

بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی بر میزان اختلاط دو سیال در میکرومیکسرهای چندمرحله‌ای مبتنی بر ساختار شیر تسلا

مهزبان قائدی^۱، حمیدرضا بهرامی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبات: taleshbahrami@qut.ac.ir

مقاله علمی- پژوهشی

صفحه ۵۲ - ۶۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

چکیده

میکرومیکسرها در صنعت گاز برای ایجاد اختلاط یکنواخت گازها در مقیاس‌های کوچک و کاهش مصرف انرژی اهمیت زیادی دارند. یکی از روش‌های ساخت میکرومیکسر، استفاده از چندین طبقه شیر تسلا است که با طراحی ویژه خود جریان را هدایت و ترکیب می‌کند. در این مقاله با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی (سی اف دی) و حلگر برپایه حجم محدود، اثر پارامترهایی چون جهت چیدمان (مستقیم و غیرمستقیم)، تعداد مراحل، عدد رینولدز، اختلاف سرعت جریان‌های ورودی و جهت جریان بر عملکرد میکرومیکسرهای تسلا بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کارایی چیدمان به عدد رینولدز ورودی وابسته است؛ به طوری که در رینولدز پایین، چیدمان مستقیم عملکرد بهتری دارد و در رینولدز ورودی یک، حدود بیست درصد راندمان اختلاط بیشتری نسبت به چیدمان غیرمستقیم دارد. در رینولدزهای بالاتر، چیدمان غیرمستقیم با بیست درصد عملکرد بهتر، مؤثرتر عمل می‌کند. همچنین، در تمامی حالات، چیدمان غیرمستقیم مستقیم افت فشار بیشتری ایجاد کرده که بر کارایی کلی سیستم تأثیرگذار است.

کلیدواژه‌ها: شیر تسلا، میکرومیکسر، میکروشیر، اختلاط

۱. مقدمه

زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مواد پس از پردازش خواهند داشت [۱].

یکی از ابزارهای نوین در بهبود فرآیندهای اختلاط، میکرومیکسرها هستند که به‌طور ویژه در صنایع گاز، شیمیایی و نفتی کاربرد دارند. میکرومیکسرها تجهیزاتی هستند که برای ترکیب دقیق و سریع سیالات در مقیاس میکرو طراحی شده‌اند. این دستگاه‌ها به دلیل ابعاد کوچک و طراحی‌های خاص خود، امکان اختلاط یکنواخت گازها را فراهم می‌آورند و در فرآیندهای مختلفی مانند احتراق، واکنش‌های شیمیایی و تولید گازهای ترکیبی کاربرد دارند [۲]. میکرومیکسرها به‌ویژه در فرآیندهای گازی می‌توانند باعث بهینه‌سازی عملکرد و

میکسینگ یا اختلاط سیالات در صنایع نفت و گاز یکی از فرآیندهای حیاتی است که بر کیفیت و عملکرد محصولات نهایی تأثیر می‌گذارد. در صنایع نفت و پالایشگاه‌ها، سیالات مختلف باید به‌طور مؤثر و یکنواخت با یکدیگر ترکیب شوند تا از این طریق فرآیندهای مختلف از جمله جداسازی و اختلاط، بهینه‌سازی شوند. فرآیندهایی مانند تصفیه گاز، همگن‌سازی آب در نفت خام و کنترل لجن در مخازن ذخیره‌سازی، نیاز به اختلاط دقیق و مؤثر دارند تا کیفیت محصول نهایی به حداکثر برسد و عملکرد سیستم‌های مختلف بهبود یابد. در این میان، سیستم‌های میکسر (مخلوط‌کن) به‌عنوان ابزارهای کلیدی، نقش بسیار مهمی در بهبود کارایی این فرآیندها دارند و تأثیر



کاهش مصرف انرژی شوند که در نتیجه آن هزینه‌ها کاهش می‌یابد. فرآیند اختلاط گازها به‌ویژه در سامانه‌های احتراقی و شیمیایی تأثیر قابل توجهی بر کیفیت و عملکرد نهایی سیستم دارد. عواملی مانند چگالی، سرعت فرآیند و میزان اختلاط نقش مهمی در کارایی و بازدهی این فرآیندها دارند [۳-۵]. در این راستا، میکرومیکسرها به‌عنوان یکی از ابزارهای مؤثر، توانسته‌اند در بهبود اختلاط گازها و ارتقاء فرآیندهای احتراقی و شیمیایی نقش بسزایی ایفا کنند. در یک مطالعه، عوامل مؤثر بر میزان اختلاط گازهای دی‌اکسید کربن، متان و اکسیژن در میکرومیکسرها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش طول لوله میکرومیکسر می‌تواند تأثیر مثبت بر میزان اختلاط گازها داشته باشد که در نهایت به بهبود احتراق در توربین‌های گازی کمک می‌کند [۶].

میکرومیکسرها به دلیل طراحی ویژه خود که به اختلاط سریع و مؤثر گازها کمک می‌کند، مزایای قابل توجهی نسبت به میکسرهای سنتی دارند. این میکرومیکسرها در صنایع مختلف، از جمله صنایع گازی و شیمیایی، به‌ویژه در فرآیندهای احتراقی و واکنش‌های شیمیایی کاربرد دارند و می‌توانند باعث بهبود عملکرد سیستم‌های احتراقی شوند و حتی تولید آلاینده‌ها مانند ناکس را کاهش دهند [۷،۸]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از میکرومیکسرها در مشعل‌ها می‌تواند به بهبود اختلاط و احتراق کمک کند و در نتیجه فرایند احتراق را کارآمدتر و بهینه‌تر سازد.

الباز و همکاران [۹] نیز در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر پارامترهای مختلف، از جمله نسبت سرعت هوا به گاز طبیعی، بر میزان اختلاط این دو گاز پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که سطح ناهمگنی مخلوط گازها بر پایداری شعله تأثیر زیادی دارد و اختلاط کافی بین گاز طبیعی و هوا می‌تواند به پایداری بالای شعله کمک کند. این یافته‌ها اهمیت کنترل دقیق شرایط اختلاط را در سامانه‌های احتراقی نشان می‌دهد، به‌ویژه زمانی که از میکرومیکسرها برای بهبود فرآیند اختلاط استفاده می‌شود.

در میان انواع میکرومیکسرها، میکرومیکسرهای غیرفعال مانند میکرومیکسر شیر تسلا به دلیل عدم نیاز به نیروی خارجی و استفاده از هندسه خاص خود برای اختلاط، در بسیاری از صنایع بیولوژیکی و شیمیایی کاربرد دارند. این میکرومیکسرها به‌ویژه در صنایعی که مواد به نیروهای خارجی حساس هستند و تغییرات دما می‌تواند تأثیر زیادی بر ساختار آن‌ها بگذارد، مفید هستند. همچنین، این سامانه‌ها

