



Enhancing Mixing Efficiency in a Passive Micromixer Using the Acoustic Active Method

Nima Nazarzadeh¹, Farid Dolati^{2*}

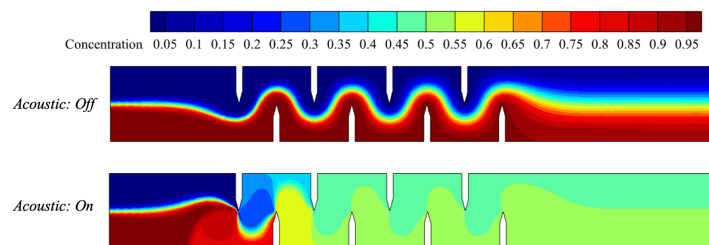
¹Bachelor's student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran. Email Address: nimaa.nzd@gmail.com

²Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran (Correspondence). Email Address: farid.dolati@gmail.com

HIGHLIGHTS

- Enhancing mixing efficiency.
- Optimized synergy of active and passive mixing mechanisms.
- Proposing a new pathway for micromixer design.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 25 May 2025

Received in revised form: 29 July 2025

Accepted: 09 September 2025

Available online: 23 September 2025

Keywords:

Acoustic micromixer

Active and passive mixing

Numerical simulation

Mixing efficiency

Optimized geometry

ABSTRACT

Vibration energy harvesting is one of the methods that is used as energy supply for electronic devices that have low power consumption (such as sensors). With the advent of piezoelectrics and due to the properties of piezoelectric materials, they were quickly introduced as one of the most common materials for energy harvesting. Currently, vibration energy harvesting with piezoelectric material can produce more than 300 microwatts per square centimeter of power. Piezopolymers are one of the types of piezoelectric materials. In this work, with the help of EAPap piezopolymer materials, which are a thin film of cellulose, energy-harvesting beams have been made. By changing the location of the piezoelectric along the length of the cantilever beam, the changes in voltage, current and output power have been investigated. It can be seen that by changing the position of the piezoelectric on the beam and getting closer to the end of the beam, the output power, current and voltage have also increased due to the increase in the amount of strain.

Cite this article: Nazarzadeh N, Dolati F. Enhancing Mixing Efficiency in a Passive Micromixer Using the Acoustic Active Method. *Aerospace Mechanics*. 2025; 21(3):59-66. DOI:<https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1501>

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights


Publisher: Imam Hossein University.



OPEN ACCESS



بهبود کارایی اختلاط در یک میکرومیکسر غیر فعال با استفاده از روش فعال آکوستیک

نیما نظرزاده آبکنار^۱، فرید دولتی^{۲*} 

^۱ دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. رایانامه: nima.nzd@gmail.com
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. (نویسنده مسئول). رایانامه: farid.dolati@gmail.com

برجسته‌ها

- بهبود کارایی اختلاط.
- هم‌افزایی بهینه شده مکانیسم‌های اختلاط فعال و غیرفعال.
- ارائه مسیر جدید برای طراحی میکرومیکسرها

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

میکرومیکسر آکوستیک

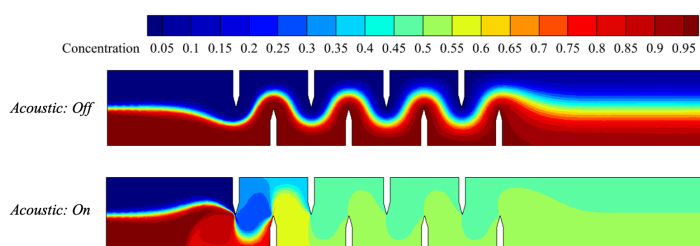
اختلاط فعال و غیرفعال

شبیه‌سازی عددی

نرخ اختلاط

هندسه بهینه

چکیده گرافیکی



چکیده

در این پژوهش، یک میکرومیکسر آکوستیک ترکیبی که از سازوکارهای اختلاط فعال و غیرفعال بهره می‌برد، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی مانند طول، عرض و ارتفاع ستون‌ها، زاویه لبه‌های تیز، و فاصله بین آن‌ها بر عملکرد اختلاط سیال است. برای این منظور، شبیه‌سازی‌های عددی در نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک انجام شده و تغییرات الگوهای جریان، شدت گردابه‌ها و نرخ اختلاط مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان داد که افزایش ارتفاع ستون‌ها موجب تقویت ساختارهای گردابی و بهبود نرخ اختلاط می‌شود. همچنین، کاهش عرض ستون‌ها اثر مثبتی بر میزان اختلاط داشته، درحالی‌که افزایش آن موجب کاهش بازدهی اختلاط شده است. کاهش فاصله بین لبه‌های تیز نرخ اختلاط را افزایش داده که نشان‌دهنده تفاوت رفتار میکرومیکسرها ترکیبی با مدل‌های صرفاً آکوستیک است. در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب مکانیسم‌های فعال و غیرفعال در کنار بهینه‌سازی هندسی، می‌تواند بهبود چشمگیری در عملکرد میکرومیکسرها را آکوستیک ایجاد کند. این یافته‌ها مسیر جدیدی را برای طراحی نسل آینده میکرومیکسرها کارآمدتر ارائه می‌دهد.

استاد: نظرزاده آبکنار نیما، دولتی فرید. بهبود کارایی اختلاط در یک میکرومیکسر غیرفعال با استفاده از روش فعال آکوستیک. هوا فضا. (۳) ۲۱: ۵۹-۶۶.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2025.1501>

نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند. ©



ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع). OPEN ACCESS

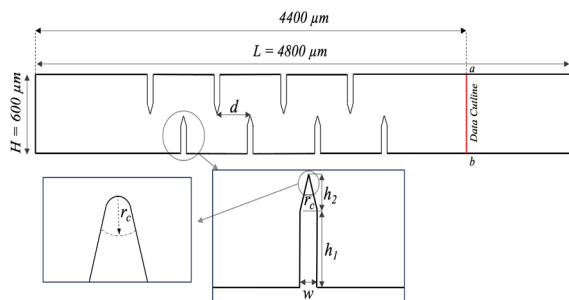
۱- مقدمه

مهمی در عملکرد میکسرهای ترکیبی دارند. تحقیقات نشان داده‌اند که میزان انرژی ورودی به سیستم می‌تواند به‌طور مستقیم بر الگوهای اختلاط تأثیر بگذارد [۱۱]. در همین راستا، مدل‌های کلی برای توصیف فرآیندهای اختلاط در سیستم‌های میکروفولوییدیک ارائه شده است که می‌تواند در طراحی بهینه میکسرهای آکوستیک مورد استفاده قرار گیرد [۲۱]. اخیراً تحقیقات متعددی به بررسی تأثیر استفاده از نوسانات آکوستیکی در مقیاس میکرو برای افزایش نرخ اختلاط پرداخته‌اند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب امواج آکوستیکی با کانال‌های خمیده و موانع داخلی می‌تواند باعث بهبود الگوهای جریان شده و در نتیجه، فرآیند اختلاط را تسریع کند [۲]. همچنین، بررسی جریان آکوستیکی در نزدیکی لبه‌های تیز نشان داده است که این ساختارها می‌توانند در تولید گردابه‌های پایدار و بهبود فرآیند اختلاط مؤثر باشند [۸]. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از رمپ‌ها در طراحی میکرومیکسر می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر برای بهبود اختلاط سیالات مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، مدل‌سازی‌های عددی جریان‌های آشفته و تولید امواج صوتی نیز می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی میکرومیکسرهای آکوستیک مفید باشد. نتایج مدل‌سازی صدای حاصل از یک جت آشفته نشان داده است که تحلیل‌های عددی می‌تواند در پیش‌بینی رفتار صوتی و بهبود طراحی سیستم‌های آکوستیکی مؤثر باشد [۱۴]. این رویکردها می‌توانند در طراحی میکرومیکسرهای آکوستیک با هندسه‌های پیچیده و استفاده از تحریک آکوستیکی برای افزایش راندمان اختلاط مفید واقع شوند. از سوی دیگر، میجر و همکاران [۱۰] نشان داده‌اند که استفاده از میکرو حباب‌های جاسازی شده در سیستم‌های میکروفولوییدیک می‌تواند به‌عنوان یک فن نوین برای تغییر مسیر جریان و افزایش نرخ اختلاط به کار رود. این روش علاوه بر افزایش سطح تماس سیال، باعث افزایش نیروی محرک در مقیاس میکرو شده و در نتیجه، کارایی فرآیند اختلاط را ارتقا می‌دهد. علاوه بر این، مطالعات ژو و همکاران [۱] تأکید دارند که میزان بهره‌وری یک میکرومیکسر ترکیبی نه تنها به پارامترهای طراحی بستگی دارد، بلکه نحوه تعامل بین میدان‌های فیزیکی مختلف نیز نقش بسزایی در عملکرد کلی دارد. این موضوع اهمیت مطالعه برهم‌کنش میان پارامترهای هیدرودینامیکی، صوتی و حرارتی را برجسته می‌سازد. تحقیقات هسل و همکاران و کوین و همکاران [۱۱، ۱۲] نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی برای ارزیابی کیفیت اختلاط ضروری است. این رویکردها شامل روش‌های تصویربرداری، تحلیل عددی و مدل‌سازی دینامیکی هستند که می‌توانند الگوهای جریان و توزیع غلظت را در مقیاس میکرو با دقت بالا بررسی کنند.

میکرومیکسرهای یکی از اجزای کلیدی در سیستم‌های میکروفولوییدیک هستند که در بسیاری از کاربردهای زیستی، شیمیایی و مهندسی در ابعاد میکرو و ماکرو [۱۳] به کار گرفته می‌شوند. از آنجاکه در مقیاس میکرونی، جریان سیال عمدتاً آرام بوده و اثرات آشفتگی قابل چشم‌پوشی است، دستیابی به یک فرآیند اختلاط مؤثر چالش برانگیز خواهد بود [۱]. برای حل این مسئله، روش‌های متنوعی توسعه داده شده‌اند که به دودسته کلی میکسرهای غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند [۲]. میکسرهای غیرفعال عمدتاً بر پایه طراحی هندسی کانال‌ها عمل کرده و از موانع، انشعابات یا جریان‌های ثانویه برای افزایش اختلاط استفاده می‌کنند [۳]. این روش‌ها، اگرچه نیاز به منبع انرژی خارجی ندارند و عملکرد ساده‌ای دارند، اما معمولاً برای دستیابی به راندمان اختلاط بالا، نیازمند طراحی‌های پیچیده و طول کانال‌های بیشتر هستند [۴]. در مقابل، میکسرهای فعال با استفاده از محرک‌های خارجی، مانند میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی، یا آکوستیکی، میزان اختلاط را بهبود می‌بخشد [۵]. در این میان، میکسرهای آکوستیک به دلیل قابلیت تنظیم پارامترهای تحریک و عدم نیاز به تماس فیزیکی مستقیم، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۶]. میکسرهای آکوستیک از امواج صوتی برای ایجاد جریان‌های ثانویه درون سیال استفاده می‌کنند. یکی از سازوکارهای اصلی در این روش، پدیده جریان آکوستیکی است که از تعامل امواج صوتی با مرزهای جامد ایجاد شده و باعث حرکت غیرخطی سیال می‌شود [۷]. مطالعات نشان داده‌اند که هندسه‌های خاصی، مانند لبه‌های تیز، می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر میزان اختلاط داشته باشند [۸]. به‌عنوان مثال، استفاده از لبه‌های تیز در کنار امواج صوتی می‌تواند نرخ اختلاط را افزایش داده و عملکرد میکرومیکسر را بهبود بخشد [۹].

با توجه به این مزایا، ترکیب روش‌های غیرفعال و فعال برای بهینه‌سازی عملکرد میکرومیکسر پیشنهاد شده است. در این رویکرد، از ساختارهای هندسی پیچیده برای ایجاد جریان‌های ثانویه و از تحریک آکوستیکی برای افزایش حرکت سیال و کاهش زمان اختلاط استفاده می‌شود [۱۰]. مطالعات نشان داده‌اند که این ترکیب می‌تواند عملکردی به مراتب بهتر از روش‌های منفرد ارائه دهد. برای مثال، برخی پژوهش‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی تأثیر ترکیب هندسه‌های پیچیده و تحریک آکوستیکی را بررسی کرده و نشان داده‌اند که این روش می‌تواند راندمان اختلاط را به شکل چشمگیری افزایش دهد [۹]. علاوه بر طراحی هندسی و تحریک آکوستیکی، پارامترهای دیگری مانند شدت میدان صوتی، فرکانس تحریک، و چیدمان لبه‌های تیز نیز نقش

هیدرودینامیکی میکرومیکسر و در نتیجه بهینه‌سازی فرآیند اختلاط است. ستون‌های عمودی و لبه‌های مثلثی با ابعاد دقیق به‌طور عمده موجب افزایش برهم زدگی جریان و بهبود توزیع سیال در طول مسیر اختلاط می‌شوند. در عین حال، این تغییرات هندسی موجب کاهش افت فشار در سیستم نیز می‌گردد، زیرا با بهبود تعاملات جریان و توزیع بهینه انرژی، مقاومتی کمتر در برابر جریان سیال ایجاد می‌شود. این اصلاحات نه تنها عملکرد اختلاط را بهبود می‌بخشند، بلکه منجر به افزایش یکنواختی غلظت در فرآیند اختلاط نیز می‌شوند. همچنین داده‌های به‌دست آمده در فاصله ۴۴۰۰ میکرومتری با استفاده از یک مقطع خطی به نام (ab) ثبت شده‌اند. این مقطع به منظور تحلیل تغییرات پارامترهای موردنظر در طول این بازه انتخاب شده و داده‌ها بر اساس آن استخراج شده‌اند.



