



Numerical Study of Mixing Two-Components Non-Newtonian Fluids in Double T-Shaped Micromixers and Multiple T-Shaped with Aligned and Non-Aligned Inputs

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nematollahi E.¹ MSc,
Sefid M.^{*1} PhD

How to cite this article

Nematollahi E, Sefid M. Numerical Study of Mixing Two-Components Non-Newtonian Fluids in Double T-Shaped Micromixers and Multiple T-Shaped with Aligned and Non-Aligned Inputs. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(4):833-844.

ABSTRACT

Passive micro-mixers have simpler manufacturing in comparison with active micro-mixers and only require energy for flow pumping. In the present study, non-Newtonian fluids and non-Newtonian power-law fluid's mixing behavior in passive micro-mixers have been studied. Simulation has been performed, using computational fluid dynamics commercial code of Ansys fluent and two different approaches of two-component mixing have investigated. The first approach studies fluid's mixing behavior by changing flow behavior index and flow consistency index in 5 different 3D geometries as multiple T-micromixer with aligned and non-aligned inputs in one and two plane, respectively, multiple T-micromixer, double T-micromixer, and T-micromixer, while the second approach studies mixing behavior by changing flow behavior index while flow consistency index is constant in two multiple 3D geometries with non-aligned inputs. In all studies, water was used as Newtonian fluid and carboxymethyl cellulose solution was used as non-Newtonian fluid. The studied range of Reynolds number was 1 to 100. In both approaches, the results for mixing index and pressure drop for power-law index according to criterion are reverse of each other; it means that in the first approach, with increasing power-law index, the mixing index increased and the pressure drop decreased and in second approach, this procedure is reversed. But, procedure of non-dimensional fully developed velocities in two approaches investigated is similar in comparison to geometries with non-aligned inputs.

Keywords Numerical Study; Non-Newtonian; Double and Multiple T-micromixers; Non-aligned Power-law

¹Energy Conversion Department,
Mechanical Engineering Faculty,
Yazd University, Yazd, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering
Faculty, Yazd University, Safayieh
,Yazd, Iran
Phone:-
Fax: +98 (35) 31232490
mhsefid@yazd.ac.ir

Article History

Received: August 12, 2018
Accepted: November 17, 2018
ePublished: April 06, 2019

CITATION LINKS

[1] Numerical simulation of mixing and reaction of Jatropha curcas oil and ethanol for synthesis of biodiesel in micromixers [2] Numerical investigation of two-phase flow through a T-junction microchannel reactor [3] Passive mixers in microfluidic systems: A review [4] Applications of micromixing technology [5] Viscous fluid flow [6] Longitudinal vortices mixing in three-stream micromixers with two inlets [7] Micromixing within microfluidic devices [8] The effect of chaotic advection on mixing degree and pressure drop of non-Newtonian fluids flow in curved micromixers [9] Mixing performance of a planar micromixer with circular chambers and crossing constriction channels. Sensors and Actuators B Chemical [10] Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer [11] Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer [12] Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers [13] Numerical simulation of flow and mixing behavior of impinging streams of shear-thinning fluids [14] Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs [15] Numerical simulation of mixing process in T-shaped and DT-shaped micromixers [16] 18.0 ANSYS Fluent Theory Guide 18.0 [17] Generalized Reynolds number for non-newtonian fluids [18] Mixing of binary fluids with composition-dependent viscosity in a T-shaped micro-device

بررسی عددی اختلاط دو مولفه‌ای سیالات غیرنیوتونی در میکرومیکسرهای T شکل دوگانه و چنگانه با ورودی‌های هم‌راستا و ناهم‌راستا

عرفان نعمت‌الهی MSc

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد سفید* PhD

گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

میکرومیکسرهای منفعل در مقایسه با میکرومیکسرهای فعال تکنولوژی ساخت ساده‌تری داشته و تنها انرژی مورد نیاز آنها انرژی پمپاژ جریان است. در این مطالعه رفتار اختلاط سیالات غیرنیوتونی با استفاده از مدل غیرنیوتونی پاورلا در میکرومیکسرهای منفعل مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی در این پژوهش با استفاده از کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی انسیس فلوئنت انجام شده و دو رویکرد اختلاط دومولفه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. رویکرد اول شامل بررسی رفتار اختلاط سیالات با تغییر شاخص توانی و شاخص پایداری در پنج هندسه سه‌بُعدی شامل دو T میکرومیکسر چنگانه با ورودی‌های هم‌راستا و ناهم‌راستا در یک صفحه و دو صفحه، T میکرومیکسر چنگانه، T میکرومیکسر دوگانه و T میکرومیکسر در سه‌بُعد انجام شده است و رویکرد دوم بررسی رفتار اختلاط با تغییر شاخص توانی و ثابت نگه‌داشتن شاخص پایداری در دو هندسه چنگانه با ورودی‌های ناهم‌راستا در سه‌بُعد بوده است. در هر دو بخش این مطالعه از آب به‌عنوان سیال نیوتونی و از محلول کربوکسی‌متیل‌سلولز به‌عنوان سیال غیرنیوتونی استفاده شده و محدوده اعداد رینولدز مورد بررسی در پژوهش حاضر ۱ تا ۱۰۰ بوده است. در هر دو رویکرد بررسی‌شده نتایج شاخص اختلاط و اُفت فشار نسبت به اعداد رینولدز براساس معیار شاخص توانی معکوس یکدیگر هستند، به این مفهوم که در رویکرد اول با افزایش شاخص توانی شاخص اختلاط افزایش یافته و اُفت فشار کاهش یافته و در رویکرد دوم این روند معکوس است. اما روند سرعت‌های کاملاً توسعه‌یافته بی‌بُعد در دو رویکرد بررسی‌شده در مقایسه هندسه‌های با ورودی‌های ناهم‌راستا مشابه است.

کلیدواژه‌ها: بررسی عددی، غیرنیوتونی، T میکرومیکسرهای دوگانه و چنگانه، ناهم‌راستا، پاورلا

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

*نویسنده مسئول: mhsefid@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

طی سالیان اخیر، تلاش‌های زیادی در راستای کوچک‌سازی قطعات تشکیل‌دهنده دستگاه‌ها با نام مینیاتورسازی صورت گرفته است [1]. در واقع پسوند میکرو در دستگاه‌های میکروسیال و نیز در میکرومیکسرهای به مشخصه ابعادی آنها در مقیاس میکرون (میکرومتر) اشاره دارد [2]. سیستم‌های میکروسیالی تأثیرات قابل توجهی را تا به حال در زمینه‌های زیست‌پزشکی و توسعه دارویی داشته‌اند و به‌طور گسترده در صنایع غذایی و شیمیایی استفاده می‌شوند [3]. در پزشکی بالینی و مطالعات بیولوژیک، اختلاط دستگاه‌های میکروسیالی به‌منظور بررسی دلایل بیماری‌ها، تشخیص و متمایز کردن تولیدات بیوشیمیایی از قبیل تست آنزیم‌ها، تشدیدی پروتئین‌ها (به‌منظور طراحی داروهای جدید)، ترکیبات فرآیندهای بلورسازی و تبلور و ساخت ترکیبات ارگانیک کاربردهای وسیعی دارند [4]. این قبیل دستگاه‌ها این امکان را فراهم می‌کنند که با مقدار کمی از نمونه آزمایشی (مواد اولیه) و در مدت‌زمان کوتاهی بتوان به کنترل خوبی در غلظت شیمیایی و نیز به نسبت سطح به حجم بالایی دست پیدا کرد [5]. میکرومیکسرهای

به دو دسته منفعل و فعال تقسیم می‌شوند. اگر چه میکرومیکسرهای فعال، عملکرد اختلاط بهتری در مقایسه با میکرومیکسرهای منفعل دارند، اما ساخت میکرومیکسرهای منفعل ساده‌تر بوده و ادغام آنها با دستگاه‌های میکروسیالی آسان‌تر است، بنابراین میکرومیکسرهای منفعل به‌طور گسترده‌ای توسعه یافته‌اند [6]. میکرومیکسرهای منفعل روی پدیده انتقال جرم فراهم‌شده توسط انتشار یا پخش مولکولی و جابه‌جایی نامنظم تکیه می‌کنند [7].

سانتانو و همکاران [1] در یک مطالعه عددی، اختلاط و ترکیب روغن جاتروفا کارکس و اتانول برای تولید سوخت پاک در میکرومیکسرهای با هندسه T شکل و میکرومیکسر صلیبی شکل و همچنین میکرومیکسر T شکل دوگانه را بررسی کردند که برای هر حالت، اثر تغییرات نسبت جرمی و میزان تبدیل روغن و تحلیل اختلاط سیال تحت رینولدزهای مختلف در مدت‌زمان‌های متفاوت قرارگیری دو سیال در میکرومیکسر مطالعه شده است. بازدهی هر نوع از میکرومیکسرهای بررسی‌شده با استفاده از شاخص اختلاط که به‌وسیله تغییر کسر مولی محاسبه می‌شود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همه نتایج نشان‌دهنده آن است که میکرومیکسر صلیبی شکل، مرتبه اختلاط بهتری را نشان می‌دهد. آنها مشاهده کردند که با افزایش عدد رینولدز، اختلاط در میکرومیکسر T شکل افزایش و در میکرومیکسر T شکل دوگانه کاهش می‌یابد و نیز افزایش این عدد در عملکرد اختلاط میکرومیکسر صلیبی شکل تأثیری ندارد. محدوده اعداد رینولدز در پژوهش آنها بین ۱۰ تا ۱۰۰ بوده است.

