



شبیه سازی عددی یک میکرومیکسر L شکل و بررسی اثر تغییرات پارامترهای هندسی بر عملکرد آن

پروانه زارع¹، شهرام طالبی^{2*}

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* صندوق پستی 8915818411، talebi_s@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 آذر 1395

پذیرش: 28 بهمن 1395

ارائه در سایت: 22 اسفند 1395

کلید واژگان:

شبیه سازی عددی

میکرومیکسر

شاخص اختلاط

افت فشار

L شکل

چکیده

به دلیل تکنولوژی ساخت و پیاده سازی آسان میکرومیکسرهای منفعل در یک سیستم میکروسیالی پیچیده، در این مطالعه یک نوع میکرومیکسر منفعل بررسی شده است. میکرومیکسرهای منفعل با افزایش سطح تماس دو سیال و کاهش فاصله پخش مولکولی، میزان اختلاط را افزایش می دهند. در مطالعه حاضر تحلیل عددی یک L میکرومیکسر به منظور بررسی رفتار اختلاط و مشخصه های جریان سیال به ازای تغییرات پارامترهای هندسی کلیدی در چهار عدد رینولدز مختلف انجام شده است. سه پارامتر هندسی بی بعد طول نرمال، نسبت طول و نسبت ابعاد تعریف شده اند. شبیه سازی ها در عدد اشمیت 900.18 انجام شده است، همچنین عدد رینولدز در محدوده بین 50 تا 200 انتخاب شده است. از یک شاخص اختلاط برای ارزیابی رفتار اختلاط در میکروکانال استفاده شده است. صحت شبیه سازی انجام شده، با مقایسه نتایج کار حاضر با نتایج مطالعات معتبر دیگران به اثبات رسیده است. نتایج نشان می دهد که شاخص اختلاط و افت فشار در یک کانال مارپیچ به تغییر پارامترهای هندسی میکروکانال حساس هستند، و به ازای اعداد رینولدز مختلف رفتار متفاوتی را نشان می دهند. علاوه بر این به دلیل تغییر جهت های تند 90° در میکروکانال، نیروی گریز از مرکز برای ایجاد گردابه به اندازه کافی بزرگ است که منجر به جابه جایی نامنظم می شود.

Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance

Parvaneh Zare¹, Shahram Talebi^{1*}

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

* P.O.B. 8915818411, Yazd, Iran, talebi_s@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 03 December 2016

Accepted 16 February 2017

Available Online 12 March 2017

Keywords:

Numerical simulation

Micromixer

Mixing index

Pressure drop

L-shaped

ABSTRACT

Due to easy manufacturing technology and implementation of passive micromixers in a complex microfluidic system, in this study, a type of passive micromixer has been investigated. Passive micromixers increase the mixing rate by increasing the contact surface of two fluids and reducing the distance of molecular diffusion. In the present study, numerical analysis of an L-micromixer has been performed to investigate the mixing behavior and characteristics of fluid flow with changes in key geometrical parameters at four Reynolds numbers. Three non-dimensional geometrical parameters, i.e., normalized length (ZR), length ratio (LR), and aspect ratio (AR) have been defined. Simulations have been performed at the Schmidt number of 900.18. The Reynolds number has also been selected in the range of 50 to 200. A mixing index has been used to quantify mixing behavior in the microchannel. The accuracy of the simulation has been proved by comparing current results with the results of other valid studies. The results reveal that mixing index and pressure drop in a serpentine channel are sensitive to the changes of geometric parameters of the microchannel, and show different behavior at various Reynolds numbers. Furthermore, due to the sharp 90° turns in the microchannel, the inertial force is large enough to cause vortices, which leads to chaotic advection.

1- مقدمه

را پوشش داده است. اختلاط به فرآیند تغییر یک سیستم غیرهمگن به یک سیستم همگن² گفته می شود. اغلب اختلاط بخشی از فرآیندهای شیمیایی و فیزیکی است. اختلاط می تواند با توجه به ترکیب های مختلف بین فازهای گاز، مایع و جامد صورت گیرد. عملیات اختلاط معمولاً به منظور مخلوط یک

در دهه گذشته شاهد افزایش کاربردهای فناوری میکروسیالی¹ در شیمی تجزیه و تولید مواد شیمیایی بوده ایم. علم و فناوری سیستم های میکروسیالی طیف وسیعی از مطالعات بنیادی تا کاربردهای واقعی در صنعت و آزمایشگاه ها

² Homogeneous

¹ Microfluidic

Please cite this article using:

P. Zare, Sh. Talebi, Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 293-304, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

P. Zare, Sh. Talebi, Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 293-304, 2017 (in Persian)

برای دستیابی به اختلاط احتیاج دارند [3]. میکرومیکسرهای فعال برای افزایش بازده اختلاط متکی بر محرک‌های خارجی از جمله اختلاف فشار، دما، میدان مغناطیسی و الکتریکی است. این میکرومیکسرها قابلیت بسیار عالی در اختلاط سیال دارند. مشکلات موجود در ساخت میکرومیکسرهای فعال و اتصال آن‌ها به دستگاه‌های تجزیه و تحلیل سبب شده امروزه به طور گسترده از میکرومیکسرهای منفعل استفاده شود؛ زیرا نیازی به سیستم‌های پیچیده جهت افزایش بازده اختلاط ندارند. میکرومیکسرهای منفعل با ایجاد جریان نامنظم با استفاده از موانع، تفکیک جریان به جریان‌های کوچک‌تر و یا تغییر شکل کانال اختلاط سبب افزایش سطح تماس دو سیال و در نتیجه آن افزایش بازده اختلاط می‌شوند [4]؛ بنابراین بررسی جریان درون کانال‌های پیچیده میکرومیکسرهای منفعل و ارزیابی اثر پارامترهای هندسی مختلف بر عملکرد اختلاط دارای اهمیت است. این مطالعات در طراحی تجهیزات میکروسایالی قوی مفید خواهد بود.

لیو و همکاران [5] با استفاده از محلول فنول فتالین و محلول سدیم هیدرواکسید¹⁷ در یک آزمایش تجربی، به بررسی عملکرد اختلاط میکرومیکسرهای سه‌بعدی با سه هندسه کانال مارپیچ سه‌بعدی، کانال موجی مربعی و کانال مستقیم در اعداد رینولدز 6-70 پرداخته‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که در این محدوده از عدد رینولدز میکروکانال مارپیچ سه‌بعدی نسبت به دو میکروکانال دیگر عمل اختلاط را بهتر انجام داده است. کاناریس و همکاران [6] طرح‌های شش میکروکانال شامل T میکرومیکسر، هندسه مارپیچ متعامد ساده، C میکرومیکسر، L میکرومیکسر، هندسه مارپیچ انحنا دار روی یک صفحه و هندسه مارپیچ انحنا دار روی دو صفحه موازی را به‌طور عددی بررسی کرده‌اند. آنها مشاهده کردند که میکرومیکسر L شکل با تفاوت کمی نسبت به میکرومیکسر C شکل و هندسه مارپیچ انحنا دار روی دو صفحه موازی عملکرد اختلاط بهتری داشته است. افزل و کیم [7] یک میکرومیکسر منفعل با کانال همگرا-واگرا با تغییرات سینوسی ارائه کرده‌اند. آن‌ها مشاهده کردند که در محدوده اعداد رینولدز 10-70 میکرومیکسر با دامنه بزرگ‌تر دیواره کانال، جریان ثانویه قوی‌تر و عملکرد اختلاط بهتری را داشته است. وانگ و همکاران [8] اختلاط در یک پیکربندی به شکل درخت را به طور عددی و تجربی بررسی کرده‌اند. آن‌ها نتیجه گرفتند که افزایش عدد رینولدز و تعداد شاخه‌ها سبب بهبود عملکرد اختلاط می‌شود. سلحاتی و همکاران [9] طرح میکروکانال با ساختار موجی را ارائه کرده‌اند. به دلیل حضور جریان ثانویه متناوب و در نتیجه آن رژیم جریان نامنظم عمل اختلاط در این میکروکانال نسبت به کانال مستقیم بهتر انجام شده است.

باهری اسلامی و احمدی [10] به بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف بر میزان اختلاط در 9 میکرومیکسر منفعل با سرعت‌های نوسانی جریان ورودی پرداخته‌اند. نتایج نشان داده است که شاخص اختلاط در میکرومیکسرهایی که جریان در کانال اختلاط را به چند لایه تقسیم می‌کنند مانند میکرومیکسرهای لوزی شکل بیشتر و در هندسه‌هایی با وجود موانع روی دیواره کانال کمتر است. شمس‌الدینی و همکاران [11] یک میکرومیکسر مجهز به پره را به کمک روش هیدرودینامیک ذرات هموار تراکم‌ناپذیر¹⁸، شبیه‌سازی کرده‌اند و عملکرد اختلاط میکرومیکسر را در چهار حالت پره ضربردی نوسان‌کننده، پره ضربردی دوران‌کننده، پره مستقیم نوسان‌کننده و پره مستقیم دوران‌کننده بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که عملکرد پره ضربردی بهتر از پره مستقیم است. قنبری و همکاران [12] به بررسی تغییر

حجم از سیال، واکنش شیمیایی، انتقال حرارت، انتقال جرم و یا ترکیب چند فاز با هم (سوسپانسیون¹ و تعلیق) برای کاهش ناهمگنی در صنعت به‌کار می‌رود؛ و منجر به اثرات ثانویه مانند واکنش و تغییر خواص می‌شود. علاوه بر این اختلاط فرآیندی است که در بیشتر دستگاه‌های میکروسایالی برای تشخیص‌های پزشکی، توالی‌یابی ژنتیکی²، تولید مواد شیمیایی و کشف دارو استفاده شده است [1].

در فرآیندهای اختلاط متداول سه اصطلاح وجود دارد: اختلاط ماکرو³، اختلاط مسو⁴ و اختلاط میکرو⁵. اختلاط ماکرو به ترکیبی که بر بزرگ‌ترین اندازه‌های حرکت سیال حاکم است، اشاره دارد. در سطح ابعاد ماکرو معمولاً اختلاط توسط یک جریان آشفته⁶ صورت می‌گیرد و در نتیجه آن سطح تماس دو سیال افزایش و طول مسیر اختلاط کاهش می‌یابد. کوچک‌ترین مقیاس حرکت سیال در اختلاط ماکرو اندازه‌های توربولانسی⁷ است. اختلاط میکرو، اختلاط در اندازه کوچک‌ترین مقیاس حرکت سیال و حرکت مولکولی است. مکانیزم اختلاط جهت انتقال جرم، حرارت و همچنین واکنش شیمیایی در سطحی که این پدیده‌ها رخ می‌دهند اختلاط به روش میکرو است. اختلاط مسو در مقیاسی بین اختلاط ماکرو و اختلاط میکرو است که می‌تواند ترکیبی از اختلاط ماکرو و اختلاط میکرو باشد [2]. این مطالعه بر اختلاط در مقیاس میکرو تمرکز دارد.

