



Numerical Investigation of the Effect of a Modified Corrugated Longitudinal Vortex Generator on the Hydraulic-Thermal Performance of a Minichannel

Younes Pourgholam Leylakoochi¹ , Hamed Mohaddes Deylami^{2*}

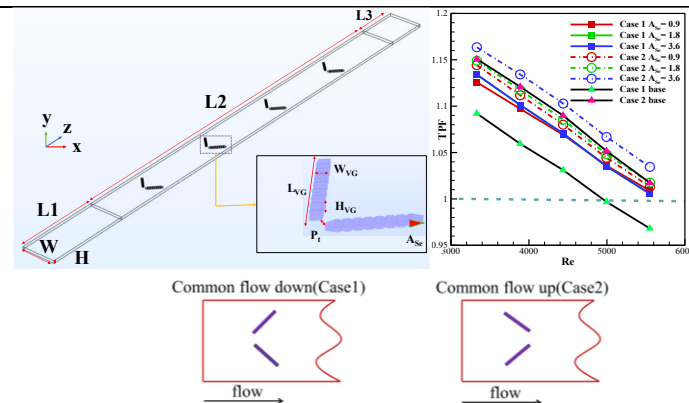
¹ PhD Student, University of Guilan, Rasht, Iran. pourgholamyounes@gmail.com

² Associate Professor, University of Guilan, Rasht, Iran. (*Correspondence: hmohaddesd@guilan.ac.ir)

HIGHLIGHTS

- Three-dimensional numerical simulation of heat transfer influenced by corrugated sharp edge vortex generator
- Analysis of flow and thermal parameters of vortex generator in modified state
- Improvement thermo-hydraulic performance of minichannel

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 14 April 2026

Received in revised form: 29 May 2026

Accepted: 07 June 2026

Available online: 01 July 2026

*Correspondence:

hmohaddesd@guilan.ac.ir

Keywords:

Longitudinal Corrugated Vortex Generator

Heat Transfer Enhancement In Minichannel

Numerical Simulation

Turbulent Flow

ABSTRACT

One of the key issues in various industries, such as aerospace, is the enhancement of cooling rates in internal flows. The use of vortex generators is a common method for improving heat transfer. The main objective of this study is to investigate the effect of sharp edges on corrugated longitudinal vortex generators in two configurations of Common Flow Up (CFU) and Common Flow Down (CFD). This research numerically simulates heat transfer inside a mini-channel. The working fluid is pure water with constant properties throughout the simulation. The energy, momentum, and continuity equations for an incompressible fluid are solved in a steady-state, three-dimensional, turbulent flow regime. The numerical simulations are performed using the COMSOL Multiphysics software based on the finite element method. The results of velocity distribution, static and local temperature in the minichannel, as well as comparisons of the Nusselt number and friction factor, are presented. The results indicate that the modified corrugated vortex generator increases the friction factor by up to 130% compared to a minichannel without a vortex generator. Furthermore, the overall Nusselt number increases by 37% in the CFD configuration and by 40% in the CFU configuration. Comparison of the modified corrugated vortex generator with the conventional corrugated vortex generator shows that, due to the enhanced vortex strength (up to 5%), the thermal performance factor of the mini-channel is improved.

Cite this article: Pourgholam Leylakoochi, Younes[®], Mohaddes Deylami, Hamed[®]. Numerical Investigation of the Effect of a Modified Corrugated Longitudinal Vortex Generator on the Hydraulic-Thermal Performance of a Minichannel. Journal of Aerospace Mechanics. 2025; 22 (2): 79-89.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2026.1544>

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

Publisher: Imam Hossein Comprehensive University.





بررسی عددی تأثیر مولد گردابه طولی چین دار اصلاح شده بر عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مینی کانال

