



شبیه سازی عددی و بهبود عملکرد اختلاط در میکرومیکسر به کمک گپ و مانع

تهمین تاجیک قنبری¹، معصومه رحیمی^{2*}، علی اکبر رنجبر³، یونس پهملی⁴

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

² استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گلستان، گرگان

³ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

⁴ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* گرگان، صندوق پستی 155، m.rahimi@gu.ac.ir

چکیده

با توجه به پیشرفت چشمگیر فناوری‌های نانو¹ و میکروسیالات و استفاده‌ی روزافزون از آن‌ها، نیاز به اختلاط سریع و بهینه در ابعاد میکرو یکی از مسائل مطرح شده در حوزه‌ی این تکنولوژی می‌باشد. میکرومیکسر² دستگاه‌های کوچکی می‌باشند که برای اختلاط³ حداقل دو فاز مورد استفاده قرار گرفته و کاربردهای فراوانی در زمینه‌های بیوشیمی، پزشکی، داروسازی و ... دارند. با توجه به ابعاد کوچک میکرومیکسر³ و اعداد رینولدز کوچک برای جریان سیالات مورد استفاده در این سیستم‌ها، پدیده اختلاط معمولاً به کندی صورت می‌گیرد بنابراین لازم است تا با استفاده از روش‌های مختلف اختلاط در این سیستم‌ها بهبود یابد. در این پژوهش، یک میکرومیکسر T-شکل به منظور بررسی رفتار اختلاط و مشخصه‌های جریان سیال در نرم افزار کامسول⁴ مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از ساختارهای گپ و مانع در مسیر جریان، فرآیند اختلاط بهبود یافته و تأثیرات این بهبود در شاخص اختلاط میکرومیکسر مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج به صورت کانتورهای اختلاط و مقادیر عددی بازده اختلاط ارائه و مورد بررسی قرار گرفته اند که این مقادیر برای مدل ساده حدود 94٪ می‌باشد و با ساختارهای اضافه شده این بازده تا حدود 98٪ بهبود می‌یابد.

کلیدواژگان

میکرومیکسر، اختلاط، گپ، مانع

Numerical simulation and mixing enhancement in a micromixer using gap and obstacle

Tahmin Tajik Ghanbari¹, Masoumeh Rahimi^{2*}, AliAkbar Ranjbar³, Younes Pahamli⁴

1- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

4- Department of mechanical engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

* P.O.B. 155, Gorgan, Iran, m.rahimi@gu.ac.ir

Abstract

Due to the significant development of nanotechnologies and microfluids and their increasing uses, needs for fast and optimal mixing in micro scales is one of the main topics raised in the field of this technology. Micromixers are small devices that are used for mixing at least two phases and have many applications in the fields of biochemistry, medicine, pharmacy, etc. because of the small size of the micromixers and the small Reynolds numbers for the fluid flow used in these systems, the mixing phenomenon is usually slow, so it is necessary to improve the mixing in these systems using different methods. In this research, a T-shaped micromixer has been simulated to investigate the mixing behavior and fluid flow characteristics in Comsol software. Also, by using gap structures and obstacles in the flow path, the mixing process is improved and the effects of this improvement on the micromixer mixing index are investigated. The results are presented in the form of mixing contours and numerical values of mixing efficiency, which are about 94% for the simple model, and with added structures this efficiency is improved to about 98%.

Keywords

Micromixer, Mixing, Gap, Obstacle

¹ nanotechnologies

² micromixers

³ mixing

⁴ comsol

1-مقدمه

در سال‌های اخیر فناوری‌های مبتنی بر نانوسیالات و نانوتکنولوژی‌ها گسترش و پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته‌اند. با توجه به کاربردهای فراوان این فناوری‌ها در زمینه‌های مختلف از جمله بیوشیمی، پزشکی، داروسازی، زیست‌شناسی و ...، محققان توجه ویژه‌ای به این زمینه داشته و به دنبال ارتقاء و بهبود سیستم‌های مبتنی بر این فناوری‌ها هستند. یکی از فرآیندهای مهم در زمینه‌ی نانوسیالات نیز اختلاط آن‌ها می‌باشد. میکرومیکسرهای یکی از دستگاه‌های میکروسایالی می‌باشند که برای اختلاط حداقل دو سیال از آن‌ها استفاده می‌شود. از کاربردهای میکرومیکسرهای می‌توان به آنالیزهای شیمیایی و بیولوژیکی، ترکیب داروهای مختلف، انحلال دارو در خو، جداسازی ذرات بر اساس میزان ضریب نفوذ، پخش کردن و یا اختلاط دو یا چند سیال مختلف اشاره کرد.

