



Examining the Performance of New Double L-Shaped Micromixer Type

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hosseini Dehshiri S.Sh.¹ MSc,
Talebi Sh.*¹ PhD

How to cite this article

Hosseini Dehshiri S.Sh, Talebi Sh.
Examining the Performance of New
Double L-Shaped Micromixer Type.
Modares Mechanical Engineering,
2019;19(4):1009-1020.

ABSTRACT

New passive double L-shaped micromixers have been investigated based on the split and recombination flow. Numerical study on micromixers was performed in the Reynolds number range of 50 to 200. The three-dimensional Navier-Stokes equations have been used to analyze flow and mixing behavior. Two different configurations from the positioning of L units have been investigated and two solutions have been proposed to improve the mixing index. If two L units are same shaped, aligned on one plate (design 1), the mixing index is low due to inappropriate split and recombination. The placement of two L units of the same shape on a two-plane parallel and non-aligned (design 2) improve the mixing index and increase to over 95% in Reynolds numbers of 100, 150, and 200. The orthogonal solution to the inputs did not affect the pressure drop and only in design 1, the mixing index could exceed 95% in all Reynolds numbers. Unbalanced micromixer solution improves mixing index by increasing pressure drop. The effect of geometric parameter of asymmetric width ratio in both designs was studied and design 1 in asymmetric width ratio 2.5 and design 2 in asymmetric width ratio 2 and 2.5 have been completely mixed in all Reynolds numbers. Also, the performance of proposed micromixers was better than L-shaped micromixer due to the split and recombination mechanism. In addition, the mixing index was higher in proposed micromixers compared to the split and recombined micromixers of previous researchers due to the use of L-shaped units.

Keywords L-shaped Micromixer; Split and Recombine; Mixing Index; Numerical Study

CITATION LINKS

[1] Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip [2] Microfluidic diagnostic technologies for global public health [3] Evaluation of a three-dimensional micromixer in a surface-based biosensor [4] Ultrasonic mixing in microfluidic channels using integrated transducers [5] Convective-diffusive transport in parallel lamination micromixers [6] Passive mixers in microfluidic systems: A review [7] Simulation and experimental analysis of a SAR micromixer with F-shape mixing units [8] Numerical analysis of lamination effect in a vortex micro T-mixer with non-aligned inputs [9] Design and mixing efficiency of rhombic micromixer with flat angles [10] A novel passive micromixer based on unbalanced splits and collisions of fluid streams [11] A novel generation of 3D SAR-based passive micromixer: Efficient mixing and low pressure drop at a low Reynolds number [12] Mixing analysis in a three-dimensional serpentine split-and-recombine micromixer [13] An optimised split-and-recombine micro-mixer with uniform 'chaotic' mixing [14] Numerical research on shape optimization of microchannels of passive micromixers [15] Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel [16] Comparing the mixing performance of common types of chaotic micromixers: A numerical study [17] Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance [18] Numerical characterization of simple three-dimensional chaotic micromixers [19] Effect of inlet conditions on the engulfment pattern in a T-shaped micro-mixer [20] Micromixers: Fundamentals, design and fabrication [21] Calculation of the optimum installation angle for fixed solar-cell panels based on the genetic algorithm and the simulated-annealing method [22] Mixing performance of unbalanced split and recombine micromixers with circular and rhombic sub-channels [23] Passive split and recombination micromixer with convergent-divergent walls [24] Mixing analysis of passive micromixer with unbalanced three-split rhombic sub-channels [25] Mixing performance of split-and-recombine micromixer with offset inlets

¹Mechanical Engineering Faculty,
Yazd University, Yazd, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering
Faculty, Yazd University, Safaieh,
Yazd, Iran. Postal Code: 8915818411
Phone: +98 (35) 31232488
Fax: +98 (35) 38212781
talebi_s@yazd.ac.ir

Article History

Received: July 22, 2018
Accepted: November 27, 2018
ePublished: April 06, 2019

بررسی عملکرد نوع جدید میکرومیکسر L شکل دوگانه

سیدشهاب‌الدین حسینی‌دهشیری MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

شهرام طالبی* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

طرح‌های جدیدی از میکرومیکسرهای منفعل L شکل دوگانه براساس رویکرد تجزیه و بازترکیب جریان مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه عددی بر میکرومیکسرها در محدوده اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰ انجام شده است. از معادلات سه‌بعدی ناویراستوکس به منظور تحلیل رفتار جریان و اختلاط استفاده شده است. دو پیکربندی متفاوت از حالت‌های قرارگیری واحدهای L مورد بررسی قرار گرفته و برای بهبود شاخص اختلاط دو راهکار ارائه شده است. چنانچه دو واحد L شکل یکسان، در یک صفحه و به صورت هم‌راستا قرار گرفته باشند (طرح ۱)، شاخص اختلاط به‌علت عمل تجزیه و بازترکیب نامناسب، کم است. قرارگیری دو واحد L شکل یکسان، در دو صفحه موازی مختلف و به صورت ناهم‌راستا (طرح ۲)، شاخص اختلاط را بهبود بخشیده و در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ به شاخص اختلاط بالای ۹۵٪ رسیده است. راهکار متعادل کردن ورودی‌ها تأثیری بر افت فشار نداشته و تنها در طرح ۱، شاخص اختلاط به بالای ۹۵٪ در تمام اعداد رینولدز رسیده است. راهکار نامتوازن کردن میکرومیکسر با افزایش افت فشار، شاخص اختلاط را بهبود بخشیده است. اثر پارامتر هندسی نسبت نامتوازن میکرومیکسر در هر دو طرح بررسی و طرح ۱ در نسبت نامتوازن ۲/۵ و طرح ۲ در نسبت نامتوازن ۲ در تمام اعداد رینولدز به اختلاط کامل رسیده‌اند. همچنین عملکرد میکرومیکسرهای پیشنهادی نسبت به میکرومیکسر L شکل به‌علت مکانیزم تجزیه و بازترکیب بهتر بوده است. علاوه بر این، شاخص اختلاط در میکرومیکسرهای پیشنهادی نسبت به میکرومیکسرهای تجزیه و بازترکیب محققان پیشین به‌علت استفاده از واحدهای L شکل بیشتر بوده است.

کلیدواژه‌ها: میکرومیکسر L شکل، تجزیه و بازترکیب، شاخص اختلاط، مطالعه عددی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۰۶

*نویسنده مسئول: talebi_s@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، شاهد افزایش کاربرد فناوری‌های میکروسویالی در بیولوژی و واکنش‌های شیمیایی بوده‌ایم. دستگاه‌های میکروسویالی مانند همه ابزارهای دیگر در کاربردهای خاصی مفید هستند. به‌عنوان مثال، این ابزارها در کاربردهایی که نیاز به تجزیه و تحلیل مقدار کم نمونه (مثلاً تجزیه و تحلیل سلول‌های تک‌سلولی) وجود دارد، می‌توانند مفید باشند. با توجه به اتصال دستگاه‌های میکروسویالی به یکدیگر، اختلاط کارآمد و سریع در این دستگاه‌ها امری ضروری است. اختلاط سریع در بسیاری از دستگاه‌های میکروسویالی مورد استفاده در واکنش‌های شیمیایی، سنتز شیمیایی و فرآیندهای بیولوژی بسیار مهم بوده [1-3]، اگرچه اختلاط در دستگاه‌های میکروسویالی با محدودیت‌هایی نیز همراه است. اختلاط کارآمد و سریع در مقیاس میکرو همیشه به یک موضوع چالش‌برانگیز برای محققان تبدیل شده است. به‌طور کلی، ابعاد دستگاه میکروسویالی کوچک‌تر از میلی‌متر بوده (حدود ۱۰۰ میکرومتر) که در آن، رژیم جریان آرام و اختلاط ضعیف است. پایین بودن عدد رینولدز در چنین وسایلی، استفاده از مزایای اختلاط توسط جریان آشفته که در سیستم‌های ماکرو وجود دارد، مقدور نیست.

میکرومیکسرها به‌طور کلی به میکرومیکسرهای فعال و منفعل طبقه‌بندی شده‌اند. میکرومیکسرهای فعال از منبع انرژی خارجی

مانند میدان‌های الکتریکی، میدان مغناطیسی و امواج صوتی استفاده می‌کنند [4]. علاوه بر این، دستگاه‌های میکرومیکسر فعال به منابع انرژی خارجی و سیستم‌های کنترل‌کننده از قبیل فعال‌کننده‌هایی نیازمند است که در دستگاه‌های میکرو تعبیه شده‌اند و باعث افزایش پیچیدگی سیستم و در نتیجه باعث ایجاد مشکلات در عملکرد، ساخت و تمیزکردن آن می‌شوند [5]. بنابراین، میکرومیکسرهای فعال، انتخاب مناسبی از نظر استفاده در کاربردهای مختلف میکروسویالی نیست. از سوی دیگر، میکرومیکسرهای منفعل به هیچ منبع انرژی خارجی نیازمند نیستند و اکثر آنها با اصلاح هندسه، اختلاط را به بهبود می‌بخشند. همچنین میکرومیکسرهای منفعل، ارزان‌تر و راحت‌تر از میکرومیکسرهای فعال ساخته می‌شوند و می‌توانند به راحتی به دستگاه‌های میکروسویالی متصل شوند.

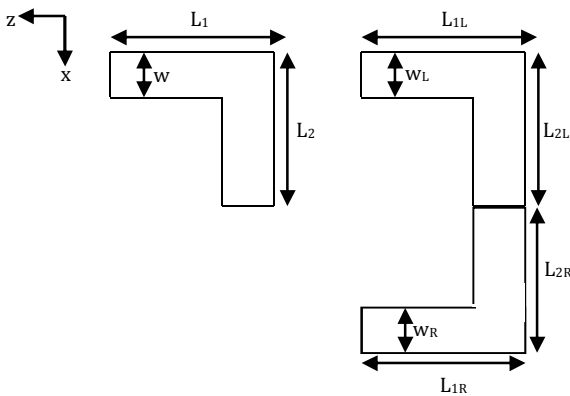
روش‌های رایج در اختلاط براساس ایجاد جابه‌جایی آشوبناک هستند و بر اثر تقسیم، کشیدگی، چین‌خوردگی و گسیختگی جریان ایجاد می‌شود [6]. در سیستم‌های ریزمقیاس، ساختار جریان می‌تواند با تقسیم‌بندی جریان به‌علت کشیدگی، چین‌خوردگی و افزایش سطح تماس، اختلاط را بهبود بخشد.

