شبیه سازی عددی و {Bhagat, 2007 #1}بهبود عملکرد اختلاط در میکرومیکسر به کمک گپ و مانع

**تهمین تاجیک قنبری1 ، معصومه رحیمی2،\* ، 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 نانو[[1]](#footnote-1) 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. میکرومیکسرها[[2]](#footnote-2) دستگاه­های کوچکی می­باشند که برای اختلاط[[3]](#footnote-3) حداقل دو فاز مورد استفاده قرار گرفته و کاربردهای فراوانی در زمینه­های بیوشیمی، پزشکی، داروسازی و ... دارند. با توجه به ابعاد کوچک میکرومیکسرها و اعداد رینولدز کوچک برای جریان سیالات مورد استفاده در این سیستم­ها، پدیده اختلاط معمولا 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 کامسول[[4]](#footnote-4) مورد شبیه سازی و بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از ساختارهای گپ و موانع در مسیر جریان، فرآیند اختلاط بهبود یافته و تاثیرات 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.

**کلی**د‌واژگ**ان**

میکرومیکسر، اختلاط، گپ، مانع

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

Tahmin Tajik Ghanbari1, Masoumeh Rahimi2\*, AliAkbar Ranjbar3, Younes Pahamli 4

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. 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، زیست شناسی 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. میكرومیكسرها یكي از دستگاه­های میكروسیالي مي باشند که برای اختلاط حداقل دو سیال از آن­ها استفاده مي­شود. از کاربردهای میکرومیکسرها 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.

میکرومیکسرها به طور کلی به دو دسته­ی فعال و غیرفعال تقسیم می­شوند. میکرومیکسرهای فعال؛ در این نوع از میکرومیکسرها برای اختلاط سیالات، یک عامل انرژی خارجی روی مسیر و نحوه­ی اختلاط جریان­ها تاثیر می­گذارد. چند نمونه از نیروهای خارجی مورد استفاده در این نوع از میکرومیکسرها عبارتند از نیروی مغناطیس، 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 میکرومیکسرها با استفاده از عواملی مانند ایجاد موانع برای درهم کردن جریان، ایجاد حرکت بی­نظم بین سیالات، ترکیب دوباره­ی مسیر و ...انجام می شود. پترسون و همكاران [[1](#_ENREF_1)] به بررسي عددي و آزمایشگاهی يك ميكروميكسر همراه با مانع، براي بررسی اختلاط در رينولدزهای پايين پرداختند. در اين مطالعه موانعی با شکل­های لوزوي، دايروي و مثلثي به كار گرفته شد. نتايج نشان داد كه وجود موانع به خصوص با هندسه دايروي اختلاط را افزایش می­دهند.

ريو و همكاران [[2](#_ENREF_2)] یک میکرومیکسر را در جهت اختلاط آب و اتانول مورد بررسی عددی و تجربی قرار دادند. نتایج ارائه شده نشان داد كه شكل موجي مربعي باعث ايجاد جريان گردابه­اي آرام می­شود و هم­چنین شيارها باعث كشيدگي جريان مي شوند كه اين دو پديده باعث ايجاد یک اغتشاش در جريان شده و میزان اختلاط را در محدوده­ی وسیعی از رینولدزها نسبت به حالت ساده و بدون این ساختارها به­طور چشم­گيري افزايش مي دهد. آن­ها هم­چنین با بررسی تغییرات در مکان ساختارها بهترین حالت را برای بهبود اختلاط و افت فشار مشخص کردند.

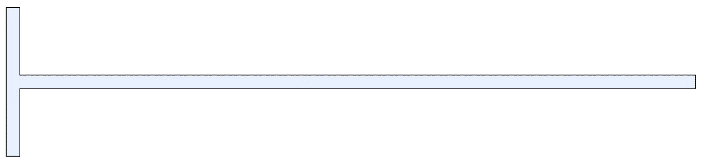
لو و همکاران [[3](#_ENREF_3)] نیز یک میکرومیکسر غیرفعال که بر اساس یک هندسه پیچیده ترکیبی-تقسیمی طراحی شده است را ارائه دادند که توانایی اختلاط کامل را در کمتر از میلی­ثانیه دارا می­باشد. ساختار این میکرومیکسر به گونه­ای است که شامل چهار جریان ورودی بوده که وارد دو کانال T-شکل و سپس چهار کانال پروانه­ای 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](#_ENREF_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 میکرومیکسرها 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

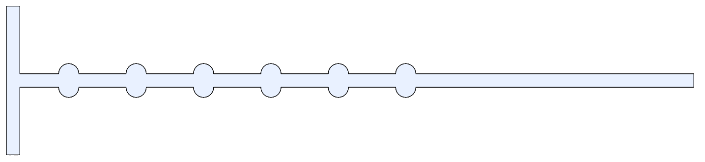
مدل ارائه شده و مورد بررسی در این پژوهش، یک میکرومیکسر T-شکل با دو ورودی و با سطح مقطع 0.2mm˟0.3mm و طول اختلاط mm 10 مطابق "شکل 1" می باشد.



