

شبیه سازی عددی میکرومیکسر غیرفعال با واحدهای اختلاط منحنی شکل: بررسی بهبود کیفیت اختلاط گازهای ورودی در رینولدزهای مختلف

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، h.sadeghi@msn.com
 دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.khalilian@urmia.ac.ir
 استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، i.mirzaee@urmia.ac.ir
 استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، sor.mems@gmail.com

مسعود صادقی
مرتضی خلیلیان
ایرج میرزایی
سجاداله رضازاده*

چکیده

اختلاط سیال های مختلف یا یکسان باهم در بسیاری از ریزساختارها نقش مهمی دارد، لذا بررسی بهبود کیفیت اختلاط در میکروکانال ها حائز اهمیت می باشد. مطالعه عددی اختلاط اکسیژن و نیتروژن در میکرومیکسر سه بعدی غیرفعال با روش المان محدود انجام و تاثیر عدد رینولدز، نوع، تعداد و عرض واحدهای اختلاط و گذاردن مانع در مسیر جریان بر کیفیت اختلاط و افت فشار بررسی گردیده است. درحالیکه بیشتر مطالعات قبلی در خصوص اختلاط مایعات بوده، در این تحقیق اختلاط گازها در میکرومیکسرهای ساده و نیز میکرومیکسرهای دارای واحدهای اختلاط بررسی شده است. بدین منظور دو نوع میکرومیکسر نوین به نام های A و B با واحدهای اختلاط جدید و متعدد معرفی شده اند. ارزیابی عملکرد جرمی مدل های نوین A و B دارای واحدهای اختلاط مارپیچ، نسبت به مدل پایه بدون واحد اختلاط نشان می دهد که مدل های نوین عملکرد بالاتری نسبت به مدل پایه دارند. طوریکه میکرومیکسر A با پنج واحد اختلاط، در رینولدز ۱۱۰، نسبت به مدل پایه کیفیت اختلاط را ۲ برابر و نسبت به مدل B ۱/۲۵ برابر بهبود می بخشد. همچنین تاثیر عمق موانع مکعبی در میکرومیکسر B با پنج واحد اختلاط بیانگر بهبود کیفیت اختلاط نسبت به مدل بدون مانع در رینولدزهای بالاتر می باشد. بطوریکه در عدد رینولدز ۱۱۰ مدل B با پنج واحد اختلاط، کیفیت اختلاطی حدود ۹۵ درصد را ارائه می دهد.

واژه های کلیدی: میکرومیکسر غیرفعال، کیفیت اختلاط، شبیه سازی سه بعدی، واحد اختلاط، عدد رینولدز.

Numerical simulation of passive micromixers with curved mixing units: A study of improving the mixing quality of inlet gases in different Reynolds

M. Sadeghi
M. Khaliliyan
I. Mirzaee
S. Rezazadeh

The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
 The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
 The mechanical engineering department, Urmia University, Urmia, Iran.
 Faculty of Renewable energies, Department of mechanical engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

Abstract

Mixing different or identical fluids together plays an important role in many microstructures, so it is important to study the quality of mixing in microchannels. Numerical study of oxygen and nitrogen mixing in passive three-dimensional micromixer was performed by finite element method and the effect of Reynolds number, type, number and width of mixing units and obstruction in the flow path on mixing quality and pressure drop was investigated. While most previous studies have been on the mixing of liquids, in this study the mixing of gases in simple micromixers as well as micromixers with mixing units has been investigated. For this purpose, two new types of micromixers named A and B with new and multiple mixing units have been introduced. Mass performance evaluation of the new models A and B with helical mixing units, compared to the base model without the mixing unit shows that the new models have a higher performance than the base model as micromixer A with five mixing units, in Reynolds 110, compared to the base model. Improves mixing quality 2 times and 1.25 times better than Model B. Also, the effect of the depth of cubic barriers in micromixer B with five mixing units indicates the improvement of mixing quality compared to the unobstructed model in higher Reynolds. As in Reynolds 110 model B with five mixing units, the mixing quality is about 95%.

Keywords: Passive micromixer, Mixing quality, Three-dimensional simulation, Mixing unit, Reynolds number.

۱-مقدمه

بیولوژیکی از میکسرها در دهه های اخیر از جمله مواردی هستند که بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۴]. در همین راستا، بحث اختلاط دو یا چند سیال با غلظت های مختلف، برای دسترسی به یک سیال مخلوط شده همگن بسیار دارای اهمیت بوده و تلاش های محققین برای بهبود کیفیت اختلاط سیال ها همچنان ادامه دارد. اختلاط بهینه سیالات با یکدیگر نقش مهمی در آزمایشگاه روی تراشه [۵] و سیستم های تجزیه و تحلیل کلی میکرومقیاسی دارد [۶]. زیرا در کارهای آزمایشگاهی، برای استحصال یک سیال بخصوص که از ترکیب

فناوری میکروسیالی امکان کوچک سازی ابزارهای آزمایشگاهی را به دستگاه های آزمایشگاه روی تراشه برای کاربردهای مختلف بیولوژیکی و شیمیایی مهیا می سازد. این فناوری به دلیل کارایی بالاتر، سرعت تجزیه و تحلیل سریع تر و حجم کم نمونه استفاده شده، مورد توجه محققان قرار گرفته است. استفاده از اثر مثبت میدان الکتریکی بر کیفیت اختلاط [۱]، بررسی تاثیر عدد رینولدز در محدوده پایین [۲]، تاثیر هندسه کانال ها بر کیفیت اختلاط [۳] و استفاده های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sor.mems@gmail.com

سیالات دیگر حاصل می گردد، از میکرومیکسر استفاده می شود. میکرومیکسرها در واقع کانال‌هایی در مقیاس میکرو می‌باشند که فرآیند اختلاط درون آنها اتفاق می‌افتد. در حالت کلی، جریان سیالات درون کانال‌های با مقیاس میکرو بصورت آرام است، بنابراین اختلاط سیال توسط مکانیزم پخش مولکولی انجام می‌شود که برای رسیدن به یک اختلاط همگن به طول کانال بزرگتری نیاز است که بعضا بدلیل محدودیت‌های موجود در آزمایشگاه‌ها، طولی نمودن کانال اختلاط امکان پذیر نمی‌باشد. بدلیل تنوع کاربرد میکرومیکسرها در صنایع مختلف، مطالعه اختلاط سیالات درون میکروکانال‌ها و آشنایی با فیزیک جریان درون آنها امری لازم و ضروری می باشد.

