



بررسی عددی تأثیر هندسه‌های مختلف بر کارایی اختلاط جریان در میکرومیکسرهای غیر فعال با سرعت‌های ورودی نوسانی

سیما باهری اسلامی^{1*}، سلمان احمدی²

1- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
2- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز
*تبریز، صندوق پستی 14766-51666، baheri@tabrizu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 اردیبهشت 1392
پذیرش: 04 شهریور 1392
ارائه در سایت: 30 تیر 1393

کلید واژگان:

میکرومیکسر فعال
میکرومیکسر غیر فعال
سرعت نوسانی
درجه اختلاط

چکیده

استفاده از میکرومیکسرهای برای بهبود اختلاط جریان در میکروکانال‌ها، به علت پایین بودن عدد رینولدز، امری ضروری است. بنابراین در این مطالعه، اختلاط در نه میکرومیکسر با هندسه‌های مختلف شامل: میکرومیکسر T شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی و متوازی‌الاضلاع در دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی اضافی موازی، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی اضافی عمودی، میکرومیکسر با موانع دایره‌ای و مثلثی در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع ضخیم و نازک بررسی شده است. برای تمامی میکرومیکسرهای سرعت‌های ورودی نوسانی به صورت سینوسی است که اختلاف فاز 180 درجه در سرعت کانال‌های ورودی وجود دارد. معادلات حاکم به صورت عددی به روش حجم محدود حل شده‌اند و تغییرات درجه اختلاط بر حسب زمان در خروجی میکرومیکسر و درجه اختلاط در طول کانال خروجی بر حسب فاصله از انشعاب برای تمامی میکرومیکسرهای بررسی و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد اختلاط در میکرومیکسرهایی که جریان در کانال اختلاط را به چند لایه تقسیم می‌کنند، مانند میکرومیکسرهای لوزی، بالا است و در هندسه‌های با موانع روی دیواره کمتر می‌باشد. همچنین در سرعت متوسط ثابت یک فرکانس بهینه وجود دارد که به ازای آن درجه اختلاط بیشترین مقدار را دارد.

Numerical investigation on the effect of various geometries on mixing efficiency of passive micromixers with oscillatory inlet velocities

Sima Baheri Islami*, Salman Ahmadi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
*P.O.B. 51666-14766 Tabriz, Iran, baheri@tabrizu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 May 2013
Accepted 26 August 2013
Available Online 21 July 2014

Keywords:

Active Micromixer
Passive Micromixer
Oscillatory Velocity
Mixing Degree

ABSTRACT

Because of the low Reynolds numbers in microchannels, using of micromixers to improve the flow mixing is essential. Therefore, in this study mixing in nine different micromixer geometries, such as: simple T-shaped micromixer, micromixer with rectangular or parallelogram ribs on the walls of the mixing channel, T-shaped micromixer with two additional parallel or perpendicular inlet channels, micromixer with circular or triangular barriers in the middle of the mixing channel, rhombus micromixer with thick or thin edges, has been investigated. Sinusoidal oscillatory velocity with a phase difference of 180 degrees relative to each other has been applied to channels inlet. The governing equations have been solved numerically using the finite volume method. For all geometries time variation of mixing degree at microchannel outlet and the variation of mixing degree along the channel length have been computed. Results show that for micromixers, which divide the flow to several layers such as rhombus micromixers, mixing degree is high and the micromixers with ribs on the walls have lower mixing degrees.

1- مقدمه

دارویی را بر عهده دارند، میکرومیکسرها هستند. میکرومیکسرها به دو دسته اصلی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند. در میکرومیکسرهای فعال، اختلاط توسط یک عامل خارجی مانند میدان الکتریکی، مغناطیسی، نوسانات فشار¹، امواج صوتی و غیره صورت می‌گیرد، در حالی که در میکرومیکسرهای غیرفعال، اختلاط از تعامل جریان اصلی با هندسه کانال که به طور خاص طراحی شده است (مانند کانال‌های متقاطع، زیگزاگی، مانع‌دار)، بدون

امروزه با رشد فناوری ساخت در ابعاد کوچک، کاربرد تجهیزات در ابعاد میکرو و نانو در صنایع مختلف نظیر پزشکی، بیومکانیک، بیوشیمی و صنایع شیمیایی رشد چشمگیری یافته است. با توجه به مشکلات و هزینه‌های ساخت در این ابعاد، شبیه‌سازی و بهینه نمودن دستگاه قبل از ساخت و آزمایش ضروری می‌باشد. یکی از قسمت‌های تأثیرگذار در تجهیزات سیالاتی در این ابعاد، که وظیفه اختلاط سیالات قبل از واکنش با آماده‌سازی ترکیب

1- Pressure Perturbation

Please cite this article using:

S. Baheri Islami, S. Ahmadi, Numerical investigation on the effect of various geometries on mixing efficiency of passive micromixers with oscillatory inlet velocities, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 27-34, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

دایره‌ای در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مثلثی در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع ضخیم، میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع نازک. جریان به صورت دو بعدی و ناپایا در نظر گرفته شده است و میکرومیکسرها از نظر درجه اختلاط در خروجی و تغییرات درجه اختلاط بر حسب فاصله از انشعاب با هم مقایسه شده اند.

2- معادلات حاکم و روش حل عددی

معادلات حاکم بر جریان تراکم ناپذیر و ناپایای سیال نیوتنی، معادلات بقای مومنتم و جرم هستند که به صورت زیر نوشته می‌شوند:

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

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

که در آن \vec{u} بردار سرعت، p فشار، ρ چگالی و ν لزجت سینماتیکی می‌باشد. برای محاسبه کسر جرمی جزء i ام در مخلوط، Y_i ، از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i \quad (3)$$

$$\vec{J}_i = -\rho D \nabla Y_i \quad (4)$$

که در آن \vec{J}_i شار و D ضریب پخش جرمی جزء i ام است.

کمیت مهمی که میزان اختلاط دو سیال را نشان می‌دهد، درجه اختلاط³ است که در هر مقطعی از کانال اختلاط می‌تواند با رابطه (5) محاسبه شود [10].

$$DM = 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \mu)^2}{n}} \left(\frac{u_j}{u_{mean}} \right)}{\mu} \quad (5)$$

که Y_i کسر جرمی در سلول i ام، u_i سرعت مماسی⁴ در سلول i ام و μ کسر جرمی در خروجی میکرومیکسر ایده آل (که برابر 0/5 است) و n تعداد سلول‌ها در مقطع مورد نظر است.