در زمینه‌های دیگری مانند صنایع دارویی، پزشکی و تحلیل ترکیبات شیمیایی نیز کاربرد گسترده‌ای دارند و به بهبود واکنش‌ها و کاهش هزینه‌های کلی کمک می‌کنند [۱۰،۱۱]. این میکسرها به دلیل سرعت بالا، دقت زیاد و مصرف کم سیال در کاربردهای مختلف صنعتی و آزمایشگاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۲-۱۴]. در سال‌های اخیر، فناوری میکروسیالی (شاخه‌ای از علم که به کنترل سیالات در ابعاد میکرو می‌پردازد) در زمینه‌های گوناگون و کاربردهای متفاوت، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱۵]. بررسی کاربردهای سیالات در ابعاد میکرو و مقایسه آن با مقیاس‌های ماکرو نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های میکروسیالی مزایای خاصی به همراه دارد [۱۶]. سامانه‌های میکروسیالی دارای ابعاد کوچک و حجم کمی هستند، هزینه‌های اجرایی را کاهش می‌دهند و امکان کنترل دقیق‌تری بر عوامل محیطی و هندسی فراهم می‌کنند [۱۵]. در بسیاری از کاربردهای سامانه‌های میکروسیالاتی، میزان یکنواختی سیال داخل سیستم نقش مهمی در عملکرد و بازدهی آن ایفا می‌کند. جریان سیالات در هندسه‌های میکرو اغلب به‌صورت آرام انجام می‌شود و فرایند اختلاط در این ابعاد به‌طور طبیعی بسیار کند و تدریجی است. این روند کند اختلاط موجب افزایش زمان مورد نیاز برای انجام عملیات می‌شود؛ بنابراین، طراحی میکرو میکسرهای کارآمد برای بهبود و تسریع فرایند اختلاط به یکی از اهداف اصلی محققان در سال‌های اخیر تبدیل شده است [۱۷]. میکرومیکسرها به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی در فرآیندهای شیمیایی و سامانه‌های میکروسیالی شناخته می‌شوند، زیرا در این فرآیندها نیاز به همگن‌سازی سریع و دقیق نمونه‌ها وجود دارد. به‌طور کلی، این تجهیزات به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند که هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند [۱۸]. در میکرومیکسرهای غیرفعال، از رفتار طبیعی سیالات برای اختلاط نمونه‌ها استفاده می‌شود و این دسته، نخستین نوع از میکرومیکسرها در سامانه‌های میکروسیالی محسوب می‌شوند [۱۹]. این دستگاه‌ها با طراحی ویژه‌ی خود، پدیده‌های انتشار مولکولی را تقویت کرده و به این ترتیب فرآیند اختلاط را در مقیاس کوچک بهبود می‌بخشند [۱۹]. در مقابل، میکرومیکسرهای فعال با به‌کارگیری نیروهای خارجی همچون حرارت، امواج صوتی و میدان‌های مغناطیسی یا الکتریکی فرآیند اختلاط را تسهیل می‌کنند [۲۰]. اگرچه میکرومیکسرهای فعال راندمان اختلاط بالاتری دارند، اما ادغام آن‌ها با سامانه‌های میکروسیالی به دلیل هزینه و پیچیدگی بیشتر، دشوارتر است





و به‌ویژه در کاربردهای حساس مانند فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی، به دلیل تولید گرادیان دمایی (ناشی از امواج اولتراسونیک)، کمتر توصیه می‌شوند [۱۵، ۱۸]. در چنین کاربردهایی، حفظ سلامت و خلوص نمونه اهمیت بالایی دارد و میکرومیکسرهای غیرفعال به دلیل اثر کمتر بر ویژگی‌های نمونه‌ها، انتخاب مناسب‌تری به حساب می‌آیند.

میکرومیکسرهای مبتنی بر شیر تسلا، نوعی از میکرومیکسرهای غیرفعال هستند که با استفاده از ساختار خاص خود، به‌ویژه طراحی جریان یک‌طرفه، فرآیند اختلاط سیالات را بهبود می‌بخشند. شیر تسلا یک شیر یک‌طرفه غیرفعال با ساختار ساده است. زمانی که سیال به سمت جلو حرکت می‌کند، مقاومت جریان کم بوده و سیال به راحتی جریان می‌یابد؛ اما زمانی که سیال به‌صورت معکوس جریان پیدا می‌کند، مقاومت جریان بالا می‌رود و جریان بدون نیروی خارجی دشوار می‌شود. این به دلیل ساختار خاص شیر تسلا است که باعث می‌شود سیال در جریان معکوس تقسیم شده و باهم برخورد کند. به همین دلیل، بسیاری از محققان از ویژگی‌های تقسیم جریان و برخورد سیال در جریان معکوس شیر تسلا برای اختلاط میکروسیالات استفاده کرده‌اند. برخی از محققان [۲۱] یک میکرومیکسر با ساختار شیر تسلا طراحی کردند که در هنگام عدد رینولدز ۱۰۰، عملکرد اختلاط آن به‌طور قابل توجهی بهبود یافته و افت فشار به میزان قابل توجهی در مقایسه با میکرومیکسر نوع T سنتی، کاهش یافته است. ونگ و همکاران [۲۲] طراحی زاویه θ ساختار شیر تسلا را بهینه کردند و این ساختار عملکرد اختلاط بهتری نسبت به نتایج طراحی هونگ و همکاران [۲۱] داشت. ونگ و همکاران [۲۳] زاویه ورودی شیر تسلا را با استفاده از شبیه‌سازی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی را بررسی کردند و دریافتند که زاویه 45° بالاترین نرخ اختلاط را فراهم می‌کند، سپس آزمایش‌هایی برای تأیید این ساختار انجام دادند. ونگ و همکاران [۲۴]، اثر وضعیت ورودی جریان در هر واحد شیر تسلا در ویژگی‌های دیودی آن با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش تعداد واحدها، به دلیل تغییر جریان ورودی از واحدهای بعدی، باعث بهبود عملکرد دیودی می‌شود. این فرضیه با افزایش فاصله بین واحدها تأیید شد، جایی که کاهش عملکرد دیودی مشاهده شد. بوگلی و همکاران [۲۵]، میکرومیکسر تسلا دوبعدی در اعداد رینولدز و مراحل مختلف شیرهای تسلا را جهت دستیابی به مخلوط بهینه را ارزیابی و مشاهده کردند. محققین نتایج دو رژیم

مختلف برای رینولدز کم و زیاد که در هر دو جریان آرام است را بررسی کردند. در رژیم رینولدز کم، مخلوط‌سازی به تدریج با عبور سیال از هر شیر افزایش یافت، در حالی که در رژیم رینولدز زیاد، مخلوط‌سازی به‌طور قابل توجهی در اولین شیر تقویت شد که ناشی از جریان مخالف تقویت‌شده از شاخه هلیکس است که موجب افزایش نفوذ آشوبی در کانال اصلی میکرو بوده است.

به‌طور خلاصه، میکرومیکسرهای در صنایع مختلف، از جمله صنعت گاز و نفت، برای اختلاط دقیق و سریع گازها به کار گرفته می‌شوند و در فرآیندهایی نظیر احتراق و واکنش‌های شیمیایی، نقش کلیدی در کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی ایفا می‌کنند. نوآوری این پژوهش در استفاده از طراحی‌های جدید برای سری کردن شیرهای تسلا نهفته است. این ساختارها که پیش‌تر به این شکل بررسی نشده‌اند، باهدف بهبود اختلاط در میکرومیکسرهای چندمرحله‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این راستا، اثر پارامترهایی نظیر جهت چیدمان (مستقیم و غیرمستقیم)، تعداد مراحل، عدد رینولدز، اختلاف سرعت در جریان‌های ورودی و جهت جریان به‌طور جامع تحلیل شده است. این پژوهش که با روش‌های عددی و به کمک نرم‌افزار انسیس فلونت انجام می‌شود، پس از اعتبارسنجی و اطمینان از استقلال شبکه، زمینه‌ساز ارائه راهکارهای جدیدی در طراحی و بهینه‌سازی میکرومیکسرها خواهد بود.

