

بررسی طرح‌های هندسی جدید برای میکرومخلوط‌کن‌ها به منظور بهینه‌سازی اختلاط سیالات غذایی و دارویی

علی وهابی^{۱*}، ابوالفضل فتاحی^۲

۱. دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه حرارت و سیالات (vahabi.ali1998@gmail.com)

۲. دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه حرارت و سیالات (afattahi@kashanu.ac.ir)

چکیده

با پیشرفت صنایع دارویی و غذایی نیاز برای اختلاط مواد مختلف در شرایط مختلف به منظور ساخت موادی همگن افزایش یافت. از اینرو، روش‌های متفاوتی برای اختلاط بیشتر جریان‌ها پیشنهاد شد. استفاده از میکرومخلوط‌کن‌ها از جمله موارد کارآ و مورد تأیید در این زمینه است که با پیشرفت صنعت ساخت توسعه یافت. با نیاز روزافزون صنایع، انتظار اختلاط سریع‌تر و همگن‌تر جریان سیال رشد یافت که یکی از عوامل توسعه میکرومخلوط‌کن‌ها بوده است. تغییرات هندسی میکرومخلوط‌کن یک ایده مناسب برای بهبود اختلاط جریان‌ها بدون اثرات چشمگیر در هزینه‌های اولیه است. تحقیق حاضر در ادامه تلاش‌های موجود سعی می‌کند به پیشنهاد هندسه‌هایی پردازد که می‌توانند از طرق مختلف به افزایش اختلاط دو جریان سرد و گرم کمک کنند. با استفاده از شبیه‌سازی عددی این طرح‌ها با یکدیگر مقایسه شده و طرح بهینه معرفی می‌شود. نتایج نشان دادند که با تغییرات هندسی می‌توان تا ۵ برابر اختلاط سیالات با دماهای متفاوت را نسبت به حالت پایه بهبود داد که البته منجر به افزایش ۲ برابری افت فشار نیز خواهد شد.

کلمات کلیدی:

میکرومخلوط‌کن، اختلاط جریان، انتقال حرارت، یکنواختی دما، افت فشار.

*نویسنده مسئول

۱- مقدمه

در دو دهه اخیر تجهیزات میکروسیالی تاثیر قابل توجهی بر روی تشخیص‌های پزشکی و بیوپزشکی داشته و به طور گسترده در تولید و توسعه دارو و صنایع تحقیقات زیست پزشکی استفاده شده‌اند [۱]. از جمله این دستگاه‌ها میکرومخلوط‌کن‌ها هستند. از کاربردهای میکرومخلوط‌کن‌ها در بیوپزشکی می‌توان به این موارد اشاره کرد: تعیین غلظت نمونه، سنتز شیمیایی، ایجاد واکنش شیمیایی، پلیمریزاسیون، استخراج و تصفیه، تجزیه و تحلیل بیولوژیکی و امولسیون [۲]. همچنین می‌توان از میکرومخلوط‌کن‌ها در تجزیه و تحلیل بیوشیمیایی، دستگاه‌های آزمایشگاهی روی تراشه (LOC) و کنترل ایمنی مواد غذایی بهره برد [۳]. در سیستم‌های میکروسیالی نسبت سطح به حجم جریان افزایش می‌یابد که برای بسیاری از کاربردها سودمند است [۴و۵]. اما پایین بودن عدد رینولدز در میکرومخلوط‌کن‌ها منجر به جریان آرام می‌شود، از این رو اختلاط مواد عمدتاً به صورت پخش صورت می‌گیرد که به طور ذاتی کند است. در نتیجه برای افزایش قابلیت اختلاط، طراحی مناسب ساختار میکرومخلوط‌کن‌ها ضروری است [۶و۷].

میکرومخلوط‌کن‌ها با توجه به طرز کارکردشان به دو نوع تقسیم می‌شوند: فعال و غیر فعال. در میکرومخلوط‌کن‌های فعال برای افزایش اختلاط جریان از انرژی‌های خارجی مانند میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی و ارتعاش آلتراسونیک استفاده می‌شود. با وجود اینکه میکرومخلوط‌کن‌های فعال موثرترند، اما به دلیل پیچیده بودن، سخت بودن فرآیند ساخت، قطعات متحرک و هزینه بالا کاربرد زیادی ندارند. میکرومخلوط‌کن‌های غیر فعال به جز انرژی لازم برای پمپ کردن سیال به انرژی دیگری نیاز ندارند. در گونه غیر فعال با تغییر هندسه کانال می‌توان طول انتشار را کاهش و سطح تماس را افزایش داد که در نهایت باعث افزایش میزان اختلاط می‌شود [۸و۹]. استفاده از میکرومخلوط‌کن‌های غیرفعال به دلیل سهولت ساخت و ارزان بودن در کاربردهای مختلف افزایش پیدا کرده است [۱۰].

ساده‌ترین نوع میکرومخلوط‌کن‌ها که با الهام گرفتن از طبیعت مدل‌سازی شده است می‌توان به میکرومخلوط‌کن‌های T شکل اشاره کرد. وونگ و همکاران [۱۱] آزمایشاتی برای بررسی ویژگی‌های اختلاط در میکروکانال‌ها انجام دادند و مشاهده کردند که با ایجاد جریان ثانویه، جریان چرخشی و گردابی در آن می‌توان به اختلاط سریع رسید. وانگ و همکاران [۱۲] با توسعه جریان در میکرومخلوط‌کن T شکل و با ایجاد جریان گردابی در آن به اختلاط یکنواخت در طول کوتاه‌تر دست پیدا کردند. محققان برای بهبود عملکرد اختلاط، تحقیقاتی برای اصلاح هندسه میکرومخلوط‌کن‌ها انجام دادند که می‌توان به ایجاد اشکال متفاوت مانند موج‌دار، زیگ‌زاگ، دیوار منحنی و وجود موانع اشاره کرد [۱۳و۱۴].