شکل ۱: هندسه میکرو میکسر مطالعه شده در پژوهش حاضر

۳- معادلات حاکم

در این مطالعه، عملکرد میکرومیکسر آکوستیکی با استفاده از مدل‌سازی جریان سیال، صوت و انتقال جرم مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور توصیف پدیده‌های فیزیکی موجود، معادلات حاکم که بر اساس روش‌های عددی و تحلیل‌های پیشین توسعه یافته‌اند، به شرح زیر ارائه می‌شوند.

۳-۱- معادلات دینامیک سیالات

با توجه به مقیاس میکرونی و عدد رینولدز پایین، جریان در محدوده آرام قرار دارد و می‌توان آن را به‌عنوان یک سیال تراکم ناپذیر مدل‌سازی کرد. در نتیجه، معادله پیوستگی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\nabla \cdot v_s = 0 \quad (1)$$

علاوه بر این، معادله مومنتوم که اثرات استریمینگ آکوستیک را در نظر می‌گیرد، به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$(\nabla \cdot v_s) v_s = -\frac{1}{\rho} \nabla p_s + \nu \nabla^2 v_s - F_s \quad (2)$$

با توجه به اهمیت موضوع، در این پژوهش یک طراحی جدید برای میکرومیکسر آکوستیک ارائه شده است که ترکیبی از میکسرهای غیرفعال و فعال را شامل می‌شود. در این طراحی، از هندسه‌های ویژه‌ای برای تغییر مسیر جریان و بهینه‌سازی میزان اختلاط استفاده شده و اثرات تحریک آکوستیکی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این پژوهش می‌تواند در بهینه‌سازی عملکرد میکرومیکسرهای آکوستیک و طراحی نسل جدیدی از این تجهیزات مؤثر باشد.

۲- هندسه

در پژوهش حاضر، یک طراحی جدید برای یک میکرومیکسر غیرفعال با استفاده از روش فعال آکوستیکی بر اساس مدل ارائه شده توسط ژانگ و همکاران [۹] پیشنهاد شده است. هندسه موردنظر تنها بر لبه‌های میکرومیکسر متمرکز بوده است. هندسه جدید به‌طور خاص به گونه‌ای طراحی شده که لبه‌ها به صورت ستون‌های عمودی با ابعاد دقیق و مشخص ایجاد شوند که در شکل (۱) قابل مشاهده است. ابعاد این ستون‌ها برای عرض آن‌ها ۴۷/۵، ۵۲/۵، و ۵۷/۵ میکرومتر، و برای ارتفاع ۱۷۵، ۲۰۰، و ۲۲۵ میکرومتر در نظر گرفته شده که طراحی آن‌ها با هدف افزایش کارایی اختلاط و بهینه‌سازی جریان سیال در نظر گرفته شده است. در قسمت بالای این ستون‌ها، لبه‌ها به شکل مثلثی و تیز طراحی شده‌اند. ارتفاع لبه‌های تیز بر روی ستون‌ها ۹۰، ۱۰۰، و ۱۱۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است که موجب ایجاد برخورد‌های شدیدتر جریان در ناحیه ابتدای ستون‌ها می‌شود. این ویژگی باعث بهبود اختلاط جریان و توزیع یکنواخت‌تر ترکیب سیال در داخل میکرومیکسر می‌شود. لبه‌های مثلثی، به‌عنوان ویژگی‌های فعال، نقش مهمی در هدایت جریان و افزایش تعاملات میان سیال‌ها ایفا می‌کنند و به‌طور مؤثری موجب بهبود اختلاط می‌شوند. علاوه بر این، فاصله میان ستون‌ها برابر ۲۰۰، ۳۰۰، و ۴۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شده است که این فاصله برای ایجاد فضای کافی برای جریان سیال و همچنین جلوگیری از تداخل‌های غیرضروری میان لبه‌ها و اختلال در مسیر جریان طراحی شده است. این طراحی موجب می‌شود که جریان سیال به‌طور آزادانه‌تر حرکت کرده و در عین حال تحت تأثیر تغییرات هندسی لبه‌ها قرار گیرد. در کنار این طراحی، شعاع انحنا در نوک لبه‌ها برابر با ۲ میکرومتر در نظر گرفته شده است. این ویژگی، با توجه به مقیاس میکرو، باعث کاهش نقاط فشار و همچنین جلوگیری از ایجاد الگوهای جریان ناخواسته در میکرومیکسر می‌شود. شعاع انحنا به‌طور مؤثر در هدایت جریان سیال به سمت نواحی چرخشی و ایجاد برهم خوردگی بیشتر تأثیرگذار است، که در نتیجه به فرآیند اختلاط بهتر کمک می‌کند. هدف از این اصلاحات هندسی، بهبود رفتار

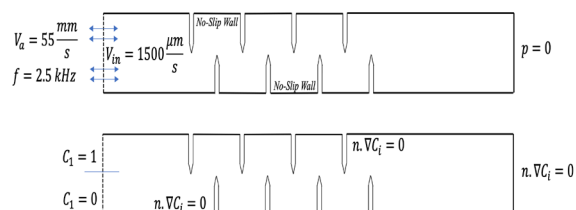
$$-D_i \nabla^2 + v \cdot \nabla C_i = 0 \quad (8)$$

$$D_i = \frac{k_b T}{6\pi\mu r} \quad (9)$$

که در آن، D_i ضریب نفوذ گونه i ، C_i غلظت مولی گونه i ، v میدان سرعت ترکیبی جریان اصلی و استریمینگ آکوستیکی، k_b ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، و r شعاع ذره حل شده است [۹].