معادلات حاکم به صورت عددی با استفاده از نرم افزار حجم محدود آنسیس فلونت⁵ حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی جملات جابجایی در معادله (1) از روش فراباد مرتبه دوم⁶ و در معادله (3) از روش کوپک⁷ استفاده شده است. همچنین الگوریتم سیمپل⁸ برای کوپل فشار و سرعت به کار رفته است.

3- هندسه، شبکه و شرایط مرزی

در شکل 1 انواع هندسه‌های مورد بررسی در این مطالعه نشان داده شده است (همه ابعاد بر حسب میلی‌متر هستند). طول کانال اختلاط برای تمامی میکرومیکسرها یکسان و برابر 3mm انتخاب شده است.

در شکل 2 نمونه‌ای از شبکه محاسباتی مورد استفاده نشان داده شده است. برای شبکه‌های تمامی هندسه‌ها از شبکه با سازمان یکنواخت استفاده شده است.

خواص سیال ورودی همه میکرومیکسرها یکسان و مشابه خواص سیالاتی که بیشتر در بیوشیمی کاربرد دارند، با ضریب پخش $D = 10^{-10} (m^2/s)$ و ویسکوزیته سینماتیکی $\nu = 10^{-6} (m^2/s)$ در نظر گرفته شده اند [9]. در این مطالعه سرعت‌های نوسانی، در کانال‌های ورودی، به اندازه π نسبت به هم اختلاف فاز دارند و به صورت زیر فرض شده اند:

هیچ‌گونه انرژی خارجی صورت می‌گیرد [1] و [2]. یکی از روش‌های بهبود اختلاط در میکرومیکسرهای غیرفعال استفاده از سرعت‌های ورودی نوسانی است که دارای اختلاف فاز نسبت به یکدیگر می‌باشند. این مفهوم، اولین بار توسط ولپرت و همکاران [3] در سال 1999 ارائه شد. این روش اغلب برای جریان‌های با عدد رینولدز کم استفاده می‌شود [4].

عملکرد میکرومیکسرها با استفاده از روش‌های تجربی مختلف از جمله طیفسنجی فلورسانس و اشعه ماورای بنفش رزونانس رامان¹، طیفسنجی لنز حرارتی، میکروولیزر فلورسانس و تصویر سرعت میکرو ذرات بررسی شده است [5]. با پیشرفت دینامیک سیالات محاسباتی از این روش برای طراحی میکرومیکسرها استفاده می‌شود زیرا به طور مستقیم از نتایج شبیه سازی می‌توان اطلاعات دقیقی از میدان جریان، میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی، میدان حرارتی و غلظت گونه‌ها به دست آورد. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای کاظمی [6] و خسروی و همکاران [7] اشاره کرد. در کار خسروی از دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی سه بعدی جریان تک فازی درون یک میکرومیکسر پیچشی غیرفعال استفاده شده است. هدف از این مدل‌سازی بررسی میزان تشکیل گردابه‌های دین و اثر پارامترهای طراحی ابعاد میکروکانال‌ها و عملیاتی عدد رینولدز بر روی افت فشار و میزان اختلاط است. گولت و همکاران [8] افزایش اختلاط را با روش دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. پهنا و عمق همه کانال‌ها به ترتیب $200 \mu m$ و $120 \mu m$ بودند. بهترین اختلاط زمانی اتفاق می‌افتاد که سرعت‌های ورودی اختلاف فاز داشتند. آن‌ها اختلاط در فاصله 2mm بعد از انشعاب را بعد از گذشت 1s بررسی کردند. مائو و خو [9] یک میکرومیکسر ساده T شکل را به صورت سه بعدی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای سه عدد رینولدز، عدد استروهال² و دامنه سرعت نوسانی متفاوت بررسی کردند. میراندا و همکاران [10] اختلاط را در یک میکرومیکسر به صورت دو بعدی و با جریان‌های ورودی نوسانی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. بهترین اختلاط زمانی بود که اختلاف فاز دو سرعت ورودی 180 درجه و تعداد مانع‌های مربعی در وسط کانال خروجی بیشتر بود. بوتائوسکیو همکاران [11] یک میکرومیکسر شامل یک کانال مستطیلی اصلی و سه کانال ثانویه عمود بر کانال اصلی طراحی کردند که با اعمال فشار نوسانی در این کانال‌های ثانویه جریان اصلی را تحریک می‌کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کانال‌های ثانویه، اختلاط را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهند. گوین و هانگ [12-14] یک میکرومیکسر با جریان ورودی نوسانی با دو شیر پیزوالکتریک را بررسی کردند و همچنین یک حل تحلیلی ساده برای جریان نوسانی وابسته به زمان ارائه کردند. چن و چو [15] یک میکرومیکسر موج‌دار را به صورت دو بعدی با استفاده از روش عددی بررسی کردند. ما و سان [16] یک میکرومیکسر T شکل ساده را با استفاده از هر دو روش عددی و تجربی تحت سرعت ورودی نوسانی بررسی کردند و بهینه‌سازی از نظر فرکانس سرعت ورودی انجام دادند.

هدف از این مطالعه بررسی کارایی میکرومیکسرهای غیرفعال مختلف در فرایند اختلاط با جریان‌های ورودی نوسانی می‌باشد. هندسه‌های بررسی شده شامل موارد زیر است: میکرومیکسر T شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی اضافی موازی، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی اضافی عمودی، میکرومیکسر با موانع

1- Raman
2-Strouhal Number

3- Mixing Degree
4- Tangential velocity
5- ANSYS FLUENT 14
6-Second Order Upwind
7-QUICK
8-SIMPLE

زیاد نشدن حجم محاسبات در این مطالعه از شبکه با تعداد سلول‌های مذکور استفاده شده است. برای بقیه هندسه‌ها نیز شبکه به روش بالا انتخاب شده است. برای اعتبارسنجی نتایج ارائه شده، تأثیر جریان تناوبی روی اختلاط در یک میکرومیکسر T شکل ساده، که توسط ما و سان [16] به صورت عددی و تجربی انجام شده بود، بررسی گردید. در شکل 4 تغییرات درجه اختلاط بر حسب فاصله از انشعاب با نتایج مرجع [16] مقایسه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج وجود دارد.