بهری/اسلامی و همکاران [8] تأثیر جریان‌های ثانویه روی میکرومیکسرهای منحنی شکل را برای اختلاط سیالات غیرنیوتونی بررسی کردند. بررسی‌ها با فرض جریان سه‌بُعدی پایا و تراکم‌ناپذیر انجام‌شده در محدوده رینولدزهای ۰/۱ تا ۳۰۰ بوده است. همچنین سیالات پاورلا با شاخص‌های توانی در محدوده ۰/۴۹ تا یک مطالعه شده‌اند. آنها از آب به‌عنوان سیال نیوتونی و محلول آبی کربوکسی‌متیل‌سلولز با غلظت‌های متفاوت به‌عنوان سیال غیرنیوتونی استفاده کردند. شبیه‌سازی فرآیند اختلاط با نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی این‌فوم انجام شده و نتایج بیانگر کاهش شاخص اختلاط و افزایش اُفت فشار بی‌بعد ناشی از کاهش شاخص پاورلا است. همچنین جابه‌جایی بی‌نظمی و شاخص اختلاط با افزایش اعداد رینولدز برای تمام مقادیر شاخص پاورلا افزایش داشته است.

عالم و کیم [9] در یک بررسی عددی به‌وسیله کد تجاری انسیس سی‌اف‌ایکس ۱۱، عملکرد اختلاط یک طرح میکرومیکسر سطح با محفظه‌های اختلاط دایروی که توسط دو کانال متراکم‌کننده که محفظه‌های اختلاط مجاور را به هم وصل می‌کند، با سه میکرومیکسر سطح دیگر (با محفظه‌های دایروی، اما با یک کانال متراکم‌کننده) در سه‌بُعد و در محدوده اعداد رینولدز ۰/۱ تا ۱۰۰ مقایسه کردند. در مطالعه آنها از دو سیال آب و اتانول برای بررسی اختلاط استفاده شده است. بهترین عملکرد اختلاط میان چهار میکرومیکسر آزمایش‌شده در محدوده اعداد رینولدز پایین بوده و ضعیف‌ترین عملکرد اختلاط مربوط به اعداد رینولدز بیشتر از ۵۰ بوده است. عالم و کیم [9] با توجه به نتایج، میکرومیکسر بررسی‌شده را برای محدوده اعداد رینولدز کمتر از ۱۰ پیشنهاد کردند.

کورتس-کیروز و همکاران [10] در یک بررسی عددی که روی T میکرومیکسر ناهم‌راستا و T میکرومیکسر انجام شده است، با به‌کارگرفتن ابعاد مساوی از طول‌های کانال و مقاطع عرضی و

جریان‌های گردابی براساس اعداد رینولدز به کار می‌رود. *بیدپناه* و همکاران^[15]، فرآیند اختلاط در میکرومیکسرهاي شکل T و شکل دوگانه را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. بررسی عددی با استفاده از روش حجم محدود برای اختلاط دو سیال تراکم‌ناپذیر در میکرومیکسرهاي سه‌بُعدی شکل T و شکل دوگانه در محدوده اعداد رینولدز ۷۵ تا ۴۰۰ انجام و همچنین اثر هندسه‌های مختلف، عدد رینولدز و طول کانال بر پارامتر شاخص اختلاط مطالعه شده است. نتایج آنها نشان داد که در اعداد رینولدز مختلف، شاخص اختلاط سیالات در کانال شکل دوگانه با زاویه ۹۰° کمتر از متناظر آن در میکرومیکسر شکل T است، زیرا تغییرات رژیم جریان در اعداد رینولدز بالاتر در کانال‌های شکل T دوگانه اتفاق می‌افتد. همچنین آنها نشان دادند که شاخص اختلاط سیالات در طول کانال اختلاط افزایش می‌یابد و با افزایش فاصله از ورودی‌ها به یک مقدار ثابت میل می‌کند.

در پژوهش حاضر، دو نوع رفتار اختلاط بررسی شده است. رویکرد اول شامل بررسی رفتار اختلاط با تغییرات شاخص توانی و به تبع آن شاخص پایداری در تمامی هندسه‌ها به صورت سه‌بُعدی بوده و رویکرد دوم شامل بررسی رفتار اختلاط با تغییرات شاخص توانی و ثابت‌مانند شاخص پایداری براساس سیال پایه آب بوده که در هندسه ۱ و ۲ بررسی شده است و در رویکرد دوم یک شاخص توانی بیشتر از رویکرد اول در نظر گرفته شده که شاخص ۱/۱ بوده است. مدل‌سازی با استفاده از کد تجاری دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS FLUENT 18 بررسی و برای مدل‌سازی لزجت سیالات از مدل قاعده توانی یا پاورلا استفاده شده است. نوآوری پژوهش حاضر شامل بررسی رفتار اختلاط به‌ازای تغییر نوع سیال در هندسه‌های چندگانه با ورودی‌های هم‌راستا و ناهم‌راستا و مقایسه کیفیت اختلاط با هندسه‌های دارای تعداد ورودی‌های کمتر و هم‌راستا و نیز بررسی رفتار اختلاط به‌ازای صرف تغییر شاخص توانی در هندسه‌های چندگانه ۱ و ۲ بوده است.

۲- معادلات و روش حل عددی و شرایط مرزی

در این مدل‌سازی برای گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی از روش بالادست مرتبه دوم و به‌منظور کوپلینگ میدان فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل‌سی استفاده شده است. معادلات انتقال جرم، بقای مومنتوم، بقای جرم در سه‌بُعد و با دقت ۲ برابر حل شده است. همچنین دقت همگرایی باقیمانده‌ها ۱۰^{-۵} در نظر گرفته شده است. در پژوهش حاضر، شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره‌ها اعمال شده است. توزیع سرعت در ورودی‌های میکرومیکسرها به صورت یکنواخت، اعمال و جریان به صورت غیرقابل تراکم و پایا در حالت سه‌بُعدی در نظر گرفته شده است. به ترتیب معادلات بقای جرم، بقای مومنتوم و انتقال جرم در روابط ۱ تا ۳ بیان شده‌اند.

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

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\bar{\tau}) \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right]$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} C_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i, \quad \vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla C_i \quad (3)$$

که در آن ρ چگالی سیال، P فشار، $\bar{\tau}$ تانسور تنش، μ لزجت مولکولی، I تانسور تنش واحد، C_i کسر جرمی گونه و $D_{i,m}$ ضریب پخش مولکولی است.

تانسور تنش برشی برای سیالات غیرنیوتونی رقیق‌شونده براساس

نرخ‌های یکسان جریان برای دو هندسه به بررسی فرآیند اختلاط پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در بررسی جریان در T میکرومیکسر ناهم‌راستا، ساختارهای گردابی جریان به سرعت تشکیل می‌شوند و این ساختارها باعث افزایش قابل توجه خطوط اتصال سیالات و در نتیجه افزایش اختلاط می‌شوند که برای میکرومیکسر بررسی شده، افزایش قابل توجه اختلاط و همچنین افت فشار کمتر و سطح یکسان از تنش برشی را در مقایسه با T میکرومیکسر نشان داد. در مطالعه آنها محدوده اعداد رینولدز به کاررفته برای الگوهای جریان بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ قرار داشته و تمام شبیه‌سازی‌های هندسه با ورودی‌های ناهم‌راستا در حالت پایا بوده است. برای هندسه T میکرومیکسر، پژوهش آنها در دو عدد $Re=500$ و $Re=700$ و شبیه‌سازی‌ها به صورت ناپایا بوده که به منظور رسیدن به همگرایی در مدل‌سازی عددی بوده است. اما در سایر اعداد رینولدز بررسی شده در هندسه T شکل شبیه‌سازی‌ها به صورت پایا انجام شده است.

بوته و همکاران^[11] در یک شبیه‌سازی عددی، مشخصه‌ها و پارامترهای اختلاط در میکرواکتور T شکل با مقاطع مستطیلی را برای سه رژیم جریان مختلف، مطالعه و سهم نرخ اتلاف انرژی در راستای مقطع عرضی را برای ارزیابی راندمان اختلاط در مجراها تعریف کردند. این شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار FLUENT انجام شده و نتایج خود را با داده‌های تجربی مقایسه کرده‌اند که توافق خوبی با نتایج تجربی داشته است.

ایت‌موهب و همکاران^[12] یک پژوهش عددی و همچنین کار تجربی روی دو میکرومیکسر با هندسه T شکل و میکرومیکسر صلیبی شکل انجام داده‌اند. آنها انتقال جرم درون میکرومیکسر با هندسه T شکل و میکرومیکسر با هندسه صلیبی شکل را با روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی و همچنین روش تجربی میکروسکوپی لیزری هم‌کانون، بررسی و پروفیل‌های غلظت را براساس رژیم‌های جریان مختلف برای مقایسه دو هندسه استفاده کردند. آنها نشان دادند که میکرومیکسر صلیبی شکل در نرخ‌های پایین جریان، تمایل بیشتری به تشدید اختلاط در مقایسه با میکرومیکسر T شکل دارد. آنها در مدل‌سازی عددی از FLUENT 6.2 استفاده کردند.

سریس/امران و دواهاستین^[13] یک هندسه دوبُعدی جریان‌های برخوردی را برای اختلاط سیالات نازک برشی به وسیله حل معادله انرژی بررسی کرده‌اند. برای بررسی از روش المان محدود و نرم‌افزار تجاری FEMLAB 3 استفاده کرده‌اند. شبیه‌سازی‌ها در محدوده اعداد رینولدز ۲۰۰-۱۰۰ بوده و همچنین از محلول کربوکسی‌متیل سلولز با غلظت‌های مختلف برای اختلاط سیالات غیرنیوتونی استفاده شده است. به منظور بررسی رفتار اختلاط سیال نیوتونی از سیال آب استفاده شده است و نتایج اختلاط غیرنیوتونی با نیوتونی در هندسه دارای جریان‌های برخوردی مورد بررسی قرار گرفته است.

