

مدل سازی CFD تشدید اختلاط در میکرومخلوط کننده ها با تحریک نانوذره های مغناطیسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی

صفورا جلیل زاده، ندا عظیمی*⁺

گروه مهندسی شیمی، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

چکیده: برانگیختگی نانوذره های مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی بیرونی یکی از راه های افزایش اختلاط در میکرومخلوط کننده ها است که با تحریک سیال و ایجاد درهمی در آن، باعث بهبود و افزایش اختلاط در آن ها می شود. هدف از این پژوهش، بررسی اثر میدان مغناطیسی بر اختلاط جریان آب و فروسیال در سه نوع میکرومخلوط کننده می باشد. سه نوع میکرومخلوط کننده Y ، T و $Oriented Y$ در نرم افزار گمیت طراحی شد. پس از مش بندی و تعیین شرایط مرزی آن ها، هندسه مورد نظر در نرم افزار فلوئنت فراخوانی شده و مدل سازی CFD جریان سیال انجام شده است. میدان مغناطیسی خارجی با قدرت برابر 2200 G (0.22 mT) در قسمت میانی هر میکرومخلوط کننده اعمال شده است. از نتیجه های مدل سازی CFD، می توان نتیجه گرفت که با اعمال میدان مغناطیسی روی هر میکرومخلوط کننده، فروسیال تحت تاثیر دو نیروی هیدرودینامیک و مغناطیسی قرار گرفته که منجر به ایجاد جریان های عرضی در کانال اختلاط شده و بنابراین، میزان اختلاط افزایش می یابد. مقایسه بازده اختلاط در سه نوع میکرومخلوط کننده نشان می دهد که بهترین اختلاط به ترتیب در مخلوط کننده $Oriented Y$ به دلیل زاویه برخورد دو جریان ورودی، میکرومخلوط کننده T و سرانجام میکرومخلوط کننده Y صورت گرفته است. مقایسه نتیجه های مدل سازی با داده های آزمایشگاهی موجود در یک مرجع معتبر، تطابق قابل پذیرشی بین آن ها را نشان داد.

واژه های کلیدی: مدل سازی CFD؛ میکرومخلوط کننده؛ اختلاط؛ میدان مغناطیسی.

KEYWORDS: CFD modeling; Micromixer; Mixing; Magnetic field.

مقدمه

در صنایع شیمیایی و زیستی پیدا کرده است. این تجهیزات شامل دستگاه های اختلاط در اندازه های میکرو (میکرومخلوط کننده ها^(۱)) و حسگرهای گوناگون هستند و برای فرایندهای گوناگونی مانند اختلاط، واکنش شیمیایی، جدایش و استخراج به کار می روند [۱،۲]. تجهیزات در مقیاس میکرو، مانند میکروکانالها^(۳) و میکرومخلوط کننده ها که کانالهایی با قطر هیدرولیکی بین

اختلاط در مقیاس مولکولی (اختلاط میکرو^(۱)) روی تماس واکنش دهنده ها، انتخاب پذیری، بازده و کیفیت فرآورده ی پایانی بسیاری از فرایندهای صنعتی مانند استخراج، جذب، ته نشین سازی و پلیمریزاسیون تاثیرگذار است. از جمله دستگاه های اختلاط که اخیراً مورد توجه قرار گرفته اند، سامانه های میکروسیالی^(۲) هستند که به سرعت در حال گسترش بوده و کاربردهای گسترده ای

*عهده دار مکاتبات

+E-mail: neda.azimi66@yahoo.com; n.azimi@iauksh.ac.ir

(۱) Micromixing

(۳) Micromixer

(۲) Microfluidic

(۴) Microchannel

حرکت نانوذره‌های مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی، باعث ایجاد جریان‌های عرضی یا جریان ثانویه^(۱) در دستگاه‌های اختلاط شده و اختلاط را بهبود می‌بخشد [۱۳]. مطالعه‌های زیادی در زمینه استفاده از نانوذره‌های مغناطیسی به منظور بهبود اختلاط و و مدل سازی اثر جریان سیال ناشی از حرکت این نانوذره‌ها در میدان مغناطیسی صورت گرفته است.

ونگ^(۸) و همکاران [۱۴] اختلاط میکرو را در یک میکرومخلوط کننده با استفاده از نانوذره‌ها و میدان مغناطیسی بهبود دادند. آن‌ها اظهار داشتند که حرکت زنجیره‌های متراکم در یک سیال مغناطیسی با استفاده از میدان مغناطیسی، باعث شکستن جریان آرام، ایجاد جریان نامنظم^(۹) و بهبود بازده اختلاط می‌شود.

اوه^(۱۰) و همکاران [۱۵] یک میکرومخلوط کننده نوین طراحی کردند که در آن با استفاده از حرکت فروسیال، اختلاط دو سیال افزایش یافته است. هدف از پژوهش آن‌ها، افزایش اختلاط آب یون زدایی شده^(۱۱) خالص و آب یون زدایی شده دارای ذره‌های پلیمری توسط جریان پلاگ^(۱۲) فروسیال بوده است. حرکت پلاگ فروسیال باعث ایجاد نوسان فشار در جریان اصلی و در نتیجه انحراف جریان اصلی شده است، که این انحراف جریان، باعث افزایش درهمی آن و در نتیجه افزایش اختلاط دو سیال شده است.

تی سلی^(۱۳) و همکاران [۱۶] اختلاط بین جریان آب و فروسیال با نانوذره‌های Fe_3O_4 در یک میکروکانال Y شکل، در میدان مغناطیسی ثابت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. طبق نتیجه‌ها به دست آمده، بازده اختلاط در حضور میدان مغناطیسی حدود ۹۰٪ و در غیاب میدان مغناطیسی بیش‌ترین ۱۵٪ بوده است.

ون^(۱۴) و همکاران [۱۷] یک مخلوط کننده میکروسیالی در میدان مغناطیسی با منبع جریان AC، برای ایجاد جریان‌های گذرا بین فروسیال و آب مقطر را بررسی کردند. میدان مغناطیسی خارجی باعث پراکندگی و توزیع یکتواخت فروسیال در آب است و نتیجه‌های عددی و تجربی آنان نشان داد که بیش‌ترین مقدار بازده اختلاط (>۹۵٪) در پایین دست ورودی کانال اختلاط به دست آمد.

۱۰ μm تا ۱ mm می‌باشند [۳]، به دلیل نسبت سطح به حجم بالا، برتری‌های بسیاری دارد. میکرومخلوط کننده‌ها بر اساس روش بهم زدن سیال به دو دسته اصلی فعال^(۱) و غیرفعال^(۲) تقسیم بندی می‌شوند [۴]. میکرومخلوط کننده فعال نیاز به انرژی ورودی بیرونی مانند اعمال میدان الکتریکی، اولتراسونیک^(۳)، میدان مغناطیسی و ... دارد، در حالی که اختلاط در میکرومخلوط کننده غیرفعال از برخورد جریان سیال با هندسه کانال، بدون هیچ گونه انرژی خارجی صورت می‌گیرد. میکرومخلوط کننده فعال عملکرد بهتری دارد ولی در بیش‌تر موارد هزینه ساخت آن بالاست. در بسیاری از میکرومخلوط کننده‌های غیرفعال، پدیده انتقال در جهت عرضی تنها به صورت نفوذ مولکولی است در حالی که اگر بتوان با روشی جریان‌های ثانویه‌ای در جهت عرضی ایجاد کرد، اختلاط به طور چشمگیری بهبود می‌یابد و می‌توان با هندسه‌های ساده‌تر به درجه‌های بالاتری از اختلاط رسید.