به منظور بررسی تأثیر سرعت‌های ورودی نوسانی با اختلاف فاز، جریان در میکرومیکسر "الف" در شکل 5 مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 5-الف تغییرات زمانی سرعت جریان را در دو ورودی نشان می‌دهد. در دو زمان a و b که در این شکل مشخص شده، سرعت‌ها هر دو ماکزیمم ولی خلاف جهت هم هستند. در شکل 5-ب قابل مشاهده است که مقداری از جریان ورودی بالا به داخل کانال اختلاط و مابقی آن به ورودی پایین می‌رود و بعد از نیم دوره تناوب زمانی همان‌طور که در شکل 5-ج نشان داده شده است، جریان برعکس می‌شود و مقداری از جریان ورودی پایین به داخل کانال اختلاط و مابقی آن به ورودی بالا می‌یابد. این روند به صورت تناوبی با زمان تکرار شده و باعث می‌شود سیال‌های دو ورودی به تدریج و به طور نوسانی وارد کانال اختلاط شوند. بدین ترتیب سطح تماس دو سیال افزایش یافته و اختلاط بهبود پیدا می‌کند.

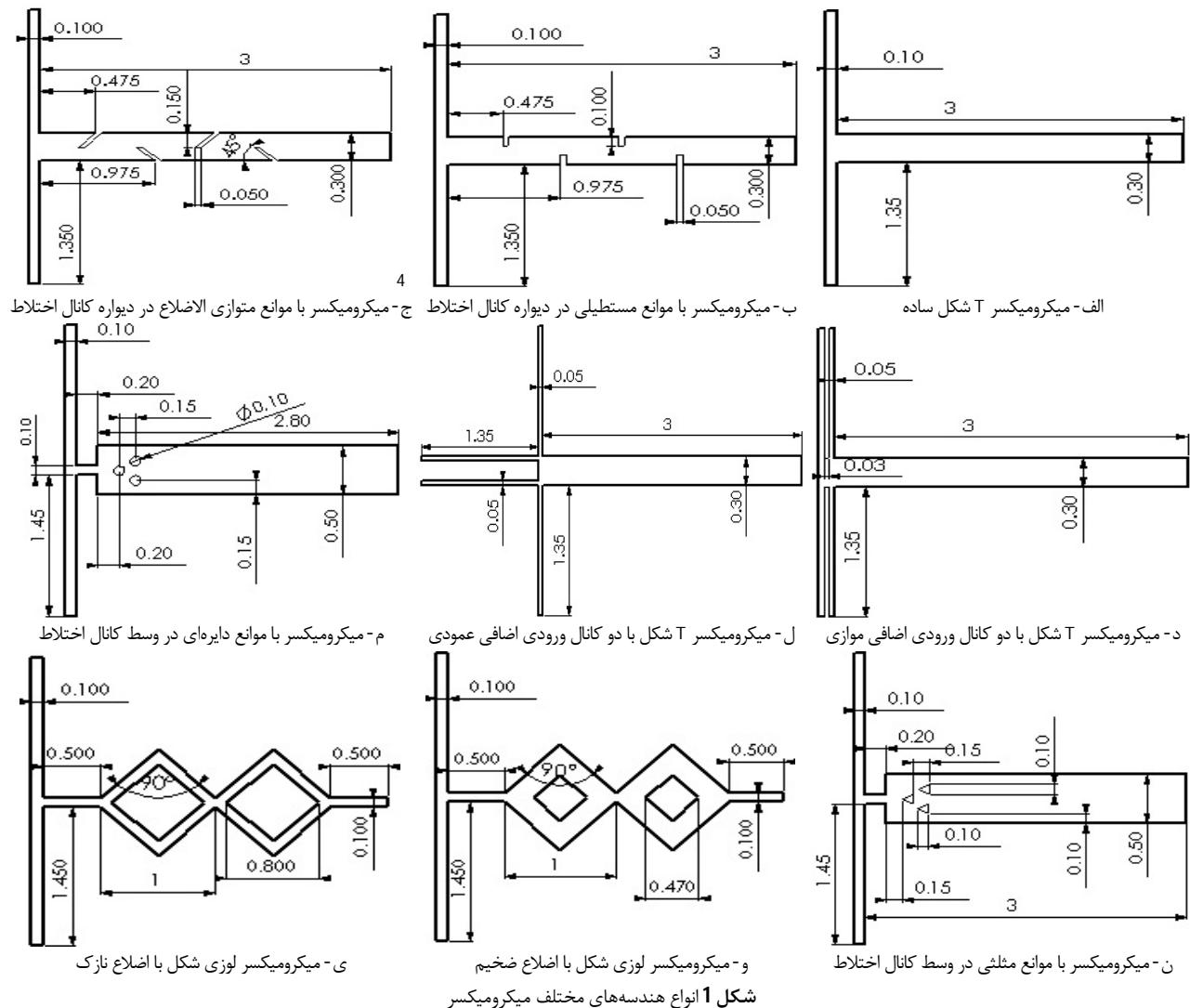
$$u_1(t) = 0.00175 \times (1 + 15 \times \sin(4\pi t + \pi))$$

$$u_2(t) = 0.00175 \times (1 + 15 \times \sin(4\pi t))$$

فرکانس نوسانی در قالب عدد بی‌بعد استروهل برابر $St=0.114$ است (عدد استروهل متوسط به صورت $St = fl/u$ تعریف می‌شود که در آن f فرکانس نوسانی، u سرعت متوسط، در اینجا $0/00175m/s$ و l طول مشخصه، در اینجا پهنای کانال ورودی، می‌باشد). دامنه بی‌بعد مطابق روابط بالا 15 و عدد رینولدز متوسط $(Re = ul/v)$ در ورودی همه کانال‌ها برابر $0/1$ در نظر گرفته شده است. روی دیواره کانال شرط مرزی عدم لغزش اعمال شده است. سیال ورودی از کانال بالا سیال 1 و ورودی از کانال پایین سیال 2 نامیده شده است. برای ورودی بالایی کسر جرمی سیال 1، برابر 1 و برای ورودی پایینی کسر جرمی سیال 1، برابر 0 در نظر گرفته شده است.