میکرومیکسرها بطور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. آنها اجزای مهمی در سیستم‌های میکروسایالی می‌باشند که در زمینه‌های مهندسی زیستی، مهندسی شیمی و پزشکی کاربردهای فراوانی دارند [۷]. اختلاط در جریان‌های آرام معمولاً در زمینه‌های مختلفی همچون استخراج و تصفیه، فرآیندهای امولسیون، سنتز شیمیایی، واکنش‌های شیمیایی، تجزیه و تحلیل دی‌ان‌ای، پلیمریزاسیون، تحلیل شیمیایی یا بیوشیمیایی استفاده می‌شود [۸]. میکرومیکسرها به طور کلی به دو دسته میکرومیکسرهای فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند. میکرومیکسرهای فعال برای افزایش کیفیت اختلاط، به انرژی خارجی نیاز دارند (مگنتو-هیدرودینامیک، لرزش الکتروآکوستیک، دی الکتروفورسیس و آشفتنگی مافوق صوت) [۹]. این میکرومیکسرها کارایی بهتری دارند اما معمولاً ساخت آنها دشوارتر و مواد بکار رفته در آنها گرانتر از انواع غیرفعال است. درمقابل، اختلاط در میکرومیکسرهای غیرفعال حاصل تعامل بین جریان سیال و هندسه کانال می‌باشد [۱۰]. برای ساخت و بهبود عملکرد میکرومیکسرها و نیز تحلیل جریان درون آنها، درک روشنی از پدیده‌های سیالاتی درون میکروکانال‌ها لازم است. بدین منظور بهره‌گیری از علم دینامیک سیالات محاسباتی یک روش امیدبخش در مدل‌سازی، تحلیل جریان و توسعه میکرومیکسرها با عملکرد بهینه می باشد، لیکن درکار حاضر نیز از روش مذکور برای شبیه‌سازی و تحلیل جریان سیال بهره گرفته شده‌است [۱۱،۱۲]. اختلاط در میکرومیکسرهای غیرفعال مبتنی بر دو اصل پخش مولکولی و همچنین حرکت بی‌نظم می‌باشد [۱۲]. پخش مولکولی را با بزرگ کردن سطح تماس بین سیالات و کاهش طول نفوذ می‌توان افزایش داد. حرکت بی‌نظم نیز با کنترل و تغییر جریان درون میکروکانال‌ها و ایجاد جریان ثانویه، سطح تماس بین سیال‌ها را افزایش می‌دهد [۱۳]. هر یک از این دو روش منجر به انتقال بهتر جرم شده و در نتیجه اختلاط همگن‌تر خواهد شد. تحقیقات متعددی در رابطه با اختلاط سیالات نیوتنی در انواع مختلف میکرومیکسرهای غیرفعال انجام شده است. در اکثر این تحقیقات، تمرکز بر روی یافتن هندسه بهینه برای دستیابی به کیفیت اختلاط بهتر بوده است. در سیالات نیوتنی با جریان آرام، هندسه‌های مسطح و ساده اختلاط همگنی را ایجاد نمی‌کنند. در حالی که، استفاده از ساختارهای هندسی تقسیم و ترکیب مجدد جریان (میکرومیکسرهای SAR) باعث افزایش قابل توجه انتقال جرم شده و کیفیت اختلاط را نسبت به میکرومیکسرهای با هندسه ساده بهبود می‌بخشد [۱۴]. میکرومیکسرهای غیرفعال با شکل‌های هندسی متفاوتی از جمله ساختار تسلا [۱۵]، ساختار تقسیم و ترکیب

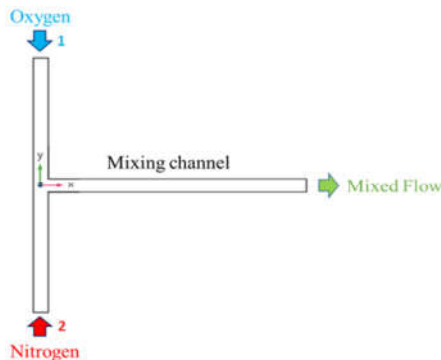
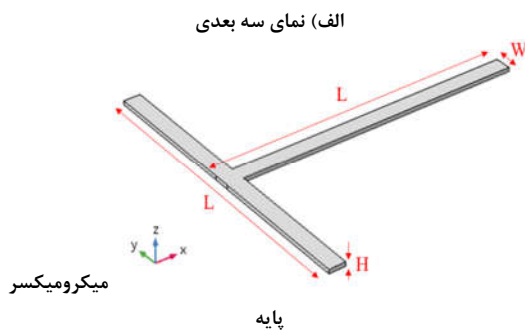
مجدد (SAR or Split and Recombine) [۱۶]، ساختار استخوان شاه‌ماهی [۱۷]، کانال‌های شیاردار [۱۸]، کانال‌های تاب خورده [۱۹] و موانع موجود در دیواره کانال [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. استروک و همکاران [۱۷] با ایجاد الگوهای متشکل از ساختار استخوان شاه‌ماهی (کانال با برجستگی های مورب) و ایجاد تغییر متناوب در سرعت جریان سیال، اختلاط نامنظمی را بوجود آوردند که این امر نهایتاً سبب افزایش اختلاط می‌گردد. کیم و همکاران [۲۰] یک میکرومیکسر ارائه کرده اند که در کانال اختلاط موانع موربی قرار داده شده است. این موانع با آشفته کردن میدان جریان سیال، سبب افزایش اختلاط می‌گردند. در همین راستا، لیو و همکاران [۲۱] یک میکروکانال ماریچج سه بعدی را برای تولید کشیدگی و فشرده‌گی سریع جریان سیال طراحی کرده اند که باعث تولید آشفتنگی می‌شود و کیفیت اختلاط را بهبود می‌بخشد.

سلیمانی و همکاران [۲۲] توسعه گردابه‌ها در میکرومیکسرهای تی-شکل را در اعداد رینولدز بین ۱۲ تا ۲۴۰ بررسی کرده اند. آنها به این نتیجه رسیدند که کیفیت اختلاط با ظاهر شدن گردابه‌هایی که با افزایش سرعت جریان سیال به وجود می‌آیند، بهبود می‌یابد. پورفتاح و همکاران [۲۳] یک مدل جدید برای میکرومیکسرهای غیرفعال جهت اختلاط مونواکسیدکربن و نیتروژن ارائه دادند. بررسی‌های آنها نشان دهنده تاثیر عدد نادسن و میزان تخلخل بر کیفیت اختلاط بود. با الهام از کار حوساین و همکاران [۲۳]، عمار و همکاران [۲۴] عملکرد اختلاط میکرومیکسر SAR اصلاح شده که قبلاً توسط حوساین و همکاران [۲۳] ارائه شده بود را بررسی کرده اند. ایده آنها اصلاح منطقه عبور برای کاهش تعداد واحدهای اختلاط بود که توسط آن به کیفیت اختلاط قابل مقایسه با سایر میکرومیکسرهای ارائه شده اخیر دست یافتند. رضازاده و همکاران [۲۴] به بررسی پارامتریک تغییر هندسی واحدهای اختلاط بر کیفیت اختلاط پرداختند. در کاری دیگر عباسی نژاد و همکاران به بررسی تاثیر اضافه نمودن موانع بر میزان کیفیت اختلاط سیال های نیوتنی و غیرنیوتنی پرداخته و به این نتیجه دست یافتند که اضافه نمودن موانع با انحناء میزان کیفیت اختلاط را بهبود می بخشد [۲۵]. علاوه بر این، یک تحقیق جامع در مورد عملکرد میکرو میکسرهای فعال و غیرفعال، توسط بیاچه و همکاران انجام شده است [۲۶-۲۷]. کارهای ذکر شده کاربرد دستگاه های در حد میکرو را بطور جامع بررسی نموده، معادلات اساسی حاکم بر جریان سیال را ارائه داده و رویکردهای عددی و تجربی مربوطه را توصیف می کنند. از طرف دیگر، کار آنها روش های گسسته سازی، انواع شبکه بندی عددی و خطاهای عددی را در پیش بینی کارایی مخلوط کردن دستگاه های میکروسایال معرفی می کند. اگرچه برخی از مطالعات بر روی اختلاط گازها در مقیاس کوچک متمرکز بوده است، اما به دلیل دشواری تعبیه حسگرهای گاز در دستگاه های میکروسایالی، اکثر مطالعات انجام شده بصورت دینامیک سیالات محاسباتی بوده و تنها کمی از بررسی ها بصورت تجربی بوده است. بنابراین، بیشتر مطالعات در مورد اختلاط گازها با روش های عددی انجام شده است. به عنوان مثال، در تاریخچه اختلاط گازها، می توان به اختلاط متانول و اکسیژن که توسط گایی و همکاران انجام شده است اشاره نمود [۲۸]. آنها از روش دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیه سازی اختلاط و بررسی عوامل موثر بر کیفیت اختلاط استفاده کرده اند. در تحقیقی دیگر، لی و همکاران [۲۹]

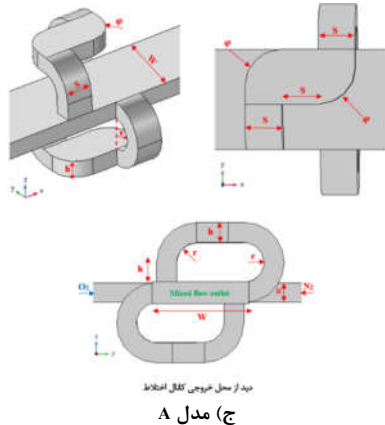
اختلاط نشان داده شده در شکل ۱، در جدول ۱ آورده شده است. هدف اصلی کار حاضر جدا کردن جریان اصلی به کمک واحدهای اختلاط و ترکیب دوباره آن برای دستیابی به کیفیت اختلاط بهتر می‌باشد. واحد(های) اختلاط جریان‌های عرضی ایجاد می‌کنند که در بهبود عملکرد اختلاط میکرومیکسر موثر است. مکانیزم SAR طراحی شده سطح تماس بین دو سیال که قرار است با هم مخلوط شوند را به حداکثر می‌رساند. بخش (ه) شکل ۱ نیز مسیر عبور گازهای اکسیژن و نیتروژن را در واحدهای اختلاط نشان می‌دهد.