اختلاط شامل چهار مکانیزم انتقال جرم پخش ادی⁸، پخش مولکولی⁹، جابه‌جایی¹⁰ و پراکندگی تیلور¹¹ است. پخش ادی انتقال گروه بزرگی از گونه‌هاست¹² و به یک جریان آشفته نیاز دارد. ایجاد جریان آشفته در این مقیاس به دلیل اثرات لزجت حاکم در ابعاد میکرو امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین اختلاط بر پایه پخش ادی در میکرومیکسرها صورت نمی‌گیرد. جابه‌جایی و پراکندگی تیلور مکانیزم‌های اصلی انتقال در میکرومیکسرهای پخش مولکولی هستند. پخش مولکولی با حرکت تصادفی مولکول‌ها انجام می‌گیرد؛ و با افزایش سطح تماس سیالات افزایش می‌یابد. این مکانیزم انتقال با ضرب پخش مولکولی مشخص می‌شود. جابه‌جایی پدیده دیگری از انتقال است که توسط حرکت سیال صورت می‌گیرد. انتقال در اثر جابه‌جایی امکان اختلاط بهبود یافته در اعداد رینولدز پایین را فراهم می‌کند، همچنین یک جریان آرام و پایا می‌تواند منجر به جابه‌جایی نامنظم¹³ شود؛ بنابراین جابه‌جایی نامنظم برای شرایط جریان آرام در میکرومیکسرهای ایده‌آل خواهد بود. پراکندگی تیلور نتیجه گرادیان سرعت است. پراکندگی محوری¹⁴ به دلیل جابه‌جایی و پخش داخلی لایه‌های سیال با سرعت‌های مختلف رخ می‌دهد. اختلاط بر پایه پراکندگی تیلور به دلیل این اثر می‌تواند دو یا سه مرتبه سریع‌تر از اختلاط بر پایه پخش مولکولی خالص باشد [1].

میکرومیکسرهای به دو دسته کلی میکرومیکسرهای منفعل¹⁵ و میکرومیکسرهای فعال¹⁶ تقسیم شده‌اند. میکرومیکسرهای منفعل تنها به انرژی پمپاژ، در حالی که میکرومیکسرهای فعال به یک چشمه انرژی خارجی

¹ Suspension² Genetic sequencing³ Macromixing⁴ Mesomixing⁵ Micromixing⁶ Turbulent flow⁷ Turbulent eddies⁸ Eddy diffusion⁹ Molecular diffusion¹⁰ Advection¹¹ Taylor dispersion¹² Species¹³ Chaotic¹⁴ Axial¹⁵ Passive micromixers¹⁶ Active micromixers¹⁷ Sodium hydroxide¹⁸ Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics

صورت $Re = \rho u D_h / \mu$ و $Sc = \mu / \rho D$ بر مبنای مجرای ورود آب تعریف شده‌اند؛ u سرعت متوسط جریان سیال و D_h قطر هیدرولیکی کانال اختلاط است [15,3,1].

3- تعریف مسأله و اعتبار سنجی

3-1- مدل فیزیکی

شکل 1 نمایی از میکروکانال مارپیچ سه‌بعدی با واحدهای تکرارشونده L شکل مورد مطالعه را نشان می‌دهد. کانال مارپیچ اصلی در یک اتصال T شکل به ناحیه ورودی جریان متصل شده است. هر واحد اختلاط توسط پارامترهای L_1 ، L_2 ، h و w مشخص می‌شود. عرض کانال اختلاط (w) در تمام هندسه‌های بررسی شده برابر با مقدار ثابت 200 میکرومتر و دو برابر عرض کانال‌های ورودی جریان، h ارتفاع میکروکانال است. از آن‌جا که واحدهای L شکل سازنده میکرومیکسر روی دو صفحه موازی قرار دارند، ارتفاع کلی میکرومیکسر برابر $2h$ است. شکل 2 طول میکرومیکسر (L_z) و طول کلی مسیر جریان (L_t) در واحدهای اختلاط تکرارشونده را نشان می‌دهد. طول کلی مسیر جریان در کانال اختلاط میکرومیکسرهای مورد مطالعه مقداری ثابت و برابر 10000 میکرومتر در نظر گرفته شده است. طول میکرومیکسر (L_z) طبق رابطه (7) قابل محاسبه است.

$$L_z = n(L_2 - w) + w \quad (7)$$

در آن n تعداد واحدهای L شکل میکروکانال است.

براساس ابعاد و پارامترهای هندسی تأثیرگذار بر مسأله سه پارامتر هندسی بی‌بعد نسبت طول (LR)، طول نرمال (ZR) و نسبت ابعاد (AR) به ترتیب به صورت روابط (8-10) تعریف و استفاده شده‌اند. هندسه هر میکروکانال به کمک این سه پارامتر بی‌بعد مشخص می‌شود.

$$LR = \frac{L_1}{L_2} \quad (8)$$

$$ZR = \frac{L_2}{w} \quad (9)$$

$$AR = \frac{h}{w} \quad (10)$$

دو سیال مخلوط‌شدنی آب و اتانول در فرآیند اختلاط به کار رفته‌اند؛ که تحت شرایط عادی مخلوط ایده‌آل تشکیل می‌دهند و با یکدیگر واکنش نمی‌دهند. خواص ترموفیزیکی هر دو سیال در دمای 20°C اندازه‌گیری شده‌اند و دارای مقداری ثابت هستند [14]. در جدول 1 خواص این دو سیال آورده شده است. جریان با توزیع سرعت توسعه‌یافته وارد کانال‌های ورودی جریان شده و با فشار نسبی استاتیکی صفر از خروجی میکرومیکسر خارج شده است. شرط مرزی عدم لغزش و نفوذناپذیری روی دیوارهای کانال حاکم است. کسر جرمی گونه 1 (C_1) در یکی از ورودی‌ها برابر 1 و در ورودی دیگر برابر 0 اعمال شده است.

3-2- معیار اختلاط و همگرایی

برای مقایسه عملکرد اختلاط هندسه‌های مختلف لازم است کیفیت اختلاط

جدول 1 خواص سیالات در دمای 20°C

سیال	لزجت ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	چگالی (kgm^{-3})	ضریب پخش مولکولی (m^2s^{-1})
آب	0.0009	999.8	10^{-9}
اتانول	0.0012	789	10^{-9}

در رفتار اختلاط دو جریان سیال تراکم‌ناپذیر با چگالی و لزجت متفاوت در یک میکروکانال دوبعدی مجهز به استوانه نوسان‌کننده و پره نوسان‌کننده و دوران‌کننده، در محدوده‌ای از نسبت لگاریتمی لزجت و نسبت چگالی، در فرکانس‌های مختلف تحریک‌کننده پرداخته‌اند. آن‌ها نتیجه گرفته‌اند که اختلاط دو سیال با چگالی و لزجت یکسان یک حالت ایده‌آل است و آن را مورد بررسی قرار داده‌اند، همچنین افزایش اندازه پره منجر به بهبود اختلاط شده است.

با مرور بر پیشینه تحقیق، کاناریس و همکاران [6] میکرومیکسرهای با طرح‌های مختلف را بررسی کرده‌اند، و بهترین عملکرد اختلاط را به میکرومیکسر L شکل نسبت داده‌اند. ویجایندران و همکاران [13] عملکرد بهتر L میکرومیکسر را نسبت به کانال مستقیم ساده گزارش کرده‌اند. در میکرومیکسرهای غیرفعال، هندسه میکرومیکسر نقش اساسی در بهبود اختلاط دارد. در این مقاله سعی شده برای ارزیابی بهترین شرایط اختلاط در میکرومیکسر L شکل و یافتن مقداری از پارامترهای هندسی در آن‌ها بتواند عملکرد اختلاط را بهبود بخشد؛ به بررسی میزان اثرگذاری تعداد واحدهای L شکل، تغییرات ارتفاع و نسبت طول شاخه‌های واحدهای سازنده میکروکانال بر فرآیند اختلاط پرداخته شود که تاکنون گزارش نشده است.

2- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات بقایی حاکم به کمک کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت¹ بر پایه تقریب حجم محدود در حالت دقت مضاعف حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی از روش بالادست مرتبه دوم² استفاده شده و الگوریتم سیمپل³ برای کوپل فشار و سرعت به کار رفته است. چگالی مخلوط در یک مخلوط که شامل دو یا چند سیال است به کمک رابطه (1) به دست می‌آید.

$$\rho = \frac{1}{\sum_i \frac{C_i}{\rho_i}} \quad (1)$$

در آن C_i کسر جرمی گونه i و ρ_i چگالی گونه i است. در یک مخلوط دو سیالی کسر جرمی گونه 1 (C_1) به صورت رابطه (2) است.

$$C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (2)$$

در آن m_1 جرم گونه 1 و m_2 جرم گونه 2 است، همچنین لزجت دینامیکی یک مخلوط دو سیالی با استفاده از یک تابع نمایی به صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود [14].

$$\mu(C_1) = \mu_2 \exp\left(-C_1 \cdot \ln \frac{\mu_2}{\mu_1}\right) \quad (3)$$

در آن μ لزجت دینامیکی مخلوط، μ_1 و μ_2 به ترتیب لزجت دینامیکی گونه 1 و گونه 2 است. در این مقاله گونه 1 اتانول و گونه 2 آب است. در مطالعه حاضر جریان به صورت لزج، هم‌دما، تراکم‌ناپذیر، آرام و دائم در نظر گرفته شده است. معادلات پیوستگی، بقای مومنتوم و انتقال جرم به ترتیب به صورت روابط (4-6) است.