4- نتایج

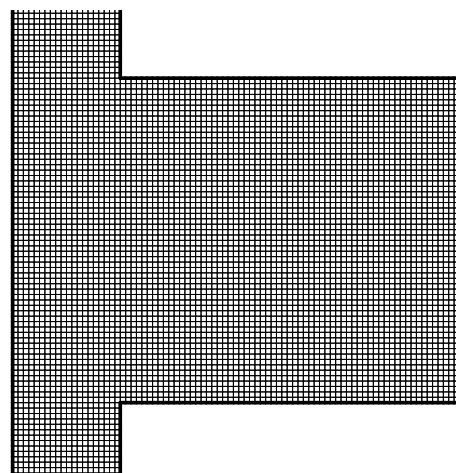
برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی در شکل 3 تغییرات درجه اختلاط برای هندسه‌های "ج"، "ن" و "و" در فاصله 2 میلی‌متر بعد از انشعاب، پس از گذشت 4s، بر حسب سه شبکه مختلف بررسی شده است. از نتایج شکل 3، شبکه‌های با تعداد سلول‌های 47200، 54515 و 68076 به ترتیب برای هندسه‌های "ج"، "ن" و "و" به عنوان شبکه بهینه برای محاسبات انتخاب شده‌اند. با دو برابر کردن تعداد سلول‌های مذکور برای هر سه هندسه، درجه اختلاط کمتر از 0/7 درصد اختلاف دارد. بنابراین برای



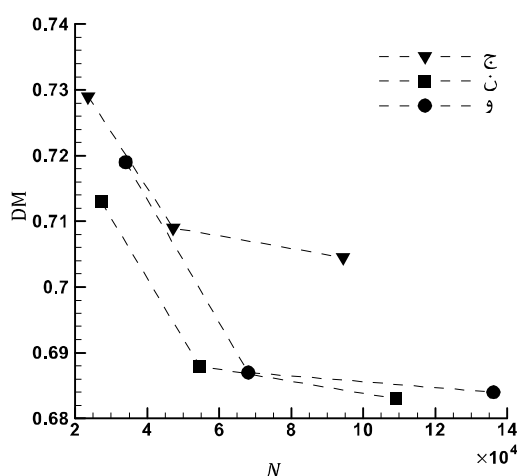
انتقال جرم، پدیده پخش مولکولی¹ می‌باشد. همان‌طور که مشخص است خطوط جریان دقیقاً پس از انشعاب مستقیم و موازی با یکدیگر هستند و خمیدگی‌های سطوح را به آرامی دنبال می‌کنند. این نشان می‌دهد میکرومیکسرهای غیرفعال در این رینولدزهای پایین قابلیت چندانی برای اختلاط جریان نخواهد داشت. بنابراین استفاده از روش‌های اختلاط فعال ضروری می‌باشد.

توزیع کسر جرمی سیال 1 برای تمامی میکرومیکسرها بعد از گذشت 15s در شکل 7 نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های 7-الف، 7-ب و 7-ج مشاهده می‌شود مانع‌های مستطیلی و متوازی‌الاضلاع نه تنها تأثیری در بهبود اختلاط نداشته‌اند بلکه باعث زود خارج شدن سیال از کانال اختلاط هم شده‌اند. همان‌گونه که در شکل 5 توضیح داده شد، دو سیال از دو کانال ورودی به طور متوالی وارد کانال اختلاط شده و به صورت یک در میان قرار می‌گیرند. رنگ‌های سیاه و سفید در کانتورها نشانگر حضور یکی از دو سیال مورد بررسی است که در این مطالعه عبارت "لایه" برای آن‌ها به کار رفته است. با شمارش تعداد رنگ‌های سیاه و سفید در کانتورها تعداد لایه‌ها به دست می‌آید. بنابراین هر چه تعداد لایه‌های حاضر از دو سیال در طول یکسان بیشتر باشد، نشانگر سطح تماس بیشتر و اختلاط بهتر است.

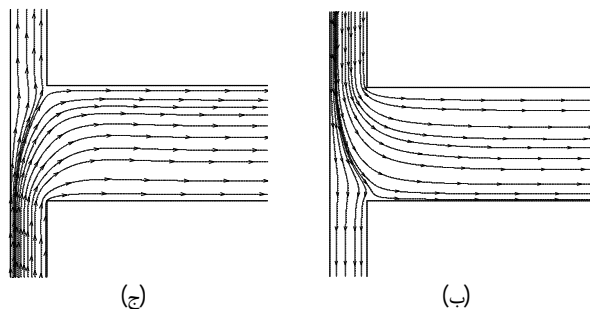
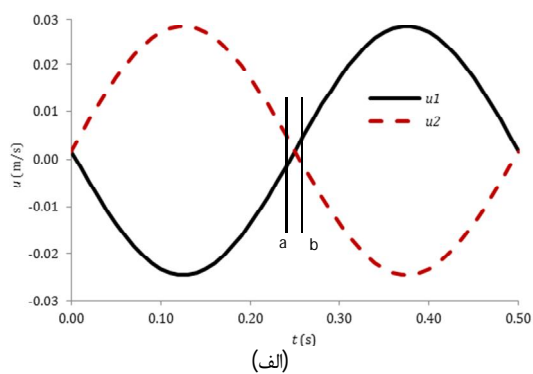
در شکل 7-الف بیشتر از 7 لایه از دو گونه سیال در کانال اختلاط دیده می‌شود، در حالی که در شکل‌های 7-ب و 7-ج کمتر از 7 لایه از دو گونه سیال در کانال اختلاط وجود دارد. با مقایسه شکل‌های 7-د و 7-ل دیده می‌شود که در شکل 7-د اختلاط بیشتر از شکل 7-ل است و پروفیل غلظت نسبت به خط مرکز متقارن‌تر است. در شکل 7-ل در نزدیک دیواره‌ها اختلاط به خوبی صورت نگرفته است. با مقایسه شکل‌های 7-م و 7-ن مشاهده می‌شود که توزیع غلظت تقریباً مشابه است و شکل موانع تأثیر چندانی بر اختلاط ندارد.



