

بررسی عددی افزایش کیفیت اختلاط سیال غیرنیوتنی در یک میکروکانال T شکل

ولی کلانتر*
دانشیار

مهدي عباسی

دانشجوی دکتری،
دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

چکیده: در این مقاله یک میکروکانال T شکل با دوره های اختلاط ۱ الی ۲۵ واحد و تغییر در هندسه هر دوره اختلاط در حالت دو بعدی و دائم توسط نرم افزار کامسول مورد ارزیابی عددی قرار گرفته است. یک پارامتر MQ برای مشخص نمودن کیفیت اختلاط در خروجی کانال و همچنین افت فشار استفاده شده است. همچنین تأثیر تعداد دوره های واحد اختلاط و موانع واقع در واحد اختلاط بر کیفیت اختلاط بررسی شده است. در ابتدا ۶ مدل هندسه برای یک دوره اختلاط طراحی شد و بعد بدست آمدن نتایج عددی بهترین هندسه برای ادامه محاسبات و کار انتخاب شد. نتایج عددی بدست آمده برای هندسه C نشان می دهند که استفاده از ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ واحد اختلاط در کانال، کیفیت اختلاط بدست آمده برای سیال خون به ترتیب ۳۰، ۴۶، ۷۳، ۸۵، ۹۲ و ۹۸ درصد می باشد که میتوان آن را برای استفاده در سیستم های شیمیایی مناسب دانست.

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۰

واژه‌های راهنما: سیال غیرنیوتنی، میکروکانال، میکرومیکسر، کیفیت اختلاط، افت فشار

Vali Kalantar*
Associate Professor

Mahdi Abbasi
Ph.D. Student, School of
Mechanical Engineering,
Yazd University, Yazd

Numerical investigation of quality enhancement of non-Newtonian fluid mixing in a T-shaped microchannel

Abstract: In this article, a T-shaped microchannel with mixing periods ranging from 1 to 25 units and variations in the geometry of each mixing period in a two-dimensional and steady state has been numerically evaluated using the COMSOL software. An MQ parameter has been used to determine the quality of mixing at the channel outlet as well as the pressure drop. Additionally, the influence of the number of mixing periods and obstacles present in the mixing unit on the mixing quality has been investigated. Initially, six geometric models were designed for one mixing period, and after obtaining the numerical results, the best geometry was selected for further calculations and work. The numerical results obtained for geometry "c" indicate that using 1, 5, 10, 15, 20, and 25 mixing units in the channel results in mixing qualities of 30%, 46%, 73%, 85%, 92%, and 98% respectively for blood fluid, which can be considered suitable for use in chemical systems.

Keywords: Non-Newtonian fluid, Microchannel, Micromixer, Mixing quality, Pressure drop

۱- مقدمه

در میکروکانال‌ها مدل‌سازی کنند. آن‌ها جریان سیالات را در میکروکانال‌های مستقیم و پیچیده شبیه‌سازی کردند و به تحلیل ترکیب و میزان مخلوط سیالات پرداخته‌اند. نتایج مطالعه نشان داد که جریان سیالات غیر نیوتونی در میکروکانال‌های پیچیده نسبت به میکروکانال‌های مستقیم تغییرات متفاوتی دارد. همچنین، ترکیب و میزان مخلوط سیالات در میکروکانال‌های پیچیده نسبت به میکروکانال‌های مستقیم بهبود یافت. به طور کلی، این مقاله به بررسی جریان و آنالیز مخلوط سیالات غیر نیوتونی در میکروکانال‌ها می‌پردازد و نتایج آن نشان می‌دهد که میکروکانال‌های پیچیده می‌توانند بهبود قابل توجهی در ترکیب و میزان مخلوط سیالات غیر نیوتونی داشته باشند.

دانگ و همکاران [۹]، آن‌ها از روش بهینه‌سازی توپولوژی برای بهینه‌سازی طراحی میکسر میکروسکوپی برای سیالات غیر نیوتونی استفاده کردند. هدف آنها یافتن ساختار بهینه میکسر برای بهبود میزان مخلوط‌شدگی و عملکرد جریان سیال غیر نیوتونی بود. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با استفاده از بهینه‌سازی توپولوژی، می‌توان ساختارهای میکسر میکروسکوپی را بهبود داد و عملکرد بهتری در میزان مخلوط‌شدگی سیال غیر نیوتونی ارائه داد. این بهینه‌سازی ساختار میکسر، می‌تواند منجر به بهبود کارایی و عملکرد سیستم‌های میکروفلوئیدیک که با سیالات غیر نیوتونی کار می‌کنند، شود.

توکاس و همکاران [۱۰]، به بررسی اختلاط سیال غیر نیوتونی در یک میکسر میکروسکوپی سه بعدی با الگوی صافی پیچیده پرداخته‌اند. در این میکسر، جریان سیال غیر نیوتونی از طریق یک صفحه پیچیده به نام صافی پیچیده عبور می‌کند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از صافی پیچیده در میکسر میکروسکوپی سه بعدی می‌تواند بهبود قابل توجهی در اختلاط سیال غیر نیوتونی ایجاد کند. این صفحه پیچیده با تاثیر درشتی جریان، ضریب مقاومت و الگوی جریان سیال غیر نیوتونی، بهبودی در میزان مخلوط‌شدگی سیال را ایجاد کرد.

کونتی و همکاران [۱۱]، تحلیلی را برای اختلاط سیالات غیر نیوتونی با استفاده از جریان الکتروترمال با جریان متناوب ارائه دادند. در این روش، جریان الکتروترمال با استفاده از جریان جابجایی الکتریکی به وجود آمده توسط جریان متناوب جهت اختلاط سیال غیر نیوتونی استفاده شده است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از جریان الکتروترمال با جریان متناوب می‌تواند بهبود قابل توجهی در اختلاط سیالات غیر نیوتونی ایجاد کند. این روش اختلاط توانست نیروهای تلاطمی و جابجایی سیال را ایجاد کرده و میزان مخلوط‌شدگی سیال را افزایش دهد. طیب و همکاران [۱۲]، با استفاده از روش تولید آنتروپی، عملکرد

سیستم‌های میکروسیال ابزارهایی هستند که مقدار کمی مایع را پردازش می‌کند. در این ادوات، سیالات از کانال‌هایی نازک‌تر از مو عبور می‌کنند و دریچه‌های کوچک می‌توانند جریان را قطع و یا وصل کنند. این کانال‌ها از موادی مانند شیشه، پلیمرها، کاغذ یا ژل ساخته شده‌اند. میکرو میکسر ها به دو دسته فعال و غیر فعل تقسیم بندی می شوند. میکرو میکسر های غیرفعال تنها به انرژی پمپاژ نیاز دارند، اما میکرو میکسر های فعال به یک انرژی خارجی مانده میدان مغناطیسی برای دست یابی به اختلاط نیاز دارند [۱]. میکرو میکسر های فعال برای افزایش کیفیت اختلاط متکی بر محرک های خارجی از جمله اختلاف فشار، دما، میدان مغناطیسی و الکتریکی است. این میکرو میکسر ها قابلیت بسیار خوبی در اختلاط سیال دارند. مشکلات موجود در ساخت میکرو میکسر های فعال و اتصال آن‌ها به دستگاه های تجزیه و تحلیل سبب شده امروزه به طور گسترده از میکرو میکسر های غیر فعال استفاده شود. زیرا نیازی به سیستم های پیچیده و پر هزینه جهت افزایش بازده کیفیت اختلاط ندارند. میکرو میکسر های غیر فعال با ایجاد جریان نامنظم با استفاده از موانع، تفکیک جریان به جریان های کوچکتر و یا تغییر شکل کانل اختلاط سبب افزایش سطح تماس دو سیال و در نتیجه آن افزایش بازده کیفیت اختلاط می شوند [۲]. میکروسیالات کاربردهای زیادی در تشخیص DNA، ساخت دارو، میکرو راکتورها، سلول های سوختی دارد [۳]. از این رو تحقیقات زیادی در مورد این موضوع به روش های عددی و تجربی انجام شده، که در ادامه به برخی از این پژوهش ها اشاره می شود.