۲. شرح مسئله

مطابق (شکل ۱)، جریان دو سیال مختلف (هر دو مایع آب)، از طریق دو ورودی جداگانه و با جریان آرام وارد می‌شوند. با فرض این که این سیالات دارای ویژگی‌هایی متفاوت هستند، فرآیند اختلاط آن‌ها در طول میکروشیر تسلا دو بعدی بررسی شده است. ابعاد ورودی میکروکانال برای هر دو سیال برابر با 0.05 میکرومتر در نظر گرفته شده و طول کانال‌ها پیش از ورود به مراحل طراحی تسلا برابر با 0.3 میکرومتر است. هر مرحله از ساختار تسلا نیز دارای طولی برابر با 0.4 میکرومتر است. سایر مشخصات هندسی و دو چیدمان مستقیم و غیرمستقیم در (شکل ۱) نشان داده شده‌اند. این چیدمان‌ها برای تحلیل تأثیر طراحی بر عملکرد اختلاط سیالات به کار رفته‌اند. ابعاد، زاویه و محل قرارگیری منحنی درون میکرومیکسرهای تسلا متناسب با شرایط هندسی کانال انتخاب می‌شود و هم‌راستا با ورودی کانال و موازی با دیوارهای منحنی کانال اصلی است [۱۱، ۲۶، ۲۷].

$$DOM = 1 - \frac{1}{\zeta} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\phi_i - \zeta)^2}{n}} \quad (4)$$

در این رابطه، ζ میانگین یا مقدار مرجع کسر جرمی (در اینجا $0/5$) مقدار کسر جرمی در نقطه i و n تعداد نقاط نمونه‌گیری است. این معادله بیان می‌کند که هرچه انحراف ϕ_i از مقدار مرجع ζ کمتر باشد، DOM به مقدار ۱ نزدیک‌تر شده و نشان‌دهنده اختلاط بهتر است. در مقابل، اگر اختلاف ویژگی‌ها بیشتر باشد، مقدار DOM کاهش یافته و به صفر میل می‌کند که نشان‌دهنده اختلاط ضعیف است. این معیار به‌طور گسترده در ارزیابی عملکرد دستگاه‌های اختلاط مانند میکرومیکسرها استفاده می‌شود و به‌ویژه برای تحلیل یکنواختی اختلاط در فرایندهای شیمیایی و گازی اهمیت دارد.

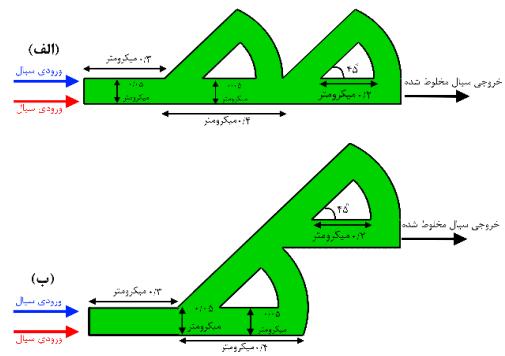
ویژگی‌های سیال، از جمله چگالی، ضریب پخش و ویسکوزیته، برابر با مقادیر آب فرض شده و به ترتیب دارای مقادیر زیر هستند: $\rho = 997$ کیلوگرم بر مترمکعب، $D = 0/1 \times 10^{-10}$ مترمربع بر ثانیه و $\nu = 0/97 \times 10^{-6}$ مترمربع بر ثانیه. عدد رینولدز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{U_{mean} d_h}{\nu} \quad (5)$$

که در آن U_{mean} ، d_h و ν به ترتیب نشان‌دهنده سرعت متوسط، قطر هیدرولیکی کانال و ویسکوزیته سینماتیکی سیال هستند.

۳-۱. بررسی شبکه

برای اطمینان از صحت نتایج و استقلال آن‌ها از شبکه محاسباتی، مطالعه‌ای با ۷ شبکه انجام شد. به دلیل هندسه میکرومیکسر تسلا، از شبکه بی‌سازمان مثلثی استفاده شده است. (شکل ۲) افت فشار را برای تعداد سلول‌های مختلف نشان می‌دهد و نتایج با ریزتر شدن شبکه به هم نزدیک می‌شوند. با توجه به تغییرات ناچیز پس از ۴۵,۰۰۰ سلول، این تعداد برای مطالعات بعدی انتخاب شد. شبکه تولید شده در (شکل ۳) ارائه شده است و به دلیل اینکه رژیم جریان درون میکرومیکسر آرام است، توزیع پروفیل سرعت به آرامی تغییر می‌کند و ریزشدگی شبکه در نزدیک دیواره لازم نیست [۳۰]



شکل ۱: شماتیک هندسه (الف) ساختار مستقیم، (ب) ساختار غیرمستقیم

۳. معادلات حاکم و روش محاسباتی

ویژگی‌های جریان سیال و مخلوط‌سازی میکرومیکسر حاضر با استفاده از نرم‌افزار تجاری انسیس فلونت ۲۰۲۱ نسخه ۲ شبیه‌سازی شد. این نرم‌افزار با روش حجم محدود، معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس و معادله جابه‌جایی-پخش را برای مخلوط‌سازی حل می‌کند؛ بنابراین، از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس زیر استفاده شد:

$$(\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

که در آن p ، \vec{u} و ν به ترتیب بردار سرعت، فشار و ویسکوزیته سینماتیکی هستند. شبیه‌سازی اختلاط شامل حل معادله جابه‌جایی-پخش به‌صورت زیر است:

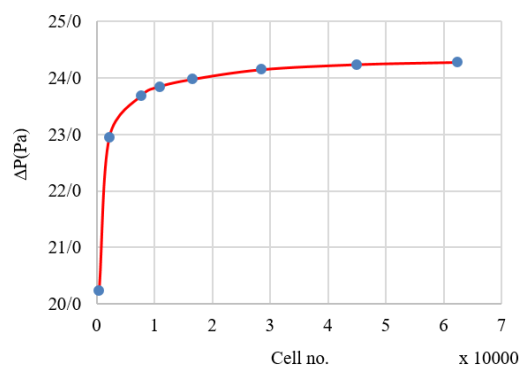
$$(\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \phi = D \nabla^2 \phi \quad (3)$$

که در آن D و ϕ به ترتیب پخش‌پذیری جرمی و کسر جرمی سیال A هستند. برای گسسته‌سازی عبارات جابه‌جایی در (معادلات ۱ و ۳)، از روش QUICK (درون‌بایی بالادست درجه سه برای جنبش جابه‌جایی) استفاده شد که به‌دقت مرتبه سوم شناخته می‌شود. با توجه به این که میکسر حاضر دو ورودی با نام‌های ورودی ۱ و ورودی ۲ دارد، کسر جرمی سیال اول در ورودی ۱ به $\phi = 1$ و در ورودی ۲ به $\phi = 0$ تنظیم شد. این به معنی ورود سیال اول از ورودی ۱ و سیال دوم از ورودی ۲ است. در خروجی، شرط خروجی فشار محیط اعمال شد. همچنین، شرط مرزی بدون لغزش برای دیوارها تعیین شد. در سامانه‌های میکرومیکسر برای ارزیابی عملکرد اختلاط، از پارامتر درجه اختلاط به‌صورت زیر استفاده می‌شود [۲۸، ۲۹]:

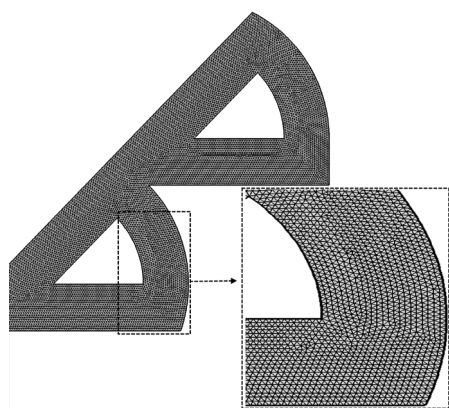


۲-۳. اعتبارسنجی

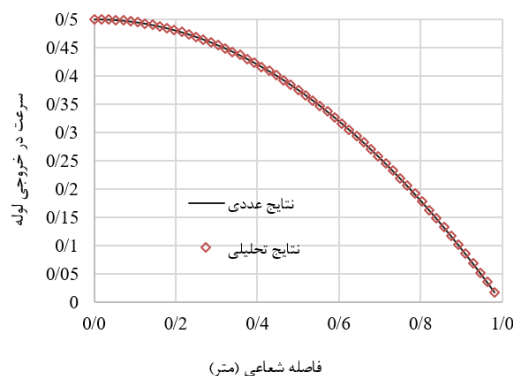
مرحله شیر تسلا در (شکل ۷) نشان داده شده است. همان‌گونه انتظار می‌رود با افزایش تعداد مراحل فرایند اختلاط بهبود می‌یابد. به‌عنوان مثال، مطابق (شکل ۸) که بیانگر میزان افت فشار و درجه اختلاط است، با افزایش مراحل از سه به شش طبقه، راندمان اختلاط حدود ۲۱ درصد بهبود می‌یابد؛ اما افت فشار نیز در حدود ۷۰ درصد افزایش می‌یابد. علت افزایش قابل توجه افت فشار سطح مقطع بسیار کوچک جریان است



شکل ۲: تغییرات افت فشار بر اساس تعداد سلول‌ها



شکل ۳: شبکه‌بندی منتخب با تعداد ۲۸۴۳۹ سلول



شکل ۴: توزیع پروفیل سرعت در خروجی لوله

اعتبارسنجی در شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا صحت نتایج شبیه‌سازی را با مقایسه داده‌های منتشر شده تحلیلی، تجربی یا محاسباتی منتشر شده تأیید می‌کند. بدون اعتبارسنجی، نتایج ممکن است به مدل‌های فیزیکی نادرست یا گسسته‌سازی نامناسب وابسته باشند که می‌تواند تصمیمات طراحی را به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. در این قسمت اعتبارسنجی‌های لازم برای حل مسئله انجام می‌شود. در بخش اول پروفیل سرعت در خروجی یک لوله با نتایج تحلیلی مربوط به جریان کاملاً توسعه یافته [۳۱] اعتبارسنجی شده است؛ و در بخش دوم اعتبارسنجی میزان افت فشار تحمیلی در کانال با افزایش عدد رینولدز با نتایج تجربی به‌دست آمده توسط دارسی-ویسباخ (رابطه ۷) ارزیابی شده است [۳۲،۳۳]. در اعتبارسنجی اول، فرض شده است که عدد رینولدز جریان ورودی به لوله ۵۰ است. پروفیل جریان کاملاً توسعه در (رابطه ۶) داده شده است. (شکل ۴)، توزیع پروفیل سرعت در خروجی لوله را نشان داده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد نتایج مطالعه حاضر همخوانی و مطابقت خوبی با حل تحلیلی دارد؛ و در اعتبارسنجی دوم فرض شده است که جریان با اعداد رینولدز ۱ الی ۱۰۰۰ درون کانال جاری شده است و میزان افت فشار درون کانال ارزیابی شده است. مطابق با (شکل‌های ۵ و ۶) میزان افت فشار به‌دست آمده در مطالعه حاضر با نتایج تجربی همخوانی مناسبی دارد.

$$u(r) = 2U_{mean} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (6)$$

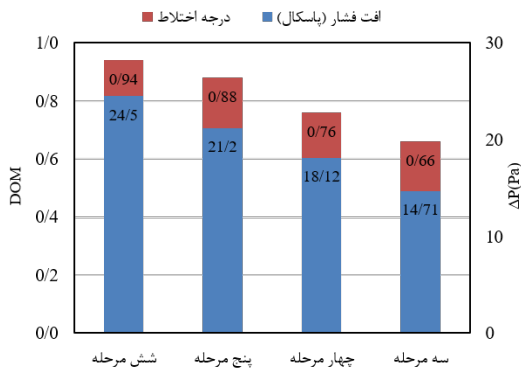
$$f = \frac{64}{Re}, \Delta P = \left(\frac{\rho v^2}{2}\right) \left(\frac{L}{D}\right) (f) \quad (7)$$

۴. نتایج و بحث

در این بخش، عوامل تأثیرگذار بر میزان اختلاط و افت فشار اعمال شده بر جریان مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا شرایط بهینه، شامل حداکثر درجه اختلاط همراه با حداقل افت فشار، شناسایی و حاصل شود.

۴-۱. اثر تعداد مراحل

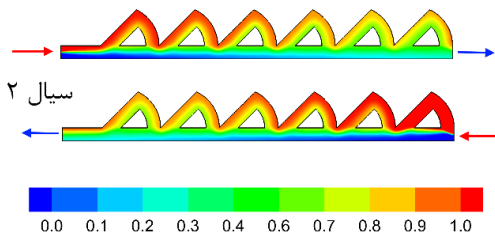
در این بخش اثر تعداد مراحل شیر تسلا بر میزان اختلاط و افت فشار درون کانال با چینش خطی بررسی شده است. کانتور کسر جرمی برای تعداد ۳، ۴، ۵ و ۶



شکل ۸: میزان افت فشار و درجه اختلاط بر اساس تعداد مراحل (رینولدز=۱)

۲-۴. اثر جهت جریان بر اختلاط

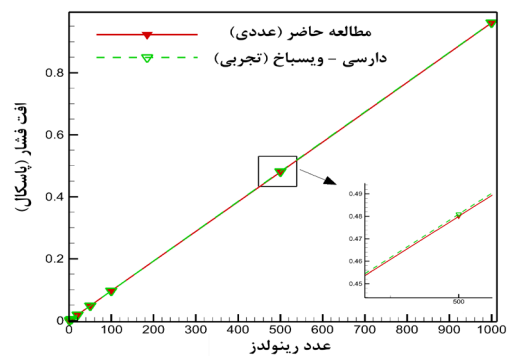
جهت جریان می‌تواند بر عملکرد میکرومیکسر مؤثر باشد. در این قسمت اثر جهت جریان بر افت فشار و درجه اختلاط در عدد رینولدز یک بررسی شده است. همان‌طوری که در (شکل ۹) ملاحظه می‌شود، میکرومیکسر شش طبقه با چیدمان مستقیم در هر دو جهت عملکرد مطلوبی از خود نشان می‌دهد. میزان اختلاط و افت فشار جریان‌ها در این دو حالت در (شکل ۱۰) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که درجه اختلاط در هر دو وضعیت بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و اختلافی در حدود ۲ درصد دارند. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که جهت جریان تأثیر قابل توجهی بر افت فشار ندارد.