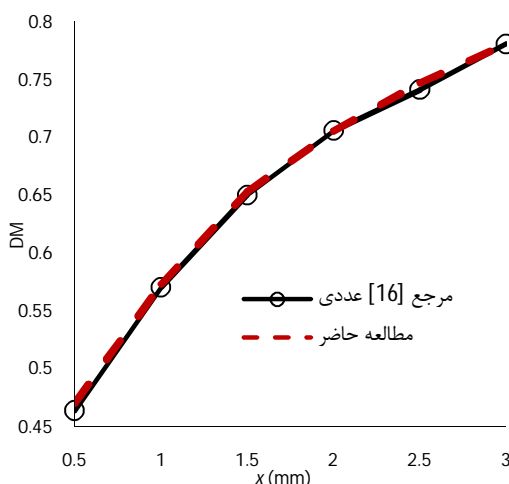
شکل 2 نمونه‌ای از شبکه محاسباتی (میکرومیکسر الف)



شکل 3 نمونه‌ای از استقلال نتایج از شبکه بر اساس تغییرات درجه اختلاط با تعداد سلول‌ها، 2 میلی‌متر بعد از انشعاب $t=4$ s



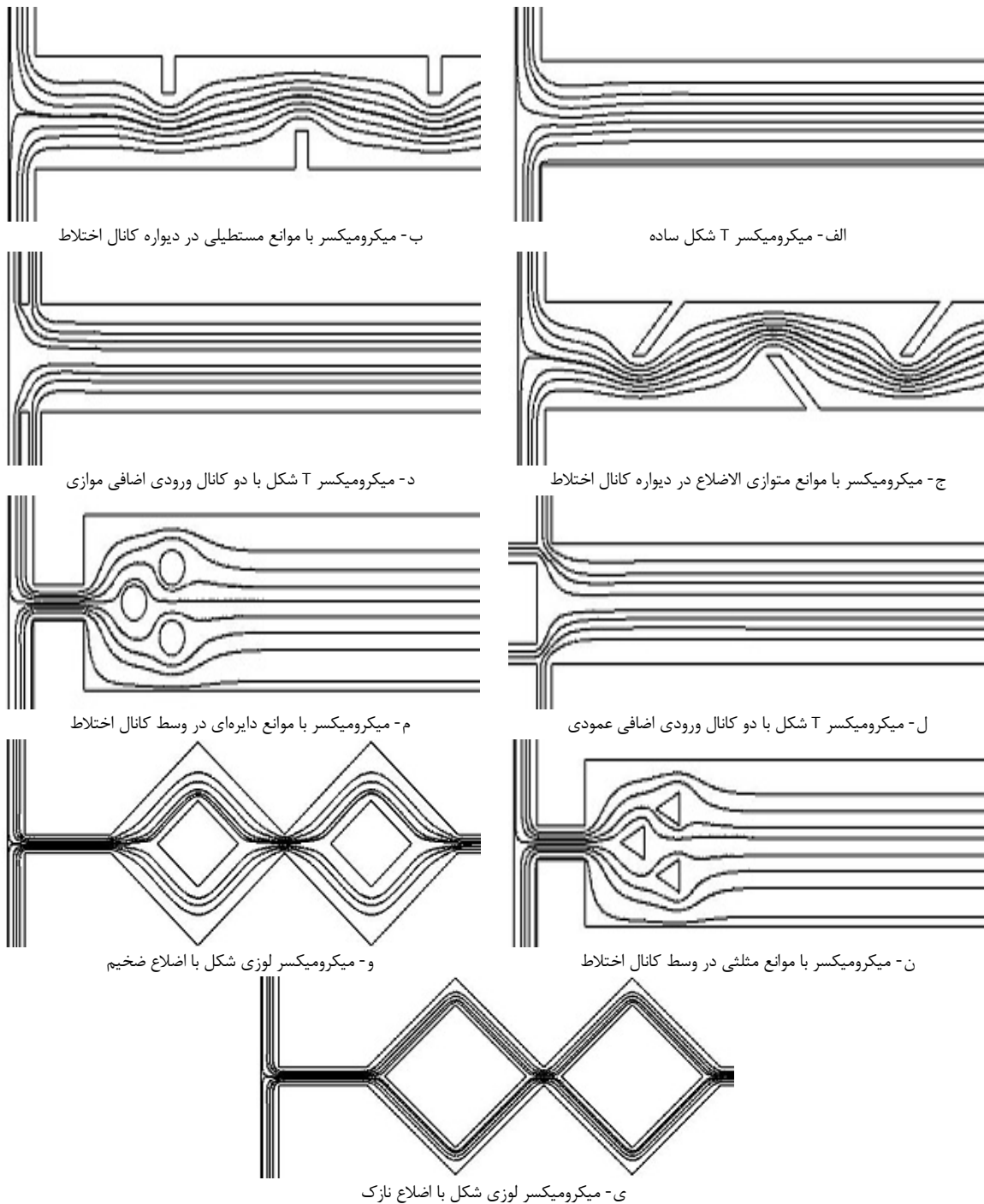
شکل 5 جریان در میکرومیکسر با هندسه الف، الف: تغییرات زمانی سرعت جریان در دو ورودی، ب: خطوط جریان در زمان a نشان داده شده در شکل الف، ج: خطوط جریان در زمان b نشان داده شده در شکل الف



شکل 4 مقایسه تغییرات درجه اختلاط بر حسب فاصله از انشعاب با نتایج مرجع [16] برای میکرومیکسر T شکل ساده

شکل 6 خطوط جریان را برای میکرومیکسرهای مورد بررسی، در حالتی که سرعت‌های ورودی هر دو کانال ثابت و غیر نوسانی می‌باشد، نشان می‌دهد. از آنجا که اندازه عدد رینولدز در این میکرومیکسرها پایین است، گردابه‌ای در کانال اختلاط دیده نمی‌شود که بتواند اختلاط را بهبود بخشد. در این حالت نیروهای لزجی، نیروی غالب وارد بر جریان سیال بوده و ساز و کار غالب در