بورگوین و همکاران [۱۵و۱۶] میکرومخلوط‌کن‌های T شکل متقاطع با موانعی به شکل منحنی در حالت سه بعدی از نظر عملکرد را مورد مطالعه و مقایسه قرار دادند. آن‌ها گزارش دادند که افزایش اختلاط و افت فشار کمتر برای موانع به صورت منحنی نسبت به موانع خطی صورت می‌پذیرد. هیونمینگ و همکاران [۱۷] روی پنج نوع میکرومخلوط‌کن غیرفعال از قبیل مخلوط‌کن به شکل‌های حلزونی مسطح، SAR^۱ مسطح، ماریچ سه بعدی، سه بعدی SAR و با هندسه واگرا را مورد ارزیابی تطبیقی قرار دادند. اسدی و همکاران [۱۸] پدیده اختلاط در میکرومخلوط‌کن‌های سینوسی و تاثیر نابرابر بودن طول موج در دیوار-های بالایی و پایینی را مورد بررسی قرار دادند. چن و همکاران [۱۹] با مقایسه شش نوع هندسه به این

^۱ split-and-recombination

نتیجه رسیدند که میکرومخلوط‌کن‌های مارپیچ مربعی تاثیر قابل توجهی روی اختلاط دارند. داس و همکاران [۲۰] میکرومخلوط‌کن‌های مستقیم و مارپیچ را مقایسه کردند و گزارش دادند که عملکرد مخلوط‌کننده مارپیچ تقریباً در همه شرایط بهتر است.

از مرور مطالعات منتخب در بالا مشخص است که تلاش برای معرفی هندسه میکرومخلوط‌کن‌هایی با اختلاط باکیفیت‌تر و در طول کمتر همچنان مورد توجه و در حال گسترش است. از اینرو، بررسی حاضر قصد دارد به معرفی انواع جدیدی از میکرومخلوط‌کن‌ها برای ایجاد اختلاط بهتر جریان‌های با دمای مختلف بپردازد. هندسه‌های جدید با استفاده از شبیه‌سازی عددی ارزیابی خواهند شد.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲ معادلات حاکم

جریان در میکرومخلوط‌کن‌ها به صورت پایا و تراکم‌ناپذیر و سیال عامل نیوتنی در نظر گرفته می‌شود. همچنین، شرایط جریان آرام می‌باشد. برای تحلیل جریان و انتقال حرارت سه معادله پیوستگی (معادله ۱)، مومنتم (معادله ۲ و ۳) و انرژی (معادله ۴) مورد نیاز است.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

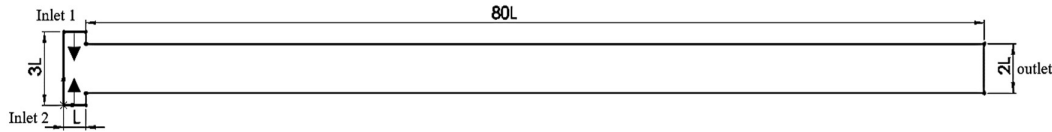
در معادلات بالا، ρ ($\frac{Kg}{m^3}$) چگالی، p ($\frac{N}{m^2}$) فشار، T (K) دما و u و v سرعت‌ها ($\frac{m}{s}$) در جهات x و y می‌باشند. همچنین، C_p ($\frac{J}{Kg K}$) و μ ($\frac{Kg}{m.s}$) ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت دینامیکی می‌باشند. پارامترهای بدون بعد در این جریان از قبیل عدد رینولدز $Re = \frac{uL}{\nu}$ و عدد اشویت $Sc = \frac{\nu}{D}$ می‌باشد. در تحلیل حاضر L عرض ورودی سیال است که در بخش بعد نمایش داده می‌شود. در بررسی حاضر آب به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. تحلیل عددی به صورت دو بعدی و در نرم‌افزار آنسیس فلونت^۲ انجام شده است.

۲-۲ هندسه‌های مورد بررسی

در همه هندسه‌ها عرض ورودی برابر L ، عرض خروجی برابر $2L$ و طول ناحیه اختلاط L در نظر گرفته شده است. سیال گرم از سمت چپ و بالای هندسه و سیال سرد از سمت چپ و پایین هندسه وارد میکرومخلوط‌کن می‌شود و پس از اختلاط در طول هندسه از قسمت راست خارج می‌شود. ساده‌ترین

² Ansys Fluent

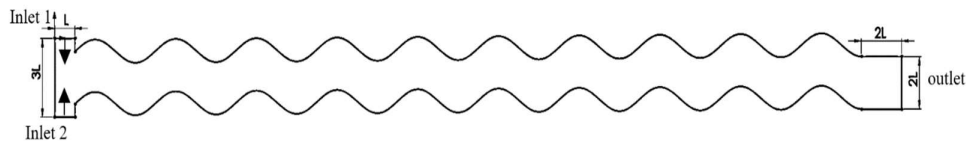
نوع هندسه که می‌توان به عنوان شاخص برای تعیین اثر بخشی سایر هندسه‌ها در نظر گرفت نوع میکرومخلوط کن T شکل است.