انصاری و همکاران^[14] در بررسی‌های تجربی خود، یک طرح جدید از میکرومیکسر T شکل با ورودی‌های عمودی کانال که در خط مرکزی کانال بر هم مماس هستند و باعث تولید جریان گردابی در میکروکانال مستطیلی می‌شوند را ارایه کردند. عملکرد اختلاط برای این میکرومیکسر با ورودی‌های ناهم‌راستا با میکرومیکسر T شکل ساده در اعداد رینولدز مختلف مقایسه شده است. ساختارهای گردابه‌ای شکل ابتدا در ورودی کانال مستطیل شکل، تشکیل و باعث افزایش ناحیه فضایی بین جریان‌های سیال به وسیله کشش می‌شود. فرآیند ساخت این میکرومیکسر آسان است و برای تولید

مدل توانی با استفاده از رابطه ۴ و لزجت ظاهری طبق مدل توانی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود و همچنین رابطه ۶، اندازه تانسور نرخ برش را به دست می‌دهد [16].

$$\bar{\tau} = k\dot{\gamma}^{n-1}\bar{\gamma} \quad (۴)$$

$$\eta = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (۵)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2}(\dot{\bar{\gamma}}:\dot{\bar{\gamma}})} \quad (۶)$$

عدد بی‌بعد رینولدز در رابطه ۷ آورده شده است [13, 17].

$$Re = \frac{\rho V^{2-n} d_h^n}{8^{n-1} k} \left(\frac{4n}{3n+1} \right) \quad (۷)$$

دو عدد بی‌بعد براساس مجرای ورودی آب تعریف شده‌اند که V سرعت متوسط جریان و d_h قطر هیدرولیک کانال اختلاط است که از رابطه ۸ محاسبه می‌شود [18].

$$d_h = \frac{2WH}{(W+H)} \quad (۸)$$

که در آن W پهنای کانال اختلاط و H ارتفاع کانال اختلاط است [18].

به‌منظور محاسبه میزان اختلاط حاصل‌شده در کانال اختلاط از تعریف شاخص اختلاط استفاده شد که به‌صورت رابطه ۹ تعریف می‌شود [10].

$$Mi = 1 - \frac{\int_A (C - \bar{C})^2 dA}{A \cdot \bar{C} (1 - \bar{C})} \quad (۹)$$

C توزیع غلظت یا کسر جرمی، $\bar{C}$ مقدار متوسط میدان غلظت یا کسر جرمی متوسط روی هر سطح و A نیز مساحت سطح مقطع است.

روابط بی‌بعدسازی زیر برای بی‌بعدسازی سرعت و بی‌بعدسازی طول مقطع عرضی استفاده شده است.

$$U^* = \frac{u}{V}, \quad Y^* = \frac{y}{W'} \quad (۹)$$

V مولفه سرعت در ورودی‌ها در راستای محور y و W' ارتفاع ورودی‌ها هستند.

۳- خواص سیالات و شرایط مرزی

در مطالعه بررسی رفتار اختلاط سیالات مختلف (تغییر شاخص توانی و شاخص پایداری) در پنج هندسه از سیال آب به‌عنوان سیال نیوتونی و از محلول آبی کربوکسی‌متیل سلولز با درصدهای جرمی مختلف به‌عنوان سیال غیرنیوتونی استفاده شده است. در بررسی رفتار اختلاط سیالات با صرفاً تغییر شاخص‌های توانی بررسی در دو هندسه با ورودی‌های ناهم‌راستا با در نظر گرفتن آب به‌عنوان سیال پایه اختلاط انجام شده است. چگالی تمامی سیالات مورد بررسی 1000 kgm^{-3} بوده و ضریب نفوذ جرمی دو سیال نسبت به یکدیگر $3/6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \times 10^{-10}$ در نظر گرفته شده و خواص این دو سیال در جدول ۱ نشان داده شده است [8]. روی دیواره‌ها شرط مرزی عدم لغزش و عدم نفوذ در دیواره‌ها اعمال شده، همچنین توزیع سرعت در ورودی‌ها به‌صورت یکنواخت بوده است.

جدول ۱) کمیت‌های جریان سیالات [8]

درصد جرمی	شاخص پاورلا	ضریب پایداری (Pas^n)
۰	۱	۰/۰۰۰۹۰۲
۰/۱	۰/۹۲۳	۰/۰۰۶۶
۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۰۹۷

۴- هندسه‌های مساله

همه هندسه‌ها به‌صورت سه‌بعدی رسم شده‌اند که هندسه ۱ مورد بررسی شامل یک T میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهم‌راستا در یک صفحه است. هندسه ۲، T میکرومیکسر چندگانه با ورودی‌های ناهم‌راستا در دو صفحه و هندسه ۳ نیز یک T میکرومیکسر چندگانه است. هندسه ۴، T میکرومیکسر دوگانه و هندسه ۵، T میکرومیکسر است. طول کل میکروکانال اختلاط $3000 \mu\text{m}$ در نظر گرفته شده که این طول در هر پنج هندسه با یکدیگر برابر است. سطح مقطع ورودی‌ها در هر پنج هندسه برابر با $10000 \mu\text{m}^2$ است. شکل ۱ طرح هندسه‌های پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

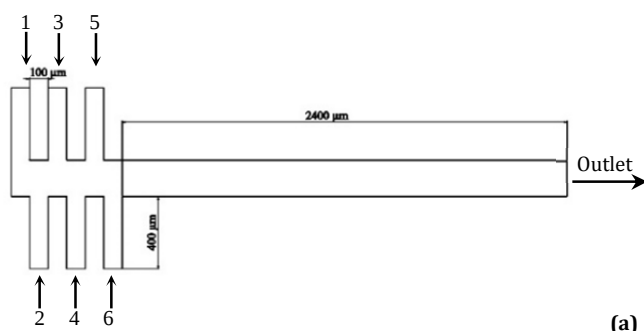
۵- استقلال حل از شبکه‌بندی

به‌منظور بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی استفاده‌شده، پنج شبکه‌بندی مختلف به‌صورت غیریکنواخت با عناصر شش‌وجهی بررسی شده است. در نمودار ۱، به‌ازای تعداد سلول‌های مورد استفاده در شبکه‌بندی غیریکنواخت، شاخص اختلاط برای هندسه ۱ در طول میکروکانال اختلاط به‌ازای شبکه‌بندی‌های مختلف رسم شده است. طبق نمودار ۱، در مقایسه شاخص اختلاط در مقاطع عرضی به‌ازای تعداد المان‌های شبکه‌بندی ۴۳۲۶۳۳۶ با شاخص اختلاط در مقاطع عرضی با تعداد المان‌های ۳۸۵۷۱۱۲ می‌توان گفت که شبکه‌بندی با تعداد سلول‌های ۳۸۵۷۱۱۲ در هندسه ۱ برای حل مساله کافی است. به‌منظور درک صحیح از شبکه‌بندی به‌کاررفته در هندسه‌ها، شکل ۲ نوع یکسان شبکه‌بندی را در هندسه ۱ نشان می‌دهد. جدول ۲ تعداد گره‌ها و المان‌های هر هندسه را با توجه به نوع یکسان شبکه‌بندی استفاده‌شده نشان می‌دهد.

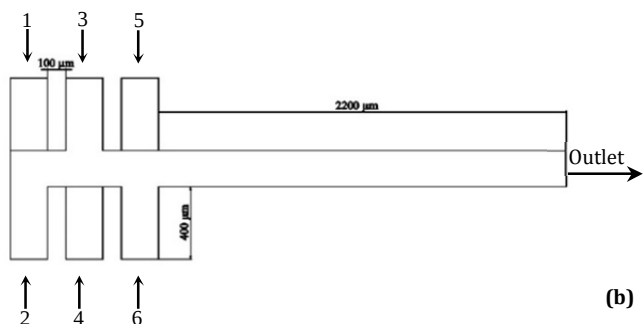
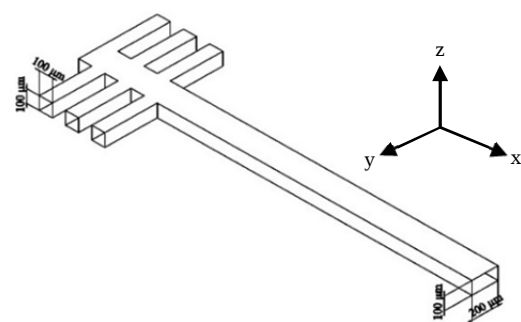
۶- اعتبارسنجی

در کار حاضر به‌منظور اطمینان از صحیح بودن روش حل عددی انجام‌شده از دو پژوهش *سریس/مران* و *دو/هاستین* [13] و *باهری/سلامی* و همکاران [8] استفاده شده است. هندسه پژوهش *سریس/مران* و *دو/هاستین* [13] در شکل ۳ نشان داده شده که به‌صورت دو‌بعدی است. در پژوهش آنها شاخص پایداری به‌همراه شاخص توانی تغییر کرده است. در نمودار ۲ پروفیل سرعت برای سیال با شاخص توانی ۰/۶۱۶۱، در عدد رینولدز ۵۰ برای کار آنها و کار حاضر مقایسه شده است. در نمودار ۳، شاخص اختلاط به‌ازای سیال با شاخص توانی ۰/۹۵۱۲ برای کار حاضر و پژوهش آنها نشان داده شده است که توافق خوبی در هر دو بررسی مشاهده می‌شود.