از آنجایی که الگوی جریان داخل میکرومخلوط کننده‌ها از نوع آرام^(۴) بوده، بازده اختلاط در این دستگاه‌ها پایین است. به تازگی، به منظور بهبود اختلاط در میکرومخلوط کننده‌ها، از میکرو ذره‌ها و نانوذره‌ها بی‌اثر با برانگیخته کردن آن‌ها تحت میدان مغناطیسی بیرونی استفاده می‌شود.

سوسپانسیون کلوییدی پایدار نانوذره‌های مغناطیسی در مایع حامل آبی یا آلی فروسیال نامیده می‌شود، که برای بهبود انتقال جرم و اختلاط در مهندسی شیمی بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵-۸]. از جمله کاربردهای جدید نانوذره‌های مغناطیسی، تحریک سیال، ایجاد آشفتگی به منظور اختلاط بهتر در میکرومخلوط کننده‌ها، با حرکت این ذره‌ها در میدان مغناطیسی است [۹-۱۲]. با اعمال میدان مغناطیسی بر روی تجهیزات اختلاط با جریان پیوسته، حرکت نانوذره‌های مغناطیسی تحت نیروهای هیدرودینامیک^(۵) (جریان سیال) و نیروی مغناطیسی^(۶) قرار می‌گیرد. در سامانه‌های دو فازی، حرکت آشفته نانوذره‌های ناشی از جریان سیال، باعث افزایش سطح مشترک دو فاز، کاهش کشش سطحی و در نتیجه افزایش میزان انتقال جرم می‌شود.

(۱) Active

(۲) Passive

(۳) Ultrasonic

(۴) Laminar

(۵) Hydrodynamic

(۶) Magnetic force

(۸) Wang

(۹) Chaotic flow

(۱۰) Oh

(۱۱) De-ionized water

(۱۲) Plug

(۱۳) Tsai

مدل سازی کردند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که با اعمال میدان مغناطیسی، جریان‌های عرضی ایجاد شده که حرکت‌های به دست آمده از آن، اختلاط را بهبود بخشیده است.

در همه پژوهش‌های مرور شده بالا، اختلاط در میکرومخلوط کننده‌های فعال در میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه‌ها نشان می‌دهد که برانگیخته کردن جریان فروسیال با اعمال نیروهای مغناطیسی می‌تواند یک روش موثر در بهبود اختلاط باشد. به هر حال، بیش‌تر مطالعه‌های بالا به صورت آزمایشگاهی بوده در حالی که می‌توان با انجام مدل سازی CFD اختلاط جریان فروسیال تحت میدان مغناطیسی، یک دید کلی از هیدروینامیک جریان سیال و همچنین چگونگی حرکت فروسیال در میدان مغناطیسی را به دست آورد. پیش از عملی شدن استفاده از نانوذره‌های مغناطیسی در میکرومخلوط کننده‌ها، طراحان می‌توانند با مدل سازی CFD، زمان و اندازه‌های لازم برای اختلاط و انتقال جرم را تخمین بزنند. همچنین به کمک مدل سازی CFD می‌توان بازده انواع واکنش‌هایی که اختلاط روی آن‌ها تأثیر گذار است را تخمین زد و اندازه‌های مناسب برای میکرومخلوط کننده را بهینه‌سازی نمود.

هدف از این پژوهش، تحلیل و بررسی فرایند تشدید اختلاط در میکرومخلوط کننده‌ها با تحریک نانوذره‌های مغناطیسی به کمک مدل سازی CFD است. به منظور تصدیق نتیجه‌های مدل سازی، یکی از هندسه‌های مورد مطالعه (مخلوط کننده Y شکل) از کار آزمایشگاهی تی سالی و همکاران [۱۶] انتخاب شده است و داده‌های CFD با داده‌های آزمایشگاهی این مرجع مقایسه خواهد شد. مدل سازی در دو مرحله شامل حضور نانوذره‌ها و نبود میدان مغناطیسی انجام می‌شود. میدان مغناطیسی به صورت عددی توسط ماژول MHD^(۸) در نرم افزار فلوئنت^(۹) بر اساس روش معادله القای مغناطیسی حل خواهد شد.

بخش نظری

شبه سازی

طراحی هندسه

در این پژوهش، مدل سازی CFD اختلاط میکرو در سه نوع

لی^(۱) و همکاران [۱۸] یک روش جدید برای افزایش اختلاط با استفاده از نانوذره‌های مغناطیسی و اعمال میدان مغناطیسی چرخشی^(۲) در یک میکروکانال Y شکل را پیشنهاد دادند. بازده اختلاط دو جریان، در غیاب نانوذره‌های مغناطیسی بسیار کم بود، در حالی که با افزودن نانوذره‌های مغناطیسی به مخزن، بدون اعمال میدان مغناطیسی، مقدار آن به ۶۶٪ و در سامانه با حضور نانوذره‌های مغناطیسی و اعمال میدان مغناطیسی خارجی چرخشی با قدرت $T = 54^{\circ}C$ ، به حدود ۹۶٪ رسید.

کیتنبرگر^(۳) و همکاران [۱۹] پدیده میکروجران مغناطیسی را به عنوان یک وسیله برای بهبود اختلاط در سامانه‌های میکروسیالی در مواردی که یکی از سیال‌های امتزاج پذیر شامل ذره‌های مغناطیسی باشد را بررسی کردند. تجزیه و تحلیل نتیجه‌ها نشان داد که بازده اختلاط بسیار بالایی با این روش به دست می‌آید. نوری^(۴) و همکاران [۲۰] اختلاط سریع جریان آب و فروسیال Fe_3O_4 در یک میکروکانال Y شکل تحت میدان مغناطیسی ثابت را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌های آن‌ها نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی ثابت بر جریان فروسیال باعث کاهش طول اختلاط و در نتیجه افزایش بازده اختلاط می‌شود.

وانگ^(۵) و همکاران [۲۱] عملکرد ذره‌های مغناطیسی در میکرومخلوط کننده تحت میدان الکترومغناطیسی را به طور عددی بررسی نمودند. این میکرومخلوط کننده به دلیل برانگیخته کردن ذره‌های مغناطیسی درون سوسپانسیون فروسیال باعث بهبود اختلاط شده است. نتیجه‌های عددی نشان داد که انگیزش ذره‌های مغناطیسی در یک فرکانس مناسب منجر به اختلاط موثر می‌شود.