یونس پورغلام لیلا کوهی¹، حامد محدث دیلمی^{2*}

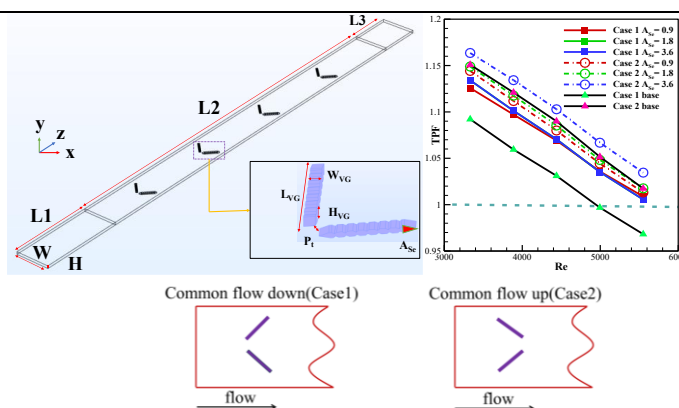
¹ دانشجوی دکتری، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. pourgholamyounes@gmail.com

² دانشیار، دانشگاه گیلان، رشت، ایران. (نویسنده مسئول: hmohaddesd@guilan.ac.ir)

برجسته ها

- شبیه سازی عددی سه بعدی انتقال حرارت تحت تأثیر مولد گردابه طولی چین دار اصلاح شده
- بررسی تأثیر مولد گردابه، در حالت اصلاح شده بر پارامترهای جریانی و حرارتی
- بهبود عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مینی کانال

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: 25 فروردین 1405

بازنگری: 08 خرداد 1405

پذیرش: 17 خرداد 1405

ارائه آنلاین: 10 تیر 1405

*نویسنده مسئول:

hmohaddesd@guilan.ac.ir

کلید واژه ها:

مولد گردابه چین دار طولی
افزایش انتقال حرارت در مینی کانال
شبیه سازی عددی
جریان آشفته

چکیده

یکی از موضوعات مهم در صنایع مختلف همچون هوافضا بهبود نرخ خنک کاری در جریان های داخلی است. استفاده از مولد گردابه یکی از روش های مرسوم برای بهبود انتقال حرارت است. هدف اصلی این پژوهش، بررسی تأثیر لیه های تیز بر روی مولدهای گردابه طولی چین دار در دو پیکربندی جریان بالا و جریان پایین است. این پژوهش به شبیه سازی عددی انتقال حرارت درون یک مینی کانال پرداخته است. سیال عامل آب خالص با خواص ثابت در طول شبیه سازی است. معادلات انرژی، مومنتوم و پیوستگی برای سیال تراکم ناپذیر در حالت پایا، سه بعدی و در رژیم جریان آشفته حل شده است. شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار کامسول مالی فیزیکس مبتنی بر روش المان محدود است. نتایج توزیع سرعت، دمای استاتیکی و موضعی مینی کانال و همچنین مقایسه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که مولد گردابه اصلاح شده باعث افزایش ضریب اصطکاک تا 130٪ در مقایسه با یک مینی کانال بدون مولد گردابه می شود. همچنین، عدد ناسلت کل در پیکربندی جریان روبه پایین 37٪ و در پیکربندی جریان روبه بالا 40٪ افزایش یافته است. مقایسه مولد گردابه چین دار اصلاح شده نسبت به مولد گردابه چین دار نشان می دهد به دلیل افزایش قدرت گردابه ها تا 5٪ ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال بهبود داشته است.

استناد: پورغلام لیلا کوهی، یونس¹، محدث دیلمی، حامد². بررسی عددی تأثیر مولد گردابه طولی چین دار اصلاح شده بر عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مینی کانال. مکانیک هوافضا. (1405)؛ 22 (2): 79-89.

DOI: <https://doi.org/10.47176/MAJ.2026.1544>

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

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



1- مقدمه

با گسترش روزافزون کاربرد قطعات و مدارهای الکترونیکی، یکی از چالش‌های اساسی مهندسان در سال‌های اخیر، افزایش نرخ انتقال حرارت از سطوح تولیدکننده گرما در ابعاد کوچک همانند هیت‌سینک‌ها، میکرو یا مینی کانال‌ها و پردازنده‌های مجتمع مرکزی^۱ (CPU) است. اهمیت این موضوع از آن جهت است که عملکرد بسیاری از سامانه‌هایی که با تولید گرما درگیر هستند، به دفع مؤثر حرارت از آن‌ها وابسته است. معمولاً خنک‌کاری این سطوح توسط مایعات انجام می‌شود [1].

