

## ارتقا کیفیت اختلاط در ریز مخلوط کن های غیر فعال با بهره گیری از جانمایی بهینه موانع با داده های فازی

**حسن اطهری\*** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی علم و فن ارومیه، ارومیه، ایران، hasan.athari400@gmail.com  
**احمد نقیلو** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد خوی، دانشگاه آزاد اسلامی، خوی، ایران، naghiloo@iaukhoy.ac.ir  
**سجاد امامی** استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی معراج علم، سلماس، ایران، eng.emami.s@gmail.com  
**حسن زینالی** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی علم و فن ارومیه، ارومیه، ایران، hasan.boukplast@yahoo.com  
**وحید عبدالهی** دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، مؤسسه آموزش عالی علم و فن ارومیه، ارومیه، ایران، hasantre@yahoo.com

### چکیده

ریز مخلوط کن هاها در علم ریز سیال نقش بسیار پر رنگی را ایفا می کنند. این ابزار در شاخه های مختلفی همچون پزشکی، صنایع غذایی، هسته ای و صنایع شیمیایی کاربرد گسترده ای دارند. حصول کیفیت اختلاط بالا در این مخلوط کن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. دو روش کلی برای افزایش کیفیت اختلاط در ریز مخلوط کن هاها مطرح می شود: روش های فعال که با بهره گیری از فاکتورهای خارجی از قبیل میدان های الکتریکی و مغناطیسی در صدد افزایش کیفیت اختلاط برمی آیند و روش های غیرفعال که بدون صرف نیرو و انرژی خارجی و صرفاً با استفاده از تغییرات ساختاری ریز مخلوط کن ها سبب ارتقا کیفیت اختلاط می گردند. روش های غیرفعال به دلیل هزینه جاری کم و عدم استفاده از قطعات متحرک طرفداران زیادی دارند. ایجاد موانع در مسیر حرکت سیال یکی از این روش هاست. در این مقاله ریز مخلوط کن های با هندسه مستطیلی در نظر گرفته شده است که با بهره گیری از موانع دایروی شکل سعی می گردد کیفیت اختلاط افزایش یابد. برای در نظر گرفتن این موانع پنج نقطه در نظر گرفته شده است که موانعی دایره ای با پنج قطر مختلف در این پنج مکان قرار می گیرند. شایان ذکر است مطالعه حاضر شامل مدل سازی عددی است و به سبب وجود عدم قطعیت در نتایج عددی به دست آمده، مدل سازی در فضای فازی می تواند نتایج مطلوب تری را بدست آورد. نوآوری کار، ارائه روشی برای جانمایی بهینه موانع با داده های فازی است که بر اساس آن بتوان آرایش موانع مختلف را در ریز مخلوط کن ها به صورتی به دست آورد که بالاترین کیفیت اختلاط حاصل گردد. نتایج نشان می دهد که المان با قطرهای ۰/۲۰، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۰ و ۰/۱۰ میلی متر را در چینش چپ به راست (بالادست به پایین دست) در پنج موقعیت تعیین شده بایستی قرار گیرند. با این ترکیب کیفیت اختلاط نسبت به حالت پایه ۴۶۷ درصد افزایش می یابد.

**واژه های کلیدی:** ریز مخلوط کن ها، کیفیت اختلاط، تخصیص بهینه فازی، داده های فازی، دینامیک سیالات محاسباتی.

### Improving the mixing quality in a passive micromixer using the optimal location of obstacles with fuzzy data

<b>H. Athari</b>	Department of Mechanical Engineering, University college of science and technology, Urmia, Iran.
<b>A. Nagiloo</b>	Department of Mechanical Engineering, Azad University, Khoy, Iran.
<b>S. Emami</b>	Department of Mechanical Engineering, Meraj higher education institute, Salmas, Iran.
<b>H. Zeinali</b>	Department of Mechanical Engineering, University college of science and technology, Urmia, Iran.
<b>V. Abdollahi</b>	Department of Mechanical Engineering, University college of science and technology, Urmia, Iran.

#### Abstract

Micromixers play a very important role in microfluidic science. These tools are widely used in various fields such as medicine, food industry, nuclear and chemical industries. Achieving high mixing quality in these mixers is very importance. There are two general methods for increasing the quality of mixing in micromixers: Active methods, which use external factors such as electric and magnetic fields to increase the quality of mixing, and Passive methods, which do not use external forces and energy and only By using structural changes of micromixers, they improve the quality of mixing. Passive methods are very popular due to their low current cost and lack of use of moving parts. Creating obstacles in the path of fluid stream is one of these methods. In this paper, a micromixer with a rectangular geometry is considered, which tries to increase the mixing quality by using circular barriers. To consider these obstacles, five points have been considered, in which circular obstacles with five different diameters are placed. It is worth mentioning that the present study includes numerical modeling and due to the uncertainty in the obtained numerical results, modeling in fuzzy space can achieve more desirable results. The innovation of the work is to provide a way to optimally locate the obstacles with fuzzy data, based on which the arrangement of different obstacles in the micromixer can be achieved in such a way that the highest mixing quality is achieved. The results show that elements with diameters of 0.20, 0.15, 0.25, 0.30 and 0.10 mm should be placed in left-to-right arrangement in five designated positions. With this combination, the mixing quality increases by 467% compared to the base state.

**Keywords:** Micromixer, Mixing quality, Fuzzy optimal allocation, Fuzzy data, CFD.

#### ۱- مقدمه

کنها که خود زیر مجموعه ای این حوزه می باشد، کاربرد مهمی در زمینه های مختلف دارویی و پزشکی دارند. ریز مخلوط کن هاها از اجزای حیاتی در دستگاه های آزمایشگاه روی-تراشه به شمار می روند. کاربرد اصلی آنها اختلاط دو گونه سیال با کیفیت مطلوب در حداقل

با پیشرفت روز افزون فناوری های جدید از جمله میکروسیال ها، مطالعه و بررسی در این زمینه ضروری به نظر می رسد. میکرو مخلوط

زمان اختلاط است [۱۰،۲]. مطالعه ریز مخلوط کن هاها عموماً در دو حالت فعال و غیر فعال صورت می‌پذیرد. در حالت فعال که در واقع از نیروها و میدان‌های خارجی بهره گرفته می‌شود محققین متعددی کار کردند. برای مثال، یک ریز مخلوط کن ها فعال به صورت آزمایشگاهی توسط تای و همکاران [۳] مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل آنها دارای موانع به شکل متوازی الاضلاع بود. ایشان نشان داده اند که مدل جدیدشان کیفیت اختلاط را بالا می‌برد و به ۹۱٪ می‌رساند. هسل و همکاران [۴] مقاله‌ای را به مرور ریز مخلوط کن هاها فعال اختصاص داده اند. ایشان دسته بندی کاملی از انواع ریز مخلوط کن هاها ارائه کرده اند. لی و همکاران [۵] در یک ریز مخلوط کن ها فعال اثر میدان پتانسیل را به صورت تجربی بررسی نموده اند. ایشان پروفیل سرعت را با تغییر میزان پتانسیل به دست آورده اند. باقرآبادی و همکاران [۶] الکترودهای اختلاط را برای القاء همرفت و گردابی استفاده نموده اند. ایشان در تحقیق خود به مطالعه عددی با حل سیستم معادلات پویزن-نرنست-پلنک-ناویر-استوک (Poisson-Nernst-Planck-Navier-Stokes) با بهره‌گیری از رایان (کد داخلی) پرداخته اند.