عظیمی^(۶) و همکاران [۲۲] اختلاط و انتقال جرم دو جریان مایع-مایع را با استفاده از حرکت عرضی نانوذره‌های مغناطیسی Fe_3O_4 در یک میکرومخلوط کننده Y شکل در میدان مغناطیسی ثابت به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتیجه‌ها نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی بر جریان فروسیال منجر به تغییر الگوی جریان و بهبود میزان اختلاط و افزایش ضریب انتقال جرم شده است. ژرو^(۷) و همکاران [۲۳] پدیده اختلاط جریان فروسیال و یک سیال امتزاج پذیر با آن، در یک میکروکانال با مقطع مستطیلی را

(۱) Lee

(۲) Rotating Magnetic Field (RMF)

(۳) Kitenbergs

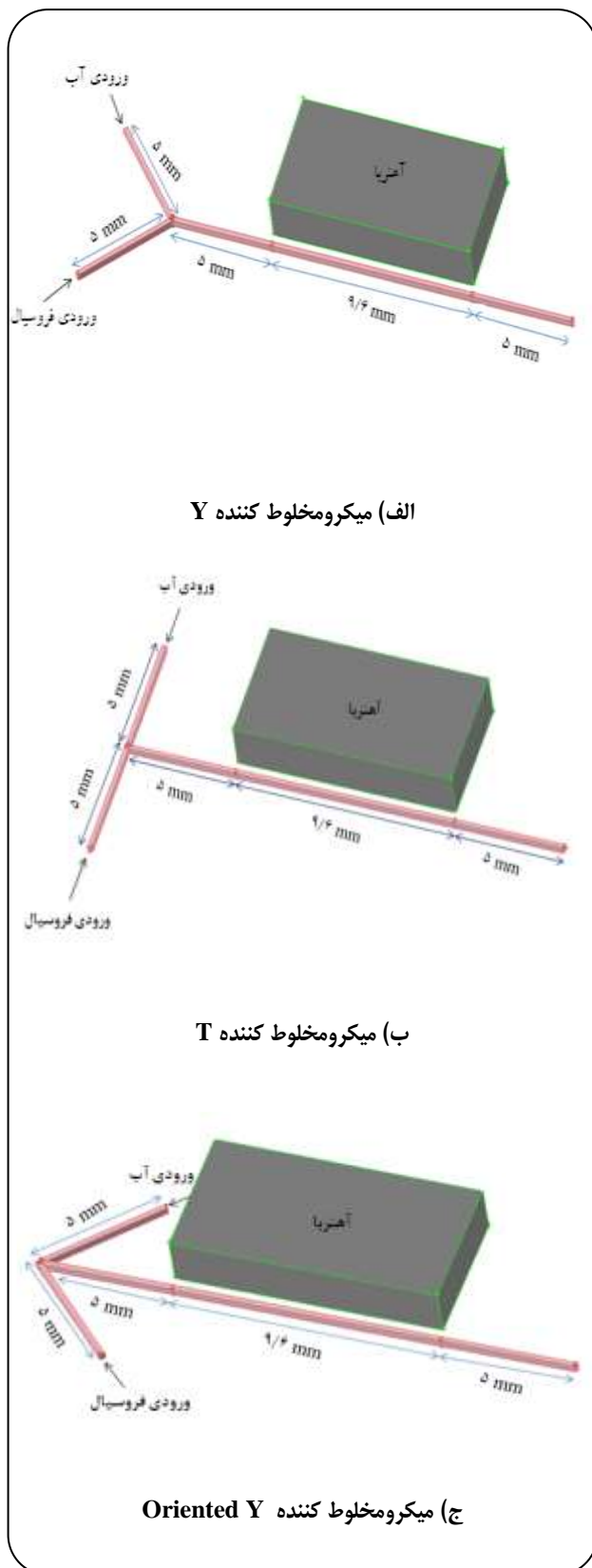
(۴) Nouri

(۶) Azimi

(۷) Zuh

(۸) Magneto Hydrodynamic

(۹) Fluent



شکل ۱- شمای میکرومخلوط کننده های مورد نظر برای مدل سازی.

میکرومخلوط کننده Y، T و Oriented Y انجام شده است. به منظور تصدیق نتیجه‌های مدل سازی، یکی از هندسه‌های مورد مطالعه (مخلوط کننده Y شکل) از کار آزمایشگاهی تی سالی و همکاران [۱۶] انتخاب شده است. طرح وارده میکرومخلوط کننده‌های مورد نظر برای مدل سازی در شکل ۱ آمده است. اولین مرحله در انجام شبیه‌سازی، ساخت هندسه آن است. برای این کار میکرومخلوط کننده‌های Oriented Y و T، Y را نخست با اندازه‌های 0.3 mm ، 0.2 mm و 0.3 mm در مرحله دوم با اندازه‌های 0.5 mm ، 0.2 mm در نرم افزار گمبیت طراحی می‌شود.

به منظور شبکه بندی، شکل‌های هندسی به حجم کنترل‌های کوچک تقسیم شدند. هر چه تعداد مش‌ها بیشتر و اندازه آن‌ها ریزتر باشد، انجام محاسبات‌های آن در نرم افزار فلوئنت کندتر، زمان آن طولانی‌تر و با دقت بیشتری انجام می‌شود.

مش بندی و بررسی استقلال از مش

برای مش بندی صفحه‌ای که میدان مغناطیسی روی آن اعمال می‌شود، از مش‌های مثلثی با اندازه 0.5 mm و برای مش بندی صفحه‌های ورودی و خروجی هر میکرومخلوط کننده، از مش‌های مثلثی با اندازه 0.1 mm استفاده شده است. برای دقت بیشتر در ناحیه‌های ورودی خروجی و همچنین محل اعمال میدان مغناطیسی مش‌های ریزتری به کار گرفته شد. برای اطمینان استقلال حل از اندازه مش‌ها، پنج اندازه برای مش بندی بررسی شد که تعداد حجم کنترل‌های به دست آمده 6.4×10^5 ، 7.8×10^5 ، 8.3×10^5 ، 9.8×10^5 و 1×10^6 بود. پارامتر اختلاط در هر میکرومخلوط کننده به عنوان معیار برای بررسی استقلال مدل از اندازه مش، در نظر گرفته شد. تغییر چشمگیری در پارامتر بیان شده با تعداد حجم کنترل‌های بیشتر از 8.3×10^5 دیده نشد. بنابراین، برای کاهش زمان محاسبات، این حالت برای مش بندی انتخاب شد.

شرایط مرزی و اولیه

شرایط مرزی تعریف شده برای این مسئله عبارت است از سرعت ورودی برای ورودی‌های میکرومخلوط کننده‌ها (برای هر دو ورودی سرعت‌ها برابر می‌باشد)، خروجی برای جریان خروجی از میکرومخلوط کننده و شرط مرزی دیواره برای صفحه‌ای که میدان مغناطیسی روی آن‌ها اعمال می‌شود. در جدول ۱ جزئیات شرایط مرزی ارائه شده است.

میدان مغناطیسی به صورت عددی توسط ماژول MHD در نرم افزار فلوئنت بر اساس روش معادله القای مغناطیس حل شد. میدان مغناطیسی به عنوان یک نیروی بدنه ای به معادله (۲) افزوده شد که با افزودن این جمله، معادله (۲) دوباره به صورت زیر بازنویسی می‌شود [۲۶]:

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T \right) \right) + \rho\vec{g} + \mu_0 (M \cdot \nabla) H \quad (3)$$

$\mu_0 (M \cdot \nabla) H$ جمله نیروی مغناطیسی است که در آن μ_0 نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء، M مقدار مغناطش سیال عامل و H قدرت میدان مغناطیسی است. وقتی که مغناطش (M) با میدان مغناطیسی اعمال شده (H) هم راستا باشد، یا H به اندازه کافی قوی باشد، معادله مغناطش به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M = \chi H \quad (4)$$

به دلیل استفاده از آهنربای دائم (میدان مغناطیسی ثابت)، قانون ماکسول - آمپر برای تعریف قدرت میدان مغناطیسی (H (A/m)) و چگالی جریان (J (A/m²)) به صورت زیر به کار برده شد [۲۶]:

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

بنابراین، قانون گوس برای تعریف چگالی شار مغناطیسی B (V/m²) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla \times B = 0 \quad (6)$$

معادله ساختاری برای توضیح رابطه بین B و H به صورت زیر است [۲۴-۲۶]:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi) H \quad (7)$$

که χ نفوذ پذیری سیال عامل است.