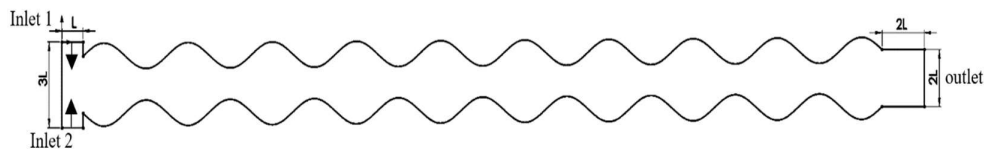
شکل ۱: هندسه پایه یک میکرومخلوط کننده T شکل (هندسه ۱)

میزان اختلاط را می‌توان با تغییر در هندسه افزایش داد. به همین منظور از دیواره‌های موج‌دار، همگرا-واگرا و مارپیچ در بررسی حاضر استفاده می‌شود که هندسه‌های مربوطه به ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۴ نمایش داده شده‌اند.

دیواره‌ها در شکل ۲ به صورت موجی با معادله $S(x) = -0.075 - 0.0675 * \sin(2\pi * \frac{(x-0.15)}{0.6} + \pi)$ ایجاد شده‌اند. در شکل ۳ دیواره بالا با معادله شکل ۲ و دیواره پایین با معادله $S(x) = -0.375 + 0.0675 * \sin(2\pi * \frac{(x-0.15)}{0.6} + \pi)$ رسم شده‌اند. در واقع ایده ایجاد اختلاف فاز در شکل دیواره‌های موجی شکل مخلوط کن در شکل‌های ۲ و ۳ مطالعه شده است. مسیر جریان در شکل ۴ به میزان $2L$ منحرف شده و معادله دیواره‌ها در این هندسه همانند شکل ۲ در نظر گرفته شده است. معادله دیواره‌ها در شکل ۵ همانند شکل ۴ است اما در مسیر جریان موانع مستطیل شکل برای ایجاد اختلاط به ابعاد $\frac{2L}{3} \times \frac{13L}{15}$ قرار داده شده است. در شکل ۶ معادله دیواره‌ها مانند شکل ۴ رسم شد و برای کاهش میزان افت فشار در جریان، مسیر جریان در گذرگاه‌ها عریض‌تر و همچنین میزان انحراف مسیر $2L$ و موانع مربعی به ضلع $2L$ انتخاب شدند. در هندسه‌های مذکور $L = 150 \mu m$ می‌باشد.



شکل ۲: هندسه میکرومخلوط کننده با دیواره‌های موجی شکل (هندسه ۲)



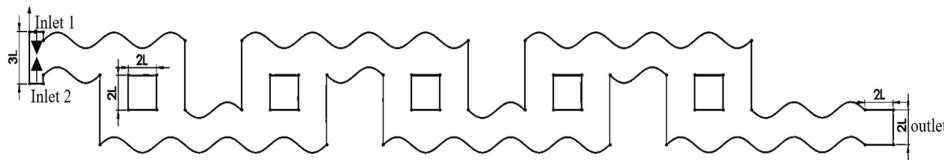
شکل ۳: هندسه میکرومخلوط کننده با دیواره‌های همگرا-واگرا (هندسه ۳)



شکل ۴: هندسه میکرومخلوط کننده با دیواره‌های مارپیچ (هندسه ۴)



شکل ۵: هندسه میکرومخلوط کننده از ترکیب دیواره مارپیچ و SAR با گذرگاه باریک (هندسه ۵)



شکل ۶: هندسه میکرومخلوط کننده از ترکیب دیواره ماریچ و SAR با گذرگاه عریض (هندسه ۶)

۳-۲ شرایط مرزی و روش عددی

شرایط مرزی برای تحلیل و شبیه‌سازی جریان در نرم‌افزار فلوئنت برای ورودی‌ها به صورت velocity inlet و برای خروجی جریان pressure-outlet انتخاب شد. در این بخش دمای سیال ورودی از Inlet1، ۸۰ درجه سلسیوس و برای Inlet2، ۲۰ درجه سلسیوس تنظیم شد و با توجه به اینکه در هر هندسه به تحلیل جریان با دو رینولدز ۷/۵ و ۲۵ پرداخته شد سرعت در ورودی‌ها به ترتیب برابر ۰/۰۵ و ۰/۱۶۷ متر بر ثانیه جایگذاری شد. برای دیواره‌های هندسه شرایط Stationary Wall و No slip و در بخش حرارتی حالت Heat Flux با مقدار صفر انتخاب شدند.

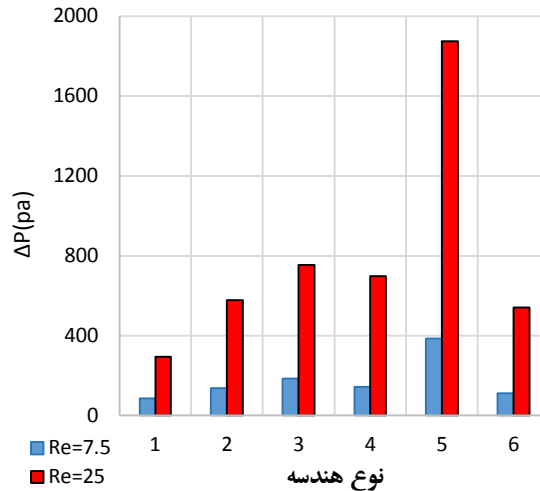
برای حل معادلات حاکم بر جریان از الگوریتم SIMPLE و برای افزایش دقت در تحلیل از Second Order برای تمام مشتقات استفاده شده است. مقدار معیار همگرایی باقیمانده برای معادلات پیوستگی و ممنتوم 10^{-3} و برای معادله انرژی 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج

