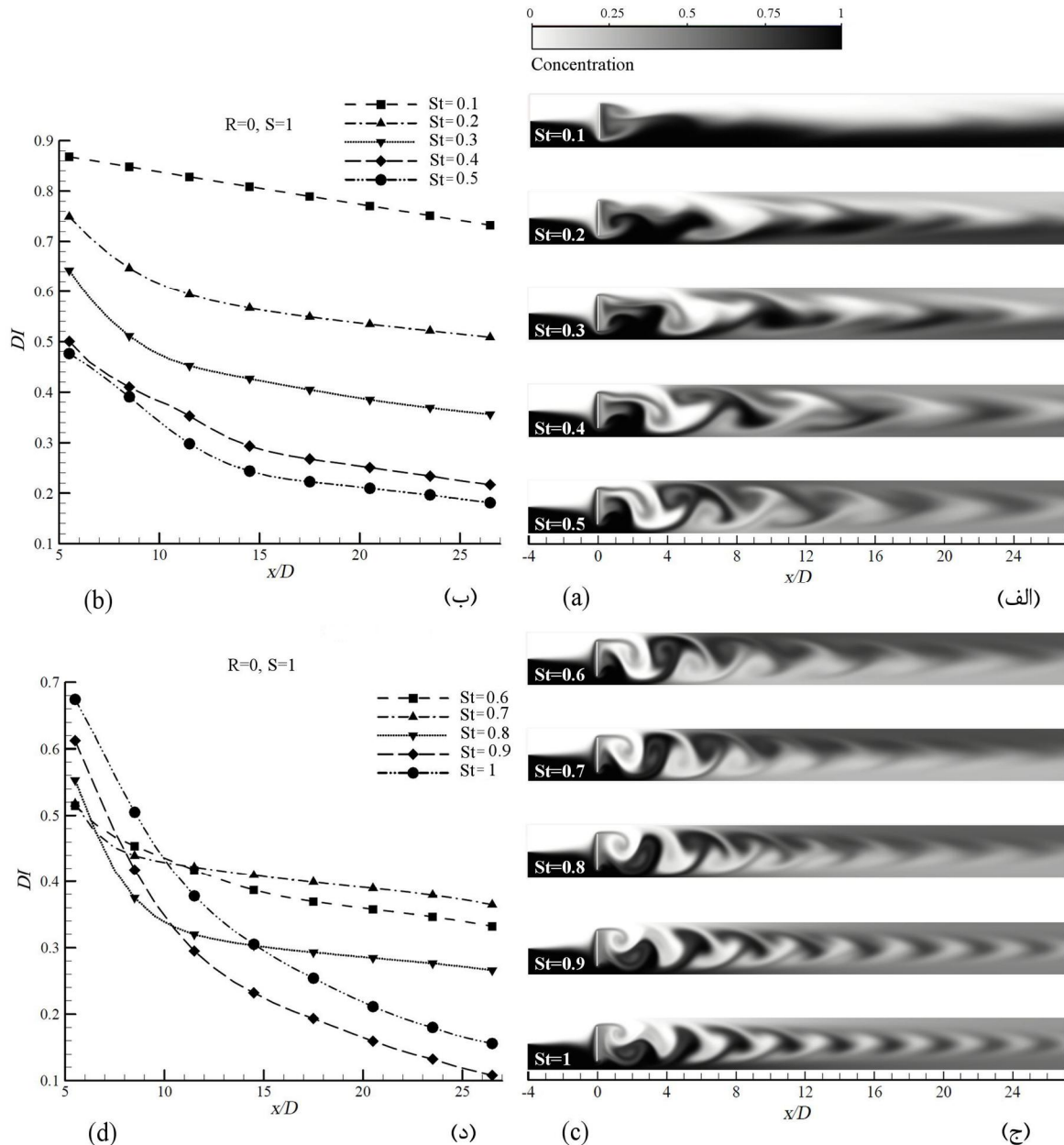


Fig. 8 Mixing of the two fluids with the same properties ($S = 1, R = 0$): (a) Contours of concentration distribution at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (b) Diagram of mixing index at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (c) Contours of concentration distribution at $0.6 \leq St \leq 1$, (d) Diagram of mixing index at $0.6 \leq St \leq 1$

شکل 8 اختلاط دو سیال با خواص یکسان ($S = 1, R = 0$): (الف) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهال $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ب) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهال $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ج) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهال $0.6 \leq St \leq 1$ ، (د) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهال $0.6 \leq St \leq 1$

مشاهده کرد. با افزایش عدد استروهل به مقدار 0.5، میزان اختلاط بهبود یافته و با افزایش عدد استروهل به بیش از این مقدار، شاهد تغییرات نوسانی بسیار کمی در افزایش و کاهش میزان اختلاط هستیم. مقدار عدد استروهل مطلوب 0.5 است، که به عنوان شاخص اختلاط پایه (DI_{st}) در نظر گرفته شده است. تأثیر فاصله گرفتن اعداد استروهل از عدد استروهل مطلوب بر اختلاط را می‌توان در جدول 3 مشاهده کرد.