روش حل

از آنجایی که الگوی جریان در میکرومخلوط کننده‌ها آرام است و همچنین طبق شدت جریان‌ها و عددهای رینولدز در این کار، محاسبه‌ها بر مبنای الگوی جریان آرام انجام شد. در حل از معادله‌ها درجه دوم^(۱) استفاده شده است و میزان مغناطش

جدول ۱- شرایط مرزی میکرومخلوط کننده‌ها.

شرط مرزی	نوع
خروجی	جریان خروجی
ورودی فروسیال	سرعت ورودی
ورودی آب	سرعت ورودی
دیوار زیر	دیواره
دیوار بالا	دیواره
دیوار راست	دیواره
دیوار چپ	دیواره
میکرومخلوط کننده	سیال

محاسبه‌ها در نرم افزار فلوئنت

پس از ساخت هندسه سه بعدی سامانه در نرم افزار گمبیت، هندسه یاد شده توسط نرم افزار فلوئنت فراخوانی می‌شود. محاسبه‌ها در این نرم افزار در دو مرحله صورت می‌گیرد. در مرحله اول تنها اختلاط جریان‌های فروسیال و آب در نظر گرفته شده و میدان مغناطیسی به سامانه اعمال نشده است. در مرحله دوم، اثر میدان مغناطیسی بر اختلاط جریان آب و فروسیال و الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. این محاسبه‌ها بدون تغییرهای دما و با ثابت بودن فشار در ۱ atm انجام شده است. ویژگی‌های فروسیال در جدول ۲ آمده است.

معادله‌های حاکم

معادله پیوستگی: معادله پیوستگی برای جریان تک فاز در نرم افزار فلوئنت به صورت زیر می‌باشد [۲۴]:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}) = 0 \quad (1)$$

که در آن v سرعت سیال، ρ دانسیته و t زمان می‌باشد. معادله مومنتوم: معادله مومنتوم برای سامانه مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد [۲۵]:

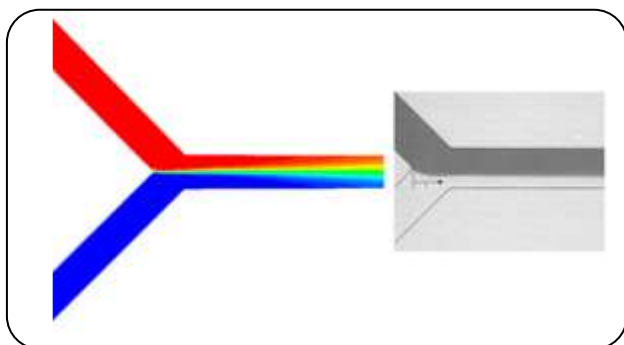
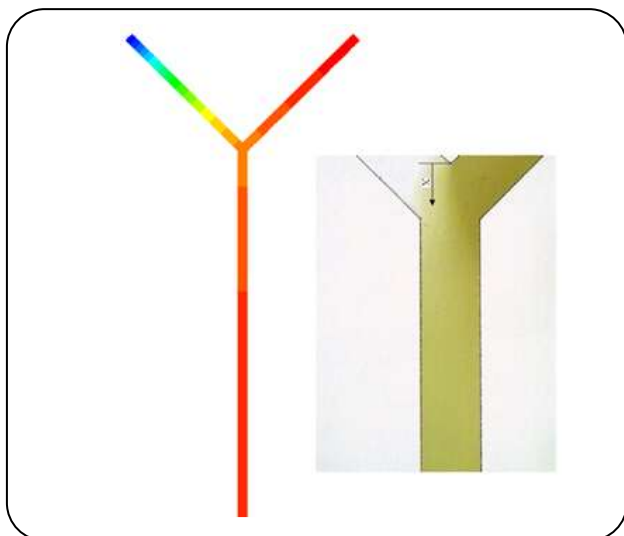
$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T \right) \right) + \rho\vec{g} \quad (2)$$

که در آن v سرعت سیال و P فشار استاتیکی است. ρ و μ دانسیته و گرانیوی می‌باشد.

(1) Second order

جدول ۲- ویژگی‌های فروسیال.

پارامتر	مقدار
دانسیته فروسیال	1050 kg/m^3
ویسکوزیته فروسیال	0.00113 kg/ms
نفوذ پذیری مغناطیسی	0.11 H/m

شکل ۲- رژیم جریان HD در یک برشی افقی ($z=0$) از کانال اختلاط در میکرومخلوط کننده Y [۱۶].شکل ۳- رژیم جریان MHD در یک برشی افقی ($z=0$) از کانال اختلاط در میکرومخلوط کننده Y [۱۶].

پراکنده شده است. مقایسه شکل ۲ و شکل ۳ نشان می‌دهد که با برانگیختن فروسیال توسط میدان مغناطیسی، الگوی جریان به هم ریخته و تغییر می‌کند. دلیل این مسئله این است که فروسیال

میدان برابر $T = 0.22$ می‌باشد. طرح PRESTO برای دورن‌یابی فشار مورد استفاده قرار گرفت. الگوی SIMPLE (روش نیمه ضمنی برای معادله‌های مربوط به فشار) برای جفت‌سازی سرعت - فشار استفاده شده است. زمانی حل همگرا در نظر گرفته شده که باقیمانده همه متغیرهای وابسته برابر یا کم‌تر از 10^{-5} باشند. فاکتورهای زیر تخفیف^(۱) برای پارامترهای فشار و مومنتوم به ترتیب، 0.3 و 0.7 بودند. میکرومخلوط کننده های طراحی شده دارای دو ورودی می باشند که شدت جریان‌های ورودی یکسان است و از ورودی اول فروسیال و از ورودی دوم آب وارد می شود.

نتیجه ها و بحث

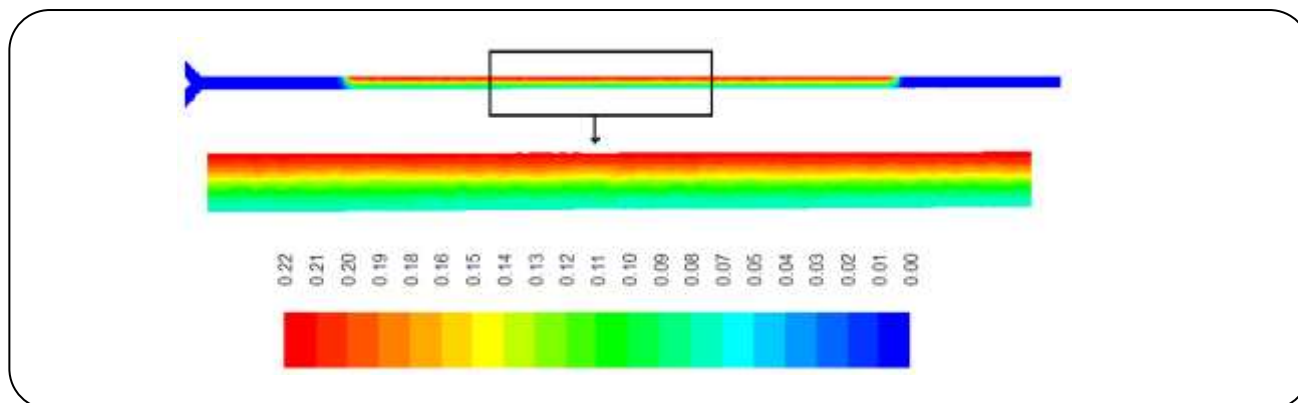
مدل جریان هیدرودینامیک (HD) و مگنتوهیدرودینامیک (MHD) در میکرومخلوط کننده Y شکل

مدل سازی در دو مرحله بدون اعمال میدان مغناطیسی و با اعمال میدان بر جریان فروسیال انجام شد. نتیجه‌های به‌دست آمده به صورت گرافیکی ترسیم شده و در ادامه تحلیل شده است. در این قسمت از پژوهش، سطح مقطع کانال مستطیلی 0.2 mm در 0.3 mm است. مدل جریان HD ($B=0 \text{ T}$) و مدل جریان MHD ($B>0 \text{ T}$) در کانال اختلاط برای آنالیز الگوی جریان بررسی شد. شکل ۲ رفتار HD فروسیال و آب را در کانال اختلاط در میکرومخلوط کننده Y شکل نشان می‌دهد. سرعت جریان فروسیال روی 0.00415 m/s و نسبت شدت جریان دو جریان ورودی ($R = Q_f / Q_w$) روی ۱ تنظیم شد. به منظور تصدیق اختلاط دو جریان، نتیجه‌های عددی با تصویرهای واقعی [۱۶] حرکت سیال درون کانال اختلاط مقایسه شد.