جدول ۱- ابعاد هندسی میکرومیکسر

طول	L	W	H=h	r	S	φ
اندازه (میکرومتر)	۵۴۵۰	۵۵۰	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵	۲۰۰ درجه



ب) دید از بالای میکرومیکسر پایه



اختلاط گازهای نیتروژن و مونوکسیدکربن را در اعداد ناسن مختلف بررسی کرده اند. بدین منظور، آنها از تکنیک های شبیه سازی دینامیک مولکولی مونت کارلو استفاده نموده و دریافتند که با افزایش دمای سیال ورودی، طول ناحیه اختلاط کاهش می یابد. هاس-ساتو و همکاران [۳۰] میکرو میکسری را برای مخلوط کردن گازها با ۴۸۰ میکروکانال یکپارچه طراحی نموده و اختلاط بین گاز نیتروژن با آرگون یا هلیوم بررسی نمودند. آنها تاثیر میزان نرخ جریان گاز و تفاوت ضریب انتشار بین دو گاز را بر کیفیت اختلاط با جزئیات کافی و دقیق مطالعه کرده اند.

با بررسی منابع معتبر موجود، مشخص می شود که مقالات زیادی وجود ندارند که به طور عددی اختلاط گازها را در میکرو میکسرها مطالعه کرده باشند. بنابراین، در مقاله حاضر، تمرکز اصلی بر مطالعه رفتار گازها در هنگام اختلاط درون میکروکانال ها است. از طرف دیگر، استفاده از میکرو میکسره های SAR و تأثیر آنها بر کیفیت اختلاط گازها نیز به ندرت توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است که در واقع ایده اصلی اضافه شده به مرجع [۳۱] میباشد. در مرجع مذکور تمرکز اصلی بر روی اختلاط گازها در میکرومیکسری شکل ساه بود ولی کار حاضر میکرومیکسره های SAR را به عنوان نوآوری مطرح نموده است. یکی از اهداف کار حاضر بررسی نحوه تغییر کیفیت اختلاط گازها با تغییر در هندسه میکرومیکسری می باشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه میکرومیکسره های SAR می توان مدل هایی معرفی نمود که قادر باشند سیال با یک غلظت مشخص را از یک طرف کانال اختلاط جدا نموده و از طرف دیگر کانال اختلاط با سیال دیگر و غلظت متفاوت مخلوط نمایند. در کار حاضر این عمل به دو صورت انجام پذیرفته است. در یک حالت سیال از سقف یا کف کانال جدا شده و از سطوح جانبی کانال اختلاط مجددا تزریق می گردد و در حالت دیگر سیال از یک سطح جانبی جدا شده و از سطح جانبی دیگر وارد کانال اختلاط می گردد. در مقایسه با هندسه های پیچیده ای که در کارهای قبلی بررسی شده اند، مدل های ارائه شده بلحاظ هندسه بصورت منحنی طراحی شده اند که ساخت آنها در آزمایشگاه بر روی تراشه های کوچک کمترین هزینه را داشته باشد.

۲- تعریف مسئله و روند حل

در این بخش، ابتدا به معرفی هندسه مدل پایه (بدون واحد اختلاط) پرداخته شده و سپس معادلات حاکم بر میدان جریان سیال و نتایج عددی به دست آمده تجزیه و تحلیل می شوند.

۲-۱- معرفی مدل

طرحواره میکرومیکسر پایه بررسی شده در این تحقیق در شکل ۱-الف (ب) نشان داده شده است. این میکرومیکسر متشکل از یک کانال اصلی اختلاط مستقیم و دو کانال ورودی عمود بر آن است. گازهای اکسیژن و نیتروژن (به عنوان سیالات نیوتنی) از طریق دو ورودی نشان داده شده، وارد میکروکانال شده و پس از اختلاط با یکدیگر از دهانه خروجی میکروکانال خارج می شوند [۳۱]. واحد(های) اختلاط مارپیچی جدیدی طراحی شده است که بر روی میکرومیکسر پایه سوار می گردد (شکل ۱-ج و د). ابعاد میکرومیکسر و واحد

$$\vec{V} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C \quad (3)$$

که در آن D ضریب پخش و C غلظت سیال است [۳۱].
 بر روی سطوح دیواره‌های کانال، شرط مرزی عدم لغزش سرعت اعمال شده است. ضمناً فرض شده است که دیواره‌های کانال عایق حرارتی و جرمی می‌باشند. همچنین، در بخش ورودی‌های اکسیژن و نیتروژن شرط مرزی سرعت ثابت و در خروجی کانال اختلاط فشار استاتیک صفر در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، غلظت سیال در ورودی ۱ برابر ۰ (رنگ آبی) و در ورودی ۲ (رنگ قرمز) نیز برابر ۱ مول بر مترمکعب می‌باشد [۳۱]. با توجه به مقدار عدد نادسن در این مطالعه که کمتر از ۰/۰۰۱ می‌توان جریان را پیوسته فرض نمود.

عدد رینولدز یک پارامتر بی‌بعد می‌باشد که نسبت نیروهای اینرسی به ویسکوزیته را نشان می‌دهد و بصورت معادله (۴) تعریف می‌شود [۲۶]:

$$Re = \frac{VD_H}{\nu} \quad (4)$$

در مطالعه حاضر محدوده عدد رینولدز از ۲۵ الی ۱۱۰ در نظر گرفته شده است پس جریان لایه‌ای و تراکم ناپذیر می‌باشد [۳۱].
 ویسکوزیته سینماتیکی، ν سرعت جریان سیال ورودی و D_H قطر هیدرولیکی را نشان می‌دهد که بصورت معادله (۵) محاسبه می‌شود:

$$D_H = \frac{2WH}{W+H} \quad (5)$$

برای تعیین مقایسه عملکرد اختلاط میکرومیکسر، کیفیت اختلاط (MQ) در هر سطح مقطع عمود بر جهت جریان بصورت معادلات (۶) و (۷) بیان می‌شود [۲۵ و ۳۲]:

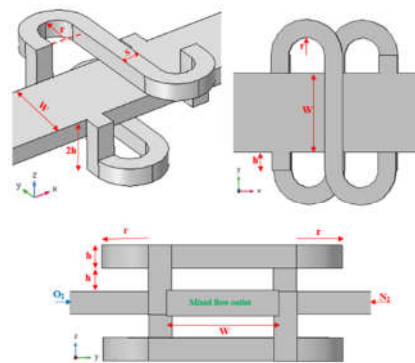
$$MQ = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{mean}^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (6)$$

$$\sigma_{mean}^2 = \int (C_i - C_{mean})^2 dy \quad (7)$$

معادله (۷) در خروجی کانال برای نقاط یا گره‌های شبکه در راستای عمودی اعمال شده است. C_i کسر جرمی در نقطه i و C_{mean} متوسط کسر جرمی مخلوط می‌باشد. σ_{max} نیز برابر است با حداکثر تغییرات غلظت در مخلوط. در خروجی کانال اختلاط، تابعی بصورت $\int (C_i - C_{mean})^2 dy$ تعریف شده است که میزان غلظت سیال مخلوط شده را در هر گره دریافت کرده و در انتگرالی بنام intop جاگذاری می‌نماید. میزان C_{mean} بر اساس مقادیر غلظت مربوط به سیال‌های ورودی ۰/۵ در نظر گرفته شده است. تابع جذر با نام sqrt به نرم افزار داده شده که بتواند معادله (۶) را حل کند.