با مقایسه دو جدول 2 و 3 می‌توان شاهد این مورد بود که کاهش میزان اختلاط، در حالتی که چگالی دو سیال متفاوت است، تغییرات کمتری نسبت به حالتی که دو سیال کاملاً یکسان است دارد و این موضوع را می‌رساند که در حالتی که چگالی دو سیال متفاوت است، نسبت به حالتی که دو سیال کاملاً یکسان است، عدد استروهل تأثیر کمتری بر اختلاط دو سیال می‌گذارد. برای حالتی که دو سیال دارای چگالی متفاوت هستند، تغییرات در کانال تا قبل از عدد استروهل 0.8، برابر با یک دوره نوسان پره است اما بعد از عدد استروهل 0.8، تغییرات برابر با یک دوره نوسان پره نیست. تغییرات ثابت می‌شوند اما نه برای یک دوره تناوب پره، بلکه برای ضربی از دوره تناوب پره ($T = nT_S$) ثابت می‌شوند.

شاید بتوان علت رخ داد حاضر را، در افزایش سرعت نوسانی و نیروی وارد به سیال، به همراه افزایش اینرسی ناشی از افزایش چگالی سیال، دانست. افزایش اینرسی، منجر به کندتر شدن تغییرات در رفتار سیال می‌شود. این سیال تا یک حدی به سرعت نوسانی و نیروی وارد شده به آن برابر با همان سرعت نوسانی، واکنش نشان می‌دهد و افزایش بیش از یک مقدار سرعت نوسانی وارد به سیالی که، شرایط و توانایی تغییرات برابر با همان سرعت نوسانی را ندارد، منجر می‌شود که سرعت تغییر متغیرها از قبیل شاخص اختلاط در یک نقطه از کانال، سرعت متوسط در کل کانال و ... کمتر از سرعت نوسانی وارد به سیال توسط پره باشد و یک دوره تناوب نوسان تغییر متغیرها، برابر با چند دوره تناوب نوسانات پره ($T = nT_S$) می‌شود.

استروهل‌ها دارند. در نقطه $\alpha/D \cong 11$ ، در عدد استروهل 0.5، تا قبل از این نقطه و در عدد استروهل 0.9، بعد از این نقطه، شاخص اختلاط بهترین حالت را نسبت به سایر استروهل‌ها دارند. اما آنچه که مهم است، سرعت نوسانی است که در آن گردابه بتوانند در طول و در عرض کانال، رشد پیدا کنند. هر چند تا قبل از این نقطه عدد استروهل 0.5، بهترین عملکرد را داشت، اما همان‌طور که از نمودار شاخص اختلاط مشاهده می‌شود معیار اختلاط از این نقطه به بعد تغییرات زیادی نداشته است و اختلاف شاخص اختلاط در خروجی نسبت به شاخص اختلاط در نقطه $\alpha/D \cong 11$ ، 39.14 درصد می‌باشد در صورتی که در عدد استروهل 0.9، اختلاف 64.349 درصد می‌باشد و این نشان می‌دهد در عدد استروهل 0.9، گردابه‌ها در طول و در عرض کانال رشد بیشتری داشته‌اند. همان‌طور که مشاهده شد مخلوط‌کننده در عدد استروهل 0.9 که عدد استروهل مطلوب نامیده می‌شود، بهترین عملکرد را نسبت به سایر استروهل‌ها داشت. شاخص اختلاط در عدد استروهل مطلوب در خروجی به عنوان شاخص اختلاط پایه (DI_{st}) در نظر گرفته می‌شود. تأثیر فاصله گرفتن اعداد استروهل از عدد استروهل مطلوب بر اختلاط را می‌توان، در جدول 2 مشاهده کرد. در حالتی که بررسی شد، تمامی تغییرات در کانال متناسب با یک دوره تناوب نوسان پره (T_S) است و در نتیجه زمان نمونه‌گیری (T) برای محاسبه انتگرال شاخص اختلاط، برابر با یک دوره تناوب نوسان پره ($T = T_S$)، در نظر گرفته شده است. همچنین کانتورهای غلظت نشان داده شده مطابق "شکل 3" در ابتدای دوره تناوب پره ($t = 0$) نشان داده شده‌اند.