شکل 1 مدل ساده میکرومیکسر T-شکل

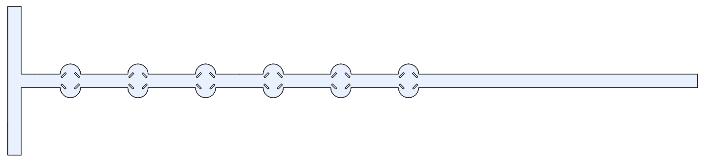
Fig1. Schematic view of T-shape micromixer

بعد از شبیه سازی 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 مومنتوم می­باشد:

*(1)*

(2)

*(3)*

که تانسور تنش برشی () به شکل معادله زیر تعریف میشود:

*(4)*

اکنون با حل این معادلات می­توان متغیر های سرعت و فشار را به دست آورد. لازم به ذکر است که این معادلات برای ترکیب­های همگن و تک فاز می­باشد و در سیستم­های 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.

*(5)*

که در این معادلات پارامتر های ، ، 𝜑، P، D، g و µ به ترتیب بیانگر بردار سرعت، چگالی سیال، کسر جرمی، فشار، ضریب نفوذ، شتاب جاذبه و لزجت سیال می­باشند. متغیرهای و µ نیز در دمای ثابت فقط تابعی از کسر جرمی هستند و وابستگی آنها به فشار قابل چشم پوشی است [[5](#_ENREF_5)] .

همچنین ویژگیهای جریان را نیز با اعداد بدون بعد رینولدز، پکله و اشمیت (Re، Pe و Sc) بیان می­کنیم.

*(6)*

*(7)*

*(8)*

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

*(9)*

هم­چنین برای مقايسه عملكرد اختلاط در مدل­های مختلف لازم است تا پارامتری به نام شاخص اختلاط تعيين گردد. اكثر محققان در مطالعات عددی و تجربی يك شاخص اختلاط بر پايه "انحراف معيار كسر جرمي از كسر جرمي متوسط روي سطح مقطع" تعريف و به عنوان عملكرد اختلاط ارائه کرده اند. در اين پژوهش نیز انحراف معيار مدل ها در مقاطع عرضي كانال اختلاط ، در جهت عمود بر جهت جريان اصلي مشخص شده است. انحراف معيار كسر جرمي در يک مقطع عرضي عمود بر جهت جريان به صورت رابطه 10 تعریف می­شود.

*(10)*

که در آن N تعداد گره های محاسباتی در مقطع عرضی، كسر جرمي در گره محاسباتی i و كسر جرمي متوسط يكي از گونه­ها در اختلاط كامل است. در نتیجه شاخص اختلاط به منظور محاسبه عملکرد اختلاط دوسیال در مقطع عرضی عمود بر جهت جریان اصلی مطابق رابطه 11 محاسبه خواهد شد [[6](#_ENREF_6)].

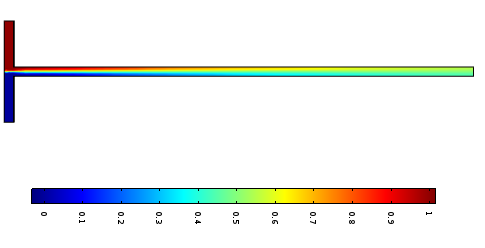
*(11)*

مقدار MI همواره در محدوده 0 ≤ MI ≤ 1 می­باشد که مقدار نزدیکتر به 1 نشان دهنده عملکرد بهتر در اختلاط است.

در مطالعه حاضر فرضیات جريان به صورت لزج، هم دما، تراكم ناپذير، آرام و دائم در نظر گرفته شده است و شبيه­سازي­ها در فضاي سه­بعدي انجام می­شود. جريان با توزيع سرعت توسعه يافته وارد كانالهاي ورودي جريان شده و با فشار نسبي استاتيكي صفر از خروجي خارج مش­شود. شرط مرزي عدم لغزش و نفوذناپذيري نیز روي ديواره­هاي كانال حاكم است. سیال کاری آب با ضریب پخش مترمکعب بر ثانیه، ویسکوزیته دینامیکی0.001 کیلوگرم بر مترثانیه و چگالی 1000 کیلوگرم بر مترمکعب می­باشد. همچنین رینولدز جریان در این کانال 20 می­باشد و جریان با دبی 3 میلی­گرم در دقیقه وارد دو ورودی میکرومیکسر شده و کسر جرمي سیال در یک ورودی برابر 1 و در ورودي ديگر برابر صفر در نظر گرفته شده است.