شکل ۳ رفتار MHD جریان فروسیال و آب در کانال اختلاط در میکرومخلوط کننده Y شکل در حالتی که میدان مغناطیسی در یک سمت کانال اختلاط اعمال شده باشد را نشان می‌دهد. سرعت جریان فروسیال روی 0.00415 m/s و نسبت شدت جریان دو جریان ورودی ($R = Q_f / Q_w$) روی ۱ تنظیم شد. به منظور تصدیق اختلاط دو جریان، نتیجه‌های عددی با تصویرهای واقعی [۱۶] حرکت سیال درون کانال اختلاط مقایسه شد.

همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، با اعمال میدان مغناطیسی در کنار کانال اختلاط، جریان فروسیال به دلیل حرکت آن به سمت میدان مغناطیسی، به طور کامل در کانال اختلاط

(1) Under-relaxation factor



شکل ۴- کانتور چگالی شار مغناطیسی (B (Tesla)) در یک برش افقی ($z=0$) از کانال اختلاط.

پس از اعمال میدان مغناطیسی انجام شده است. در این شکل، فاصله از محل تقاطع دو کانال ورودی و L طول کانال اختلاط است. مقدار متوسط سرعت برای جریان HD ($B=0$ T) به تقریب برابر 0.00415 m/s است در حالی که در جریان ($B=0.22$ T) MHD مقادیرهای سرعت در ناحیه ای که میدان مغناطیسی اعمال شده، کاهش می‌یابد. میدان مغناطیسی اعمال شده باعث برانگیخته شدن جریان فروسیال و ایجاد جریان ثانویه در جهت عمود بر جریان می‌شود. حرکت عرضی نانوذره‌ها و سیال پایه آن، منجر به شکل‌گیری گردابه و کاهش سرعت در ناحیه اعمال میدان مغناطیسی می‌شود.

شکل ۷ بردارهای سرعت در کانال اختلاط را برای جریان HD و MHD را نشان می‌دهد. افزون بر این، در این شکل نمای بزرگ بردارهای سرعت برای مقایسه روشن اثر وجود فروسیال و میدان مغناطیسی با حالت بدون اعمال میدان، نشان داده شده است. برای جریان HD، خطوط موازی با پیکان‌های مستقیم در جهت جریان قابل دیدن است، در حالی که برای جریان MHD، حرکت گردابه ای و چرخشی خطوط جریان دیده می‌شود. این شکل تأیید می‌کند که نیروی مغناطیسی باعث ایجاد جریان ثانویه عمود بر جهت جریان و در نتیجه، پخش شدن فروسیال در سیال دیامغناطیسی می‌شود.

نتیجه‌های مدل سازی CFD میکرومخلوط کننده Y شکل بر اساس فاکتور بازده اختلاط

در کار آزمایشگاهی که توسط *تی سالی و همکاران* [۱۶] انجام شد، تصویرهایی از اختلاط فروسیال و آب در میکرومخلوط کننده Y

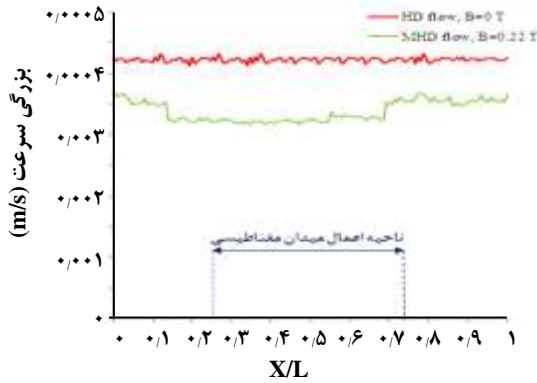
تحت تأثیر دو نیروی هیدرودینامیک و مغناطیسی قرار گرفته که منجر به حرکت جابه جایی در جهت و عمود بر جریان سیال می‌شود. حرکت دینامیک فروسیال در کانال اختلاط و در جهت خطوط میدان مغناطیسی، باعث تغییر در شکل پراکنندگی جریان شده که موجب اختلاط جانبی دو جریان می‌شود.

شکل ۴ توزیع چگالی شار مغناطیسی در یک برش افقی از کانال اختلاط ($z=0$) را نشان می‌دهد. در این مطالعه، آهنربا در سمت راست کانال اختلاط در جهت مخالف ورودی فروسیال قرار داده شده است، بنابراین، ناحیه با بالاترین چگالی شار مغناطیسی در یک طرف کانال اختلاط دیده می‌شود. به دلیل پتانسیلی که بر فروسیال اعمال شده است، نیروی حجمی مغناطیسی به نام نیروی کلونین^(۱) بر سیال اعمال می‌شود. نیروی کلونین برآمده از برهم‌کنش بین میدان مغناطیسی (H) اعمال شده بر فروسیال و مغناطش (M) است که باعث ایجاد گرادیان فشار می‌شود

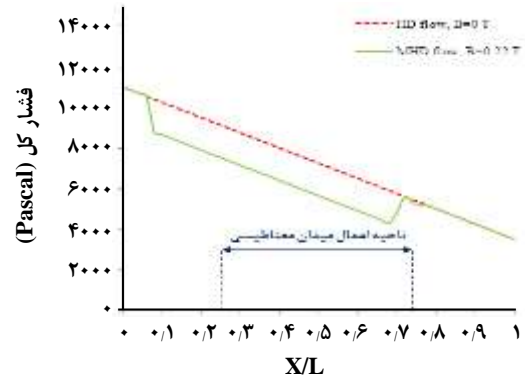
شکل ۵ توزیع فشار کل برای جریان های HD و MHD در میکرومخلوط کننده Y شکل را نشان می‌دهد. در جریان HD فشار در نخست برابر 10900 pa بوده که در جهت طول کانال اختلاط در حال کاهش است. تغییرهای فشار برای جریان HD به صورت خطی است در حالی که در جریان MHD، فشار به طور ناگهانی در ناحیه‌ای که میدان مغناطیسی بر آن اعمال شده کاهش پیدا می‌کند. در جریان MHD، توزیع فشار در کنار دیواره‌هایی که میدان مغناطیسی بر آن‌ها اعمال شده، کاهش می‌یابد. بیشترین افت فشار مربوط به ناحیه‌های با بالاترین چگالی شار مغناطیسی است.