تعدادی از مطالعات روی میکرومیکسرهای تجزیه و بازترکیب متمرکز شده است. چن و شن [7] میکرومیکسر با واحدهای اختلاط F شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داده که شاخص اختلاط میکرومیکسر F شکل نسبت به میکرومیکسر T شکل به‌علت مکانیزم‌های تجزیه، بازترکیب و ایجاد جابه‌جایی آشوبناک بهتر بوده است. ریانی و همکاران [8] اثر ورودی شکاف‌دار بر میکروکانال ساده با ورودی‌های غیرهم‌راستا در محدوده اعداد رینولدز ۱۰ تا ۷۰ را بررسی کرده‌اند. نتایج عددی نشان داده که تقسیم‌بندی کانال ورودی جریان در هر حالت منجر به افزایش شاخص اختلاط شده است. چانگ و همکاران [9] طرح میکرومیکسر لوزی شکل بدون انحنا را بررسی کردند. مطالعه آنها نشان داد که سازوکار اختلاط براساس مفهوم تجزیه و بازترکیب منجر به جابه‌جایی آشوبناک شده و شاخص اختلاط بیش از ۹۵٪ برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۸۰ به‌علت تشکیل گردابه‌های دین و افزایش چرخش سیال به دست آمده است. انصاری و همکاران [10]، عملکرد میکرومیکسر براساس مفهوم تجزیه و بازترکیب نامتوازن جریان سیال در اعداد رینولدز محدود به ۱۰ تا ۸۰ را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان داده که برای اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۴۰، به‌ویژه هنگامی که عرض کانال بزرگ‌تر تقریباً ۲ برابر عرض کانال کوچک‌تر بوده، عملکرد بهینه اختلاط حاصل شده است. ویکتورو و نیمافر [11] طرح میکرومیکسر سه‌بعدی زنجیره‌ای را ارائه کرده‌اند. مطالعه آنها به‌صورت تجربی و عددی برای اعداد رینولدز پایین بود. نتایج آنها نشان داده که شاخص اختلاط در میکرومیکسر به‌علت فرآیند تجزیه و بازترکیب به ۹۸٪ رسیده است. حسین و کیم [12] طرح میکرومیکسر سه‌بعدی متشکل از آرایه‌های OH شکل را ارائه داده‌اند. مفهوم تجزیه و بازترکیب در طراحی میکرومیکسر منجر به بهبود عملکرد اختلاط و شاخص اختلاط ۰/۸۸۴ در عدد رینولدز ۳۰ شده است. شونفلد و همکاران [13] مطالعه عددی بر یک میکرومیکسر براساس تجزیه و بازترکیب را برای طیف گسترده‌ای از اعداد رینولدز انجام داده و نشان داده‌اند که در میکرومیکسر، مکانیزم تجزیه و بازترکیب، شاخص اختلاط را بهبود بخشیده است.

طی دهه گذشته، مطالعات تجربی و عددی روی اشکال مختلف میکرومیکسرهای مارپیچ به‌منظور ایجاد جابه‌جایی آشوبناک انجام شده است. چن و همکاران [14] به بررسی عملکرد شش طرح

می‌شود.

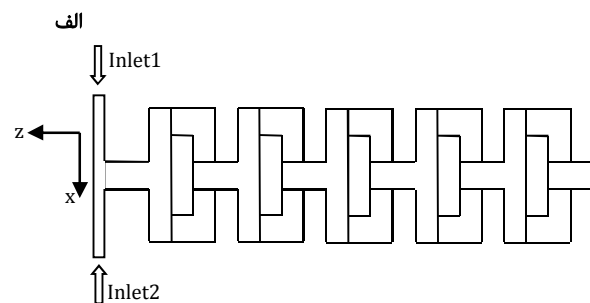
شکل ۲، شماتیک اشکل دوگانه ساده طرح ۱ را نشان می‌دهد که در هر واحد، اختلاط از دو واحد اشکل تشکیل شده است. در طرح ۱، دو واحد اشکل در یک صفحه و به صورت هم‌راستا قرار گرفته است. در طرح ۱، عرض واحدهای میکروکانال (W_L و W_R) برابر با ۲۰۰ میکرومتر و طول واحدهای L_1 (L_{1L} ، L_{1R} ، L_{2L} و L_{2R}) برابر با ۶۰۰ میکرومتر انتخاب شده است. شکل ۳، طرح ساده دیگر از قرارگیری اشکل دوگانه است که در آن دو واحد اشکل در دو صفحه مختلف به صورت ناهم‌راستا قرار گرفته‌اند. در طرح ساده ۲ نیز عرض واحدهای میکروکانال (W_L و W_R) برابر با ۲۰۰ میکرومتر و طول واحدهای L_1 (L_{1L} ، L_{1R} ، L_{2L} و L_{2R})، ۶۰۰ میکرومتر انتخاب شده است.



الف

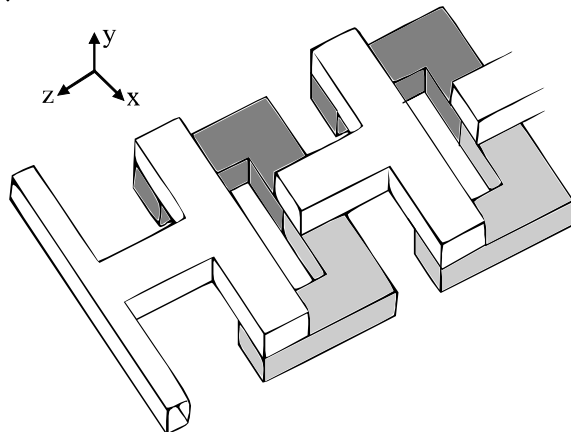
ب

شکل ۱) پارامترهای هندسی در اشکل و اشکل دوگانه؛ الف) اشکل، ب) اشکل دوگانه



الف

ب



شکل ۲) میکرومیکسر اشکل دوگانه طرح ۱؛ الف) نمای دو بُعدی (صفحه xz)، ب) نمای سه بُعدی

میکرومیکسر موجی مربعی شکل، موج چندگانه، زیگزآگ شکل، اشکل T شکل، دهان شکل و حلقه شکل پرداخته‌اند. نتایج نشان داده که میکرومیکسر با میکروکانال‌های موج مربعی شکل به علت چرخش‌های ۹۰ درجه‌ای، بهترین عملکرد از بین شش میکرومیکسر پیشنهادی را دارند. لیو و همکاران^[15]، عملکرد اختلاط یک میکرومیکسر سه بُعدی ماریچ متشکل از بخش‌های C شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند که در یک سطح عمود بر هم قرار گرفتند. مطالعات تجربی آنها نشان داد که میکروکانال سه بُعدی ماریچ در اعداد رینولدز بزرگتر از ۲۵ مناسب عمل کرده و با افزایش عدد رینولدز، شاخص اختلاط افزایش یافته است. کاناریس و همکاران^[16] به مقایسه عملکرد پنج میکرومیکسر با پیکربندی مختلف و میکرومیکسر T شکل معمولی پرداخته‌اند. آنها دریافته‌اند که شاخص اختلاط تمام میکرومیکسرهای ارائه شده نسبت به میکرومیکسر ساده T شکل بیشتر و میکرومیکسر C و اشکل نسبت به بقیه میکسرهای ارائه شده به علت چرخش‌های ۹۰ درجه‌ای بالاترین شاخص اختلاط را دارند. همچنین طرح میکرومیکسر اشکل نسبت به طرح میکرومیکسر C شکل دارای امتیاز جریان چرخشی بیشتری بوده که منجر به عملکرد بهتر آن شده است. ویجایندران و همکاران^[3] عملکرد مناسب میکرومیکسر سه بُعدی ماریچ شامل بخش‌های اشکل را نسبت به T شکل گزارش داده‌اند. زارع و طالبی^[17] به مطالعه میکرومیکسر سه بُعدی و ماریچ اشکل به منظور بررسی رفتار اختلاط، جریان سیال و اثر پارامترهای هندسی پرداخته و نشان داده‌اند که با اصلاح هندسه می‌توان به شاخص اختلاط بالایی رسید.

با توجه به تحقیقات گذشته، بهترین عملکرد بین میکرومیکسرهای ماریچ، میکرومیکسر سه بُعدی با واحدهای تکرارشونده اشکل معرفی شده است. میکرومیکسر اشکل، علاوه بر ویژگی سه بُعدی و ماریچ بودن، توانایی ایجاد جابه‌جایی آشوبناک براساس چین‌خوردگی و تاشدگی را داراست. از طرفی با توجه به کارآمد بودن اختلاط در میکرومیکسرهای تقسیم و باز ترکیب که با افزایش سطح تماس همراه بوده، طرح میکرومیکسر که در هر واحد اختلاط از دو قسمت اشکل تشکیل شده است، علاوه بر سه بُعدی و ماریچ کردن، توانایی ایجاد جابه‌جایی آشوبناک براساس چین‌خوردگی، تجزیه و باز ترکیب را داراست. بنابراین در مقاله حاضر برای اولین بار به بررسی تحلیل جریان، شاخص اختلاط و افت فشار در طرح‌های میکرومیکسر منفعل اشکل دوگانه با حالت‌های قرارگیری مختلف اشکل پرداخته شده است. همچنین نتایج کار حاضر با میکرومیکسر اشکل^[17] و میکرومیکسرهای محققان پیشین براساس مفهوم تجزیه و باز ترکیب مقایسه شده است.

۲- مدل فیزیکی مساله

شکل ۱ به صورت شماتیک واحد اشکل استفاده شده در طرح‌های حاضر را نشان داده است. هر واحد L با عمق ۲۰۰ میکرومتر توسط سه پارامتر L_1 ، L_2 و W مشخص می‌شود. پارامترهای L_1 و L_2 برابر با ۶۰۰ میکرومتر و W برابر ۲۰۰ میکرومتر مطابق با مرجع^[17] انتخاب شده است. میکرومیکسرهای اشکل دوگانه مورد بررسی از ۵ واحد اختلاط با گام ۱۰۰۰ میکرومتر تشکیل و طول معادل ۴۲۰۰ میکرومتر مطابق با مرجع^[17] را داراست. همچنین کانال اصلی مربعی شکل و به ابعاد ۲۰۰ میکرومتر انتخاب شده است. هر واحد اختلاط از دو واحد اشکل تشکیل شده است و با توجه به قرارگیری واحد اشکل به وسیله پارامترهای L_{1L} ، L_{1R} ، L_{2L} ، L_{2R} و W_L و W_R مشخص

شده است. خواص ترموفیزیک هر دو سیال ثابت و در دمای ۲۰°C انتخاب شده است [18]. جدول ۱ خواص این دو سیال را نشان داده است.

جدول ۱) خواص سیالات در دمای ۲۰°C [18]

سیال	لزجت (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	چگالی (kg m ⁻³)	ضریب پخش مولکولی (m ² s ⁻¹)
آب	۰/۰۰۰۹	۹۹۹/۸	۱۰ ^{-۹}
اتانول	۰/۰۰۱۲	۷۸۹	۱۰ ^{-۹}

جریان با توزیع سرعت توسعه یافته وارد کانال‌های ورودی میکرومیکس شده و با فشار نسبی استاتیک صفر از آن خارج شده است. شرط مرزی عدم لغزش و عدم نفوذناپذیری بر دیوارهای کانال حاکم است. کسر جرمی گونه ۱ (C₁) در یکی از ورودی‌ها برابر یک و در ورودی دیگر صفر اعمال شده است.

شاخص اختلاط بر پایه انحراف معیار کسر جرمی از متوسط کسر جرمی روی سطح مقطع عمود بر جهت جریان، به عنوان کیفیت عملکرد میکرومیکس استفاده شده است که به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (C_i - \bar{C}_m)^2} \quad (7)$$

که در آن n تعداد نقاط در سطح مقطع که به صورت یکنواخت قرار گرفته‌اند، C_i کسر جرمی گونه در نقطه i و \bar{C}_m کسر جرمی متوسط یکی از گونه‌ها در اختلاط کامل است.