جلیلی و همکاران [۴]، به بررسی افزایش کیفیت اختلاط سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی با استفاده از میکرو میکسر غیر فعال T شکل پرداخته‌اند آن‌ها با تغییر هندسی در واحد های اختلاط در ۲۵ دوره اختلاط برای سیال خون به ۸۱/۲ درصد رسیدند. فنگ و همکاران [۵]، به بررسی افزایش اختلاط با ویژگی های هندسی دوره ای ساده در میکروکانال‌ها پرداخته‌اند. آن‌ها با ۲۴ واحد اختلاط به کیفیت ۷۶/۱ درصد رسیدند. کیم و همکاران [۶]، در نتیجه استفاده همزمان از پمپاژ و اختلاط برای دو الگوی جریان یکسان که در آنها عدد پکلت ۷۳۳۸ است به کیفیت اختلاط ۹۷/۳ درصد رسیدند. شاملو و همکاران [۷]، به بررسی عددی اختلاط کارآمد سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در یک میکرو میکسر الکترو اسمزی پرداخته‌اند. در بهترین حالت کار آن‌ها به کیفیت ۹۹/۸ درصد دست یافتند. افضل و کیم [۸]، از روش‌های عددی استفاده کردند تا جریان سیالات غیر نیوتونی را

می‌کنند که منجر به افزایش میزان مخلوط شدگی سیالات غیر نیوتونی و همچنین کاهش فشار در جریان می‌شود.

تاتلیسوز و همکاران [۱۶]، از جریان پالسیتیل در میکرومیکسرها به همراه افزایش الکتروسموزیونیک (ICEO) برای مخلوط کردن جریان سیالات غیر نیوتونی استفاده کرده‌اند. ICEO یک پدیده فیزیکی است که در حضور سطح باردار (charged) در سیال، جریان سیال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از جریان پالسیتیل همراه با ICEO می‌تواند بهبود قابل توجهی در مخلوط کردن سیالات غیر نیوتونی داشته باشد. این روش با تأثیر جریان پالسیتیل و ICEO، تلاطم و آشوب در جریان سیال را ایجاد می‌کند که منجر به افزایش میزان مخلوط شدگی سیالات غیر نیوتونی می‌شود.

ال وی و چن [۱۷]، به بررسی رفتار مخلوط کردن سیالات غیر نیوتونی در اختلاط به روش الکترواسموزیک میکرومیکسرها می‌پردازند. در این میکسرها، جریان سیال تحت تأثیر نیروهای الکتریکی قرار می‌گیرد که باعث حرکت سیال در داخل میکسر می‌شود. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که رفتار مخلوط کردن سیالات غیر نیوتونی در میکسینگ الکترواسموزیک میکرومیکسرها ویژگی‌های منحصر به فردی دارد. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی‌ها و آزمایش‌ها، رفتار مخلوط کردن سیالات غیر نیوتونی در میکسرها الکترواسموزیک را بررسی کرده‌اند و برخی از نکات جدید و مهم درباره این رفتار را مشاهده کرده‌اند.

نعمت الهی و سفید [۱۸]، از روش تحلیل عددی برای بررسی مخلوط کردن دو سیال غیر نیوتونی در میکسرها T شکل (shaped) دوتایی و چندتایی با ورودی‌های هم‌خطی و غیر هم‌خطی استفاده کرده‌اند. با استفاده از مدلسازی عددی، رفتار مخلوط کردن سیالات غیر نیوتونی در این نوع میکسرها را بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که ترکیب دو سیال غیر نیوتونی در میکسرها T شکل دوتایی و چندتایی با ورودی‌های هم‌خطی و غیر هم‌خطی به صورتی منحصر به فرد رفتار می‌کند. تغییر در ترتیب و هندسه ورودی‌ها باعث تأثیر قابل توجهی بر میزان مخلوط شدگی سیالات غیر نیوتونی می‌شود.

شاملو و همکاران [۱۹]، آن‌ها از طریق شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی برای بررسی یک میکسر میکروسیال الکترواسموزیک جدید استفاده کرده‌اند. در این میکسر، جریان سیال با استفاده از نیروهای الکتریکی کنترل می‌شود تا مخلوط کردن بهبود یابد. نتایج مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این میکسر میکروسیال الکترواسموزیک جدید منجر به بهبود قابل توجهی

اختلاط حرارتی سیالات غیر نیوتونی با خاصیت کاهش برش درون میکرومیکسرها دو لایه‌ای با کانال‌های متقاطع را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این میکسرها، جریان سیال غیر نیوتونی از طریق کانال‌های متقاطع دو لایه‌ای عبور می‌کند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که استفاده از میکسرها دو لایه‌ای با کانال‌های متقاطع می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد اختلاط حرارتی سیالات غیر نیوتونی با خاصیت کاهش برش ایجاد کند. این میکسرها با تولید آنتروپی و تولید نیروی کششی، میزان مخلوط شدگی و تبادل حرارت بین سیال‌های غیر نیوتونی را افزایش می‌دهند.

کومار و همکاران [۱۳]، تحقیقاتی در مورد اختلاط حرارتی و رئولوژی سیالات غیر نیوتونی در یک میکسر میکروسکوپی الکترواسموزی با بار القایی انجام داده‌اند. در این میکسر، جریان سیال غیر نیوتونی از طریق جریان الکترواسموزی با بار القایی عبور می‌کند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که تحقیقات در مورد سیالات غیر نیوتونی در میکسر میکروسکوپی الکترواسموزی با بار القایی می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد حرارتی و رئولوژی سیالات غیر نیوتونی ایجاد کند. این میکسر با استفاده از جریان الکترواسموزی با بار القایی، تبادل حرارت بین سیالات غیر نیوتونی را افزایش داده و میزان مخلوط شدگی سیالات را بهبود می‌بخشد.

کوآدری و همکاران [۱۴]، یک مطالعه مقایسه‌ای در مورد رفتارهای اختلاط با استفاده از جریان سیالات غیر نیوتونی در میکرومیکسرها غیر فعال انجام داده‌اند. در این میکرومیکسرها، جریان سیال غیر نیوتونی به صورت غیر فعال از طریق میکروساختارهای خاص عبور می‌کند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با استفاده از جریان سیالات غیر نیوتونی در میکرومیکسرها غیر فعال، می‌توان بهبودهای قابل توجهی در رفتارهای اختلاط داشت. این میکسرها با استفاده از طراحی میکروساختارهای خاص، تلاطم سیال را افزایش داده و میزان مخلوط شدگی سیالات غیر نیوتونی را بهبود می‌بخشند.

باهری و همکاران [۱۵]، تأثیر آشوب زایی روی میزان مخلوط شدگی و کاهش فشار در جریان سیالات غیر نیوتونی در میکرومیکسرها منحنی را بررسی کرده‌اند. در این میکرومیکسرها، جریان سیال غیر نیوتونی از طریق ساختارهای منحنی عبور می‌کند که باعث آشوب‌زایی جریان می‌شود. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که آشوب‌زایی جریان سیالات غیر نیوتونی در میکرومیکسرها منحنی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر میزان مخلوط شدگی و کاهش فشار داشته باشد. این میکسرها با تأثیر آشوب‌زایی، جریان سیال را با تلاطم بیشتری روبه‌رو

سرعت برای هر ۲ سیال ثابت بوده و برابر با 0.4 متر برثانیه می باشد و سیال عامل نیز خون است. در شکل (۱) می توان نمایی از ۶ مدل کانال شبیه سازی شده و شرایط مرزی اعمال شده را مشاهده نمود.