1- Molecular Diffusion

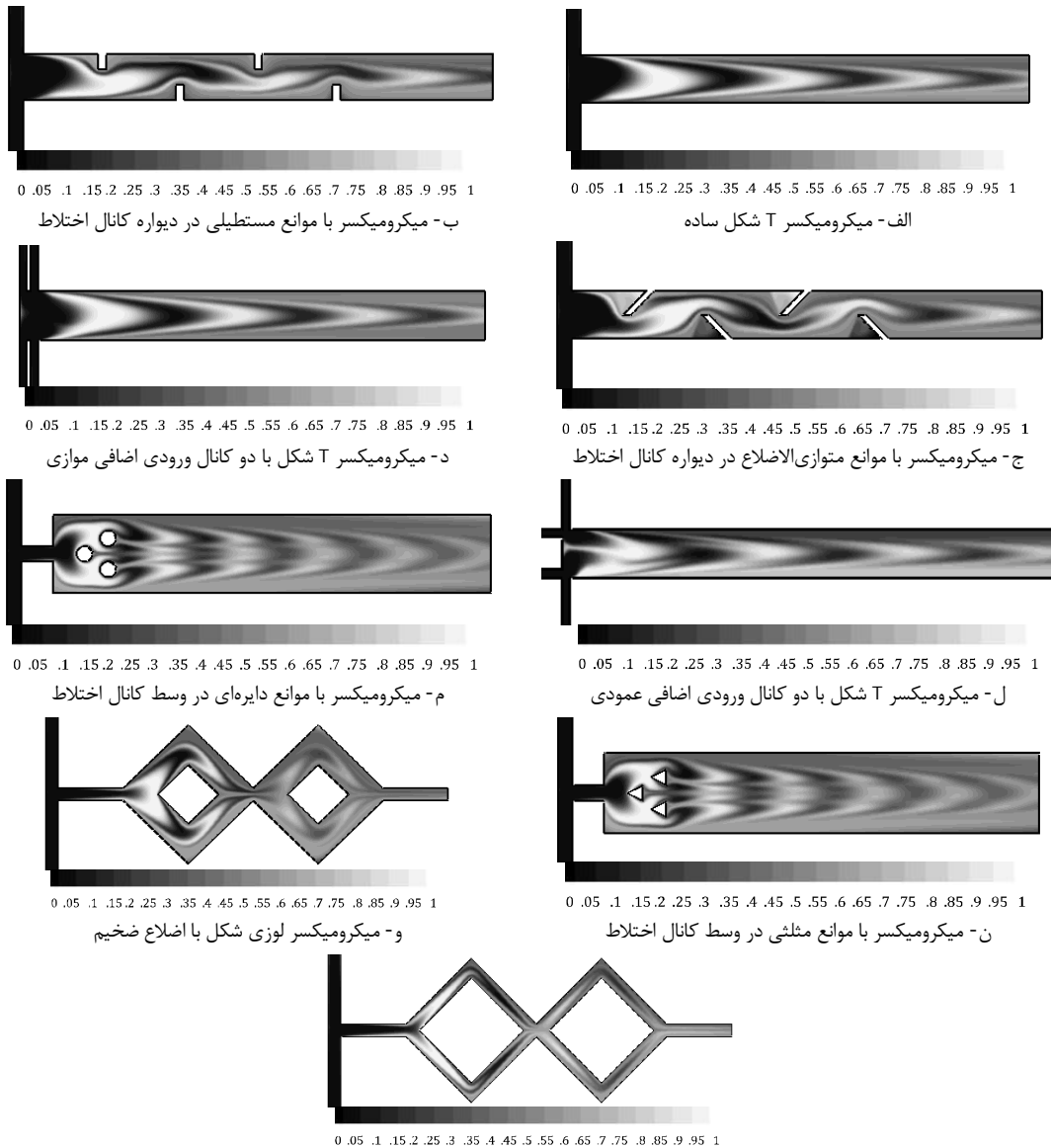


شکل 6 خطوط جریان برای سرعت‌های ثابت ورودی یکسان

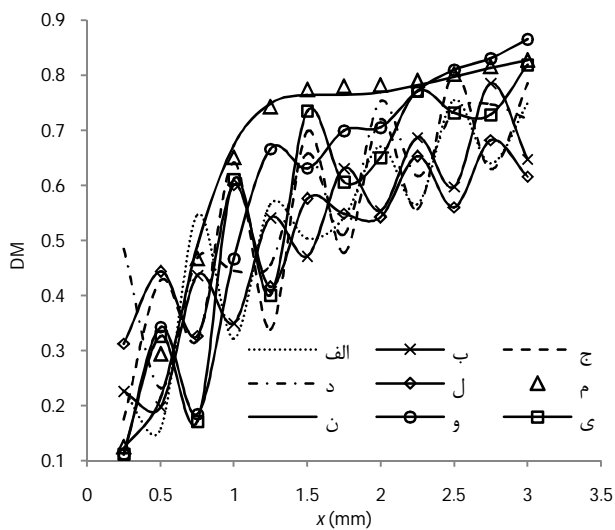
در شکل 9 تغییرات درجه اختلاط بر حسب فاصله از انشعاب برای همه میکرومیکسرها در زمان $15s$ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود هندسه‌های "م"، "ن"، "و" و "ی" نسبت به سایر هندسه‌ها اختلاط بهتری دارند و هندسه "ل" بدترین عملکرد را از نظر اختلاط دارد. در شکل 10 نمودار درجه اختلاط بر حسب زمان برای تمام هندسه‌ها در مقطع خروجی میکرومیکسر نشان داده شده است. زمان $t = 0$ مربوط به حالتی است که سرعت در ورودی تمام میکرومیکسرها ثابت و برابر $0,00175m/s$ باشد. همان‌طور که مشخص است با اعمال جریان نوسانی در ورودی میکرومیکسرها و با گذشت زمان، اختلاط بهبود قابل توجهی نسبت به سرعت ثابت داشته است.

شکل‌های 7-و و 7-ی نشان می‌دهند که به دلیل بزرگ‌تر بودن پهنای کانال خروجی میکرومیکسر "و" نسبت به "ی"، سیال دیرتر از میکرومیکسر "و" خارج شده است. تغییرات کسر جرمی سیال 1 در شکل 8 در امتداد مقطع خروجی برای همه میکرومیکسرها بعد از گذشت $15s$ نشان داده شده است. به طور کلی اگر تغییرات غلظت در خروجی کمتر باشد اختلاط بهتر صورت گرفته است.