3-4- اختلاط دو سیال با چگالی متفاوت

در این بخش تأثیر متفاوت بودن چگالی دو سیال بر اختلاط و بر عملکرد مخلوط‌کننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. می‌توان کانتور غلظت و نمودار شاخص اختلاط در 10 عدد استروهل، برای حالتی که لزجت دو سیال یکسان اما چگالی آنها متفاوت ($S = 2.5, R = 0$) هستند را در "شکل 9"

جدول 2 افزایش یا کاهش میزان اختلاط دو سیال با خواص یکسان ($S = 1, R = 0$) نسبت به شاخص اختلاط پایه در خروجی کانال در عدد رینولدز 50 و عدد اشمیت 10.

Table 2 Increase or decrease of the amount of mixing of the two fluids with the same properties ($S = 1, R = 0$), to mixing index at outlet at $Re = 50$ and $Sc = 10$.

عدد استروهل	$St = 0.1$	$St = 0.2$	$St = 0.3$	$St = 0.4$	$St = 0.5$
η (درصد)	577.94	370.51	229.53	100.56	67.71
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش
عدد استروهل	$St = 0.6$	$St = 0.7$	$St = 0.8$	$St = 0.9$	$St = 1$
η (درصد)	207.52	237.517	146.054	0	44.31
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	حالت پایه	کاهش

جدول 3 افزایش یا کاهش میزان اختلاط دو سیال با چگالی متفاوت ($S = 2.5, R = 0$) نسبت به شاخص اختلاط پایه در خروجی کانال در عدد رینولدز 50 و عدد اشمیت 10.

Table 3 Increase or decrease of the amount of mixing of the two fluids with a various density ($S = 2.5, R = 0$), to mixing index at outlet at $Re = 50$ and $Sc = 10$.

عدد استروهل	$St = 0.1$	$St = 0.2$	$St = 0.3$	$St = 0.4$	$St = 0.5$
η (درصد)	54.01	18.39	10.9	4.96	0
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	حالت پایه
عدد استروهل	$St = 0.6$	$St = 0.7$	$St = 0.8$	$St = 0.9$	$St = 1$
η (درصد)	1.99	1.73	1.56	4.55	0.82
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش

نشده‌اند و سیال تمایلی به حل شدن ندارد و فقط شاهد نوسانات نامنظم بسیار نزدیک به هم، در شاخص اختلاط هستیم. برای این حالت که تغییرات در کانال، برابر با یک دوره تناوب نوسان پره نیست، کانتورهای غلظت در ابتدای یکی از دوره‌های تناوب نوسان پره (مطابق شکل 3 ($t = 0$)) نشان داده شده‌اند، که این کانتور را می‌توان در بازه دوره تناوب تغییرات در کانال مشاهده کرد.

آنچه که از اختلاط دو سیال در حالت فوق مشاهده می‌شود این است که، نه تنها در خروجی کانال، بلکه در طول کانال هم، تغییر عدد استروهل تأثیر چندانی بر شاخص اختلاط نداشته است و فقط شاهد نوسانات نامنظمی در شاخص اختلاط هستیم. با مقایسه کانتورها و نمودارهای غلظت در "شکل‌های 8 و 9" می‌توان مشاهده کرد، در حالت چگالی متفاوت، نقش‌های قارچی و هلالی رشد داشته‌اند اما این مورد منجر به تغییر در میزان اختلاط