روش‌های افزایش انتقال حرارت از سطوح، به‌طور کلی به دو دسته‌ی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شوند [۲]. در روش فعال، با بهره‌گیری از یک میدان یا نیروی خارجی و افزایش مومنتم ذرات سیال از طریق کنترل جریان، نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد [۳]. از مزایای این روش می‌توان به افزایش نرخ خنک‌کاری و بهبود بازده سیستم در مدت‌زمان کوتاه اشاره کرد. با این حال، روش فعال نیازمند تجهیزات اضافی و مصرف انرژی بیشتر است [۴]. هزینه بالای سیستم‌های خنک‌کاری، حساسیت زیاد قطعات مورد استفاده و محدودیت در نصب آن‌ها در برخی کاربردهای خاص، از جمله معایب این روش محسوب می‌شوند. در مقابل، در روش‌های غیرفعال، با تغییر در هندسه سطح و بهره‌گیری از ویژگی‌های جریان سیال، از طریق ایجاد آشفتگی و بی‌نظمی در جریان، امکان افزایش نرخ انتقال حرارت فراهم می‌شود [۵]. در میان روش‌های غیرفعال، مولدهای گردابه جایگاه ویژه‌ای دارند. این مولدها با ایجاد اختلاف فشار در مسیر سیال و تشکیل گردابه‌های طولی، موجب برهم‌زدن لایه‌ی مرزی و افزایش اختلاط جریان شده و در نتیجه، نرخ انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند.

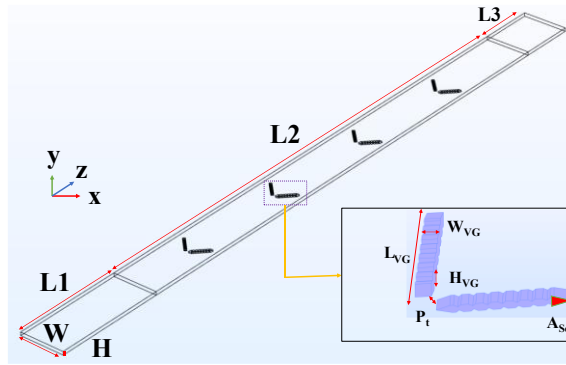
مولدهای گردابه به دلیل کاربرد گسترده در زمینه‌هایی مانند خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی در مقیاس کوچک، بهبود عملکرد آیرودینامیکی وسایل نقلیه و هواپیماها، خنک‌کاری در مینی کانال‌ها و صنعت تهویه مطبوع، مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته‌اند. از این‌رو، مطالعات گسترده‌ای به‌منظور بهبود کارایی آن‌ها انجام شده است. به‌عنوان نمونه، جلایری و همکاران [6] در یک مطالعه عددی، تأثیر حضور مولد گردابه در سه شکل مختلف درون یک مینی کانال با جریان آرام و حضور سیال فروفلوئید را بررسی کردند. نتایج نشان داد که وجود مولد گردابه سبب افزایش چشمگیر انتقال حرارت در کانال تا 70٪ و بهبود عملکرد هیدرولیکی - حرارتی آن تا 100٪ می‌شود. همچنین، در میان اشکال مختلف، مولد گردابه مستطیلی به دلیل ساختار ساده و قابلیت ساخت آسان، عملکرد قابل‌قبولی از خود نشان داد.

ژائو کینگ و همکاران [7] گزارش کردند که پیکربندی صحیح مولد گردابه در آرایش جفت و تبدیل آن به باله^۲، تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد حرارتی کانال دارد. آنان با بررسی دو پیکربندی جریان بالا^۳ (CFU) و جریان پایین^۴ (CFD) برای مولدهای گردابه مستطیلی و مثلثی دریافتند که این مولدها در رژیم جریان آشفته، به دلیل کاهش ضریب اصطکاک، عملکرد حرارتی بهتری دارند. البته مولدهای مستطیلی به علت افت اصطکاک بیشتر، از نظر عملکرد هیدرولیکی - حرارتی در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرند.