۳- معادلات حاکم

جریان سیال توسط معادلات ناوراستوکس حل می شوند که در معادله (۱) و (۲) مشاهده می شوند. معادله پیوستگی

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} \triangleq \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله ممنوم

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \nu\nabla^2\vec{V} + \vec{g} \quad (2)$$

که در آن ρ چگالی سیال (kg/m^3) است، \vec{V} نشان دهنده بردار سرعت (m/s)، فشار P (Pa) و μ ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s) است. برای سیالات نیوتنی، مقدار μ (ویسکوزیته دینامیکی) ثابت است. اما بیشتر سیستم های شیمیایی و پزشکی با سیالات غیر نیوتنی با متغیر μ سروکار دارند. ویسکوزیته دینامیکی خون به عنوان یک سیال غیر نیوتنی (که به طور گسترده در کاربردهای بیولوژیکی استفاده می شود) تابعی از نرخ برش ($\dot{\gamma}$) است.

مدل های مختلفی برای ارزیابی μ در سیالات غیر نیوتنی وجود دارد، مانند مدل پاورلا، مدل ایس و مدل کارئو- یاسودا و... با توجه به مدل کارئو- یاسودا، ویسکوزیته دینامیکی به صورت معادله (۳) بیان می شود.

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (3)$$

که در معادله (۳) μ_0 لزجت در نرخ برش صفر و μ_{∞} لزجت در نرخ برش بینهایت λ زمان استراحت n شاخص رفتاری و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می باشد که برای سیال خون داده ها در جدول (۱) قابل مشاهده می باشد، همچنین میدان غلظت توسط معادله (۴) و (۵) بیان می شود.

$$\nabla \cdot \vec{j}_i = 0 \quad (4)$$

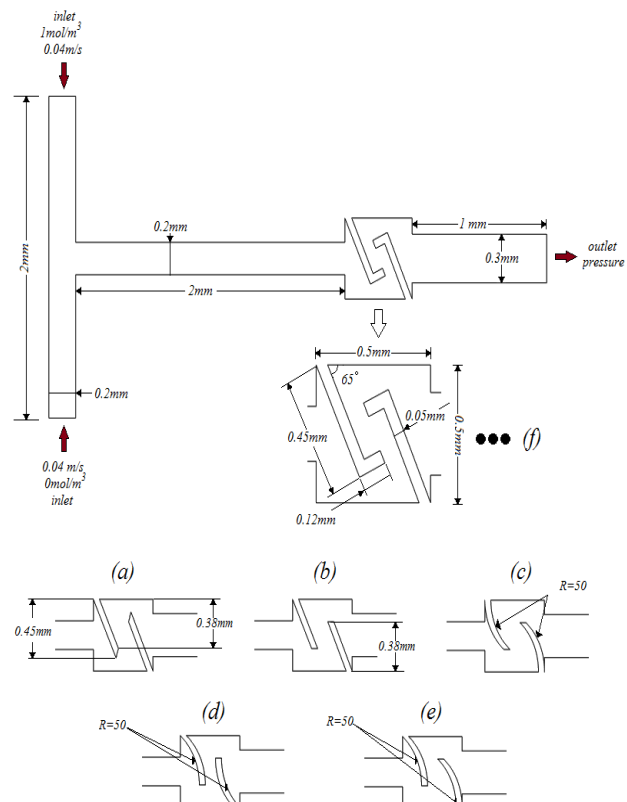
$$\vec{j}_i = -D_i \nabla C_i + \vec{V} C_i \quad (5)$$

در مخلوط کردن سیالات می شود. با تغییر پارامترهای مختلف مانند شدت جریان الکتریکی و طراحی هندسی میکسر، میزان مخلوط شدگی سیالات قابل تنظیم است.

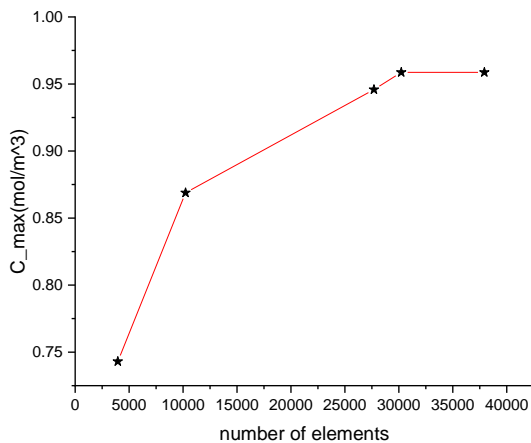
یانگ و همکاران [۲۰]، از شبیه سازی عددی برای بررسی مخلوط کردن الکترواسموزیک سیالات غیر نیوتنی در یک میکرومیکسر با ناهمگنی پتانسیل زتا استفاده کردند. در این میکرومیکسر، جریان سیال تحت تأثیر نیروهای الکتریکی قرار می گیرد و میزان مخلوط شدگی سیالات با تغییرات پتانسیل زتا در داخل میکسر بررسی می شود. نتایج کار آن ها نشان می دهد که ناهمگنی در پتانسیل زتا می تواند تأثیر قابل توجهی در مخلوط کردن الکترواسموزیک سیالات غیر نیوتنی داشته باشد. با استفاده از شبیه سازی عددی و تغییرات در پتانسیل زتا در داخل میکسر، میزان مخلوط شدگی سیالات قابل تنظیم است.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش ۶ میکروکانال T شکل در حالت دو بعدی و دائم مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا ۶ مدل با هندسه متفاوت در هر واحد دوره اختلاط از لحاظ کیفیت اختلاط و افت فشار با هم مقایسه شدند، سپس بهترین مدل از لحاظ کیفیت و اختلاط تا ۲۵ واحد دوره اختلاط مورد ارزیابی عددی قرار گرفت.



شکل ۱ شرایط مرزی و اولیه مسئله



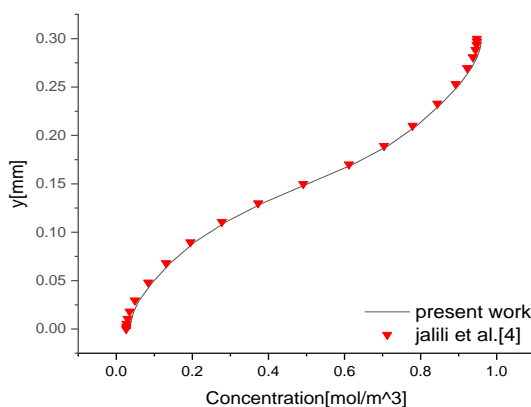
نمودار ۱ نتایج همگرایی حداکثر غلظت نسبت به تغییرات

۵- اعتبار سنجی

جلیلی و همکاران [۴]، به بررسی افزایش کیفیت اختلاط سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی با استفاده از میکرومیکسر غیر فعال T شکل پرداخته اند، آن ها با تغییر هندسی در واحد های اختلاط تا ۲۵ دوره اختلاط، برای سیال خون به کیفیت قابل توجه، ۸۱/۲ درصد رسیدند. این پژوهش نیز برای صحت سنجی کار خود، مرجع فوق را با استفاده از نرم افزار کامسول مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه شبیه سازی خود را با این مقاله بررسی و مقایسه نمود که در انتها نتایج خوب و قابل قبولی حاصل شد همچنین نتیجه را می توان در جدول (۲)، نمودار (۲) و شکل (۳) مشاهده نمود.