شکل ۶ توزیع بزرگی سرعت روی خط مرکزی کانال اختلاط را نشان می‌دهد. مقایسه‌ای بین بزرگی سرعت پیش و

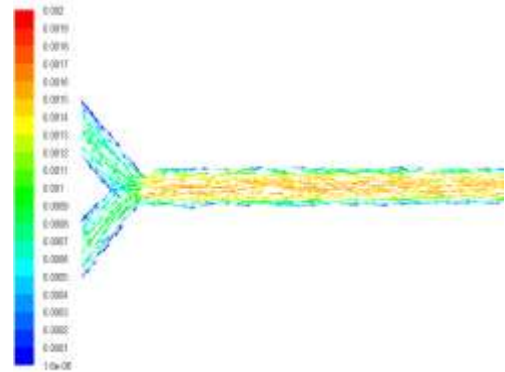
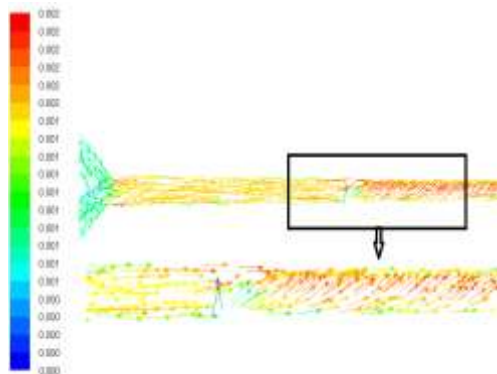
(۱) Kelvin force



شکل ۶- بزرگی سرعت در جهت جریان در خط مرکزی کانال اختلاط، سرعت جریان فروسیال روی m/s 0.000415 و نسبت شدت جریان دو جریان ورودی برابر ۱.



شکل ۵- توزیع فشار کل در جهت جریان در خط مرکزی کانال اختلاط، سرعت جریان فروسیال روی m/s 0.000415 و نسبت شدت جریان دو جریان ورودی برابر ۱.



شکل ۷- بردارهای سرعت برای جریان HD و MHD (m/s) در جهت جریان در یک برش افقی ($z=0$)، سرعت جریان فروسیال روی m/s 0.000415 و نسبت دبی دو جریان ورودی برابر ۱. الف) جریان HD و $B=0$ T، ب) جریان MHD و $B=0.22$ T.

بنابراین، مدل سازی در سه شدت جریان ۳، ۶ و $10 \mu L/min$ برای کانال با دو عرض 300 و $500 \mu m$ انجام شد. در پایان، کانتورهای غلظت فروسیال در سه شدت جریان مورد نظر برای دو جریان HD و MHD به صورت سیاه و سفید از نرم افزار فلونت استخراج شد و با استفاده از نرم افزار Image-J پارامتر بازده اختلاط (η) طبق رابطه (۸) بر اساس شدت مقیاس خاکستری محاسبه شد.

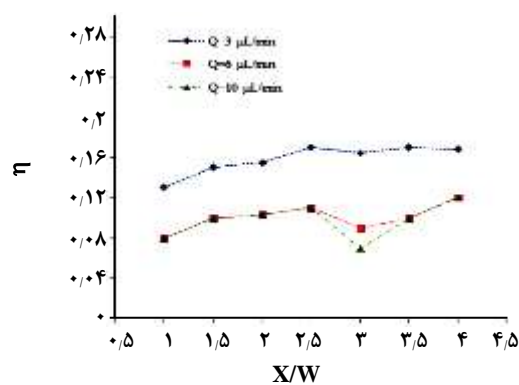
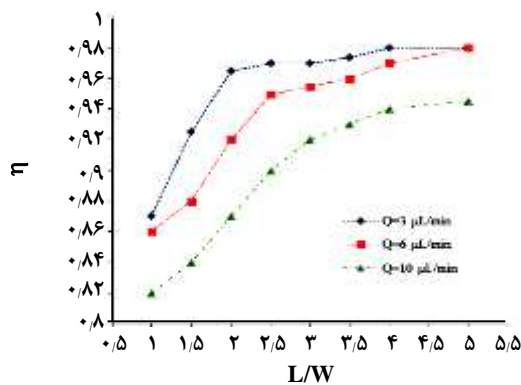
به علت زیاد بودن داده ها و به منظور مقایسه با نتیجه‌های آزمایشگاهی، نتیجه‌های CFD بازده اختلاط (η) با استفاده از دستور Plot در نرم افزار فلونت به صورت نموداری ترسیم شد که در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده است که در مقایسه با شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ در مرجع [۱۶] تطابق خیلی خوبی دارد.

توسط دوربین نصب شده در بالای آن تهیه شد که آن‌ها را به مقیاس خاکستری تبدیل نمودند و با استفاده از نتیجه‌های به دست آمده و رابطه زیر بازده اختلاط را محاسبه نمودند:

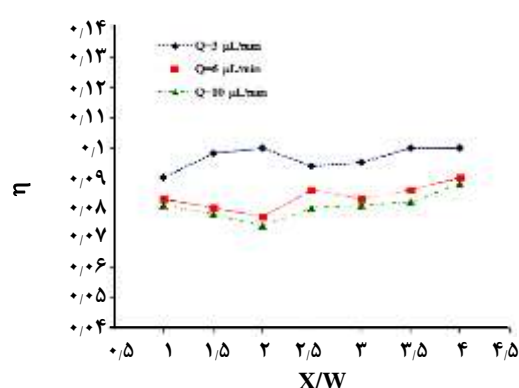
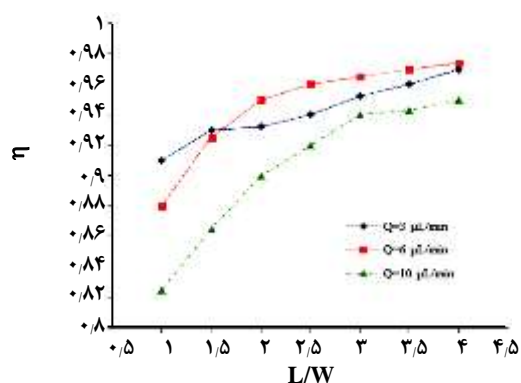
$$\eta = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|I_i - I_m|}{I_m} \quad (8)$$

که I_m شدت مقیاس خاکستری محلول به طور کامل مخلوط شده فروسیال و آب و I_i شدت مقیاس خاکستری در پیکسل i ام مخلوط در محل خاصی از میکرومخلوط کننده است و N تعداد پیکسل‌هایی است که مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

برای تصدیق نتیجه‌های مدل سازی، باید داده‌های CFD با داده‌های شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ در مرجع [۱۶] مقایسه شود.



شکل ۸ - نتیجه‌های CFD بازده اختلاط (η) برای جریان HD و MHD در کانال با عرض $300 \mu\text{m}$.
الف) جریان HD و $B=0 \text{ T}$ ، ب) جریان MHD و $B=0.22 \text{ T}$



شکل ۹ - نتیجه‌های CFD بازده اختلاط (η) برای جریان HD و MHD در کانال با عرض $500 \mu\text{m}$.
الف) جریان HD و $B=0 \text{ T}$ ، ب) جریان MHD و $B=0.22 \text{ T}$

داده های آزمایشگاهی کم تر از ۱۰٪ بوده و فاکتور اختلاط (η) در بازه‌ی مورد مطالعه برای شدت جریان دو جریان ورودی، به خوبی با مقدارهای آزمایشگاهی با بیشترین خطای نسبی ۹٫۸٪ مطابقت دارد.