میکرومیکسرهای به طور کلی به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. میکرومیکسرهای فعال؛ در این نوع از میکرومیکسرهای برای اختلاط سیالات، یک عامل انرژی خارجی روی مسیر و نحوه‌ی اختلاط جریان‌ها تأثیر می‌گذارد. چند نمونه از نیروهای خارجی مورد استفاده در این نوع از میکرومیکسرهای عبارتند از نیروی مغناطیسی، الکتریسیته، محرک‌های فشار، صدا، حرارت و ... میکرومیکسرهای غیرفعال؛ میکرومیکسر غیرفعال که با نام میکرومیکسر استاتیکی نیز شناخته می‌شود بدون استفاده از قطعات مکانیکی متحرک یا منبع انرژی فعال، تنها با استفاده از تغییرات در هندسه میکرومیکسر، شدت اختلاط را افزایش می‌دهند. اختلاط در این نوع میکرومیکسرهای با استفاده از عواملی مانند ایجاد موانع برای درهم کردن جریان، ایجاد حرکت بی‌نظم بین سیالات، ترکیب دوباره‌ی مسیر و ... انجام می‌شود. پترسون و همکاران [1] به بررسی عددی و آزمایشگاهی یک میکرومیکسر همراه با موانع، برای بررسی اختلاط در رینولدزهای پایین پرداختند. در این مطالعه موانعی با شکل‌های لوزی، دایروی و مثلثی به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که وجود موانع به خصوص با هندسه دایروی اختلاط را افزایش می‌دهند.

ریو و همکاران [2] یک میکرومیکسر را در جهت اختلاط آب و اتانول مورد بررسی عددی و تجربی قرار دادند. نتایج ارائه شده نشان داد که شکل موجی مربعی باعث ایجاد جریان گردابه‌ای آرام می‌شود و همچنین شیارها باعث کشیدگی جریان می‌شوند که این دو پدیده باعث ایجاد یک اغتشاش در جریان شده و میزان اختلاط را در محدوده‌ی وسیعی از رینولدزها نسبت به حالت ساده و بدون این ساختارها به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین با بررسی تغییرات در مکان ساختارها بهترین حالت را برای بهبود اختلاط و افت فشار مشخص کردند.

لو و همکاران [3] نیز یک میکرومیکسر غیرفعال که بر اساس یک هندسه پیچیده ترکیبی-تقسیمی طراحی شده است را ارائه دادند که توانایی اختلاط کامل را در کمتر از میلی‌ثانیه دارا می‌باشد. ساختار این میکرومیکسر به گونه‌ای است که شامل چهار جریان ورودی بوده که وارد دو کانال T-شکل و سپس چهار کانال پروانه‌ای شکل می‌شوند، می‌باشد. آن‌ها علاوه بر شبیه‌سازی عددی، یک مدل آزمایشگاهی نیز از این میکرومیکسر طراحی کردند و نتایج تجربی و عددی را مورد بررسی قرار دادند.

سلحاتی و همکاران [4] نیز برای بهبود کیفیت اختلاط ضمن سادگی هندسه، میکرومیکسر با ساختار موجی را ارائه کردند. شبیه‌سازی عددی آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت انجام شده است. مسیر موجی سیالات در این نوع میکرومیکسرهای باعث تشکیل جریان ثانویه و اختلاط بهتر نسبت به میکرومیکسر مستقیم می‌شود. ساختار موجی در اعداد رینولدز بالاتر با تشدید جابجایی آشفته، مؤثرتر نیز می‌شود.

در مطالعه حاضر به بررسی یک میکرومیکسر T شکل پرداخته می‌شود که دارای گپ و مانع در طول مسیر اختلاط است. این میکرومیکسر دارای دو ورودی بوده و از آب به عنوان سیال اختلاط استفاده می‌گردد.

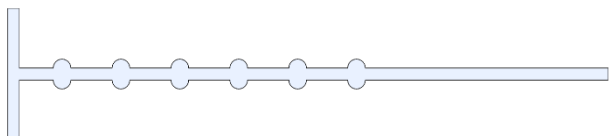
2- شرح مدل فیزیکی

مدل ارائه شده و مورد بررسی در این پژوهش، یک میکرومیکسر T-شکل با دو ورودی و با سطح مقطع $0.2\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ و طول اختلاط 10 mm مطابق "شکل 1" می‌باشد.