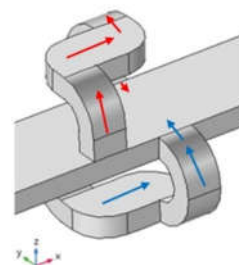
۳-۲- استقلال حل عددی از شبکه‌بندی

در تحقیق حاضر از یک مش غیرساختارمند با المان‌های مثلثی برای شبکه‌بندی دامنه محاسباتی بهره گرفته شده است (شکل ۲). این انتخاب بدلیل پیچیدگی شکل هندسه میکرومیکسر پیشنهادی و وجود زوایای تیز در آن است. به منظور بررسی حساسیت نتایج عددی به شبکه محاسباتی، از چهار شبکه‌بندی با تعداد المان‌های ۰۰۰،۳۰، ۰۰۰،۶۰، ۰۰۰،۱۲۰ و ۰۰۰،۲۴۰ استفاده شده است. همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، شبکه با تعداد المان‌های ۰۰۰،۱۲۰ به عنوان شبکه مورد استفاده در نظر گرفته شده است. شکل ۳ در واقع

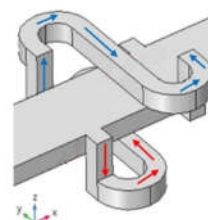


شکل ۱- مدل عددی میکسر

(د) مدل B



۱- مسیر عبور گازها در مدل A



۲- مسیر عبور گازها در مدل B

شکل ۱- هندسه مسئله: (الف و ب): طرحواره‌ای از میکرومیکسر پایه، (ج): طرحواره‌ای از واحد اختلاط مدل A، (د): شماتیکی از واحد اختلاط مدل B، (ه) مسیر عبور گازها در واحد‌های اختلاط مدل‌های B و A

۲-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

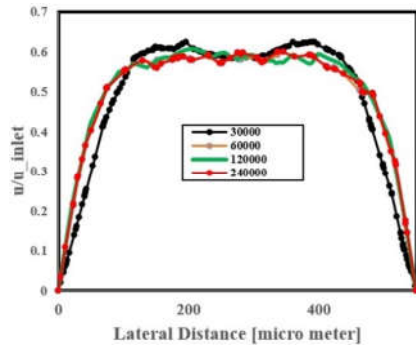
در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی جریان و مکانیزم اختلاط سیال با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار Camsol multiphysics انجام شده است. پس از گسسته شدن معادلات، از روش ماتریسی تکراری برای حل معادلات جبری استفاده می‌شود. معیار همگرایی نیز 10^{-8} در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم بر میدان جریان سیال شامل معادلات تراکم‌ناپذیر پیوستگی (معادله ۱) و معادله مومنتوم (معادله ۲) [۳۱]:

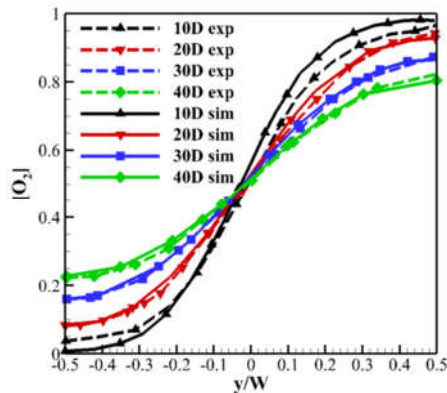
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

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

که در آن V ، ρ و μ به ترتیب سرعت، چگالی، فشار و لزجت دینامیکی سیال را نشان می‌دهند. معادله انتقال جرم (معادله ۳) برای سیال با چگالی ثابت یک معادله نفوذ همرفت است که توسط معادله (۳) ارائه می‌شود:

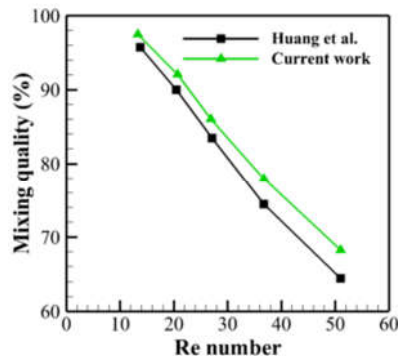


شکل ۳- تغییرات سرعت بی بعد سیال مخلوط شده برای شبکه‌بندی با تعداد المان‌های مختلف در رینولدز ۱۳/۹



شکل ۴- تغییرات غلظت اکسیژن در خروجی کانال در چهار فاصله مختلف از ورودی و مقایسه آن با کار هوانگ و همکاران [۳۱] در عدد رینولدز ۱۳/۹

شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب اعتبارسنجی کار حاضر را برای تغییرات کیفیت اختلاط و افت فشار سیال در رینولدزهای مختلف با داده‌های مرجع [۳۱] نشان می‌دهد که تطابق قابل قبول را نتیجه داده است.



شکل ۵- تغییرات کیفیت اختلاط در خروجی کانال و مقایسه آن با کار هوانگ و همکاران [۳۱] در اعداد رینولدز مختلف

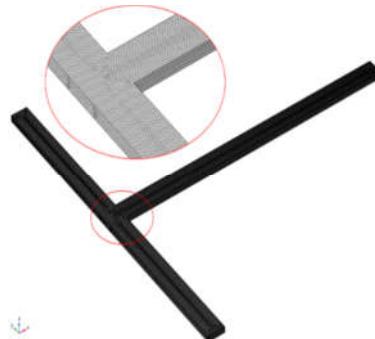
نشان دهنده غلظت و سرعت بی بعد سیال مخلوط شده در امتداد خط مرکزی گذرنده از سطح مقطع خروجی کانال اختلاط در امتداد محور Y است.

۲-۴- صحت‌سنجی

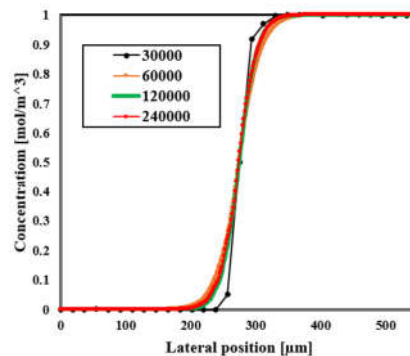
به منظور صحت‌سنجی نتایج عددی، تغییرات غلظت اکسیژن روی خط مرکزی چهار صفحه عمودی در فواصل مختلف از ورودی میکرومیکسر بدون واحد اختلاط با داده‌های آزمایشگاهی [۳۱] انجام شده است. شکل ۴ بیان می‌کند که نتایج شبیه‌سازی حاضر با تقریب قابل قبولی با نتایج مرجع منطبق است. D در شکل ۴ نشان دهنده قطر هیدرولیکی می‌باشد که فواصل مختلف از ورودی میکرومیکسر ضرابی از این پارامتر است. بدلیل وجود هندسه‌های الحاقی پیچیده به میکرومیکسر تی شکل ساده در این حل عددی، اعتبارسنجی با نتایج میکرومیکسر SAR انجام شده که نتایج نشان دهنده مطابقت مناسب نتایج با یکدیگر است [۳۳].