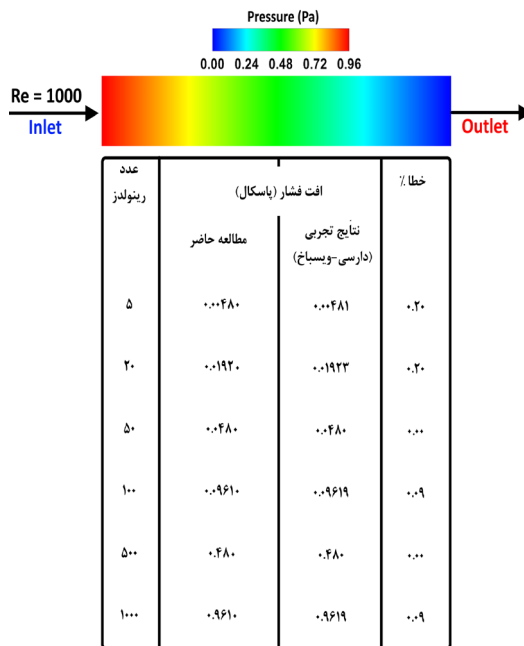
شکل ۹: اثر جهت جریان بر میزان اختلاط، کانتور کسر جرمی (رینولدز=۱)

۳-۴. اثر چیدمان بر عملکرد شیرها

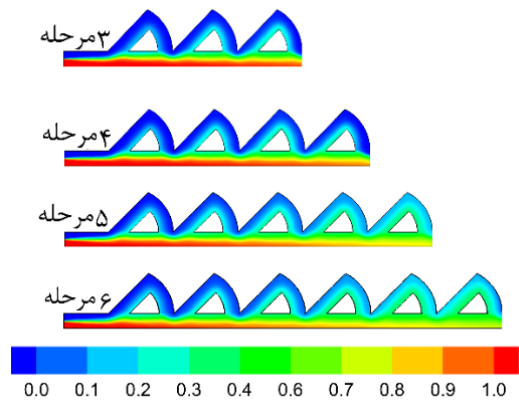
شیرهای تسلا به دلیل ساختار بدون قطعه متحرک و قابلیت تنظیم جریان در جهت خاص، گزینه‌ای مناسب برای اختلاط سیالات هستند. چیدمان‌های مختلف می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر میزان اختلاط و افت فشار داشته باشند. در جریان‌های میکرو، افت فشار اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا به دلیل ابعاد کوچک کانال‌ها، هرگونه تغییر در مسیر می‌تواند مقاومت قابل توجهی در برابر حرکت سیال ایجاد کند و بر مصرف انرژی و کارایی سیستم اثر بگذارد. این افت فشار بالا در مقیاس میکرو



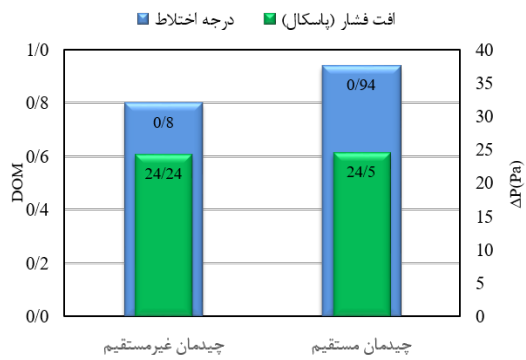
شکل ۵: مقایسه میزان افت فشار در لوله بر حسب عدد رینولدز



شکل ۶: کانتور و مقدار کمی افت فشار در لوله و مقایسه نتایج عددی و تجربی



شکل ۷: اثر افزایش تعداد مراحل تسلا بر میزان اختلاط، کانتور کسر جرمی (رینولدز=۱)



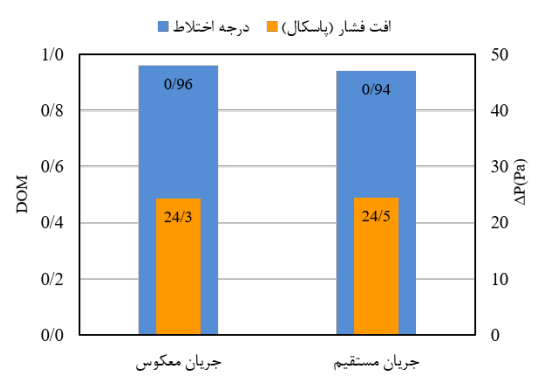
شکل ۱۲: اثر چیدمان بر میزان افت فشار و درجه اختلاط (رینولدز=۱)

۴-۴. اثر عدد رینولدز در چیدمان‌های مختلف

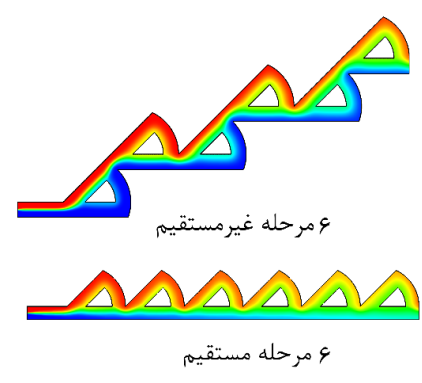
اثر رینولدز در دو چیدمان مستقیم و غیرمستقیم بررسی شده است. اثر عددهای رینولدز بر روی کانتور کسر جرمی در (شکل ۱۳) نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که عملکرد چیدمان غیرمستقیم با افزایش عدد رینولدز بهبود می‌یابد. با مراجعه به (شکل ۱۴) که میزان درجه اختلاط و افت فشار را نمایش داده است، ملاحظه می‌شود که میزان اختلاط برای چیدمان غیرمستقیم در رینولدز ۱۰۰ به یک نزدیک می‌شود. این درحالی‌که که میزان اختلاط در چیدمان مستقیم در اعداد رینولدز بالاتر حتی بدتر می‌شود زیرا که افت فشار تحمیل شده به جریان افزایش پیدا کرده است و میزان اختلاط تغییری نکرده است. علت این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که جریان با مومنتوم بالاتر تمایلی به تغییر جهت نداشته و برای همین جریان بیشتر ترجیح می‌دهد که مسیر مستقیم را طی کند. همچنین در چیدمان غیرمستقیم به دلیل سطوح ایجاد شده ناشی از تغییر محل مراحل تسلا و تغییر زاویه ناگهانی، جریان با مومنتوم بالا به دیواره‌ها برخورد کرده و تغییر جهت ناگهانی درون جریان سیال ایجاد می‌گردد که باعث بهبود اختلاط در رینولدز بالا شده است

در میکروکانال‌ها، افت فشار زیاد یکی از چالش‌های مهم است، چراکه به دلیل ابعاد بسیار کوچک کانال، حتی تغییرات جزئی در مسیر یا سطح داخلی آن می‌تواند مقاومت زیادی در برابر جریان سیال ایجاد کند. این افت فشار بالا به معنای نیاز به انرژی بیشتر برای حفظ جریان مناسب است و می‌تواند کارایی سیستم را کاهش دهد. علاوه بر این، افت فشار زیاد ممکن است منجر به