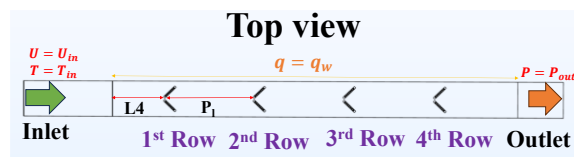
اویس و بوهیان [8] در پژوهش‌های تجربی و عددی خود بر روی مولد گردابه مستطیلی، نشان دادند که این نوع مولد در بازه اعداد رینولدز کمتر از ۶۰۰۰ عملکرد مناسبی دارد. همچنین ابراهیمی و همکاران [9] در یک مطالعه عددی، پیکربندی‌های مختلف مولدهای گردابه مستطیلی را بررسی کرده و اثبات کردند که با افزایش تعداد مولدها و تبدیل آن‌ها به مولدهای گردابه طولی در دو پیکربندی CFU و CFD، می‌توان عملکرد هیدرولیکی - حرارتی را درون مینی کانال بهبود بخشید. اسماعیل‌زاده و همکاران [10] نیز در پژوهشی عددی با تغییر در هندسه مولد گردابه دوزنقه‌ای و ایجاد خمیدگی در آن نشان دادند که اصلاح سطح مولد باعث کاهش افت فشار و افزایش مطلوب انتقال حرارت می‌شود. در مطالعه‌ی دیگر، دیلمی و لیلاکوهی [11] با تغییر سطح مولد گردابه مستطیلی و تبدیل آن به مولد گردابه چین‌دار، دریافتند که این اصلاح موجب افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش ضریب اصطکاک می‌گردد. نتایج آنان نشان داد که مولد گردابه‌ی چین‌دار شده در مقایسه با نوع مستطیلی پایه خود، موجب افزایش ۲۷ درصدی ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال می‌شود.

بر اساس پیشینه پژوهش در زمینه مولدهای گردابه درمی‌یابیم یکی از راهکارهای افزایش کارایی مولدهای گردابه، اصلاح شکل هندسی آن‌ها باهدف کنترل و بهینه‌سازی مشخصه‌های جریان است. هدف اصلی مطالعه حاضر ایجاد تغییر شکل در هندسه مولد گردابه چین‌دار (ارائه‌شده توسط دیلمی و لیلاکوهی [11]) به‌منظور بهبود عملکرد و کارایی این نوع مولد گردابه در خنک‌کاری جریان‌های داخلی همچون مینی کانال‌ها است. پژوهش حاضر، به تأثیر افزودن سطح نوک‌تیز به مولد گردابه چین‌دار و اصلاح آن پرداخته است. همچنین مولد گردابه چین‌دار اصلاح‌شده به‌عنوان یک مولد گردابه‌ی طولی از منظر ویژگی‌های جریان و حرارتی مورد ارزیابی و بررسی قرار می‌گیرد. پیکربندی‌های انتخاب‌شده بر اساس مطالعات پیشین شامل دو حالت جریان بالا (CFU) و جریان پایین (CFD) درون مینی کانال مستطیلی است که از پایه‌ای‌ترین نوع آرایش‌ها برای مولدهای گردابه به شمار می‌روند. رژیم جریان مورد بررسی از نوع آشفته و در محدوده‌ی اعداد رینولدز ۳۳۰۰ تا

² Winglet³ Common Flow Up⁴ Common Flow Down¹ Central Processing Unit



الف



ب

1
Base corrugated vortex generator



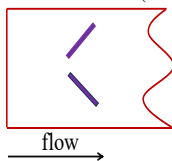
2



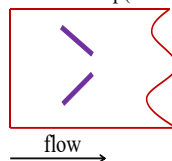
Area of sharp edge (A_{Se})

پ

Common flow down (Case1)



Common flow up (Case2)



ت

شکل (1): شکل شماتیک مولدهای گردابه طولی در مینی کانال الف
نمای سه بعدی ب) نمای از بالا پ) نحوه اصلاح مولد گردابه چین دار
ت) پیکربندی.

3- معادلات حاکم و پارامترهای مورد بررسی

معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی سیال برای رژیم آشفته
سه بعدی، تراکم ناپذیر و پایا به شرح زیر است [13 و 14]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$c_p \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) - c_p \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

۵۵۰۰ در نظر گرفته شده است. باتوجه به کاربردهای گسترده
مولدهای گردابه و سادگی در ساخت، نتایج این پژوهش می تواند در
طراحی های آبی و کاربردهای صنعتی مفید واقع شود.