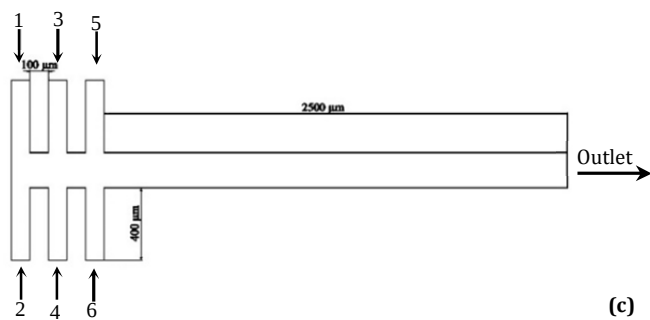
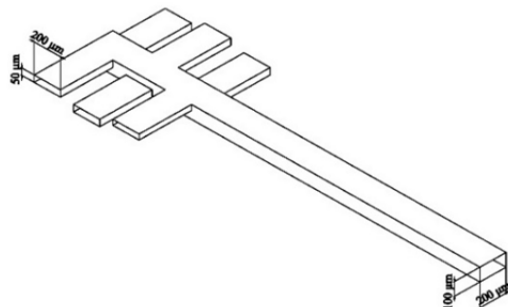
هندسه اعتبارسنجی‌شده مربوط به مطالعه *باهری/سلامی* و همکاران در نمودار ۴ نشان داده شده است. در پژوهش آنها شاخص پایداری به‌همراه شاخص توانی برای هر سیال تغییر کرده است. به‌منظور اعتبارسنجی سیال با شاخص توانی ۰/۹۳ از کار آنها استفاده شده و لازم به ذکر است که در پژوهش آنها شاخص توانی به‌همراه شاخص پایداری تغییر کرده است. مقایسه نتایج میزان اختلاط برای دو سیال در مقطع خروجی کانال اختلاط در هشت عدد رینولدز برای کار آنها و پژوهش حاضر بررسی شده است (نمودار



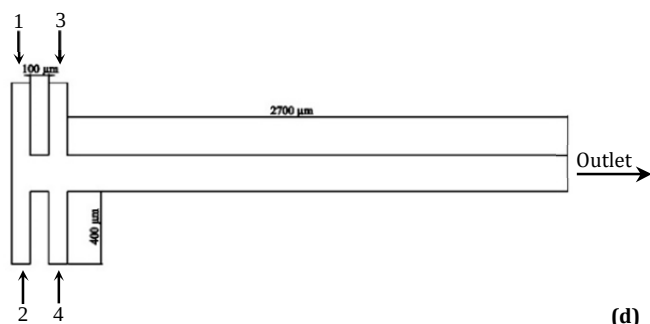
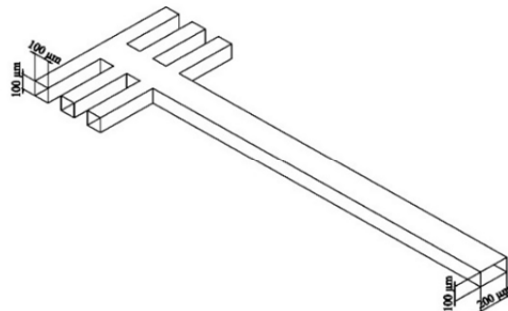
(a)



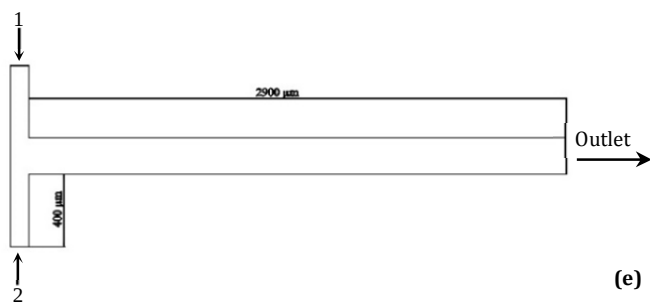
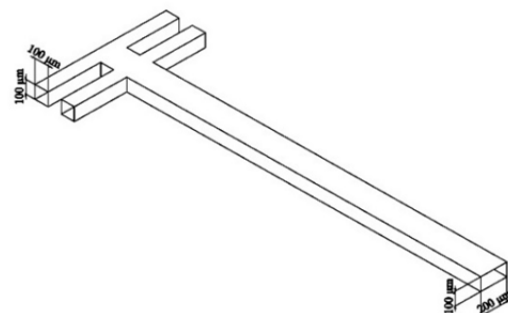
(b)



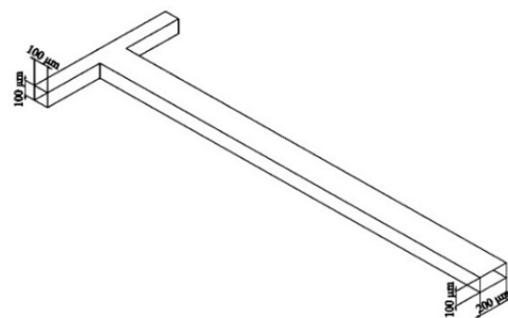
(c)



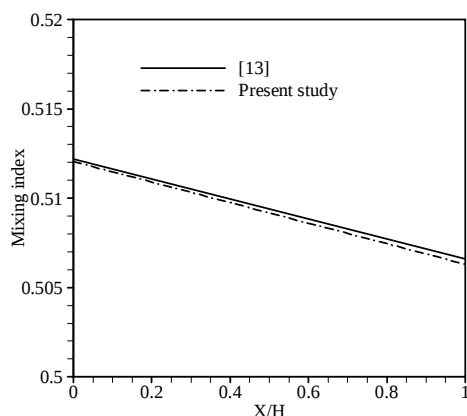
(d)



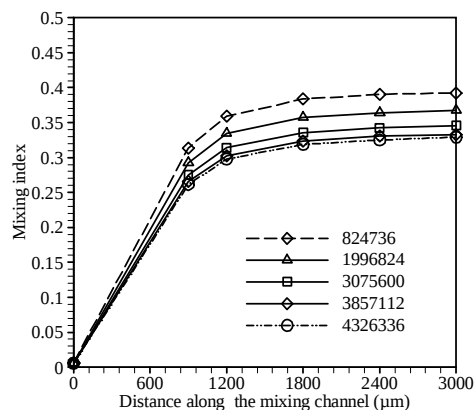
(e)



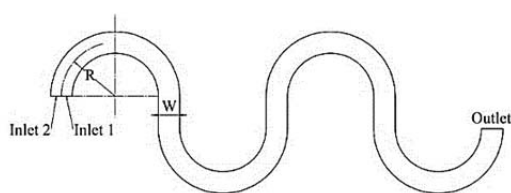
شکل ۱) شماتیک T میکرومیکسرها: (a) هندسه ۱، چندگانه با ورودی‌های ناهم‌راستا در یک صفحه، (b) هندسه ۲، چندگانه با ورودی‌های ناهم‌راستا در دو صفحه، (c) هندسه ۳، چندگانه، (d) هندسه ۴، دوگانه، (e) هندسه ۵



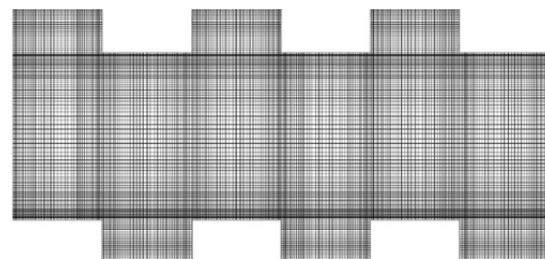
نمودار ۳) مقایسه شاخص اختلاط نسبت به فاصله محوری بی‌بعد به‌ازای $k=0.00383$ و $n=0.9512$ در کار حاضر با مرجع [13]



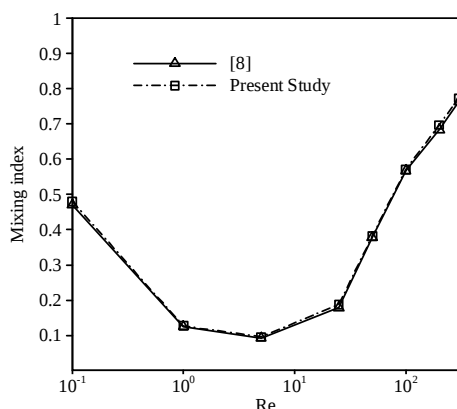
نمودار ۱) شاخص اختلاط در مقاطع عرضی در طول کانال اختلاط به‌ازای شبکه‌بندی‌های مختلف در $Re=100$ و $n=0.75$ و $k=0.097$



شکل ۴) شماتیک میکرومیکسر منحنی شکل [6]



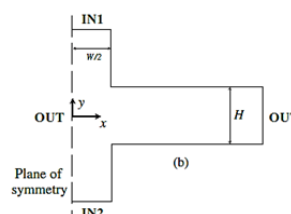
شکل ۲) نمای قسمتی از ورودی‌ها و کانال اختلاط در صفحه (x-y) از شبکه‌بندی استفاده شده (هندسه ۱)



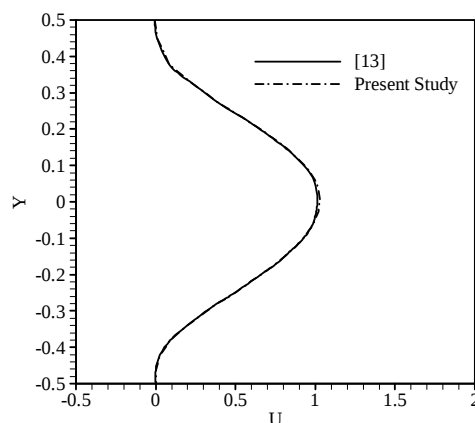
نمودار ۴) مقایسه شاخص اختلاط در محدوده $Re=0.1$ تا $Re=300$ به‌ازای سیال با $n=1$ و $k=0.000902$ برای کار حاضر و مرجع [8]

جدول ۲) اطلاعات نوع یکسان شبکه‌بندی استفاده شده در هندسه‌ها

هندسه	المان	گره
۱	۳۸۵۷۱۱۲	۴۰۳۸۴۰۲
۲	۳۸۳۴۰۰۰	۴۰۲۹۵۵۲
۳	۳۸۵۷۱۱۲	۴۰۳۸۴۰۲
۴	۳۴۸۶۴۵۶	۳۶۴۶۸۶۸
۵	۳۱۱۵۸۰۰	۳۲۵۵۳۳۴



شکل ۳) شماتیک هندسه پژوهش سرپس/امران و دواهاستین [13]



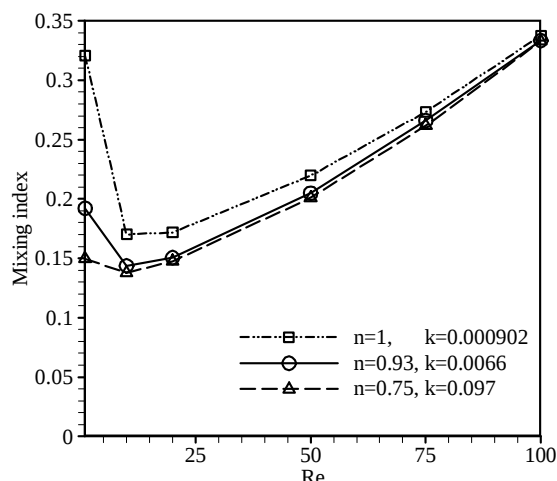
نمودار ۲) سرعت محوری بی‌بعد در نقطه $X=0.5$ به‌ازای $n=0.6161$ و $k=0.6572$ در $Re=50$ در کار حاضر و مرجع [13]