فانگ و همکاران [۷] به شکل عددی اختلاط در ریز مخلوط کن ها T شکل را با بکارگیری المان‌های دوره‌ای مورد مطالعه قرار داده و اشاره کرده اند که بهترین کیفیت اختلاط در ۲۸ دوره قابل حصول است. رسولی و همکاران [۸] اختلاط با اعداد رینولدز ( Reynolds number) پایین را در یک میکرو مخلوط کن T شکل مورد مطالعه قرار داده اند. در کار آنها علاوه بر مدل‌سازی شکل ساده از دو مدل هندسی دیگر نیز استفاده شد که با بهره‌گیری از موانعی در مسیر کانال اختلاط را افزایش می‌دادند. شاه و همکاران [۹] سه نوع ریز مخلوط کن ها Y شکل غیر فعال سه بعدی را به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار داده اند. این طرح‌ها به سبب هزینه ساخت پایین و قابلیت اختلاط بهتر برای ایشان اهمیت داشتند. میزان جریان و اختلاط این مخلوط کنها برای عدد رینولدز در محدوده ۵/۰ تا ۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. شاخص اختلاط و افت فشار هر طرح در نرم افزار COMSOL 5.3a ارزیابی گردید. نتایج به دست آمده به وضوح نشان داد که اختلاط در مدل YSSAR در مقایسه با مخلوط کن ساده مستقیم بسیار بهبود یافت. در ارتباط با این موضوع می‌توان مطالب بسیاری را در ادبیات فن علاوه بر موارد ذکر شده استخراج نمود [۱۰-۱۳]. کومار و همکاران [۱۴] مخلوط کنهای T و Y شکل را به صورت غیر فعال مورد مطالعه قرار دادند. در

کار دیگری میسر حلزونی به صورت غیر فعال توسط تریپاتی و همکاران [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت.

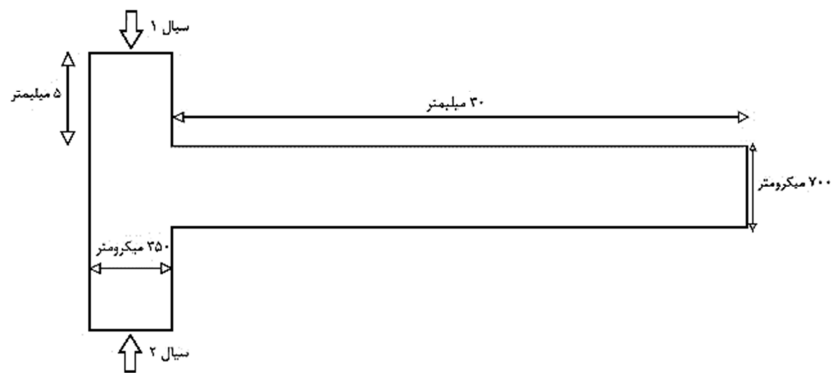
بر اساس داده‌های منتشر شده با توجه به اینکه ریز مخلوط کن هاها غیرفعال از هیچ‌گونه میدان و انرژی خارجی بهره نمی‌برند و دارای قسمت‌های متحرک نیز نیستند می‌توانند نقش مؤثری در افزایش راندمان یک سیستم اختلاط به دلیل پایین بودن هزینه جاری داشته باشند. ولی رسیدن به کیفیت اختلاط بالا در این نوع از مخلوط کنها از مسائل مورد توجه پژوهشگران است. یکی از مهمترین موضوعات مطرح در این حوزه، چگونگی قرارگیری المان‌های استاتیکی در داخل یک ریز مخلوط کن ها غیر فعال است به گونه‌ای که کیفیت اختلاط در بالاترین حد خود باشد. مقاله حاضر روشی را تحت عنوان تخصیص بهینه برای ریز مخلوط کن هاها غیرفعال ارائه می‌کند تا بر اساس آن بتوان ترکیب بهینه‌ای را برای المان‌های استاتیکی با کاهش تعداد شبیه‌سازی‌های زمانبر ارائه نمود.

## ۲- روش تحقیق

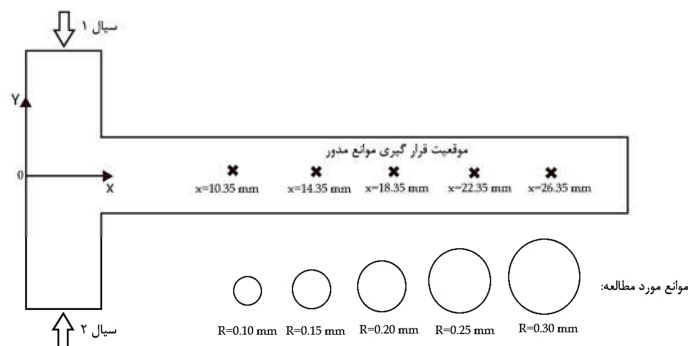
### ۲-۱- شبیه‌سازی عددی

این تحقیق یک کار مطالعاتی عددی دو بعدی می‌باشد که به کمک نرم افزار تجاری COMSOL Multiphysics Version 5.3a انجام شده است. بررسی صورت گرفته مطالعه کیفیت اختلاط در میکرو مخلوط کن T شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۱). با توجه به اهمیت اختلاط در ریز مخلوط کن هاها، افزایش میزان اختلاط امری ضروری و بسیار با اهمیت قلمداد می‌شود. در همین راستا استفاده از روش غیر فعال به سبب عدم استفاده از منبع انرژی خارجی و عدم وجود قطعات متحرک بیشتر مورد توجه پژوهشگران این حوزه قرار می‌گیرد. به همین سبب در کار حاضر از پنج مانع مدور در مسیر حرکت سیال در پنج نقطه تعیین شده قبلی بهره گرفته می‌شود (شکل ۲). هدف از مطالعه رسیدن به ترکیبی بهینه از قرارگیری موانع در کنار هم می‌باشد تا بتوان به بیشترین کیفیت اختلاط دست پیدا کرد. چگالی و لزجت سیال کاری در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به ترتیب برابر با ۹۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب و ۰/۰۰۰۸۹ پاسکال در ثانیه می‌باشد. جریان غیر قابل تراکم و یکنواخت فرض می‌شود و همچنین فشار ورودی ۳۰۰ پاسکال می‌باشد.