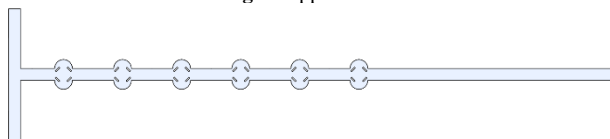


شکل 1 مدل ساده میکرومیکسر T-شکل
Fig1. Schematic view of T-shape micromixer

بعد از شبیه‌سازی مدل ساده، گپ و موانعی در مسیر جریان سیال قرار داده شده تا با انحراف آن میزان اختلاط در طول کانال مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. شکل‌های 2 و 3 به ترتیب نشان‌دهنده مدل گپ‌دار و مدل گپ‌دار با مانع هستند.



شکل 2 مدل گپ دار
Fig2. Gapped model



شکل 3 مدل گپ دار با مانع
Fig3. Gapped model with baffles

3- معادلات و شرایط مرزی حاکم بر مسئله

معادلات حاکم بر یک جریان سیال به صورت پایا شامل معادله پیوستگی (بقای جرم) و بقای مومنوم می‌باشد:

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

$$\nabla \cdot (\rho_b \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + pg \quad (2)$$

$$\vec{V} = (u, v, w) \quad (3)$$

مقطع عرضی عمود بر جهت جریان اصلی مطابق رابطه 11 محاسبه خواهد شد [6].

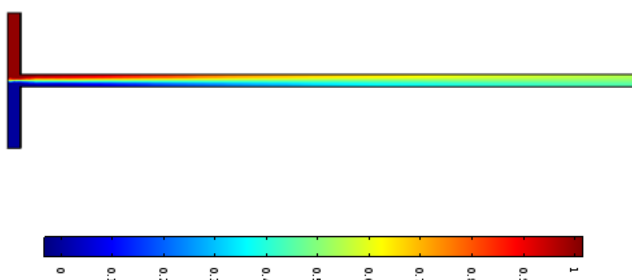
$$MI = 1 - \sqrt{\frac{\sigma^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (11)$$

مقدار MI همواره در محدوده $0 \leq MI \leq 1$ می باشد که مقدار نزدیکتر به 1 نشان دهنده عملکرد بهتر در اختلاط است.

در مطالعه حاضر فرضیات جریان به صورت لزج، هم دما، تراکم ناپذیر، آرام و دائم در نظر گرفته شده است و شبیه سازی ها در فضای سه بعدی انجام می شود. جریان با توزیع سرعت توسعه یافته وارد کانالهای ورودی جریان شده و با فشار نسبی استاتیکی صفر از خروجی خارج می شود. شرط مرزی عدم لغزش و نفوذناپذیری نیز روی دیواره های کانال حاکم است. سیال کاری آب با ضریب پخش 2.34×10^{-9} مترمکعب بر ثانیه، ویسکوزیته دینامیکی 0.001 کیلوگرم بر مترثانیه و چگالی 1000 کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. همچنین رینولدز جریان در این کانال 20 می باشد و جریان با دبی 3 میلی گرم در دقیقه وارد دو ورودی میکرومیکسر شده و کسر جرمی سیال در یک ورودی برابر 1 و در ورودی دیگر برابر صفر در نظر گرفته شده است.

4 - نتایج

با در نظر گرفتن شرایط مرزی مطرح شده مدل ساده و مدل های بهبود یافته را در محیط سه بعدی نرم افزار کامسول شبیه سازی می شود و با بررسی نتایج به تغییرات شاخص اختلاط و مقایسه آن پرداخته می شود. کانتور اختلاط استخراج شده برای مدل ساده در شکل 4 ارائه شده است. همانطور که پیداست با حرکت در مسیر طول کانال اختلاط صورت گرفته و با توجه به داده های رنگی کانتور، تغییر رنگ به سمت سبز نشان دهنده اختلاط دوسیال می باشد.