شاخص اختلاط به منظور ارزیابی درجه اختلاط دو سیال به صورت رابطه ۸ محاسبه شده است:

$$MI = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (8)$$

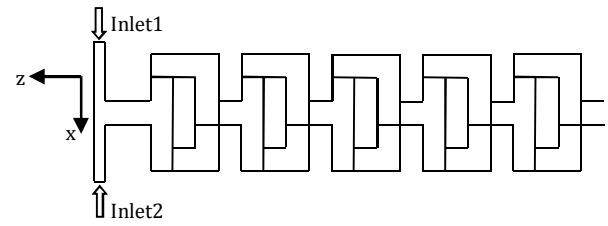
مقدار MI همواره در محدوده بین صفر و یک قرار دارد. مقدار بزرگ‌تر MI نشان‌دهنده اختلاط بهتر است. در رابطه ۸، σ_{max} بیشترین انحراف معیار بین داده‌های موجود است. انحراف معیار برای سیالات کاملاً مخلوط نشده (در مقاطع ورودی)، بیشترین مقدار و برای سیالات کاملاً مخلوط شده، کمترین مقدار را داراست. همچنین مقدار باقیمانده کمتر از ۱۰^{-۶} برای معادلات پیوستگی و انتقال جرم به عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است. همچنین عدد رینولدز و عدد اشمیت به ترتیب به صورت $Re = \rho u D_h / \mu$ و $Sc = \mu / \rho D$ بر مبنای مجرای آب تعریف شده‌اند. سرعت متوسط سیال در کانال ورودی آب و قطر هیدرولیک کانال اختلاط (اصلی) است.

۴- استقلال از شبکه

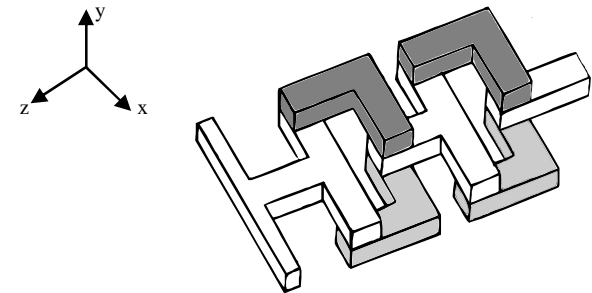
به علت دقت بالا، سادگی و محاسبه مناسب گرادین‌های شدید در گوشه‌ها از مش‌بندی با عناصر شش‌وجهی با سازمان استفاده شده است. همچنین از آنجایی که تغییرات عرضی جریان در میکروکانال بیشتر از قسمت‌های مستقیم کانال بوده، از سلول‌های مکعب مستطیلی در شبکه‌بندی استفاده شده است. نمودار ۱، اثر تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی بر شاخص اختلاط در عدد رینولدز ۲۰۰ برای طرح ۱ را نشان می‌دهد.

همان طور که مشاهده می‌شود، شبکه ۳ به عنوان شبکه محاسباتی انتخاب شده است. همچنین شکل ۴ نیز نمایی از شبکه سازمان‌یافته با سلول‌های مکعب مستطیلی را نشان می‌دهد.

الف



ب



شکل ۳) میکرومیکس با شکل دوگانه طرح ۲: الف) نمای دو بعدی (صفحه XZ)، ب) نمای سه بعدی

۳- معادلات حاکم و شبیه‌سازی عددی

معادلات بقایی حاکم به کمک کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت بر پایه حجم محدود در حالت دقت مضاعف حل شده است. از روش بالادست مرتبه دوم برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی و از الگوریتم سیمپل برای کوپل فشار و سرعت استفاده شده است.

جریان به صورت لزج، همدم، تراکم‌ناپذیر، آرام و دایم در نظر گرفته شده و معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم و انتقال جرم به صورت روابط ۱-۳ است.

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

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{\nabla} \vec{V}) \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} C) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} C) \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی، \vec{V} بردار سرعت، μ لزجت دینامیکی، C کسر جرمی و D ضریب پخش مولکولی است. خواص مخلوط به صورت روابط ۴-۶ است:

$$\rho = \frac{1}{\sum \frac{C_i}{\rho_i}} \quad (4)$$

که در آن C_i کسر جرمی گونه i و ρ_i چگالی گونه i ام است. در یک مخلوط دوسیالی، کسر جرمی گونه ۱ به صورت رابطه ۵ است:

$$C_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

که در آن m₁ کسر جرمی گونه ۱ و m₂ کسر جرمی گونه ۲ است. همچنین لزجت دینامیکی یک مخلوط دوسیالی با استفاده از یک تابع توانی به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود [18]:

$$\mu = \mu_2 \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{C_1} \quad (6)$$

که در آن μ لزجت دینامیکی مخلوط، μ_1 و μ_2 به ترتیب لزجت دینامیکی گونه ۱ و گونه ۲ و C₁ کسر جرمی گونه ۱ است. گونه ۱ در مطالعه حاضر، اتانول و گونه ۲ آب در نظر گرفته شده است. دو جریان همدم و مخلوط‌شدنی آب و اتانول وارد میکرومیکس

بررسی عملکرد نوع جدید میکرومیکسر اشکل دوگانه ۱۰۱۳
 جدول ۲) مقایسه تغییرات شاخص اختلاط در مقاطع $y=50\mu\text{m}$ و $y=300\mu\text{m}$ -
 $y=$ در مطالعه حاضر با نتایج گالتی و همکاران [19]

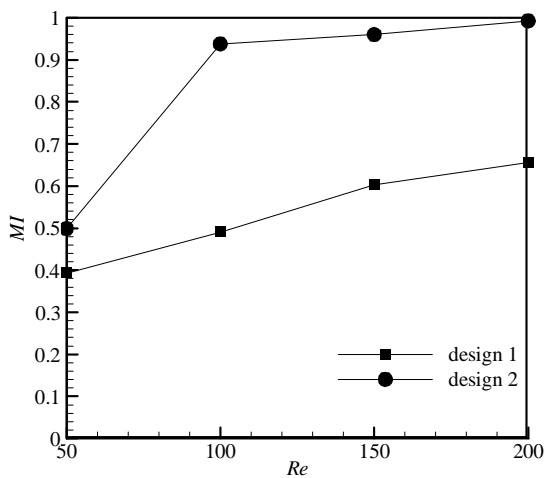
عدد رینولدز	موقعیت (μm)	نتایج گالتی [19] (شاخص اختلاط)	نتایج کار حاضر (شاخص اختلاط)
۹۶	-۵۰۰	۰/۰۲۷	۰/۰۲۸
	-۳۰۰۰	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱
۱۴۴	-۵۰۰	۰/۰۳۵	۰/۰۳۶
	-۳۰۰۰	۰/۰۳۹	۰/۰۴۰
۱۹۲	-۵۰۰	۰/۰۲۳	۰/۰۲۳
	-۳۰۰۰	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳
۲۸۸	-۵۰۰	۰/۰۴۶	۰/۰۴۵
	-۳۰۰۰	۰/۰۶۱	۰/۰۶۰

۶- بحث و بررسی نتایج

مطالعه رفتار جریان و عملکرد اختلاط برای میکرومیکسرهای اشکل دوگانه طرح‌های ۱ و ۲ در اعداد رینولدز ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ و عدد اشمیت ۹۰۰/۱۸ انجام شده است. شاخص اختلاط به عنوان معیار عملکرد هندسه‌های مختلف انتخاب شده است. در ادامه نیز با ارایه راهکارهایی مناسب، با اصلاح هندسه طرح‌های ۱ و ۲، عملکرد اختلاط بررسی شده است.

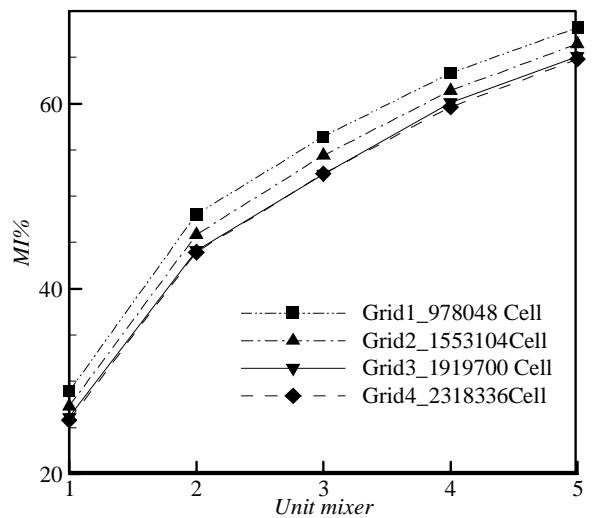
۶-۱- طرح‌های ساده اشکل دوگانه

نمودار ۲، تغییرات شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسرهای اشکل دوگانه برای طرح‌های ۱ و ۲ به ازای اعداد مختلف رینولدز را نشان داده است. همان طور که انتظار می‌رفت، شاخص اختلاط با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه قوی‌تر شدن گردابه‌ها افزایش یافته، همچنین طرح ۲ نسبت به طرح ۱ بهتر عمل کرده است.

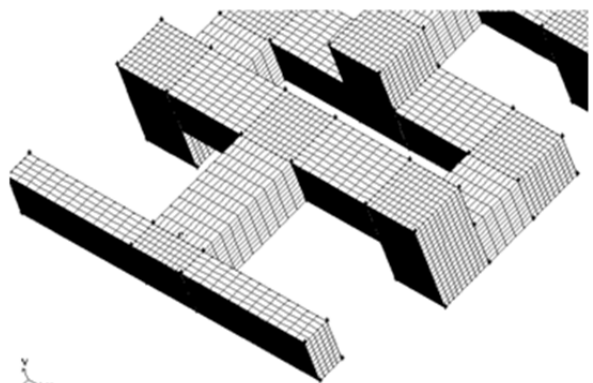


نمودار ۲) شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع خروجی برای طرح‌های ۱ و ۲

شکل ۶، کانتور کسر جرمی اتانول برای طرح‌های ۱ و ۲ در عدد رینولدز ۱۰۰ در مقاطع مشخص شده بعد از هر واحد اختلاط را نشان می‌دهد. در طرح ۱، ساختار جریان در ورودی و تقسیم یکسان جریان باعث شده است تا اتانول در یک شاخه حداکثر و در شاخه دیگر حداقل شود و عمل اختلاط به خوبی صورت نگرفته باشد. در واقع، اگر ساختار ورودی تغییر پیدا کند یا تقسیم جریان در شاخه‌های اشکل یکسان نباشد، می‌تواند باعث بهبود اختلاط شود. از این رو در ادامه، دو راهکار ورودی‌های متعامد و استفاده از واحدهای اشکل غیریکسان بررسی شده است. اما در طرح ۲، ناهم‌راستابودن شاخه‌های اشکل منجر به افزایش سطح تماس دو گونه و ایجاد جریان چرخشی در کانال اصلی شده است. همچنین



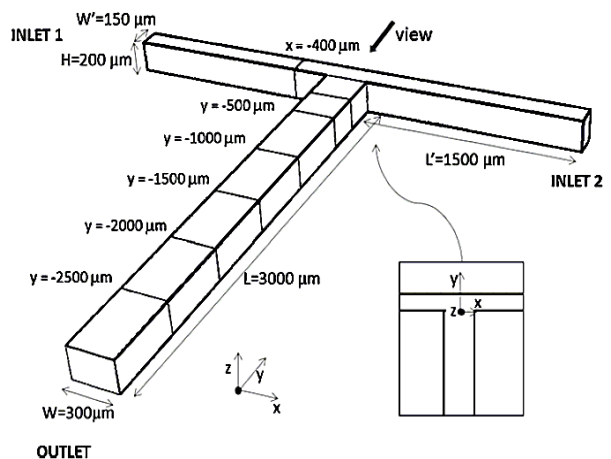
نمودار ۱) حل استقلال از شبکه برای شاخص اختلاط



شکل ۴) شبکه با سازمان به کاررفته در میکسر دوگانه، طرح ۱

۵- اعتبارسنجی

گالتی و همکاران [19]، الگوی جریان و اختلاط در میکرومیکسر T شکل را مورد بررسی قرار داده‌اند (شکل ۵). جدول ۲، شاخص اختلاط در مقاطع عرضی مختلف ($y=50\mu\text{m}$ و $y=300\mu\text{m}$) در کار حاضر و گالتی و همکاران [19] را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، تطابق مناسبی میان نتایج حاضر و کار گالتی و همکاران [19] وجود دارد.