در این تحقیق پس از ارائه معادلات حاکم، شرایط مرزی مربوطه و هندسه مسئله، به بررسی اعتبارسنجی کار عددی حاضر با یک کار تجربی پرداخته می‌شود. در ادامه، نتایج بدست آمده در این تحقیق به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۱- هندسه اصلی مورد مطالعه



شکل ۲- موانع مدور مورد مطالعه و موقعیت های قرار گیری این موانع.

### ۲-۱-۱ معادلات حاکم

جریان سیال در کار پیش رو از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس و اختلاط اجزا اشاره شده به شرح زیر بهره گرفته می شود.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0.0 \quad (1)$$

$$\rho[(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v}] = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot J_i + u \cdot \nabla C_i = R_i \quad (3)$$

$$J_i = -D \nabla C_i \quad (4)$$

کیفیت اختلاط نیز به صورت معادله (۳) بیان می گردد:

$$MQ = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{mean}^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (3)$$

که:

$$\sigma_{mean}^2 = \int (C_i - C_{mean})^2 dy \quad (4)$$

که  $C_i$  غلظت مورد مطالعه می باشد.

### ۲-۲-۱ مسأله تخصیص

#### ۲-۲-۱ نظریه مجموعه های فازی

اولین بار مفهوم مجموعه های فازی توسط لطفی زاده (۱۹۶۵) معرفی [۱۶] شد. امروزه بهره گیری از مبحث فازی در بسیاری از کاربردها مطرح می باشد [۱۷]. یک مجموعه فازی بطور کلی بصورت یک تابع عضویت تعریف می شود که عناصر را به درجه عضویت در یک بازه معین که معمولا بصورت بازه  $[0,1]$  است نشان می دهد. در ادامه تعاریف پایه ای برای مجموعه اعداد فازی مورد استفاده در این مطالعه ارائه شده است.

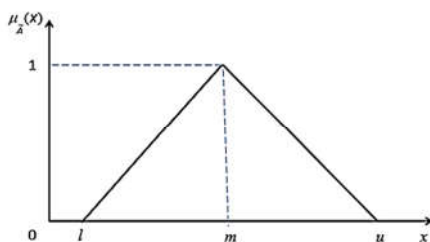
تعریف ۱: یک مجموعه فازی  $\tilde{A}$  که در مرجع  $X$  تعریف شده است بصورت معادله (۵) می باشد.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad (5)$$

در رابطه (۱)،  $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1]$  تابع عضویت از مجموعه فازی  $\tilde{A}$  است. مقدار عضویت  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  درجه وابستگی  $x \in X$  را در  $\tilde{A}$  نشان می دهد.

تعریف ۲: عدد فازی مثلثی  $\tilde{A}$  بصورت سه تایی  $(l, m, u)$  تعریف می شود که  $l$ ،  $m$  و  $u$  به ترتیب حد پایین، مقدار میانی، حد بالا و تابع عضویت مطابق رابطه (۶) و نمودار آن به صورت شکل (۳) می باشد.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m} & m \leq x \leq u \end{cases} \quad (6)$$



شکل ۳- عدد فازی مثلثی.

تعریف ۳: مقایسه اعداد فازی مثلثی مقیاس میانگین ادغامی برای عدد فازی  $\tilde{A} = (l, m, u)$  به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Subject to : } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

### ۳- تحلیل نتایج

در کار حاضر از روش عددی المان محدود بهره گرفته می شود. گام نخست بررسی مدل پایه بدون در نظر گرفتن اختلاط می باشد تا بتوان میزان افزایش کیفیت اختلاط را مقایسه نمود. البته لازم به ذکر است که ابتدا بایستی استقلال حل از شبکه ارائه شود و همچنین نتایج این نمونه با نتایج کار تجربی اعتبارسنجی گردد. در این کار از مقاله حقیقی نیا و موحدی راد [۱۸] برای اعتبارسنجی مطالعه عددی بهره گرفته می شود. جدول ۲ نتایج استقلال از شبکه و جدول ۳ نتایج مربوط به میانگین کیفیت اختلاط در خروجی میکرو مخلوط کن را مقایسه می کند.

جدول ۲- جدول استقلال از شبکه

ردیف	تعداد مش	کیفیت اختلاط در خروجی (%)
۱	۵۰۰۰	۹/۰۰۲
۲	۱۰۰۰۰	۱۰/۶۸۵
۳	۱۵۰۰۰	۱۱/۶۰۹
۴	۲۰۰۰۰	۱۱/۸۰۵

جدول ۳- نتایج اعتبارسنجی کار عددی

میانگین کیفیت اختلاط در خروجی (%)	مطالعه عددی حاضر	کار تجربی [۱۸]
۱۱/۶۰۹		
۱۲/۲۰۰		

همانگونه که نتایج نشان می دهد تعداد مش ۱۵۰۰۰ برای مدلسازی استفاده می گردد و نیز جدول ۳ نشان می دهد که میزان اختلاف کار تجربی و عددی حدود ۵ درصد می باشد که میزان قابل قبولی است.

شکل ۴ نمودار کیفیت را برای مدل پایه نمایش می دهد. مقدار میانگین کیفیت اختلاط در خروجی مدل ۱۱/۶۰۹ می باشد. برای ادامه کار و اعمال روش تخصیص بهینه نیاز به تشکیل ماتریس ارائه شده در جدول ۱ می باشد. برای انجام این کار بایستی موانع مدور به تنهایی طی پنج مرحله مجزا در پنج نقطه تعیین شده قرار داده شوند و نتایج کیفیت اختلاط در هر مدل سازی تعیین گردد. برای انجام این روند نیاز به ۲۵ مرحله شبیه سازی عددی دارد که نتایج تمام حالات در قالب نمودارهای ۵ تا ۹ ارائه می گردد. بر اساس این نمودارها، کیفیت اختلاط در ۲۵ حالت متصور به دست می آید. که نتایج حاصل علاوه بر این که تاثیر موانع را بر روی کیفیت اختلاط نشان می دهد، داده های مورد لزوم برای ماتریس تخصیص را مهیا می نماید.

$$R(\bar{A}) = \frac{l + 4m + u}{6} \quad (7)$$

### ۲-۲-۲- تخصیص بهینه فازی (Fuzzy Optimal Allocation):

مسأله تخصیص به مسائلی که  $m$  شغل متناظر با  $n$  فرد برای حداقل کردن هزینه یا حداکثر نمودن سود حاصل از آن می باشد، اتلاق می گردد. عوامل گوناگونی بر این تخصیص ها مؤثر است که باعث تصمیم گیری های متفاوتی در امر تخصیص می شود. عواملی که حداقل یا حداکثر بود نشان در تخصیص صورت گرفته تأثیر مستقیم دارند.