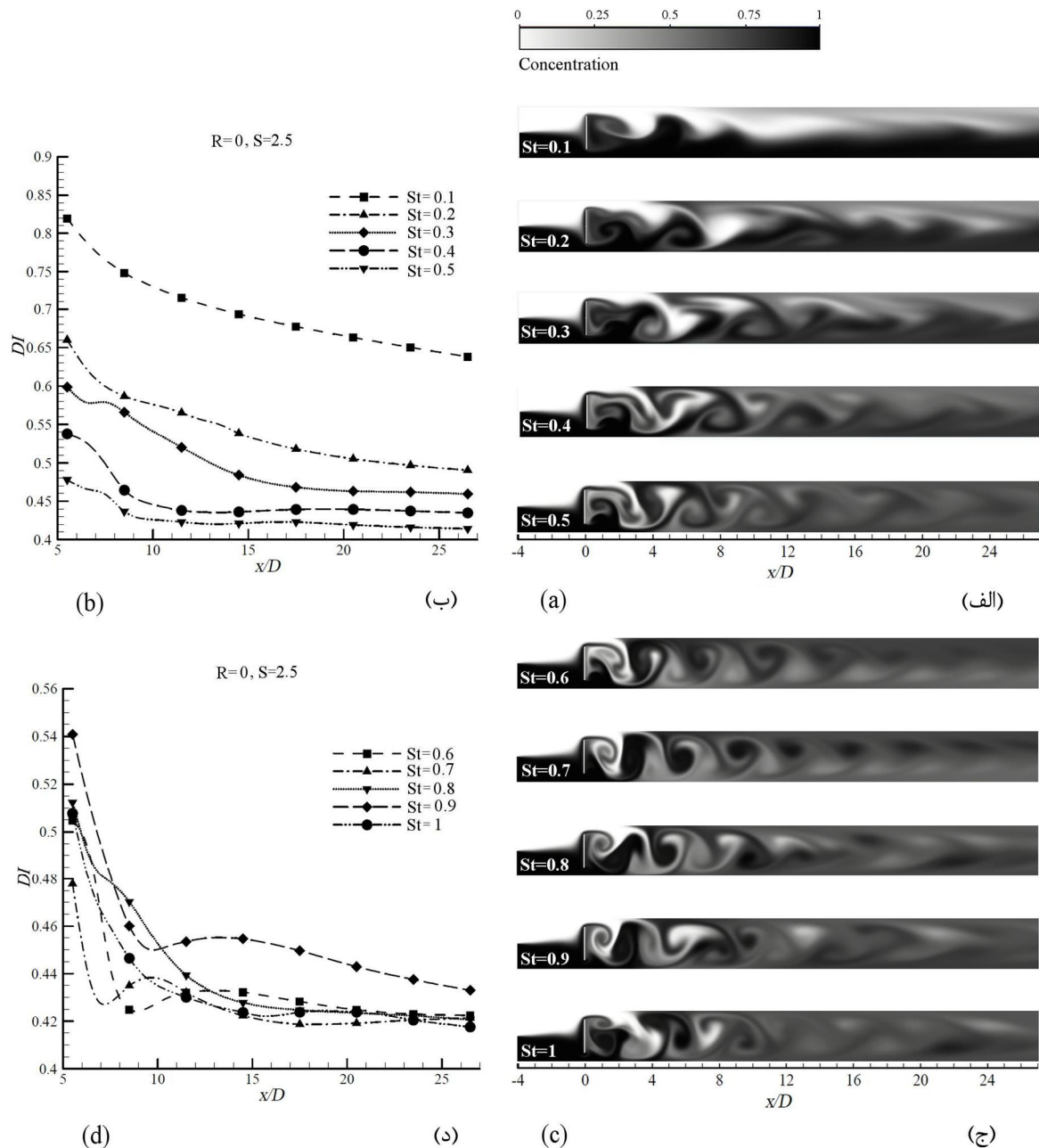


Fig. 9 Mixing of the two fluids with a various density ($S = 2.5, R = 0$): (a) Contours of concentration distribution at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (b) Diagram of mixing index at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (c) Contours of concentration distribution at $0.6 \leq St \leq 1$, (d) Diagram of mixing index at $0.6 \leq St \leq 1$

شکل 9 اختلاط دو سیال با چگالی متفاوت ($S = 2.5, R = 0$): (الف) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهل $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ب) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهل $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ج) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهل $0.6 \leq St \leq 1$ ، (د) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهل $0.6 \leq St \leq 1$

4-4- اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت

در این بخش تأثیر تفاوت در لزجت دو سیال بر اختلاط و بر عملکرد مخلوط کننده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. می‌توان کانتور غلظت و نمودار معیار اختلاط در 10 عدد استروهال، برای حالتی که چگالی دو سیال یکسان، اما لزجت آن‌ها متفاوت ($S = 1, R = 1.5$) هستند را در شکل 10 مشاهده کرد. با افزایش عدد استروهال به مقدار 0.7، میزان اختلاط بهبود یافته و با افزایش عدد استروهال به بیش از این مقدار شاهد کاهش میزان اختلاط هستیم. معیار اختلاط در خروجی کانال در عدد استروهال مطلوب 0.7، به

عنوان معیار اختلاط پایه (DI_{St}) در نظر گرفته می‌شود. تأثیر فاصله گرفتن اعداد استروهال، از عدد استروهال مطلوب بر اختلاط را می‌توان در جدول 4 مشاهده کرد.