۴- شرایط مرزی

در این مطالعه، دو سیال با غلظت‌های متفاوت به میکرومیکسر وارد می‌شوند. غلظت اولیه یکی از سیالات برابر با ۱ مول بر مترمکعب و دیگری برابر با ۰ مول بر مترمکعب است. این سیالات با سرعت ورودی ۱۵۰۰ میکرومتر بر ثانیه وارد کانال می‌شوند. در ابتدای کانال، یک عنصر پیزوالکتریک^۱ با فرکانس تحریکی ۲٫۵ کیلوهرتز قرار داده شده است که با ایجاد ارتعاش، یک سرعت آکوستیکی به مقدار ۵۵ میکرومتر بر ثانیه را درون کانال القا می‌کند. این ارتعاش منجر به لرزش لبه‌های کانال شده و بر فرآیند اختلاط تأثیر می‌گذارد. از نظر شرایط مرزی، دیواره‌های کانال به صورت دیواره‌های صلب و بدون لغزش مدل‌سازی شده‌اند. این فرض باعث می‌شود که سیال تماس با مرز جامد، سرعتی معادل با سرعت مرز جامد داشته باشد. علاوه بر این، در خروجی کانال، شرط فشار صفر اعمال شده است [۹].



شکل ۲: شرایط مرزی اعمال شده در میکرو میکسر.

۵- شبکه بندی

در این مطالعه، فرایند مش بندی در نرم افزار کامسول مولتی فیزیک^۲ با استفاده از المان‌های مثلثی انجام شده است. برای بهبود دقت در نواحی نزدیک به دیواره‌های کانال، از لایه مرزی با ۳ لایه استفاده شده که در آن ضریب کشیدگی^۳ برابر با ۱/۲ و ضریب تنظیم ضخامت^۴ برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. این تنظیمات به افزایش دقت شبیه سازی در نواحی با گرادینان‌های بالای سرعت و غلظت کمک می‌کند.

که در آن v_s بردار سرعت ناشی از استریمینگ آکوستیکی، p_s فشار استریمینگ، F_s نیروی محرک حاصل از نوسانات آکوستیکی و v ویسکوزیته سینماتیکی سیال است [۹].

۳-۲- معادلات حاکم بر استریمینگ آکوستیکی

در اثر تحریک آکوستیکی در فرکانس ω ، میدان‌های سرعت و فشار شامل سه مؤلفه اصلی هستند:

$$v = v_0 + v_\omega + v_s, \quad v_\omega = \text{Re}(v_a e^{-i\omega t}) \quad (3)$$

$$p = p_0 + p_\omega + p_s, \quad p_\omega = \text{Re}(p_a e^{-i\omega t}) \quad (4)$$

که در آن، v_0 جریان اصلی، v_ω مؤلفه نوسانی، و v_s جریان استریمینگ است [۹]. با جایگذاری این روابط در معادلات ناویر-استوکس، دو مجموعه معادله برای حل میدان‌های سرعت و فشار استخراج می‌شوند:

۳-۳- معادله حاکم بر دینامیک جریان نوسانی آکوستیکی

در این روابط، مؤلفه‌های نوسانی و استریمینگ به صورت مجزا مورد بررسی قرار می‌گیرند تا دینامیک کلی میدان جریان تعیین شود [۹]. در این روابط بیانگر مزدوج مختلط مؤلفه نوسانی سرعت است.

$$i\omega v_a + ((v_s + v_0) \cdot \nabla) v_a + (v_a \cdot \nabla)(v_s + v_0) = -\frac{1}{\rho} \nabla p_a + v \nabla^2 (v_a) \quad (5)$$

$$((v_s + v_0) \cdot \nabla)(v_s + v_0) + \frac{1}{2} \text{Re}[(v_a \cdot \nabla) v_a^*] = -\frac{1}{\rho} \nabla p_s + v \nabla^2 (v_s + v_0) \quad (6)$$

معادله نیروی محرک حاصل از نوسانات آکوستیکی (که معمولاً به عنوان نیروی استریمینگ یا نیروی ناشی از تنش‌های رینولدزی شناخته می‌شود) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_s = \frac{1}{2} \text{Re}[\langle (v_a \cdot \nabla) v_a^* \rangle] \quad (7)$$

۴-۳- معادله انتقال جرم

انتقال جرم بین دو جریان ورودی به میکرومیکسر توسط معادله همرفت-پخش کلاسیک بیان می‌شود:

¹Piezoelectric

²COMSOL Multiphysics

³Stretching Factor

⁴Thickness Adjustment Factor

۷- نتایج

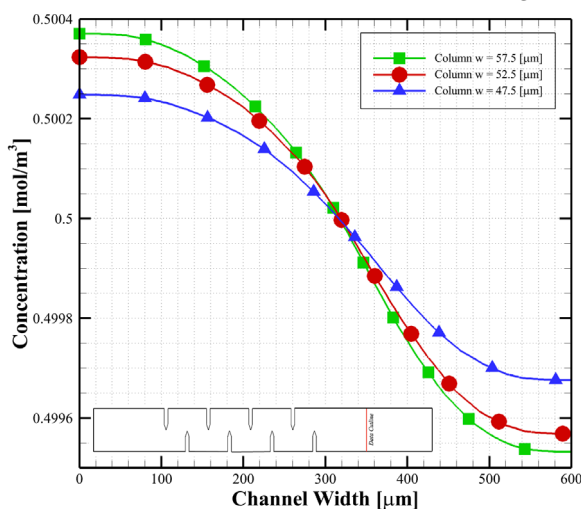
در این مطالعه، تأثیر پارامترهای هندسی میکرومیکسر بر نرخ اختلاط بررسی شده است. تحلیل‌ها بر روی تغییرات عرض و طول ستون‌های داخلی و همچنین ارتفاع و زاویه مثلث بالایی انجام شده است. این تغییرات منجر به تغییر در اثرات هیدرودینامیکی و در نتیجه بهبود یا کاهش نرخ اختلاط شده است. مطابق با روابط جریان آکوستیکی، نرخ اختلاط (MI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MI = \left(1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - C_{avg})^2}}{C_{avg}} \right) \times 100 \quad (1)$$

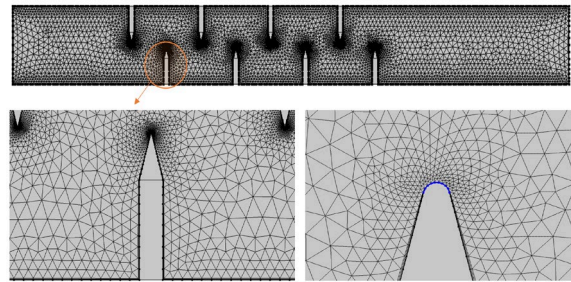
که در آن C_i غلظت در هر نقطه نمونه‌برداری شده است، C_{avg} میانگین غلظت در مقطع خروجی، C_{avg} تعداد نقاط نمونه‌برداری است.