جدول ۱- ماتریس تخصیص برای  $m$  شغل متناظر با  $n$  فرد

به / از	$B_1$	$B_2$	...	$B_n$
$A_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	...	$c_{1n}$
$A_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	...	$c_{2n}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮
$A_m$	$c_{m1}$	$c_{m2}$	...	$c_{mn}$

مدل ریاضی تخصیص بهینه برای جانمایی  $m$  شغل به  $m$  فرد بصورت زیر می باشد.

$$\text{Maximize or Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (8)$$

$$\text{Subject to : } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

$A_i$  شغل  $i$  ام و  $B_j$  فرد  $j$  ام  $c_{ij}$  هزینه (کمینه سازی) یا سود (بیشینه سازی) تخصیص شغل  $i$  ام به فرد  $j$  ام مقدار تخصیص شغل  $i$  ام به فرد  $j$  ام ، اگر شغل  $i$  ام به فرد  $j$  ام اختصاص یابد  $x_{ij} = 1$  در غیر اینصورت  $x_{ij} = 0$  مدل ریاضی تخصیص بهینه فازی برای جانمایی  $m$  شغل به  $n$  فرد با توجه به مدل (۸) بصورت زیر می باشد.

$$\text{Maximize or Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{c}_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

$$\text{Subject to : } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

$$\bar{c}_{ij} = (c_{ij}^l, c_{ij}^m, c_{ij}^u)$$

مدل (۹) بصورت زیر باز نویسی می گردد:

$$\text{Maximize or Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R(c_{ij}^l, c_{ij}^m, c_{ij}^u) x_{ij} \quad (10)$$

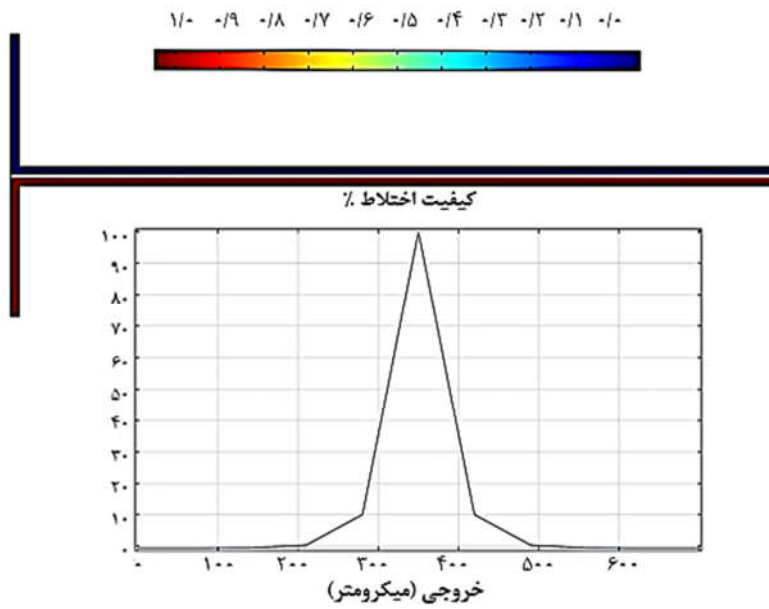
$$\text{Subject to : } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, n$$

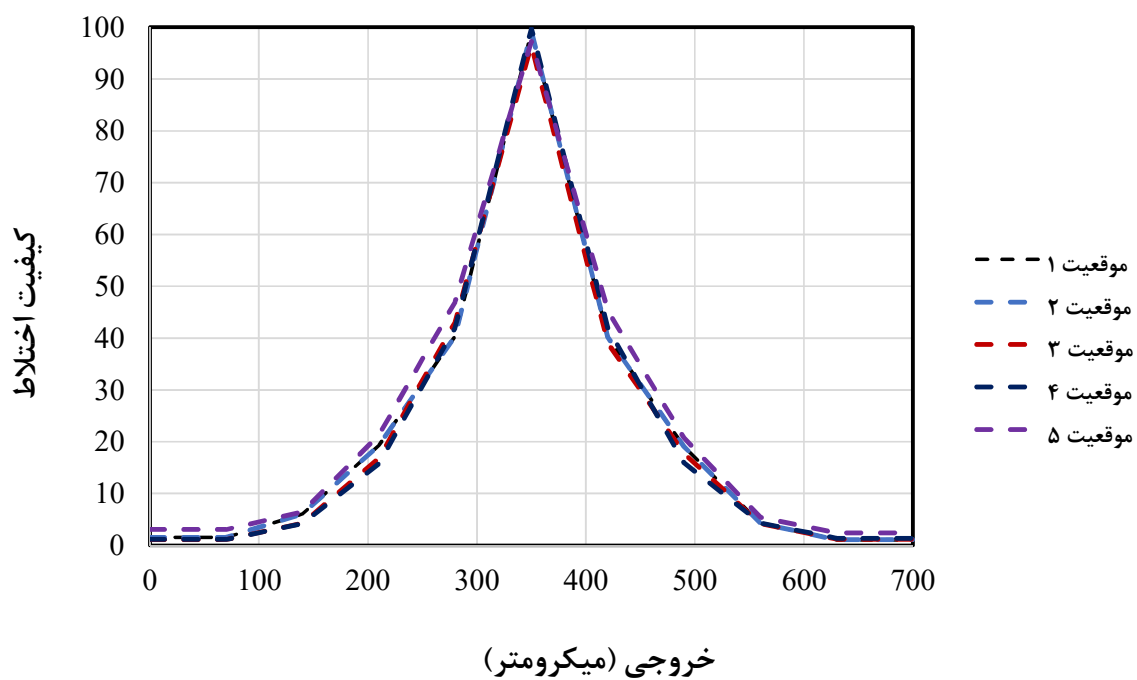
$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

مدل (۱۰) با استفاده از تعریف ۳ بصورت زیر تبدیل می گردد:

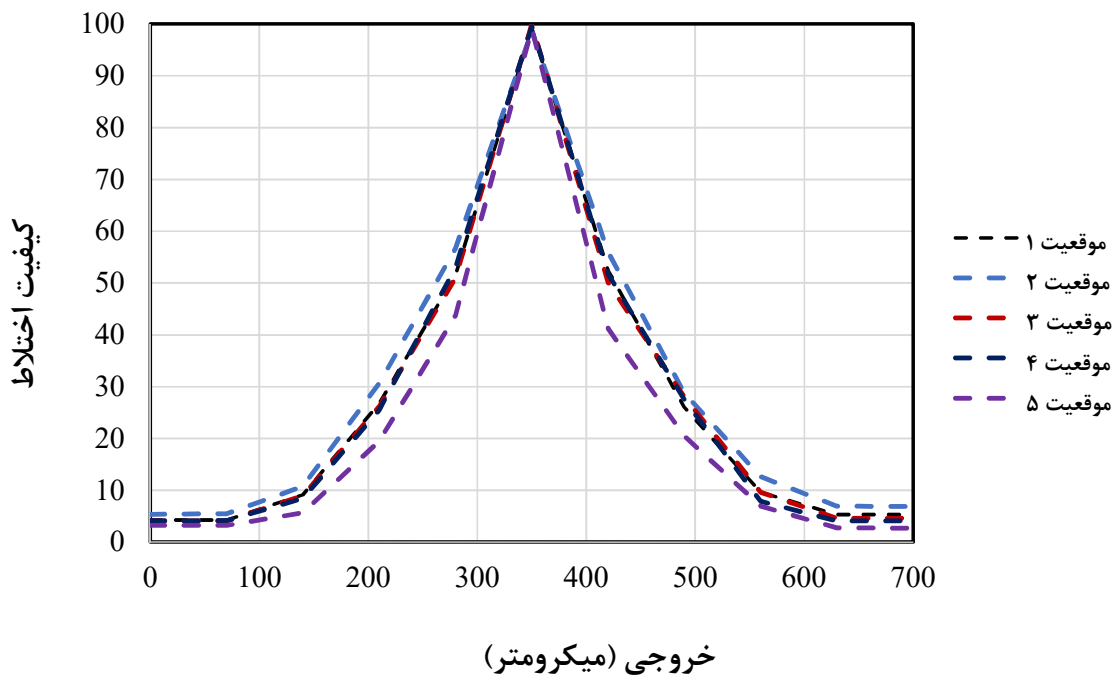
$$\text{Maximize or Minimize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \frac{c_{ij}^l + 4c_{ij}^m + c_{ij}^u}{6} \right) x_{ij} \quad (11)$$



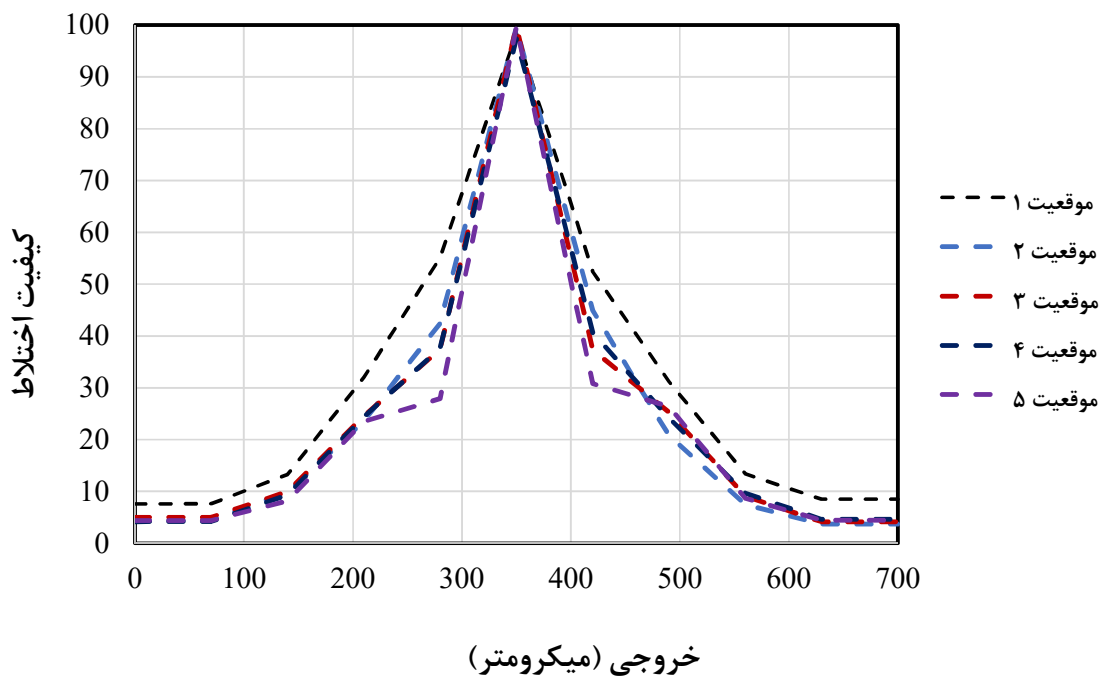
شکل ۴- کیفیت اختلاط در خروجی مدل پایه



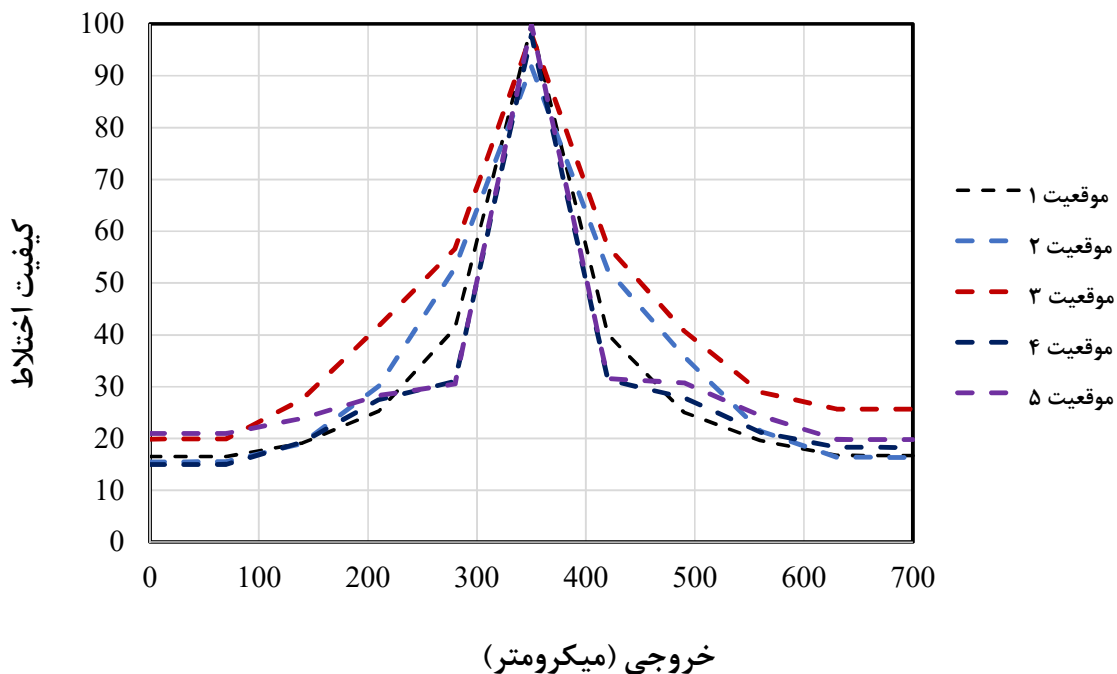
شکل ۵- نمودار کیفیت اختلاط برای مانع مدور با شعاع ۱۰۰ میکرومتر