همانند آنچه که برای دوسیال با چگالی متفاوت دیدیم، در این جا هم با مقایسه دو جدول 2 و 4 می‌توان شاهد این مورد بود که کاهش میزان اختلاط در حالتی که لزجت دو سیال متفاوت است، تغییرات کمتری نسبت به حالتی است که دو سیال کاملاً یکسان است دارد و این موضوع را می‌رساند که در حالتی که لزجت دو سیال متفاوت است، نسبت به حالتی که دو سیال کاملاً

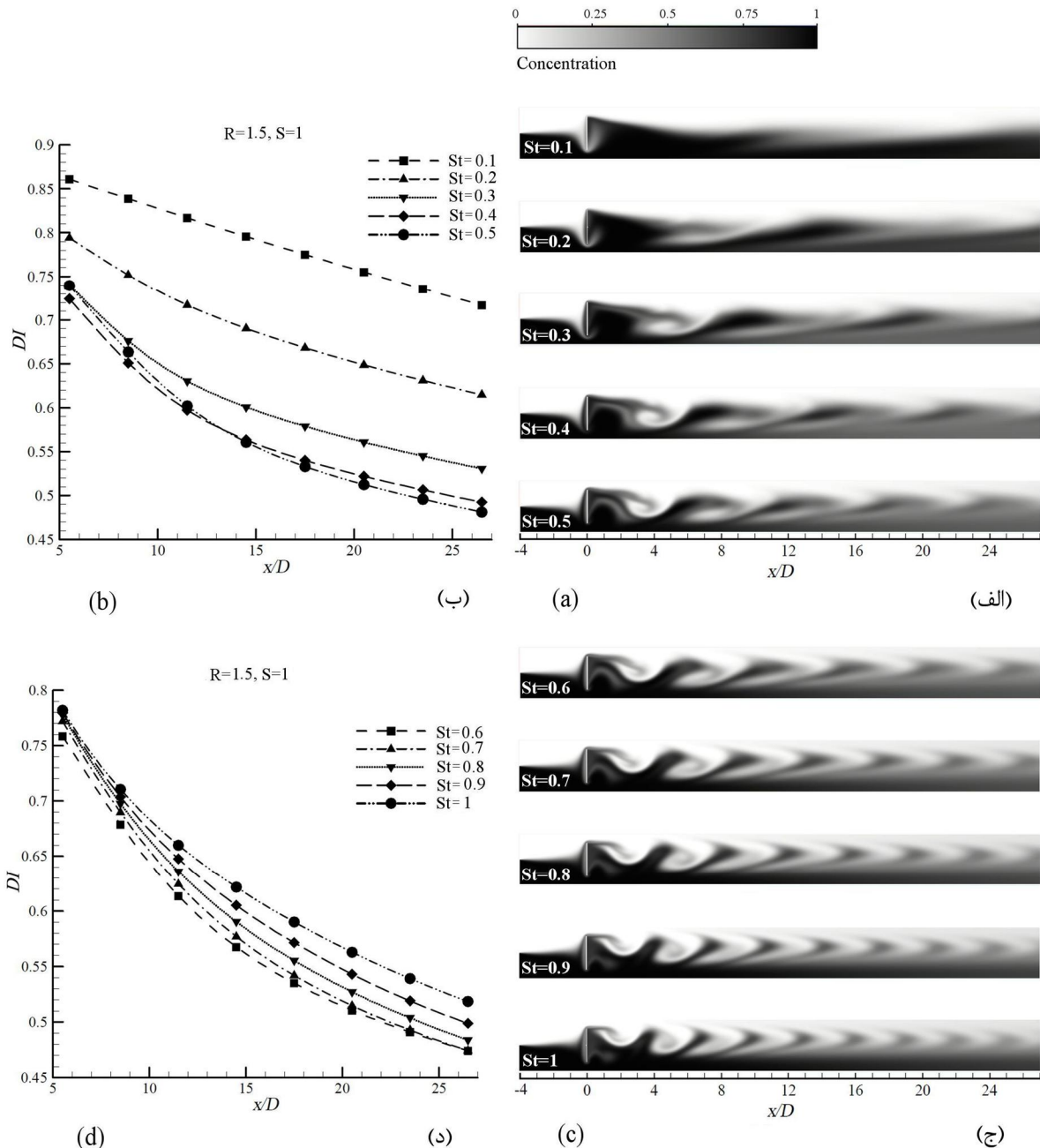


Fig. 10 Mixing of the two fluids with a various viscosity ($S = 1, R = 1.5$): (a) Contours of concentration distribution at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (b) Diagram of mixing index at $0.1 \leq St \leq 0.5$, (c) Contours of concentration distribution at $0.6 \leq St \leq 1$, (d) Diagram of mixing index at $0.6 \leq St \leq 1$

شکل 10 اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت ($S = 1, R = 1.5$): (الف) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهال $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ب) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهال $0.1 \leq St \leq 0.5$ ، (ج) کانتور غلظت در محدوده عدد استروهال $0.6 \leq St \leq 1$ ، (د) نمودار شاخص اختلاط در محدوده عدد استروهال $0.6 \leq St \leq 1$

جدول 4 افزایش یا کاهش میزان اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت ($S = 1, R = 1.5$) نسبت به شاخص اختلاط پایه در خروجی کانال در عدد رینولدز 50 و عدد اشمیت 1.

