



A 3D Numerical Study of the Impact of Physical Parameters on the Behavior of a Flexible Vortex Generator and Heat Transfer within a Microchannel

Mahdi Sheikhezad Saravani¹, Hamed Mohaddes Deylami^{2*}, Mohammad Naghashzadegan²

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

² Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

HIGHLIGHTS

- A flexible vortex generator has been numerically simulated.
- The impact of the geometric dimensions of the generator in a microchannel on the flow field and heat transfer was investigated.
- The optimal performance range of the vortex generator was found when its width and height were at the maximum values within the examined range.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 26 August 2024

Received in revised form: 21 September 2024

Accepted: 10 October 2024

Available online: 10 October 2024

*Correspondence:

hmohaddesd@guilan.ac.ir

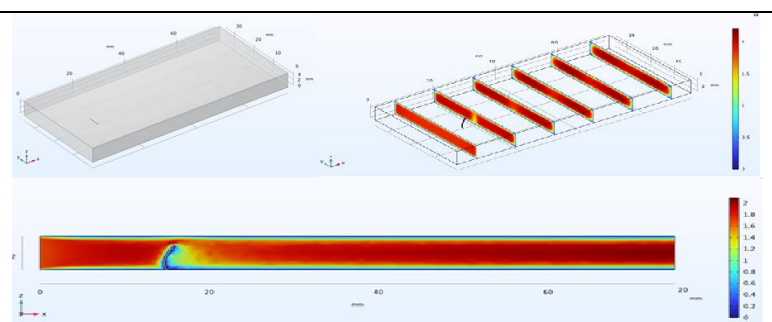
How to cite this article:

M. S. Saravani, H. M. Deylami, M. Naghashzadegan. A 3D numerical study of the impact of physical parameters on the behavior of a flexible vortex generator and heat transfer within a microchannel. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2025; 20(4):71-86.

Keywords:

Flexible Vortex Generator
Numerical Study,
Microchannel
Fluid-Structure Interaction

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

In this paper, the impact of geometric parameters on the behavior of a flexible vortex generator and heat transfer in a three-dimensional microchannel is investigated. The primary objective of this study is to analyze the effects of the geometric parameters of the vortex generator on heat transfer and pressure drop within the microchannel. Numerical simulations were conducted using COMSOL software to examine the influence of variations in the width and height of the vortex generator cross-section, as well as the inlet flow velocity. In this research, the width and height of the vortex generator cross-section were analyzed within the range of 0.15 to 0.3 mm. The results indicated that increasing the width of the generator at a constant velocity resulted in up to a 3% increase in the Nusselt number. Additionally, increasing the width of the generator from 0.15 mm to 0.3 mm led to an increase in the generator tip displacement, indicating reduced flow resistance and enhanced efficiency in preventing boundary layer formation. The study also examined three ranges of flow velocity (1.71, 2.28, and 3.42 m/s). The results showed that as the flow velocity increased, the Nusselt number increased, while the friction coefficient decreased, and leading to a reduction in the system's pressure drop.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.

Publisher: Imam Hossein University

© Authors





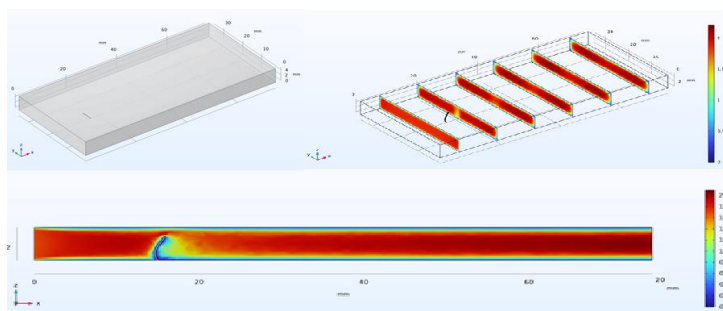
بررسی عددی سه بعدی تأثیر پارامترهای فیزیکی بر رفتار مولد گردابه انعطاف‌پذیر و انتقال حرارت درون یک میکروکانال

مهدی شیخی‌زاد سراوانی^۱، حامد محدث دیلمی^{۱*}، محمد نقاش زادگان^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- یک مولد گردابه انعطاف‌پذیر به صورت عددی شبیه‌سازی شده است.
- تأثیر ابعاد هندسی مولد در یک میکروکانال بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شد.
- بهترین محدوده عملکرد مولد گردابه برای حالتی که پهنا و عرض مولد در بیشینه مقدار در محدوده بررسی بوده‌اند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۷/۱۹

*نویسنده مسئول:

hmohaddesd@guilan.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

مولد گردابه انعطاف‌پذیر

مطالعه عددی

میکروکانال

تعامل سازه و سیال

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای هندسی بر رفتار مولد گردابه انعطاف‌پذیر و انتقال حرارت در یک میکروکانال سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل اثرات پارامترهای هندسی مولد گردابه بر انتقال حرارت و افت فشار در میکروکانال است. شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است تا تأثیر تغییرات پهنا و عرض مقطع مولد گردابه و همچنین سرعت جریان ورودی بررسی گردد. در این پژوهش، پهنا و عرض مقطع مولد گردابه در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی‌متر بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش عرض مولد در سرعت ثابت، عدد ناسلت حداکثر تا ۳ درصد افزایش یافته است. علاوه بر این، افزایش پهنای مولد از ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی‌متر به ۰/۳ میلی‌متر منجر به افزایش جابجایی نوک مولد شد که این امر نشان‌دهنده کاهش مقاومت جریان و افزایش کارایی در جلوگیری از تشکیل لایه مرزی می‌باشد. در این مطالعه، سه محدوده سرعت جریان (۱/۷۱، ۲/۲۸، و ۳/۴۲ متر بر ثانیه) نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت جریان، عدد ناسلت افزایش و ضریب اصطکاک کاهش یافته که منجر به کاهش افت فشار سیستم می‌شود.



۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسئله بهینه‌سازی انتقال حرارت به دلیل افزایش مصرف انرژی و توسعه تکنولوژی‌های جدید از اهمیت بسیاری برخوردار شده است [۱ و ۲]. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود انتقال حرارت، استفاده از مولدهای گردابه است که با افزایش تلاطم جریان، به کاهش ضخامت لایه مرزی و افزایش نرخ انتقال حرارت کمک می‌کنند [۳ و ۴]. مولدهای گردابه به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف صنعتی از جمله هوافضا، خودروسازی و سیستم‌های خنک‌کاری میکروالکترونیک استفاده شده‌اند [۵]. این تجهیزات با ایجاد گردابه‌ها و جریان‌های ثانویه در سیال، سبب افزایش انتقال حرارت و کاهش لایه‌های مرزی حرارتی می‌شوند. جلوگیری از توسعه لایه مرزی یک روش علمی برای افزایش انتقال حرارت در داخل میکروکانال‌ها است [۶ و ۷]. این پیشگیری می‌تواند با استفاده از مولد گردابه انجام شود که امکان نصب و اضافه شدن به تجهیزات حرارتی موجود را نیز دارد [۸].

مولد گردابه ابزاری است که مومنتوم را از جریان خارج از لایه مرزی به داخل آن منتقل می‌کند، که این امر باعث افزایش مومنتوم در ناحیه نزدیک به دیواره و در ادامه کاهش ضخامت لایه مرزی شده که نتیجه آن افزایش انتقال حرارت در میکروکانال می‌باشد [۹ و ۱۰]. این مولدها در دو نوع فعال و غیرفعال طراحی می‌شوند که نوع فعال با استفاده از منابع خارجی انرژی همچون برق یا پنوماتیک عمل می‌کند، در حالی که نوع غیرفعال بدون نیاز به منابع خارجی، تنها از تلاطم‌های طبیعی جریان استفاده می‌کند [۱۱ و ۱۲]. در مطالعات مرتبط با مولدهای گردابه ثابت، دودک [۱۳] با استفاده از روش BAY سه هندسه مختلف شامل مولد پره‌ای روی صفحه تخت، مولدهای گردابه در گلوگاه لوله به شکل S، و پره‌های مولد در جریان‌های مادون و مافوق صوت را شبیه‌سازی کرده است. نتایج نشان داد که این روش قادر به مدل‌سازی دقیق مولدهای گردابه کوچک در محدوده لایه مرزی است.

اسمعیل‌زاده و همکاران [۱۴] به شبیه‌سازی دو نوع مولد گردابه (شبه ایرفویلی و دوزنقه‌ای) پرداخته و نشان دادند که حضور مولدها موجب افزایش انتقال حرارت از طریق ایجاد

گردابه‌های طولی و عرضی می‌شود. مولدهای شبه ایرفویلی عملکرد بهتری نسبت به نوع دوزنقه‌ای نشان دادند. پورغلامی و همکاران [۱۵] نیز تأثیر مولدهای گردابه ثابت و متحرک را در یک کانال دوبعدی بررسی کردند و دریافتند که پره نوسانی با زاویه حمله ۴۵ درجه بهترین انتقال حرارت را ایجاد می‌کند. تیان و همکاران [۱۶] با استفاده از روش شرط مرزی غوطه‌ور و المان محدود، تأثیر مولدهای نوسان‌کننده بر میدان جریان را بررسی کردند و عملکرد بهبود یافته این مولدها را تأیید کردند. کانگ و همکاران [۱۷] نیز با شبیه‌سازی دو پرچم انعطاف‌پذیر نشان دادند که این مولدها با افزایش زاویه نوسان، باعث بهبود انتقال حرارت می‌شوند. نصاب و آدینی [۱۸] مولدهای گردابه کامپوزیتی با مدول یانگ متفاوت را بررسی کردند و نشان دادند که مولدهای با دامنه و فرکانس نوسان بالا، انتقال حرارت بیشتری ایجاد می‌کنند. همچنین لیائو و جینگ [۱۹] نشان دادند که مینی‌میکسرهای مجهز به مولد گردابه انعطاف‌پذیر، با افزایش عدد رینولدز و ارتفاع پرچم، موجب بهبود کارایی اختلاط می‌شوند.