۷-۱- تأثیر تغییرات عرض ستون‌های داخلی

یکی از پارامترهای بررسی شده در این پژوهش، تغییر عرض ستون‌های داخلی (w) میکرومیکسر بود. نتایج نشان داد که با افزایش عرض ستون‌ها، نرخ اختلاط کاهش یافته است. این کاهش به این دلیل است که افزایش عرض ستون باعث کاهش میزان ناحیه تأثیرپذیر از امواج آکوستیکی شده و در نتیجه، جریان‌های گردابی ضعیف‌تر ایجاد می‌شوند. علاوه بر این، افزایش عرض ستون با افزایش زاویه‌ی مثلث بالایی رابطه‌ی مستقیم دارد که این امر خود می‌تواند الگوهای جریان را تغییر دهد. از سوی دیگر، با کاهش عرض ستون‌ها، نرخ اختلاط بهبود یافته است، زیرا ناحیه‌ی فعال شده توسط امواج آکوستیکی افزایش یافته و جریان‌های ثانویه قوی‌تری ایجاد شده‌اند. این نتایج در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.



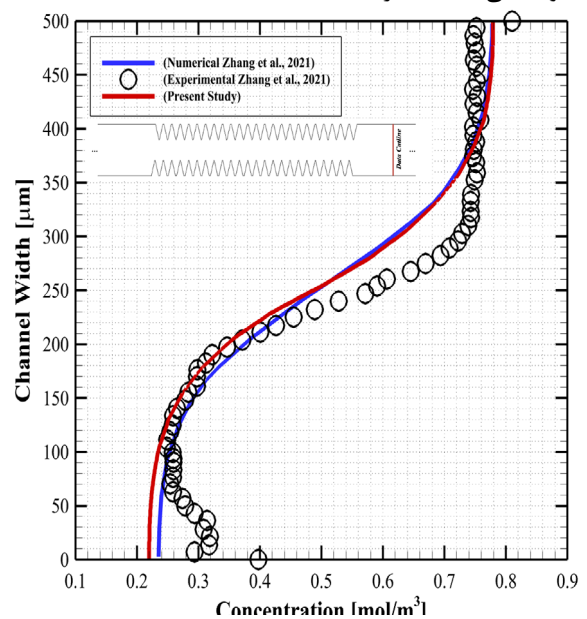
شکل ۵: مقایسه غلظت در تغییر عرض لبه‌های ستون‌های داخلی (w).



شکل ۳: نماهایی از شبکه‌بندی میکرو میکسر.

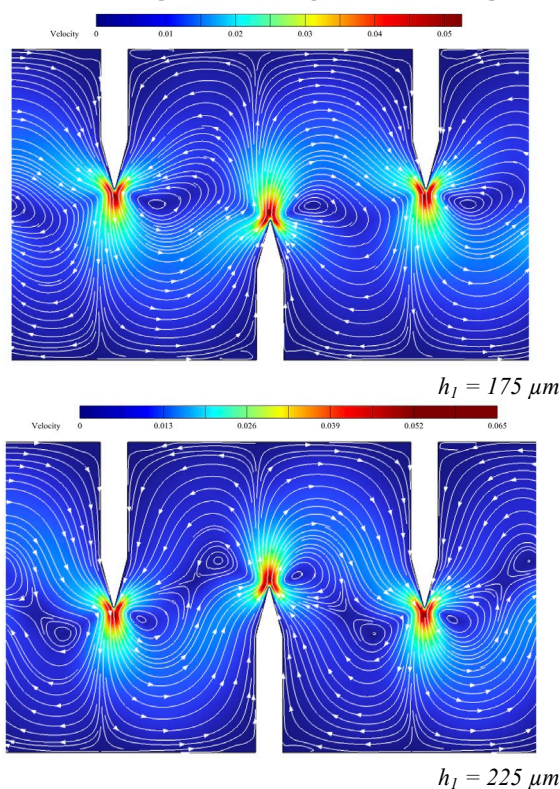
۶- اعتبار سنجی

به منظور بررسی صحت مدل عددی، نتایج به دست آمده با داده‌های ارائه شده در مطالعه‌ی ژانگ و همکاران [۹] مقایسه شده است. در این مقایسه، شرایط عملیاتی مطابق مقاله‌ی مرجع در نظر گرفته شده است، به گونه‌ای که دبی ورودی سیال برابر با ۸ میکرولیتر بر دقیقه، سرعت آکوستیکی اعمال شده ۸۵ میلی‌متر بر ثانیه و فرکانس تحریک ۲/۵ کیلوهرتز تنظیم شده است. با توجه به شکل ۴، الگوی جریان و توزیع غلظت در خروجی میکرومیکسر در این مطالعه با نتایج مقاله‌ی ژانگ تطابق بالایی دارد. همچنین، بر اساس شکل نمودار ۴، مقادیر شاخص اختلاط محاسبه شده برای مدل عددی پیشنهادی با مقادیر ارائه شده در مقاله‌ی مرجع بسیار نزدیک بوده و اختلاف میان نتایج در محدوده‌ی قابل قبول قرار دارد. این مقایسه نشان می‌دهد که مدل عددی توسعه یافته در این مطالعه قادر است پدیده‌های هیدرودینامیکی و اثرات آکوستیکی را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. بنابراین، می‌توان از این مدل برای بررسی و بهینه‌سازی طراحی میکرومیکسرهای آکوستیکی استفاده کرد.



شکل ۴: اعتبار سنجی نمودار غلظت و مقایسه با نتایج ژانگ و همکاران [۹].

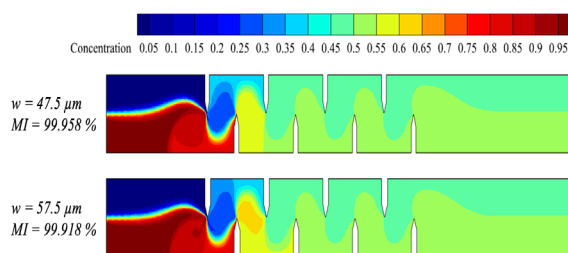
برای تشریح فیزیک اثرگذاری ارتفاع ستون‌ها، توزیع سرعت و خطوط جریان در دو ارتفاع در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، افزایش ارتفاع ستون باعث ایجاد جریان‌های چرخشی قوی‌تری در ناحیه‌ی اختلاط بیشتر شده است. این امر به بهبود برهم‌کنش بین امواج آکوستیکی و جریان زمینه منجر شده که نقش کلیدی در افزایش نرخ اختلاط دارد. در مقابل، کاهش ارتفاع ستون باعث تضعیف این جریان‌های چرخشی شده که کاهش نرخ اختلاط را در پی داشته است.