می‌تواند باعث محدودیت جریان و نیاز به توان بیشتر برای حفظ جریان مناسب شود، درحالی‌که انتخاب چیدمان مناسب می‌تواند تعادلی بین بهبود اختلاط و کنترل افت فشار ایجاد کند در (شکل ۱۱)، تأثیر چیدمان شش مرحله‌ای شیر تسلا در دو حالت مستقیم و غیرمستقیم بر کانتور کسر جرمی نمایش داده شده است. برای هر دو جریان، عدد رینولدز برابر با یک در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهند که راندمان اختلاط در چیدمان مستقیم به‌طور محسوسی بهتر است. این بهبود به‌وضوح در (شکل ۱۲) قابل مشاهده است، جایی که درجه اختلاط در چیدمان مستقیم حدود ۲۰ درصد افزایش یافته است. توزیع سیال ۱ درون سیال ۲ در هر مرحله در میکرومیکس مستقیم باعث بهبود نرخ اختلاط در مقایسه با غیرمستقیم است. مطابق (شکل ۱۱) سیال ۱ درون سیال ۲ در چیدمان غیرمستقیم به ازای هر ۲ مرحله توزیع می‌شود و دلیل بهبود اختلاط در چیدمان مستقیم توزیع سریع‌تر سیال ۱ درون سیال ۲ است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که افت فشار در هر دو چیدمان تقریباً یکسان بوده و تفاوت قابل توجهی ندارد.



شکل ۱۰: اثر جهت جریان بر میزان افت فشار و درجه اختلاط (رینولدز=۱)



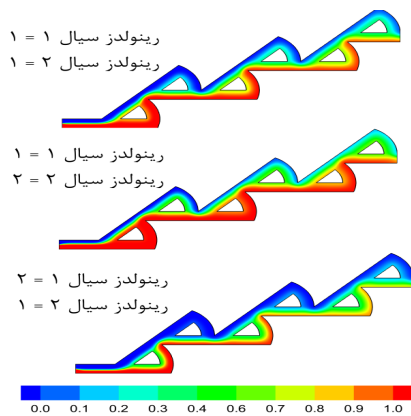
شکل ۱۱: تأثیر چیدمان بر میزان اختلاط، کانتور کسر جرمی (رینولدز=۱)

جدول ۱: مقایسه میزان بهبود افت فشار و درجه اختلاط برای اعداد رینولدز مختلف در چیدمان‌های متفاوت

عدد رینولدز = ۱۰	
درجه اختلاط چیدمان مستقیم (-)	۰/۹۶
افت فشار چیدمان مستقیم (پاسکال)	۲۴۵
درجه اختلاط چیدمان غیرمستقیم (-)	۰/۸۲
افت فشار چیدمان غیرمستقیم (پاسکال)	۲۵۵/۷
بهبود درجه اختلاط نسبت به حالت نامطلوب (%)	۱۷
بهبود افت فشار نسبت به حالت نامطلوب (%)	۴/۱۸
عدد رینولدز = ۱۰۰	
درجه اختلاط چیدمان مستقیم (-)	۰/۹۶
افت فشار چیدمان مستقیم (پاسکال)	۲۴۵۱
درجه اختلاط چیدمان غیرمستقیم (-)	۱
افت فشار چیدمان غیرمستقیم (پاسکال)	۸۴۸۸
بهبود درجه اختلاط نسبت به حالت نامطلوب (%)	۴/۱۶
بهبود افت فشار نسبت به حالت نامطلوب (%)	۷۱/۱۲

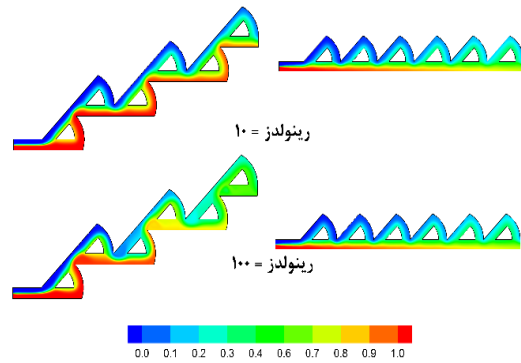
۵-۴. اثر اختلاف سرعت جریان‌های ورودی بر میزان اختلاط

اختلاف سرعت دو سیال در ورودی‌ها می‌تواند بر راندمان اختلاط مؤثر باشد. فرایند اختلاط برای سه حالت مختلف رینولدز ورودی در (شکل ۱۵)، نشان داده شده است. برای درک بهتر، (شکل ۱۶) می‌توان در نظر گرفت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، زمانی که رینولدز در ورودی یک بیشتر باشد فرایند بهتر انجام می‌شود. دلیل تغییر اختلاط در خروجی با افزایش رینولدز در یکی از ورودی‌ها، افزایش سرعت در ورودی یکی از فازها است. با افزایش سرعت یکی از فازها، میزان مومنتوم و دبی جرمی فاز موردنظر افزایش پیدا می‌کند و در میزان اختلاط نهایی میکسر اثرگذار است. سیالی که دارای رینولدز بیشتری است به دلیل دبی جرمی و سرعت بیشتری که نسبت به سیال دیگر دارد، در میزان اختلاط اثر بیشتر می‌گذارد.

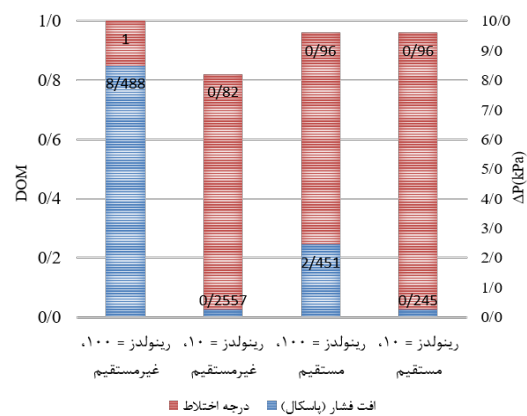


شکل ۱۵: فرایند و میزان اختلاط برای رینولدزهای مختلف در ورودی‌ها، کانتور کسر جرمی

پدیده‌های نامطلوبی مانند کاویتاسیون شود که می‌تواند آسیب‌های فیزیکی به ساختار داخلی کانال وارد کند. نشستی نیز در مقیاس میکرو می‌تواند مشکل‌ساز باشد؛ در این ابعاد کوچک، حتی کوچک‌ترین ناپیوستگی یا نقص در دیواره‌ها می‌تواند باعث نشستی شود که هم عملکرد سیستم را مختل می‌کند و هم موجب کاهش ایمنی و دقت در فرآیند می‌شود. نشستی‌ها می‌توانند به دلیل فشار بالای جریان در مقیاس میکرو به راحتی رخ دهند و کنترل دقیق بر روی کیفیت و یکپارچگی ساختار کانال‌ها را ضروری می‌سازند. (جدول ۱) میزان بهبود افت فشار و درجه اختلاط را نسبت به شرایط مطلوب نشان می‌دهد. اگرچه چیدمان غیرمستقیم عملکرد قابل توجهی از خود نشان می‌دهد، اما در عدد رینولدز ۱۰۰، با ۱۲/۷۱ درصد افت فشار بیشتر همراه است. با در نظر گرفتن این نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب این چیدمان به‌عنوان طرح بهینه نیازمند احتیاط بیشتری است، زیرا افزایش افت فشار ممکن است بر کارایی کلی سیستم تأثیر منفی بگذارد.