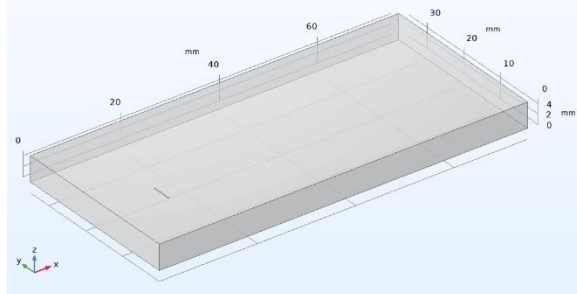
امینی و حبیبی [۲۰] ویژگی هیدروترمال سینک‌های حرارتی با مولدهای گردابه متعدد را بررسی کردند. یافته‌ها حاکی از آن است که تقسیم‌کننده‌های انعطاف‌پذیر موجب بهبود انتقال حرارت و کاهش تلفات هیدرودینامیکی می‌شوند. کالیسکان و همکاران [۲۱] با بررسی مولدهای گردابه با پرچم‌های انعطاف‌پذیر و سخت نشان دادند که مولدهای انعطاف‌پذیر کارایی حرارتی بهتری دارند. در مطالعه‌ای دیگر، حسینی و همکاران [۲۲] با استفاده از مولدهای گردابه الاستومریک، بهبود انتقال حرارت و اختلاط در میکروکانال‌ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که استفاده از مولدهای نوسانی باعث بهبود انتقال حرارت و افزایش عدد ناسلت می‌شود.

سائینی و همکاران [۲۳] نیز با مطالعه بر روی مولدهای گردابه بال‌دار دوزنقه‌ای منحنی، تأثیر سوراخ‌های دایره‌ای بر بهبود کارایی حرارتی-هیدرولیکی را تأیید کردند. بهینه‌سازی انتقال حرارت در میکروکانال‌ها با استفاده از مولدهای گردابه با چالش‌های متعددی روبرو است، از جمله مشکل اصلی آن افت فشار بالا در هنگام بهبود نرخ انتقال حرارت است. این چالش به‌ویژه در صنایعی مانند میکروالکترونیک و هوافضا که به

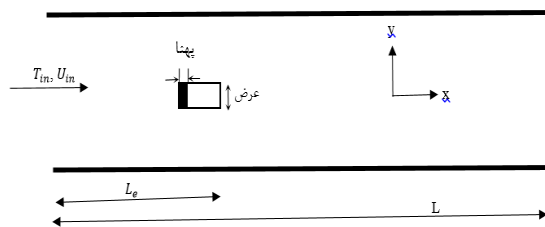
۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

۲-۱- هندسه مساله

در این مطالعه، میکروکانال سه‌بعدی به‌عنوان یک مبدل حرارتی با ارتفاع ۵ میلی‌متر، عرض ۳۵ میلی‌متر و طول ۷۵ میلی‌متر بررسی شده است. یک مولد گردابه در فاصله ۱۵ میلی‌متری از ورودی و در وسط عرض دیوار پایین کانال نصب شده است. این مولد با ابعاد اولیه پهنا و عرض ۰/۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۴ میلی‌متر و با زاویه حمله ثابت ۴۵ درجه قرار گرفته است. جریان هوا با دمای ۲۹۳/۱۵ کلوین به صورت یکنواخت وارد کانال می‌شود (شار ثابت ۵۰۰ وات بر مترمربع به دیواره‌های بالا و پایین اعمال شده است) و در سه سرعت مختلف ۱/۷۱، ۲/۲۸ و ۳/۴۲ متر بر ثانیه مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات نشان می‌دهد که اعداد رینولدز برای این سرعت‌ها به ترتیب ۸۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۳۰۰ است، که بیانگر جریان آرام در میکروکانال می‌باشد. در شکل ۱ نمایشی از هندسه مورد بررسی در این مطالعه در دو نمای، سه بعدی (شکل ۱ الف) و دو بعدی (شکل ۱ ب) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۱): نمایشی از هندسه مورد بررسی در این مطالعه:

الف) نمای سه بعدی؛ ب) نمای دو بعدی بالای میکروکانال (نمای X-Y).

بهینه‌سازی سیستم‌های خنک‌کاری و مدیریت حرارتی نیاز دارند، اهمیت زیادی دارد. در بسیاری از تحقیقات پیشین، مولدهای گردابه ثابت مورد استفاده قرار گرفته‌اند که با وجود بهبود انتقال حرارت، باعث افت فشار قابل توجهی می‌شوند. بنابراین، یافتن راه‌حلی که علاوه بر افزایش انتقال حرارت، این افت فشار را کاهش دهند، یک ضرورت اساسی در طراحی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها است.

یکی از چالش‌های اصلی در بهینه‌سازی مولدهای گردابه، تعیین ابعاد هندسی بهینه آن‌هاست. پارامترهایی همچون عرض و پهنای مولد تأثیر بسزایی در عملکرد انتقال حرارت و افت فشار دارند. در سال‌های اخیر، مطالعات مختلفی برای بررسی تأثیرات این پارامترها در میکروکانال‌ها انجام شده است. این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تغییرات ابعادی مولدها می‌تواند به‌طور قابل توجهی نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشد و همزمان افت فشار را کاهش دهد. پژوهش حاضر با استفاده از مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر و بررسی جامع پارامترهای هندسی و دینامیکی، پیشرفت قابل توجهی نسبت به مطالعات پیشین ایجاد کرده است. استفاده از مولدهای انعطاف‌پذیر به جای مولدهای ثابت، امکان بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار را فراهم می‌کند. این مولدها به تغییرات جریان پاسخ می‌دهند و عملکرد بهتری نسبت به مولدهای ثابت دارند. علاوه بر این، تحلیل سه‌بعدی دقیق این پژوهش که با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده است، دیدگاه جدیدی نسبت به رفتار جریان و تأثیر مولدهای گردابه در میکروکانال‌ها ارائه می‌دهد که در مطالعات گذشته کمتر به آن پرداخته شده است.

در این مقاله، هدف بررسی تاثیر پارامترهای هندسی مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر بر جریان و انتقال حرارت در میکروکانال‌ها با استفاده از شبیه‌سازی عددی است. این پژوهش تلاش دارد تا با تحلیل اثرات ابعادی مولد گردابه، بهینه‌ترین شرایط عملکردی آن را مشخص کند. نتایج این پژوهش نه تنها تأثیر قابل توجه پارامترهای هندسی بر رفتار جریان و توزیع دمایی را به وضوح نشان می‌دهد، بلکه می‌تواند در مقیاس میکرو تأثیر ابعاد مولد در بهینه‌سازی طراحی و عملکرد مولدها را بیان سازد.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_f}{\partial t} + (u_f - \hat{v}) \cdot \nabla T_f \\ = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T_f \frac{\partial T_f}{\partial t} \\ + (u_f - \hat{v}) \cdot \nabla T_f \\ = \frac{k}{\rho c_p} \nabla^2 T_f \end{aligned} \quad (3)$$

که در این معادله T_f دمای سیال، k ضریب هدایت حرارتی و c_p ظرفیت گرمایی ویژه می‌باشد.

ورتیسیته به عنوان یک متغیر مهم در تحلیل جریان‌های چرخشی و شکل‌گیری گردابه‌ها استفاده می‌شود. ورتیسیته به‌طور خاص نرخ چرخش موضعی سیال را در هر نقطه از میدان جریان نشان می‌دهد و با استفاده از گرادیان سرعت به‌دست می‌آید. ورتیسیته $\vec{\omega}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} \quad (4)$$

که در آن $\vec{u}$ بردار سرعت سیال است. برای تحلیل دقیق‌تر، معادلات ناویر-استوکس نیز می‌توانند به‌صورت معادلات ورتیسیته-تابع جریان بازنویسی شوند. معادله ورتیسیته به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{\omega} = (\vec{\omega} \cdot \nabla) \vec{u} + \nu \nabla^2 \vec{\omega} \quad (5)$$

که در آن ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال است. به منظور تعیین افت اصطکاکی f نیز به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$f = \frac{2H}{L} \frac{\Delta P}{\rho \bar{u}_{f,inlet}^2} \quad (6)$$

که در این رابطه ΔP اختلاف فشار ورودی و خروجی و $\bar{u}_{f,inlet}$ سرعت متوسط در ورودی میکروکانال می‌باشد. عدد ناسلت نیز از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$Nu = \frac{h D_H}{k} \quad (7)$$

که در این رابطه D_H قطر هیدرولیکی است. همچنین h ضریب انتقال حرارت جابجایی است که به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$h = \frac{q}{\Delta T} = \frac{q}{T_w - T_{mean}} \quad (8)$$

که q شار دیواره میکروکانال، T_w دمای دیواره و T_{mean} دمای متوسط در هر مقطع می‌باشد. در انتها شرایط مرزی حاکم بر مساله به صورت زیر می‌باشد.

مولد گردابه در زاویه حمله ۴۵ درجه نسبت به جریان ورودی نصب شده است. این زاویه به منظور به حداکثر رساندن اختلال در جریان و ایجاد گردابه‌های مناسب برای افزایش انتقال حرارت انتخاب شده است. جهت مولد به گونه‌ای است که جریان به طور مستقیم با سطح مولد در زاویه ۴۵ درجه برخورد کرده و منجر به ایجاد جریان‌های گردابی در پایین‌دست مولد می‌شود.