جدول ۲- اعتبارسنجی مدل عددی SAR با مرجع [۳۳]

Re Number	نتایج مربوط به مرجع			نتایج کار عددی انجام شده		
	۱۸	۵۰	۸۰	۱۸	۵۰	۸۰
MQ (%)	۷۰	۹۳	۹۵	۶۸	۹۴	۹۶

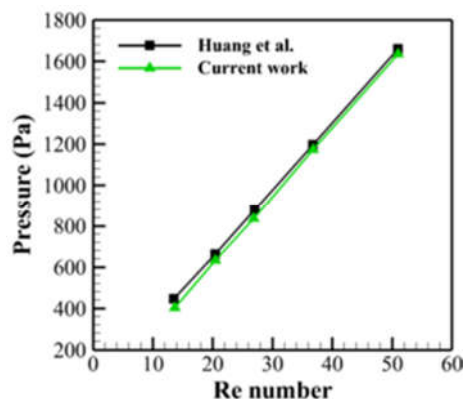


شکل ۲- شبکه‌بندی استفاده شده در کار حاضر برای مدل پایه

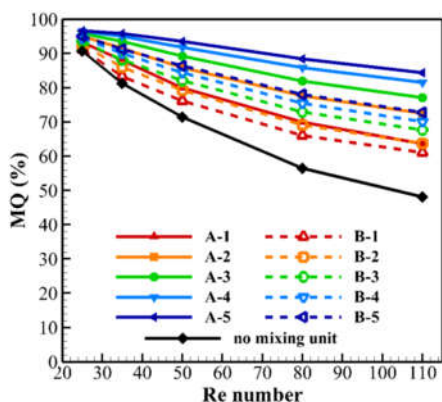


شکل ۱۳- تغییرات غلظت سیال مخلوط شده در خروجی کانال برای شبکه‌بندی با تعداد المان‌های مختلف در رینولدز ۱۳/۹

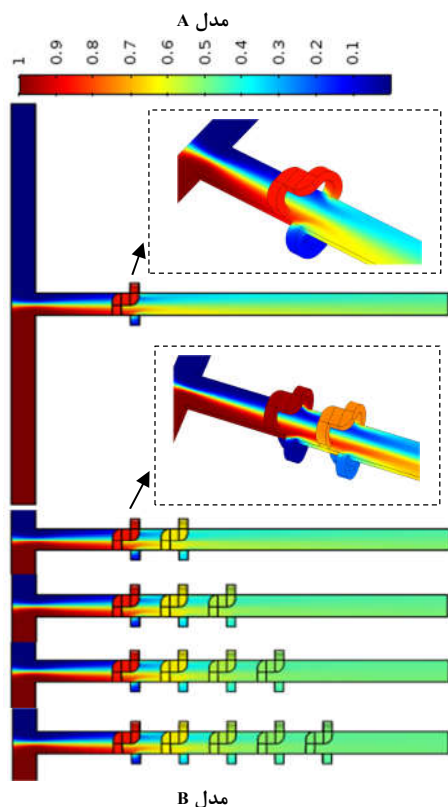
واحدهای اختلاط، سرعت فرآیند کشیدگی و تاشوندگی لایه‌های جریان بیشتر می‌شود تا کیفیت اختلاط بالاتر حاصل شود. بعلاوه، مقایسه دو مدل A و B نشان می‌دهد که در تعداد واحدهای اختلاط یکسان، مدل A کیفیت اختلاط بهتری را نسبت به مدل B دارد. لازم بذکر است که بدلیل اینکه در کانال‌های ورودی سیال بلحاظ فیزیکی اتفاق خاصی رخ نمی‌دهد، بجز در شکل اول در بقیه شکل‌ها بخش کوچکی از کانال‌های ورودی نمایش داده شده‌است. ضمناً برای مدل‌های جدید استقلال نتایج عددی از تعداد شبکه انجام شده که همگرایی نتایج در تعداد شبکه حدود ۱۲۰۰۰۰ برای هر دو مدل A و B با یک واحد اختلاط حاصل شده است.



شکل ۶- تغییرات افت فشار و مقایسه آن با کار هوانگ و همکاران در اعداد رینولدز مختلف [۳۱]

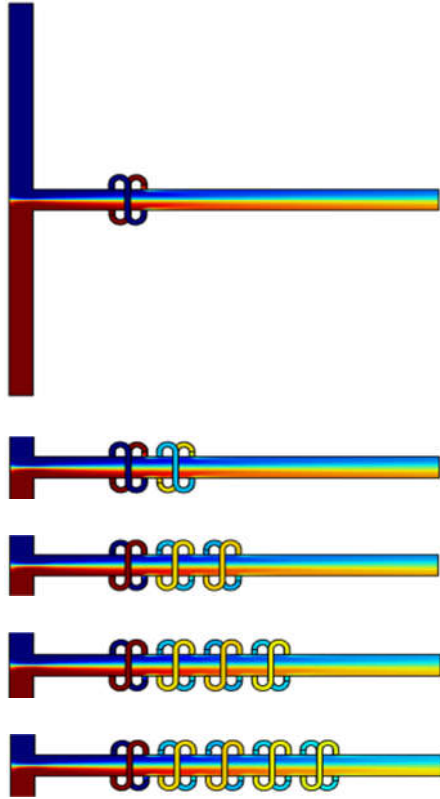


شکل ۷- تغییرات کیفیت اختلاط با عدد رینولدز در تعداد واحدهای اختلاط مختلف

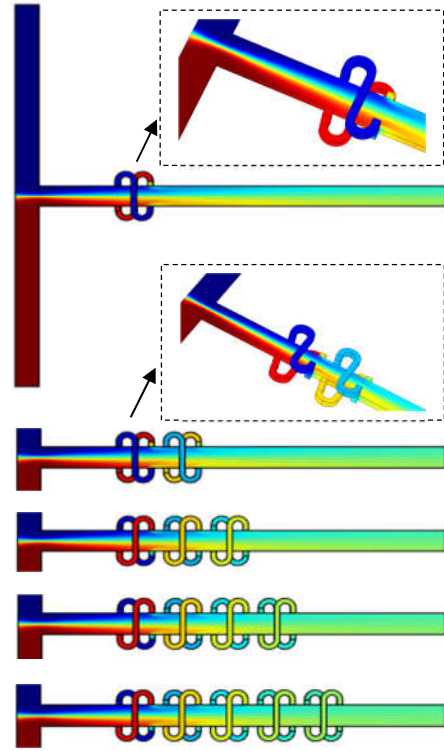


۵-۲- تاثیر عدد رینولدز و افزودن واحد اختلاط

افزودن واحدهای اختلاط یک روش غیرفعال مناسب است که می‌تواند عملکرد میکرومیکسرها را تحت تاثیر قرار دهد. با اضافه کردن واحدهای اختلاط در سطح مقطع‌های خاص از میکرومیکسر، جریان سیال از مسیر اصلی خود جدا شده و بار دیگر با جریان اصلی ترکیب می‌شود. این امر منجر به افزایش شار پخشی سیالات شده و اختلاط افزایش می‌یابد. شکل ۷ تغییرات کیفیت اختلاط را نسبت به عدد رینولدز در خروجی کانال نشان می‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، به دلیل کاهش پخش مولکولی، کیفیت اختلاط برای همه تعداد واحدهای اختلاط کاهش می‌یابد. کاهش پخش مولکولی بدلیل کاهش زمان حضور سیال و در نتیجه افزایش سرعت آن است. یعنی سیالات برای دستیابی به اختلاط مناسب باید در مدل پایه (بدون واحد اختلاط) بسیار کند جریان داشته باشند. در میکرومیکسرهای SAR، فرآیند اختلاط سرعت می‌یابد و کیفیت اختلاط بالاتر از مقادیر میکرومیکسر مدل پایه است. از این رو، با افزودن واحدهای اختلاط به مدل پایه کیفیت اختلاط به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج عددی نشان می‌دهد که در هر یک از دو مدل (A و B) میکرومیکسر با پنج واحد اختلاط دارای حداکثر کیفیت اختلاط در تمام دامنه‌های عدد رینولدز است. بعلاوه، مقایسه دو مدل A و B نشان می‌دهد که در تعداد واحدهای اختلاط یکسان، مدل A کیفیت اختلاط بهتری نسبت به مدل B دارد. شکل‌های ۸ و ۹ کانتورهای غلظت در سطح مقطع x-y با تعداد مختلف واحدهای اختلاط (یک تا پنج) در اعداد رینولدز ۲۵ و ۱۱۰ را برای دو مدل A و B نشان می‌دهند. در این تحقیق، در اعداد رینولدز پایین، پخش مولکولی روند اختلاط را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در کمترین عدد رینولدز (Re=۲۵)، ضخامت سطح مشترک سیالات در ورودی کانال اصلی نسبت به سایر اعداد رینولدز عریض‌تر است. در اعداد رینولدز کوچکتر به دلیل سرعت پایین، سیالات بیشترین زمان را برای پخش دارند. با کاهش سرعت سیال، زمان حضور سیالات در میکرومیکسر افزایش می‌یابد که باعث پخش مولکولی بیشتر بین لایه‌های هم‌تراز سیالات شده و اختلاط بهبود می‌یابد. از سوی دیگر، واحدهای اختلاط باعث تقویت کشیدگی و تاخوردگی سطح مشترک بین سیالات می‌شوند تا ناحیه بین‌سطحی را افزایش دهند که منجر به اختلاط بهتر می‌شود. در عدد رینولدز ثابت، با افزایش تعداد