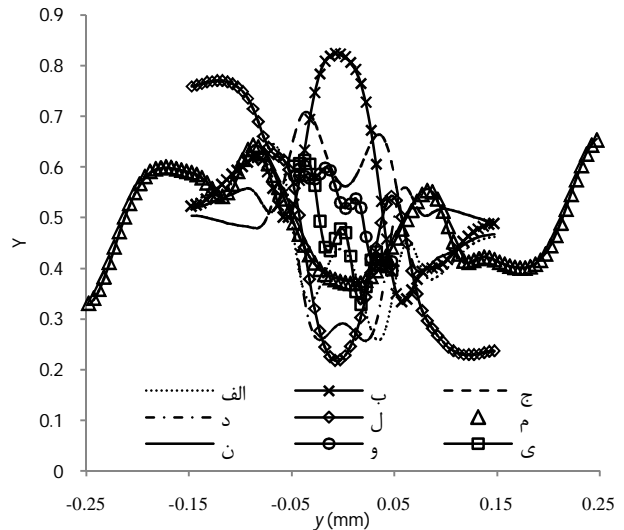
در هندسه‌های "الف"، "ب"، "ج" و "د" اختلاط در نزدیک دیواره‌ها خوب ولی در مرکز تغییرات زیادی دارد. هندسه‌های "م"، "ن"، "و" و "ی" نسبت به سایر شکل‌ها کمترین تغییرات و هندسه "ل" بیشترین تغییرات را دارد.



شکل 7 توزیع کسر جرمی سیال 1 بعد از گذشت 15 s



شکل 8 تغییرات کسر جرمی سیال 1 در خروجی میکرومیکسرها بعد از گذشت 15s



شکل 9 تغییرات درجه اختلاط میکرومیکسرها بر حسب فاصله از انشعاب بعد از گذشت 15s

هندسه‌های "م" و "ن" کمترین سرعت اختلاط را دارند. مشاهده گردید که میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع ضخیم در 3 ثانیه به اختلاط 68/5 درصد می‌رسد در حالی که میکرومیکسر "م" و "ن" بعد از گذشت 5/9 ثانیه به این مقدار اختلاط رسیده‌اند. به طور کلی میکرومیکسرهای لوزی شکل از نظر سرعت و بازده اختلاط نسبت به سایر هندسه‌ها مناسب‌ترند از آنجایی که عملکرد میکرومیکسر "و" نسبت به سایر میکرومیکسرها بهتر می‌باشد، تأثیر فرکانس و دامنه نوسان جریان‌های ورودی روی اختلاط این میکرومیکسر به ترتیب در شکل‌های 11 و 12 بررسی و نشان داده شده است.

از شکل 11 قابل مشاهده است که در اعداد استرومال متوسط اختلاط بهتر صورت می‌گیرد و در اعداد استرومال خیلی کم یا خیلی زیاد اختلاط کم می‌شود. در اعداد استرومال بسیار پایین سطح تماس دو سیال همانند حالت سرعت یکنواخت، بسیار کم است. به همین دلیل درجه اختلاط در این اعداد مقدار کمی است. با افزایش عدد استرومال و افزایش سطح تماس سیال‌ها DM افزایش می‌یابد اما این روند افزایشی با افزایش استرومال کاهش می‌یابد که منجر به ایجاد یک DM ماکزیمم در نمودار می‌شود، زیرا در استرومال خیلی بالا زمان ماندن سیال‌ها به میزان کافی در کانال اختلاط فراهم نمی‌شود و این قضیه باعث کاهش درجه اختلاط می‌شود.

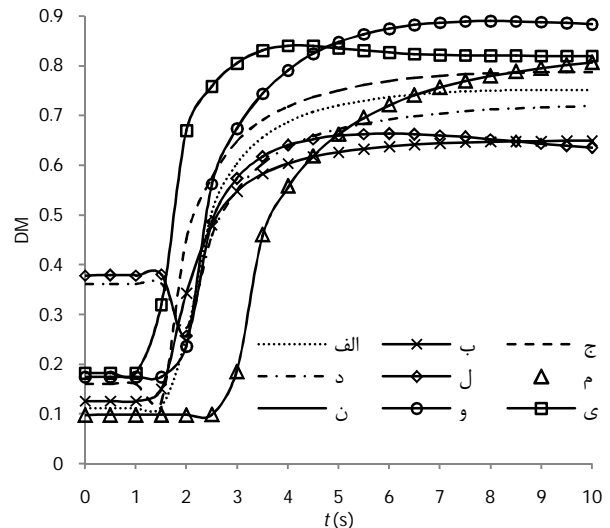
شکل 12 نشان می‌دهد با افزایش دامنه، اختلاط بهبود می‌یابد اما با توجه به این که دامنه‌های بالا به انرژی خارجی بیشتری نیاز دارد، استفاده از دامنه‌های متوسط به صرفه‌تر می‌باشد [14].

5- نتیجه‌گیری

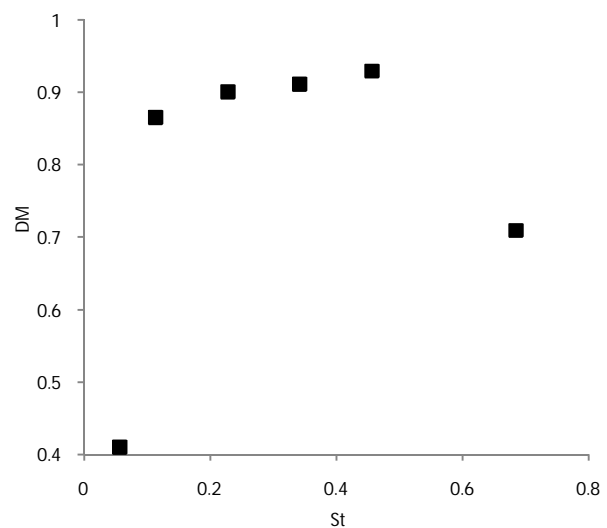
در این مطالعه سرعت‌های ورودی نوسانی روی نه هندسه کاملاً مختلف از میکرومیکسرهای از جمله میکرومیکسر T شکل ساده، میکرومیکسر با موانع مستطیلی در دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع متوازی الاضلاع در دیواره کانال اختلاط، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی اضافی موازی، میکرومیکسر T شکل با دو کانال ورودی عمودی، میکرومیکسر با موانع دایره‌ای در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر با موانع مثلثی در وسط کانال اختلاط، میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع ضخیم، میکرومیکسر لوزی شکل با اضلاع نازک اعمال گردید و مشاهده شد که هندسه‌های با مانع در دیواره باعث بهبود اختلاط نمی‌شوند بلکه اختلاط را نیز نسبت به هندسه ساده کمتر می‌کنند در حالی که هندسه‌های با مانع در وسط و هندسه‌های لوزی شکل اختلاط را به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهند. به طور کلی چون جریان‌های نوسانی در میکروکانال‌ها با اعداد رینولدز پایین استفاده می‌شوند، هندسه‌هایی مناسب هستند که جریان در کانال اختلاط را به لایه‌های کوچک تقسیم کرده و از این طریق اختلاط را بهبود می‌بخشند. نتایج نشان داد در سرعت متوسط ثابت یک فرکانس بهینه وجود دارد که به ازای آن درجه اختلاط بیشترین مقدار را دارد. همچنین با افزایش دامنه، بهبود در اختلاط مشاهده گردید.