۷- بررسی نتایج
۷-۱- ترتیب استفاده شده قرارگیری سیال در ورودی‌ها
 در هندسه‌هایی که شامل بیش از دو ورودی هستند، از یک ترتیب قرارگیری خاص سیال در ورودی‌ها استفاده شده است. فرض می‌شود که یک ماده نمایانگر به یکی از سیالات اضافه می‌شود و رنگ آن را بدون ایجاد تغییری در خواص آن تغییر می‌دهد. در شکل ۱، ورودی‌های هندسه‌ها شماره‌گذاری شده که در هندسه‌های ۱ تا ۴ که تعداد ورودی‌ها بیش از دو ورودی است، ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها اهمیت دارد و در هندسه ۵ که دارای دو ورودی است، تنها یک ترتیب قرارگیری دو سیال در ورودی‌ها تعریف می‌شود. در هندسه‌های ۱، ۲ و ۳ در ورودی‌های ۱، ۴ و ۵، سیال دارای رنگ وارد کانال اختلاط می‌شود و از سایر ورودی‌ها، سیال بدون رنگ وارد می‌شود. همچنین به‌ازای این نوع قرارگیری برای هندسه ۴ که دارای چهار ورودی است، از ورودی‌های ۱ و ۴، سیال دارای رنگ وارد کانال اختلاط می‌شود و از دو ورودی دیگر،

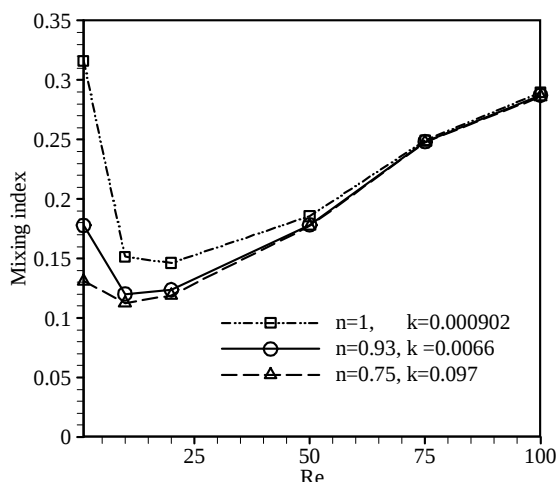
سازوکار غالب اختلاط است.

با در نظرگیری ضریب نفوذ جرمی یکسان در هر دو رویکرد در ناحیه که بی‌نظمی، سازوکار غالب اختلاط است، این یکسان بودن ضریب نفوذ جرمی نیز خود به‌طور خاص باعث افزایش نمود اثرات بی‌نظمی می‌شود که این نکته در تمامی نمودارهای مربوط به شاخص اختلاط مشهود است. طرح هندسه‌های مورد بررسی در رویکرد اول طبق نمودارهای ۵-۹ باعث افزایش میزان تنش برشی وارد شده به سیال می‌شوند که این منجر به کاهش اثرات لزجت ظاهری و در نهایت میزان اختلاط بهتری می‌شود.

نمودارهای ۱۰-۱۲ به‌ترتیب بیان‌کننده مقایسه‌ای از درجه اختلاط بر حسب کمیت شاخص اختلاط در پنج هندسه بر حسب اعداد رینولدز مختلف هستند که در هر یک از این سه نمودار، یک سیال در پنج هندسه بررسی شده است. در مقایسه دو هندسه ۲ و ۴ در عدد رینولدز ۱۰۰ به‌ازای سه سیال مختلف بررسی شده طبق نمودارهای ۱۰-۱۲، هندسه ۵، شاخص اختلاط بالاتری را نشان می‌دهد، گرچه در سایر اعداد رینولدز، شاخص اختلاط پایین‌تری را نسبت به هندسه ۲ داراست. نمودار ۱۳، افت فشار برای هر پنج هندسه برای سیال با شاخص توانی ۰/۷۵ و شاخص پایداری ۰/۰۹۷ را نشان می‌دهد.



نمودار ۵) شاخص اختلاط برای سه سیال مختلف در مقطع عرضی خروجی برای محدوده $Re=0/1$ تا $Re=100$ (هندسه ۲)

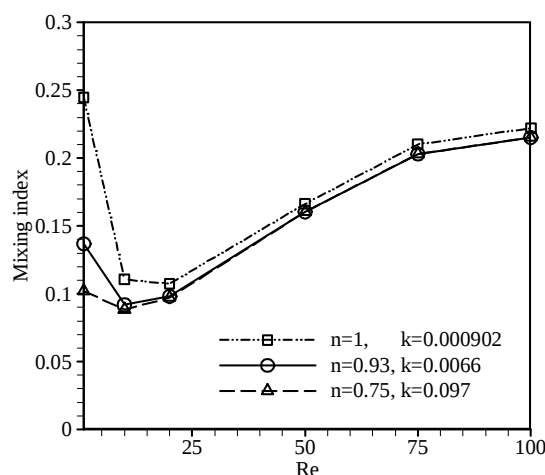


نمودار ۶) شاخص اختلاط برای سه سیال مختلف در مقطع عرضی خروجی برای محدوده $Re=0/1$ تا $Re=100$ (هندسه ۱)

سیال بی‌رنگ وارد می‌شود. مجموع کسر جرمی سیال بدون رنگ و سیال دارای رنگ در ورودی‌های تمامی هندسه‌ها برابر بوده است.

۲-۲- بررسی تاثیر محدوده اعداد رینولدز بر جریان آرام

در مطالعه حاضر، ۶ عدد رینولدز در محدوده‌ای از اعداد رینولدز ۱ تا ۱۰۰ در نظر گرفته شده است که این محدوده از اعداد رینولدز شامل جریان آرام خزشی نیز می‌شود که در جریان خزشی، علت غالب اختلاط میان دو سیال مورد بررسی، غلبه نیروی لزجت بر نیروی اینرسی است. به‌عنوان مثال در نمودار ۵، $Re=1$ که در محدوده جریان خزشی قرار دارد، بخش عمده‌ای از میزان اختلاط حاصل، ناشی از تأثیرات نیروی لزجت است. پس از عدد رینولدز بحرانی با افزایش اعداد رینولدز، بی‌نظمی افزایش پیدا می‌کند و تأثیرات لزجت کاهش می‌یابد.

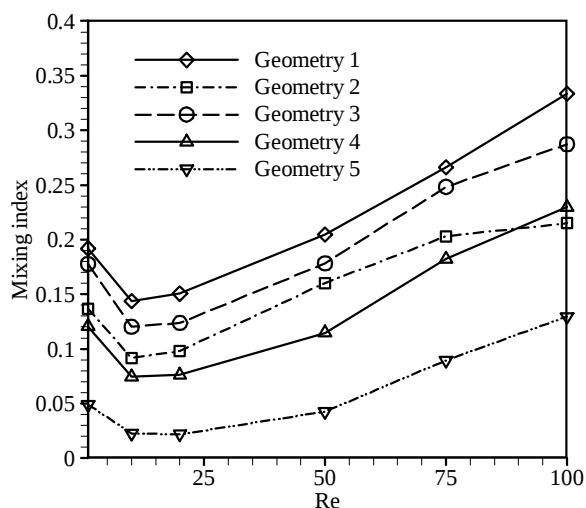


نمودار ۷) شاخص اختلاط برای سه سیال مختلف در مقطع عرضی خروجی برای محدوده $Re=0/1$ تا $Re=100$ (هندسه ۲)

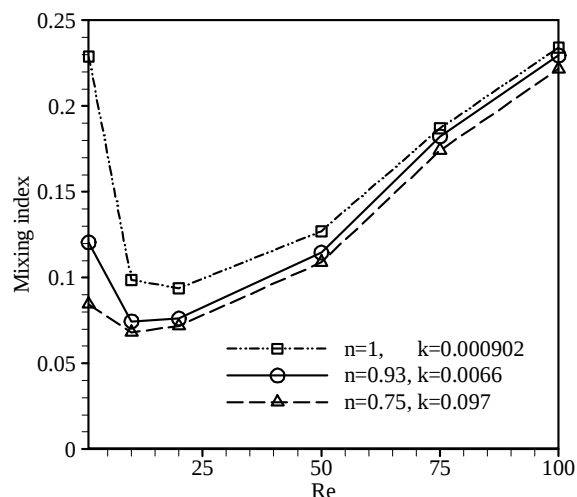
۳-۲- تاثیر تعداد ورودی‌ها و نحوه قرارگیری آنها

میان هندسه‌هایی که دارای تعداد ورودی‌های برابر هستند و شامل هندسه‌های ۱ تا ۳ می‌شوند، هندسه ۱ که دارای ورودی‌های ناهم‌راستا در یک صفحه بوده، شاخص اختلاط بالاتری داشته و هندسه ۲ نیز دارای درجه اختلاط پایین‌تری است. بین هندسه‌هایی که ورودی‌ها به‌صورت متقابل قرار دارند، هندسه ۳ در تمامی اعداد رینولدز، شاخص اختلاط بالاتری را در مقایسه با هندسه ۴ و ۵ دارد و هندسه ۴ نیز شاخص اختلاط بالاتری را در مقایسه با هندسه ۵ داراست. شاخص اختلاط با تعداد ورودی‌ها رابطه مستقیم داشته، به این مفهوم که افزایش تعداد ورودی‌ها منجر به افزایش شاخص اختلاط شده است.