در این بخش نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی برای هندسه‌های معرفی شده ارائه می‌گردد و با استفاده از نتایج به مقایسه هندسه‌های مختلف و انتخاب بهترین نوع آن‌ها می‌پردازیم. قبل از شبیه‌سازی عددی، بررسی کوک و همکاران [۲۱] در زمینه بهبود اختلاط در جریان خروجی یک کانال دوبعدی با مانع در راه جریان تکرار شد و خطای ۴ درصد برای دمای خروجی از کانال بدست آمد. چنانکه پیشتر بیان شد دیواره‌ها در هندسه ۱ کاملاً صاف هستند و به عنوان معیار برای مقایسه با دیگر هندسه‌ها می‌باشد. جدول ۱ نتایج دمایی این طرح را در طول‌های مختلف (سنجیده شده نسبت به ورودی) و دو عدد رینولدز نمایش می‌دهد. مشهود است که با افزایش فاصله از ورودی مقدار اختلاف دمای جریان‌های گرم (T_{max}) و سرد (T_{min}) کمتر می‌شود. نکته جالب توجه بهتر بودن روند اختلاط با در نظر گرفتن اختلاف دماهای کمتر برای عدد رینولدز ۷/۵ در مقایسه با عدد رینولدز ۲۵ است. در نزدیکی انتهای میکرومخلوط کن ($x=0/12$) اختلاف دمای موجود در عدد رینولدز کمتر حدود ۳۵ برابر کوچکتر از عدد رینولدز بیشتر است. این نشان می‌دهد در این هندسه به دلیل غلبه لایه‌های مرزی سرعت بر جریان، اختلاط در سرعت‌های کمتر بهتر انجام می‌شود. علاوه بر این کمتر بودن سرعت جریان به معنی افزایش زمان ماندگاری در مخلوط کن و افزایش احتمال اختلاط است. نتایج عددی مطابق نمودار ۱ افت فشار را برای عدد رینولدز ۷/۵ و ۲۵ به ترتیب مقادیر $85/24$ kpa و $293/24$ kpa نشان می‌دهند که نشان دهنده میزان انرژی لازم بیشتر برای حرکت سیال در حالت عدد رینولدز بزرگتر است.

جدول ۱: مقادیر دمای پیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۱

X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
Re	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T_{max}	۸۰	۸۰	۶۷/۴۵	۷۸/۷۳	۵۷/۳۵	۷۳/۶۲	۵۳/۱۵	۶۸/۴۶	۵۱/۳۵	۶۴/۲۷	۵۰/۵۵	۶۱/۰۴	۵۰/۲۵	۵۸/۵۲
T_{min}	۲۰	۲۰	۳۲/۵۵	۲۱/۲۷	۴۲/۶۵	۳۶/۳۸	۴۶/۸۸	۳۱/۵۴	۴۸/۶۵	۳۵/۷۱	۴۹/۴۵	۳۸/۹۶	۴۹/۷۵	۴۱/۴۸
$\Delta T(^{\circ}C)$	۶۰	۶۰	۳۴/۹۰	۵۷/۴۶	۱۴/۷۰	۴۷/۲۴	۶۲/۲۰	۳۶/۹۲	۲/۷۰	۲۸/۵۶	۱/۱۰	۲۲/۰۸	۰/۵۰	۱۷/۰۴



نمودار ۱: افت فشار در هندسه‌های مختلف برای دو عدد رینولدز مورد بررسی

جدول ۲ مقادیر مشابه جدول ۱ را برای هندسه ۲ نمایش می‌دهد. مقدار اختلاف دمای پیشینه و کمینه نسبت به هندسه ۱ کاهش یافته است. مقدار اختلاف دما برای عدد رینولدز ۷/۵ تا ۵ برابر و برای عدد رینولدز ۲۵ تا ۲/۵ برابر کاهش می‌یابد که نشان دهنده بهبود اختلاط نسبت به هندسه پایه ۱ است. همچنان مشاهده می‌شود که کارکرد اختلاط مخلوط کن در عدد رینولدز کمتر بهتر است. مقادیر افت فشار با توجه به نمودار ۱ برای عدد رینولدز ۷/۵ و ۲۵ برابر $۱۳۷/۹۵$ kpa و $۵۷۷/۶۸$ kpa می‌باشند که نشان دهنده افزایش افت فشار نسبت به هندسه پایه به بهای افزایش اختلاط می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر دمای پیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۲

X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
Re	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T_{max}	۸۰	۸۰	۶۴/۳۵	۷۵/۵۱	۵۵/۲۵	۶۷/۷۹	۵۱/۷۵	۶۱/۸۶	۵۰/۶۵	۵۸/۰۳	۵۰/۲۵	۵۵/۵۲	۵۰/۰۵	۵۳/۷۴
T_{min}	۲۰	۲۰	۳۵/۱۵	۲۴/۲۰	۴۴/۹۵	۳۲/۴۹	۴۸/۱۵	۳۸/۰۷	۴۹/۳۵	۴۱/۸۸	۴۹/۷۵	۴۴/۵۸	۴۹/۹۵	۴۶/۲۸
$\Delta T(^{\circ}C)$	۶۰	۶۰	۲۹/۲۰	۵۱/۳۵	۱۰/۳۰	۳۵/۳۰	۳/۶۰	۲۳/۷۹	۱/۳۰	۱۶/۱۵	۰/۵۰	۱۰/۹۴	۰/۱۰	۷/۴۶

نتایج بدست آمده برای هندسه شماره ۳ در جدول ۳ نمایش داده شده است. این هندسه دیواره‌هایی سینوسی و همگرا-واگرا داشت. برای عدد رینولدز ۷/۵، میزان اختلاف دمای بدست آمده بیشتر از هندسه شماره ۲ و البته کمتر از هندسه ۱ است. با اینحال، این بهبود در عدد رینولدز ۲۵ دیده نمی‌شود. همچنین افت فشار برای اعداد رینولدز ۷/۵ و ۲۵ به ترتیب $۱۸۶/۲۴$ kpa و $۵۵۳/۶۱$ kpa بدست آمد (به نمودار ۱)

نگاه کنید) که نسبت به مقادیر مشابه هندسه ۲ بیشتر است. از اینرو، می‌توان نتیجه گرفت هندسه شماره ۳ نسبت به هندسه ۲ کارایی کمتری دارد.