شکل ۵) شماتیک T میکسر [19]

در ادامه دو راهکار برای بهبود اختلاط در ایجاد جابه‌جایی آشوبناک در میکروکانال‌های L شکل و بهبود فرآیند اختلاط در مکانیزم تجزیه و بازترکیب طرح‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۲-۶- راهکار اول، ورودی متعامد

در طرح ۱، اختلاط گونه‌ها در شاخه‌های L شکل به علت تغییر جهت‌های ۹۰ درجه جریان مناسب بود، اما تقسیم نامناسب گونه‌ها در دو شاخه L منجر به اختلاط نامطلوب در خروجی شده بود. یکی از راهکارهای مناسب، متعامدبودن کانال ورودی است. عمودبودن کانال ورودی باعث می‌شود تقریباً نصف اتانول و آب در هر شاخه به‌طور یکسان تقسیم شود و می‌تواند اختلاط را بهبود بخشد.

شکل ۷ به‌صورت شماتیک، نمای سه‌بُعدی از میکرومیکسرهای L شکل دوگانه ۱ و ۲ با ورودی‌های متعامد را نشان داده است. طرح‌های متعامد، از لحاظ ابعاد، مشابه طرح ساده خود بوده و تنها ورودی‌ها ۹۰ درجه چرخیده‌اند. شکل ۸ توزیع کسر جرمی در مقاطع نشان‌داده شده بعد از هر واحد اختلاط در عدد رینولدز ۱۰۰ برای طرح اصلاح شده با ورودی‌های متعامد را نشان داده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع کسر جرمی در موقعیت A-A' نسبت به طرح ساده ۱ (شکل ۶-الف) متفاوت بوده و ۹۰ درجه چرخیده است. این تغییر در مقطع A-A' منجر به تقسیم مناسب گونه‌ها شده و این بار تقریباً نصف گونه‌ها در هر شاخه L قرار گرفته و عمل اختلاط در واحدهای L شکل به‌علت تغییر جهت‌های ۹۰ درجه‌ای صورت گرفته و سپس عمل بازترکیب انجام شده است.

علاوه بر این، مقدار بزرگی ورتیسیتته در مقطع بازترکیب B-B' در عدد رینولدز ۵۰ برای طرح ساده ۱ و عمود آن تقریباً هم‌اندازه و برابر با $1/S(19700)$ است. بنابراین عمودبودن جریان تأثیر زیادی بر افزایش ورتیسیتته نداشته است.

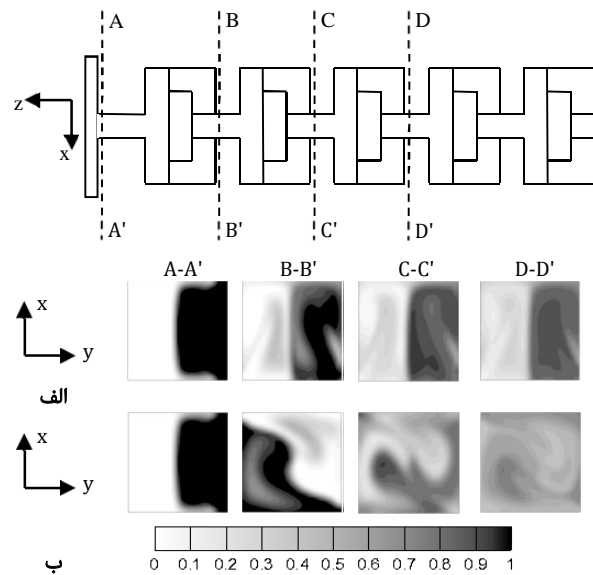
نمودار ۴، شاخص اختلاط بر حسب عدد رینولدز برای طرح ساده ۱ (شکل ۲) و طرح ۱ با ورودی‌های عمود (شکل ۷-الف) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار ۴ مشخص بوده، شاخص اختلاط به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. متعامدکردن ورودی‌ها منجر به اختلاط مناسب گونه‌ها در عمل تجزیه و بازترکیب جریان شده است. علاوه بر این، در عدد رینولدز ۵۰ نیز با وجود آن که عدد رینولدز شاخه‌های L شکل ۲۵ بوده، ولی عمل تجزیه و بازترکیب مناسب جریان، شاخص اختلاط را به ۹۵٪ رسانده است.

نمودار ۵، تغییرات شاخص اختلاط در خروجی میکرومیکسر بر حسب عدد رینولدز برای طرح ساده ۲ و طرح ۲ با ورودی‌های عمود را نشان می‌دهد. متعامدکردن ورودی‌ها تأثیر چندانی با طرح ساده خود نداشته و تنها در عدد رینولدز ۵۰ توانسته است تا شاخص اختلاط را بهبود بخشد. به عبارت دیگر، در عدد رینولدز ۵۰ که جابه‌جایی آشوبناک در شاخه‌ها غیرفعال بوده، تقسیم صحیح گونه‌ها در ورودی منجر به بهبود اختلاط شده است. اما پیش از این در اعداد رینولدز دیگر، ناهم‌راستابودن شاخه‌های L، فرآیند بازترکیب جریان را بهبود بخشیده بود و به همین دلیل متعامدکردن ورودی‌ها در اعداد رینولدز بالا بی‌تأثیر بوده است.

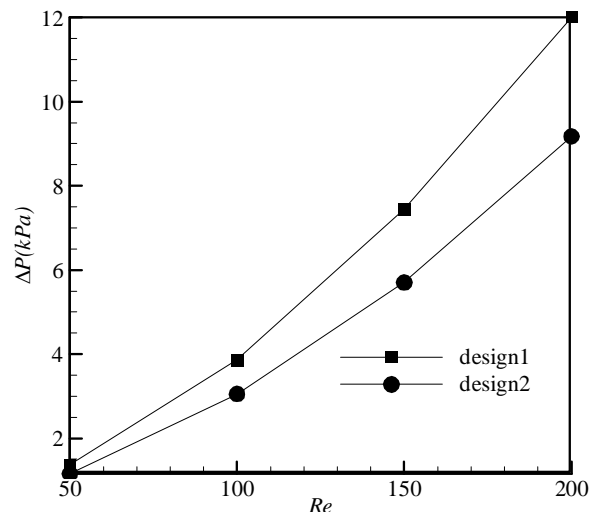
نمودار ۶، تغییرات افت فشار در طول میکرومیکسر برای طرح‌های L شکل دوگانه ۱ و عمود آن، L شکل دوگانه ۲ و عمود آن را نشان می‌دهد. متعامدکردن ورودی‌ها تأثیر چندانی بر افت فشار نداشته است. بنابراین طرح‌های عمود توانسته‌اند در همان افت فشار به شاخص اختلاط بالاتری دست یابند. طرح متعامد ۱ در تمام اعداد رینولدز به شاخص اختلاط بالای ۹۵٪ رسیده و عملکرد مناسبی داشته است. از آنجایی که شاخص اختلاط بین ۸۰ تا ۱۰۰٪ در کاربردهای اختلاط در مقیاس میکرو قابل قبول بوده [20]، شاخص

در طرح ۲ در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ به شاخص اختلاط بالایی رسیده، در حالی که در عدد رینولدز ۵۰ این مقدار کوچک است (نمودار ۲). علت آن، عدد بدون بعد رینولدز است. به عبارت دیگر در عدد رینولدز ۵۰، در طرح‌های ۱ و ۲، عدد رینولدز در میکروکانال L شکل، ۲۵ بوده و عدد رینولدز در شاخه به اندازه کافی کوچک شده تا جابه‌جایی رسیدن به جابه‌جایی آشوبناک و ایجاد گردابه دین را نداشته باشد. بنابراین در عدد رینولدز ۵۰، عملکرد نامناسب واحدهای L منجر به افت شاخص اختلاط شده است. از این رو، استفاده از واحدهای L شکل غیریکسان می‌تواند به ایجاد جابه‌جایی آشوبناک در واحد L شکل کمک کند.

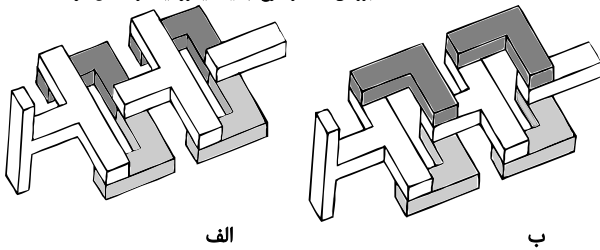
نمودار ۳، تغییرات افت فشار در خروجی میکرومیکسر در اعداد رینولدز مختلف برای طرح‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. در طرح ۱ هم‌راستابودن واحدهای L شکل باعث برخورد مستقیم دو جریان در مرحله بازترکیب شده و همین موضوع باعث افت فشار بیشتری در طرح ۱ نسبت به طرح ۲ شده است.