۲-۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای توصیف جریان سیال و انتقال حرارت در داخل میکروکانال و برهم‌کنش آن با مولد گردابه انعطاف‌پذیر تدوین شده‌اند که برای توصیف حرکت سیال در جریان آرام و تراکم‌ناپذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. معادلات ناویر-استوکس در شکل کلی خود بیانگر تعادل نیروهای درون سیال از جمله نیروهای لزجت و فشار هستند. در مقاله حاضر، این معادلات به صورت زیر نوشته شده‌اند:

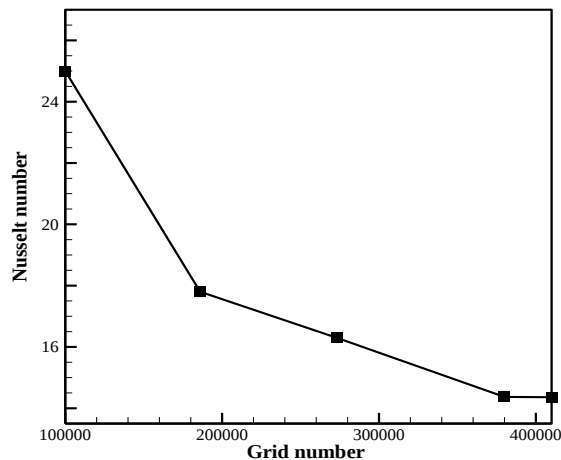
$$f + \mu \nabla^2 u + \nabla p = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) \quad (1)$$

که در آن u سرعت سیال، p فشار سیال، μ ویسکوزیته، ρ چگالی و f نیروهای خارجی است. رفتار مولد گردابه به دلیل انعطاف‌پذیری آن، از طریق معادلات تعامل سیال-جامد (FSI) مدل‌سازی شده است. این معادلات شامل رابطه بین نیروهای سیال و تغییر شکل سازه انعطاف‌پذیر مولد هستند. برای مدل‌سازی دقیق این برهم‌کنش، از روش لاگرانژی-اولری (ALE) استفاده شده است. این روش معادلات حاکم بر حرکت سازه و تغییر شکل آن را به صورت زیر در نظر می‌گیرد [۲۴-۲۶]:

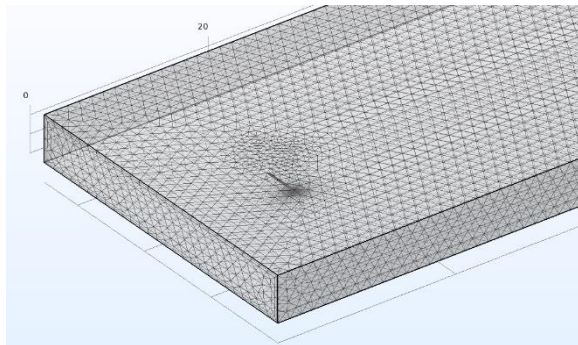
$$\rho_s \frac{\partial^2 d_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + f_s \quad (2)$$

که d_s جابجایی جسم جامد، σ تنش در جسم جامد و f_s نیروهای خارجی وارد بر جسم جامد است. در محل برخورد بین سیال جامد به سبب شرط مرزی پیوستگی، سرعت و تنش دو محیط در مرز باید برابر باشد. پس از محاسبه توزیع سرعت و فشار برای ناحیه محاسباتی که شامل سیال و جامد می‌باشد، جهت محاسبه توزیع دمایی این ناحیه می‌بایست معادله انتقال حرارت در فضای محاسباتی ALE که به صورت معادله (۲) می‌باشد، محاسبه گردد [۲۷].

نظر کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، با رسیدن به تعداد ۳۸۰,۰۰۰ المان، دیگر تغییر معناداری در عدد ناسلت مشاهده نمی‌شود (شکل ۲)، که نشان از کافی بودن تعداد المان‌های شبکه برای این مطالعه است. افزایش بیشتر تعداد المان‌ها (شکل ۳) تنها منجر به افزایش بار محاسباتی خواهد شد. در نهایت، باید تأکید کرد که این فرآیند استقلال از شبکه برای تمامی نتایج مورد بررسی در این مطالعه انجام شده است، تا به دقت و صحت نتایج بیشتری دست یافته شود.



شکل (۲): تغییرات عدد ناسلت در نقطه AA در تعداد شبکه‌های مختلف.



شکل (۳): نمایی از شبکه مورد استفاده در این مطالعه.

۳- اعتبارسنجی و بحث و بررسی نتایج

۳-۱- اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی مطالعه حاضر در بخش FSI، نتایج با کار تیان و همکاران [۲۸] و تورک و هرون [۲۹] مقایسه شده است. هندسه مورد نظر در این بررسی در شکل ۴ نشان داده

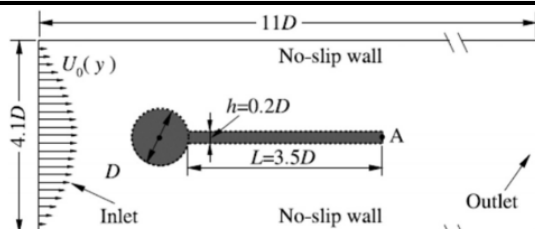
$$\begin{aligned}
 x = 0, u = u_{in}, v = 0, w = 0, T = T_{in} \\
 x = L, p = p_{ambient}, \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \\
 z = 0, u = 0, v = 0, w = 0, q'' = q_{wall} \\
 z = H, u = 0, v = 0, w = 0, q'' = q_{wall} \\
 y = 0, u = 0, v = 0, w = 0, q'' = 0 \\
 y = 35mm, u = 0, v = 0, w = 0, q'' = 0
 \end{aligned} \quad (9)$$

۲-۳- استقلال از شبکه

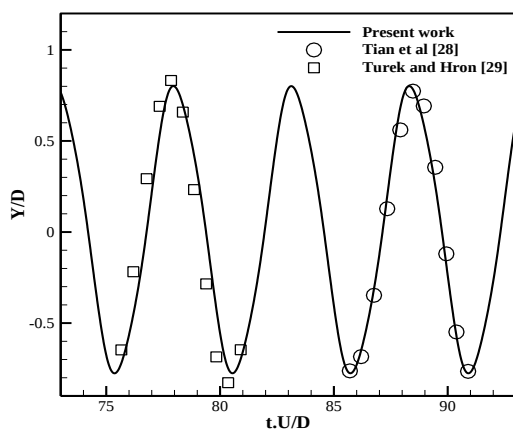
در این پژوهش، از شبکه‌بندی بی‌سازمان برای انطباق بهتر با هندسه پیچیده مولدهای گردابه و میکروکانال استفاده شده است. در نواحی نزدیک به مولد گردابه، از المان‌های ریزتر و تراکم بالاتر به منظور مدل‌سازی دقیق لایه‌های مرزی سرعت و حرارت بهره برده شده است. در مقابل، در نواحی دورتر از مولد و جریان اصلی، المان‌های بزرگ‌تر به کار رفته است تا حجم محاسباتی کاهش یابد و دقت نتایج همچنان حفظ شود. کیفیت شبکه با معیارهایی مانند Aspect و Skewness Ratio سنجیده شده و در نواحی حساس (نزدیک دیواره‌ها و مولد) این مقادیر بهینه‌سازی شده‌اند تا دقت حداکثری تضمین شود. همچنین، لایه‌های مرزی چندگانه در اطراف دیواره‌ها و مولد گردابه به کار رفته است تا انتقال حرارت و تغییرات سرعت به‌درستی مدل‌سازی شود. در این مطالعه، تأثیر مولد گردابه انعطاف‌پذیر در میکروکانال با استفاده از برنامه کامپوسول بررسی شده است. برای اطمینان از دقت نتایج و استقلال از شبکه، تغییرات عدد ناسلت در نقطه AA (با مختصات $x=50$ ، $y=17/5$ و $z=0$) بررسی شده است. دلیل انتخاب این نقطه، قرارگیری آن در ناحیه‌ای است که اثرات نوسانات جریان و مولد گردابه به وضوح مشاهده می‌شود. در این نقطه، تغییرات عدد ناسلت و افت فشار به خوبی نمایانگر رفتار جریان در حضور مولد گردابه است. به همین دلیل، این نقطه به عنوان یک موقعیت حساس و مهم برای ارزیابی همگرایی نتایج و تحلیل استقلال از شبکه انتخاب شده است. این انتخاب امکان ارزیابی دقیق تأثیر تغییرات شبکه بر پارامترهای کلیدی مانند عدد ناسلت و افت فشار را فراهم می‌آورد. این بررسی برای شرایط جریان با سرعت ۱/۷۱ متر بر ثانیه و ابعاد مولد با پهنا و عرضی برابر ۰/۱۵ میلی‌متر انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش تعداد المان‌ها، تغییرات عدد ناسلت به مقدار ثابتی ($Nu=15$) در نقطه مورد

جدول (۱): مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تیان و همکاران [۲۸] و تورک و هرون [۲۹].