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} \vec{V}) \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} C) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} C) \quad (6)$$

در آن‌ها ρ چگالی، $\vec{V}$ بردار سرعت، μ لزجت دینامیکی، C کسر جرمی و D ضریب پخش مولکولی است. عدد رینولدز و عدد اشمیت به ترتیب به

¹Fluent

²Second Order Upwind

³SIMPLEC

انحراف معیار در بین داده‌های موجود است؛ انحراف معیار برای سیالات کاملاً مخلوط‌نشده (در مقاطع ورودی جریان) بیشترین مقدار و برای سیالات کاملاً مخلوط‌شده کمترین مقدار را دارد. مقدار کمتر از 10^{-6} برای باقی‌مانده شاخص اختلاط به‌عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است.

3-3- حل مستقل از شبکه

در حل عددی معادلات نمی‌توان پخش عددی² را به طور کامل حذف کرد، اما می‌توان به کمک روش‌های مشخصی کاهش داد [17]. یکی از راه‌های کاهش خطاهای ناشی از انتخاب شبکه محاسباتی ریزتر کردن آن است. این موضوع به ویژه در قسمت‌هایی از جریان که تغییرات شدید وجود دارد بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. ریزتر کردن شبکه برای دستیابی به حل دقیق‌تر معادلات سبب افزایش چشمگیر مدت زمان اجرای برنامه خواهد شد. ریز کردن شبکه تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که تغییر کیفیت شبکه تأثیری بر نتایج کلیدی ایجاد نکند. در این حالت ریزتر کردن شبکه امری غیرضروری بوده و شبیه‌سازی مستقل از شبکه است.

جهت دستیابی به نتایج دقیق به‌ویژه در تحلیل اختلاط، مش‌بندی با کیفیت بالا ضروری است. مش‌بندی با عناصر شش وجهی سازمان‌یافته نسبت به مش‌بندی بدون سازمان علاوه بر دقت و سادگی برای تحلیل اثر هندسه بر اختلاط، بهتر می‌تواند گرادینان‌های شدید در گوشه‌ها را با تعداد گره کافی کنترل کند. در شکل 3 اثر تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی بر شاخص اختلاط در یک L میکرومیکسر با پارامترهای طراحی $AR=1$ ، $LR=1$ و $ZR=0.333$ به ازای $Re=200$ نشان داده شده است. در قسمت شرح علائم شکل 3 اعداد سمت چپ و سمت راست به ترتیب نشان‌دهنده تعداد سلول‌های محاسباتی در مقطع عرضی کانال اختلاط و تعداد کل سلول‌های محاسباتی است. با توجه به شکل 3 مقادیر شاخص اختلاط در دو شبکه محاسباتی با تعداد کل سلول‌های 3392000 و 4514752 نزدیک به یکدیگر بوده است (اختلاف کمتر از 5.5%). برای دستیابی به محاسبات دقیق‌تر از آن‌جا که تغییرات جریان در جهت عرضی میکروکانال بیشتر از قسمت‌های مستقیم کانال است پیشنهاد می‌شود در جهت عرضی از سلول‌های محاسباتی ریزتر و در قسمت‌های مستقیم کانال اختلاط از سلول‌های درشت‌تر در شبکه‌بندی استفاده شود. مقادیر شاخص اختلاط در حالت شبکه‌بندی 44_3471248 (اندازه سلول‌ها در جهت طولی دو برابر اندازه سلول‌ها در جهت عرضی کانال)، انطباق خوبی با حالت 44_4514752 دارد (اختلاف کمتر از 0.7%)، بنابراین شبکه با تعداد کل سلول‌های محاسباتی 3471248 جهت صرفه‌جویی در زمان اجرای برنامه کفایت می‌کند. شکل 4 نمایی از شبکه محاسباتی سازمان‌یافته در L میکرومیکسر را نشان می‌دهد.

4-3- اعتبارسنجی

از مسأله مورد بررسی گالتی و همکاران [18] برای حصول اطمینان از صحت شبیه‌سازی استفاده شده است. گالتی و همکاران [18] اثر شرایط مرزی جریان ورودی بر میزان اختلاط در T میکرومیکسر نشان داده شده در شکل 5 را به طور عددی بررسی کرده‌اند؛ به این صورت که یک بار جریان با توزیع سرعت یکنواخت (حالت non-FD) و بار دیگر با توزیع سرعت توسعه‌یافته (حالت FD) وارد کانال‌های ورودی جریان شده است. شکل 6 مقدار شاخص اختلاط در اعداد رینولدز مختلف برای دو حالت non-FD و FD در دو مقطع مختلف ($y=500 \mu m$ و $y=-3000 \mu m$)، در کار حاضر و کار گالتی و

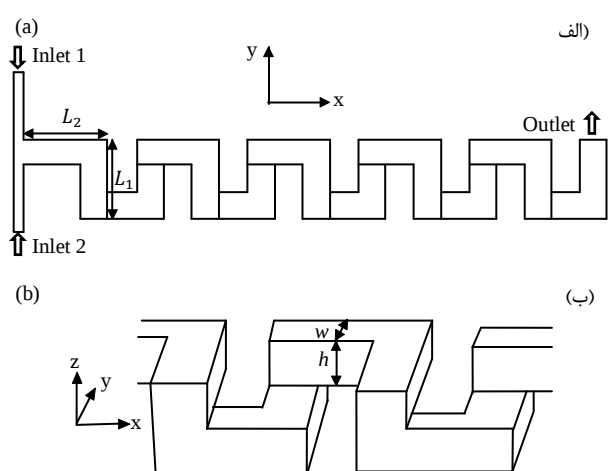


Fig. 1 L-micromixer: a- Two-dimensional view (xy plane), b- Three-dimensional view.

شکل 1 میکرومیکسر: الف- نمای دوبعدی (صفحه xy)، (ب- نمای سه‌بعدی)

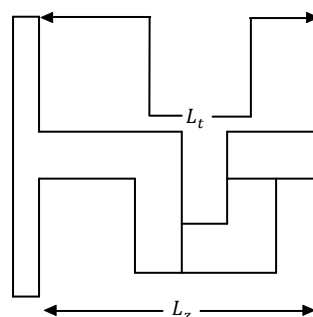


Fig. 2 Geometric parameters of the length of micromixer (L_z) and the total length of flow path (L_t)

شکل 2 پارامترهای هندسی طول میکرومیکسر (L_z) و طول کلی مسیر جریان (L_t)

تعیین گردد. در بیشتر مطالعات تجربی و عددی یک شاخص اختلاط¹ بر پایه انحراف معیار کسر جرمی از کسر جرمی متوسط روی سطح مقطع تعریف می‌شود. در مطالعه حاضر انحراف معیار گونه‌ها در مقاطع عرضی کانال اختلاط، در جهت عمود بر جهت جریان اصلی مشخص شده است. انحراف معیار بر پایه مفهوم شدت تفکیک است؛ که بر پایه انحراف کسر جرمی از کسر جرمی متوسط است. انحراف معیار کسر جرمی در یک مقطع عرضی عمود بر جهت جریان با سلول‌های محاسباتی یکنواخت به صورت رابطه (11) تعریف شده است [16]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (c_i - c_m)^2} \quad (11)$$

که در آن N تعداد گره‌های محاسباتی در مقطع عرضی، c_i کسر جرمی در گره محاسباتی i و c_m کسر جرمی متوسط یکی از گونه‌ها در اختلاط کامل و برابر با 0.5 است. شاخص اختلاط (M)، به منظور ارزیابی درجه اختلاط دو سیال در مقطع عرضی عمود بر جهت جریان اصلی مطابق رابطه (12) محاسبه شده است [16].

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \quad (12)$$

مقدار M همواره در محدوده $0 \leq M \leq 1$ قرار دارد. مقدار بزرگ‌تر M نشان‌دهنده عملکرد اختلاط بهتر است. در رابطه (12)، $\sigma_{\max}$ بیشترین

²Numerical diffusion

¹ Mixing index

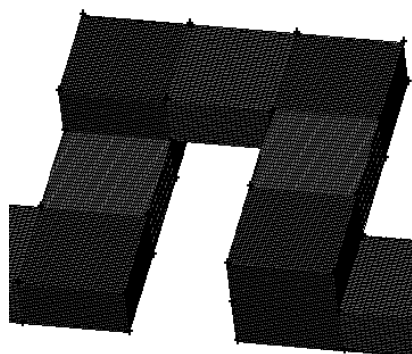


Fig. 4 Structured grid in L-micromixer

شکل 4 شبکه‌بندی باسازمان در L میکرومیکسر

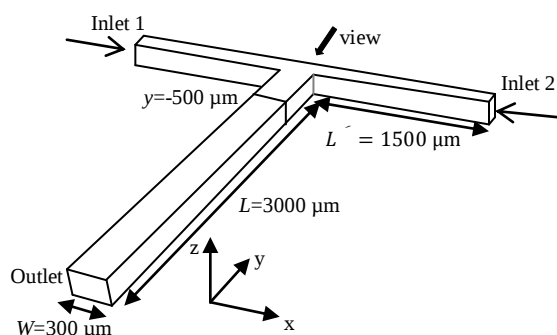
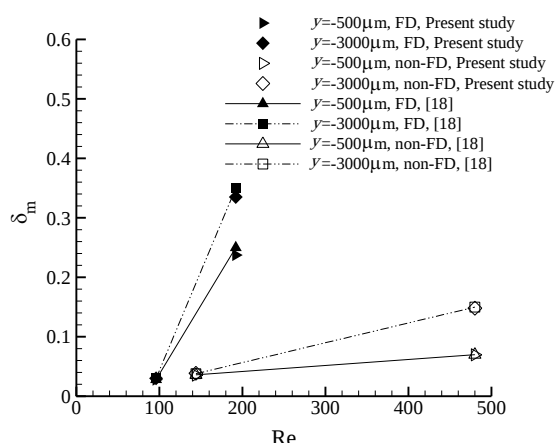


Fig. 5 Schematic of T-micromixer [18]

شکل 5 شماتیک T میکرومیکسر [18]

شاخص اختلاط در همه میکرومیکسرها تقریباً ثابت و بدون تغییر مانده است. بیشترین مقدار شاخص اختلاط در دو میکرومیکسر با 4 و 8 واحد L شکل ($ZR=0.276$ و $ZR=0.148$)، با افزایش عدد رینولدز به بیشترین مقدار شاخص اختلاط در هندسه با 10 واحد L شکل (شاخص اختلاط 88% در خروجی میکروکانال) نزدیک شده است. دو سیال در اعداد رینولدز بالا به سرعت در قسمت‌های ابتدایی کانال اختلاط در دو میکرومیکسر با تعداد 8 و


 Fig. 6 Comparison of changes of mixing index as a function of Reynolds number at the $y = -500 \mu\text{m}$ and $y = -3000 \mu\text{m}$ cross sections in mixing channel in present study with Galletti et al. [18] results

شکل 6 مقایسه تغییرات شاخص اختلاط به صورت تابعی از عدد رینولدز در مقاطع عرضی $y = -3000 \mu\text{m}$ و $y = -500 \mu\text{m}$ در کانال اختلاط در مطالعه حاضر با نتایج گالتی و همکاران [18]

همکاران [18] را نشان می‌دهد؛ بیشینه اختلاف نتایج 1.5% بوده است.