شکل 3 کانتور اختلاط مدل ساده
Fig3. Mixing contour for simple case

برای درک بهتر تاثیر ساختارهای ایجاد شده روی اختلاط میکرومیکسر، کانتورهای مدل های شکل 3 و 4 نیز ارائه شده اند. با کمی دقت به کانتورهای ارائه شده در شکل 6 و رنگ کانتورها در طول کانال جریان، می توان متوجه

که تانسور تنش برشی ($\bar{\tau}$) به شکل معادله زیر تعریف میشود:

$$\bar{\tau} = \mu(\nabla \bar{V} + (\nabla \bar{V})^T) + \frac{2}{3}\delta(\nabla \cdot \bar{V}) \quad (4)$$

اکنون با حل این معادلات می توان متغیرهای سرعت و فشار را به دست آورد. لازم به ذکر است که این معادلات برای ترکیب های همگن و تک فاز می باشد و در سیستم های میکروسیالی که حاوی بیشتر از یک نمونه هستند، برای بیان پدیده انتقال جرم به معادله دیگری نیز نیاز است که غلظت را از طریق معادله نفوذ جابجایی تعیین میکند.

$$\rho \bar{V} \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot (\rho D \nabla \phi) \quad (5)$$

که در این معادلات پارامترهای \bar{V} , ϕ , ρ , D , P و g و μ به ترتیب بیانگر بردار سرعت، چگالی سیال، کسر جرمی، فشار، ضریب نفوذ، شتاب جاذبه و لزجت سیال می باشند. متغیرهای ρ و μ نیز در دمای ثابت فقط تابعی از کسر جرمی هستند و وابستگی آنها به فشار قابل چشم پوشی است [5]. همچنین ویژگی های جریان را نیز با اعداد بدون بعد رینولدز، پکله و اشمیت (Re, Pe و Sc) بیان می کنیم.

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (6)$$

$$Pe = \frac{Ud}{D} = Re \cdot Sc \quad (7)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (8)$$

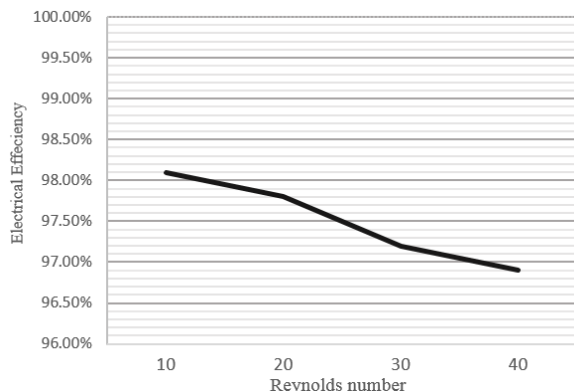
که در این معادلات نیز U سرعت متوسط و d قطر هیدرولیکی کانال می باشد که به عنوان طول مشخصه سیال در نظر گرفته شده است. این پارامتر برای یک کانال با مقطع مستطیلی ($W \cdot H$) بیان شده است.

$$d = \frac{2WH}{(W+H)} \quad (9)$$

همچنین برای مقایسه عملکرد اختلاط در مدل های مختلف لازم است تا پارامتری به نام شاخص اختلاط تعیین گردد. اکثر محققان در مطالعات عددی و تجربی یک شاخص اختلاط بر پایه "انحراف معیار کسر جرمی از کسر جرمی متوسط روی سطح مقطع" تعریف و به عنوان عملکرد اختلاط ارائه کرده اند. در این پژوهش نیز انحراف معیار مدل ها در مقاطع عرضی کانال اختلاط، در جهت عمود بر جهت جریان اصلی مشخص شده است. انحراف معیار کسر جرمی در یک مقطع عرضی عمود بر جهت جریان به صورت رابطه 10 تعریف می شود.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (c_i - \bar{c}_m)^2} \quad (10)$$

که در آن N تعداد گره های محاسباتی در مقطع عرضی، c_i کسر جرمی در گره محاسباتی i و \bar{c}_m کسر جرمی متوسط یکی از گونه ها در اختلاط کامل است. در نتیجه شاخص اختلاط به منظور محاسبه عملکرد اختلاط دوسیال در



شکل 5 مقادیر بازده اختلاط با تغییرات رینولدز
Fig5. Mixing index for different Reynolds

با توجه به مشاهده این تغییرات مثبت با وجود ساختارهای ارائه شده، در مطالعات بعدی می توان اثر تغییرات این ساختارها مانند گپ های متفاوت و موانع مختلف را روی اختلاط میکرومیکسر مورد بررسی قرار داد و به یک مدل بهینه برای ساختارها جهت بهبود هرچه بهتر در بازده اختلاط رسید.