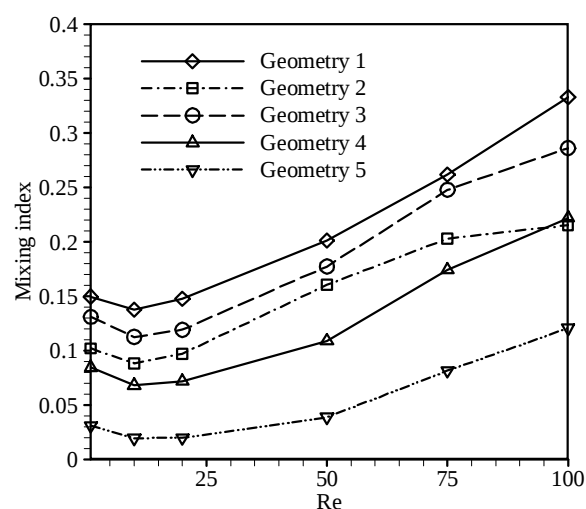
در بررسی مربوط به رویکرد اول در نمودارهای ۵-۹، شاخص اختلاط بر حسب رینولدزهای مختلف به‌ازای سیال نیوتونی ($k=0/000902$; $n=1$) و سیالات غیرنیوتونی ($k=0/0066$; $n=0/93$) و ($k=0/097$; $n=0/75$) رسم شده است. در این بررسی‌ها با تغییر شاخص پاورلا یا همان شاخص توانی، شاخص پایداری تغییر کرده است. در نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز و به‌تبع آن افزایش سرعت اثر لزجت کاهش‌یافته و فاصله میان سیالات مختلف کم می‌شود. در نمودارهای ۵-۹، درجه اختلاط بر حسب شاخص اختلاط پس از رسیدن به مقدار کمینه که رینولدز بحرانی نام دارد (به‌عنوان مرزی برای تغییر روند اختلاط معرفی می‌شود)، شروع به افزایش می‌کند و در رینولدزهای پایین، پدیده نفوذ جرمی،



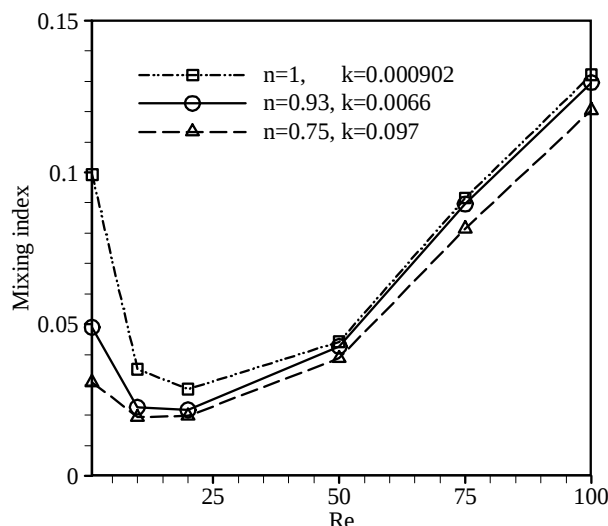
نمودار ۱۱) مقایسه شاخص اختلاط در پنج هندسه در محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ به‌ازای $n=0.93$ و $k=0.0066$ در مقطع عرضی خروجی



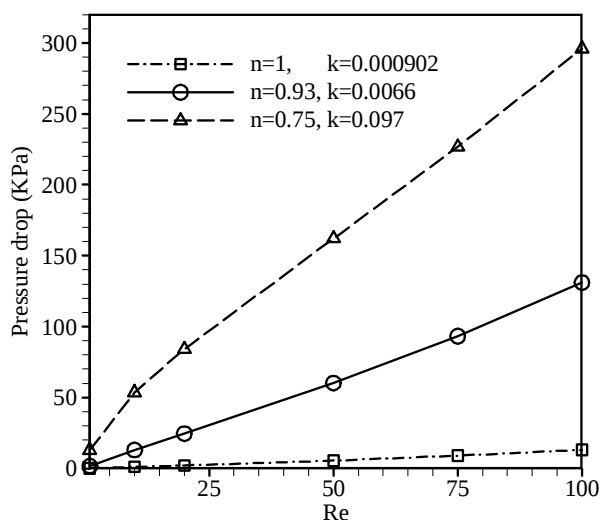
نمودار ۱۲) شاخص اختلاط برای سه سیال مختلف در مقطع عرضی خروجی برای محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ (هندسه ۴)



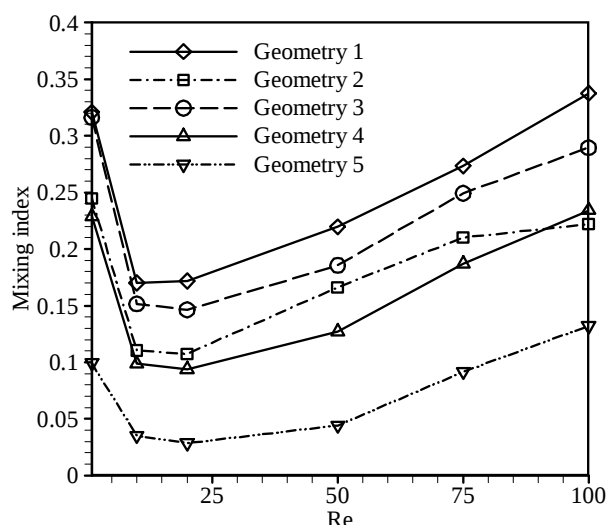
نمودار ۱۳) مقایسه شاخص اختلاط در پنج هندسه در محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ به‌ازای $n=0.75$ و $k=0.097$ در مقطع عرضی خروجی



نمودار ۱۴) شاخص اختلاط برای سه سیال مختلف در مقطع عرضی خروجی برای محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ (هندسه ۵)

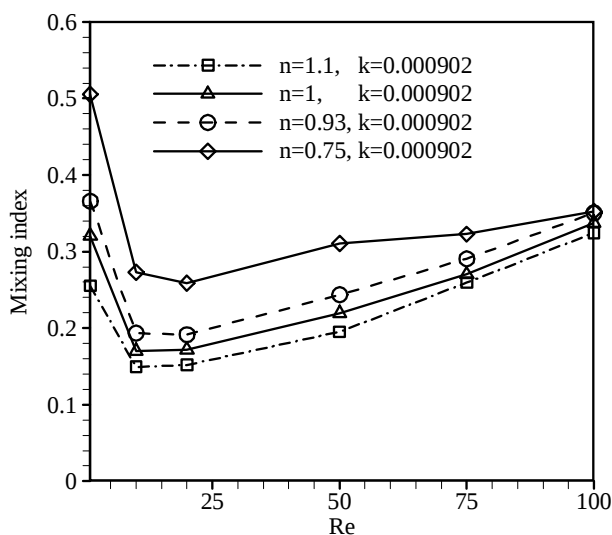


نمودار ۱۵) افت فشار به‌ازای سه سیال مختلف با محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ در مقطع خروجی (هندسه ۱)

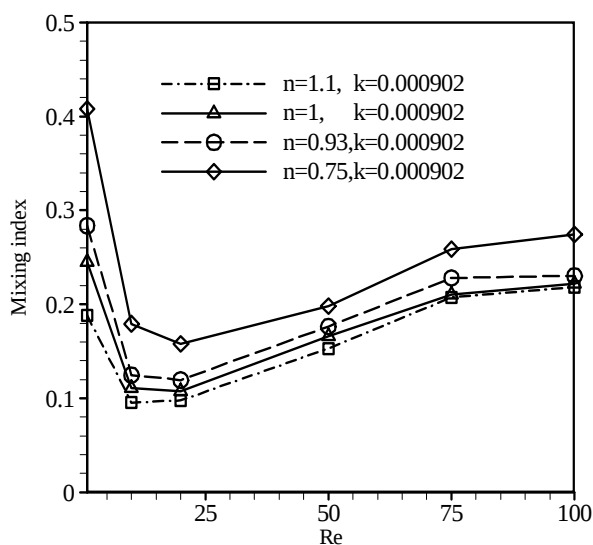


نمودار ۱۶) مقایسه شاخص اختلاط در پنج هندسه در محدوده $Re=0$ تا $Re=100$ به‌ازای $n=1$ و $k=0.000902$ در مقطع عرضی خروجی

بی‌بعد و دارای بعد در عدد رینولدز ۲۰ نشان می‌دهد که بزرگ‌ترین پروفیل سرعت در حالت دارای بعد مربوط به سیال با شاخص توانی ۰/۷۵ و شاخص پایداری ۰/۹۷ است و لزجت بالاتری را در مقایسه با دو سیال دیگر داراست. اما در پروفیل بی‌بعد، سیال آب بزرگ‌ترین پروفیل سرعت کاملاً توسعه‌یافته را داراست. نمودار ۲۰ پروفیل‌های سرعت کاملاً توسعه‌یافته در مقطع عرضی خروجی را نیز در دو حالت بی‌بعد و دارای بعد برای هندسه ۱ و ۲ به‌ازای صرفاً تغییر شاخص توانی نشان می‌دهد که در هر دو حالت بی‌بعد و دارای بعد سیال با شاخص توانی ۱/۱ و شاخص پایداری ثابت، بزرگ‌ترین پروفیل سرعت کاملاً توسعه‌یافته در خروجی را داراست. با توجه به نمودارهای ۱۹ و ۲۰ مربوط به پروفیل‌های سرعت کاملاً توسعه‌یافته بی‌بعد مشاهده می‌شود که در هر دو رویکرد با تغییر شاخص توانی همراه با ثابت بودن شاخص پایداری یا با تغییر شاخص پایداری، سیالی که شاخص توانی بیشتری را داراست، پروفیل سرعت بزرگ‌تری را خواهد داشت.