2- هندسه مطالعاتی

هندسه مسئله شامل یک مینی کانال با مقطع مستطیلی در
حضور مولدهای گردابه طولی با چهار ردیف در دو پیکربندی
CFD و CFU است. در پژوهش حاضر نوع مولد گردابه در حالت
پایه از نوع چین دار است که پس از اصلاح به صورت، چین دار با
گوشه های تیز از نوع مثلثی در دو طرف آن تغییر شکل داده شده
است. هدف از این کارافزایش هرچه بیشتر کارایی این نوع از
مولدهای گردابه به منظور خنک کاری در مینی کانال ها است.
مراحل اصلاح مولد گردابه چین دار در شکل 1 پ) به نمایش
درآمده است. هندسه مولد گردابه و نحوه قرار گیری آن در
مینی کانال، نوع پیکربندی و نحوه اصلاح مولد گردابه چین دار از
موارد مهمی است که در بخش های مختلف از شکل 1 به آن
اشاره شده است. برای راحتی و بحث در بخش های بعدی
پیکربندی جریان پایین به عنوان Case 1 و جریان بالا با Case 2
معرفی می شوند. مینی کانال مستطیلی مطابق با پژوهش تانگ و
همکاران [12] تشکیل شده از سه بخش ورودی با طول L_1 ،
بخش دارای شار حرارتی L_2 و ناحیه خروجی L_3 است. ارتفاع
مینی کانال H ، عمق آن W و همچنین فاصله طولی اولین ردیف
از مولدهای گردابه L_4 و فاصله هر ردیف از مولدهای گردابه P_t
تعریف می شود. همچنین ارتفاع مولد گردابه H_{VG} ، طول مولد
گردابه L_{VG} و فاصله عرضی باله ها P_t است. سطح چین دار، A_{Cd}
 $0.25/8$ mm² و سطح اصلاح شده A_{Se} در سه اندازه $0.9/8$ و
 $3/6$ mm² است. همچنین زاویه حمله در Case 1 44 درجه و در
Case 2 136 درجه است. در جدول 1 تمامی پارامترهای هندسی
مسئله مورد مطالعه ارائه شده است.

جدول (1): ابعاد و اندازه مینی کانال و مولد

مشخصه	اندازه (میلی متر)
L_1	100
L_2	450
L_3	50
L_4	60
L_{VG}	14
W	40
W_{VG}	2/2
H	3
H_{VG}	1/8
P_t	4
P_l	100

به منظور یافتن افت اصطکاک، ضریب اصطکاک به صورت زیر محاسبه می شود:

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{\rho U_{in}^2 L} \quad (9)$$

در معادله فوق L طول مینی کانال و ΔP اختلاف فشار متوسط ورودی و خروجی مینی کانال است.

برای سنجش عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مینی کانال، ضریب عملکرد حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$TPF = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (10)$$

زیر وندهای 0 نشانگر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مینی کانال در عدم حضور مولد گردابه است. ضرایب بیشتر از یک برای رابطه فوق نشان می دهد که در حضور مولد گردابه مینی کانال عملکرد بهتری دارد.

4- شرایط مرزی

به منظور دستیابی به حل صحیح یک پدیده فیزیکی، اعمال شرایط مرزی مناسب امری حیاتی تلقی می گردد. مطابق با شکل 1 (ب) سرعت سیال در ورودی برحسب عدد رینولدز محاسبه می شود و دمای سیال ورودی، 300 K است. در دیواره پایین که مولدهای گردابه بر روی آن قرار دارند شار ثابت 50 kW اعمال شده است. تمامی دیواره ها از شرط عدم لغزش پیروی می کنند. همچنین سطح مولد گردابه آدیاباتیک است. برای خروجی دامنه محاسباتی، فشار برابر با فشار محیط است و تمامی گرادینان ها در خروجی مینی کانال برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