4 - نتایج

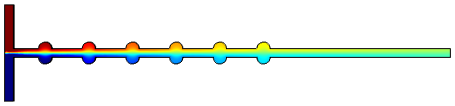
با در نظر گرفتن شرایط مرزی مطرح شده مدل ساده و مدل های بهبود یافته را در محیط سه­بعدی نرم افزار کامسول شبیه سازی می­شود و با بررسی نتایج به تغییرات شاخص اختلاط و مقایسه آن پرداخته می­شود. کانتور اختلاط استخراج شده برای مدل ساده در شکل 4 ارائه شده است. همانطور که پیداست با حرکت در مسیر طول کانال اختلاط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

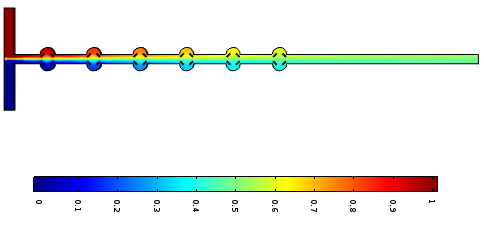


شکل 3 کانتور اختلاط مدل ساده

Fig3. Mixing contour for simple case

برای درک بهتر تاثیر ساختارهای ایجاد شده روی اختلاط میکرومیکسر، کانتورهای مدل­های 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، می­توان متوجه تغییرات اختلاط به خصوص با اضافه شدن فین به ساختار میکرومیکسر گپ­دار شد.

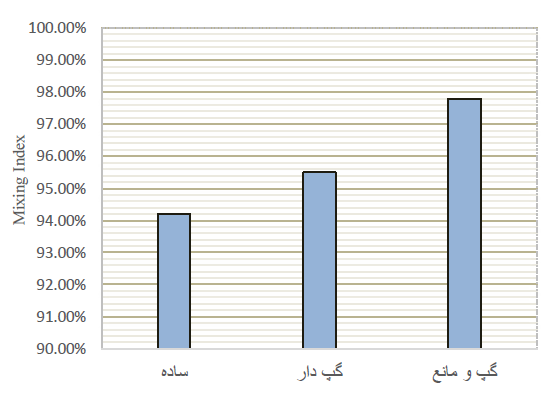




شکل 4 کانتور اختلاط مدل­های گپ­دار و فین­دار

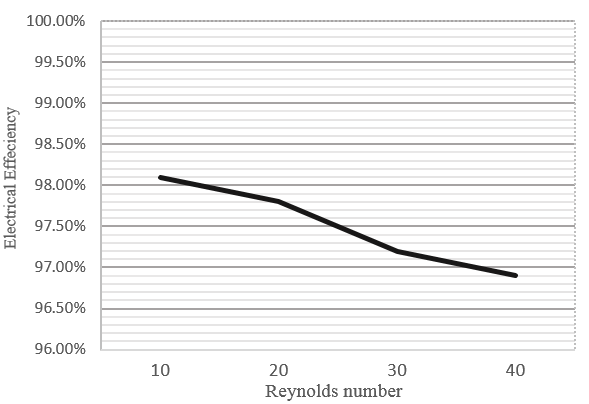
Fig4. Mixing contour for different cases

برای بررسی دقیق­تر این بهبودها می­توان 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 می­گردد 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



شکل 6 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 می­توان اثر تغییرات این ساختارها مانند گپ­های متفاوت و موانع مختلف را روی اختلاط میکرومیکسر مورد بررسی قرار داد و به یک مدل بهینه برای ساختار ها جهت بهبود هرچه بهتر در بازده اختلاط رسید.

5 - فهرست علایم

|  |  |
| --- | --- |
|  | فشار (kgm-1s-2) |
|  | سرعت متوسط |
|  | عدد رینولدز |
|  | عدد پکله |
|  | عدد اشمیت |
|  | ضریب نفوذ (m2s-1) |
|  | شتاب جاذبه (ms-2) |
|  | قطر هیدرولیکی (mm) |
|  | طول سطح مقطع کانال (mm) |
|  | عرض سطح مقطع کانال (mm) |
| **علایم یونانی** | |
|  | لزجت (kgm-1s-1) |
|  | چگالی (kgm-3) |
|  | 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.

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.

1. nanotechnologies [↑](#footnote-ref-1)
2. micromixers [↑](#footnote-ref-2)
3. mixing [↑](#footnote-ref-3)
4. comsol [↑](#footnote-ref-4)