5 - فهرست علائم

P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
U	سرعت متوسط
Re	عدد رینولدز
Pe	عدد پکله
Sc	عدد اشمیت
D	ضریب نفوذ (m^2s^{-1})
g	شتاب جاذبه (ms^{-2})
d	قطر هیدرولیکی (mm)
H	طول سطح مقطع کانال (mm)
W	عرض سطح مقطع کانال (mm)

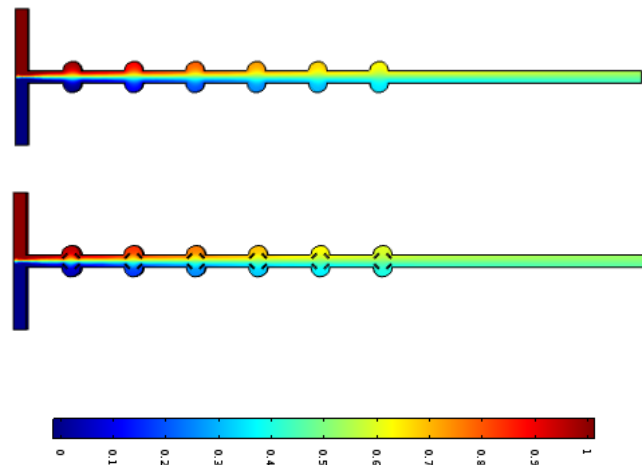
علائم یونانی

μ	لزجت ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	کسر جرمی

6 - مراجع

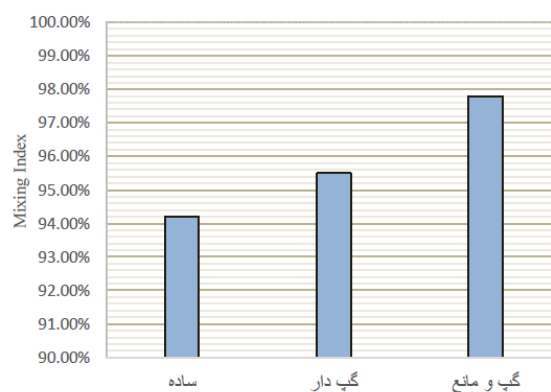
1. Bhagat, A.A.S., E.T. Peterson, and I. Papautsky, A passive planar micromixer with obstructions for mixing at low Reynolds numbers. Journal of micromechanics and microengineering, 2007. 17(5): p. 1017.
2. Ryu, S.-P., J.-Y. Park, and S.-Y. Han, Optimum design of an active micro-mixer using successive Kriging method. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011. 12(5): p. 849-855.

تغییرات اختلاط به خصوص با اضافه شدن فین به ساختار میکرومیکسر گپ دار شد.



شکل 4 کانتر اختلاط مدل های گپ دار و فین دار
Fig4. Mixing contour for different cases

برای بررسی دقیق تر این بهبودها می توان با استفاده از روابط ارائه شده در بخش سوم و معادلات 10 و 11 مقادیر بازده اختلاط هرمدل را محاسبه کرده و مورد مقایسه قرار داد. این مقادیر در نمودار شکل 5 ارائه شده است. همچنین در نمودار شکل 6 تاثیرات رینولدز روی بازده اختلاط مدل با گپ و مانع در 4 مقدار مختلف برای رینولدز ارائه شده است. همانطور که مشاهده می گردد با ارائه ساختارهای جدید برای این میکرومیکسر بازده اختلاط از مقدار 94% در مدل ساده به حدود 95% در مدل گپ دار و 98% در مدل با مانع رسیده است.



شکل 5 مقادیر بازده اختلاط برای کیس های مختلف
Fig5. Mixing index for different cases



3. Lu, Z., et al., *Passive microfluidic device for submillisecond mixing*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010. **144**(1): p. 301-309.
4. Solehati, N., J. Bae, and A.P. Sasmito, *Numerical investigation of mixing performance in microchannel T-junction with wavy structure*. Computers & Fluids, 2014. **96**: p. 10-19.
5. Orsi, G., et al., *Water-ethanol mixing in T-shaped microdevices*. Chemical Engineering Science, 2013. **95**: p. 174-183.
6. Chung, C.-K. and T. Shih, *Effect of geometry on fluid mixing of the rhombic micromixers*. Microfluidics and Nanofluidics, 2008. **4**(5): p. 419-425.