5- اعتبارسنجی و استقلال از شبکه

شبکه بندی تحقیق حاضر توسط ابزار تولید شبکه نرم افزار کامسول مالتی فیزیکس انجام شده است. نوع شبکه بندی از نوع بی سازمان و مثلثی برای دیواره های جانبی مینی کانال و مولد گردابه است. به منظور افزایش دقت حل در تنظیمات شبکه کالیبراسیون متناسب بر اساس دینامیک سیالات لحاظ شده است. اندازه بزرگ ترین المان مثلثی برابر با 2 mm و کوچک ترین آن 0/6 mm با نرخ رشد 1/2 انتخاب شده است. برای افزایش دقت حل و تحلیل درست متغیرهای وابسته به دیواره همچون ضریب اصطکاک و عدد ناسلت از مش لایه مرزی با تعداد 6 لایه، ضریب کشیدگی 1/3 و ضریب ضخامت 0/9 استفاده شده تا شرط لازم $y^+ < 1$ برای مدل آشفتگی SST-k ω ارضا شود. در شکل 2 شبکه بندی مینی کانال و مولد گردابه به نمایش درآمده است. برای دستیابی به جواب های مناسب و کاهش هزینه محاسباتی برای کار حاضر، مطالعه شبکه در شکل 3 نشان می دهد که مینی کانال در حضور مولد گردابه چین دار اصلاح شده در تعداد سلول 400000 برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به حالت پایدار رسیده است.

در معادله فوق λ ضریب هدایت حرارتی سیال است، همچنین اتلافات ویسکوز و معادله انرژی جنبشی سیال با استفاده از مدل آشفتگی SST-k ω در مرجع [16] قابل مشاهده است. معادلات فوق به شیوه عددی مبتنی بر روش المان محدود حل می شوند. خواص سیال در طول شبیه سازی ثابت فرض شده است. از آنجایی که هدف نهایی مطالعه حاضر بررسی متغیرهای مسئله در حالت پایدار است، به منظور کاهش هزینه های محاسباتی و صرفه جویی در زمان از اثرات تغییرات زمان صرف نظر و معادلات در شرایط پایا حل می شوند. برای جملات سرعت و فشار از گسسته سازی P1+P1 و برای جملات دما از تقریب درجه دوم استفاده شده است. معادلات به صورت گسسته¹ حل می شوند. شرط همگرایی کاهش باقی مانده ها تا 10^{-4} برای جملات مومنوم، 10^{-6} برای جملات انرژی و مدل آشفتگی لحاظ شده است. بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه مولدهای گردابه [10-14] مدل آشفتگی SST-k ω به دلیل پیش بینی صحیح مشخصه حرارتی و جریانی وابسته به دیواره و نیز الگوی هسته اصلی جریان انتخابی مناسب و قابل اعتماد برای شبیه سازی جریان های داخلی به شمار می رود.

به منظور به دست آوردن خواص مهم جریان و همچنین پارامترهای ورودی مورد نیاز برای مسئله پیش رو قطر هیدرولیکی به صورت زیر تعریف می شود:

$$D_h = \frac{2HW}{H+W} \quad (4)$$

برای محاسبه سرعت ورودی در مینی کانال برحسب عدد رینولدز خواهیم داشت:

$$Re = \frac{\rho U_{in} D_h}{\mu} \quad (5)$$

به طوری که U_{in} سرعت ورودی است. برای بررسی میزان انتقال حرارت دریافتی از سطح توسط سیال، ضریب انتقال حرارت جابه جایی متوسط به صورت زیر بیان می گردد:

$$h = \frac{q_w}{T_w - T_b} \quad (6)$$

در معادله فوق q_w شار حرارتی وارد بر دیواره، T_w دمای میانگین سطح دیواره و T_b دمای بالک سیال است که از رابطه زیر تعیین می گردد:

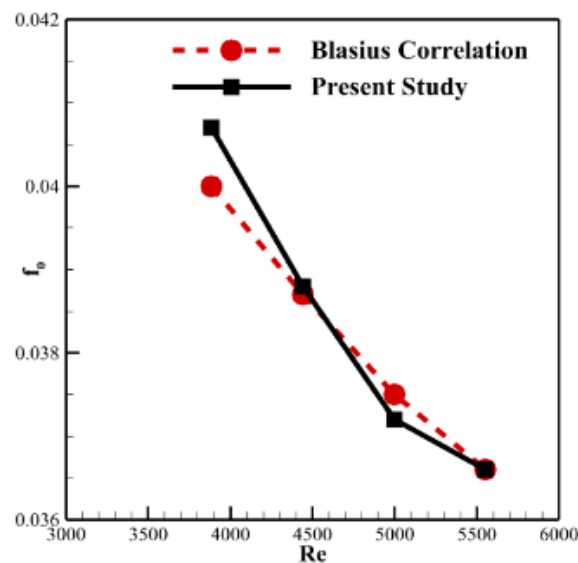
$$T_b = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (7)$$