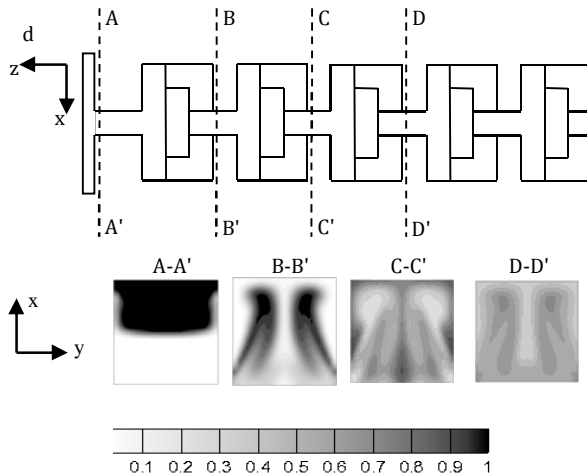
شکل ۶) توزیع کسر جرمی اتانول در مقاطع نشان‌داده شده در عدد رینولدز ۱۰۰ برای طرح‌های ۱ و ۲؛ الف) طرح ۱، ب) طرح ۲



نمودار ۳) افت فشار در خروجی بر حسب عدد رینولدز در طرح‌های ۱ و ۲



شکل ۷) نمای سه‌بعدی طرح ۱ با ورودی‌های متعامد و طرح ۲ با ورودی‌های متعامد؛ الف) طرح ۱ با ورودی‌های متعامد، ب) طرح ۲ با ورودی‌های متعامد



شکل ۸) توزیع کسر جرمی اتانول در مقاطع نشان‌داده شده در عدد رینولدز ۱۰۰ برای طرح ۱ با ورودی‌های متعامد

۳-۶- راهکار دوم: طرح نامتوازن

یکی از راهکارهای مرسوم به‌منظور بهبود فرآیند تجزیه و بازترکیب، نامتوازن کردن میکرومیکسر است [10]. به عبارت دیگر، استفاده از دو واحد L غیریکسان می‌تواند باعث تغییر دبی جریان در شاخه‌های میکرومیکسر شود و ضمن تغییر عدد رینولدز در شاخه‌ها و کمک به ایجاد جابه‌جایی آشوبناک در واحدهای L شکل، عمل تجزیه و بازترکیب جریان را بهبود بخشد. براساس ابعاد و پارامترهای مورد استفاده در مساله، پارامتر نسبت نامتوازن عرضی به‌صورت رابطه ۹ تعریف شده است:

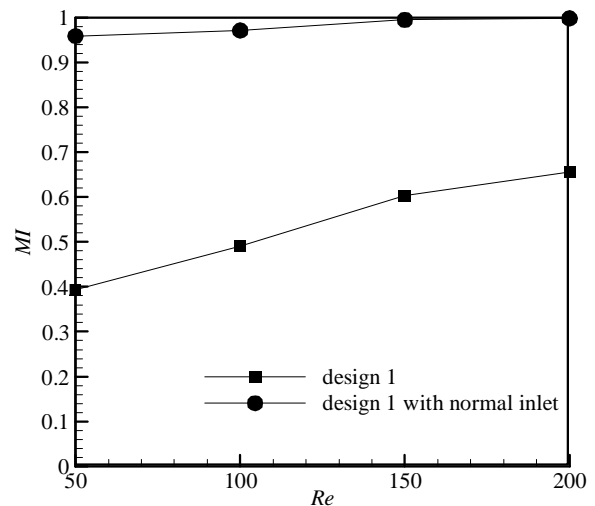
$$AWR = \frac{w_R}{w_L} \quad (9)$$

که در آن AWR نسبت نامتوازن عرضی، w_L و w_R ، به‌ترتیب عرض شاخه L در سمت راست و چپ نشان‌داده شده در شکل ۱ است.

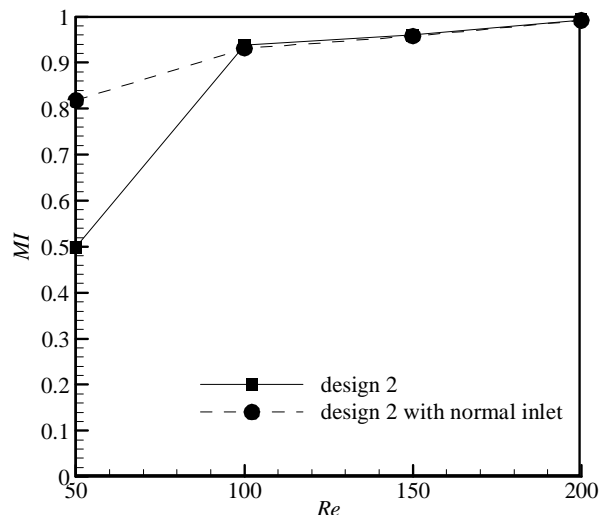
طرح نامتوازن عرضی: شکل ۹، میکرومیکسر L شکل دوگانه نامتوازن، طرح‌های ۱ و ۲ را نشان داده است. یک واحد L شکل همانند طرح ساده انتخاب شده و واحد دیگر با عرض کوچک‌تر مطابق با نسبت‌های نامتوانی در شعاع داخلی قرار گرفته است. همچنین به‌منظور بهبود مکانیزم بازترکیب اختلاط واحدهای اختلاط نسبت به محور Z برعکس قرار گرفته‌اند [10].

شکل ۱۰، توزیع بزرگی سرعت به‌ترتیب برای طرح ساده ۱ و نامتوازن عرضی ۱ را نشان داده است. استفاده از L ‌های با مقطع غیریکسان منجر به تقسیم نامتوازن جریان شده و اکثر حجم جریان در شاخه با مقطع بزرگ‌تر قرار گرفته است. این تغییر دبی در شاخه‌ها باعث افزایش بیشینه سرعت و افزایش سرعت جریان در شاخه بزرگ‌تر بیشتر می‌شود و عدد رینولدز در شاخه نیز افزایش می‌یابد. علاوه بر

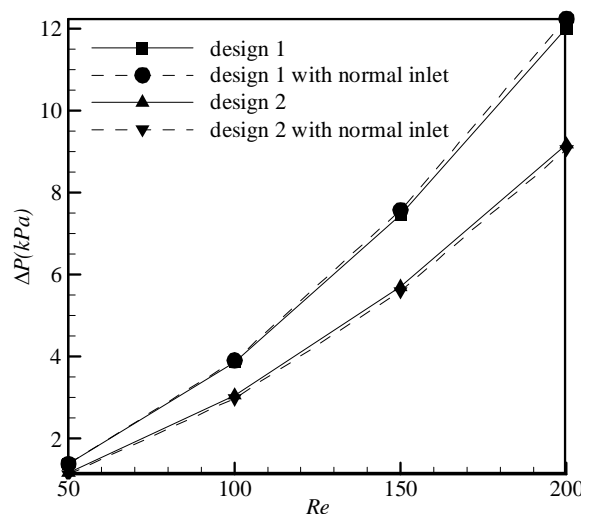
اختلاط در طرح عمود ۲ نیز در عدد رینولدز ۵۰ به ۸۲٪ رسیده است.



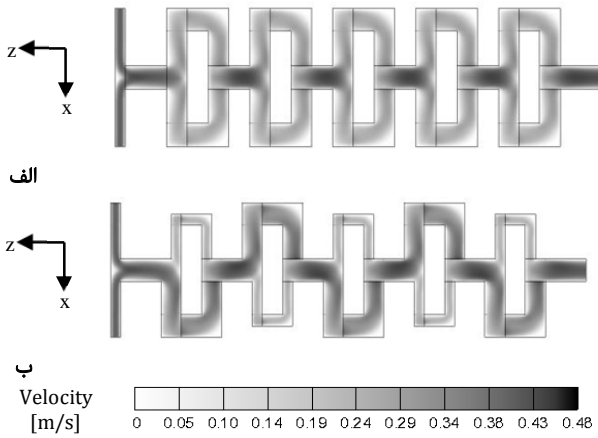
نمودار ۹) شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع خروجی برای طرح ۱ و طرح ۱ با ورودی‌های متعامد



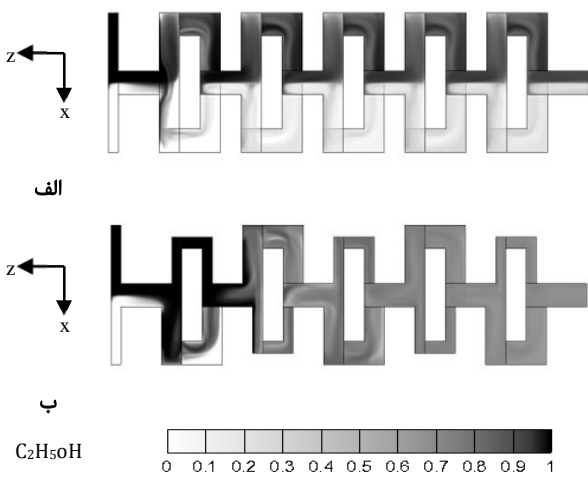
نمودار ۱۰) شاخص اختلاط نسبت به عدد رینولدز در مقطع خروجی برای طرح ۲ و طرح ۲ با ورودی‌های متعامد



نمودار ۱۱) افت فشار در خروجی بر حسب عدد رینولدز در طرح ۱، طرح ۲، طرح ۱ با ورودی‌های متعامد و طرح ۲ با ورودی‌های متعامد



شکل ۱۰) کانتور سرعت در شاخه‌های L شکل در صفحه y-z در $Re=50$ و $AWR=2$ با ۱ و ۲ (الف: $AWR=2$) طرح نامتوازن ۱ (ب) طرح نامتوازن ۱



شکل ۱۱) توزیع کسر جرمی اتانول در $Re=50$ در صفحه xz طرح ۱ و طرح نامتوازن ۱ با $AWR=2$ (الف: $AWR=2$) طرح نامتوازن ۱ (ب) طرح نامتوازن ۱

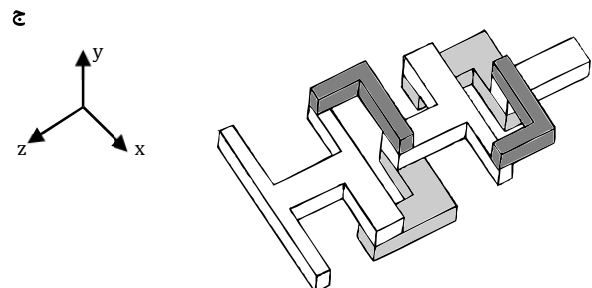
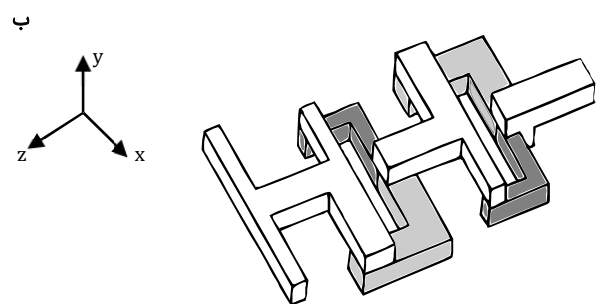
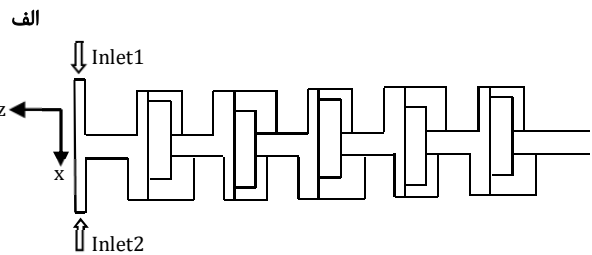
شکل ۱۲، کانتور کسر جرمی در مقاطع مختلف بعد از هر واحد اختلاط در عدد رینولدز ۵۰ برای دو طرح نامتوازن ۱ و ۲ با نسبت نامتوازن عرضی ۲ را نشان داده است. در برخورد متعادل (زیرکانال‌های با عرض برابر، به‌عنوان مثال $W_R=W_L$)، زیرکانال تقریباً توسط یک گونه تنها اشغال می‌شود و نسبت گونه در هر دو زیرکانال مشابه است (شکل ۶). با این حال، در موارد برخورد نامتعادل سطح تماس دو سیال در کانال‌های اصلی به‌دلیل جریان‌های عرضی به‌طور قابل توجهی تغییر کرده و همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاط را بهبود بخشیده است (شکل ۱۲).

علاوه بر این، نامتوازن کردن باعث افزایش قدرت گرده‌بها شده است. به‌عنوان مثال در عدد رینولدز ۵۰، مقدار متوسط بزرگی ورتیسیته در مقطع B-B' در طرح ساده ۱، تقریباً حدود 1.835 (1/s) بوده که این مقدار در طرح نامتوازن آن با نسبت نامتوازن عرضی ۲ برابر با 1.8825 (1/s) (افزایش ۶ درصدی) به‌علت برخورد جریان با اینرسی قوی‌تر به جریان ضعیف‌تر نیز شده است.