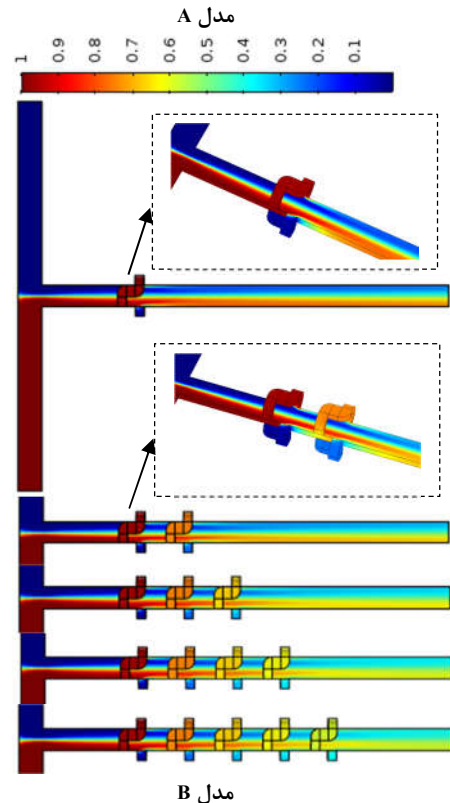
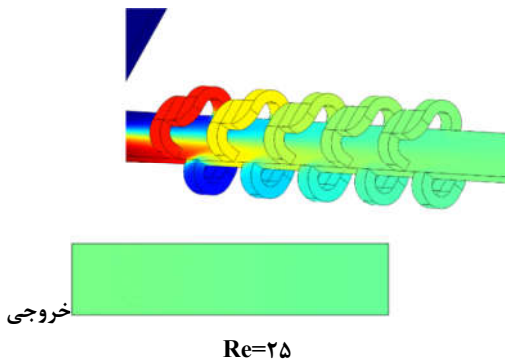


شکل ۹- کانتورهای غلظت برای میکرومیکسر SAR در عدد رینولدز ۱۱۰ با تعداد واحدهای اختلاط مختلف (۱ تا ۵)

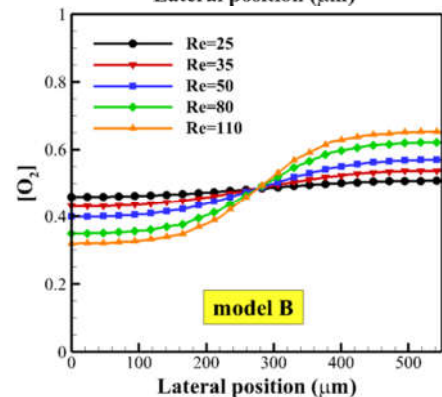
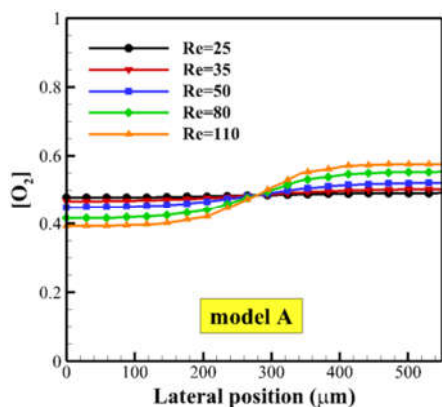


شکل ۸- کانتورهای غلظت برای میکرومیکسر SAR در عدد رینولدز ۲۵ با تعداد واحدهای اختلاط مختلف (۱ تا ۵)

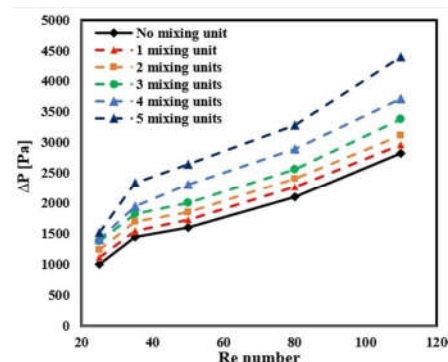
شکل‌های ۱۰ و ۱۱ فرآیند اختلاط را به ترتیب در میکرومیکسرهای مدل A و B با پنج واحد اختلاط برای عدد رینولدز ۲۵ و ۱۱۰ را نشان می‌دهند. کانتور غلظت در سطح مقطع خروجی نشان دهنده اختلاط بهتر در مدل با عدد رینولدز ۲۵ می‌باشد. شکل ۱۲ نمودار توزیع غلظت اکسیژن بر روی خط میانی تعریف شده در خروجی کانال اختلاط برای دو مدل A و B را نمایش می‌دهد. هرچقدر میزان تغییرات غلظت در نزدیکی عدد ۰/۵ اتفاق بیفتد مفهوم آن اختلاط بهتر دو سیال می‌باشد. در تمامی بازه‌های عدد رینولدز، مدل A در مقایسه با مدل B توزیع غلظت همگن‌تری را نشان می‌دهد.



مدل B



شکل ۱۲- نمودار توزیع اکسیژن برای مدل های A و B



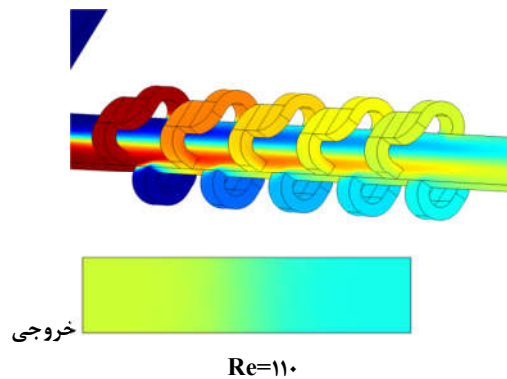
شکل ۱۳- تغییرات افت فشار با عدد رینولدز در تعداد

واحدهای مختلف در مدل A

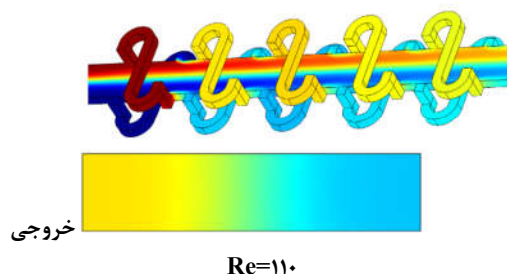
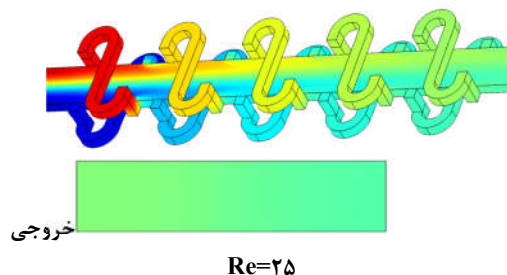
جهت انتخاب بهترین مدل از بین مدل های ارائه شده بلحاظ افزایش کیفیت اختلاط و در نظر گرفتن عدم افزایش زیاد در افت فشار از پارامتری بنام شاخص عملکرد استفاده شده است. این شاخص بصورت زیر تعریف شده است:

$$PI = \frac{(MQ/MQ_0)}{(P^*)^{1/3}} \quad (A)$$

که در آن MQ_0 کیفیت اختلاط مربوط به میکرومیکسر بدون واحد اختلاط است. P^* فشار بی بعد می باشد. بر این اساس نیز مدل A-5 بهترین عملکرد را در تمام رینولدزها دارا می باشد.