4- بحث و بررسی نتایج

مطالعه عملکرد یک L میکرومیکسر با مقادیر مختلف پارامترهای هندسی بی‌بعد طول نرمال (ZR)، نسبت طول (LR) و نسبت ابعاد (AR) انجام شده است. شاخص اختلاط به‌عنوان پارامتری برای مقایسه عملکرد اختلاط هندسه‌های مختلف انتخاب شده است. تحلیل‌ها به ازای عدد اشمیت 900.18 و چهار عدد رینولدز 50، 100، 150 و 200 انجام شده‌اند.

1-4- تغییرات طول نرمال (ZR)

اثر تغییرات طول نرمال بر هندسه میکروکانال در شکل 7 نشان داده شده است. شکل 8 تغییرات شاخص اختلاط در مقاطع عرضی L میکرومیکسر با مقادیر مختلف طول کلی مسیر جریان (L_t)، به ازای چهار مقدار طول نرمال 0.077، 0.148، 0.276 و 0.333 در اعداد رینولدز 50، 100، 150 و 200 را نشان می‌دهد. به طور کلی با افزایش طول نرمال و در نتیجه آن افزایش تغییر جهت‌های جریان که سبب افزایش سطح تماس دو سیال می‌شوند، عملکرد اختلاط L میکرومیکسر بهبود یافته است. در $Re=50$ شاخص اختلاط در امتداد میکروکانال با طول نرمال 0.077 به دلیل جابه‌جایی نامنظم ضعیف به تدریج افزایش یافته است، همچنین افت کمی که در مقدار شاخص اختلاط در برخی از مقاطع میکروکانال‌ها مشاهده می‌شود به دلیل اختلاط ضعیف رخ داده است (شکل 8-الف). در اعداد رینولدز پایین نیروهای لزجی، نیروی غالب وارد بر جریان سیال بوده و ساز و کار غالب در انتقال جرم، پدیده پخش مولکولی است. با افزایش تغییر جهت‌های جریان و در نتیجه آن افزایش قدرت جابه‌جایی نامنظم فرآیند اختلاط به طور چشمگیری بهبود می‌یابد [19]. استفاده از هندسه‌های افزایش‌دهنده اختلاط در اعداد رینولدز کم ضروری است. همواره شیب تغییرات شاخص اختلاط در قسمت‌های ابتدایی کانال اختلاط در دو میکرومیکسر با تعداد 8 و 10 واحد L شکل ($ZR=0.276$ و $ZR=0.333$)، بیشتر از دو میکروکانال دیگر بوده، این اختلاف با افزایش عدد رینولدز بیشتر شده است. در $Re=150$ شاخص اختلاط در مقطع خروجی میکروکانال با $ZR=0.276$ بیشترین مقدار را داشته و افزایش طول نرمال به مقدار $ZR=0.333$ تأثیری بر مقدار شاخص اختلاط در خروجی نداشته است؛ و طول کلی مسیر جریان 7000 میکرومتر برای دستیابی به بیشترین مقدار شاخص اختلاط کفایت می‌کند.

به ازای $Re=200$ و $Re=150$ ، از مقطع مشخصی از کانال مارپیچ مقدار

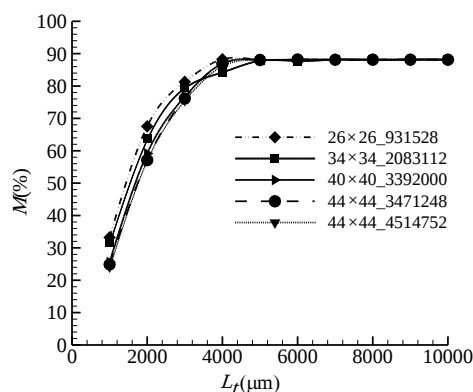


Fig. 3 Determination of grid independency solution

شکل 3 تعیین حل مستقل از شبکه‌بندی

همراه است. افت فشار بالا مستقیم به اتلاف انرژی زیاد مربوط است؛ که در فرآیند اختلاط واقعی نامطلوب است [14]. تغییرات افت فشار به صورت تابعی از عدد رینولدز در هندسه‌های با طول نرمال مختلف در شکل 10 نشان داده شده است. افت فشار به صورت غیرخطی با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است. شیب تغییرات افت فشار با افزایش عدد رینولدز به دلیل ایجاد جابه‌جایی نامنظم قوی‌تر در L میکرومیکسر زیادتر شده است. افزایش تعداد تغییر جهت‌ها و زانویی‌ها در میکروکانال (افزایش طول نرمال)، افت فشار را افزایش داده است؛ اما این موضوع در اعداد رینولدز پایین صادق نیست.

4-2- تغییرات نسبت طول (LR)

نمایی از سه L میکرومیکسر طراحی‌شده با نسبت طول 0.5، 1 و 1.93 در شکل 11 آورده شده است. نسبت ابعاد در همه این هندسه‌ها برابر یک و تعداد واحدهای L شکل در هر سه میکروکانال یکسان فرض شده‌اند. طول نرمال برای عدم دخالت اثر تغییرات تعداد واحدهای سازنده بر عملکرد اختلاط با تغییر نسبت طول تغییر کرده است. مقدار پارامتر هندسی طول نرمال به ازای مقادیر نسبت طول 0.5، 1 و 1.93 به ترتیب برابر با 0.5، 0.333 و 0.25 محاسبه شده است. شکل 12 تغییرات شاخص اختلاط در مقاطع عرضی L میکرومیکسرهایی با نسبت طول مختلف به ازای اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. در $Re=50$ شاخص اختلاط در خروجی هر سه میکروکانال با هم برابر بوده و در مقاطع عرضی پیش از آن عملکرد اختلاط میکرومیکسر با نسبت طول 1 از دو میکروکانال دیگر بهتر بوده است (شکل 12-الف). به بیان دیگر در اعداد رینولدز پایین با توجه به غالب بودن پدیده پخش مولکولی، زمانی که محل قرارگیری زانویی‌ها در وسط واحدهای L شکل باشد، فواصل تغییر جهت‌های جریان در امتداد کانال یکسان خواهد بود. این امر سبب تقویت جریان عرضی به طور منظم در تمام طول مسیر جریان شده و بازده اختلاط را در امتداد میکروکانال نسبت به دو میکروکانال دیگر افزایش داده است. در $Re=100$ عملکرد اختلاط دو میکروکانال با نسبت طول 0.5 و 1.93 به عملکرد اختلاط میکرومیکسر با نسبت طول 1 نزدیک شده است (شکل 12-ب). در $Re=150$ در مقطع عرضی با طول کلی مسیر جریان 5000 میکرومتر بیشترین مقدار ممکن شاخص اختلاط حاصل می‌شود و تغییر پارامتر نسبت طول تأثیری بر شاخص اختلاط ندارد؛ بنابراین می‌توان طول کلی مسیر جریان میکروکانال را به 5000 میکرومتر کاهش داد (شکل 12-ج). با کاهش طول کلی مسیر جریان میکروکانال در $Re=150$ به مقدار کمتر از 5000 میکرومتر، دو میکرومیکسر با نسبت طول 0.5 و 1.93 عملکرد اختلاط کمی بهتری نسبت به میکرومیکسر با نسبت طول واحد دارند. در نهایت به‌ازای $Re=200$ رفتار اختلاط در هر سه میکروکانال تقریباً مشابه بوده است (شکل 12-د). در اعداد رینولدز بالا تغییرات نسبت طول واحدهای L شکل سازنده میکروکانال تأثیر چندانی بر عملکرد اختلاط نمی‌گذارد. به طور کلی می‌توان دریافت که به‌ازای اعداد رینولدز بالا در L میکرومیکسرها نوع و تعداد تغییر جهت‌های تند 90 درجه جریان و به تبع آن اثرات نیروهای گریز از مرکز دارای اهمیت است؛ در حالی که محل این تغییر جهت‌ها در واحدهای سازنده میکروکانال چندان حائز اهمیت نیست. کمتر بودن مقدار طول میکرومیکسر (L_z) نشان‌دهنده تراکم بیشتر میکروکانال است. تراکم میکرومیکسرها نوان یکی از مهم‌ترین مزایای میکرو تجهیزات در کاربردهای اختلاط [22] و یا انتقال حرارت [23] است. از آن‌جا که طول میکرومیکسر (L_z) در میکروکانال با نسبت طول 1.93 کمتر است؛ بنابراین

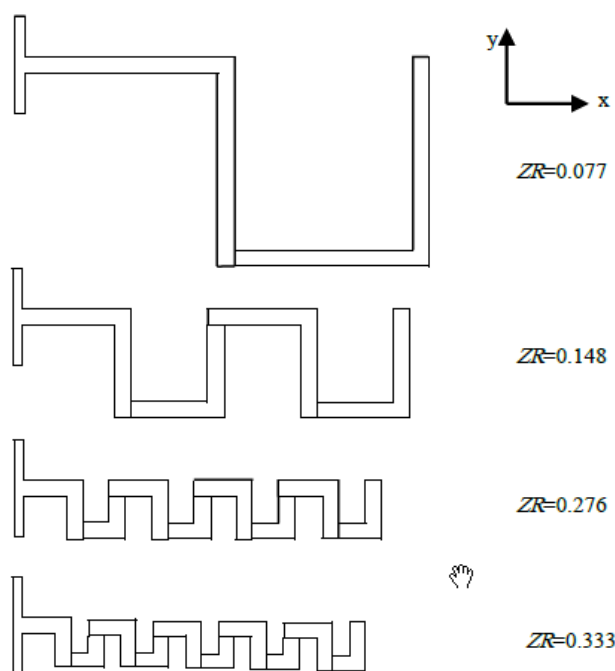


Fig. 7 Two dimensional view of microchannels with different normalized length (ZR)