مدل جریان HD و MHD در میکرومخلوط کننده های T و Oriented Y

به منظور بررسی اثر هندسه میکرومخلوط کننده بر الگوی جریان و میزان بازده اختلاط، دو میکرومخلوط کننده دیگر با هندسه T و Oriented Y مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت نیز، کانتورهای غلظت فروسیال در سه شدت جریان مورد نظر برای دو جریان HD و MHD به صورت سیاه و سفید از نرم افزار فلونت استخراچ شد و به صورت نموداری ترسیم شد که در شکل ۱۰ قابل دیدن است.

طبق این دو شکل، با افزایش شدت جریان، مقدار بازده اختلاط کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش کاهش زمان ماند، دو جریان ورودی فرصت کمتری برای اختلاط داشته و بنابراین بازده اختلاط کاهش می‌یابد.

به منظور راستی آزمایی نتیجه‌های به دست آمده از مدل سازی CFD، خطای بین نتیجه‌های CFD در شکل‌های ۸ و ۹ و نتیجه‌های آزمایشگاهی در مرجع [۱۶] برای فاکتور اختلاط محاسبه شده و برای کانال با عرض $300 \mu\text{m}$ و $500 \mu\text{m}$ در جدول‌های ۳ و ۴ آورده شده است. خطای نسبی فاکتور اختلاط (η) در این جداول مطابق با رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\text{ARE}\% = \left| \frac{\text{CFD value} - \text{Experimental value}}{\text{CFD value}} \right| \times 100 \quad (9)$$

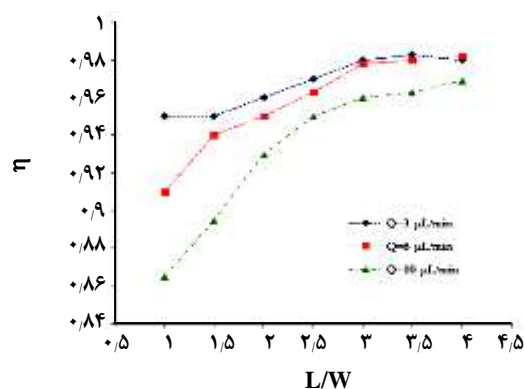
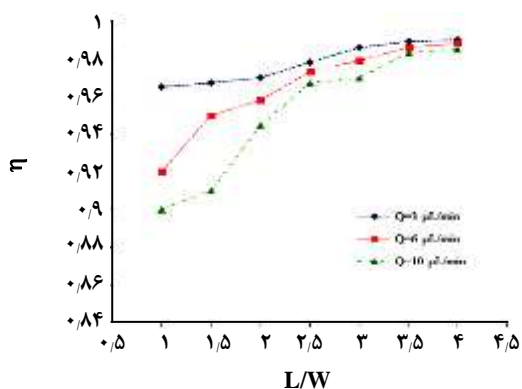
همان‌گونه که در جدول‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، برای دو جریان HD و MHD میزان خطای بین نتیجه‌های CFD و

جدول ۳- مقادارهای ARE% در شدت جریان هاگونگون برای برای کانال با عرض $300 \mu\text{m}$.

جریان MHD				جریان HD				دبی ($\mu\text{L}/\text{min}$)
L/W				X/W				
۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۳
۷/۶	۴/۵	۸/۷	۳/۶	۵/۶	۷/۸	۹/۴	۹/۸	۶
۷/۹	۴/۳	۶/۴	۷/۵	۷/۷	۶/۵	۶/۷	۵/۵	۱۰
۲/۶	۴/۵	۲/۳	۴/۶	۷/۴	۴/۸	۷/۵	۵/۶	

جدول ۴- مقادارهای ARE% در شدت جریان های گوناگون برای برای کانال با عرض $500 \mu\text{m}$.

جریان MHD				جریان HD				دبی ($\mu\text{L}/\text{min}$)
L/W				X/W				
۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۳
۸/۲	۶/۱	۴/۶	۷/۴	۳/۷	۵/۲	۷/۴	۵/۷	۶
۴/۱	۵/۷	۷/۱	۶/۳	۶/۴	۵/۴	۷/۲	۶/۹	۱۰
۴/۹	۳/۲	۴/۱	۵/۲	۵/۹	۶/۳	۳/۸	۵/۸	

شکل ۱۰ - نتیجه های CFD بازده اختلاط (η) برای جریان MHD در کانال با عرض $300 \mu\text{m}$ [۲۶].
الف) میکرومخلوط کننده T ب) میکرومخلوط کننده Y Oriented.

زاویه برابر 270° است. هرچه θ بیش تر باشد، در هنگام برخورد دو جریان ورودی، نیروی اعمال شده بر آن ها بیش تر خواهد بود و بنابراین میزان بازده اختلاط بالاتر خواهد شد.

نتیجه گیری

در این مقاله، مدل سازی CFD اختلاط و جریان HD برای آب و فروسیال بدون اعمال میدان مغناطیسی و جریان MHD

مقایسه شکل ۱۰ با شکل (۸) نشان می دهد که میکرومخلوط کننده Y شکل دارای کم ترین بازده اختلاط و میکرومخلوط کننده Y Oriented دارای بالاترین میزان بازده اختلاط است. این به دلیل تفاوت در زاویه برخورد جریان های ورودی در این سه نوع میکرومخلوط کننده است. در واقع، در میکرومخلوط کننده Y شکل، زاویه بین دو جریان ورودی $(\theta) 90^\circ$ در میکرومخلوط کننده T شکل، 180° و در میکرومخلوط کننده Y Oriented این

D	قطر کانال های میکرومخلوط کننده، m
D_m	قطر ذره‌های مغناطیسی، m
g	شتاب ثقل، m/s^2
H	شدت میدان مغناطیسی، A/m
J	چگالی جریان، A/m^2
K_B	ثابت بولتزمن (-)
M	مقدار مغناطش، A/m
M_s	مقدار مغناطش اشباع، A/m
N	تعداد کل پیکسل‌ها در ناحیه موردنظر
T	دما (K)
Q	شدت جریان حجمی (m^3/s)
Re	عدد رینولدز (-)
U	سرعت ظاهری (s/m)
V	حجم میکرومخلوط کننده (m^3)
X_s	ضریب جدایش
χ	قابلیت مغناطیسی اولیه (-)

حرف‌های یونانی

μ	گرانروی ($kg/m.s$)
μ_0	نفوذپذیری مغناطیسی خلاء ($J/A^2.m$)
ρ	دانسیتته سیال (kg/m^3)
ρ_{MNPs}	دانسیتته نانوذره‌ها (kg/m^3)

نمادهای اختصاری

HD	هیدرودینامیک
MF	میدان مغناطیسی
MNPs	نانوذره‌های مغناطیسی
MHD	هیدرودینامیک مغناطیسی

با اعمال میدان مغناطیسی بر سه نوع میکرو مخلوط کننده انجام شد. برای مدل HD در هر سه نوع میکرومخلوط کننده، دیده شد که اختلاط ضعیف بوده و با حضور میدان مغناطیسی (مدل MHD) به دلیل اینکه فروسیال تحت دو نیروی هیدرودینامیک و مغناطیسی است، شکل جریان تغییر پیدا کرده و بازده اختلاط بهبود یافته است. توزیع فشار در جریان HD برای کانال Y شکل به صورت خطی کاهش پیدا کرده، در حالی که در مدل جریان MHD، فشار به طور ناگهانی در قسمتی از کانال که میدان مغناطیسی بر آن اعمال شده است، کاهش پیدا یافته است. بزرگی سرعت در میکرومخلوط کننده در حالتی که میدان مغناطیسی بر آن اعمال نشده است، ثابت می باشد اما با اعمال میدان مغناطیسی، سرعت در ناحیه ای که میدان اعمال شده کاهش می یابد. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش شدت جریان به دلیل کاهش زمان ماند، میزان بازده اختلاط کاهش پیدا می کند. کانتور سرعت برای هر سه نوع میکرومخلوط کننده، نشان می‌دهد که در سرعت ورودی یکسان، مقدارهای سرعت در میکرومخلوط کننده در راستای Y به دلیل بزرگ تر بودن زاویه برخورد بیشتر از میکرومخلوط کننده‌های T و Y شکل می باشد. می‌توان نتیجه گرفت که میکرومخلوط کننده Y شکل دارای کم‌ترین بازده اختلاط و میکرومخلوط کننده Oriented Y دارای بالاترین میزان بازده اختلاط است. این نتیجه به دلیل تفاوت در زاویه برخورد جریان های ورودی در این سه نوع میکرومخلوط کننده است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که با اعمال میدان مغناطیسی بر هر سه نوع میکرومخلوط کننده، فروسیال تحت دو نیروی هیدرودینامیک و مغناطیسی قرار می‌گیرد که منجر به ایجاد جریان‌های عرضی شده و میزان اختلاط افزایش پیدا می‌کند.