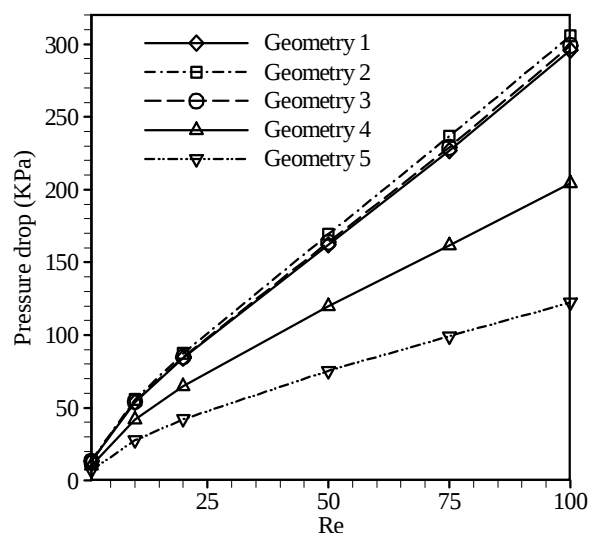


نمودار ۱۵) شاخص اختلاط در مقطع عرضی خروجی برای اعداد رینولدز مختلف (هندسه ۱)



نمودار ۱۶) شاخص اختلاط در مقطع عرضی خروجی برای اعداد رینولدز مختلف (هندسه ۲)

در نمودار ۱۳، افت فشار به‌ازای سه سیال مختلف نسبت به اعداد رینولدز مختلف در هندسه ۱ را نشان داده است که سیال با شاخص توانی ۰/۷۵ و شاخص پایداری ۰/۹۷ بیشترین میزان افت فشار را دارد. طبق نمودار ۱۴، برای مقایسه افت فشار می‌توان دو مقایسه انجام داد، یکی مقایسه بین میکرومیکسرهایی که دارای شش ورودی هستند که شامل هندسه ۱ و ۲ و ۳ می‌شود و بین این سه هندسه، هندسه‌ای که بیشترین اختلاط را دارد، دارای کمترین افت فشار و هندسه‌ای که کمترین افت فشار را دارد، دارای بیشترین اختلاط است، گرچه اختلاف افت فشار میان این ۳ هندسه بسیار اندک است. می‌توان میان میکرومیکسرهایی که ورودی‌ها به‌صورت متقابل (هم‌راستا) قرار دارند نیز مقایسه‌ای انجام داد که بین آنها هر هندسه‌ای که شاخص اختلاط بیشتری دارد، افت فشار بیشتری نیز خواهد داشت و افت فشار با شاخص اختلاط رابطه مستقیم دارد.

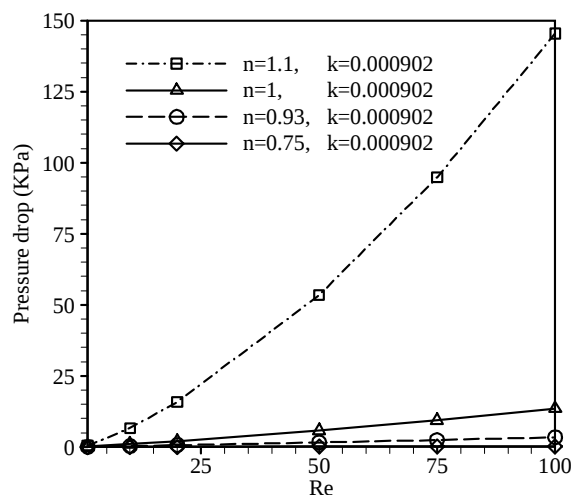


نمودار ۱۴) مقایسه افت فشار در پنج هندسه در محدوده $Re=0/1$ تا $Re=100$ به‌ازای $k=0/97$ و $n=0/75$

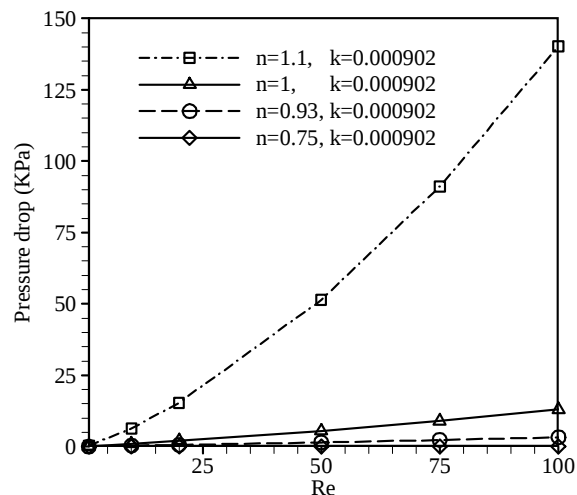
در نمودارهای ۱۵ و ۱۶، بررسی اختلاط با صرف تغییر شاخص توانی و در نظر گرفتن سیال آب به‌عنوان سیال پایه به‌ازای چهار شاخص توانی مختلف ۰/۷۵، ۰/۹۳، ۱ و ۱/۱ و شاخص پایداری ثابت در دو هندسه با ورودی‌های ناهم‌راستا نشان داده شده است. در نمودارهای ۱۵ و ۱۶، به‌ترتیب شاخص اختلاط برای هندسه ۱ و ۲ به‌ازای اعداد رینولدز مختلف در مقطع عرضی خروجی نشان داده شده است که در هر دو نمودار، سیال با شاخص توانی ۰/۷۵ و شاخص پایداری ثابت براساس سیال آب بیشترین میزان اختلاط را دارد. با مقایسه نمودارها مشخص می‌شود که هندسه ۱ در حالت صرفاً تغییر شاخص توانی نیز درجه اختلاط بالاتری را در مقایسه با هندسه ۲ داراست.

در بررسی‌های مربوط به رویکرد دوم در نمودارهای ۱۷ و ۱۸ که به‌ترتیب بیانگر افت فشار در دو هندسه ۱ و ۲ هستند، مشاهده می‌شود که در هر دو هندسه، شاخص توانی با افت فشار به‌ازای شاخص پایداری ثابت، رابطه مستقیم دارد که سیال با شاخص توانی ۱/۱ در هر دو هندسه افت فشار شدیدتری را دارد.

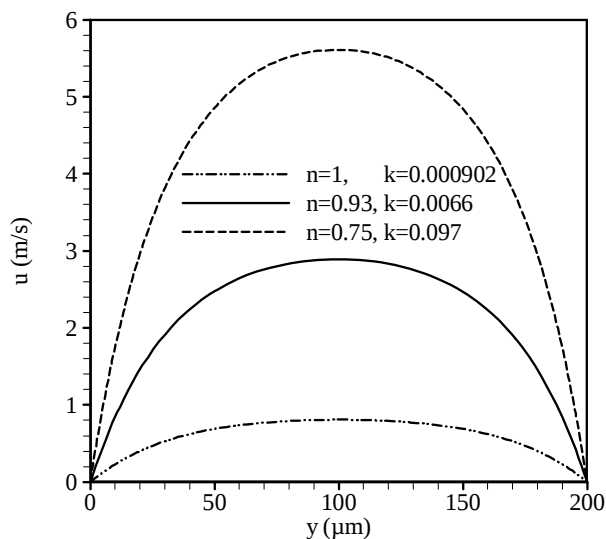
در بررسی‌های مربوط به رویکرد اول، نمودار ۱۹، پروفیل سرعت کاملاً توسعه‌یافته در مقطع عرضی خروجی را برای هندسه ۱ در دو حالت



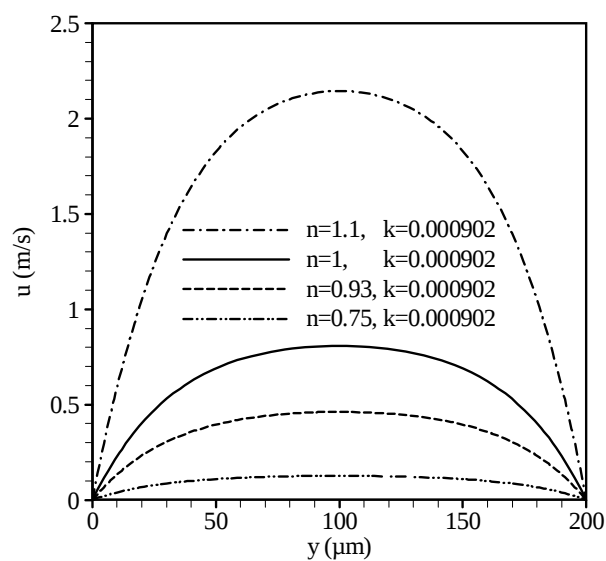
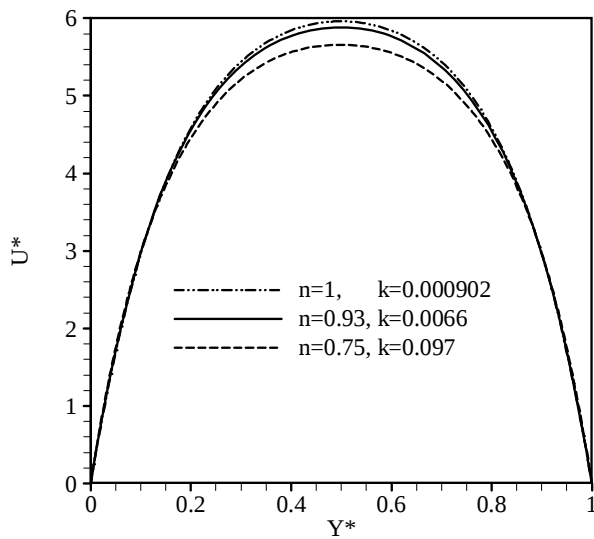
نمودار ۱۸) افت فشار در مقطع عرضی خروجی در محدوده اعداد $Re=100$ تا $Re=10$ (هندسه ۲)



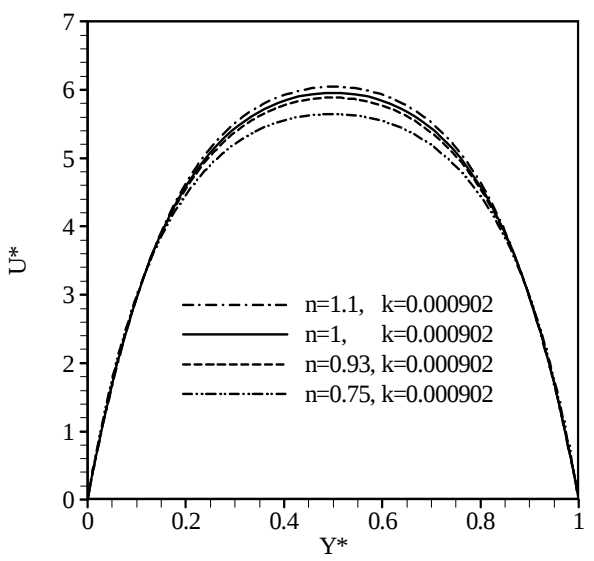
نمودار ۱۹) افت فشار در مقطع عرضی خروجی در محدوده اعداد $Re=100$ تا $Re=10$ (هندسه ۱)