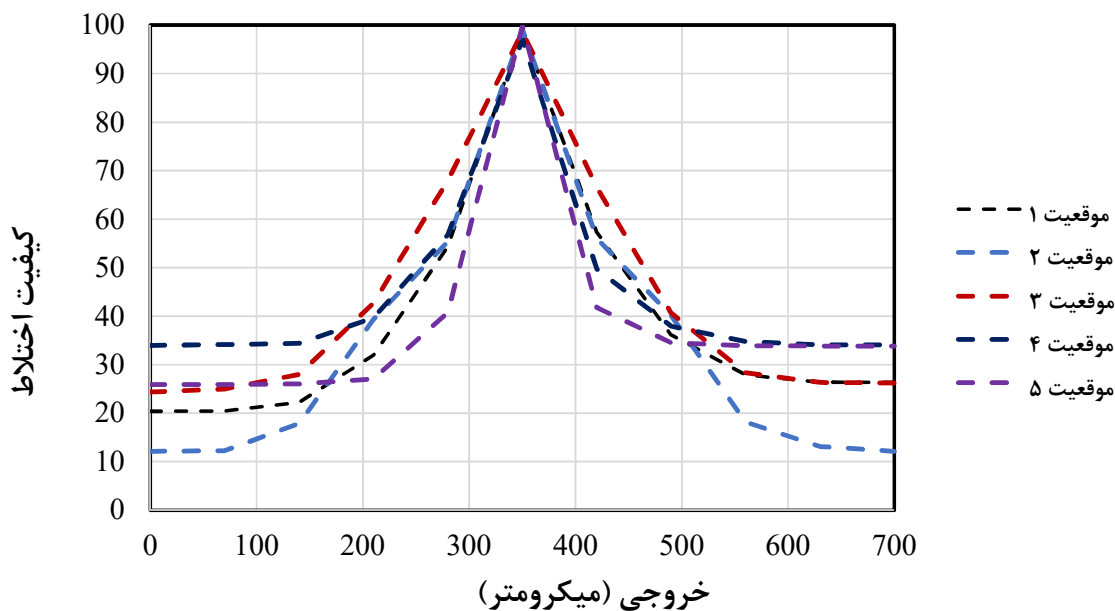
شکل ۶- نمودار کیفیت اختلاط برای مانع مدور با شعاع ۱۵۰ میکرومتر



شکل ۷- نمودار کیفیت اختلاط برای مانع مدور با شعاع ۲۰۰ میکرومتر



شکل ۸- نمودار کیفیت اختلاط برای مانع مدور با شعاع ۲۵۰ میکرومتر



شکل ۹- نمودار کیفیت اختلاط برای مانع مدور با شعاع ۳۰۰ میکرومتر

قرار می‌گیرد. علاوه بر این باید اشاره داشت به اینکه با توجه به خطای موجود در کار عددی برای نتایج شکل های ۴ تا ۹ بازه عدم قطعیتی تعریف می‌شود که باعث می‌گردد تمام اعداد در محیط فازی قرار گیرد. جدول ۴ ماتریس تخصیص فازی را برای پنج مانع متناظر با پنج محل مورد مطالعه نشان می‌دهد.

برای انتخاب مانع مناسب برای هر مکان جهت دستیابی به بیشینه کیفیت اختلاط در صورتی که کار با مدل‌سازی عددی بدون روش پیشنهادی و صرفاً متکی بر مدل‌سازی با بهره‌گیری از نرم افزار پیش برده شود تعداد حالات بررسی ۵<sup>۵</sup> یا بعبارتی ۳۱۲۵ می‌باشد که عملاً کاری دشوار و بسیار زمان بر خواهد بود. بنابراین برای سهولت کار روش تخصیص بهینه مورد استفاده

جدول ۴- ماتریس تخصیص فازی برای پنج مانع مدور متناظر با پنج محل مورد مطالعه

به از	مکان ۱			مکان ۲			مکان ۳			مکان ۴			مکان ۵		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
دایره ۱	۲۰/۰۰۱	۲۳/۳۱۳	۲۵/۳۲۱	۱۷/۹۰۱	۱۹/۹۰۶	۲۰/۹۰۱	۲۱/۳۳۳	۲۲/۸۵۵	۲۴/۰۰۱	۲۸/۲۵۸	۳۰/۰۰۱	۳۲/۰۰۱	۳۳/۰۰۱	۳۵/۴۴۴	۳۷/۰۰۱
دایره ۲	۲۶/۱۱۱	۲۸/۹۸۶	۳۰/۰۲۵	۲۶/۳۳۳	۳۱/۳۹۱	۳۳/۲۵۵	۲۵/۶۵۸	۲۸/۶۸۳	۲۹/۲۲۵	۲۳/۲۵۸	۲۸/۶۳۵	۳۰/۳۶۹	۳۲/۰۰۴	۲۴/۶۴۰	۲۵/۶۶۷
دایره ۳	۲۸/۴۴۴	۳۲/۱۵۶	۳۳/۲۵۸	۲۵/۱۱۱	۲۶/۱۱۸	۲۶/۹۸۷	۲۵/۲۱۱	۲۵/۷۴۶	۲۵/۹۷۸	۲۵/۰۰۳	۲۵/۹۰۴	۲۶/۵۴۷	۲۲/۸۸۸	۲۳/۸۶۹	۲۴/۷۷۷
دایره ۴	۲۷/۱۱۲	۳۲/۰۲۶	۳۳/۸۵۲	۳۲/۶۹۹	۳۵/۸۸۰	۳۷/۵۵۸	۴۰/۰۰۲	۴۲/۱۱۳	۴۳/۹۹۹	۲۹/۲۰۱	۳۰/۸۱۹	۳۱/۵۷۶	۳۰/۰۰۷	۳۳/۰۵۷	۳۵/۶۶۹
دایره ۵	۳۹/۱۱۱	۴۰/۰۰۴	۴۱/۳۳۳	۴۵/۲۲۱	۴۷/۰۶۰	۵۰/۱۱۵	۴۴/۳۱۴	۴۶/۷۲۳	۴۹/۳۶۱	۴۴/۱۰۲	۴۵/۵۳۶	۴۶/۵۰۳	۳۸/۶۴۵	۳۹/۳۵۳	۴۰/۵۶۲