شکل ۱۳: اثر چیدمان بر روی اختلاط در دو رینولدز ۱۰ و ۱۰۰، کانتور کسر جرمی



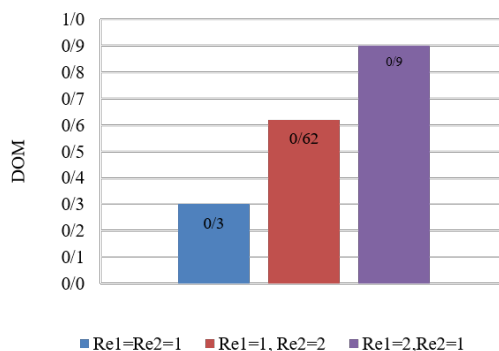
شکل ۱۴: اثر عدد رینولدز بر روی میزان اختلاط

افت فشار به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۲. جهت حرکت جریان یا جهت چینش طبقات نسبت به جریان تأثیر قابل توجهی بر راندمان اختلاط و یا افت فشار ندارد.

۳. اثر جهت چیدمان طبقات اثرات متناقضی در رینولدزهای بالا و پایین دارد. چینش‌های مستقیم در رینولدزهای پایین راندمان اختلاط بهتری نسبت به چینش‌های غیرمستقیم دارند؛ اما در رینولدزهای بالا چینش‌های غیرمستقیم عملکرد بهتری دارند. چینش‌های غیرمستقیم در همه وضعیت‌ها افت فشار بیشتری دارند.

۴. اگر رینولدز در ورودی یک بزرگ‌تر باشد، فرایند اختلاط بهتر انجام می‌شود.



شکل ۱۶: درجه اختلاط برای حالت‌های مختلف رینولدز در دو ورودی

۵. نتیجه‌گیری

میکرومیکسرها تجهیزاتی هستند که برای اختلاط دقیق و سریع سیالات در مقیاس میکرو به کار می‌روند و در صنایع مختلف از جمله صنعت گاز و نفت، داروسازی، پزشکی و شیمیایی کاربرد دارند. این دستگاه‌ها به دلیل ابعاد کوچک، هزینه‌های کم و توانایی کنترل دقیق بر فرایندهای اختلاط، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. میکرومیکسرهای مبتنی بر شیر تسلا با ساختار خاص خود، مقاومت در برابر جریان معکوس ایجاد کرده و به بهبود اختلاط سیالات کمک می‌کنند. این ویژگی‌ها باعث بهبود عملکرد سامانه‌های میکروسیالی، کاهش افت فشار و افزایش کارایی در مقایسه با سایر میکرومیکسرها می‌شود که نتایج به‌دست آمده در مطالعه با نتایج به‌دست آمده توسط محققین برای سایر میکرومیکسرها با هندسه‌های متفاوت در (جدول ۲)، مقایسه شده است.

جدول ۲: مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه هیدرات‌گازی

منبع	RE	ΔP	DOM	هندسه
مطالعه حاضر	۱	۲۴/۵	۰/۹۴	تسلا
[۳۴]	۱	۹۰	۰/۶	بافل متعدد
[۳۵]	۱	۲۰۰	۰/۲۵	مارپیچ
[۲۸]	۱	۷۰۰	۰/۸۵	کانال دایروی

در این مطالعه اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد یک میکرومیکسر چندطبقه‌ای مبتنی بر شیرهای تسلا به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد میکرومیکسر مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به‌طور خلاصه به شرح زیر است:

۱. با افزایش تعداد طبقات میکرومیکسر، راندمان اختلاط بهبود می‌یابد، اما به خاطر مقطع بسیار کوچک مسیر،

مراجع:

- [1]. R.R. Hemrajani, Fluid Mixing Technology in the Petroleum Industry, in: E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta (Eds.), Handbook of Industrial Mixing, 1st ed., Wiley, 2003: pp. 1171–1186. <https://doi.org/10.1002/0471451452.ch19>.
- [2]. A.A. Araoye, A. Abdelhafez, M.A. Nemtallah, M.A. Habib, R. Ben-Mansour, M. Hussain, Shape and stability characteristics of hydrogen-enriched natural-gas oxy-flames in a micromixer burner, Combustion Science and Technology 195 (2023) 1887–1909. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2006190>.
- [3]. R. Gan, W. Wang, B. Li, G. Yang, X. Li, Design of High-Temperature Gas Mixing Device Based on Tesla-Type Channel, in: 2023 9th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), IEEE, Lanzhou, China, 2023: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/FPM57590.2023.10565627>.
- [4]. A. Zacepins, D. Kotovs, V. Komasilovs, A. Kvisis, Economic Modelling of Mixing Hydrogen with Natural Gas, Processes

- nanofluid-cooled heat sink with helical Tesla valve-based microchannels, *Case Studies in Thermal Engineering* 58 (2024) 104429. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104429>.
- [11]. H. Shi, Y. Cao, Y. Zeng, Y. Zhou, W. Wen, C. Zhang, Y. Zhao, Z. Chen, Wearable tesla valve-based sweat collection device for sweat colorimetric analysis, *Talanta* 240 (2022) 123208. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123208>.
- [12]. A. Purwidyantri, B.A. Prabowo, Tesla Valve Microfluidics: The Rise of Forgotten Technology, *Chemosensors* 11 (2023) 256. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11040256>.
- [13]. K. Mohammadzadeh, M. Gharib, M. and Abbasi, Numerical Investigation of Oscillatory Fluid Flow Through a Tesla Microvalve, *Modares Mechanical Engineering* 18 (2018). <http://mme.modares.ac.ir/article-15-908-fa.html>.
- [14]. K. Mohammadzadeh, E.M. Kolahdouz, E. and Shirani, Numerical study on the effect of the number of stages on the performance of Tesla microvalve and comparison with nozzle/diffuser microvalve, *Modares Mechanical Engineering* 12 (2013). <http://mme.modares.ac.ir/article-15-6973-fa.html>.
- [15]. S. Razavi Bazaz, A. Sayyah, A.H. Hazeri, R. Salomon, A. Abouei Mehrizi, M. Ebrahimi Warkiani, Micromixer research trend of active and passive designs, *Chemical Engineering Science* 293 (2024) 120028. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120028>.
- [16]. M. Xiong, J. Yang, X. Ding, H. Li, H. Zhang, Topology optimization design of micromixer based on principle of Tesla 12 (2024) 262. <https://doi.org/10.3390/pr12020262>.
- [5]. E. Rój, M. Dmoch, CFD study of gas mixing efficiency and comparisons with experimental data, in: *Computer Aided Chemical Engineering*, Elsevier, 2007: pp. 509–514. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(07\)80108-8](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(07)80108-8).
- [6]. A.A. Araoye, A. Abdelhafez, R. Ben-Mansour, M.A. Nemitallah, M.A. Habib, On the quality of micromixing in an oxy-fuel micromixer burner for gas turbine applications: A numerical study, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 162 (2021) 108336. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108336>.
- [7]. X. Chen, H. Wang, C. Wang, X. Wang, N. Wang, X. Liu, Numerical investigation into fuel–air mixing characteristics and cold flow field of single hydrogen-rich Micromix nozzle, *Fuel* 332 (2023) 126181. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126181>.
- [8]. X. Chen, H. Wang, X. Wang, X. Liu, Y. Zhu, Fuel/air mixing characteristics of a Micromix burner for hydrogen-rich gas turbine, *Energy* 282 (2023) 128786. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128786>.
- [9]. A.M. Elbaz, M.S. Mansour, B.M. Akoush, M. Juddoo, A.M. Khedr, H.M. Al-Bulqini, M.F. Zayed, M.M.A. Ahmed, W.L. Roberts, A.R. Masri, Detailed investigation of the mixing field and stability of natural gas and propane in highly turbulent planar flames, *Fuel* 309 (2022) 122222. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122222>.
- [10]. A. Shahsavar, M. Hasani, A. Alizadeh, Two-phase simulation of hydrothermal performance and entropy generation aspects of a biologically prepared