شکل 7 نمای دوبعدی میکروکانال‌های با طول نرمال (ZR) مختلف

10 واحد L شکل با هم مخلوط شده‌اند و شاخص اختلاط در مقطع عرضی با طول کلی مسیر جریان 5000 میکرومتر در این دو میکروکانال به بیشترین مقدار (88%) رسیده است (شکل 8-د). در $Re=200$ منحنی داده‌های شاخص اختلاط در دو میکروکانال با 8 و 10 واحد سازنده، به جز در نواحی ابتدایی کانال اختلاط بسیار به یکدیگر نزدیک بوده‌اند و عملکرد اختلاط مشابهی را داشته‌اند؛ و مقدار شاخص اختلاط در مقطع خروجی سه L میکرومیکسر با 4، 8 و 10 واحد سازنده یکسان و 9% بیشتر از شاخص اختلاط در مقطع خروجی میکرومیکسر با 4 واحد L شکل بوده است. L میکرومیکسر با $ZR=0.077$ ، به دلیل کاهش تعداد زانویی‌ها و در نتیجه آن کاهش قدرت جابه‌جایی نامنظم، قابلیت دستیابی به شاخص اختلاط به نسبت بالا (حتی در اعداد رینولدز بالا) را نداشته است. با توجه به شکل‌های 8-ج و 8-د به ازای $ZR=0.333$ با افزایش مقدار L_z شاخص اختلاط همواره سیر صعودی نداشته است. حسین و همکاران [20] و الم و کیم [21] نیز در بررسی عملکرد میکرومیکسرها به ازای اعداد رینولدز بالا نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند. به این صورت که مقدار شاخص اختلاط تا زمان رسیدن به اختلاط کامل همواره سیر صعودی نداشته است. روند تغییرات شاخص اختلاط مربوط به هندسه میکروکانال است و ممکن است با تغییر هندسه میکروکانال به یک طرح نامتناوب اختلاط افزایش یابد.

کیفیت اختلاط در خروجی میکرومیکسر نماینده عملکرد اختلاط کلی میکروکانال است. شکل 9 تغییرات شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع خروجی چهار هندسه میکروکانال با طول نرمال مختلف را نشان می‌دهد. به طور کلی در هر چهار هندسه با افزایش عدد رینولدز شاخص اختلاط در مقطع خروجی میکروکانال افزایش یافته است. در اعداد رینولدز بالا تغییرات طول نرمال تأثیر کمتری بر شاخص اختلاط در مقطع خروجی داشته است.

کیفیت اختلاط بسیار خوب در یک میکرومیکسر معمولاً با افت فشار بالا

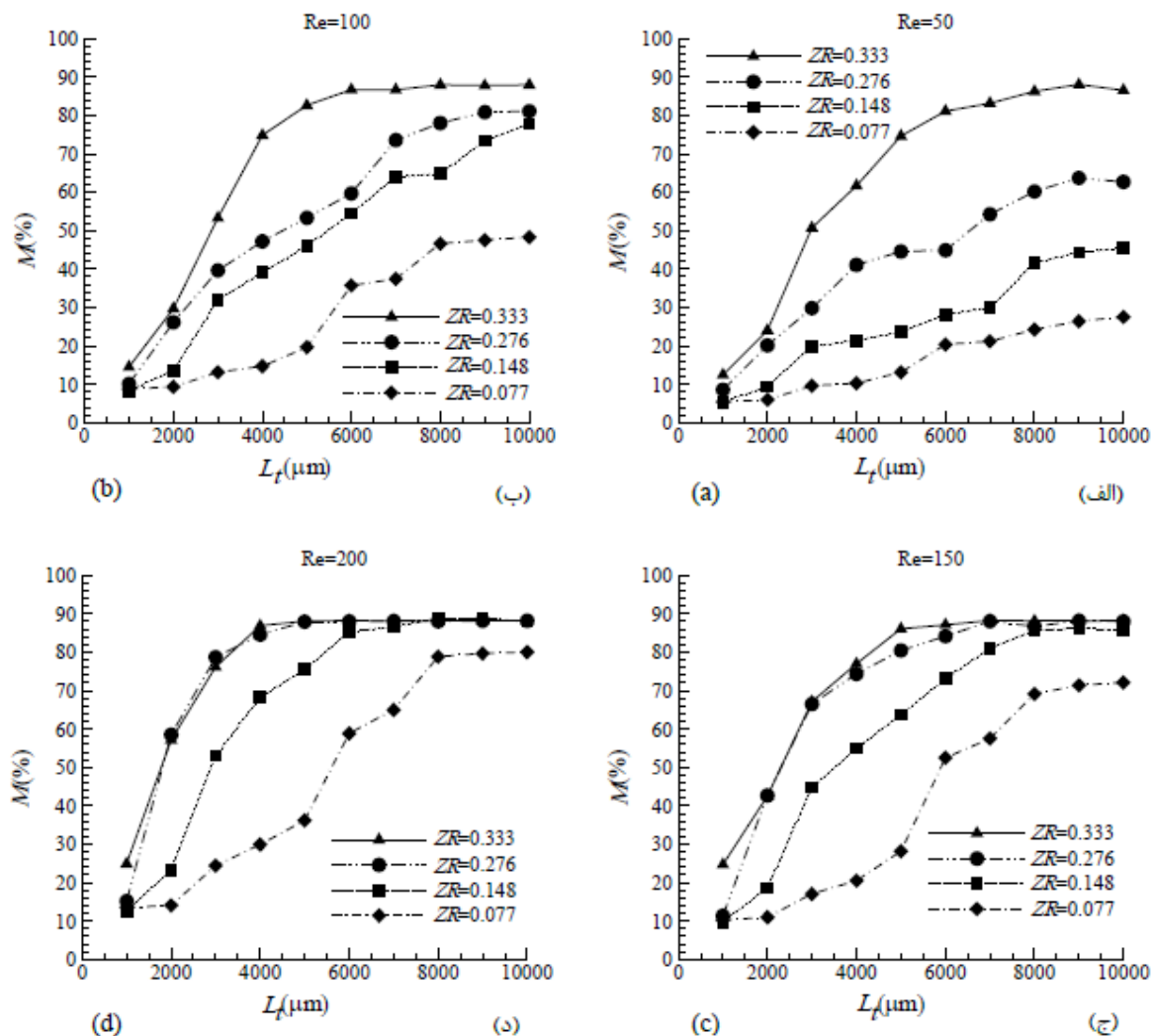


Fig. 8 Mixing index as a function of the total length of flow path (L_f) in L-mixers with $LR=1$, $AR=1$, and different normalized length (ZR): a) $Re=50$, b) $Re=100$, c) $Re=150$, and d) $Re=200$

شکل 8 شاخص اختلاط به صورت تابعی از طول کلی مسیر جریان (L_f) در L-میکرومیکسرهایی با $LR=1$ ، $AR=1$ و طول نرمال (ZR) مختلف، الف- $Re=50$ ، ب- $Re=100$ ، ج- $Re=150$ ، د- $Re=200$

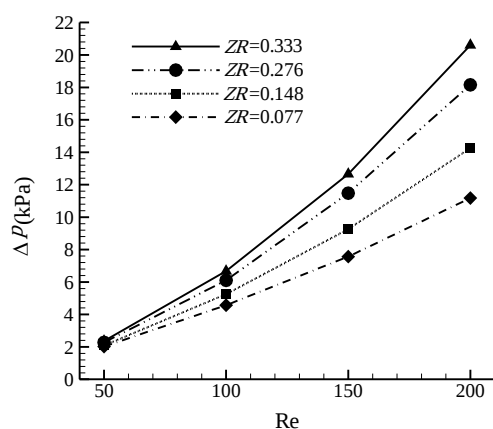


Fig. 10 Pressure drop vs. Reynolds number in L-mixers with $LR=1$, $AR=1$, and different normalized length (ZR).

شکل 10 افت فشار نسبت به عدد رینولدز در L-میکرومیکسرهایی با $AR=1$ ، $LR=1$ و طول نرمال (ZR) مختلف

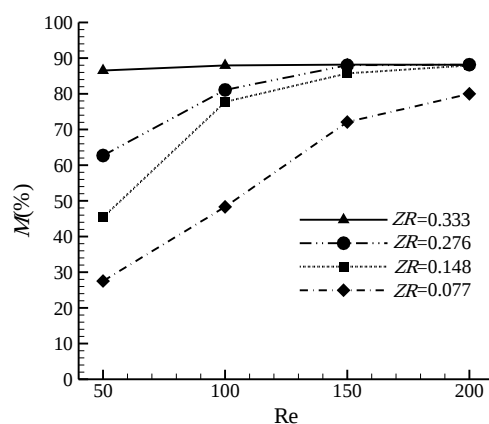


Fig. 9 Mixing index vs. Reynolds number at the outlet section of L-mixers with $LR=1$, $AR=1$, and different normalized length (ZR)

شکل 9 شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع خروجی L-میکرومیکسرهایی با $AR=1$ ، $LR=1$ و طول نرمال (ZR) مختلف