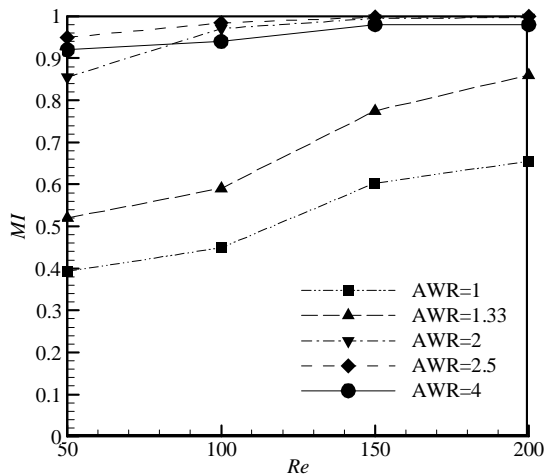
نمودار ۷، اثر میزان نامتوازن بودن شاخه‌های L (AWR) بر شاخص اختلاط در طرح ۱ بررسی شده است. با افزایش نسبت عرضی، شاخص اختلاط افزایش یافته، اما در نسبت عرضی برابر با ۴، افت کمی در شاخص اختلاط مشاهده شده است. به عبارت دیگر، در

این، مقدار نسبت دبی در شاخه‌های L محاسبه شده است. به‌عنوان مثال در طرح ۱ در عدد رینولدز ۱۰۰ از تمام دبی ورودی در حالت متوازن تقریباً ۵۰٪ وارد یک شاخه و بقیه، وارد شاخه دیگری شده است، در حالی که در حالت نامتوازن با نسبت ۲، حدود ۷۵٪ آن وارد شاخه L با مقطع بزرگ‌تر شده، در حالت نامتوازن با نسبت ۲/۵، حدود ۸۵٪ آن وارد شاخه L با مقطع بزرگ‌تر شده و در حالت نامتوازن با نسبت ۴، تقریباً تمام جریان وارد شاخه L با مقطع بزرگ‌تر شده است.

شکل ۱۱، توزیع کسر جرمی در میکرومیکسر L شکل دوگانه طرح ۱ و طرح نامتوازن ۱ با نسبت ۲ را نشان می‌دهد. در طرح ساده ۱، جریان آب و اتانول تقریباً به‌طور کامل در شاخه‌ها در سمت خود قرار گرفته و اختلاط به‌صورت مناسب صورت نگرفته است. اما در طرح‌های نامتوازن، اتانول از ورودی به دو جریان تقسیم شده که یک قسمت به شاخه اصلی و دیگری وارد شاخه فرعی شده است. از آنجایی که جریان در شاخه اصلی L اینرسی بالاتری دارد (به‌دلیل دبی بزرگ‌تر جریان در این شاخه)، جریان اتانول به داخل جریان آب هل داده می‌شود و اختلاط موثر در محفظه اختلاط قبل از ورود به واحد دوم میکسر صورت می‌گیرد. در نتیجه، همان‌طور که در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است، در مرحله تقسیم جریان (واحد اختلاط دوم) به‌جای اتانول تقریباً خالص، مخلوط آب و اتانول وارد شاخه L می‌شود. به عبارت دیگر، جریان اتانول به دو جریان تقسیم شده و مخلوط آب و اتانول به شاخه اصلی و قسمت دیگر اتانول به شاخه فرعی رفته است. این الگوی تکرار شده در شکل ۱۱-ب نیز وجود دارد.



شکل ۹) نمای دو بُعدی و سه بُعدی میکرومیکسر L شکل دوگانه طرح نامتوازن؛ (الف) نمای دو بُعدی (صفحه xz)، (ب) نمای سه بُعدی طرح نامتوازن ۱، (ج) نمای سه بُعدی طرح نامتوازن ۲



نمودار ۷) شاخص اختلاط در خروجی طرح ۱ نسبت به عدد رینولدز در مقادیر مختلف AWR

در نمودار ۸، اثر میزان نامتوازن بودن شاخه‌های L بر شاخص اختلاط در طرح ۲ بررسی شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نامتوازن کردن در هر حالت منجر به بهبود اختلاط شده است. با توجه به این که طرح ساده ۲ توانسته بود به‌علت ناهم‌راستابودن شاخه L و تقسیم مناسب گونه‌ها به شاخص اختلاط بالایی برسد، نامتوازن کردن میکرومیکسر تأثیر کمتری نسبت به طرح ۱ داشته است. اما در اعداد رینولدز پایین مانند عدد رینولدز ۵۰، شاخص اختلاط را به‌صورت قابل توجهی افزایش داده، به‌طوری که در طرح نامتوازن ۲، شاخص اختلاط را از ۴۹ به ۹۸٪ رسانده است. همچنین در نسبت عرضی برابر با ۲/۵ در تمام حالات اندکی به شاخص اختلاط بالاتری دست یافته است. به عبارت دیگر، نامتوازن کردن میکرومیکسر سه پیامد زیر را در پی داشته است:

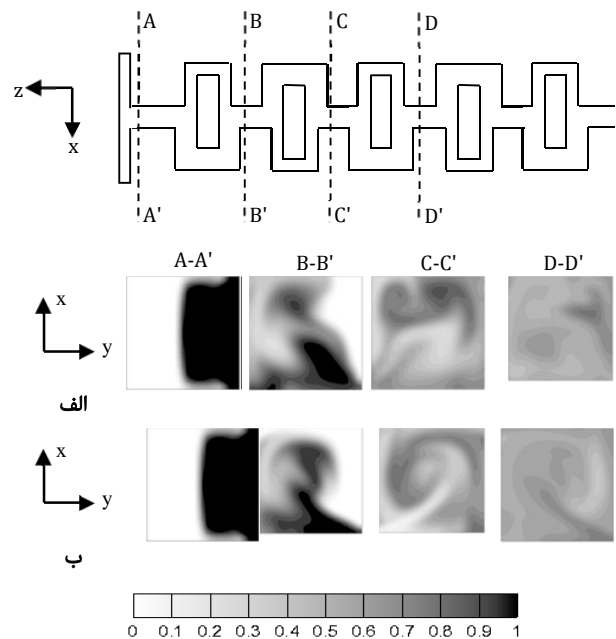
۲- افزایش عدد رینولدز در شاخه‌های میکرومیکسر به‌منظور جابه‌جایی آشوبناک

۳- افزایش قدرت گردابه در مکانیزم بازترکیب جریان. بنابراین عمل نامتوازن در طرح ۲ تنها با بهبود عدد رینولدز در شاخه‌ها و بهبود مکانیزم بازترکیب جریان، شاخص اختلاط را افزایش داده است. همچنین در نسبت عرضی بالا تقریباً تمام جریان وارد یک شاخه شده و همانند لامیکسر عمل کرده است.

در نمودار ۹، اثر میزان نامتوازن بودن شاخه‌های L در طرح ۱ بر افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش نامتوازن کردن میکرومیکسر با افت فشار همراه بوده است. به عبارت دیگر، افت فشار به‌علت چرخش‌های دو بُعدی و سه بُعدی جریان در میکرومیکسر و همچنین در مرحله تجزیه و بازترکیب عدد رینولدز در شاخه‌های L شکل افزایش یافته و چرخش‌های ۹۰ درجه در عدد رینولدز بالاتری صورت گرفته است و از آنجایی که با افزایش عدد رینولدز، افت فشار در شاخه‌های L افزایش می‌یابد، با افزایش نسبت نامتوانی، افت فشار بالاتری حاصل شده است.

در نمودار ۱۰ نیز اثر میزان نامتوازن بودن شاخه‌های L بر افت فشار در طرح ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. همانند طرح نامتوازن عرضی ۱، افزایش نامتوازن کردن میکرومیکسر با افت فشار همراه بوده است. همچنین افت فشار در طرح نامتوازن ۲ با نسبت عرضی

طرح L اشکل دوگانه ساده ۱ (نسبت عرضی ۱) به‌علت تقسیم نامناسب گونه‌ها و همچنین پایین بودن عدد رینولدز در شاخه‌های L، شاخص اختلاط نسبت به طرح‌های نامتوازن پایین‌تر شده است. در نسبت عرضی برابر با ۱/۴، با افزایش عدد رینولدز میزان بهبود شاخص اختلاط نسبت به حالت متوازن بیشتر بوده، به‌گونه‌ای که در عدد رینولدز ۲۰۰، طرح نامتوازن در نسبت عرضی برابر با ۱/۴، مقدار شاخص اختلاط در خروجی را از ۶۵ به ۸۳٪ افزایش داده، در حالی که در عدد رینولدز ۵۰ این مقدار از ۴۰ به ۵۰٪ افزایش یافته است. به عبارت دیگر، در اعداد رینولدز پایین به‌علت پایین‌تر بودن عدد رینولدز در شاخه‌های L اشکل، طرح نامتوازن عرضی ۱/۴ تفاوت چندانی با طرح متوازن خود نداشته است. علاوه بر این، در تمام اعداد رینولدز به‌جز عدد رینولدز ۵۰ که کوچک بوده، طرح نامتوازن عرضی برابر با ۲ نسبت به طرح نامتوازن برابر با ۴ بهتر عمل کرده، ولی در عدد رینولدز ۵۰ به همان علت پایین بودن عدد رینولدز در شاخه‌های L، به شاخص اختلاط پایین‌تری رسیده است. به عبارت دیگر، تغییر اندازه مقطع L اشکل‌های به‌کاررفته منجر به تغییر میزان دبی جریان در شاخه‌ها می‌شود و میزان عدد رینولدز در شاخه‌ها را تغییر می‌دهد. بنابراین در نسبت عرضی مشخصی، جریان داخل L اشکل‌ها آشوبناک می‌شود و همانند لامیکسر عمل می‌کند. همچنین چنانچه تمام جریان وارد یک شاخه L شود، تقریباً همانند L اشکل عمل می‌کند (طرح نامتوازن با نسبت مقطعی برابر با ۴) و عمل بازترکیب جریان صورت نمی‌گیرد. به عبارت دیگر در نمودار ۷، در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ طرح نامتوازن با نسبت مقطعی برابر با ۲، نسبت به طرح نامتوازن با نسبت مقطعی برابر با ۴ به‌علت تجزیه و بازترکیب جریان، بهتر عمل کرده است. اما در عدد رینولدز ۵۰، به‌علت آشوبناک‌نشدن جریان در شاخه‌های L ضعیف‌تر عمل کرده است. در نسبت عرضی برابر با ۲/۵ حتی در عدد رینولدز ۵۰، جریان در شاخه‌های L اشکل آشوبناک شده و مکانیزم بازترکیب جریان باعث شده است تا نسبت به طرح نامتوازن با نسبت مقطعی برابر با ۴ بهتر عمل کند.