فهرست نمادها

چگالی شار مغناطیسی، T B

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۷/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

مراجع

- [۱] کریمی؛ هجیر، سبزه میدانی؛ محمد مهدی، مطالعه عددی تأثیر عامل‌های هندسی بر انتقال گرمای نانو سیال آب - Al_2O_3 در یک میکروکانال، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۴) ۳۵: ۱۳۷ الی ۱۵۰ (۱۳۹۵).

- [2] Ansari M.A, Kim K.Y., Anwar K., Kim S.M., [A Novel Passive Micromixer Based on Unbalanced Splits and Collisions of Fluid Streams](#), *J Micromechanics Microengineering*, **20** (5):55007 (2010).
- [3] Odedra A., Geyer K., Gustafsson T., Gilmour R., Seeberger P.H., [Safe, Facile Radical-Based Reduction and Hydrosilylation Reactions in a Microreactor Using Tris \(trimethylsilyl\) Silane](#), *Chem. Communicat.*, **0** (26):3025-3027 (2008).
- [4] Rahimi M., Azimi N., Parsamogadam M.A., Rahimi A., Masahy M.M., [Mixing Performance of T, Y, and Oriented Y-Micromixers with Spatially Arranged Outlet Channel: Evaluation with Villiermaux/Dushman Test Reaction](#), *Microsystem. Technol.*, **23** (8): 3117–3130 (2017).
- [5] Hajiani P., Larachi F., [Controlling Lateral Nanomixing and Velocity Profile of Dilute Ferrofluid Capillary Flows in Uniform Stationary, Oscillating and Rotating Magnetic Fields](#), *Chem. Eng. J.*, **223**: 454–466 (2013).
- [6] Zhang Q., Li H., Zhu C., Fu T., Ma Y., Li H., [Micro-Magnetofluidics of Ferrofluid Droplet Formation in a T-Junction](#), *Colloid Surf A: Physicochem. Eng. Asp.*, **537**: 572-579 (2018).
- [7] Rashin M.N., Hemalatha J., [Magnetic and Ultrasonic Studies on Stable Cobalt Ferrite Magnetic Nanofluid](#), *Ultrasonics*, **54** (3):834–840 (2014).
- [8] Hejazian M., Nguyen N.T., [Magnetofluidics for Manipulation of Convective Heat Transfer](#), *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **81**: 149–154 (2017).
- [9] Owen D., Ballard M., Alexeev A., Hesketh P.J., [Rapid Microfluidic Mixing via Rotating Magnetic Microbeads](#), *Sens. Act. A: Physical.*, **251**: 84-91 (2016).
- [10] Azimi N., Rahimi M., [Magnetic Nanoparticles Stimulation to Enhance Liquid-Liquid Two-Phase Mass Transfer under Static and Rotating Magnetic Fields](#), *J. Magn. Magn. Mater.*, **422**: 188–196 (2017).
- [11] Hajiani P., Larachi F., [Reducing Taylor Dispersion in Capillary Laminar Flows Using Magnetically Excited Nanoparticles: Nanomixing Mechanism for Micro/Nanoscale Applications](#), *Chem. Eng. J.*, **203**: 492–498 (2012).
- [12] Yang, R.J. Hou H.H., Wang Y.N., Fu L.M., [Micro-Magnetofluidics in Microfluidic Systems: A Review](#), *Sens. Act. B: Chemical.*, **224**: 1-15 (2016).
- [13] Wei Z.H., Lee C.P., [Magnetic Fluid Micromixer with Tapered Magnets](#), *J. Appl. Phys.*, **105**: 07B523 (2009).
- [14] Wang R.J., Lin J.Z., [Experimental Research on Mixing Efficiency of Magnetic Micromixer](#), *Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, China*, 18-21 (2006).
- [15] Oh D.W., Jin J.S., Choi J.H., Kim H.Y., Lee J.S., [A Microfluidic Chaotic Mixer Using Ferrofluid](#), *J Micromechanics Microengineering*, **17**: 2077–2083 (2007).
- [16] Tsai T.H., Liou D.S., Kuo L.S., Chen P.H., [Rapid Mixing between Ferro-Nanofluid and Water in a Semi-Active Y-Type Micromixer](#), *Sen. Act. A*, **153**:267–273 (2009).

- [17] Wen C.Y., Yeh C.P., Tsai C.H., Fu L.M., [Rapid Magnetic Microfluidic Mixer Utilizing AC Electromagnetic Field](#), *Electrophoresis*, **30**: 4179-4186 (2009).
- [18] Lee S.H., Noort D.V., Lee J.Y., Zhang B.T., Park T.H., [Effective Mixing in a Microfluidic Chip Using Magnetic Particles](#), *Lab. Chip.*, **479**: 479-482 (2009).
- [19] Kitenbergs G., Erglis K., Perzynski R., Cebers A., [Magnetic Particle Mixing with Magnetic Micro-Convection for Microfluidics](#), *J. Magn. Magn. Mater.*, **380**: 227-230 (2015).
- [20] Nouria D., Hesari A.Z., Passandideh-Fard M., [Rapid Mixing in Micromixers Using Magnetic Field](#), *Sens. Act. A*, **255**: 79-86 (2017).
- [21] Wang Y., Zhe J., Chung B.T.F., Dutta P., [A Rapid Magnetic Particle Driven Micromixer](#), *Microfluid Nanofluid*, **4**: 375-389 (2008).
- [22] Azimi N., Rahimi M., Abdollahi N., [Using Magnetically Excited Nanoparticles for Liquid-Liquid Two-Phase Mass Transfer Enhancement in a Y-Type Micromixer](#), *Chem. Eng. Process*, **97**: 12-22 (2015).
- [23] Zhu G.P., Nguyen N.T., [Magnetofluidic Spreading in Microchannels](#), *Microfluid Nanofluid*, **13**: 655-663 (2012).
- [24] Fluent 6.3., [User's manual to FLUENT 6.3.](#), Centra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, (2006) USA: Fluent Inc.
- [25] Lindner J., Menzel K., Nirschl H., [Simulation of Magnetic Suspensions for HGMS Using CFD, FEM and DEM Modeling](#), *Comput. Chem. Eng.*, **35**: 111-121 (2013).
- [26] Seo H.S., Lee J.C., Hwang I.J., Kim Y.J., [Flow Characteristics of Ferrofluid in a Microchannel with Patterned Blocks](#), *Mater. Research Bull.*, **58**: 10-14 (2014).