میکرومیکسرهایی با مقادیر نسبت ابعاد 0.5، 1 و 1.5 بررسی شده است. پارامترهای طراحی نسبت طول و طول نرمال در این سه میکرومیکسر یکسان و به ترتیب برابر $LR=1$ و $ZR=0.333$ در نظر گرفته شده است. شکل 15 نمایی از سه هندسه مورد مطالعه در این قسمت را نشان می‌دهد. تغییرات شاخص اختلاط در امتداد کانال‌های مارپیچ با نسبت ابعاد مختلف در چهار عدد رینولدز در شکل 16 ارائه شده است. در $Re=50$ میکروکانال با نسبت ابعاد 0.5 به جز در نواحی ابتدایی کانال اختلاط، عملکرد اختلاط ضعیف‌تری نسبت به دو میکروکانال دیگر داشته است (شکل 16-الف)؛ همچنین تغییرات نوسانی شاخص اختلاط در برخی از مقاطع به دلیل جابه‌جایی نامنظم ضعیف و در نتیجه اختلاط ضعیف رخ داده است. در اعداد رینولدز بالاتر از $Re=50$ ، شاخص اختلاط از مقطع مشخصی از کانال اختلاط در هر سه میکروکانال مقدار ثابت و یکسانی داشته و در نواحی پیش از این مقطع اختلاط در میکروکانال با نسبت ابعاد 0.5 بهتر صورت گرفته است. طول کانال مورد نیاز برای اختلاط از مهم‌ترین کمیت‌ها برای بررسی هندسه است. میکرومیکسری که در کوتاه‌ترین طول بتواند به درجه اختلاط مورد نظر دست یابد، مناسب است [26,25]. در اعداد رینولدز 100، 150 و 200 به ترتیب از طول کلی مسیر جریان 7000، 6000 و 5000 میکرومتر با پیشروی در کانال اختلاط مقدار شاخص اختلاط در هر سه هندسه با هم برابر بوده و به بیشترین مقدار ممکن رسیده است؛ بنابراین می‌توان طول کلی مسیر جریان در میکروکانال‌ها را به ازای اعداد رینولدز 100، 150 و 200 به ترتیب به 7000، 6000 و 5000 میکرومتر برای دستیابی به بیشترین مقدار شاخص اختلاط ممکن کاهش داد. نسبت سطح به حجم کانال اختلاط در L میکرومیکسرهایی طراحی شده با نسبت ابعاد 0.5، 1 و 1.5 به ترتیب برابر با 0.03، 0.02 و 0.017 بوده است. عملکرد اختلاط بهتر در میکرومیکسر با نسبت ابعاد 0.5 نسبت به دو میکروکانال دیگر می‌تواند به دلیل طول پخش کوتاه‌تر و یا بیشتر بودن نسبت سطح به حجم کانال اختلاط باشد؛ که سبب شده سطح تماس دو سیال در امتداد کانال اختلاط بیشتر تحت کشش و پیچش قرار گیرد. در $Re=200$ عملکرد اختلاط دو میکروکانال با نسبت ابعاد 1 و 1.5 بسیار به یکدیگر نزدیک بوده است (شکل 16-د).

در شکل 17 تغییرات افت فشار به صورت تابعی از پارامتر بی‌بعد نسبت ابعاد کانال مارپیچ به ازای اعداد رینولدز مختلف ارائه شده است. این داده‌ها در طراحی پمپ مورد نیاز برای به حرکت در آوردن جریان در میکرومیکسر دارای اهمیت است. افت فشار در یک عدد رینولدز مشخص با افزایش نسبت ابعاد کاهش یافته، در $Re=50$ افت فشار با تغییرات نسبت ابعاد میکروکانال چندان تحت تأثیر قرار نگرفته، در حالی که در اعداد رینولدز بالا تغییرات قابل توجه افت فشار با تغییر نسبت ابعاد را نشان داده است. افت فشار در دو میکروکانال با نسبت ابعاد 1 و 1.5 به ازای اعداد رینولدز مختلف تقریباً یکسان است. افت فشار در بالاترین عدد رینولدز و کمترین نسبت ابعاد بیشترین مقدار خود را داشته است.

مقدار شاخص اختلاط در خروجی میکروکانال با نسبت ابعاد 1 به ازای هر چهار عدد رینولدز بررسی شده بیشترین مقدار را داشته و افت فشار در آن در مقایسه با میکروکانال با نسبت ابعاد 0.5 کمتر بوده است. در میکروکانال با نسبت ابعاد 1، با حفظ نسبت سطح به حجم به نسبت پایین در کانال اختلاط می‌توان احتمال گرفتگی، رسوب و از دست دادن نمونه توسط جذب بیومولکولی بر سطح میکرودستگاه را کاهش داد. در تصمیم‌گیری نهایی میکرومیکسر مناسب در فرآیند اختلاط، میکروکانال با نسبت ابعاد 1 می‌تواند انتخاب مناسبی باشد.

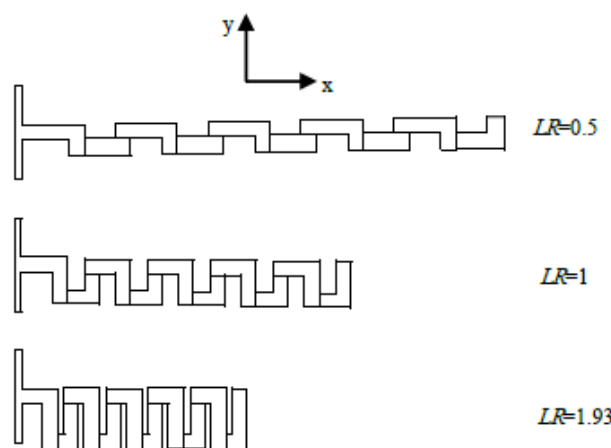


Fig. 11 Two dimensional view of microchannels with different length ratio (LR)

شکل 11 نمای دوبعدی میکروکانال‌های با نسبت طول (LR) مختلف

در اعداد رینولدز بالا میکرومیکسر با نسبت طول 1.93 می‌تواند انتخاب مناسب‌تری نسبت به دو میکرومیکسر دیگر باشد. تغییرات افت فشار نسبت به عدد رینولدز در L میکرومیکسرهایی با نسبت طول مختلف در شکل 13 گزارش شده است. افت فشار در هر سه هندسه به صورت غیرخطی با افزایش عدد رینولدز افزایش یافته است و به ازای اعداد رینولدز کمتر از $Re=150$ تقریباً یکسان بوده است. افت فشار در اعداد رینولدز بالا با افزایش نسبت طول واحدهای L شکل میکروکانال افزایش یافته است.

ورتنیسته به صورت کرل¹ بردار سرعت تعریف می‌شود و بیانگر پیچش المان‌های سیال است [24]؛ بنابراین می‌تواند به عنوان معیار مناسبی برای نمایش جریان‌های ثانویه در این بررسی مورد استفاده قرار گیرد. در شکل 14 توزیع مؤلفه x ورتنیسته (ω_x)، در مقاطع عرضی موازی با صفحه yz در سومین واحد L شکل میکروکانال با پارامترهای طراحی $AR=1$ ، $LR=0.5$ و $ZR=0.5$ به ازای $Re=50$ ارائه شده و محل قرارگیری این مقاطع به صورت نسبت s/d مشخص شده است. تعریف دو مشخصه d و s در میکروکانال در شکل 14-الف نشان داده شده است. در نواحی ابتدایی سومین واحد L شکل سازنده میکروکانال دو ناحیه مشخص با بیشترین مقدار ورتنیسته در خلاف جهت یکدیگر مشاهده می‌شود. با پیشروی در میکروکانال نواحی با بیشترین مقدار ورتنیسته در مرکز کانال از بین رفته و در دیوارهای جانبی سازنده میکروکانال دو ناحیه مشخص با بیشترین مقدار ورتنیسته در خلاف جهت یکدیگر مشاهده می‌شود. با پیشروی در میکروکانال نواحی با بیشترین مقدار ورتنیسته در مرکز کانال از بین رفته و در دیوارهای جانبی ظاهر شده است. بیشینه ورتنیسته در نزدیکی ورودی سومین واحد L شکل به سرعت کاهش یافته و مقدار ورتنیسته در قسمت مستقیم کانال در واحد L شکل کم است. در نهایت در محل تغییر جهت جریان دوباره افزایش پیدا کرده است. اختلاط دو سیال با مقدار ورتنیسته مرتبط است. در نواحی مستقیم میکروکانال ورتنیسته ضعیف‌تر بوده و در نتیجه اختلاط به کندی انجام می‌شود.

3-4- تغییرات نسبت ابعاد (AR)

اثر نسبت ارتفاع به عرض کانال اختلاط بر عملکرد اختلاط L

¹ curl

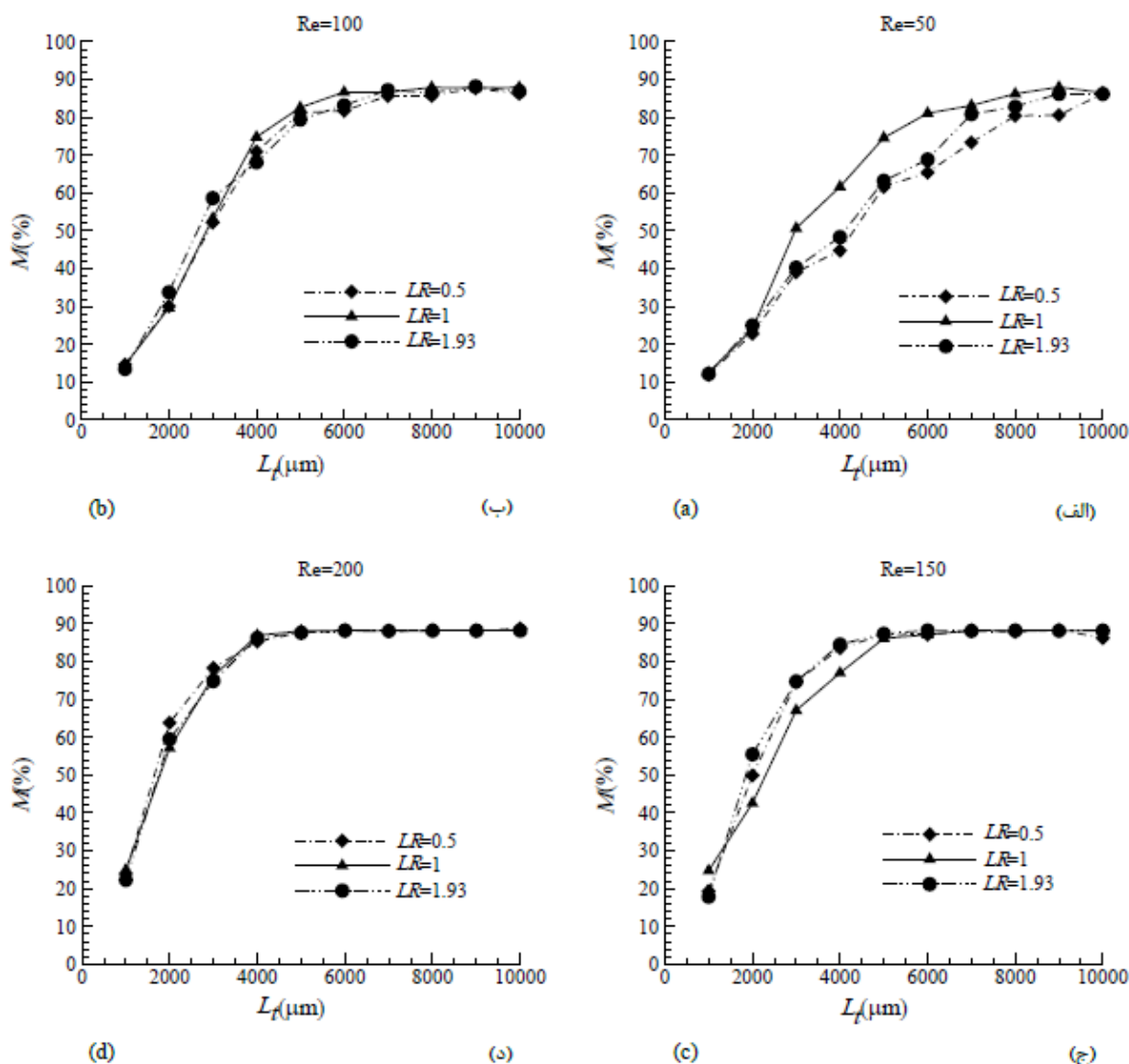


Fig. 12 Mixing index as a function of the total length of flow path (L_t) in L-micromixers with different length ratio (LR): a) $Re=50$, b) $Re=100$, c) $Re=150$, and d) $Re=200$.