جدول ۲ مقایسه کیفیت اختلاط برای میکرومیکسر اعتبار سنجی شده یک واحد اختلاط با کار جلیلی و همکاران [۴]

نتیجه کار شبیه سازی شده (۲۵ واحد)	نتیجه (۲۵ واحد) همکاران [۴]
۸۲/۴۸۱	۸۱/۲



نمودار ۲ نتیجه کار شبیه سازی شده جهت اعتبار سنجی با کار جلیلی و همکاران [۴]

که در آن \vec{V} و C_i به ترتیب سرعت و غلظت سیال می باشند و D_i نشان دهنده ضریب پخش است که در این مقاله برابر با $10^{-11} m^2/s$ در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه کیفیت اختلاط از معادله (۶ و ۷) استفاده شده است [۴].

$$MQ = 1 - \sqrt{\frac{\sigma_{mean}^2}{\sigma_{max}^2}} \quad (6)$$

$$\sigma_{mean}^2 = \int (C_i - C_{mean})^2 dy \quad (7)$$

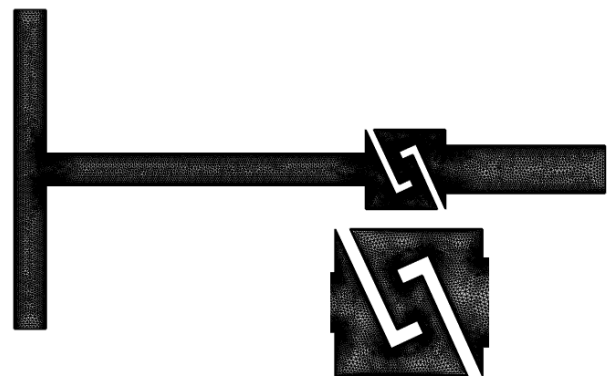
که در آن C_i کسر جرمی در نقطه i ، C_{mean} غلظت متوسط و σ_{max} برابر با حداکثر تغییر غلظت در اختلاط است.

جدول ۱ ثابت های سیال خون

مولفه ها	مقدار
ρ	1060 kg/m^3
μ_0	0.056 Pa.s
μ_∞	0.0035 Pa.s
λ	3.313 s

۴- استقلال شبکه

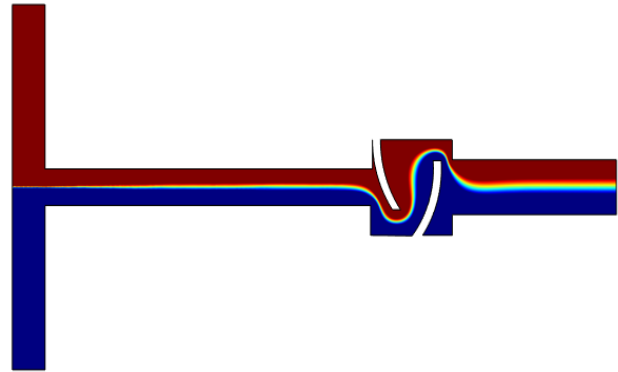
نتیجه شبیه سازی حداکثر غلظت داخل کانال با تغییر عدد سلول های ایجاد شده برای ۱ واحد اختلاط از ۳۹۵۰ تا ۳۷۹۲۴ سلول مورد ارزیابی قرار گرفت. اجراهای متعدد نشان می دهد که بعد از ۲۷۶۲۳ سلول دیگر حداکثر غلظت پس از همگرایی دچار تغییر نمی شود. در شکل (۲) می توان شبکه بندی و ناحیه محاسباتی را مشاهده نمود. همچنین در نمودار (۱) نتایج آزمون همگرایی قابل مشاهده است. از این رو در کل برای یک واحد اختلاط ۳۰۲۲۳ سلول ایجاد شد.



شکل ۲ شبکه بندی و ناحیه محاسباتی

سرعت در جریان می شود، این امر کاملاً در شکل های (۴) و (۵) به خصوص در هندسه f قابل مشاهده است. در طراحی میکرومیکسرها برای سیال غیرنیوتونی مانند خون، عواملی همچون، رئولوژی خون که خود یک سیال غیرنیوتونی است و رفتار آن به شدت وابسته به شرایط جریان می باشد باید توجه شود. در طراحی میکرومیکسرها، باید ویژگی های رئولوژیکی خون مانند ویسکوزیته، الاستیسیته و شکست شدگی را در نظر گرفت. برای مدل سازی و طراحی صحیح، معادلات رئولوژیکی مناسبی برای خون باید استفاده شود، همچنین ضریب اصطکاک سطحی بین سیال و دیواره میکروکانال نقش مهمی ایفا می کند. برای سیالات غیرنیوتونی مانند خون، بهبود خواص سطحی (مانند پوشش دهی ضد چسبندگی) می تواند به کاهش اصطکاک سطحی و بهبود عملکرد میکرومیکسر کمک کند. طراحی هندسی میکروکانال، هندسه داخلی میکروکانال ها نیز در طراحی میکرومیکسرها برای سیال غیرنیوتونی مهم است.

روش های طراحی مناسب هندسه میکروکانال می تواند به بهبود انتقال جریان، کاهش نیروهای بین ذره ای و بهبود مخلوط کردن سیال ها کمک کند. کنترل جریان، میکرومیکسرها معمولاً دارای سیستم کنترل جریان هستند. برای سیالات غیرنیوتونی، نیاز به الگوریتم های کنترل مناسب برای تنظیم سرعت جریان و فشار درون میکروکانال وجود دارد. معیارهای عملکرد، در طراحی میکرومیکسرها برای سیال غیرنیوتونی مانند خون، معیارهای عملکرد مهمی مانند زمان میکسینگ، یکنواختی مخلوط کردن، ضیاع فشار و توزیع سرعت را باید در نظر گرفت. این معیارها بر اساس نیازهای نهایی سیستم و برنامه کاربردی مشخص می شوند. میکرومیکسرها با کاهش افت فشار و حداکثر اختلاط، توانسته اند قابلیت های منحصر به فردی را در ترکیب مواد و ایجاد جریان سیال بهبود بخشند. با استفاده از تکنیک های پیشرفته و طراحی دقیق کانال های میکرواسکالر، این میکروساختارها به عملکرد بهینه ای دست یافته اند. کاهش افت فشار در میکرومیکسرها به این معنی است که در طول جریان سیال از یک سری ترکیبات و مواد، فشار کاهش می یابد. این موضوع باعث می شود تا جریان بیشتری به طور پیوسته و با سرعت بالا در میکروکانال حرکت کند، بدون اینکه انرژی زیادی از دست بدهد. از این رو، افت فشار کم در میکرومیکسرها برای کارایی و بهره وری بالا از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین، ایجاد حداکثر درصد اختلاط در میکرومیکسرها نیز به عنوان یک هدف مهم مطرح می شود. با ترکیب مواد مختلف در سیالات و استفاده از روش های بهینه مخلوط سازی، اختلاط مواد به صورت یکنواخت و موثر در جریان سیال رخ می دهد. این اختلاط منجر