جدول ۳: مقادیر دمای بیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۳

X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
Re	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T _{max}	۸۰	۸۰	۶۳/۹۵	۷۶/۸۶	۵۴/۸۸	۶۹/۴۸	۵۱/۷۵	۶۳/۴۷	۵۰/۵۵	۵۹/۱۷	۵۰/۱۵	۵۶/۴۴	۵۰/۰۵	۵۴/۵۱
T _{min}	۲۰	۲۰	۳۵/۹۵	۲۳/۱۴	۴۵/۱۰	۳۰/۵۱	۴۸/۲۵	۳۶/۵۱	۴۹/۴۵	۴۰/۸۱	۴۹/۷۵	۴۳/۵۴	۴۹/۹۵	۴۵/۴۸
ΔT(°C)	۶۰	۶۰	۲۸	۵۳/۷۲	۹/۷۸	۳۸/۹۷	۳/۵۰	۲۶/۹۶	۱/۱۰	۱۸/۳۶	-۰/۴۰	۱۲/۹۰	-۰/۱۰	۹/۰۳

در هندسه شماره ۴ حرکت سیال تحت اثر دیواره‌های موجی شکل و مسیر مارپیچ است. نتایجی که در جدول ۴ نشان داده شده گواهی بهبود اختلاط نسبت به تمام هندسه‌های پیشین است. نسبت به هندسه ۲، در این هندسه کاهش میانگین ۱۵ و ۲۰ درصد به ترتیب برای اختلاف دمای رینولدزهای ۷/۵ و ۲۵ داریم. این نتایج نشان می‌دهد استفاده همزمان از اثرات تغییرات دیواره و انحراف مسیر حرکت سیال در بهبود اختلاط نقش مهمی دارند. در این هندسه نیز مانند قبل اختلاط در عدد رینولدز کمتر کارا تر است. چنانکه در نمودار ۱ نمایش داده شده است، افت فشار در این هندسه برای عدد رینولدز کمتر و بیشتر به ترتیب برابر ۱۴۳/۴۴ kpa و ۶۹۸/۹ kpa بدست آمده است که از هندسه سوم کمتر اما از هندسه دوم بیشتر است.

جدول ۴: مقادیر دمای بیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۴

X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
Re	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T _{max}	۸۰	۸۰	۶۴/۰۵	۷۴/۵۹	۵۴/۳۵	۶۵/۸۱	۵۱/۳۵	۵۹/۶۹	۵۰/۴۵	۵۶/۱۰	۵۰/۱۵	۵۳/۸۴	۵۰/۰۵	۵۲/۴۱
T _{min}	۲۰	۲۰	۳۶/۷۵	۲۶/۱۲	۴۵/۳۵	۳۳/۸۹	۴۸/۶۵	۴۰/۴۱	۴۹/۵۵	۴۴/۱۹	۴۹/۸۵	۴۶/۰۹	۴۹/۹۵	۴۷/۶۰
ΔT(°C)	۶۰	۶۰	۲۷/۳۰	۲۸/۴۷	۹/۰	۳۱/۹۲	۲/۷۰	۱۹/۲۸	-۰/۹۰	۱۱/۹۱	-۰/۳۰	۷/۷۵	-۰/۱۰	۴/۸۱

در هندسه ۵ از ترکیب مواردی چون دیواره موجی شکل، انحراف مسیر جریان و موانع برای بهبود اختلاط جریان‌های سرد و گرم استفاده شده است. نسبت به هندسه شماره ۴، در مقادیر اختلاف دمای عدد رینولدز ۷/۵ بهبودی حاصل نشده است. اما بهبود اندکی در عدد رینولدز ۲۵ حاصل شده است. با این وجود مطابق نمودار ۱ مقادیر بسیار بالای افت فشار در عدد رینولدز ۲۵ که بیش از دو برابر مقادیر قبلی افزایش پیدا می‌کند این هندسه را در عدد رینولدز مذکور نسبت به هندسه‌های پیشین بسیار پرهزینه جلوه می‌دهد. علاوه بر این در عدد رینولدز ۷/۵ افت فشار این هندسه به طور میانگین تا دو برابر بیشتر از سایر هندسه‌ها است. از نظر حرارتی نیز این هندسه مزیتی نسبت به هندسه ۴ ندارد و لذا در اولویت انتخاب نمی‌باشد.