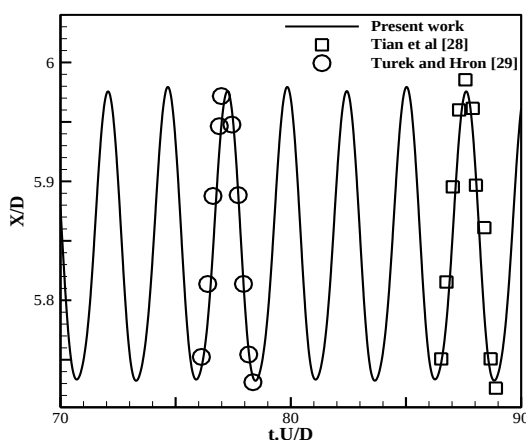
عنوان اول	St	$/DA_m$	C_D
تیان و همکاران [۲۸]	۰/۱۹	۰/۷۸	۴/۱۱
تورک و هرون [۲۹]	۰/۱۹	۰/۸۳	۴/۱۳
کار حاضر	۰/۱۹	۰/۸۰۱۳	۴/۲



شکل (۴): هندسه یک تیر نوسان کننده متصل به یک سیلندر.



(الف)



(ب)

شکل (۵): نوسان نقطه انتهایی ستون الف) در راستای x؛ ب) در راستای y.

شده است. با توجه به جدول شماره ۱، شکل ۵ الف (نوسان در راستای x) و شکل ۵ ب (نوسان در راستای y) مطابقت مناسبی در ضریب درگ، عدد استرودهال و دامنه نوسان مشاهده می‌شود. به منظور اعتبارسنجی افت فشار و عدد ناسلت در یک کانال سه‌بعدی، مقایسه نتایج عددی حاضر با روابط تجربی (معادله ۱۰ و ۱۱) شاه و لندن [۳۱ و ۳۰] در شکل ۶ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی و تجربی مطابقت خوبی دارند و درصد خطای محاسبه شده بین نتایج برای افت فشار در محدوده اعداد رینولدز ۸۰۰ تا ۱۳۰۰، کمتر از ۵ درصد و برای عدد ناسلت نیز کمتر از ۴ درصد است.

$$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 13.74(x^+)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$+ \frac{1.25 + 64(x^+) - 13.74(x^+)^{\frac{1}{2}}}{1 + 0.0002(x^+)^{-2}}$$

$$x^+ = \frac{x}{Re \cdot D_h}$$

$$Nu_{0-x}$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} 2.236 \cdot x_*^{-\frac{1}{3}}, x_* \leq 0.001 \\ 2.236 \cdot x_*^{-\frac{1}{3}} + 0.9, 0.001 \leq x_* \leq 0.01 \\ 8.235 + \frac{0.0364}{x_*}, 0.01 \leq x_* \end{array} \right\} \quad (11)$$

$$x_* = \frac{x}{Re_{D_h} \cdot Pr}$$

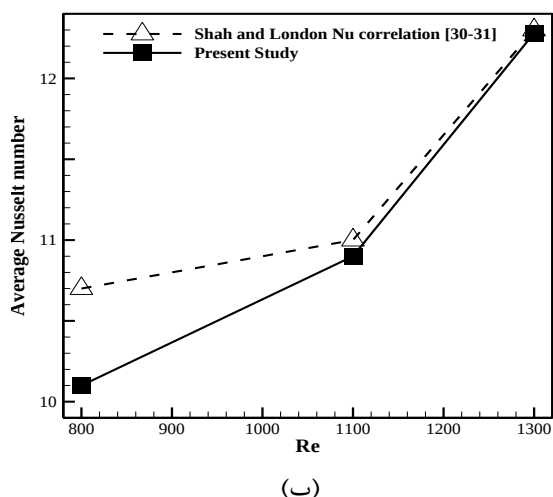
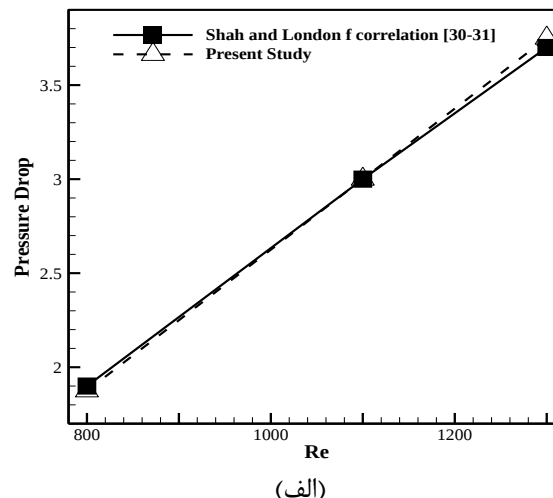
۴- نتایج

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی مولد گردابه انعطاف‌پذیر درون یک میکروکانال با ابعاد $75 \times 25 \times 5$ میلی‌متر و در سرعت‌های ورودی مختلف ارائه می‌شود. مطالعه حاضر با تمرکز بر تاثیر پارامترهای فیزیکی مختلف بر رفتار مولد گردابه و انتقال حرارت در محدوده اعداد رینولدز بین ۸۰۰ تا ۱۳۰۰ و با استفاده از هوا به عنوان سیال عامل انجام شده است.

پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر بر بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار در میکروکانال‌ها است. برخلاف مطالعات پیشین که مولدهای گردابه ثابت را بررسی کرده‌اند، استفاده از مولدهای انعطاف‌پذیر منجر به افزایش انعطاف‌پذیری جریان و بهبود چشمگیر در توزیع حرارتی می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که مولدهای انعطاف‌پذیر توانایی واکنش به تغییرات دینامیکی جریان را داشته و از این طریق منجر به بهبود کارایی سیستم‌های انتقال حرارت می‌شوند. علاوه بر این، بررسی پارامترهای هندسی و دینامیکی نظیر عرض و ارتفاع مولدها نیز حاکی از آن است که تغییرات این پارامترها می‌تواند بهینه‌سازی عملکرد مولدها را در پی داشته باشد، به گونه‌ای که افزایش عرض مولد منجر به کاهش بیشتر افت فشار و بهبود توزیع دما شده است. تحلیل‌های سه‌بعدی انجام شده نیز نشان می‌دهد که رفتار دینامیک سیال در این شرایط به طور دقیق‌تری مدل‌سازی شده و نتایج حاکی از تأثیرات مثبت شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی نسبت به مدل‌های دوبعدی پیشین است.

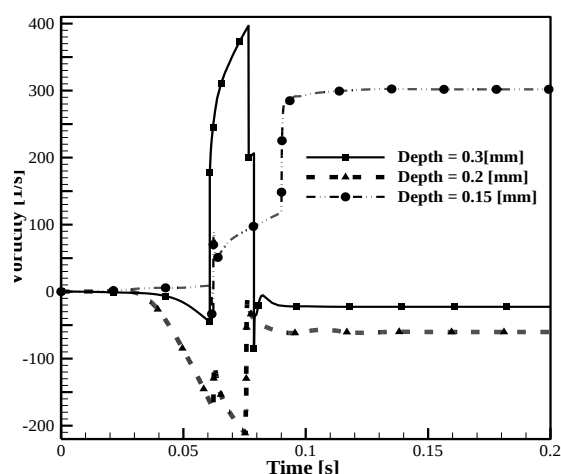
۴-۱- بررسی تغییرات عرض مولد گردابه انعطاف‌پذیر

شکل ۷ جابجایی و نوسان نوک مولد گردابه را در طول بازه زمانی برای سه عرض مختلف (۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ میلی‌متر) با سرعت ورودی ۱/۷۱ متر بر ثانیه ($Re = 800$) نمایش می‌دهد. در این نمودار، مشاهده می‌شود که نوک مولد دلیل ممنوعیت بالای جریان ورودی، دچار تغییر شدیدی می‌شود و پس از حدود ۰/۱ ثانیه به حالت پایدار می‌رسد. میزان نهایی جابجایی نوک مولد برای عرض‌های مختلف تفاوت‌های جزئی دارد. عرض ۰/۳ میلی‌متر بیشترین جابجایی را با حدود ۳/۶ میلی‌متر نشان می‌دهد، در حالی که عرض ۰/۱۵ میلی‌متر کمترین مقدار جابجایی را در حدود ۳/۵ میلی‌متر دارد. این اختلافات به دلیل تغییرات در مقاومت هیدرودینامیکی و پایداری جریان گردابه‌ای اطراف مولد است. افزایش عرض مولد باعث افزایش سطح برخورد جریان و تشدید نوسانات و نیروهای وارده می‌شود که منجر به جابجایی بیشتر نوک مولد



شکل (۶): مقایسه نتایج حاضر با روابط تجربی: الف) افت فشار؛ ب) عدد ناسلت در محدوده عدد رینولدز ۸۰۰-۱۳۰۰. مولد گردابه دارای مدول یانگ در حدود ۰/۰۴ مگاپاسکال می‌باشد که به عنوان یک ماده انعطاف‌پذیر می‌تواند شامل موادی مانند پلیمرهای نرم یا الاستومرهایی نظیر سیلیکون باشد. تحلیل‌ها در محدوده زمانی ۰/۲ ثانیه صورت گرفته‌اند تا تأثیرات دینامیکی پارامترهای هندسی شامل ضخامت و پهنای مولد بر روی رفتار جریان و انتقال حرارت به خوبی مشخص شوند. در این شبیه‌سازی‌ها، از روش المان محدود با مرتبه دوم گسسته‌سازی برای محاسبات فشار، سرعت و دما استفاده شد. چون معادلات حاکم در هر گام زمانی به صورت تکراری حل می‌شوند، برای تشخیص حل همگرا از معیار همگرایی استفاده شد و حداقل باقیمانده‌ها برای معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی 10^{-5} تعیین شده است. نتایج این