شکل ۹: توزیع سرعت و خطوط جریان با تغییر ارتفاع ستون‌های داخلی (h_2).

۷-۳- تأثیر تغییر زاویه‌ی لبه تیز (ارتفاع لبه تیز) ستون‌ها

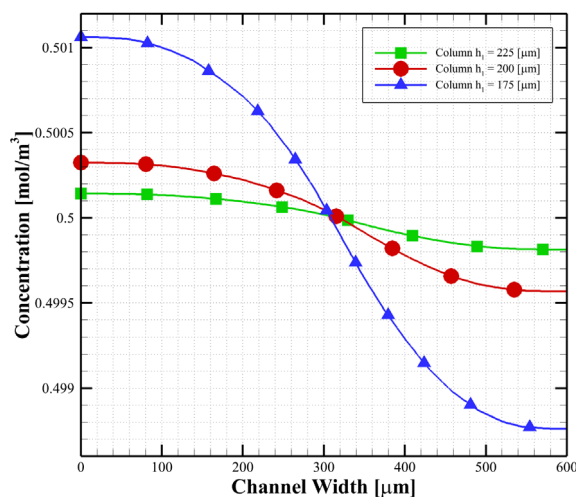
در این بخش، تأثیر تغییر ارتفاع لبه تیز (h_2) روی ستون‌ها بر نرخ اختلاط موردبررسی قرار گرفته است. مطابق با نتایج، افزایش ارتفاع لبه‌های تیز، نرخ اختلاط را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده است (شکل ۱۰ و ۱۱). این امر به دو دلیل رخ داده است: نخست، در حالت غیرفعال، افزایش ارتفاع منجر به تقویت اثرات هیدرودینامیکی شده و باعث ایجاد گردابه‌هایی به نسبت قوی‌تر در ناحیه اختلاط شده است. دوم، از نظر روش فعال، کاهش زاویه‌ی لبه‌های تیز تأثیر مستقیمی بر الگوی جریان ایجادشده توسط امواج آکوستیکی داشته و باعث افزایش دامنه‌ی حرکت سیال شده است. علاوه بر این، کاهش زاویه‌ی لبه‌های تیز منجر



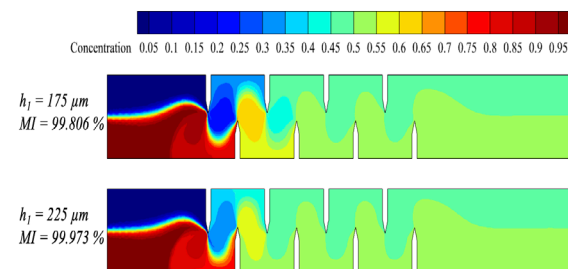
شکل (۶): اثرات تغییر عرض ستون‌های (w) داخلی بر توزیع غلظت.

۷-۲- تأثیر ارتفاع ستون‌های داخلی

در این بخش، تأثیر تغییر ارتفاع ستون‌های داخلی (h_1) موردبررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ستون‌ها، نرخ اختلاط افزایش یافته است. این افزایش به دلیل تقویت اثرات هیدرودینامیکی و ایجاد مسیرهای جریان پیچیده‌تر در داخل میکرومیکسر بوده است. افزایش ارتفاع ستون‌ها منجر به تشکیل نواحی با جریان‌های ثانویه قوی‌تر و در نتیجه، فرآیند اختلاط بهبود یافته است. اما در مقابل، کاهش ارتفاع ستون‌ها باعث کاهش نرخ اختلاط شده است. دلیل این امر آن است که با کاهش ارتفاع ستون‌ها، زمان تعامل سیال با امواج آکوستیکی کاهش یافته و گردابه‌های القاشده ضعیف‌تر شده‌اند. این تغییرات در نرخ اختلاط در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است.

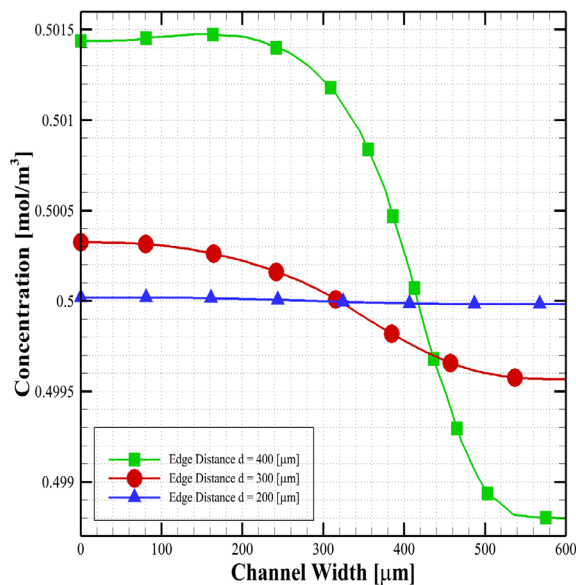


شکل (۷): نمودار مقایسه غلظت در تغییر ارتفاع ستون‌های داخلی (h_1).

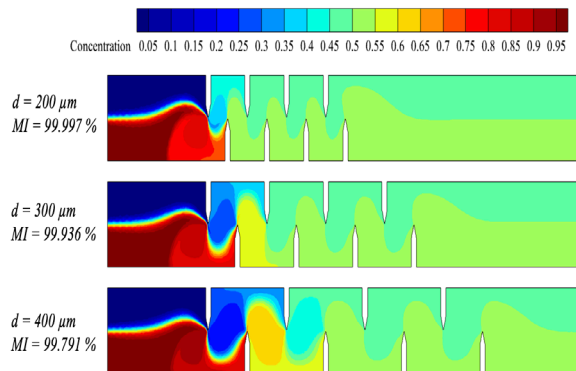


شکل (۸): مقایسه کانتور غلظت در تغییر ارتفاع ستون‌های داخلی (h_1).

داد، زیرا باعث تمرکز بیشتر ناحیه‌ی القای امواج آکوستیکی شده و انرژی بیشتری به جریان تزریق شد. از سوی دیگر، افزایش فاصله‌ی بین لبه‌ها منجر به کاهش نرخ اختلاط شد، این تغییرات در شکل ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که در طراحی میکرومیکسرهای ترکیبی، بهینه‌سازی فاصله‌ی بین لبه‌ها می‌تواند عاملی کلیدی در بهبود فرآیند اختلاط باشد. برخلاف نتایج پژوهش‌های پیشین که در میکرومیکسرهای صرفاً فعال، افزایش فاصله‌ی لبه‌ها نرخ اختلاط را افزایش می‌داد، در این مطالعه مشخص شد که در طراحی ترکیبی، کاهش این فاصله می‌تواند باعث بهبود عملکرد شود.