شکل ۱۰- کانتورهای غلظت سه بعدی به همراه کانتورهای غلظت در خروجی کانال در اعداد رینولدز ۲۵ و ۱۱۰ برای مدل A



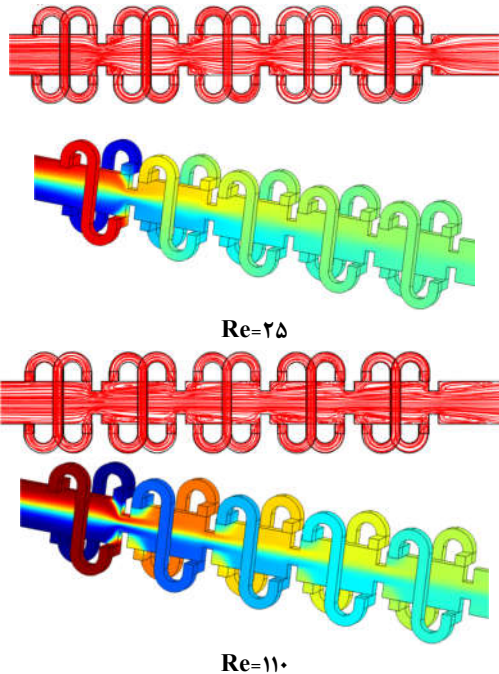
شکل ۱۱- کانتورهای غلظت سه بعدی به همراه کانتورهای غلظت در خروجی کانال در اعداد رینولدز ۲۵ و ۱۱۰ برای مدل B

میکرومیکسرهای پیشنهادی با هدف به حداکثر رساندن کیفیت اختلاط و به حداقل رساندن افت فشار طراحی شده اند. از این رو، برای درک بهتر، مقایسه ای بین افت فشار در مقابل عدد رینولدز انجام شده است. شکل ۱۳ تغییرات افت فشار در مدل A با عدد رینولدز با تعداد واحدهای اختلاط مختلف را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، افت فشار با افزایش عدد رینولدز در همه مدل ها افزایش می یابد. میکرومیکسر پایه کمترین افت فشار را در بین سایر میکرومیکسرها دارد. در تمامی بازه های عدد رینولدز، مقدار افت فشار با افزایش تعداد واحدها و طبعاً افزایش مسیر حرکت سیال افزایش یافته است. با توجه به بیشتر بودن افت فشار مدل B نسبت به مدل A، از ارائه داده های مربوط به افت فشار مدل B خودداری شده است.

۲-۶- بررسی تاثیر افزودن موانع بر روی اختلاط در

میکرومیکسر مدل B

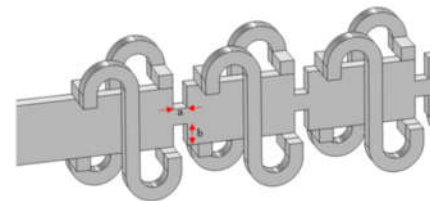
با توجه به اینکه مدل B نسبت به مدل A کیفیت اختلاط کمتری را نتیجه داد، لذا جهت بررسی نحوه بهبود کیفیت اختلاط در میکرومیکسر مدل B موانعی به شکل مکعب مستطیل به دیواره های کانال اختلاط اضافه گردید. در شکل ۱۴ پارامتر هندسی $a = 50$ میکرومتر و b متغیر می باشد. شکل ۱۵ تغییرات کیفیت اختلاط و افت فشار با نسبت انسداد b/D_H (b عمق مانع و D_H قطر هیدرولیکی) را برای میکرومیکسر B-5 (میکرومیکسر مدل B با δ واحد اختلاط) نشان می دهد. با توجه به شکل ۱۶-الف)، با کاهش رینولدز، کیفیت اختلاط افزایش می یابد. اما با ایجاد موانع با عمق بزرگتر بعد از واحدهای اختلاط، افزایش عدد رینولدز دیگر تاثیر چشمگیری بر روی کیفیت اختلاط ندارد، بطوریکه، در نسبت انسداد 0.9818 میکرومیکسر در تمامی اعداد رینولدز کیفیت اختلاط تقریباً یکسان با مقدار بزرگی را دارد. طبق نمودار شکل ۱۵-ب) افت فشار در طول کانال با افزایش عدد رینولدز افزایش پیدا می کند.



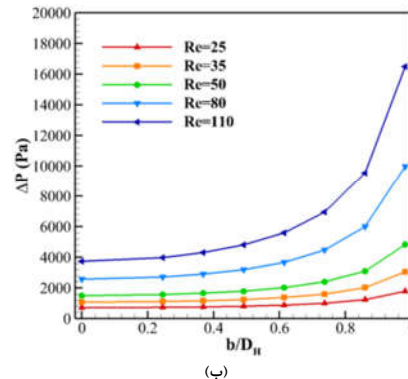
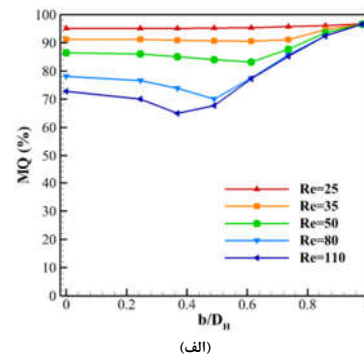
شکل ۱۶- خطوط جریان و کانتورهای سه بعدی غلظت برای میکرومیکسر مدل B با پنج واحد اختلاط در اعداد رینولدز مختلف زمانی که $b/D_H = 0.736$

۳- نتیجه گیری

در کار حاضر، میکرومیکسر غیرفعال تی-شکل با سیال های عامل اکسیژن و نیتروژن بصورت عددی شبیه سازی شده است. روش المان محدود برای حل معادلات حاکم بر جریان سیال بکار گرفته شده است. اعتبارسنجی برای مدل پایه (مدل بدون واحد اختلاط) در رینولدزهای مختلف انجام شده که نشان دهنده تطابق مناسب بین نتایج حاضر با داده های موجود در ادبیات فن می باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که کیفیت اختلاط در خروجی میکرومیکسر و افت فشار، با افزایش تعداد واحدهای اختلاط در یک عدد رینولدز مشخص، افزایش می یابند. مقایسه دو مدل A و B نشان می دهد که در تعداد واحدهای اختلاط یکسان، مدل A کیفیت اختلاط بهتری را نسبت به مدل B دارد. در رینولدز ۱۱۰ مدل B-5 نسبت به مدل پایه حدود $57/7$ درصد و مدل A-5 نسبت به مدل پایه حدود ۸۰ درصد کیفیت اختلاط را بهبود بخشیده اند. بنابراین می توان ادعا نمود که در برخی کاربردهای عملی که رینولدزهای بالاتری نیاز می باشد، استفاده از مدل



شکل ۱۴- محل قرارگیری مانع در مدل B



شکل ۱۵- تغییرات (الف): کیفیت اختلاط و (ب): افت فشار با

نسبت b/D_H در اعداد رینولدز مختلف برای مدل B

[16] Schönfeld, F., Hessel, V., Hofmann, C., An optimized split-and-recombine micro mixer with uniform 'chaotic' mixing. *Lab on a Chip*, pp. 65–69, 2004.