Table 4 Increase or decrease of the amount of mixing of the two fluids with the various viscosity ($S = 1, R = 1.5$), to mixing index at outlet at $Re = 50$ and $Sc = 10$

عدد استروهال	St = 0.5	St = 0.4	St = 0.3	St = 0.2	St = 0.1
η (درصد)	1.49	3.87	11.9	29.62	51.15
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش
عدد استروهال	St = 1	St = 0.9	St = 0.8	St = 0.7	St = 0.6
η (درصد)	9.35	5.19	2.03	0	0.003
افزایش یا کاهش میزان اختلاط	کاهش	کاهش	کاهش	حالت پایه	کاهش

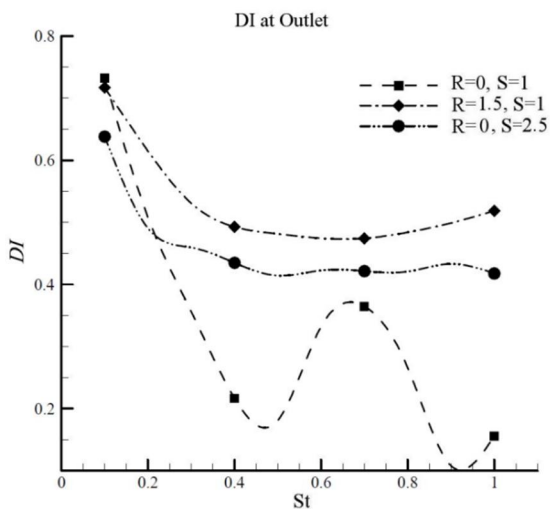


Fig. 11 Diagram of mixing index at outlet

شکل 11 نمودار شاخص اختلاط در خروجی کانال

• دو سیال با چگالی یکسان و لزجت متفاوت ($S = 1, R = 1.5$)

مطالعه انجام شده نشان داد متفاوت بودن چگالی و لزجت دو سیال بر عملکرد مخلوط کننده و جریان اختلاط درون کانال تأثیر می گذارد. با متفاوت شدن چگالی و لزجت دو سیال، عدد استروهال، تأثیر کمتری بر تغییر میزان شاخص اختلاط می گذارد و دامنه تغییرات شاخص اختلاط در حالتی که دو سیال یکسان است، بیشتر از حالتی است که چگالی و لزجت دو سیال متفاوت است و همچنین مخلوط کننده در هر یک از سه مورد بررسی شده، عملکرد متفاوتی داشت و عدد استروهال مطلوب برای هر کدام متفاوت بود.

در حالت دو سیال یکسان و دو سیال با لزجت متفاوت، تغییرات متغیرها در کانال برابر با یک دور نوسان پره است، اما برای دو سیال با چگالی متفاوت تغییرات در کانال تا قبل از عدد استروهال 0.8، برابر با یک دوره نوسان پره است، اما بعد از عدد استروهال 0.8، تغییرات برابر با یک دوره نوسان پره نیست و سیال به علت افزایش نیروی اینرسی ناشی از افزایش چگالی شرایط و توانایی تغییرات برابر با همان سرعت نوسانی اعمال شده را ندارد. سرعت تغییر متغیرها از قبیل شاخص اختلاط در یک نقطه از کانال، سرعت متوسط در کل کانال و ... کمتر از سرعت نوسانی وارده به سیال توسط پره می باشد و یک دوره تناوب نوسان تغییر متغیرها، برابر با چند دوره تناوب نوسانات پره ($T = nT_s$) می شود. در حالتی که لزجت دو سیال متفاوت است به علت افزایش نیروهای لزجی سیال در برابر تغییر شکل مقاوم است و نقش های قارچی و هلالی شکل، در جهت عرضی رشد کمتری دارند و اختلاط در نزدیکی دیواره کمتر صورت گرفته است ولی در حالت چگالی متفاوت، سیال