نمودار ۲۰) سرعت کاملاً توسعه‌یافته در دو حالت بی‌بعد و دارای بعد به‌ازای سه سیال مختلف در $Re=20$ در مقطع خروجی هندسه ۱



نمودار ۲۱) سرعت کاملاً توسعه‌یافته در دو حالت بی‌بعد و دارای بعد به‌ازای سیال با شاخص‌های توانی مختلف و شاخص پایداری ثابت در $Re=20$ در مقطع خروجی هندسه ۱



شده است، نتایج روند شاخص اختلاط، افت فشار و پروفیل‌های سرعت کاملاً توسعه‌یافته دارای بعد بر حسب معیار شاخص توانی، معکوس یکدیگر هستند، اما در روند پروفیل‌های سرعت کاملاً توسعه‌یافته بی‌بعد، مشابه هستند.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: به تمامی اصول اخلاقی در زمینه چاپ و نشر مقاله با توجه به قوانین مجله مکانیک مدرس متعهد می‌باشم. کلیه مطالب گفته شده در این مقاله مورد تأیید اینجانب می‌باشد.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: عرفان نعمت‌الهی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روشناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۷۵٪)؛ محمد سفید (نویسنده دوم)، روشناس/تحلیلگر آماری (۲۵٪)

منابع مالی: این پژوهش هیچ کمک هزینه خاصی از هیچ موسسه سرمایه‌گذار در بخش عمومی، تجاری یا غیر انتفاعی دریافت نکرده است.

منابع

- 1- Santana HS, Silva Jr JL, Taranto OP. Numerical simulation of mixing and reaction of Jatropha curcas oil and ethanol for synthesis of biodiesel in micromixers. Chemical Engineering Science. 2015;132:159-168.
- 2- Mansour M, Kawahara A, Sadatomi M. Numerical investigation of two-phase flow through a T-junction microchannel reactor. Journal of Environmental Science and Engineering A. 2014;3(1A):42-54.
- 3- Lee CY, Wang WT, Liu CC, Fu LM. Passive mixers in microfluidic systems: A review. Chemical Engineering Journal. 2016;288:146-160.
- 4- Jeong GS, Chung S, Kim CB, Lee SH. Applications of micromixing technology. Analyst. 2010;135(3):460-473.
- 5- White FM. Viscous fluid flow. 3rd Edition. New York: McGraw-Hill; 2006.
- 6- Huang YT, Wu CY, Huang SW. Longitudinal vortices mixing in three-stream micromixers with two inlets. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. 2014;8(7):1175-1180.
- 7- Capretto L, Cheng W, Hill M, Zhang X. Micromixing within microfluidic devices. In: Lin B, editor. Microfluidics: Technologies and applications. Berlin: Springer; 2011. pp. 27-68.
- 8- Baheri Islami S, Khezerloo M, Gharraei R. The effect of chaotic advection on mixing degree and pressure drop of non-Newtonian fluids flow in curved micromixers. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017;39(3):813-831.
- 9- Alam A, Kim KY. Mixing performance of a planar micromixer with circular chambers and crossing constriction channels. Sensors and Actuators B Chemical. 2013;176:639-652.
- 10- Cortes-Quiroz CA, Azarbadegan A, Zangeneh M. Evaluation of flow characteristics that give higher mixing performance in the 3-D T-mixer versus the typical T-mixer. Sensors and Actuators B Chemical. 2014;202:1209-1219.
- 11- Bothe D, Stemich C, Warnecke HJ. Fluid mixing in a T-shaped micro-mixer. Chemical Engineering Science. 2006;61(9):2950-2958.
- 12- Ait Mouheb N, Malsch D, Montillet A, Sollicet C, Henkel T. Numerical and experimental investigations of mixing in T-shaped and cross-shaped micromixers. Chemical

جدول ۳، شاخص اختلاط به‌ازای رویکرد اول در پنج هندسه مورد بررسی در این رویکرد را در عدد رینولدز ۱۰۰ نشان داده است که هندسه ۱ به‌ازای سیال آب بیشترین کیفیت اختلاط را نشان می‌دهد و همچنین هندسه ۵ که T-میکرومیکسر ساده است، به‌ازای محلول آبی کریوکسی‌متیل‌سلولز ۰/۲۵٪ جرمی، کمترین کیفیت اختلاط را دارد. جدول ۴ شاخص اختلاط را به‌ازای بررسی‌های رویکرد دوم که شامل هندسه‌های ۱ و ۲ بوده است را در عدد رینولدز ۱۰۰ نشان می‌دهد که در مقایسه دو هندسه، هندسه ۱ به‌ازای سیال با شاخص توانی ۰/۷۵، بیشترین کیفیت اختلاط را دارد. در بررسی رفتار اختلاط در هندسه‌های ۱ و ۲ به‌طور جداگانه در عدد رینولدز ۱۰۰، هندسه سیال با شاخص توانی ۰/۷۵ بیشترین میزان اختلاط را داراست.

جدول ۳) شاخص اختلاط پنج هندسه در رویکرد اول در $Re=100$ در مقطع خروجی

هندسه	$n=1$ $K=0.00902$	$n=0.93$ $K=0.0066$	$n=0.75$ $K=0.097$
۱	۰/۳۳۷۶	۰/۳۳۳۴	۰/۳۳۲۸
۲	۰/۲۲۲۱	۰/۲۱۵۱	۰/۲۱۵۱
۳	۰/۲۸۹۵	۰/۲۸۷۳	۰/۲۸۶۱
۴	۰/۲۳۴۲	۰/۲۲۹۶	۰/۲۲۱۸
۵	۰/۱۳۲۱	۰/۱۲۹۶	۰/۱۲۰۵

جدول ۴) شاخص اختلاط هندسه‌های ۱ و ۲ در رویکرد دوم در $Re=100$ در مقطع خروجی

هندسه	$n=1/1$	$n=1$	$n=0.93$	$n=0.75$
۱	۰/۳۲۴۴	۰/۳۳۷۶	۰/۳۵۰۴	۰/۳۵۲۵
۲	۰/۲۱۸۵	۰/۲۲۲۱	۰/۲۳۰۳	۰/۲۷۴۲

۸- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، دو نوع رفتار اختلاط بررسی شد. اول رفتار اختلاط دو مولفه‌ای سیال (تک‌سیالی) برای سه سیال مختلف به‌ازای شاخص‌های توانی و پایداری مختلف در پنج هندسه و دوم، رفتار اختلاط دو مولفه‌ای سیال به‌ازای سیال با شاخص‌های توانی مختلف و شاخص پایداری ثابت در دو هندسه دارای ورودی‌های ناهم‌راستا مورد مطالعه قرار گرفت که در بررسی اول مشاهده شد که هر چه سیالی دارای لزج بیشتری باشد، دارای شاخص اختلاط کمتری است که با افزایش عدد رینولدز، اثرات لزج سیال کاهش می‌یابد و سیال غلیظ به درجه اختلاط بهتری می‌رسد. به‌طور کلی در بررسی اول، شاخص اختلاط با افزایش شاخص توانی و به‌تبع آن کاهش شاخص پایداری، رابطه مستقیمی دارد. در بررسی‌های مربوط به رویکرد دوم با ثابت‌نگه‌داشتن شاخص پایداری و تغییر شاخص توانی، رابطه میان شاخص اختلاط با شاخص توانی، یک رابطه معکوس بوده و با کاهش شاخص توانی، اختلاط افزایش توانی درجه اختلاط افزایش یافته و در رویکرد اول، این روند معکوس است. با توجه به نمودارهای ۱۳ و ۱۶ که میزان افت فشار را در هندسه ۱ به‌ترتیب به‌ازای رویکردهای بررسی‌شده اول و دوم نشان می‌دهند، اگر شاخص توانی را به‌عنوان معیار قرار دهیم، در رویکرد اول، میزان افت فشار با افزایش شاخص توانی رابطه معکوس داشته است و در رویکرد دوم با افزایش آن رابطه مستقیم دارد، اما روند سرعت‌های کاملاً توسعه‌یافته بی‌بعد در دو رویکرد بررسی‌شده، در هندسه‌های با ورودی‌های ناهم‌راستا مشابه است و با افزایش شاخص پروفیل بزرگ‌تر می‌شود. در واقع هندسه‌های چندقابله با ورودی‌های ناهم‌راستا که هر دو رویکرد در آنها بررسی

Engineering Communications. 2018;205(3):363-371.
 16- Fluent A. 18.0 ANSYS Fluent Theory Guide 18.0. [Internet]. Canonsburg: Ansys Inc; 2017. Available from: Not Found
 17- Madlener K, Frey B, Ciezki HK. Generalized reynolds number for non-newtonian fluids. Progress in Propulsion Physics. 2009;1:237-250.
 18- Galletti Ch, Arcolini G, Brunazzi E, Mauri R. Mixing of binary fluids with composition-dependent viscosity in a T-shaped micro-device. Chemical Engineering Science. 2015;123:300-310.

Engineering Science. 2012;68(1):278-289.
 13- Srisamran Ch, Devahastin S. Numerical simulation of flow and mixing behavior of impinging streams of shear-thinning fluids. Chemical Engineering Science. 2006;61(15):4884-4892.
 14- Ansari MA, Kim KY, Anwar K, Kim SM. Vortex micro T-mixer with non-aligned inputs. Chemical Engineering Journal. 2012;181-182:846-850.
 15- Izadpanah E, Hekmat MH, Azimi H, Hoseini H, Babaie Rabiee M. Numerical simulation of mixing process in T-shaped and DT-shaped micromixers. Chemical