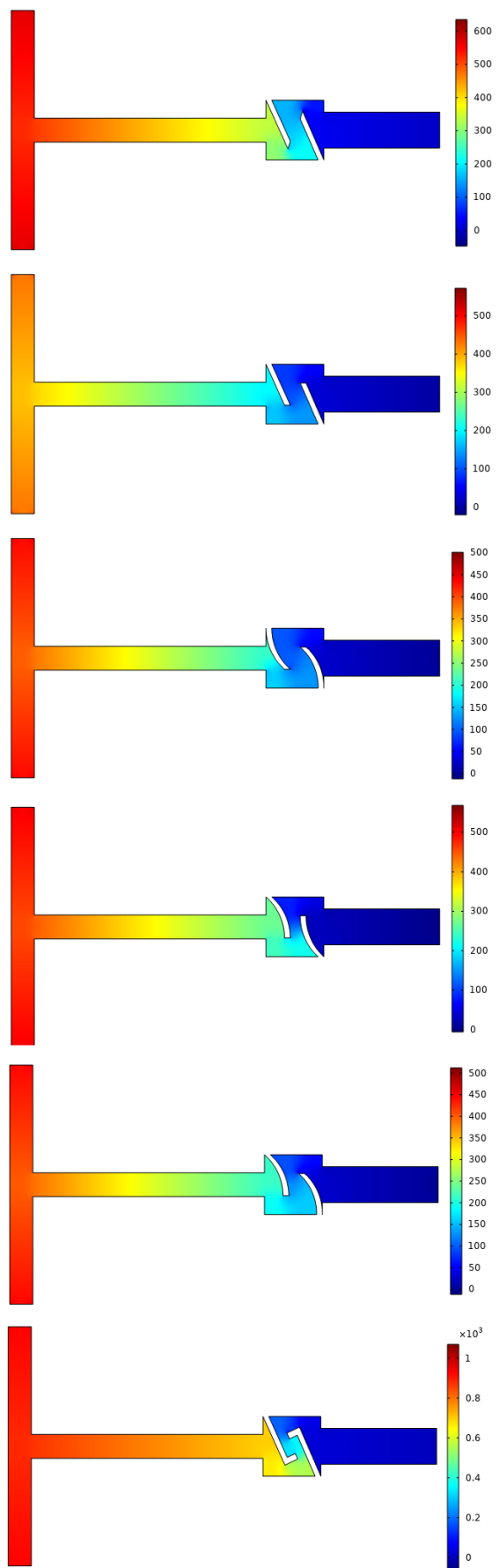
شکل ۳ نتیجه کار شبیه سازی شده جهت اعتبار سنجی با کار جلیلی و همکاران [۴]

۶- نتیجه شبیه سازی

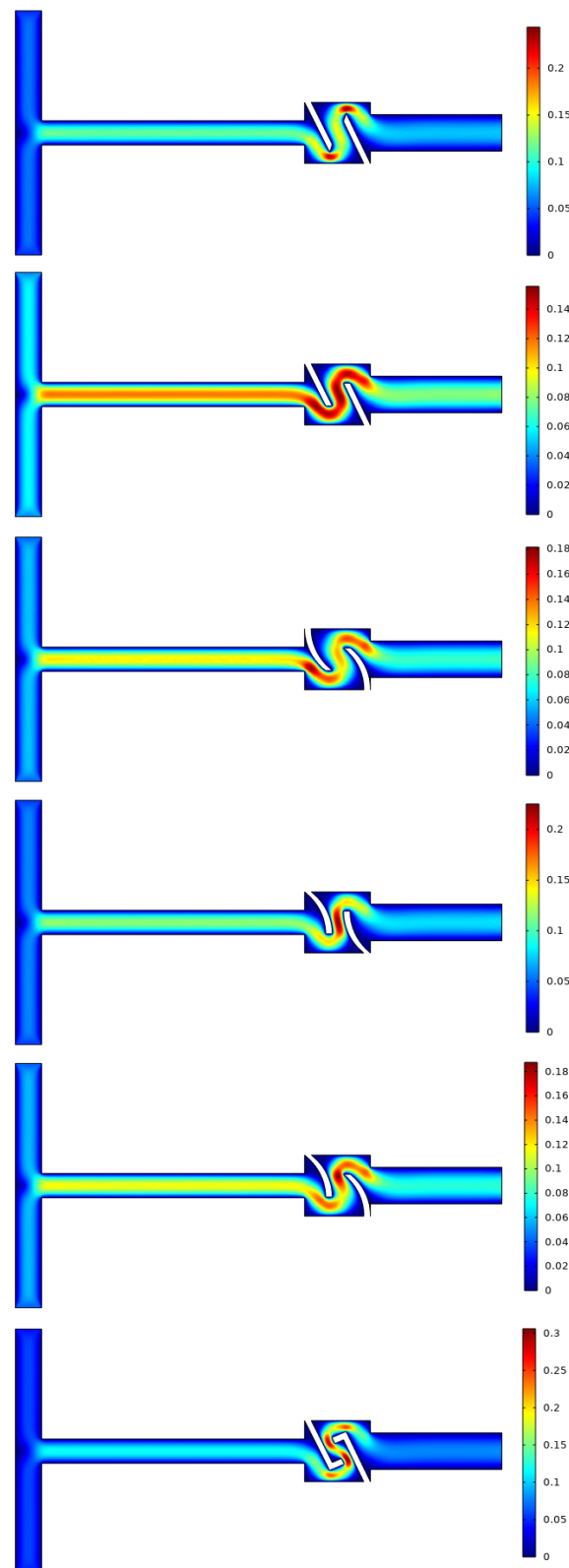
داده ها طبق شکل (۱) به نرم افزار وارد شد. افت فشار و کیفیت اختلاط دو پارامتر مهم و اساسی می باشند که در هنگام طراحی میکروکانال باید حتماً به آن ها توجه شود. زیرا تغییر کیفیت اختلاط میکسر تحت بررسی کاهش فشار بسیار بحث مهمی می باشد. در شکل (۴) می توان توزیع سرعت برای ۶ مدل ارزیابی شده را مشاهده کرد. و در شکل (۵) توزیع فشار و در شکل (۶) توزیع غلظت را مشاهده کرد.

در شکل (۴) همانطور که اشار شد می توان توزیع سرعت را مشاهده کرد. در طراحی f سرعت در لحظه برخورد به موانع موجود در میکسر و بالا رفتن فشار باعث افزایش سرعت می شود، زیرا با بالا رفتن سرعت در یک سیال غیرنیوتونی مانند خون، فشار نیز افزایش خواهد یافت. در سیالات غیرنیوتونی، رفتار سیال به شدت وابسته به شرایط جریان است و رابطه بین فشار و سرعت به صورت غیرخطی است. زمانی که سرعت جریان سیال افزایش می یابد، شکست شدگی های داخلی در سیال افزایش می یابد و مولکول ها به هم فشرده تر می شوند. این باعث افزایش نیروهای بین ذره ای در سیال می شود که در نتیجه فشار سیال نیز افزایش می یابد. مثلاً در خون که در این پژوهش هم سیال عامل خون می باشد، هنگامی که سرعت جریان خون افزایش می یابد (مانند جریان در عروق باریکتر و شلوغ تر)، فشار خون نیز افزایش خواهد یافت. این امر می تواند در برخی شرایط مانند آترواسکلروز، فشار خون بالا و مشکلات قلبی عروقی مهم باشد. البته، تأثیر افزایش سرعت بر فشار در سیالات غیرنیوتونی به عوامل دیگری مانند ویسکوزیته سیال و همچنین خواص رئولوژیکی آن بستگی دارد. بنابراین، این تأثیرات در هر سیستم خاص باید به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. در میکرومیکسرها نیز مانند رگ در بدن وقتی خون به موانع برخورد میکند باعث افزایش فشار و

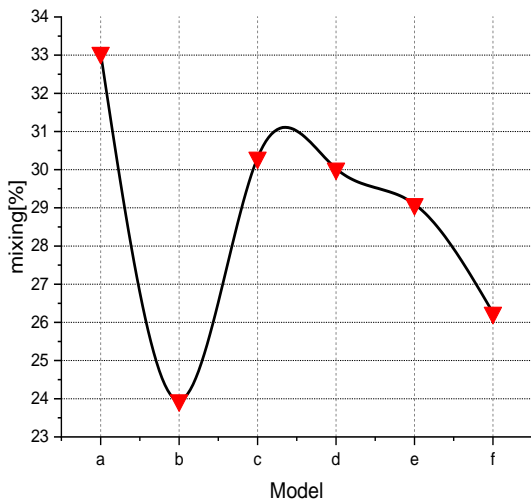
به ترکیب دقیق تر و همگن تر مواد می شود، که در بسیاری از صنایع و تحقیقات علمی بسیار اهمیت دارد. در نمودار (۳) می توان درصد اختلاط را مشاهده کرد.