یکسان است، عدد استروهال تأثیر کمتری بر اختلاط می گذارد. با مقایسه "شکل 8 و 10" می توان مشاهده کرد، در حالتی که لزجت دو سیال متفاوت است سیال در برابر تغییر شکل مقاوم است و نقش های قارچی و هلالی شکل در جهت عرضی رشد کمتری دارند و اختلاط در نزدیکی دیواره کمتر صورت گرفته است. یکی از دلایل کاهش اختلاط می تواند این باشد که با افزایش لزجت سیال منجر به افزایش نیروهای لزجی و مقاومت سیال در برابر نیروهای وارد بر آن بیشتر می شود و همین مورد، باعث افزایش مقاومت سیال در برابر تغییر شکل سیال می شود. همانند حالت دو سیال یکسان و برخلاف حالت چگالی متفاوت، در این حالت تمامی تغییرات در کانال متناسب با یک دوره تناوب نوسان پره (T_s) است و در نتیجه زمان نمونه گیری (T) برای محاسبه انتگرال شاخص اختلاط، برابر با یک دوره تناوب نوسان پره ($T = T_s$)، در نظر گرفته شده است. همچنین کانتورهای غلظت نشان داده شده مطابق شکل 3 در ابتدای دوره تناوب پره ($t = 0$) نشان داده شده اند.

"شکل 11" که مبین نمودار شاخص اختلاط در خروجی کانال برای سه حالت مورد بررسی شده در قبل است، نشان می دهد با متفاوت شدن دو سیال عملکرد مخلوط کننده تغییر می کند و در هر حالت مخلوط کننده رفتار منحصر به فردی دارد. اختلاط دو سیال یکسان، یک حالت ایده آل است که مورد بررسی قرار می گیرد، زیرا اختلاط زمانی معنا پیدا می کند که دو سیال دارای دما، غلظت و یا خواص متفاوت باشند با این حال، اکثر کارهای صورت گرفته در زمینه بهینه سازی عملکرد مخلوط کننده در اختلاط دو سیال یکسان را مورد بررسی قرار دادند و نقاط بهینه معرفی شده، فقط مختص اختلاط دو سیال یکسان هستند و نمی توان از این نقاط بهینه بدست آمده، برای اختلاط دو سیال با خواص متفاوت استفاده کرد زیرا با تغییر خواص دو سیال، رفتار مخلوط کننده متفاوت می شود و نیاز است که بهینه سازی با در نظر گرفتن تفاوت خواص دو سیال، صورت گیرد.

5- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر بررسی تأثیر متفاوت بودن چگالی و لزجت دو سیال مخلوط شونده نسبت به یکدیگر بر عملکرد یک میکرومخلوط کننده دو بعدی، مجهز به یک پره نوسانی در نرم افزار CFX مورد بررسی قرار گرفت. عدد رینولدز و عدد اشمیت به ترتیب، مقادیر 50 و 10 را به خود اختصاص دادند. نسبت لگاریتمی لزجت 1.5 و نسبت چگالی 2.5 در نظر گرفته شد. زاویه نوسان پره $\pm 45^\circ$ و محدوده عدد استروهال مورد بررسی $0.1 \leq St \leq 1$ ، در نظر گرفته شد. عملکرد مخلوط کننده در سه حالت مورد بررسی قرار گرفت:

- دو سیال با خواص یکسان ($S = 1, R = 0$)
- دو سیال با لزجت یکسان و چگالی متفاوت ($S = 2.5, R = 0$)

در برابر تغییر شکل مقاومتی ندارند، اما با این حال تمایل کمتری به مخلوط شدن دارد.

6- فهرست علائم

A	ترکیبی از لزجت
\hat{A}	ترکیبی از لزجت
B	ترکیبی از لزجت
\hat{B}	ترکیبی از لزجت
C	غلظت
d	نفوذ جرمی (m^2s^{-1})
D	طول واحد
DI	شاخص اختلاط (وابسته به زمان)
E	ترکیبی از لزجت
f	فرکانس نوسانی اجباری (s^{-1})
h	اندازه دهانه ورودی کانال
L	اندازه طولی پره
M	شاخص اختلاط (مستقل از زمان)
n	تعداد دوره تناوب نوسان پره
N	تعداد نقاط در یک مقطع عرضی
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pe	عدد پکلت
R	نسبت لگاریتمی لزجت
Re	عدد رینولدز
S	نسبت چگالی
Sc	عدد اشمیت
St	عدد استروهل
T	بازه زمانی نمونه گیری شده (s)
T_s	یک دوره تناوب نوسان پره (s)
u	سرعت متوسط جریان (ms^{-1})
U_0	سرعت در $y = 0$ (ms^{-1})
x	مولفه افقی محور مختصات
y	مولفه عمودی محور مختصات
	علائم یونانی
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
η	درصد افزایش یا کاهش میزان اختلاط
	زیرنویس‌ها
1	سیال 1
2	سیال 2
mean	مقدار متوسط
t	آشفتگی
out	در خروجی کانال
st	پایه
i	هر نقطه

7- مراجع

[1] E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta, *Handbook of*

industrial mixing: science and practice, pp. 1-24, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

[2] P. J. Cullen, *Food mixing: Principles and applications*, pp. 6, Chichester, U.K.: Wiley-Blackwell, 2009.