جدول ۵: مقادیر دمای بیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۵

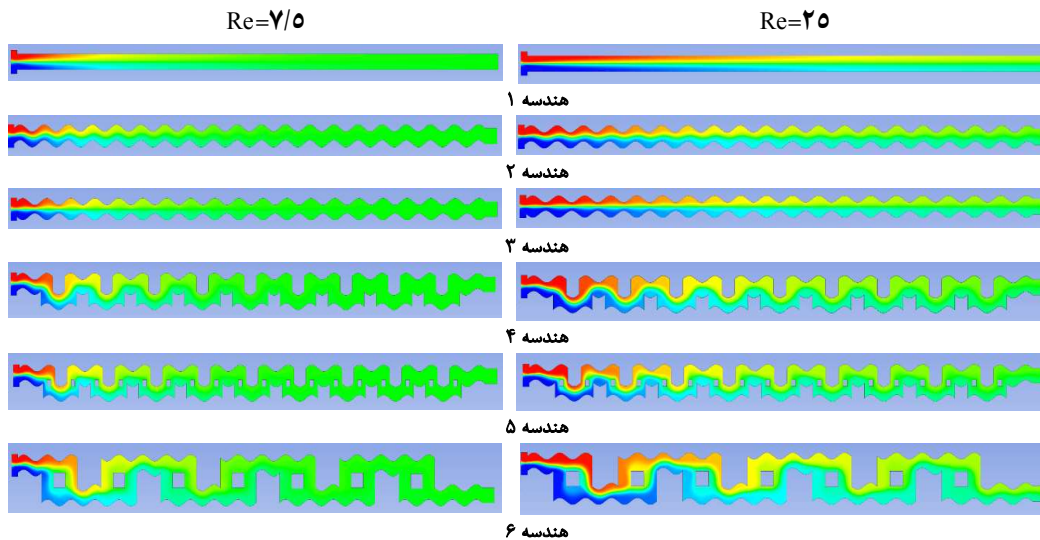
X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
Re	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T _{max}	۸۰	۸۰	۶۳/۶۵	۷۳/۴۷	۵۴/۱۵	۶۴/۶۶	۵۱/۴۵	۵۹/۰۴	۵۰/۵۵	۵۵/۹۵	۵۰/۱۵	۵۳/۶۰	۵۰/۰۵	۵۲/۴۵
T _{min}	۲۰	۲۰	۳۷/۶۵	۲۶/۸۸	۴۵/۰۵	۳۴/۰۸	۴۸/۴۵	۴۰/۵۴	۴۹/۵۵	۴۴/۳۰	۴۹/۸۵	۴۶/۱۱	۴۹/۹۵	۴۷/۵۸
ΔT(°C)	۶۰	۶۰	۲۶	۴۹/۵۹	۹/۱۰	۳۰/۵۸	۳/۰	۱۸/۵۰	۱/۰	۱۱/۶۵	-۰/۳۰	۷/۴۹	-۰/۱۰	۴/۸۱

هندسه ۶ تلاش کرده است از مزایای موارد اشاره شده در هندسه ۵ استفاده کند. علاوه بر اینکه تغییر جهات نود درجه‌ای سیال تداعی ایجاد یک جریان آشوبناک^۳ را می‌کند. با این وجود نسبت به هندسه شماره ۴ و حتی ۵ بهبودی در زمینه انتقال حرارت دیده نمی‌شود. اما با توجه به نمودار ۱ میزان افت فشار در این هندسه کمتر از تمامی طرح‌های ارائه شده پیشین است که برای اعداد رینولدز ۷/۵ و ۲۵ به ترتیب برابر $112/71 \text{ kpa}$ و $541/46 \text{ kpa}$ می‌باشد.

جدول ۶: مقادیر دمای پیشینه، کمینه و اختلاف دما در مقاطع مختلف هندسه ۶

X(m)	۰		۰/۰۰۲		۰/۰۰۴		۰/۰۰۶		۰/۰۰۸		۰/۰۱		۰/۰۱۲	
	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵	۷/۵	۲۵
T_{max}	۸۰	۸۰	۶۶/۳۵	۷۶/۳۲	۵۷/۵۵	۷۰/۴۳	۵۳/۲۵	۶۴/۲۰	۵۱/۳۵	۶۰/۲۱	۵۰/۶۵	۵۷/۷۰	۵۰/۲۵	۵۵/۳۴
T_{min}	۲۰	۲۰	۳۲/۴۵	۲۲/۷۰	۴۳/۴۵	۳۱/۲۲	۴۶/۴۵	۳۴/۷۶	۴۸/۵۵	۳۹/۴۳	۴۹/۴۵	۴۲/۹۲	۴۹/۷۵	۴۴/۵۶
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	۶۰	۶۰	۳۳/۹۰	۵۳/۶۲	۱۴/۱۰	۳۹/۲۱	۶/۸۰	۲۹/۴۴	۲/۸۰	۲۰/۷۸	۱/۲	۱۴/۷۸	۰/۵	۱۰/۷۸

شکل ۷ اختلاط جریان‌های سرد (با رنگ آبی) و گرم (با رنگ قرمز) را از طریق کانتورهای دما نشان می‌دهد. مشخص است که در عدد رینولدز بیشتر طول بیشتری برای اختلاط وجود دارد. در واقع سرعت بیشتر جریان سیال عامل منفی در اختلاط جریان‌ها با فرار زودتر آن‌ها از سطوح مشترک جریان‌هاست. در تمام هندسه‌های عدد رینولدز ۷/۵ یکنواختی رنگ ایجاد شده قبل از نیمه کانال به‌خوبی نشان‌دهنده اختلاط مناسب است. حال آنکه در عدد رینولدز ۲۵ حتی تا انتهای کانال مخلوط‌کن اختلاف رنگ جریان‌های سرد و گرم مشهود است. این موضوع ناشی از اثر سریع‌تر لایه‌های مرزی بر اختلاط جریان‌ها در عدد رینولدز کوچکتر است.