$$X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} + X_{53} = 1$$

$$X_{14} + X_{24} + X_{34} + X_{44} + X_{54} = 1$$

$$X_{15} + X_{25} + X_{35} + X_{45} + X_{55} = 1$$

با ساده سازی مدل ارائه شده، مدل سازی ریاضی به صورت زیر

بازنویسی می گردد:

$$\begin{aligned} \text{Max } & (23.096x_{11} + 19.738x_{12} + 22.792x_{13} + 30.126x_{14} \\ & + 25.296x_{15} + \\ & 28.680x_{21} + 30.859x_{22} + 28.269x_{23} + 328.028x_{24} + \\ & 24.539x_{25} + \\ & 31.721x_{31} + 26.095x_{32} + 25.696x_{33} + 25.861x_{34} + \\ & 323.857x_{35} + \\ & 31.511x_{41} + 35.630x_{42} + 42.076x_{43} + 30.676x_{44} + \\ & 32.984x_{45} + \\ & 40.077x_{51} + 47.263x_{52} + 46.761x_{53} + 45.458x_{54} + \\ & 39.437x_{55}) \end{aligned}$$

subject to:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = 1$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 1$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} = 1$$

$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} = 1$$

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} = 1$$

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} = 1$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 1$$

$$x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} + x_{53} = 1$$

$$x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} + x_{54} = 1$$

$$x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} + x_{55} = 1$$

جواب بهینه بصورت زیر می باشد:

$$x_{15} = x_{22} = x_{31} = x_{43} = x_{54} = 1, \quad x_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, 5, \quad j = 1, 2, \dots, 5$$

که در شکل ۱۰ نشان داده می شود. تفسیر این نمودار به صورت ترکیب جدید در شکل ۱۱ نشان داده می شود. شکل ۱۰ پنج شعاع را نشان می دهد که تخصیص در آن نقاط اتفاق افتاده است. شکل ۱۲ کانتور کیفیت اختلاط و نمودار کیفیت اختلاط را در ترکیب پیشنهادی نشان می دهد.

بر مبنای داده های جدول ۲ و مدل ریاضی تخصیص فازی (۷) مدلسازی مسئله به شکل زیر ارائه می گردد:

$$\begin{aligned} \text{Max } & [(20.001, 23.312, 25.321)x_{11} \\ & + (17.901, 19.906, 20.901)x_{12} \\ & + (21.333, 22.855, 24.001)x_{13} + \\ & (28.258, 30.124, 32.001)x_{14} \\ & + (23.001, 25.444, 27.001)x_{15} \\ & + (26.111, 28.986, 230.025)x_{21} + \\ & (26.333, 31.391, 33.255)x_{22} \\ & + (25.658, 28.683, 29.225)x_{23} \\ & + (23.258, 28.635, 30.369)x_{24} + \\ & (23.004, 24.460, 25.667)x_{25} \\ & + (28.444, 32.156, 33.258)x_{31} \\ & + (25.111, 26.133, 26.987)x_{32} + \\ & (25.211, 25.746, 25.978)x_{33} \\ & + (25.003, 25.904, 26.547)x_{34} \\ & + (22.888, 23.869, 24.777)x_{35} + \\ & (27.112, 32.026, 33.852)x_{41} \\ & + (32.699, 35.880, 37.558)x_{42} \\ & + (40.002, 42.113, 43.999)x_{43} + \\ & (29.201, 30.819, 31.576)x_{44} \\ & + (30.007, 33.057, 35.669)x_{45} \\ & + (39.111, 40.004, 41.333)x_{51} + \\ & (45.221, 47.060, 50.115)x_{52} \\ & + (44.314, 46.723, 49.361)x_{53} \\ & + (44.102, 45.536, 46.503)x_{54} \\ & + (38.645, 39.353, 40.562)x_{55} \end{aligned}$$

Subject to:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = 1$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 1$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} = 1$$

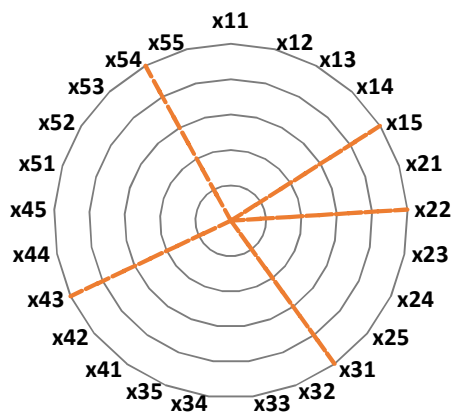
$$x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} = 1$$

$$x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} = 1$$

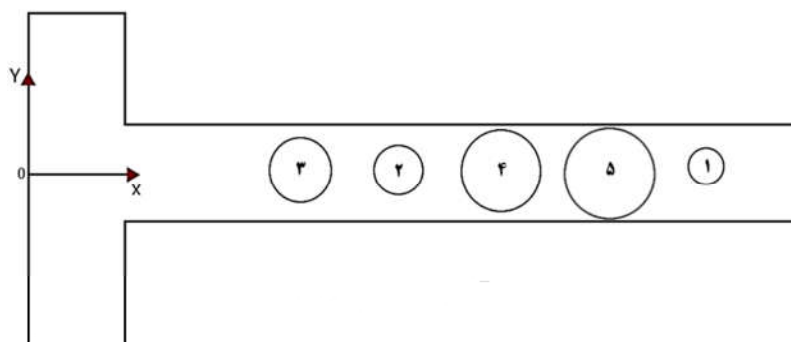
$$x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} = 1$$

$$x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 1$$

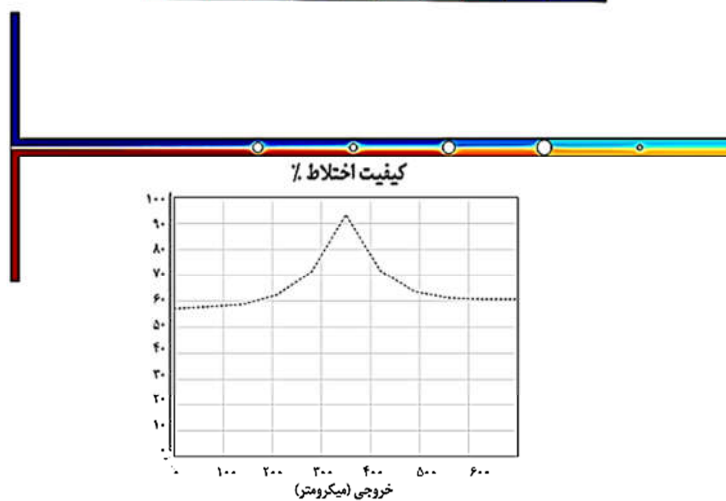
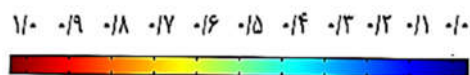