[17] Stroock, A., Dertinger, S., Ajdari, A. I., Mezic, Chaotic mixer for microchannels. *Science*, pp. 647–651, 2002.

[18] Howell, P., Mott, D., Fertig, S., Kaplan, C., Golden, J., Oran, E., A microfluidic mixer with grooves placed on the top and bottom of the channel. *Lab on a Chip*, pp. 524–530, 2005.

[19] Jen, C., Wu, Y., Lin, Y., Wu, C., Design and simulation of the micro mixer with chaotic advection in twisted micro channels. *Lab on a Chip*, pp. 77–81, 2003.

[20] Kim, D., Lee, W., Kwon, T., Lee, S., A barrier embedded chaotic micro mixer" *Journal of micromechanics and micro engineering*. Vol. 14, pp. 798–805, 2004.

[21] Liu, R., Stremmer, M., Sharp, K., Olsen, M., J. Santiago, Passive mixing in a three-dimensional serpentine microchannel. *Journal of Microelectro mechanical Systems*, Vol. 9, 190–197, 2000.

[22] Soleymani, A., Kolehmainen, E., Turunen, I., Numerical and experimental investigations of liquid mixing in T-type micro mixers. *Journal of chemical engineering*, Vol. 135, pp. 219–228, 2016.

[23] Pourfattah, F., Semiromi, D., AliAkbari, O., Adhampour, M., Shahsavari, A., Investigation of mixing process of two different gases in a micromixer: effect of porous medium and Knudsen number. *Journal of porous media*, DOI: 10.1615/JPorMedia.201902702, pp. 81–89, 2020.

[24] Karimi, R., Rezazadeh, S., Raad, M., Investigation of different geometrical configurations effect on mixing performance of passive split-and-recombine micromixer. *Microfluidics and Nanofluidics*, doi.org/10.1007/s10404-021-02491-2, pp. 2–22, 2021.

[25] Fallah, D., Raad, M., Rezazadeh, S., Jalili, H., Increment of mixing quality of Newtonian and non-Newtonian fluids using T-shape passive micro mixer: numerical simulation. *Microsystem Technologies*, pp. 1–11, 2020.

[26] Bayareh, M. Artificial diffusion in the simulation of micromixers: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 2020.

[27] Bayareh, M., Nazemi Ashani, M., Usefian, A. Active, and passive micromixers: a comprehensive review. *Chemical Engineering Process*, Vol. 147, 2020.

[28] Gobby, D., Angeli, P., Gavriilidis, A., Mixing characteristics of T-type microfluidic mixers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, pp. 126–132, 2001.

[29] Lee, M., Hassan, I., DSMC simulation of gas mixing in T-shape micromixer. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, pp. 2370–2377, 2007.

[30] Haas-Santo, K., Pfeifer, P., Schubert, K., T. Zech, D. Hönicke, Experimental evaluation of gas mixing with a static microstructure mixer. *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, pp. 2955–2962, 2005.

[31] Chih-Yung Huang, Shaw-An Wan, Yu-Hsiang Hu. Oxygen and nitrogen gases mixing in T-type micro mixers visualized and quantitatively characterized using pressure-sensitive paint. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 111, pp. 520–531, 2017.

[32] Gharrabi, R., Taviana, M., Naghizadeh, A., Numerical Investigation of Fluid Flow and Thermal Mixing in a Rotating Curved Micro-Channel with Rectangular Cross Section. *Journal of mechanical engineering*, Vol. 79, pp. 79–88, 2016.

[33] Chen, C., Jienan, S., Numerical and experimental investigation on splitting-and-recombination micromixer with E-shape mixing units. *Microsystem Technologies*, Vol. 23, pp. 4671–4677, 2016.

های SAR ضروری است، زیرا مدل پایه در رینولدزهای بالا کارایی بسیار پایینتری از خود نشان داده است. به عنوان مثال اختلاف بین مقادیر کیفیت اختلاط مدل پایه، برای رینولدز ۱۱۰ (حدود ۴۸ درصد) و رینولدز ۲۵ (حدود ۹۲ درصد) تقریباً ۱۰۰ درصد می باشد که رقم بسیار چشمگیری است. در صورتیکه برای مدل A با پنج واحد اختلاط، این اختلاف حدود ۱۲ درصد می باشد که استفاده از میکرومیکسرهای مدل SAR را بالاخص در رینولدزهای بالاتر کاملاً توجیه می نماید. ضمناً برای بهبود کیفیت عملکرد مدل B، موانعی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد مختلف به آن اضافه گردید که نشان دهنده تاثیر مثبت این موانع در اختلاط سیال ها می باشد، طوریکه در مدل B با پنج واحد اختلاط، در رینولدز ۱۱۰ کیفیت اختلاط ۹۴ درصد می باشد. از سویی دیگر، مدل های پیشنهادی در کار حاضر، به دلیل دارا بودن کمترین زوایای تیز، افت فشار را نسبت به سایر مدل های موجود بطور قابل توجه افزایش نمی دهند که این امر سبب مصرف انرژی کمتر پمپاژ سیالات به درون میکروکانال می گردد.

۴- منابع

[1] Jalili, H., Raad, M., and Fallah, D. Numerical study on the mixing quality of an electroosmotic micro mixer under periodic potential. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* pp. 1–13, 2020.

[2] Stone, H., Stroock, A., Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 36 pp. 381–411, 2004.

[3] Rajitsinha, R., Nitin D., Flow field analysis of a passive wavy micromixer with CSAR and ESAR elements. *Microsystem Technologies*. Vol. 27, pp. 1017–1030, 2019.

[4] Gambin, Y., Simonnet, C., VanDelinder, V., Deniz, A., Groisman, A., Ultrafast microfluidic mixer with three-dimensional flow focusing for studies of biochemical kinetics. *Lab on a Chip* Vol. 10, pp. 598–6097, 2010.

[5] Whitesides, G., The lab finally comes to the chip. *Lab on a Chip*. Vol. 14, pp. 3125–3126, 2014.

[6] Rajabi, N., Bahnemann, J., Tzeng, T. O., Platas Barradas, A.-P., Zeng, J. Müller, Lab-on-a-chip for cell perturbation, lysis, and efficient separation of subcellular components in continuous flow mode. *Sensors and Actuators*. pp. 136–143, 2014.

[7] Lee, C.Y., Fu, L.M., Recent advances and applications of micro mixers. *Sensors and Actuators*, pp. 677–702, 2018.

[8] Lee, C.Y., Wang, W.T., Liu, C.C., Fu, L.M., Passive mixers in microfluidic systems: a review. *Journal of chemical engineering*, pp. 146–160, 2016.

[9] Lee, C.Y., Chang, C.L., Wang, Y.N., Fu, L.M., Microfluidic mixing: a review. *International journal of molecular science*, Vol. 12, pp. 3263–3287, 2016.

[10] Raad M., Meshkat, S., Jalili, H., Abbasnejad, D., A three-dimensional numerical investigation of an induced-charge electro kinetic micro mixer equipped with fully polarizable particle. *Engineering Research Express*, Vol. 2, 2020.

[11] Hessel, V., Lowe, H., Schönfeld, F., Micrometers – a review on passive and active mixing principles. *Chemical engineering science*, Vol. 60, pp. 2479–2501, 2005.

[12] Nguyen, N., Wu, Z., micro mixers – a review, *Journal of micromechanics and micro engineering*, Vol. 15, pp. 1–16, 2005.

[13] Aref, H., Stirring by chaotic advection. *Journal of fluid mechanics*, Vol. 143, pp. 1–2, 1984.

[14] Ansari, M.A., Kim, K.Y., Mixing performance of unbalanced split and recombine micro mixers with circular and rhombic sub-channels. *Journal of chemical engineering*, Vol. 162, pp. 760–767, 2016.

[15] Hong, C., Choi, J., Ahn, C., A novel in-plane passive microfluidic mixer with modified Tesla structure. *Lab on a Chip*, pp. 109–113, 2004.