شکل ۵ توزیع فشار برای ۶ مدل ارزیابی شده (Pa)



شکل ۴ توزیع سرعت برای ۶ مدل ارزیابی شده (m/s)



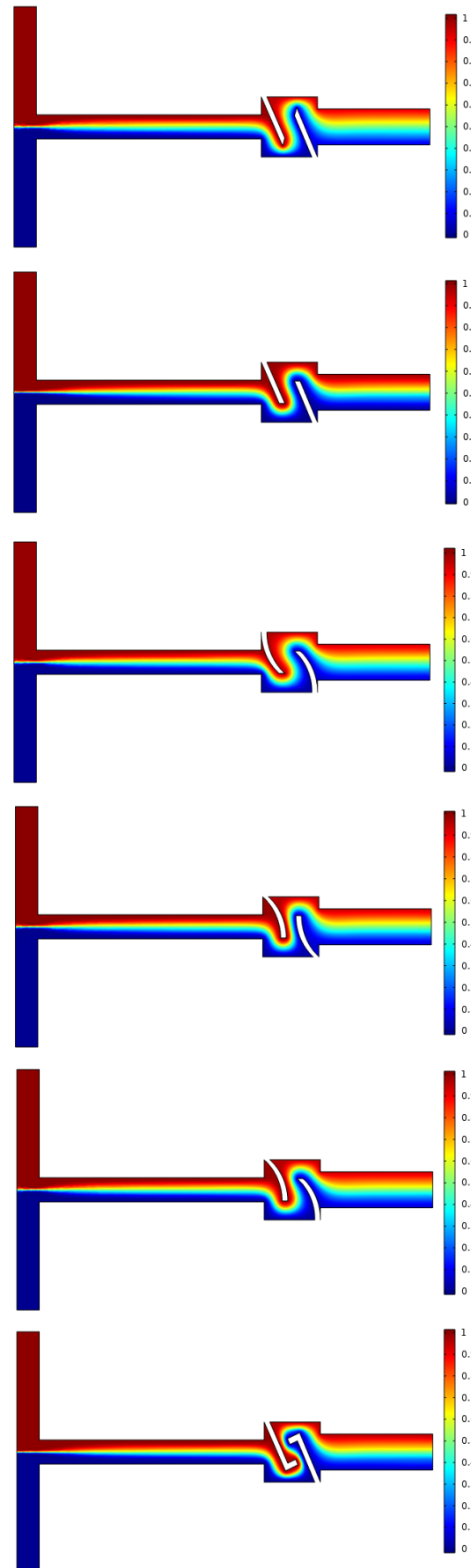
نمودار ۳ درصد اختلاط برای ۶ هندسه طراحی شده برای یک واحد دوره اختلاط

همانگونه که در نمودار (۳) مشاهده می شود بیشترین درصد اختلاط مربوط به هندسه a است، بعد از آن f, e, d, c دارای بهترین کیفیت اختلاط می باشند. اما این امر با توجه به افت فشار و نرخ برش دست خوش تغییرات می شود. همانگونه که قبل تر گفته شد در طراحی یک میکرومیکسر ۲ عامل بشدت قابل توجه می باشد که این دو عامل افت فشار و کیفیت اختلاط است. یعنی یک میکرومیکسر ایدآل باید با کمترین افت فشار بیشترین کیفیت اختلاط را داشته باشد تا یک میکرومیکسر بهینه و قابل قبول طراحی و ساخته شود. برای درک بهتر این موضوع می توان نمودار (۴) را مشاهده کرد.

در نمودار (۴) مدل هندسه طراحی شده دارای پارامترهای بیشترین سرعت، افت فشار و نرخ برش قابل مشاهده است. قبل تر در نمودار (۳) مشاهده شد که هندسه a دارای بهترین کیفیت اختلاط بود. اما در نمودار (۴) بهترین و کمترین افت فشار مربوط به هندسه c است.

با توجه به نمودار (۳) هندسه f دارای کیفیت اختلاط ۲۶ درصد می باشد، اما طبق نمودار (۴) هندسه f دارای بیشترین افت فشار، بیشترین سرعت و بیشترین نرخ برش می باشد که اصلا برای طراحی مناسب نیست. در آخر هندسه c با توجه به ۳۰ درصد اختلاط و کمترین نرخ برش و افت فشار، برای طراحی مناسب و بهینه می باشد، که این امر به لطف انحنا در پره های اختلاط به وجود آمده است.

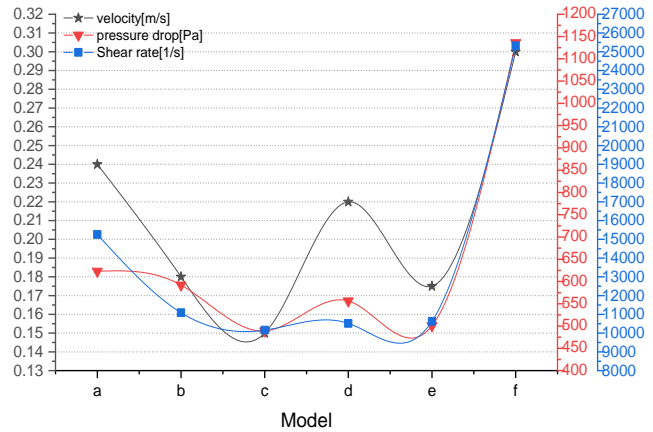
با توجه به مطالب گفته شده درباره نمودارهای (۳) و (۴) بهترین گزینه برای طراحی هندسه c است که در این پژوهش این هندسه در واحد های اختلاط ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۵ دوره مورد



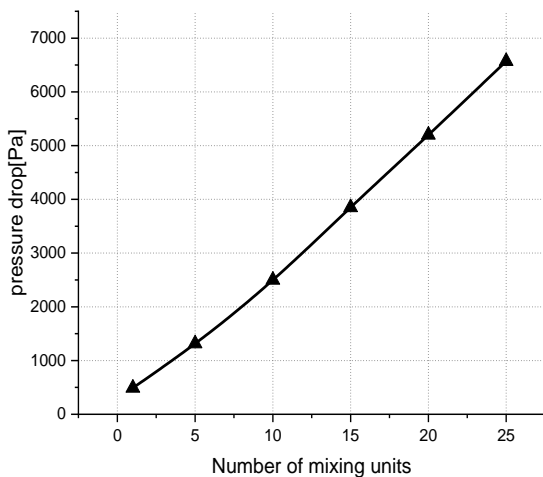
شکل ۶ توزیع غلظت برای ۶ مدل ارزیابی شده [۱]

انجام شده در دیگر پژوهش ها می باشد و با ۱۰ دوره اختلاط کیفیت اختلاط به ۷۳ درصد می رسد. همچنین در نمودار (۸) افت فشار برای مرجع [۴]، تا ۱۰ دوره اختلاط کمتر از هندسه طراحی شده در این پژوهش می باشد و این اختلاف فشار برای ۱ دوره ۲۲۸ پاسکال، ۵ دوره ۱۰۶۱ پاسکال و ۱۰ دوره ۲۰۹۰ پاسکال بدست آمده است. ولی در هندسه C طراحی شده در این پژوهش برای ۱ دوره ۴۹۰ پاسکال، ۵ دوره ۱۳۱۵ پاسکال و ۱۰ دوره ۲۵۰۰ پاسکال محاسبه شده است که با توجه به کیفیت اختلاط بدست آمده در این پژوهش افت فشار کمتری نسبت به سایر کار ها بدست آمده است، و این خود نقطه قوت طراحی هندسه C می باشد. در نمودار (۹) نیز می توان نمودار حداقل و حداکثر غلظت در خروجی کانال طبق تعداد واحد های اختلاط را مشاهده کرد. در شکل (۷) نیز می توان توزیع غلظت برای واحد های اختلاط برای هندسه C را مشاهده کرد.