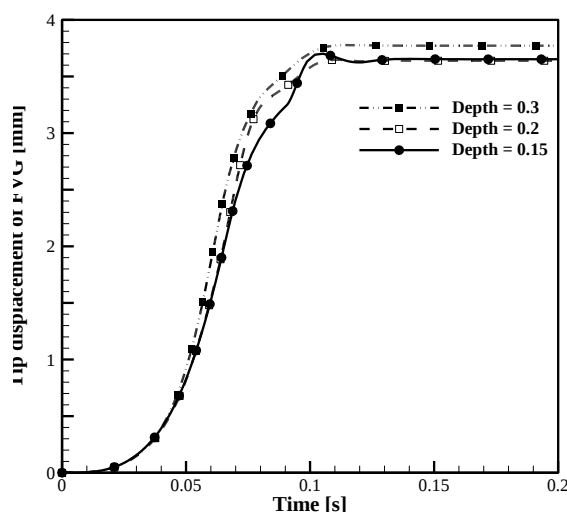
به دلیل عبور یک گردابه قوی، ورتیسسته به‌طور ناگهانی تا 400 1/s افزایش یافته و با گذر زمان و ایجاد تعادل بین مومنتوم جریان و نیروی الاستیک مولد، مقدار ورتیسسته به نزدیکی صفر کاهش می‌یابد. در سرعت‌های ورودی دیگر نیز با افزایش عرض مولد، تغییرات ورتیسسته کمتر و نوسانات ملایم‌تر بوده و تعادل زودتر به دست می‌آید. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد رینولدز و عرض مولد، تغییرات ورتیسسته در نقاط مشخص‌شده کاهش یافته و نوسانات ملایم‌تر می‌شوند. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر مثبت عرض مولد بر کاهش شدت نوسانات و تسریع در رسیدن به تعادل هیدرودینامیکی است.



شکل ۸): تغییرات ورتیسسته بعد از مولد در عرض‌های مختلف ($Re=800$).

شکل‌های ۹ الف و ب کانتورهای سرعت را برای مولدی با عرض 0.15 میلی‌متر در شرایط عدد رینولدز 800 نمایش می‌دهند. در شکل ۹ الف، نمای سه‌بعدی از توزیع سرعت به وضوح نشان می‌دهد که در این شرایط، سرعت جریان در نواحی مختلف میکروکانال چگونه توزیع می‌شود. عرض مولد در این حالت به گونه‌ای است که جریان به‌طور یکنواخت در طول کانال هدایت می‌شود و مناطق با سرعت‌های بالا و پایین به خوبی از یکدیگر تفکیک شده‌اند. این نمای سه‌بعدی به‌طور مؤثری نحوه تأثیرگذاری هندسه مولد بر میدان سرعت را روشن می‌سازد. شکل ۹ ب که نمای مقطعی از میدان سرعت را در طول محور طولی میکروکانال ارائه می‌دهد، نشان می‌دهد که با عرض 0.15 میلی‌متر، توزیع سرعت در امتداد

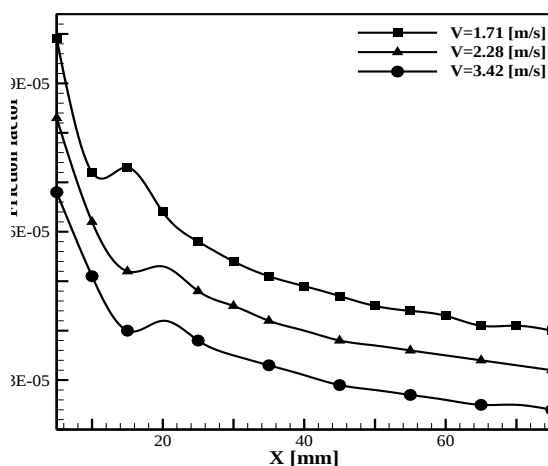
می‌گردد. سرعت‌های ورودی دیگر ($2/28$ و $3/42$ متر بر ثانیه) روندهای مشابهی را با تغییرات جزئی نشان می‌دهند. نوسان و جابجایی نوک مولد در هر دو حالت به سرعت افزایش یافته و سپس به یک حالت پایدار می‌رسد. با افزایش سرعت جریان، میزان جابجایی نوک مولد افزایش یافته و بیشترین جابجایی برای عرض 0.3 میلی‌متر مشاهده می‌شود. این افزایش ناشی از تأثیر شدیدتر نیروهای هیدرودینامیکی با افزایش سرعت جریان و تشدید نوسانات گردابه‌ای است. در نهایت، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تغییرات عدد رینولدز و عرض مولد تأثیر مستقیمی بر تشکیل گردابه‌ها، نوسانات و جابجایی نوک مولد دارند. هرچه سرعت جریان و عرض مولد افزایش یابد، نوسانات و جابجایی نوک مولد نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۷): جابجایی نوک مولد در عرض‌های مختلف ($Re=800$).

در شکل ۸، تغییرات ورتیسسته در نقطه BB با مختصات ($x=18$, $y=17/5$, $z=1$) برای سه عرض مختلف مولد گردابه (0.15 , 0.2 و 0.3 میلی‌متر) و با سرعت ورودی $1/71$ متر بر ثانیه ($Re=800$) بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که در عرض 0.15 میلی‌متر، ورتیسسته به سرعت از مقدار اولیه صفر به حدود 100 1/s افزایش یافته و سپس با یک جهش ناگهانی در زمان 0.1 ثانیه به مقدار تعادلی 400 1/s می‌رسد. در عرض 0.2 میلی‌متر، ابتدا ورتیسسته تا حدود 100 1/s کاهش یافته و سپس با یک کاهش شدید تا 200 1/s روبرو می‌شود. در نهایت، ورتیسسته به تدریج افزایش یافته و به مقدار تعادلی حدود 50 1/s می‌رسد. در عرض 0.3 میلی‌متر، ابتدا

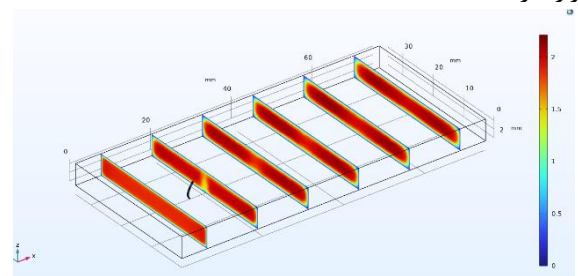
اصطکاک می‌شود. این درحالی‌است که در طی این روند، حضور مولد به عنوان یک مانع سبب افزایش افت فشار و در نتیجه سبب افزایش ناگهانی در مسیر نزولی ضریب اصطکاک شده است. بعنوان مثال در سرعت جریان $1/71$ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک از مقدار اولیه تقریباً $10^{-5} \times 9/9$ به مرور کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به دلیل توسعه لایه مرزی و کاهش تنش برشی دیواره در طول کانال توجیه کرد. در سرعت جریان $2/28$ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک اولیه کمتر از حالت قبل است و از مقدار تقریباً $10^{-5} \times 8/2$ شروع شده و به تدریج کاهش می‌یابد. با افزایش سرعت جریان به $3/42$ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک اولیه تقریباً $10^{-5} \times 6/8$ بوده که تا انتهای کانال به مقداری حدود $10^{-5} \times 2/6$ کاهش می‌یابد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که تغییرات ضریب اصطکاک با توجه به فاصله از ورودی کانال و سرعت جریان، به وضوح تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد که این تغییرات به دلیل توسعه لایه مرزی و کاهش تنش برشی دیواره است.



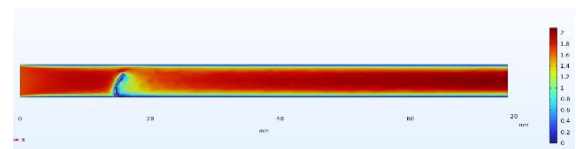
شکل (۱۰): تغییرات فاکتور اصطکاک در سرعت‌های مختلف برای عرض $0/3$ میلی‌متری.

شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت را در طول میکروکانال و در سه عرض مختلف مولد ($0/15$ ، $0/2$ و $0/3$ میلی‌متر) و در سرعت $1/71$ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در نزدیکی ورودی کانال، عدد ناسلت در تمامی عرض‌ها بیشترین مقدار را دارد و با افزایش فاصله از ورودی، دچار نوسانات می‌شود. این نوسانات در فاصله 15 میلی‌متری از ورودی به دلیل وجود مانع برجسته‌تر

میکروکانال چگونه تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که سرعت جریان در نزدیکی مولد بیشینه است و سپس با فاصله گرفتن از مولد، کاهش می‌یابد. این الگوی سرعت بیانگر تأثیر مهم ابعاد مولد بر توزیع سرعت در میکروکانال‌ها است. این کانتورها به وضوح نشان می‌دهند که در شرایط مطالعه شده، توزیع سرعت در میکروکانال به شدت تحت تأثیر هندسه مولد قرار دارد.



(الف)



(ب)

شکل (۹): کانتور تغییرات سرعت برای عرض $0/15$ میلی‌متر و عدد رینولدز 800 (الف نمای سه بعدی ب) نمای مقطع طولی).