شکل 12 شاخص اختلاط به صورت تابعی از طول کلی مسیر جریان (L_t) در L میکرومیکسرهایی با نسبت طول (LR) مختلف: الف - $Re=50$ ، ب - $Re=100$ ، ج - $Re=150$ و د - $Re=200$

5- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مطالعه اثر پارامترهای طراحی طول نرمال (ZR)، نسبت طول (LR) و نسبت ابعاد (AR) بر مشخصه‌های افت فشار و شاخص اختلاط در یک میکروکانال مارپیچ سه‌بعدی با واحدهای تکرارشونده L شکل می‌تواند راهنمایی‌هایی را در زمینه انتخاب طرح مناسب میکرومیکسر در اختیار مهندسان قرار دهد. وجود تغییر جهت‌های جریان در میکروکانال ساختار جریان عرضی و شاخص اختلاط در مقاطع کانال اختلاط را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش عدد رینولدز سبب افزایش شاخص اختلاط در میکروکانال می‌شود و میزان اختلاط به مقدار پارامترهای هندسی بستگی دارد. عملکرد اختلاط L میکرومیکسر با افزایش طول نرمال و در نتیجه آن افزایش تعداد زانویی‌های میکروکانال بهبود یافته است. در $Re=200$ طول کلی مسیر جریان 8000 میکرومتر در دو میکروکانال با 2 و 4 واحد سازنده و همچنین طول کلی مسیر جریان 5000 میکرومتر در دو میکروکانال با 8 و 10 واحد سازنده برای دستیابی به بیشترین مقدار شاخص اختلاط ممکن کفایت می‌کند. زمانی که طول شاخه‌های واحدهای L شکل میکروکانال در اعداد

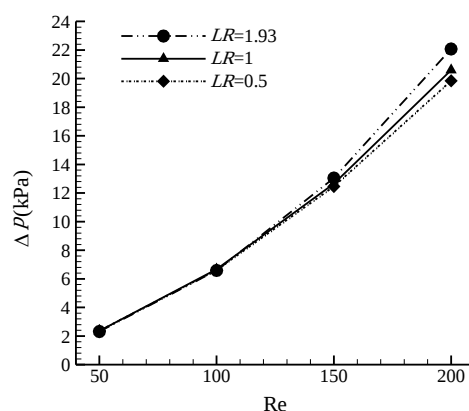


Fig. 13 Pressure drop vs. Reynolds number in L-micromixers with different length ratio (LR)

شکل 13 افت فشار نسبت به عدد رینولدز در L میکرومیکسرهایی با نسبت طول (LR) مختلف

رینولدز پایین ($Re=50$) با هم برابر باشند، اختلاط در امتداد کانال بهتر صورت می‌گیرد و در اعداد رینولدز بالا تغییرات نسبت طول میکروکانال تأثیر چندانی بر عملکرد اختلاط نمی‌گذارد. تغییر نسبت طول در اعداد رینولدز بررسی شده تأثیری بر مقدار شاخص اختلاط در مقطع خروجی میکروکانال نداشته است. تعداد 7، 6 و 5 واحد L شکل برای دستیابی به بیشترین مقدار شاخص اختلاط ممکن به ترتیب به ازای اعداد رینولدز 100، 150 و 200 در میکروکانال‌هایی با نسبت طول و نسبت ابعاد مختلف کفایت می‌کند. اختلاط در نواحی ابتدایی میکروکانال با نسبت ابعاد 0.5 در اعداد رینولدز بالاتر از $Re=50$ به دلیل نسبت سطح به حجم بیشتر کانال اختلاط بهتر انجام شده است که با پیشروی در کانال اختلاط هر سه هندسه عملکرد یکسانی داشته‌اند. به طور کلی اثرات گریز از مرکزی روی سیال در تمام میکروکانال‌های بررسی شده با افزایش سرعت جریان بیشتر شده و شدت جریان‌های ثانویه و گردابه‌های عرضی افزایش یافته است. در نتیجه قدرت جابه‌جایی نامنظم در میکرومیکسرهای و مقدار شاخص اختلاط در امتداد کانال اختلاط افزایش یافته است. مشخصه افت فشار در کانال مارپیچ تحت تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی قرار دارد. در اعداد رینولدز پایین، تغییرات پارامترهای هندسی بی‌بعد اثرات ناچیزی بر افت فشار داشته، در حالی که اثرات پارامترهای هندسی بی‌بعد در اعداد رینولدز بالاتر بر افت فشار قابل توجه است. افزایش دو پارامتر هندسی طول نرمال و نسبت طول و کاهش

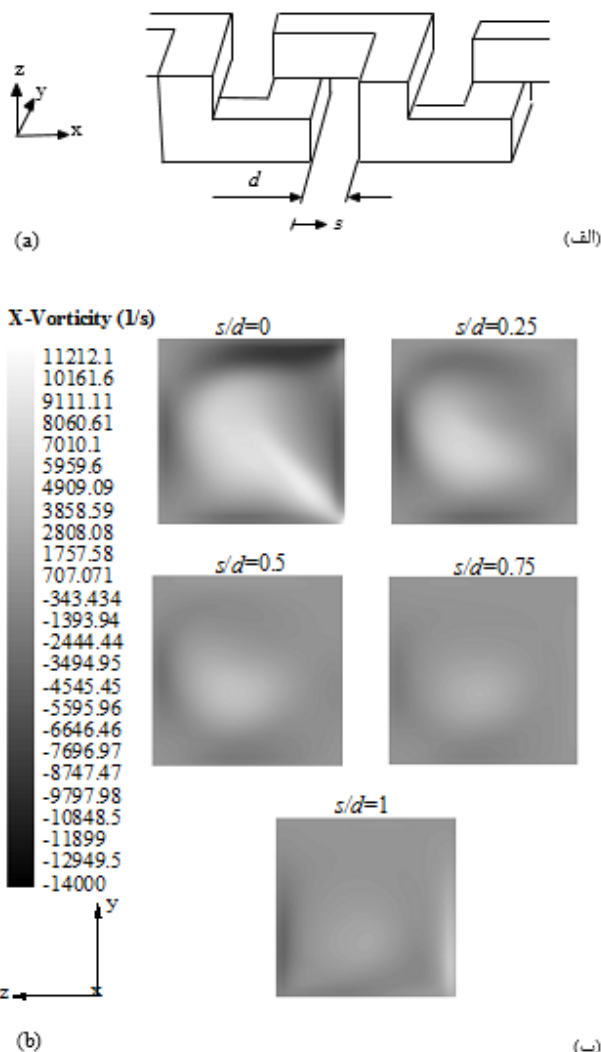


Fig. 14 (a) Definition of two characteristics d and s in L-mixer, (b) x -vorticity (ω_x) distribution in cross sections parallel with yz plane in third L-shaped unit of microchannel ($LR=0.5$, $AR=1$ and $ZR=0.5$) at $Re=50$

شکل 14 الف- تعریف دو مشخصه s و d در میکرومیکسر، ب- توزیع مؤلفه x ورتیسیت (ω_x) در مقاطع عرضی موازی با صفحه yz در سومین واحد L شکل میکروکانال ($LR=0.5$ و $AR=1$ ، $ZR=0.5$) در $Re=50$

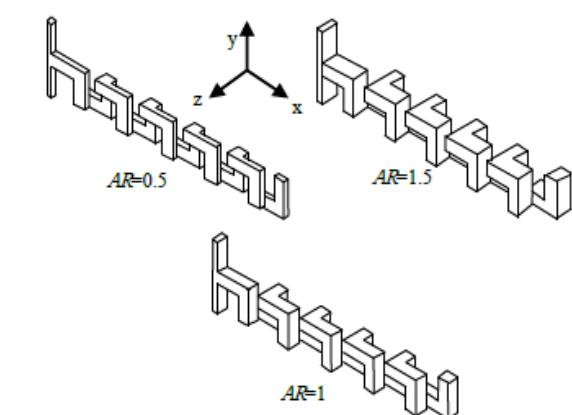
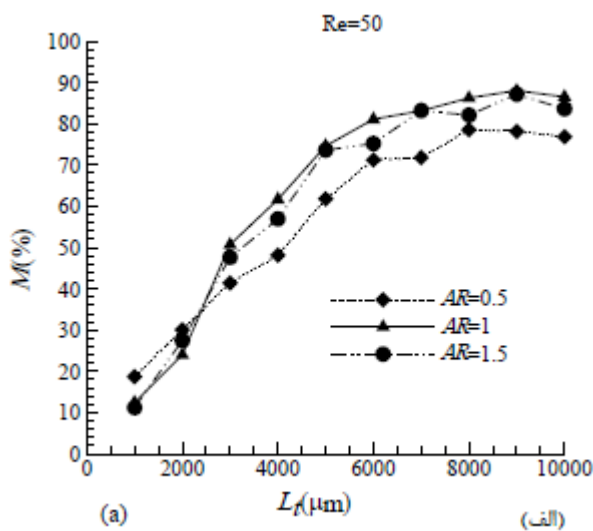
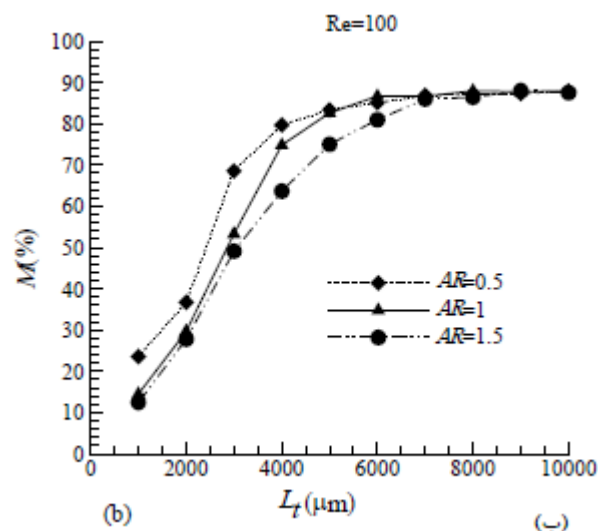