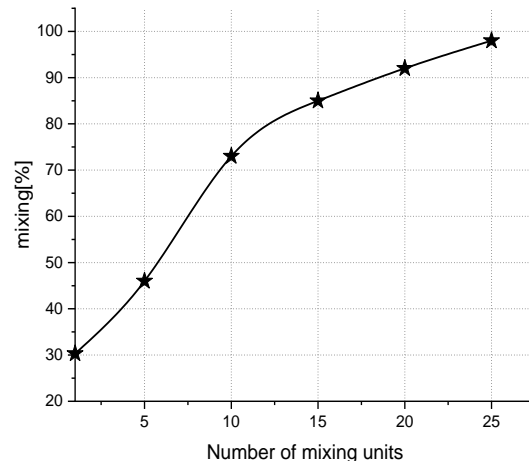
ارزیابی عددی قرار گرفته است. در نمودار (۵) می توان تغییرات درصد اختلاط را برای هندسه C مشاهده کرد.



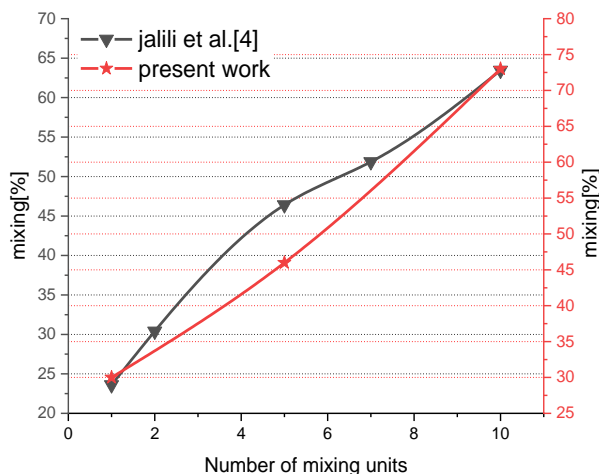
نمودار ۴ افت فشار، حداکثر سرعت و نرخ برش در ۶ هندسه مورد ارزیابی



نمودار ۶ تغییرات افت فشار هر دوره اختلاط برای هندسه C



نمودار ۵ تغییرات کیفیت هر دوره اختلاط برای هندسه C

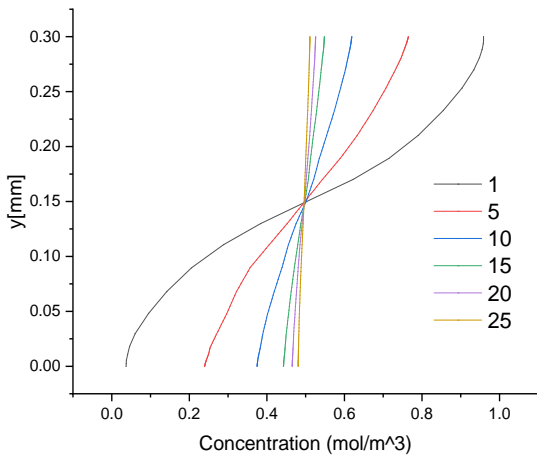


نمودار ۷ مقایسه کیفیت اختلاط برای ۱۰ دوره اختلاط انجام شده در این پژوهش با کار جلیلی و همکاران [۴]

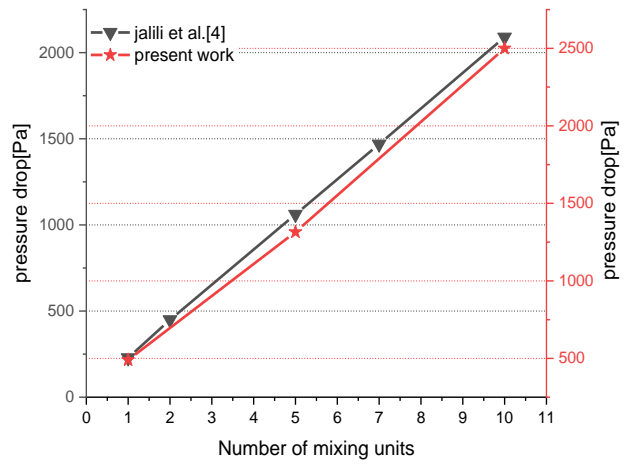
همچنین در نمودار (۶) می توان تغییرات فشار با افزایش دوره های اختلاط برای هندسه C را مشاهده کرد.

همانگونه که در نمودار (۶) مشاهده می شود با افزایش تعداد دوره های اختلاط افت فشار به صورت خطی بالا رفته و این امر در مرجع شماره [۴] نیز ذکر شده است. در نمودار (۷) می توان مقایسه کیفیت اختلاط برای ۱۰ واحد اختلاط با کار انجام شده در این پژوهش و کار انجام شده با کار جلیلی و همکاران [۴] را مشاهده کرد. در نمودار (۸) نیز مقایسه افت فشار محاسبه شده در این پژوهش با کار مرجع شماره [۴]، قابل مشاهده است.

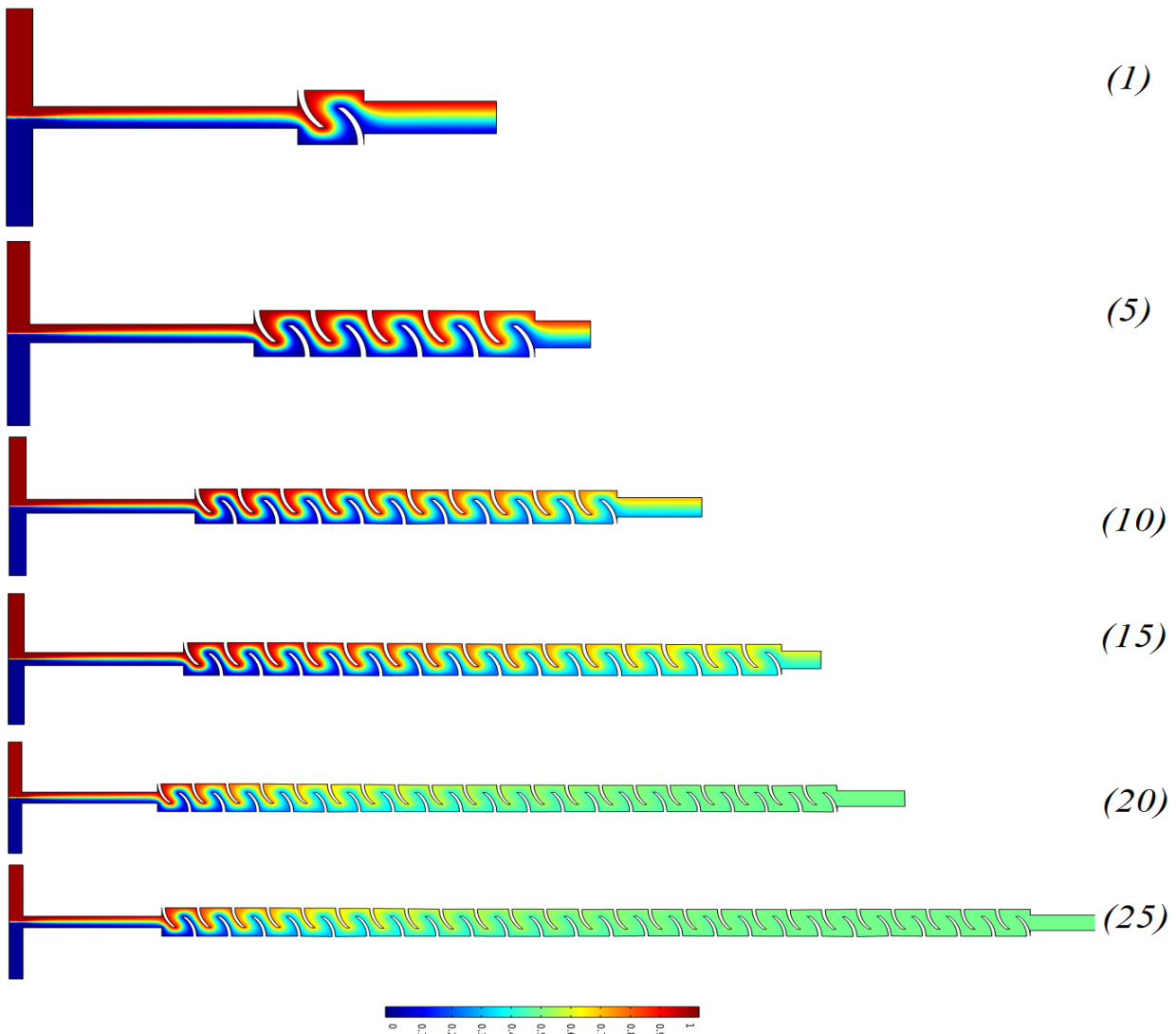
همانطور که در نمودار (۸) قابل مشاهده می باشد طراحی هندسه C دارای کیفیت اختلاط بالایی نسبت به طراحی های