شکل ۱۲) توزیع کسر جرمی اتانول در مقاطع نشان‌داده‌شده در عدد رینولدز ۱۰۰ برای طرح‌های ۱ و ۲؛ الف) طرح ۱؛ AWR=۲؛ ب) طرح ۲؛ AWR=۲.۵

۴-۴- عملکرد میکرومیکسر با شکل دوگانه و میکرومیکسر با شکل

مطالعه قبلی در مورد میکرومیکسر با شکل [17]، از ۱۰ واحد اختلاط در طول ۴۲۰۰ میکرومتر و در هر واحد از یک واحد با شکل مطابق با اندازه نشان‌داده‌شده در شکل ۱ استفاده شده بود. از طرفی میکرومیکسر با شکل [17] در اعداد رینولدز بالا در واحدهای اختلاط کمتری به شاخص مطلوب رسیده است.

بنابراین نتایج شاخص اختلاط و افت فشار برای میکرومیکسرهای با شکل دوگانه بررسی شده به همراه نتایج با میکسر [17] در جدول‌های ۳ تا ۶ ارائه شده است. جدول ۳، مقادیر شاخص اختلاط و افت فشار در تعداد واحدهای L در عدد رینولدز ۲۰۰ را گزارش داده است. همان‌طور که مشخص است، تمام میکرومیکسرها در عدد رینولدز ۲۰۰ به شاخص اختلاط بالایی رسیده‌اند. همچنین طرح ۲ با نسبت نامتوازن ۲ و ۲/۵ در تعداد واحد L کمتر یا طول کوتاه‌تری نسبت به میکسر به شاخص تقریباً یکسانی رسیده‌اند. علاوه بر این، افت فشار در طرح با میکسر نسبت به طرح‌های با شکل دوگانه بالاست. به عبارت دیگر، در طرح‌های با شکل دوگانه پایین‌تر بودن سرعت در شاخه‌های L نسبت به طرح با میکسر باعث افت فشار کمتر شده است. بنابراین در عدد رینولدز ۲۰۰، طرح ۲ با نسبت نامتوانی ۲ و ۲/۵ به علت اختلاط در فاصله کوتاه‌تر، طرح ساده ۲، طرح متعامد ۱ و طرح ۱ با نسبت نامتوانی ۲/۵ به علت افت فشار کمتر نسبت به میکسر بهتر عمل کرده‌اند.

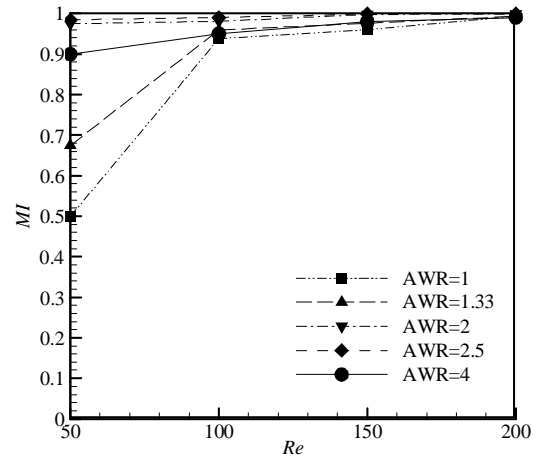
جدول ۴، مقادیر شاخص اختلاط و افت فشار در تعداد واحدهای L در عدد رینولدز ۱۵۰ را گزارش داده است. همانند عدد رینولدز ۲۰۰، تمام طرح‌ها به شاخص اختلاط بالایی رسیده‌اند، اما افت فشار در طرح با میکسر نسبت به طرح‌های با شکل دوگانه بالاتر است. بنابراین در عدد رینولدز ۱۵۰، طرح ۲ با نسبت نامتوانی ۲ و ۲/۵ به علت اختلاط بهتر و افت فشار کمتر، طرح ۱ با نسبت نامتوانی ۲/۵ و طرح متعامد ۱ به علت شاخص اختلاط یکسان و افت فشار کمتر نسبت به میکسر بهتر عمل کرده‌اند. اگر چه طرح ساده ۲ در واحد با شکل بیشتری به شاخص اختلاط با میکسر رسیده، اما افت فشار به مراتب کمتری ایجاد شده است.

جدول ۵، مقادیر شاخص اختلاط و افت فشار در تعداد واحدهای L در عدد رینولدز ۱۰۰ را گزارش داده است. همانند حالت‌های قبل، تمام طرح‌ها به شاخص اختلاط بالایی رسیده‌اند، اما افت فشار در طرح با میکسر نسبت به طرح‌های با شکل دوگانه بالاتر است. در عدد رینولدز ۱۰۰، طرح ۲ با نسبت نامتوانی ۲ و ۲/۵ به علت اختلاط یکسان و افت فشار کمتر، طرح ۱ با نسبت نامتوانی ۲/۵ و طرح متعامد ۱ به علت شاخص اختلاط تقریباً یکسان و افت فشار کمتر نسبت به میکسر بهتر عمل کرده‌اند.

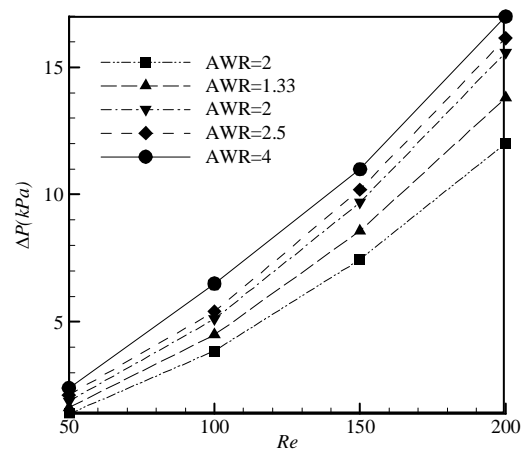
جدول ۶، مقادیر شاخص اختلاط و افت فشار در تعداد واحدهای L در عدد رینولدز ۵۰ را گزارش داده است. همانند حالت‌های قبل، تمام طرح‌ها به شاخص اختلاط مورد قبولی رسیده‌اند، اما افت فشار در طرح با میکسر نسبت به طرح‌های با شکل دوگانه بالاتر است. در عدد رینولدز ۵۰، طرح ۲ با نسبت نامتوانی ۲ و ۲/۵ به علت شاخص اختلاط بالاتر و افت فشار کمتر، طرح ۱ با نسبت نامتوانی ۲/۵ و طرح متعامد ۱ به علت شاخص اختلاط تقریباً یکسان و افت فشار کمتر نسبت به میکسر بهتر عمل کرده‌اند.

به عبارت دیگر، عمل تجزیه و بازترکیب جریان باعث شد تا طرح میکرومیکسر با شکل دوگانه نسبت به طرح با میکسر به شاخص اختلاط بالاتری (طرح ۲ نامتوان) برسد. همچنین مشکل اصلی طرح میکرومیکسر با شکل، افت فشار بالای آن بوده که مکانیزم

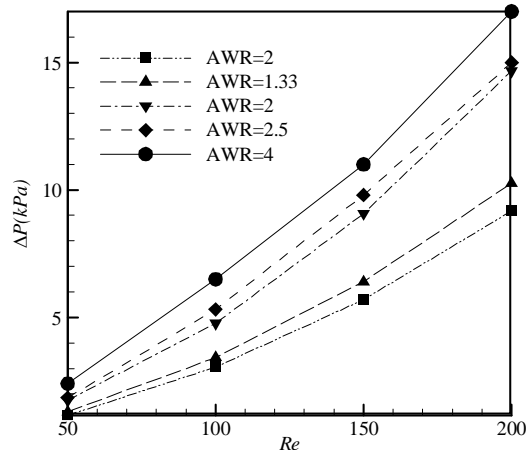
۴ تقریباً مشابه طرح نامتوان ۱ عمل کرد، اما در نسبت عرضی‌های دیگر تقریباً طرح ۲ نسبت به طرح ۱ بهتر عمل کرده است. از طرف دیگر، شاخص اختلاط در طرح ۲ با نسبت نامتوان ۲ و ۲/۵ مشابه عمل کرده و طرح ۲ با نسبت نامتوان عرضی ۲ نسبت به طرح ۲/۵، افت فشار بهتری داشته و در مجموع طرح ۲ با نسبت نامتوان عرضی ۲ بهتر عمل کرده است.



نمودار ۸) شاخص اختلاط در خروجی طرح ۲ نسبت به عدد رینولدز در مقادیر مختلف نسبت نامتوازن عرضی



نمودار ۹) افت فشار در خروجی بر حسب عدد رینولدز در طرح ۱، در مقادیر مختلف AWR



نمودار ۱۰) افت فشار در خروجی بر حسب عدد رینولدز در طرح ۲، در مقادیر مختلف AWR

مرجع	نام طرح	عدد رینولدز	تعداد واحدهای اختلاط	طول میکسر (mm)	شاخص اختلاط در خروجی (%)
[21]	میکرومیکسر نامتقارن (کانال دایره‌ای)	۸۰	۴	۴	۵۶
[22]	میکرومیکسر نامتقارن (کانال لوزی شکل)	۸۰	۴	۴	۵۶
[23]	میکرومیکسر با دیواره‌های همگرا و اگر	۷۰	۸	۶/۷	۸۱
[24]	میکرومیکسر با سه تقاطع	۸۰	۴	۴	۸۶
[12]	میکرومیکسر سه‌بُعدی با واحدهای OH شکل	به ۳۰ بالا	۱۰	۲/۱	۸۸
[25]	میکرومیکسر با ورودی‌های ناهم‌راستا	به ۳۰ بالا	۱۰	۳/۵	۸۸
حاضر	طرح ۲ با AWR=۲/۵	۵۰	۵	۴/۲	۹۸
حاضر	طرح ۱ با AWR=۲/۵	۵۰	۵	۴/۲	۹۶
حاضر	طرح متعامد ۱	۵۰	۵	۴/۲	۹۵

۷- نتیجه‌گیری

۱۲ طرح میکرومیکسر اشکل دوگانه براساس رویکرد تجزیه و بازترکیب مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی که دو واحد اشکل در یک صفحه و به صورت هم‌راستا قرار گرفته باشند، تقسیم‌گونه‌ها در مرحل تجزیه نامناسب بوده و باعث کاهش شاخص اختلاط شده است، اما اگر دو واحد اشکل به صورت ناهم‌راستا قرار گیرند، به‌علت جریان چرخشی در مرحله بازترکیب، شاخص اختلاط بزرگ‌تری حاصل شده است. همچنین طرح ۲ نسبت به طرح ۱ به‌علت برخورد نکردن مستقیم دو جریان، به افت فشار پایین‌تری رسیده است.