6- مراجع

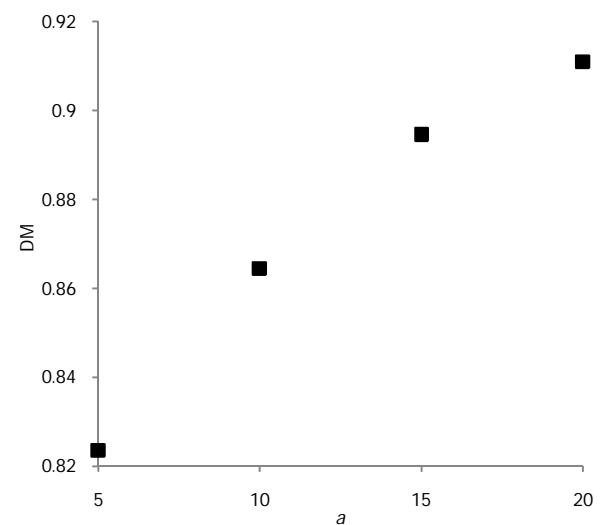
- [1] C. Y. Lee, C. L. Chang, Y. N. Wang, L. M. Fu, Microfluidic Mixing: A Review, *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 12, No. 5, pp.3263-3287, 2011.
- [2] N. T. Nguyen, Z. Wu, Micromixers-a review, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 15, No. 2, pp. R1-R16, 2005.
- [3] M. Volpert, C. D. Meinhardt, I. Mezic, M. Dahelth, An Actively Controlled Micromixer, *MEMS ASME IMECE*, Nashville, Tennessee, 1999.
- [4] D. R. Lilly, *Viability of A Controllable Chaotic Micromixer through the use of Titanium-Nickel Shape Memory Alloy*, M.Sc. Thesis, University of Kentucky, Kentucky, 2011.



شکل 10 تغییرات درجه اختلاط با زمان در مقطع خروجی میکرومیکسرهای



شکل 11 تأثیر عدد استرومال روی درجه اختلاط در خروجی میکرومیکسر "و"



شکل 12 تأثیر دامنه بی بعد جریان ورودی نوسانی روی درجه اختلاط در خروجی میکرومیکسر "و"

بعد از گذشت 5 ثانیه اختلاط در خروجی میکرومیکسرهای تقریباً ثابت مانده است. سرعت اختلاط در هندسه "ی" نسبت به سایر هندسه‌ها بیشتر است و

- [11] F. Bottausci, I. Mezić, C. D. Meinhart, C. Cardonne, Mixing in the Shear Superposition Micromixer: Three-Dimensional Analysis, *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 362, No. 1818, pp. 1001-1018, 2004.
- [12] N. T. Nguyen, X. Huang, Modeling, Fabrication and Characterization of a Polymetric Micromixer Based on Sequential Segmentation, *Biomed Microdevices*, Vol. 8, No. 2, pp. 133-139, 2006.
- [13] N. T. Nguyen, X. Huang, Mixing in microchannels based on hydrodynamic focusing and time-interleaved segmentation: modelling and experiment, *Lab Chip*, Vol. 5, No. 11, pp. 1320-1326, 2005.
- [14] N. T. Nguyen, X. Y. Hung, An Analytical Model for Mixing Based on Time interleaved sequential segmentation, *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 1, Issue 4, pp. 373-375, 2005.
- [15] C. K. Chen, C. C. Cho, A Combined Active/Passive Scheme for Enhancing the Mixing Efficiency of Microfluidic Devices, *Chemical Engineering Science*, Vol. 63, Issue 12, pp. 3081-3087, 2008.
- [16] Y. Ma, C. P. Sun, M. Fields, Y. Li, D. A. Haake, B. M. Churchill, C. M. Ho, An Unsteady Microfluidic T-form Mixer Perturbed by Hydrodynamic Pressure, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 18, pp. 45015, 2008.
- [5] A. Rida, M. A. M. Gijs, Manipulation of Self-Assembled Structures of Magnetic Beads for Microfluidic Mixing and Assaying. *Analytical Chemistry*, Vol. 76, No. 21, pp. 6239-6246, 2004.
- [6] S. A. Kazemi, *Experimental and Numerical Investigation of Mixing Phenomena in Micromixers*, M. Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, 2012. (In Persian)
- [7] M. Khosravi Parsa, F. Hormozi, S. Mirhaj, Numerical Design and Modeling of Curved Passive Micromixer for Biochemical and Biomedical Applications, in *The 14th Conference of chemical Engineering*, Tehran, Iran, 2012. (In Persian)
- [8] A. Goulet, I. Glasgow, N. Aubry, Dynamics of Microfluidic Mixing using Time Pulsing, *Discrete and continuous dynamical systems*, supplement Volume, pp. 327-336, 2005.
- [9] W. B. Mao, J. L. Xu, Micromixing Enhanced by Pulsating Flows, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 5258-5261, 2009.
- [10] J. M. Miranda, H. Oliveira, J. A. Teixeira, A. A. Vicente, J. H. Correia, G. Minas, Numerical Study of Micromixing Combining Alternate Flow and Obstacles", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 581-586, 2010.