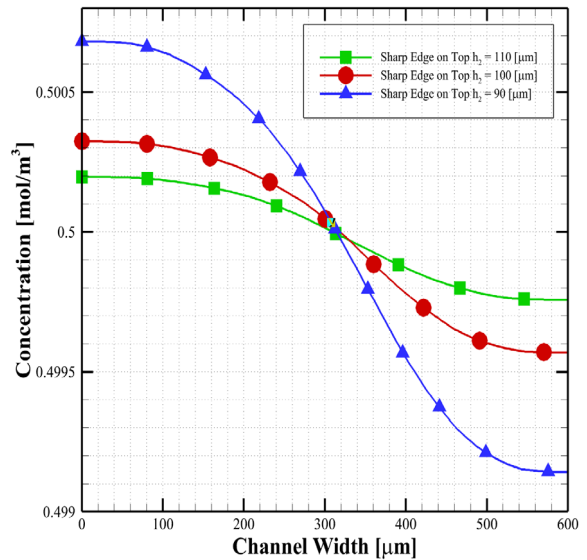
شکل (۱۲): نمودار مقایسه غلظت در تغییر فاصله‌ی لبه‌ها (d).



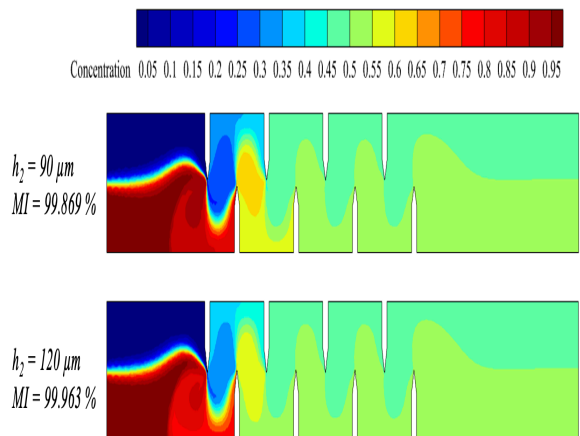
شکل (۱۳): مقایسه کانتور غلظت در تغییر فاصله‌ی لبه‌ها (d).

همچنین، در شکل (۱۴) (توزیع سرعت و خطوط جریان) مشاهده می‌شود که با کاهش فاصله، شدت جریان‌های گردابی بین لبه‌ها افزایش یافته و ناحیه‌ی اختلاط گسترده‌تر شده است. این امر نشان‌دهنده‌ی تأثیر مثبت کاهش فاصله‌ی لبه‌ها بر نرخ اختلاط است. در مقابل، با افزایش فاصله، ساختار جریان ضعیف‌تر شده و جریان‌های گردابی کوچک‌تری شکل گرفته‌اند که منجر به کاهش نرخ اختلاط شده است.

به افزایش شدت جریان‌های گردابی شده و در نتیجه، نرخ اختلاط افزایش یافته است.



شکل (۱۰): نمودار مقایسه غلظت در تغییر ارتفاع لبه‌های تیز بالایی (h_2).



شکل (۱۱): مقایسه کانتور غلظت در تغییر ارتفاع لبه‌های تیز بالایی (h_2).

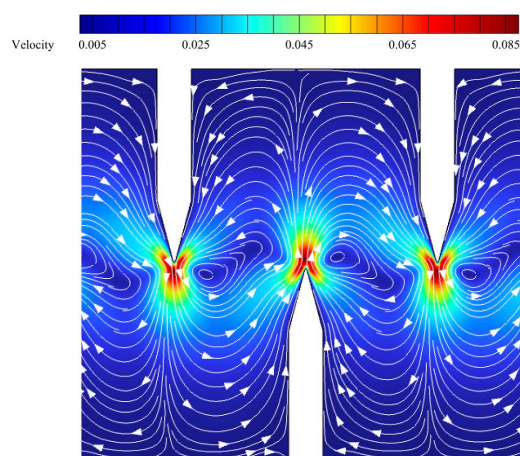
۷-۴- تأثیر تغییرات فاصله‌ی لبه‌ها

برخلاف مطالعاتی که نشان داده‌اند افزایش فاصله‌ی لبه‌ها در سیستم‌های صرفاً فعال منجر به بهبود نرخ اختلاط می‌شود، در این پژوهش مشخص شد که کاهش فاصله‌ی لبه‌ها باعث افزایش نرخ اختلاط شده است. این تفاوت به دلیل ترکیب اثرات غیرفعال و آکوستیکی در این طراحی بهینه شده است. با کاهش فاصله‌ی بین لبه‌ها، جریان‌های گردابی در محدوده‌ی بین دو لبه تقویت شده و برهم‌کنش مؤثرتری بین جریان‌های ثانویه و امواج آکوستیکی ایجاد می‌شود. این امر باعث افزایش اختلاط در مقیاس میکرو شده و نرخ اختلاط بهبود یافته است. به‌طور خاص، کاهش فاصله‌ی لبه‌ها، نرخ اختلاط را به‌طور قابل توجهی افزایش

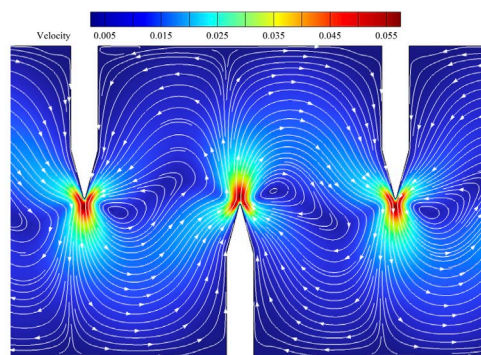
نشان داد که افزایش آن باعث کاهش نرخ اختلاط، و کاهش آن موجب بهبود آن شده است. همچنین، افزایش ارتفاع لبه‌های تیز موجب افزایش اختلاط شده، درحالی‌که کاهش ارتفاع تأثیر معکوس داشته است. بررسی فاصله‌ی بین لبه‌ها نشان داد که برخلاف برخی پژوهش‌های پیشین، کاهش این فاصله در این طراحی موجب افزایش اختلاط شده است. این امر به تعامل قوی‌تر بین جریان‌های ثانویه و سازوکارهای آکوستیکی و هیدرودینامیکی نسبت داده می‌شود. نتایج نشان داد که ترکیب بهینه‌ی تغییرات هندسی و جریان زمینه در این پژوهش منجر به افزایش قابل توجه نرخ اختلاط شده است.