Fig. 15 View of microchannels with different aspect ratio (AR)
شکل 15 نمای میکروکانال‌های با نسبت ابعاد (AR) مختلف



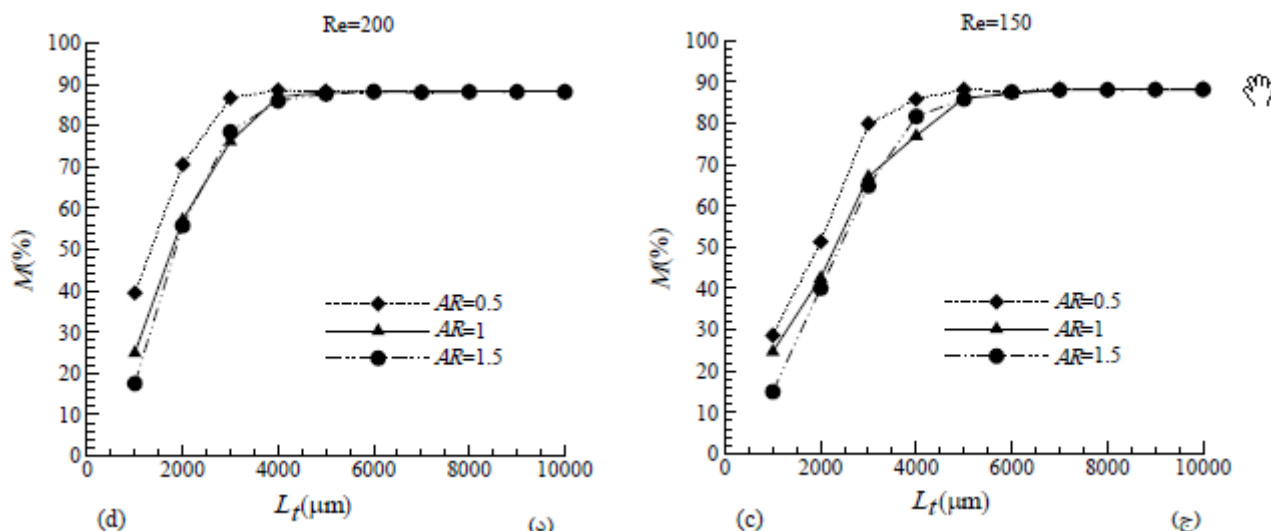


Fig. 16 Mixing index as a function of the total length of flow path (L_T) in L-mixers with different aspect ratio (AR): a) Re=50, b) Re=100, c- Re=150, and -d- Re=200.

شکل 16 شاخص اختلاط به صورت تابعی از طول کلی مسیر جریان (L_T) در L-میکرومیکسرهایی با نسبت ابعاد (AR) مختلف: الف- Re=50، ب- Re=100، ج- Re=150 و د- Re=200

6- مراجع

- [1] N. T. Nguyen, *Micromixers: Fundamentals, Design and Fabrication (Micro & nano technologies)*, pp. 1-4, Norwich, New York: William Andrew, 2008.
- [2] E. L. Paul, V. A. Atiemo-Obeng, S. M. Kresta, *Handbook of industrial mixing: science and practice*, pp. 20-24, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [3] N. T. Nguyen, Z. Wu, Micromixers—a review, *Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 2, pp. R1, 2004.
- [4] M. A. Teamah, M. K. Dawood, W. M. El-Maghlany, Double diffusive natural convection in a square cavity with segmental heat sources, *Scientific Research*, Vol. 54, No. 2, pp. 287-301, 2011.
- [5] 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, *Microelectromechanical Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 190-197, 2000.
- [6] A. G. Kanaris, I. A. Stogiannis, A. A. Mouza, S. G. Kandlikar, Comparing the mixing performance of common types of chaotic micromixers: A numerical study, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 36, No. 13, pp. 1122-1131, 2015.
- [7] A. Afzal, K.-Y. Kim, Passive split and recombination micromixer with convergent-divergent walls, *Chemical Engineering*, Vol. 203, No. 1, pp. 182-192, 2012.
- [8] L. Wang, W. Wu, X. Li, Numerical and experimental investigation of mixing characteristics in the constructal tree-shaped microchannel, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 67, No. 1, pp. 1014-1023, 2013.
- [9] N. Solehati, J. Bae, A. P. Sasmito, Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure, *Computers & Fluids*, Vol. 96, No. 1, pp. 10-19, 2014.
- [10] S. Baheri Islami, S. Ahmadi, Numerical investigation on the effect of various geometries on mixing efficiency of passive micromixers with oscillatory inlet velocities, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 27-34, 2014. (فارسی)
- [11] R. Shamsoddini, M. Sefid, R. Fatehi, Numerical investigation of the mixing performance of two-blade twin and circular mixers by using an improved Weakly Compressible Smoothed Particle Hydrodynamics, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 11, 2015. (فارسی)
- [12] 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. (فارسی)
- [13] R. A. Vijayendran, K. M. Motsegood, D. J. Beebe, D. E. Leckband, Evaluation of a three-dimensional micromixer in a surface-based biosensor, *Langmuir*, Vol. 19, No. 5, pp. 1824-1828, 2003.
- [14] Y. Lin, Numerical characterization of simple three-dimensional chaotic micromixers, *Chemical Engineering*, Vol. 277, No. 1, pp. 303-311, 2015.
- [15] 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.
- [16] A. Soleymani, E. Kolehmainen, I. Turunen, Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micromixers, *Chemical engineering*, Vol. 135, No. 1, pp. S219-S228, and 2008.

پارامتر نسبت ابعاد در یک عدد رینولدز مشخص سبب افزایش افت فشار شده است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد از دو سیال آب و اتانول در فرآیند اختلاط استفاده شده است. اختلاط سیالات با اختلاف زیاد در چگالی رفتارهای متفاوتی با عبور از زانویی‌ها در کانال مارپیچ به دلیل اختلاف نیروی اینرسی از خود نشان می‌دهند، اما به طور کلی انتظار می‌رود که تغییر خواص دو سیال ورودی به میکروکانال، اثر تغییرات پارامترهای هندسی میکرومیکسر بر عملکرد اختلاط را چندان تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. دلیل عدم دستیابی به مقدار شاخص اختلاط بالاتر در این میکروکانال‌ها می‌تواند هندسه متناوب کانال باشد؛ به این صورت که میکرومیکسر از مقطع مشخصی در کانال قادر به بهبود فرآیند اختلاط نخواهد بود. این امکان وجود دارد که با تغییر هندسه میکروکانال به یک طرح نامتناوب و قرار دادن واحدهای L شکل با پارامترهای هندسی مختلف در کنار یکدیگر بیشترین مقدار شاخص اختلاط افزایش یابد.

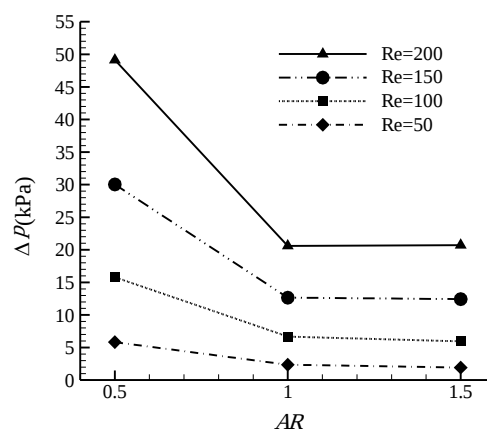


Fig. 17 Pressure drop vs. Reynolds number in L-mixers with different aspect ratio (AR)

شکل 17 افت فشار نسبت به عدد رینولدز در L-میکرومیکسرهایی با نسبت ابعاد مختلف (AR)

- B: *Chemical*, Vol. 176, No. 1, pp. 639-652, 2013.
- [22] V. Kumar, M. Paraschivoiu, K. Nigam, Single-phase fluid flow and mixing in microchannels, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, No. 7, pp. 1329-1373, 2011.
- [23] S. G. Kandlikar, High flux heat removal with microchannels—a roadmap of challenges and opportunities, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 26, No. 8, pp. 5-14, 2005.
- [24] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, W. W. Huebsch, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Sixth Edition, PP. 265-269, New York:Wiley, 2009.
- [25] A. Alam, K.-Y. Kim, Analysis of mixing in a curved microchannel with rectangular grooves, *Chemical Engineering*, Vol. 181, No. 1, pp. 708-716, 2012.
- [26] A. P. Sudarsan, V. M. Ugaz, Fluid mixing in planar spiral microchannels, *Lab on a Chip*, Vol. 6, No. 1, pp. 74-82, 2006.
- [17] S. Hardt, F. Schönfeld, Laminar mixing in different interdigital micromixers: II. Numerical simulations, *AIChE Journal*, Vol. 49, No. 3, pp. 578-584, 2003.
- [18] C. Galletti, M. Roudgar, E. Brunazzi, R. Mauri, Effect of inlet conditions on the engulfment pattern in a T-shaped micro-mixer, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 185, No. 1, pp. 300-313, 2012.
- [19] S. Wiggins, J. M. Ottino, Foundations of chaotic mixing, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 362, No. 1818, pp. 937-970, 2004.
- [20] S. Hossain, M. Ansari, K. Y. Kim, Evaluation of the mixing performance of three passive micromixers, *Chemical Engineering*, Vol. 150, No. 2, pp. 492-501, 2009.
- [21] A. Alam, K. Y. Kim, Mixing performance of a planar micromixer with circular chambers and crossing constriction channels, *Sensors and Actuators*