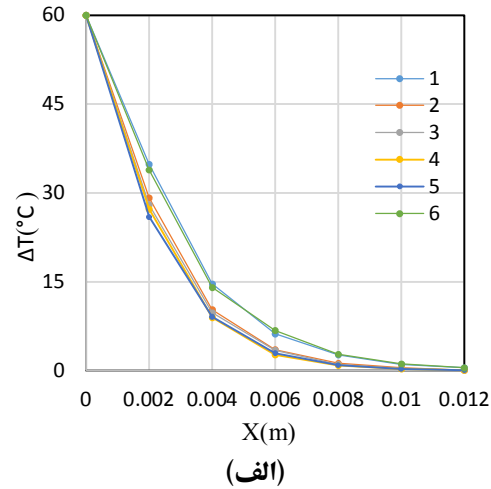
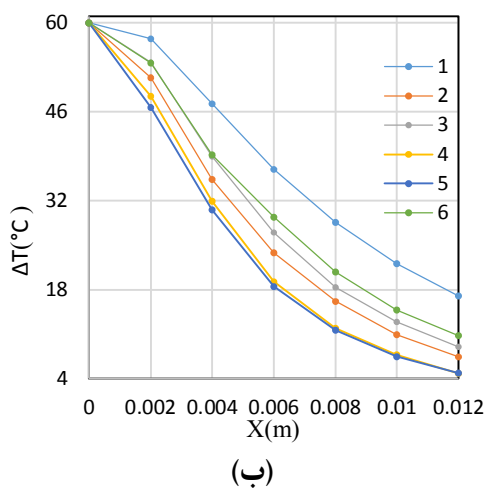


شکل ۷: کانتور دما برای هندسه‌های مورد بررسی در اعداد رینولدز ۷/۵ و ۲۵.

برای تصمیم‌گیری بهتر در انتخاب هندسه بهینه از بین موارد معرفی شده بهتر است از تغییرات تصویری دما در امتداد میکرومخلوط‌کن استفاده شود. نمودار ۲ نشان می‌دهد که در $Re=7.5$ و در ابتدای مسیر

³ Chaotic flow

هندسه ۵ بیشترین نرخ کاهش اختلاف دما را دارد اما در ادامه مسیر نرخ کاهش دمای دو هندسه ۴ و ۵ باهم برابر می‌شوند. از نمودار ۱ که افت فشار را نشان می‌دهد به راحتی می‌توان مشاهده کرد که به مراتب افت فشار در هندسه ۵ بیشتر از هندسه ۴ می‌باشد و از مقایسه همزمان افت فشار و اختلاف دما می‌توان پیشنهاد داد که هندسه ۴ بهینه و کارتر از سایر هندسه‌ها است. در $Re=25$ نیز چنین مقایسه‌ای معتبر است و هندسه شماره ۴ به عنوان بهینه معرفی می‌شود. هرچند با توجه به بهبود اختلاط در تمام هندسه‌های معرفی شده نسبت به هندسه پایه، می‌توان از هر کدام از آن‌ها با توجه به محدودیت‌های فضایی سیستم و نیز مشکلات احتمالی ساخت استفاده کرد.



نمودار ۲: تغییرات اختلاف دمای هندسه‌های معرفی شده در طول میکرومخلوط‌کن برای (الف) عدد رینولدز ۷/۵ و (ب) برای عدد رینولدز ۲۵

۴- نتیجه‌گیری

میکرومخلوط‌کن‌ها امروزه اهمیت بسیار زیادی در صنایع دارویی و غذایی دارند و این خود عامل مهمی در توسعه مطالعات در مورد این موضوع طی سال‌های اخیر است. توسعه فناوری‌های ساخت و تولید، امکان استفاده از این تجهیزات در ابعاد کوچک را فراهم کرده است. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه، نیاز به معرفی ساختارهای جدید در اختلاط غیرفعال میکرومخلوط‌کن‌ها وجود دارد. در این مطالعه طرح‌های هندسی جدیدی با استفاده از تغییرات در دیواره‌ها، تغییر مسیر جریان و ایجاد موانع در آن معرفی و از نظر بهبود اختلاط ارزیابی شدند. به‌طور خلاصه نتایج زیر بدست آمد.

۱. افزایش میزان اختلاط از طریق افزایش طول لوله، ایجاد موانع بر سر راه جریان، تغییر شکل دیواره-ها و کاهش عدد رینولدز امکان‌پذیر است.
۲. با تغییر موارد بالا به منظور افزایش میزان اختلاط، افت فشار در مسیر افزایش می‌یابد که میزان این افزایش افت در همه موارد برابر نیست.
۳. با افزایش عدد رینولدز، میزان اختلاط کمتر می‌شود که ناشی از ضعف مشارکت پدیده پخش به عنوان پدیده غالب در اختلاط میکرومخلوط‌کن‌ها است.

۴. اگر چه تمام طرح‌های معرفی شده نسبت به حالت معمول اختلاط بیشتری ایجاد می‌کردند، اما طرح هندسه شماره ۴ می‌توانست به میزان ۵ برابر در اختلاف دمای موجود در انتهای مخلوط‌کن نسبت به حالت پایه کاهش ایجاد کند. این مزیت البته با افزایش ۱۰۰ و ۵۰ درصدی افت فشار به ترتیب برای رینولدزها ۲۵ و ۷/۵ بود.