راهکار متعامد کردن ورودی‌ها تقریباً تأثیری بر افت فشار و ایجاد گردابه قوی‌تر نداشته و تنها مرحله تجزیه جریان را بهبود بخشیده است. متعامد کردن ورودی‌ها منجر به افزایش چشمگیر شاخص اختلاط در طرح ۱ شده، به‌گونه‌ای که حتی در عدد رینولدز ۵۰، متعامد کردن ورودی‌ها شاخص اختلاط را از ۴۰ به ۹۵٪ رسانده، اما در طرح ۲، ناهم‌راستابودن شاخه‌های اشکل پیش از این عمل تجزیه و بازترکیب را بهبود بخشیده و به همین دلیل، راهکار متعامد کردن ورودی‌ها تقریباً بر شاخص اختلاط بی‌تأثیر بوده است. راهکار نامتوازن کردن عرضی در هر حالت منجر به افزایش شاخص اختلاط و افت فشار در طرح‌های ۱ و ۲ شده است. نامتوازن کردن میکرومیکسر با افزایش عدد رینولدز در یک شاخه به‌منظور رسیدن به جابه‌جایی آشوبناک، عمل تجزیه مناسب سیال‌ها به‌واسطه استفاده از واحدهای اشکل غیریکسان و همچنین عمل بازترکیب مناسب به‌واسطه برخورد جریان با اینرسی قوی‌تر و ضعیف‌تر و ایجاد گردابه‌های چندجهته با افزایش قدرت ورتیسیته باعث بهبود اختلاط شده است. در طرح‌های نامتوازن با افزایش میزان نامتوانی، افت فشار به‌علت افزایش سرعت در شاخه‌ها افزایش یافته است. شاخص اختلاط نیز با افزایش نامتوازن کردن افزایش یافته، اما در مقادیر نامتوازن بالا با کاهش شاخص اختلاط همراه بوده است. در طرح نامتوازن با نسبت نامتوازن بالا (نسبت نامتوازن ۴) که تمام جریان وارد یک شاخه L شده، اختلاط تنها به‌واسطه ایجاد جریان آشوبناک در چرخش‌های ۹۰ درجه صورت گرفته، در حالی که در نسبت نامتوانی خاصی (طرح ۱ نسبت نامتوانی ۲/۵ و طرح ۲ نسبت نامتوانی ۲ و ۲/۵) اختلاط هم به‌واسطه چرخش‌های ۹۰ درجه در واحد L و هم تجزیه و بازترکیب

تجزیه و بازترکیب با تقسیم جریان، این مشکل را حل کرده است.

جدول ۳) مقایسه شاخص اختلاط و افت فشار در مطالعه حاضر با میکرومیکسر اشکل [17] در $Re=200$

میکرومیکسر	تعداد واحد L	شاخص اختلاط (%)	افت فشار (kPa)
میکرومیکسر اشکل [17]	۶	۹۸	۱۲/۸
طرح ۱ با AWR=۲/۵	۸	۹۹	۱۶/۸
طرح متعامد ۱	۶	۹۸	۹/۸
طرح ساده ۲	۶	۹۸	۷/۸
طرح ۲ با AWR=۲	۶	۹۹	۷/۶
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۶	۹۹	۹/۷

جدول ۴) مقایسه شاخص اختلاط و افت فشار در مطالعه حاضر با میکرومیکسر اشکل [17] در $Re=150$

میکرومیکسر	تعداد واحد L	شاخص اختلاط (%)	افت فشار (kPa)
میکرومیکسر اشکل [17]	۶	۹۶	۷/۹
طرح ۱ با AWR=۲/۵	۸	۹۹	۱۰/۲
طرح متعامد ۱	۶	۹۶	۵
طرح ساده ۲	۸	۹۹	۶/۶
طرح ۲ با AWR=۲	۱۰	۹۶	۵/۷
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۶	۹۷	۵/۸
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۶	۹۸	۶/۲

جدول ۵) مقایسه شاخص اختلاط و افت فشار در مطالعه حاضر با میکرومیکسر اشکل [17] در $Re=100$

نام میکرومیکسر	تعداد واحد L	شاخص اختلاط (%)	افت فشار (kPa)
میکرومیکسر اشکل [17]	۸	۹۵	۵/۳
طرح ۱ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۸	۶/۸
طرح متعامد ۱	۸	۹۴	۴/۳
طرح ساده ۲	۱۰	۹۸	۵/۲
طرح ۲ با AWR=۲	۸	۹۵	۳/۲
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۷	۳/۹
طرح ۲ با AWR=۲	۱۰	۹۴	۳
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۸	۹۷	۴/۴
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۸	۴/۸

جدول ۶) مقایسه شاخص اختلاط و افت فشار در مطالعه حاضر با میکرومیکسر اشکل [17] در $Re=50$

میکرومیکسر	تعداد واحد L	شاخص اختلاط (%)	افت فشار (kPa)
میکرومیکسر اشکل [17]	۸	۹۲	۲
طرح ۱ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۶	۲/۴
طرح متعامد ۱	۸	۹۲	۱/۲
طرح ساده ۲	۱۰	۹۶	۱/۵
طرح ۲ با AWR=۲	۸	۹۱	۱/۱
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۵	۱/۴
طرح ۲ با AWR=۲	۱۰	۹۷	۱/۷
طرح ۲ با AWR=۲/۵	۱۰	۹۸	۱/۸

۶-۵- عملکرد میکرومیکسر اشکل دوگانه و میکرومیکسرهای تجزیه و بازترکیب رایج محققان پیشین

جدول ۷، به مقایسه طرح حاضر و طرح میکرومیکسرهای محققان پیشین براساس رویکرد تجزیه و بازترکیب را گزارش داده است [21-25]. همان‌طور که مشخص است، میکرومیکسرهای پیشنهادی به‌علت استفاده از شاخه‌های اشکل و تغییر جهت ۹۰ درجه توانسته‌اند در واحد اختلاط کمتر یا فاصله کوتاه‌تر به شاخص اختلاط بالاتری دست یابند.

lamination effect in a vortex micro T-mixer with non-aligned inputs. *Heat and Mass Transfer*. 2016;52(3):611-619.

9- Chung CK, Shih TR, Wu BH, Chang CK. Design and mixing efficiency of rhombic micromixer with flat angles. *Microsystem Technologies*. 2010;16(8-9):1595-1600.

10- Ansari MA, Kim KY, Anwar K, Kim SM. A novel passive micromixer based on unbalanced splits and collisions of fluid streams. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2010;20(5):055007.

11- Viktorov V, Nimafar M. A novel generation of 3D SAR-based passive micromixer: Efficient mixing and low pressure drop at a low Reynolds number. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2013;23(5):055023.

12- Hossain Sh, Kim KY. Mixing analysis in a three-dimensional serpentine split-and-recombine micromixer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015;100:95-103.

13- Schönfeld F, Hessel V, Hofmann C. An optimised split-and-recombine micro-mixer with uniform 'chaotic' mixing. *Lab on a Chip*. 2004;4(1):65-69.

14- Chen X, Li T, Li X. Numerical research on shape optimization of microchannels of passive micromixers. *IEEE Sensors Journal*. 2016;16(17):6527-6532.

15- Liu RH, Stremmer MA, Sharp KV, Olsen MG, Santiago JG, Adrian RJ, et al. Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2000;9(2):190-197.

16- Kanaris AG, Stogiannis IA, Mouza AA, Kandlikar SG. Comparing the mixing performance of common types of chaotic micromixers: A numerical study. *Heat Transfer Engineering*. 2015;36(13):1122-1131.

17- Zare P, Talebi Sh. Numerical simulation of an L-shaped micromixer and investigation of the effect of variations of geometrical parameters on its performance. *Motares Mechanical Engineering*. 2017;17(3):293-304. [Persian]

18- Lin Y. Numerical characterization of simple three-dimensional chaotic micromixers. *Chemical Engineering Journal*. 2015;277:303-311.

19- Galletti Ch, Roudgar M, Brunazzi E, Mauri R. Effect of inlet conditions on the engulfment pattern in a T-shaped micro-mixer. *Chemical Engineering Journal*. 2012;185-186:300-313.

20- Nguyen NT. *Micromixers: Fundamentals, design and fabrication*. Amsterdam: Elsevier; 2008.

21- Ansari MA, Kim KY. A numerical study of mixing in a microchannel with circular mixing chambers. *AIChE Journal*. 2009;55(9):2217-2225.

22- Ansari MA, Kim KY. Mixing performance of unbalanced split and recombine micromixers with circular and rhombic sub-channels. *Chemical Engineering Journal*. 2010;162(2):760-767.

23- Afzal A, Kim KY. Passive split and recombination micromixer with convergent-divergent walls. *Chemical Engineering Journal*. 2012;203:182-192.

24- Hossain Sh, Kim KY. Mixing analysis of passive micromixer with unbalanced three-split rhombic sub-channels. *Micromachines*. 2014;5(4):913-928.

25- Husain A, Khan FA, Huda N, Ansari MA. Mixing performance of split-and-recombine micromixer with offset inlets. *Microsystem Technologies*. 2018;24(3):1511-1523.

صورت گرفته است. در نهایت، عملکرد میکرومیکسرهای با شکل دوگانه از لحاظ شاخص اختلاط و افت فشار با طرح با میکسر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از عمل تجزیه و بازترکیب در طرح‌هایی منجر به اختلاط کامل در فاصله کوتاه‌تر و در تمام طرح‌ها به شاخص اختلاط یکسان و افت فشار پایین‌تر نسبت به میکرومیکسر با شکل شده است. همچنین میکرومیکسرهای پیشنهادی به علت استفاده از واحدهای با شکل، به شاخص اختلاط بالاتری نسبت به میکرومیکسرهای پیشین محققان براساس رویکرد تجزیه و بازترکیب رسید.

در مجموع، با توجه به پایین بودن عدد رینولدز در میکرومیکسرها، مکانیزم اختلاط تنها از نوع دیفیوژن است. شاخص اختلاط در طرح با میکسر دوگانه با تجزیه، ترکیب و چرخش‌های مداوم خطوط جریان در سه بعد، به علت ایجاد جابه‌جایی آشوبناک بالاست. اگر چه این موضوع در ابعاد ماکرو نیز صادق است، اما در آن ابعاد کاربرد ندارد. زیرا در ابعاد ماکرو جریان معمولاً آشفته است و این آشفته‌گی می‌تواند در کوتاه‌ترین فاصله، بهترین اختلاط را ایجاد کند. همچنین در ماکرومیکسر استفاده از روش‌های فعال (مانند هم‌زن) به صرفه‌تر است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان متعهد می‌شوند که نتایج این مقاله در مجله دیگری چاپ نشده است یا در حال داوری نیست.

تعارض منافع: هر دو نویسنده منافع یکسانی از این مقاله دارند.

سهم نویسندگان: سیدشهاب‌الدین حسینی‌دهشیری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ شهرام طالبی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)

منابع مالی: در انجام این تحقیق از هیچ منبع مالی دولتی یا غیردولتی استفاده نشده است.

منابع

- 1- Stone HA, Stroock AD, Ajdari A. Engineering flows in small devices: Microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004;36:381-411.
- 2- Yager P, Edwards T, Fu E, Helton K, Nelson K, Tam MR, et al. Microfluidic diagnostic technologies for global public health. *Nature*. 2006;442(7101):412-418.
- 3- Vijayendran RA, Motsegood KM, Beebe DJ, Leckband DE. Evaluation of a three-dimensional micromixer in a surface-based biosensor. *Langmuir*. 2003;19(5):1824-1828.
- 4- Yaralioglu GG, Wygant IO, Marentis TC, Khuri-Yakub BT. Ultrasonic mixing in microfluidic channels using integrated transducers. *Analytical Chemistry*. 2004;76(13):3694-3698.
- 5- Wu Z, Nguyen NT. Convective-diffusive transport in parallel lamination micromixers. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2005;1(3):208-217.
- 6- Lee CY, Wang WT, Liu CC, Fu LM. Passive mixers in microfluidic systems: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2016;288:146-160.
- 7- Chen X, Shen J. Simulation and experimental analysis of a SAR micromixer with F-shape mixing units. *Analytical Methods*. 2017;9(12):1885-1890.
- 8- Rabani R, Talebi Sh, Rabani M. Numerical analysis of