نمودار ۹ حداقل و حداکثر غلظت در خروجی کانال طبق تعداد واحد های اختلاط



نمودار ۸ مقایسه افت فشار محاسبه شده در این پژوهش با کار مرجع شماره [۴]



شکل ۷ توزیع غلظت برای دوره های ۱ الی ۲۵ واحد اختلاط مربوط به هندسه C

۷- نتیجه گیری

دارای کمترین افت فشار و نرخ برش در مقابل دیگر هندسه ها است. همچنین هندسه C با توجه به افت فشار کم دارای کیفیت اختلاط مناسبی نسبت به سایر پژوهش ها می باشد و برای سیال خون با ۲۵ واحد اختلاط در کانال کیفیت بدست آمده برابر با ۹۸ درصد می باشد که می توان آن را برای استفاده در سیستم های شیمیایی مناسب دانست. بعد از هندسه C هندسه d دارای بهترین عملکرد بوده و بدترین هندسه مربوط به هندسه f می باشد که کمترین میزان کیفیت اختلاط، همراه با بالاترین افت فشار را دارا است.

شبیه سازی عددی برای ارزیابی کیفیت اختلاط در ۶ مدل هندسه متفاوت برای یک میکرومیکسر غیرفعال با تعداد واحد های اختلاط ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عددی به دست آمده توسط نرم افزار COMSOL Multiphysic (نسخه 6.1)، برای تجزیه و تحلیل بهبود کیفیت اختلاط و عامل MQ ارائه شد. نتایج حل عددی نشان داد برای سیال غیرنیوتونی بهترین هندسه برای اختلاط سیال خون هندسه C می باشد که

۸- مراجع

- [1] N.-T. Nguyen and Z. Wu, "Micromixers—a review," *Journal of micromechanics and microengineering*, vol. 15, p. R1, doi: 10.1088/0960-1317/15/2/R01, (2004).
- [2] M. A. Teamah, M. K. Dawood, and W. M. El-Maghlany, "Double diffusive natural convection in a square cavity with segmental heat sources," *Scientific Research*, vol. 54, pp. 287-301, 2011.
- [3] S. K. Sia and G. M. Whitesides, "Microfluidic devices fabricated in poly (dimethylsiloxane) for biological studies," *Electrophoresis*, vol. 24, pp. 3563-3576, doi: <https://doi.org/10.1002/elps.200305584>, (2003).
- [4] D. A. Fallah, M. Raad, S. Rezazadeh, and H. Jalili, "Increment of mixing quality of Newtonian and non-Newtonian fluids using T-shape passive micromixer: numerical simulation," *Microsystem Technologies*, vol. 27, pp. 189-199, doi: 10.1007/s00542-020-04937-z, (2021).
- [5] Y. Fang, Y. Ye, R. Shen, P. Zhu, R. Guo, Y. Hu, *et al.*, "Mixing enhancement by simple periodic geometric features in microchannels," *Chemical Engineering Journal*, vol. 187, pp. 306-310, doi: 10.1016/j.cej.2012.01.130, (2012).
- [6] B. J. Kim, S. Y. Yoon, K. H. Lee, and H. J. Sung, "Development of a microfluidic device for simultaneous mixing and pumping," *Experiments in fluids*, vol. 46, pp. 85-95, doi:10.1007/S00348-008-0541-1, (2009).
- [7] A. Shamloo, M. Mirzakhaneloo, and M. R. Dabirzadeh, "Numerical simulation for efficient mixing of newtonian and non-newtonian fluids in an electro-osmotic micro-mixer," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 107, pp. 11-20, doi: 10.1016/j.cep.2016.06.003, (2016).
- [8] A. Afzal and K.-Y. Kim, "Flow and mixing analysis of non-Newtonian fluids in straight and serpentine microchannels," *Chemical Engineering Science*, vol. 116, pp. 263-274, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.021>, (2014).
- [9] X. Dong, K. Yaji, and X. Liu, "Optimum design of micromixer for a non-Newtonian fluid by topology optimization," *Chemical Engineering Journal*, vol. 428, p. 131367, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131367>, (2022).
- [10] S. Tokas, M. Zunaid, and M. A. Ansari, "Non-Newtonian fluid mixing in a Three-Dimensional spiral passive micromixer," *Materials Today: Proceedings*, vol. 47, pp. 3947-3952, doi: 10.47176/JAFM.16.04.1450, (2021).
- [11] G. Kunti, A. Bhattacharya, and S. Chakraborty, "Analysis of micromixing of non-Newtonian fluids driven by alternating current electrothermal flow," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 247, pp. 123-131, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2017.06.010>, (2017).
- [12] N. T. Tayeb, K. Amar, K. Sofiane, L. Lakhdar, and L. Yahia, "Thermal mixing performances of shear-thinning non-Newtonian fluids inside Two-Layer Crossing Channels Micromixer using entropy generation method: Comparative study," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 156, p. 108096, doi: 10.15282/jmes.13.4.2019.15.0471, (2020).
- [13] A. Kumar Bansal, G. K. Nhaichaniya, M. Bhardwaj, and S. Chitnis, "Micromixing Optimization of Non-Newtonian Fluids with Heterogeneous Zeta Potential," *Engineering Research Express*, doi: 10.1088/2631-8695/acecda, (2023).
- [14] A. Kouadri, E. Douroum, Y. Lasbet, T. T. Naas, S. Khelladi, and M. Makhlof, "Comparative study of mixing behaviors using non-Newtonian fluid flows in passive micromixers," *International*

- Journal of Mechanical Sciences*, vol. 201, p. 106472, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106472, (2021).
- [15] S. Baheri Islami, M. Khezerloo, and R. Gharraei, "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*, vol. 39, pp. 813-831, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-016-0689-1>, (2017).
- [16] M. M. Tatlısoz and Ç. Canpolat, "Pulsatile flow micromixing coupled with ICEO for non-Newtonian fluids," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 131, pp. 12-19, doi: 10.1016/j.cep.2018.07.002, (2018).
- [17] H. Lv and X. Chen, "New insights into the mixing behavior of Non-Newtonian fluid in electroosmotic micromixer," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, p. 181, doi: 10.1007/s40430-022-03502-1, (2022).
- [18] E. Nematollahi and M. Sefid, "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*, vol. 19, pp. 833-844, doi: <http://mme.modares.ac.ir/article-15-24042-en.html>, (2019).
- [19] A. Shamloo, M. Madadelahi, and S. Abdorahimzadeh, "Three-dimensional numerical simulation of a novel electroosmotic micromixer," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 119, pp. 25-33, doi: <https://doi.org/10.1007/s11012-019-01018-y>, (2017).
- [20] J. Yang, Y. Chen, C. Du, X. Guan, and J. Li, "Numerical simulation of electroosmotic mixing of non-Newtonian fluids in a micromixer with zeta potential heterogeneity," *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, vol. 186, p. 109339, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109339>, (2023).