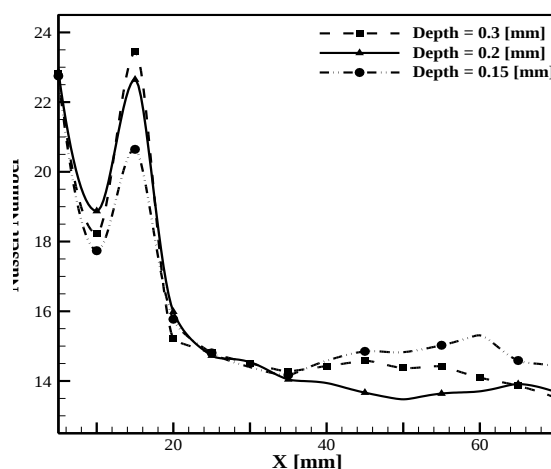
شکل ۱۰ تغییرات ضریب اصطکاک در طول کانال را در سه سرعت مختلف جریان ($1/71$ ، $2/28$ و $3/42$ متر بر ثانیه) نشان می‌دهد. شایان ذکر است که ضریب اصطکاک برای یک سرعت ثابت در عرض‌های مختلف مولد ($0/15$ ، $0/2$ و $0/3$ میلی‌متر) تقریباً یکسان است به همین دلیل، برای سادگی تحلیل و جلوگیری از تکرار، فقط نتایج مربوط به عرض $0/3$ میلی‌متر ارائه شده است. با توجه به شکل، ضریب اصطکاک در نزدیکی ورودی کانال بیشترین مقدار را دارد و با افزایش فاصله از ورودی کاهش می‌یابد تا به یک مقدار تقریباً ثابت برسد. این پدیده به دلیل این است که در ورودی کانال، جریان هنوز به طور کامل توسعه نیافته و به دلیل وجود اثرات لبه و عدم تشکیل کامل لایه مرزی، تنش برشی بیشتری بر دیواره کانال اعمال می‌شود. با حرکت جریان به سمت پایین کانال، لایه مرزی به تدریج تشکیل شده و توسعه می‌یابد که این امر باعث کاهش تنش برشی دیواره و در نتیجه کاهش ضریب

نزدیک می‌شود. با افزایش عرض مولد، مقدار عدد ناسلت افزایش یافته و نقاط اوج بیشتری را تجربه می‌کند. با این حال، این تأثیر با فاصله گرفتن از ورودی کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش عرض مولد، مقدار عدد ناسلت در طول کانال افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل تشدید جریان گردابه‌ای و افزایش اختلاط در جریان سیال است که باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. همچنین، با افزایش سرعت جریان، عدد ناسلت افزایش می‌یابد، اما رفتار کلی نوسانات و کاهش آن در طول کانال مشابه با حالت‌های سرعت پایین‌تر است. در نهایت، عرض و سرعت مولد هر دو تأثیر مستقیمی بر روی انتقال حرارت و مقدار عدد ناسلت دارند.

۴-۲- بررسی تاثیر تغییرات پهنای مولد گردابه انعطاف‌پذیر

شکل ۱۲ نشان‌دهنده جابجایی نوک مولد بر حسب زمان برای سه پهنای مختلف مولد (۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ میلی‌متر) در سرعت ورودی ۱/۷۱ متر بر ثانیه است. از نمودار مشخص است که با افزایش پهنای مولد، جابجایی نوک مولد نیز افزایش می‌یابد. این افزایش جابجایی به دلیل افزایش تعامل بین ممنوم جریان ورودی با پهنای بیشتری از مولد است. همچنین، در پهنای بیشتر، مقاومت آیرودینامیکی نیز بیشتر می‌شود که منجر به افزایش جابجایی نوک مولد می‌گردد. در پهنای ۰/۲۵ میلی‌متر تعادل بیشتری بین نیروهای وارد بر مولد برقرار است و مولد جابجایی ۲/۲ میلی‌متر را ثبت می‌کند. در حالیکه برای پهنای ۰/۲ میلی‌متر، به دلیل سطح برخورد کمتر مولد با جریان، مولد پس از جابجایی اولیه، با کمک نیروی الاستیک به سمت اولیه خود بر می‌گردد. در پهنای ۰/۳ میلی‌متر نیز پس از نوسانی کوتاه، نیروهای وارده به تعادل رسیده و نوک مولد در جابجایی ۳/۵ میلی‌متر ثابت باقی می‌ماند. برای سرعت ورودی ۲/۲۸ متر بر ثانیه و ۳/۴۲ متر بر ثانیه نیز بررسی‌های مشابهی انجام شده است که نتایج آن‌ها، رفتار جابجایی نوک مولد مشابه با سرعت ۱/۷۱ متر بر ثانیه را نشان دادند. برای اختصار، این نمودارها در مقاله حذف شده‌اند.

هستند و سپس به تدریج کاهش یافته و به یک مقدار تقریباً ثابت در طول کانال می‌رسند. برای عرض ۰/۳ میلی‌متر، مقدار اولیه عدد ناسلت حدود ۲۳ بوده که به تدریج کاهش یافته و در انتهای کانال به حدود ۱۴ می‌رسد. در عرض‌های ۰/۲ و ۰/۱۵ میلی‌متر نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود، هرچند که مقادیر عدد ناسلت کمی کمتر از حالت عرض ۰/۳ میلی‌متر است. این نوسانات در عدد ناسلت می‌تواند ناشی از تغییر جهت جریان ناشی از مولد گردابه باشد که باعث افزایش انتقال حرارت و در نتیجه افزایش عدد ناسلت در نقاط خاصی از کانال می‌شود. با افزایش فاصله از ورودی، جریان به تدریج به حالت پایدارتری می‌رسد و اثرات مولد کاهش می‌یابد که منجر به کاهش عدد ناسلت می‌شود. عرض‌های کمتر مولد تأثیر کمتری بر سرعت جریان دارند، که باعث می‌شود جریان با مومنوم بیشتری به نواحی انتهایی میکروکانال برسد و در نتیجه عدد ناسلت در این نواحی بیشتر باشد. در حالی که مولد با عرض ۰/۳ میلی‌متر با ایجاد گردابه‌های قوی‌تر، لایه مرزی را کنترل کرده و مقدار عدد ناسلت بهبود یافته‌تری را ثبت می‌کند. در عرض ۰/۲ میلی‌متر، تعامل بین مولد و جریان به تعادل رسیده و مکانیزمی مشابه دو حالت قبلی ندارد.

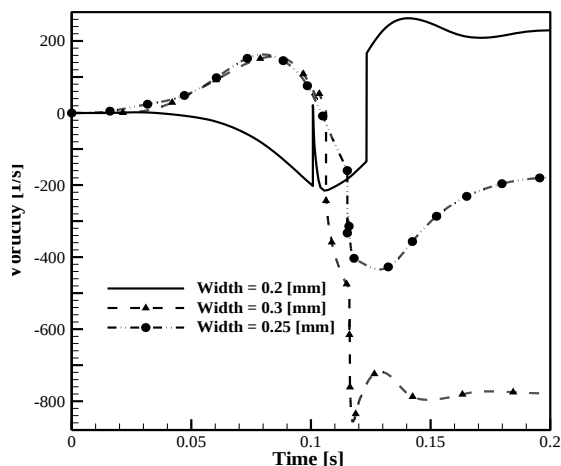


شکل (۱۱): تغییرات عدد ناسلت برای دیواره پایین در

عرض‌های مختلف ($Re=800$).

الگوی کلی تغییرات عدد ناسلت در سرعت‌های ۲/۲۸ و ۳/۴۲ متر بر ثانیه برای سه عرض مختلف مولد مشابه با حالت سرعت ۱/۷۱ متر بر ثانیه است، به طوری که در ابتدا عدد ناسلت کاهش یافته و سپس به دلیل حضور مولد گردابه، افزایشی ناگهانی را تجربه می‌کند و در ادامه مسیر به یک مقدار ثابت

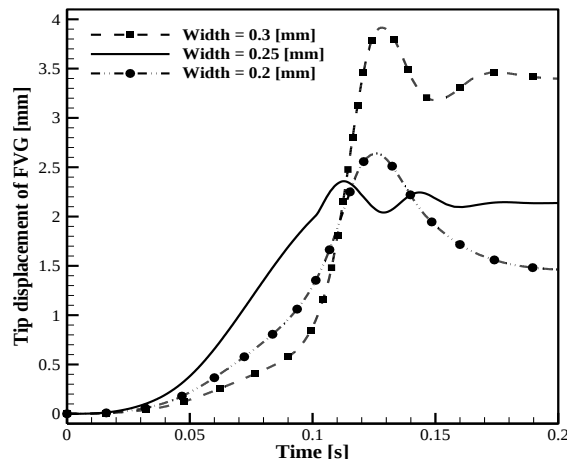
پایدار $1/S$ ۲۰۰ می‌رسد. در پهنای 0.25 میلی‌متر و 0.3 میلی‌متر نیز تغییرات ورتیسیت به ابتدا با شیب ملایمی افزایش می‌یابد. این روند آرام ادامه دارد تا زمانی که در حدود 0.12 ثانیه، افزایش ممنوم جریان ورودی منجر به تقویت ورتیسیت می‌شود.



شکل (۱۳): تغییرات وورتیسیت برای نقطه BB در پهنای مختلف مولد ($Re=800$).

افزایش پهنای مولد باعث افزایش تعامل مولد با جریان ورودی می‌شود که نتیجه آن تعامل قوی‌تر است. این موضوع نشان می‌دهد که پهنای مولد به طور مستقیم بر شدت و پایداری ورتیسیت تأثیر دارد؛ به طوری که پهنای بزرگ‌تر به دلیل تعامل بیشتر با جریان ورودی، ورتیسیت‌های بالاتر و پایداری تولید می‌کنند. با افزایش سرعت ورودی، دامنه و شدت تغییرات ورتیسیت افزایش می‌یابد. در سرعت ورودی $1/71$ متر بر ثانیه، تغییرات ورتیسیت نسبتاً آرام است و با افزایش سرعت به $2/28$ و سپس $3/42$ متر بر ثانیه، این تغییرات به طور قابل توجهی تشدید می‌شوند. پهنای مولد نیز نقش مهمی در رفتار ورتیسیت دارد؛ پهنای بیشتر منجر به پایداری بیشتر و افزایش شدت ورتیسیت می‌شوند. بنابراین، عدد رینولدز و پهنای مولد دو عامل کلیدی در تعیین رفتار ویسکوزیته جریان عبوری هستند.