شکل ۱۰- نتیجه حاصل از تخصیص بهینه فازی



شکل ۱۱- ترتیب قرارگیری موانع مدور بر اساس مدل تخصیص بهینه فازی



شکل ۱۲- افزایش کیفیت اختلاط در ترتیب بهینه ارائه شده

قرار گیرند این مقدار ۴۲۰ درصد و در حالت نزولی ۴۱۵ درصد می‌باشد.

از شکل ۱۲ چنین استنباط می‌گردد که این ترکیب جدید تقریباً ۴۶۷ درصد افزایش کیفیت اختلاط را نسبت به حالت پایه دارد. در حالیکه اگر برای نمونه موانع به شکل صعودی در محل های مورد نظر

## ۵- نتیجه گیری

مقاله حاضر به بررسی عددی افزایش کیفیت اختلاط در یک ریز مخلوط کن ها غیر فعال T شکل پرداخته است. برای افزایش میزان اختلاط در پنج نقطه از ریز مخلوط کن ها پنج المان استاتیکی مدور با قطرهای مختلف در نظر گرفته شده است. هدف کار حاضر انتخاب ترکیب مناسب از المان‌های استاتیکی برای رسیدن به بیشترین میزان کیفیت اختلاط است. با توجه به تعداد بالای شبیه سازی عددی جهت به نتیجه رساندن این امر، ۳۱۲۵ بررسی، از روش تخصیص بهینه برای مکان‌یابی المان‌ها بهره گرفته شده است. نتیجه به دست آمده به ترتیب المان با قطرهای ۰/۲۰، ۰/۱۵، ۰/۲۵، ۰/۳۰ و ۰/۱۰ میلی‌متر را در چینش چپ به راست (بالادست به پایین‌دست) در پنج موقعیت تعیین شده قرار داد. با این ترکیب کیفیت اختلاط نسبت به حالت پایه ۴۶۷ درصد افزایش می‌یابد.

## ۶- مراجع

- [۱] محمدباقری، سعید و وجدی، محمد، بررسی اختلاط الکترواسموتیک در میکرو مخلوط کن با موانع نیم دایروی، بیست و هفتمین کنفرانس سالانه بین المللی انجمن مهندسان مکانیک ایران، تهران، ۱۳۹۸.
- [۲] ملکی باقرآبادی، کامیار، ثانی، مهدی، سعیدی، محمدسعید، مدل‌سازی عددی چند نوع ریز مخلوط کن‌های الکتروسینتیکی فعال و غیرفعال با استفاده از معادلات پواسون- ترنسست- پلنک- ناویر- استوکس، مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۹ شماره ۸، ص: ۲۰۵۷-۲۰۶۶، ۱۳۹۸.
- [3] Tai, Ch., Yang, R., Huang, M., Liu, C., Tsai, C., Fu, L., Micromixer utilizing electrokinetic instability-induced shedding effect, *Electrophoresis* 27, 4982-4990, 2006.
- [4] Hesse, V., Löwe, H., Schönfeld, F., Micromixers—a review on passive and active mixing principles, *Chemical Engineering Science* 60, 2479 – 2501, 2005.
- [5] Lee, C., Lee, G., Fu, L., Lee, F., Yang, R., Electrokinetically driven active micro-mixers utilizing zeta potential variation induced by field effect, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Volume 14, Issue 10, pp. 1390-1398, 2004.
- [6] Maleki Bagherabadi, K., Sani, M., Saidi, M., Enhancing active electro-kinetic micro-mixer efficiency by introducing vertical electrodes and modifying chamber aspect ratio, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 142, 107560, 2019.
- [7] Fang, Y., Ye, Y., Shen, R., Zhu, P., Guo, R., Hu, Y., Wu, L., Mixing enhancement by simple periodic geometric features in microchannels, *Chemical Engineering Journal* 187, 306– 310, 2012.
- [8] Rasouli, M., Abouei Mehrizi, A., Lashkaripour, A., Numerical Study on Low Reynolds Mixing of T-Shaped Micro-Mixers with Obstacles, *Trans. Phenom. Nano Micro Scales*, 3(2): 68-76, 2015.
- [9] Shah, I., Kim, S., Kim, K., Doh, Y., Choi, K., Experimental and numerical analysis of Y-shaped split and recombination micro-mixer with different mixing units, *Chemical Engineering Journal*, Volume 358, Pages 691-706, 2019.
- [10] Zhao, S., et al., Passive Micromixer Platform for Size- and Shape-Controllable Preparation of Ultrafine HNS. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(36): p. 16709-16718, 2019.
- [11] Bayareh, M., Nazemi Ashani, M., Usefian, A., Active and passive micromixers: A comprehensive review, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 147, 2020.
- [12] Shi, X., Huang, Sh., Wang L., Li, F., Numerical analysis of passive micromixer with novel obstacle design, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42:3, 440-456, 2021.
- [13] Raza, W.; Hossain, S.; Kim, K.-Y. A Review of Passive Micromixers with a Comparative Analysis. *Micromachines*, 11, 455, 2020.
- [14] Udaya Kumar, A., Sai Ganesh, D., Vamsi Krishna, T., Sashank, B., Satyanarayana, T., Modeling and investigation on mixing characteristics of T & Y-shaped micromixers for microfluidic devices, *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [15] Tripathi, E., Patowari, P., Pati, S., Numerical investigation of mixing performance in spiral micromixers based on Dean flows and chaotic advection, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, Volume 169, 2021.
- [16] Lotfi A. Zadeh, Fuzzy Sets, 1965, Information and Control, 8: p. 338-353.
- [17] Rezazadeh, S., Mehrabi, M., Pashae, T. et al. Using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance modeling. *J Mech Sci Technol* 26, 3701–3709, 2012.
- [18] Haghghinia, A., Movahedirad, S., Mass transfer in a novel passive micro-mixer: flow tortuosity effects, *Analytica Chimica Acta*, 2019.