[3] I. Kostin, M. Marion, R. Texier-Picard, V. A. Volpert, Modelling of miscible liquids with the Korteweg stress, *{ESAIM}: M2AN*, Vol. 37, No. 5, pp. 741-753, 2003.

[4] B. A. Hegberg, G. R. Brenniman, W. H. Hallenbeck, *Mixed plastics recycling technology*, pp. 91, Park Ridge, New Jersey: Noyes Data Corporation, 1992.

[5] J.-Y. Park, Y.-D. Kim, S.-R. Kim, S.-Y. Han, J.-S. Maeng, Robust design of an active micro-mixer based on the Taguchi method, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 129, No. 2, pp. 790-798, 2008.

[6] L. Capretto, W. Cheng, M. Hill, X. Zhang, *Micromixing within microfluidic devices*, in: *Microfluidics*, pp. 27-68: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[7] Y. Z. Liu, B. J. Kim, H. J. Sung, Two-fluid mixing in a microchannel, *International journal of heat and fluid flow*, Vol. 25, No. 6, pp. 986-995, 2004.

[8] V. Hessel, H. Löwe, F. Schönfeld, Micromixers—a review on passive and active mixing principles, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 8, pp. 2479-2501, 2005.

[9] M. Nobari, H. Naderan, A numerical study of flow past a cylinder with cross flow and inline oscillation, *Computers & Fluids*, Vol. 35, No. 4, pp. 393-415, 2006.

[10] M. Koch, H. Witt, A. Evans, A. Brunnschweiler, Improved characterization technique for micromixers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 156, 1999.

[11] R. H. Liu, M. A. Stremmer, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, D. J. Beebe, Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 190-197, 2000.

[12] S.-Y. Jin, Y.-Z. Liu, W.-Z. Wang, Z.-M. Cao, H. S. Koyama, Numerical evaluation of two-fluid mixing in a swirl micro-mixer, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, Vol. 18, No. 5, pp. 542-546, 2006.

[13] S.-J. An, Y.-D. Kim, S. Heu, J.-S. Maeng, Numerical study of the mixing characteristics for rotating and oscillating stirrers in a microchannel, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 49, No. 2, pp. 651-659, 2006.

[14] Y.-D. Kim, S.-J. An, J.-S. Maeng, Numerical analysis of the fluid mixing behaviors in a microchannel with a circular cylinder and an oscillating stirrer, *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 50, No. 2, pp. 505-513, 2007.

[15] S.-P. Ryu, J.-Y. Park, S.-Y. Han, Optimum design of an active micro-mixer using successive Kriging method, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 5, pp. 849-855, 2011.

[16] R. Shamsoddini, M. Sefid, R. Fatehi, ISPH modelling and analysis of fluid mixing in a microchannel with an oscillating or a rotating stirrer, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, No. 2, pp. 289-298, 2014.

[17] C. ANSYS, *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, Vol. Release 16.0, 2015; <http://www.ansys.com/>

[18] C. ANSYS, *ANSYS CFX-Solver modeling Guide*, Vol. Release 15.0., 2013; <http://www.ansys.com/>

[19] C. M. Karst, B. D. Storey, J. B. Geddes, Laminar flow of two miscible fluids in a simple network, *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 25, No. 3, pp. 033601, 2013.

[20] L. Talon, N. Goyal, E. Meiburg, Variable density and viscosity, miscible displacements in horizontal Hele-Shaw cells. Part 1. Linear stability analysis, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 721, pp. 268-294, 2013.

[21] L. Talon, E. Meiburg, Plane Poiseuille flow of miscible layers with different viscosities: instabilities in the Stokes flow regime, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 686, pp. 484-506, 2011.

[22] K. Sahu, H. Ding, P. Valluri, O. Matar, Linear stability analysis and numerical simulation of miscible two-layer channel flow, *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 21, No. 4, pp. 042104, 2009.

[23] N.-T. Nguyen, *Micromixers: fundamentals, design and fabrication*, pp. 312-320, Norwich, New York: William Andrew, 2011.