شکل‌های ۱۴ الف و ب کانتورهای سرعت را برای مولد با پهنای 0.3 میلی‌متر و در شرایطی که عدد رینولدز 800 است، نمایش می‌دهد. در این کانتورها، اثرات قابل توجه هندسه مولد بر توزیع سرعت جریان در امتداد میکروکانال به وضوح مشاهده می‌شود. در شکل (۱۴-الف)، که یک نمای سه‌بعدی

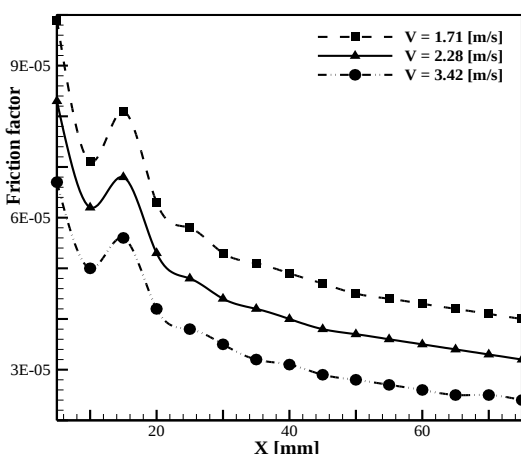


شکل (۱۲): تغییرات جابجایی نوک مولد در پهنای مختلف مولد ($Re=800$).

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پهنای مولد، جابجایی نوک مولد در تمامی سرعت‌های مورد بررسی افزایش می‌یابد. این افزایش جابجایی به دلیل افزایش نیروی وارد بر مولد به علت افزایش تعاملات دینامیکی بین جریان هوا و مولد است. در سرعت‌های بالاتر، این تعاملات تشدید شده و منجر به ایجاد تعامل بیشتری در نوک مولد می‌شود. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پهنای مولد و سرعت ورودی جریان هوا تأثیر مستقیمی بر جابجایی نوک مولد دارند. با افزایش پهنای مولد، جابجایی نوک مولد نیز افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش تعامل بین ممنوم جریان ورودی و پهنای بیشتری از مولد و همچنین افزایش مقاومت آیرودینامیکی است. به علاوه، با افزایش سرعت ورودی جریان هوا، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر مولد افزایش یافته و منجر به افزایش جابجایی نوک مولد می‌گردد. این نتایج می‌تواند در طراحی بهینه مولدهای گردابه برای کاربردهای مختلف مهندسی، از جمله کاهش نوسانات و بهبود پایداری سازه‌ها، مفید واقع شود.

شکل ۱۳ نشان‌دهنده تغییرات ورتیسیت در نقطه BB (با مختصات $x=18$ ، $y=17/5$ و $z=1$) با سرعت ورودی $1/71$ متر بر ثانیه برای سه پهنای مختلف مولد (0.2 ، 0.25 و 0.3 میلی‌متر) است. در این نمودار، برای پهنای 0.2 میلی‌متر مشاهده می‌شود که ورتیسیت ابتدا تقریباً ثابت است تا اینکه در زمان 0.95 ثانیه، تغییر ناگهانی در مقدار ورتیسیت رخ می‌دهد. این تغییر به دلیل تداخل جریان‌های اطراف مولد است که منجر به افزایش سریع ورتیسیت شده و به مقدار

می‌یابد. در سرعت‌های ورودی ۲/۲۸ و ۳/۴۲ متر بر ثانیه نیز روند کاهشی مشابهی مشاهده می‌شود، به طوری که ضریب اصطکاک در ابتدا بالاتر بوده و به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش در راستای طول کانال به دلیل توسعه پروفایل جریان و تشکیل لایه مرزی است که مقاومت اصطکاکی را کاهش می‌دهد. در عین حال حضور مولد در هر سه سرعت بعنوان یک مانع بوده و سبب افزایش مقطعی ضریب اصطکاک در طول ۱۵ میلی‌متری شده است.

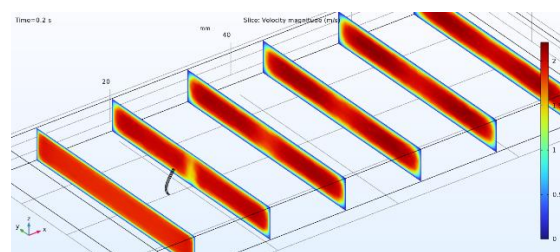


شکل (۱۵): تغییرات ضریب اصطکاک در سرعت های مختلف در پهنای ۰/۳ میلی‌متر.

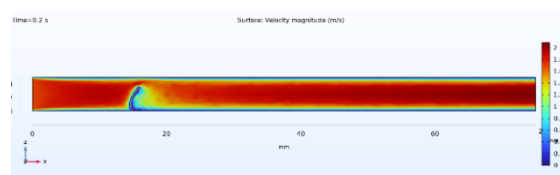
لازم به توضیح است با افزایش سرعت ورودی، ضریب اصطکاک به طور کلی کاهش می‌یابد زیرا در سرعت‌های بالاتر، نیروی ممنوم غالب شده و لایه مرزی نازک‌تری ایجاد می‌شود که مقاومت کمتری در برابر جریان سیال دارد. با افزایش سرعت، انرژی جنبشی سیال بیشتر شده و این امر موجب کاهش میزان تعامل سیال با دیواره‌های کانال و در نتیجه کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. با توجه به اینکه پهنای کانال تاثیر قابل توجهی بر تغییرات ضریب اصطکاک در یک عدد رینولدز ثابت ندارد، تنها یک پهنای ۰/۳ میلی‌متر برای بررسی این تغییرات در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۶ تغییرات عدد ناسلت را نسبت به طول کانال برای سه پهنای مختلف مولد (۰/۲، ۰/۲۵ و ۰/۳ میلی‌متر) با سرعت ورودی ۱/۷۱ متر بر ثانیه نشان می‌دهد. در این نمودار، عدد ناسلت در ابتدا تقریباً برابر با ۲۲ است و با عبور جریان از روی مولد، یک افزایش جزئی مشاهده می‌شود. سپس با ادامه جریان در کانال، عدد ناسلت به سرعت کاهش یافته و به

از میدان سرعت را ارائه می‌دهد، توزیع سرعت در نزدیکی مولد به صورت غیر یکنواخت و با بیشینه سرعت در محدوده‌ای نزدیک به لبه‌های مولد مشاهده می‌شود. این توزیع سرعت نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ابعاد مولد بر نحوه تغییرات سرعت در جریان اصلی است. در شکل (۱۴-ب) که یک نمای طولی از میدان سرعت را به تصویر می‌کشد، مشاهده می‌شود که در ناحیه نزدیک به مولد، یک تغییر شدید در سرعت جریان وجود دارد. این تغییر سرعت، که به واسطه تداخل جریان با مولد به وجود می‌آید، به طور مشخص توزیع انرژی جنبشی جریان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که مولد با پهنای ۰/۳ میلی‌متر، نه تنها بر توزیع سرعت جریان در میکروکانال تأثیر می‌گذارد، بلکه به عنوان یک عامل کلیدی در تنظیم رفتار جریان در شرایط مختلف عمل می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل (۱۴): الف) نمای سه بعدی کانتور تغییرات سرعت برای پهنای ۰/۳ میلی‌متر و عدد رینولدز ۸۰۰؛ ب) نمای مقطع طولی کانتور تغییرات سرعت برای پهنای ۰/۳ میلی‌متر و عدد رینولدز ۸۰۰.

شکل ۱۵ نشان‌دهنده تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب طول میکروکانال در سه سرعت ورودی متفاوت (۱/۷۱، ۲/۲۸ و ۳/۴۲ متر بر ثانیه) با پهنای ثابت ۰/۳ میلی‌متر برای مولد است. روند تغییرات ضریب اصطکاک برای هر سه سرعت کاهشی است. به عنوان مثال، در سرعت ورودی ۱/۷۱ متر بر ثانیه، ضریب اصطکاک از حدود $10^{-5} \times 9/6$ شروع شده و به حدود $10^{-5} \times 4/6$ (در طول کانال ۶۰ میلی‌متر) کاهش

۰/۳ میلی‌متر، عدد ناسلت به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد که باعث بهبود قابل توجه در انتقال حرارت در میکروکانال‌ها می‌شود.

۲) تأثیر سرعت جریان ورودی بر افت فشار و

انتقال حرارت: بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان ورودی در محدوده ۱/۷۱ تا ۳/۴۲ متر بر ثانیه، افت فشار کاهش می‌یابد و انتقال حرارت به طور محسوسی بهبود پیدا می‌کند.

۳) افزایش جابجایی حرارت با کاهش لایه مرزی:

با افزایش پهنای مولد، جابجایی حرارتی به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی روی دیواره کانال بهبود یافته و انتقال حرارت تا ۳ درصد افزایش می‌یابد.

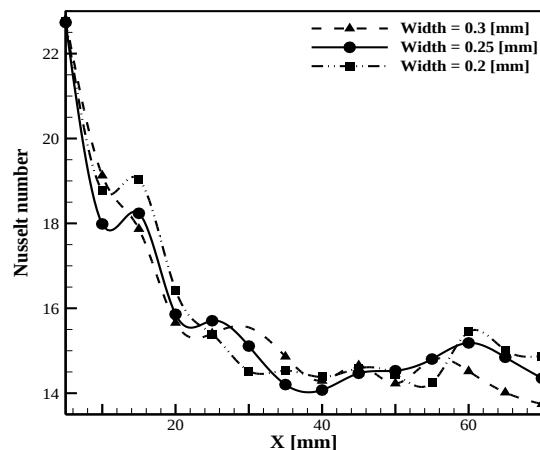
۴) بهبود عملکرد مولد در سرعت‌های بالاتر: در

سرعت‌های ورودی بالاتر، اثرات بهبود در انتقال حرارت و کاهش مقاومت جریان بیشتر مشهود است، که نشان‌دهنده عملکرد مؤثرتر مولد در این شرایط است.