منابع

- 1- Yang, R. J., Hou, H. H., Wang, Y. N., & Fu, L. M. (2016). Micro-magnetofluidics in microfluidic systems: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 224, 1-15.
- 2- Lee, C. Y., & Fu, L. M. (2018). Recent advances and applications of micromixers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 259, 677-702.
- 3- Mondal, B., Mehta, S. K., Patowari, P. K., & Pati, S. (2019). Numerical study of mixing in wavy micromixers: comparison between raccoon and serpentine mixer. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 136, 44-61.
- 4- Deng, Q., Lei, Q., Shen, R., Chen, C., & Zhang, L. (2017). The continuous kilogram-scale process for the synthesis of 2, 4, 5-trifluorobromobenzene via Gattermann reaction using microreactors. *Chemical Engineering Journal*, 313, 1577-1582.
- 5- Yang, R. J., Liu, C. C., Wang, Y. N., Hou, H. H., & Fu, L. M. (2017). A comprehensive review of micro-distillation methods. *Chemical Engineering Journal*, 313, 1509-1520.
- 6- Meller, K., Szumski, M., & Buszewski, B. (2017). Microfluidic reactors with immobilized enzymes—Characterization, dividing, perspectives. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 244, 84-106.
- 7- Kanai, T., & Tsuchiya, M. (2016). Microfluidic devices fabricated using stereolithography for preparation of monodisperse double emulsions. *Chemical Engineering Journal*, 290, 400-404.
- 8- Aref, H. (1984). Stirring by chaotic advection. *Journal of fluid mechanics*, 143, 1-21.
- 9- Stroock, A. D., Dertinger, S. K., Ajdari, A., Mezić, I., Stone, H. A., & Whitesides, G. M. (2002). Chaotic mixer for microchannels. *Science*, 295(5555), 647-651.
- 10- Ward, K., & Fan, Z. H. (2015). Mixing in microfluidic devices and enhancement methods. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(9), 094001.

- 11- Wong, S. H., Ward, M. C., & Wharton, C. W. (2004). Micro T-mixer as a rapid mixing micromixer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 100(3), 359-379.
- 12- Wang, L., Wu, W., & Li, X. (2013). Numerical and experimental investigation of mixing characteristics in the constructal tree-shaped microchannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 1014-1023.
- 13- Abed, W. M., Whalley, R. D., Dennis, D. J., & Poole, R. J. (2015). Numerical and experimental investigation of heat transfer and fluid flow characteristics in a micro-scale serpentine channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88, 790-802.
- 14- Das, S. S., Tilekar, S. D., Wangikar, S. S., & Patowari, P. K. (2017). Numerical and experimental study of passive fluids mixing in micro-channels of different configurations. *Microsystem Technologies*, 23(12), 5977-5988.
- 15- Borgohain, P., Arumughan, J., Dalal, A., & Natarajan, G. (2018). Design and performance of a three-dimensional micromixer with curved ribs. *Chemical Engineering Research and Design*, 136, 761-775.
- 16- Borgohain, P., et al. "Numerical assessment of mixing performances in cross-T microchannel with curved ribs." *Microsystem Technologies* 24.4 (2018): 1949-1963.
- 17- Huanming, X., Jiawei, W., & Zhiping, W. (2018). A comparative discussion of different designs of passive micromixers: specific sensitivities of mixing efficiency on Reynolds numbers and fluid properties. *Microsystem Technologies*, 24(2), 1253-1263.
- 18- Asadi, M., & Niazmand, H. (2019, August). Numerical investigation of flow mixing in sinusoidal channels by using Lattice Boltzmann Method. In *هجدهمین کنفرانس بینامیک شماره ها*
- 19- Chen, X., Li, T., Zeng, H., Hu, Z., & Fu, B. (2016). Numerical and experimental investigation on micromixers with serpentine microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 131-140.
- 20- Das, S. S., Tilekar, S. D., Wangikar, S. S., & Patowari, P. K. (2017). Numerical and experimental study of passive fluids mixing in micro-channels of different configurations. *Microsystem Technologies*, 23(12), 5977-5988.
- 21- Kok, B., Firat, M., Oztop, H. F., & Varol, Y. (2013). A numerical study on thermal mixing in narrow channels inserted rectangular bodies. *International communications in heat and mass transfer*, 44, 69-76.



سیزدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک
بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران
(مکانیک بیوسیستم ۱۴۰۰)

۲۴-۲۶ شهریور ۱۴۰۰



Investigation of new geometric designs for micro-mixers in order to optimize the mixing of food and pharmaceutical fluids

Ali Vahabi^{1,*}, Abolfazl fattahi²

1. Department of Heat and Fluids, school of Mechanical Engineering, Kashan University
(vahabi.ali1998@gmail.com)
2. Department of Heat and Fluids, school of Mechanical Engineering, Kashan University
(afattahi@kashanu.ac.ir)

Abstract

With the development of the pharmaceutical and food industries, the need to mix different materials in different conditions in order to make homogeneous materials increased. Therefore, different methods were proposed for mixing more flows. The use of micro-mixers is one of the efficient and approved cases in this field, which was developed with the development of the manufacturing industry. With the growing need of industries, the expectation of faster and more homogeneous mixing of the fluid flow grew, which was one of the factors in the development of micromixers. Micromixer geometric variations are a good idea to improve the mixing of flows without significant effects on initial costs. The present study, in continuation of the existing efforts, tries to suggest geometries that can help increase the mixing of hot and cold flows in different ways. Using numerical simulation, these designs are compared with each other and the optimal design is introduced. The results showed that with geometric changes, the mixing of fluids with different temperatures can be improved up to 5 times compared to the basic mode, which of course, will lead to a 2-fold increase in pressure drop.

Key words: Micromixer, flow mixing, heat transfer, temperature uniformity, pressure drop.

*Corresponding author