- valve structure, *Huagong Jinzhan/ Chemical Industry and Engineering Progress* 40 (2021) 4173–4178. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1894>.
- [23]. X. Wang, L. Yang, F. Sun, CFD analysis and RSM optimization of obstacle layout in Tesla micromixer, *International Journal of Chemical Reactor Engineering* 19 (2021) 1045–1055. <https://doi.org/10.1515/ijcre-2021-0087>.
- [24]. P. Wang, P. Hu, L. Liu, Z. Xu, W. Wang, B. Scheid, On the diodicity enhancement of multistage Tesla valves, *Physics of Fluids* 35 (2023) 052010. <https://doi.org/10.1063/5.0145172>.
- [25]. W.L. Buglie, K.F. Tamrin, N.A. Sheikh, M.F.M. Yasin, S. Mohamaddan, Enhanced fluid mixing using a reversed multistage Tesla micromixer, *Chemical Engineering & Technology* 45 (2022) 1255–1263.
- [26]. G. Du, T.R. Alsenani, J. Kumar, S. Alkhalaf, T. Alkhalifah, F. Alturise, H. Almujibah, S. Znaidia, A. Deifalla, Improving thermal and hydraulic performances through artificial neural networks: An optimization approach for Tesla valve geometrical parameters, *Case Studies in Thermal Engineering* 52 (2023) 103670. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103670>.
- [27]. F. Huang, L. Ren, S. Xie, M. Leng, P. Liao, Numerical study of flow characteristics and heat transfer mechanism in Tesla valve tube, *Results in Engineering* 21 (2024) 101795. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101795>.
- [28]. M. Juraeva, D.-J. Kang, Mixing Performance of a Passive Micromixer Based on Split-to-Circulate (STC) Flow valve: An experimental and numerical study, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 193 (2023) 109560. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109560>.
- [17]. B. Lee, M. Kim, S. Oh, D. Bi Lee, S.-G. Lee, H. Min Kim, K.H. Kim, J. Song, C.-S. Lee, Characterization of passive microfluidic mixer with a three-dimensional zig-zag channel for cryo-EM sampling, *Chemical Engineering Science* 281 (2023) 119161. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119161>.
- [18]. S. Gimondi, H. Ferreira, R.L. Reis, N.M. Neves, Microfluidic Devices: A Tool for Nanoparticle Synthesis and Performance Evaluation, *ACS Nano* 17 (2023) 14205–14228. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c01117>.
- [19]. M.A. Khan, M. Suhaib, M.A. Ansari, Investigations on fluid flow and mixing in fractal tree like biomimetic microchannel based on Murray's law, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* 194 (2023) 109564. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109564>.
- [20]. Y. Shao, H. Wang, Q. Zhang, Z. Xie, X. Zhu, Y. Ding, R. Chen, Q. Liao, Cross-channel microfluidic device for dynamic control of concentration and velocity by the electroosmotic drive, *Chemical Engineering Science* 281 (2023) 119139. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119139>.
- [21]. C.-C. Hong, J.-W. Choi, C.H. Ahn, A novel in-plane passive microfluidic mixer with modified Tesla structures, *Lab Chip* 4 (2004) 109–113. <https://doi.org/10.1039/B305892A>.
- [22]. X. Weng, S. Yan, Y. Zhang, J. Liu, J. Shen, Design, simulation and experimental study of a micromixer based on Tesla

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.02.033>.

Characteristics, *Micromachines* 15 (2024) 773. <https://doi.org/10.3390/mi15060773>.

- [29]. M. Juraeva, D.-J. Kang, Design and Mixing Analysis of a Passive Micromixer with Circulation Promoters, *Micromachines* 15 (2024) 831. <https://doi.org/10.3390/mi15070831>.
- [30]. M. Siavashi, H.R. Talesh Bahrami, H. Saffari, Numerical investigation of flow characteristics, heat transfer and entropy generation of nanofluid flow inside an annular pipe partially or completely filled with porous media using two-phase mixture model, *Energy* 93 (2015) 2451–2466. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.100>.
- [31]. R.W. Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, J.C. Leylegian, Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics, 8. ed, Wiley, Hoboken, NJ, 2011.
- [32]. H. Chanson, Physical modelling of hydraulics, in: *Hydraulics of Open Channel Flow*, Elsevier, 2004: pp. 253–274. <https://doi.org/10.1016/B978-075065978-9/50021-0>.
- [33]. Y. Bai, Q. Bai, Hydraulics, in: *Subsea Engineering Handbook*, Elsevier, 2010: pp. 349–399. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-689-7.10013-5>.
- [34]. M. Juraeva, D.-J. Kang, Mixing Performance of a Passive Micromixer Based on Multiple Baffles and Submergence Scheme, *Micromachines* 14 (2023) 1078. <https://doi.org/10.3390/mi14051078>.
- [35]. S. Hossain, M.A. Ansari, K.-Y. Kim, Evaluation of the mixing performance of three passive micromixers, *Chemical Engineering Journal* 150 (2009) 492–501.



Investigation of the Influence of Key Parameters on the Mixing Efficiency of Two Fluids in Multi-Stage Micro-Mixers Based on Tesla Valve Structure

Mahziyar Ghaedi¹, Hamid-Reza Bahrami^{2*}

1. M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

2. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

ARTICLE INFO

ORIGINAL RESEARCH

Article History:

Received: 24 October 2024

Revised: 13 December 2024

Accepted: 24 December 2024

Keywords:

Tesla valve
Micro-mixer
Micro-valve
Mixing

ABSTRACT

Micro-mixers play a significant role in the gas industry in achieving uniform gas mixing at micro-scales and reducing energy consumption. One approach to constructing micro-mixers involves using multiple stages of Tesla valves, which guide and blend flow through a special design. This study uses the computational fluid dynamics (CFD) method and finite volume-based solver to investigate the impact of parameters such as configuration direction (direct and oblique), number of stages, Reynolds number, inlet velocity difference, and flow direction on the performance of Tesla micro-mixers. Results show that arrangement efficiency depends on the inlet Reynolds number; at low Reynolds numbers, direct configurations perform better, with approximately 20% higher mixing efficiency at Reynolds number one compared to oblique configurations. At higher Reynolds numbers, oblique configurations prove more effective, with 20% better performance. Additionally, in all cases, oblique configurations create more pressure drop, impacting the overall system efficiency.

DOR: [20.1001.1.25885251.1403.00.00](https://doi.org/10.25885/251.1403.00.00)

How to cite this article

M. Ghaedi, H.R. Bahrami, Investigation of the Influence of Key Parameters on the Mixing Efficiency of Two Fluids in Multi-Stage Micro-Mixers Based on Tesla Valve Structure. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2024; 11(2): 52-64. (https://www.ijge.irangi.org/article_723185.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: taleshbahrami@qut.ac.ir, (H.R. Bahrami).

Available online 30 December 2024

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