۵) کاهش ضریب اصطکاک و افزایش کارایی

سیستم: با افزایش سرعت جریان ورودی و بهبود هندسه مولد، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و کارایی کلی سیستم افزایش پیدا می‌کند.

مقادیر پایداری در حدود ۱۴ تا ۱۶ می‌رسد. این کاهش به دلیل افزایش ضخامت لایه مرزی حرارتی و کاهش گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های کانال رخ می‌دهد که به کاهش نرخ انتقال حرارت منجر می‌شود. تاثیر پهنای کانال بر عدد ناسلت در این شرایط جزئی بوده و تفاوت قابل توجهی در نتایج مشاهده نمی‌شود. روند تغییرات در سرعت‌های ورودی ۲/۲۸ و ۳/۴۲ متر بر ثانیه نیز مشابه شکل (۱۶) است؛ به طوری که عدد ناسلت ابتدا در مقادیر بالاتری شروع شده و سپس به مقادیر پایداری در انتهای کانال می‌رسد. در سرعت‌های بالاتر، عدد ناسلت اولیه بالاتر است و پس از کاهش تدریجی به مقادیر بیشتری نسبت به سرعت پایین‌تر، ختم می‌شود.



شکل (۱۶): تغییرات عدد ناسلت برای دیواره پایین در

پهنای مختلف مولد ($Re=800$).

به طور کلی، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت ورودی، عدد ناسلت اولیه و تغییرات آن افزایش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش جریان ورودی است که به افزایش گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های کانال منجر می‌شود. تفاوت‌های بین پهنای مختلف مولد بر عدد ناسلت کم بوده و پهنای کانال تاثیر محدودی بر تغییرات این عدد دارد. با این حال، تاثیر سرعت ورودی بر عدد ناسلت بیشتر بوده و با افزایش سرعت، عدد ناسلت بالاتری در طول کانال به دست می‌آید.

۵- نتیجه‌گیری

۱) افزایش انتقال حرارت با افزایش پهنای مولد:

با افزایش پهنای مولد گردابه از ۰/۱۵ میلی‌متر به

۶- فهرست علائم

A_m	جابجایی متوسط نقطه $A(mm)$
b	بردار نیروی حجمی (N/m)
C	سرعت نسبی بین مش و ماده (m/s)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/K)
C_D	ضریب متوسط درگ (-)
f	ضریب فاکتور اصطکاک (-)
D	قطر سیلندر (mm)
D_H	قطر هیدرولیکی (mm)
d_s	جابجایی ساختار جامد (mm)
E	مدول یانگ (MPa)
μ	ویسکوزیته دینامیکی $(kg/(m \cdot s))$
F	تانسور دفرمگی جامد (-)

performance of microchannel with combined ultrasonic and passive structure. Applied Thermal Engineering. 2023;233:121076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121076>.

[7] Memon SA, Akhtar S, Cheema TA, Park CW. Enhancing heat transfer in microchannels: A systematic evaluation of crescent-like fin and wall geometries with secondary flow. Applied Thermal Engineering. 2024;239:122099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122099>.

[8] Wu X, Fu T, Wang J, Zeng L, Zhang F. A comparative study of fluid flow and heat transfer in the tube with multi-V-winglets vortex generators. Applied Thermal Engineering. 2024;236:121448. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121448>.

[9] Wang J, Wang C. Heat transfer and flow characteristics of a rectangular channel with a small circular cylinder having slit-vent vortex generator. International Journal of Thermal Sciences. 2016;104:158-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.01.006>.

[10] Singh NK. Control of laminar separation bubble using vortex generators. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2019;12(3):891-905. DOI: <https://doi.org/10.29252/jafm.12.03.29352>.

[11] Xie J, Xie Y, Yuan C. Numerical study of heat transfer enhancement using vortex generator for thermal management of lithium ion battery. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;129:1184-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.018>.

[12] Al-Asadi MT, Alkasmoul FS, Wilson MC. Heat transfer enhancement in a micro-channel cooling system using cylindrical vortex generators. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2016;74:40-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.002>.

[13] Dudek JC. Modeling vortex generators in a Navier-Stokes code. AIAA journal. 2011;49(4):748-59. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.050683>.

[14] Esmaeilzadeh A, Amanifard N, Deylami HM. Comparison of simple and curved trapezoidal longitudinal vortex generators for optimum flow characteristics and heat transfer augmentation in a heat exchanger. Applied Thermal Engineering. 2017;125:1414-25. DOI:

H	ارتفاع میکروکانال (mm)
h	ضریب انتقال حرارت محلی ($W/(m^2K)$)
K	ضریب انتقال حرارت هدایت ($W/(m.K)$)
L	طول میکروکانال (mm)
L_e	فاصله مولد از ورودی کانال (mm)
Nu	عدد ناسلت (-)
P	فشار (atm)
q''	شار حرارتی (W/m^2)
S	تانسور دوم پیولا کریشهف (-)
St	عدد استرودهال (-)

۶- مراجع

[1] Vujanović M, Besagni G, Duić N, Markides CN. Innovation and advancement of thermal processes for the production, storage, utilization and conservation of energy in sustainable engineering applications. Applied thermal engineering. 2023;221:119814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119814>.

[2] Asif M, Muneer T. Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. Renewable and sustainable energy reviews. 2007;11(7):1388-413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.004>.

[3] Li J, Chen J, Chen Y, Luo X, Liang Y, He J, Yang Z. Multi-objective optimizations of vapor-liquid adjustment evaporator and its machine-learning based operational control strategy. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024;219:124894. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124894>.

[4] Tafavogh M, Zahedi A. Improving the performance of home heating system with the help of optimally produced heat storage nanocapsules. Renewable Energy. 2022; 181:1276-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.015>.

[5] Zhang D, Fu L, Guan J, Shen C, Tang S. Investigation on the heat transfer and energy-saving performance of microchannel with cavities and extended surface. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022; 189:122712. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122712>.

[6] Zhang D, Fu L, Tang S, Lan M, Shen C, Chen S, Cao H, Wu J. Investigation on the heat transfer

- Engineering Journal. 2021;405:126652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126652>.
- [23] Saini P, Dhar A, Powar S. Performance enhancement of fin and tube heat exchanger employing curved trapezoidal winglet vortex generator with circular punched holes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023;209:124142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124142>.
- [24] Gallegos RK, Sharma RN. Flags as vortex generators for heat transfer enhancement: Gaps and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;76:950-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.115>.
- [25] Tian FB, Dai H, Luo H, Doyle JF, Rousseau B. Fluid-structure interaction involving large deformations: 3D simulations and applications to biological systems. Journal of computational physics. 2014;258:451-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.047>.
- [26] Malvern LE. Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium. 1969.
- [27] Ali S, Habchi C, Menanteau S, Lemenand T, Harion JL. Heat transfer and mixing enhancement by free elastic flaps oscillation. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015 ;85:250-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.122>.
- [28] Tian FB, Dai H, Luo H, Doyle JF, Rousseau B. Fluid-structure interaction involving large deformations: 3D simulations and applications to biological systems. Journal of computational physics. 2014 ;258:451-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.047>.
- [29] Turek S, Hron J. Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow. Springer Berlin Heidelberg; 2006. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-34596-5_15.
- [30] Bejan A. Convection heat transfer. John Wiley & sons; 2013.
- [31] Asaadi S, Abdi H. Numerical investigation of laminar flow and heat transfer in a channel using combined nanofluids and novel longitudinal vortex generators. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021;145:2795-808. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09795-5>.
- <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.115>.
- [15] Pourgholam M, Izadpanah E, Motamedi R, Habibi SE. Convective heat transfer enhancement in a parallel plate channel by means of rotating or oscillating blade in the angular direction. Applied Thermal Engineering. 2015;78:248-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.057>.
- [16] Tian FB, Dai H, Luo H, Doyle JF, Rousseau B. Fluid-structure interaction involving large deformations: 3D simulations and applications to biological systems. Journal of computational physics. 2014;258:451-69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2013.10.047>.
- [17] Kang MS, Park SG, Dinh CT. Heat transfer enhancement by a pair of asymmetric flexible vortex generators and thermal performance prediction using machine learning algorithms. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2023;200:123518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123518>.
- [18] Gandjalikhan Nassab SA, Moein Addini M. Convection Enhancement Using Composite Vortex Generator. AUT Journal of Mechanical Engineering. 2022;6(1):149-64. DOI: <https://doi.org/10.22060/ajme.2021.20158.5992>.
- [19] Liao W, Jing D. Experimental study on fluid mixing and pressure drop of mini-mixer with flexible vortex generator. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2023;142:106615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.106615>.
- [20] Amini Y, Habibi SE. Effects of multiple flexible vortex generators on the hydrothermal characteristics of a rectangular channel. International Journal of Thermal Sciences. 2022;175:107454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107454>.
- [21] Caliskan S, Koseoglu AD, Dogan A, Sahin UR. Experimental investigation of the effect of flexible/rigid flag on heat transfer. International Journal of Thermal Sciences. 2023;188:108147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108147>.
- [22] Hosseini S, Aghebatandish S, Dadvand A, Khoo BC. An immersed boundary-lattice Boltzmann method with multi relaxation time for solving flow-induced vibrations of an elastic vortex generator and its effect on heat transfer and mixing. Chemical