۹- فهرست علائم

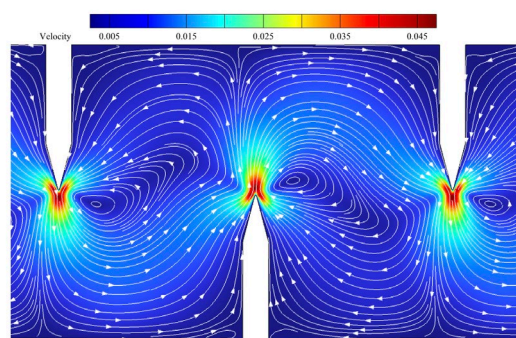
فاصله بین لبه‌ها (m)	d
ارتفاع ستون‌های داخلی (m)	h_1
ارتفاع لبه‌های تیز روی ستون‌ها (m)	h_2
ضخامت یا عرض لبه‌ها (m)	w
شعاع انحنای نوک لبه‌ها (m)	r_c
طول کانال (m)	L
ارتفاع کانال (m)	H
شعاع ذره حل شده (m)	r
بردار سرعت جریان اصلی (m/s)	v_0
بردار سرعت استریمینگ آکوستیکی (m/s)	v_s
بردار سرعت مؤلفه نوسانی (m/s)	v_ω
مزدوج مختلط مؤلفه نوسانی سرعت (m/s)	v_a^*
نیروی محرک حاصل از نوسانات آکوستیکی (N)	F_s
فشار مؤلفه نوسانی (Pa)	p_ω
فشار استریمینگ (Pa)	p_s
فشار جریان اصلی (Pa)	p_0
مؤلفه آکوستیک (Pa)	p_a
مشخصه‌ی موهومی	i
عدد رینولدز	Re
ثابت بولتزمن	k_b
ضریب نفوذ گونه (m^2/s)	D_i
دما (K)	T
غلظت مولی (mol/m^3)	C_i
میدان سرعت ترکیبی جریان اصلی و استریمینگ	v
آکوستیکی (m/s)	MI
نرخ اختلاط	f
فرکانس (Hz)	C_{avg}
میانگین غلظت (mol/m^3)	t
زمان (s)	



$d = 200 \mu m$



$d = 300 \mu m$



$d = 400 \mu m$

شکل (۱۴): مقایسه کانتور سرعت و خط جریان در تغییر فاصله لبه‌ها (d).

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد یک میکرومیکسر آکوستیک ترکیبی بررسی شده است. هدف، ارزیابی تأثیر طول و عرض ستون‌ها، ارتفاع و زاویه لبه‌های تیز، و فاصله‌ی بین لبه‌ها بر میزان اختلاط سیال است.

نتایج نشان داد که افزایش طول ستون‌ها باعث بهبود اختلاط شده، زیرا گردابه‌های قوی‌تری ایجاد شده و تعامل امواج آکوستیکی با جریان سیال افزایش یافته است. در مقابل، کاهش طول ستون‌ها منجر به افت اختلاط شد. بررسی عرض ستون‌ها

[12] Nagy KD, Shen B, Jamison TF, Jensen KF. Mixing and dispersion in small-scale flow systems. *Organic Process Research & Development*. 2012;16(5):976-81. Doi: 10.1021/op200349f

[13] Zahedzadeh M, Ommi F. Effect of Ramp Height on Fuel-Air Mixing Characteristics for Dual Transverse Injection behind the Ramp in Supersonic Air Crossflow. *Aerospace Mechanics*. 2022;18(3):27-40.(persian) Dor: 20.1001.1.26455323.1401.18.3.3.5

[14] Zahed M, Ebrahimi R, Mehdizadeh NS. Computational Simulation of a Turbulent Jet Noise, Using the Acoustic Analogy. *Aerospace Mechanics Journal*. 2008;3(4):35-47. URL: <https://www.magiran.com/paper/539163>

علائم یونانی

فرکانس (Hz)	ω
لزجت سینماتیکی (m^2/s)	ν
گرادیان	∇
چگالی سیال در جریان (kg/m^3)	ρ
لزجت دینامیکی ($kg \cdot m/s$)	μ
زیرنویس‌ها	
میانگین	avg
گونه	i

۱۰- مراجع

[1] Guo F, Mao Z, Chen Y, Xie Z, Lata JP, Li P, et al. Three-dimensional manipulation of single cells using surface acoustic waves. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2016;113(6):1522-7. Doi: 10.1073/pnas.1524813113

[2] Huang PH, Chan CY, Li P, Nama N, Xie Y, Wei CH, et al. A spatiotemporally controllable chemical gradient generator via acoustically oscillating sharp-edge structures. *Lab Chip*. 2015;15(21):4166-76. Doi: 10.1039/c5lc00868a

[3] Zhang J, Yan S, Yuan D, Alici G, Nguyen NT, Ebrahimi Warkiani M, et al. Fundamentals and applications of inertial microfluidics: a review. *Lab Chip*. 2016;16(1):10-34. Doi: 10.1039/c5lc01159k

[4] Nguyen N-T, Wu Z. Micromixers—a review. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2004;15(2):0960-1317. Doi: 10.1088/0960-1317/15/2/R01

[5] Glasgow I, Aubry N. Enhancement of microfluidic mixing using time pulsing. *Lab Chip*. 2003;3(2):114-20. Doi: 10.1039/b302569a

[6] Ghorbani Kharaji Z, Kalantar V, Bayareh M. Acoustic sharp-edge-based micromixer: a numerical study. *Chemical Papers*. 2022;76(3):1721-38. Doi: 10.1007/s11696-021-01994-0

[7] Boluriaan S, Morris PJ. Acoustic streaming: from Rayleigh to today. *International Journal of aeroacoustics*. 2003;2(3):255-92. Doi: 10.1260/147547203322986142

[8] Zhang C, Guo X, Brunet P, Costalonga M, Royon L. Acoustic streaming near a sharp structure and its mixing performance characterization. *Microfluidics and Nanofluidics*. 2019;23:1-15. Doi: 10.1007/s10404-019-2271-5

[9] Zhang C, Brunet P, Royon L, Guo X. Mixing intensification using sound-driven micromixer with sharp edges. *Chemical Engineering Journal*. 2021;410:128252. Doi: 10.1016/j.cej.2020.128252

[10] Meijer HE, Singh MK, Kang TG, Den Toonder JM, Anderson PD, editors. Passive and active mixing in microfluidic devices. *Macromolecular symposia*; 2009;279:1:201-209. Wiley Online Library. Doi: 10.1002/masy.200950530

[11] Hessel V, Löwe H, Schönfeld F. Micromixers—a review on passive and active mixing principles. *Chemical engineering science*. 2005;60(8-9):2479-501. Doi: 10.1016/j.ces.2004.11.033