در این رابطه T_{in} دمای متوسط ورودی سیال و T_{out} دمای متوسط خروجی آن است. عدد ناسلت میانگین به عنوان معیاری برای سنجش میزان انتقال حرارت جابه جایی به صورت زیر تعریف می شود:

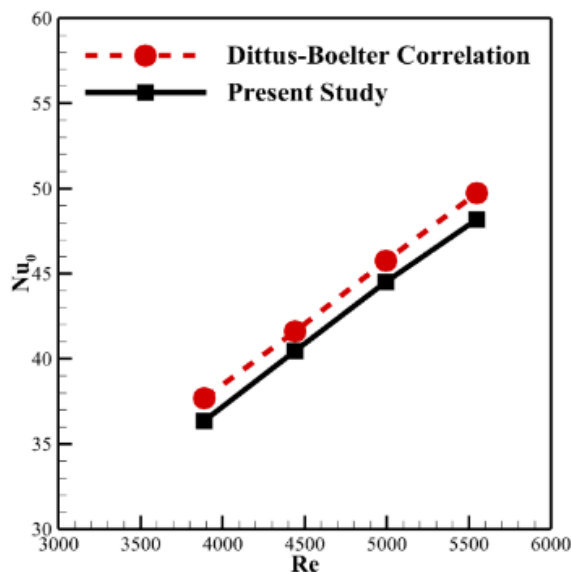
$$Nu = \frac{h D_h}{\lambda} \quad (8)$$

¹ Segregated

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (12)$$



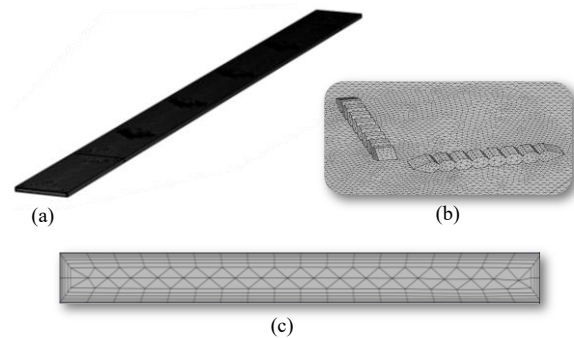
شکل (4): اعتبارسنجی نتایج پژوهش حاضر با روابط همبستگی برای ضریب اصطکاک.



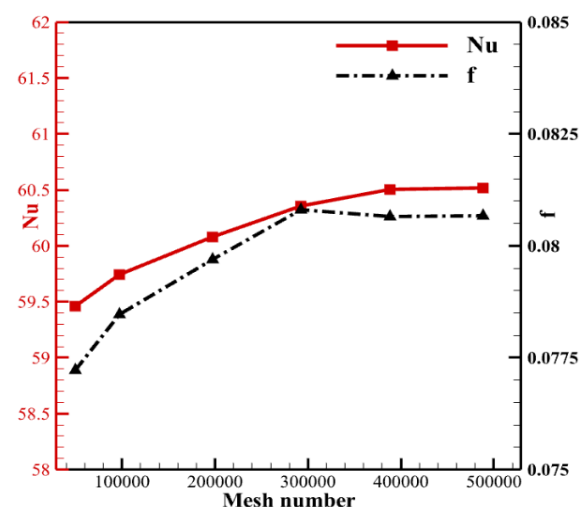
شکل (5): اعتبارسنجی پژوهش حاضر با روابط همبستگی برای عدد ناسلت.

6- نتایج

به منظور درک بهتر اثرات نوک تیز کردن مولد گردابه چین دار لازم است، این رویکرد در ابعاد مختلف جریانی و حرارتی مورد بحث و بررسی قرار گیرد. به همین منظور در این بخش اثر مولد گردابه اصلاح شده در شرایط مختلف جریانی و حرارتی مورد بررسی قرار می گیرد. شکل 6 توزیع میدان سرعت و خطوط جریان در مینی کانال را برای آخرین ردیف از مولدهای گردابه (4th Row) در عدد رینولدز 3300 نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می شود هنگامی که مساحت نوک تیز افزایش پیدا



شکل (2): شبکه بندی و توزیع سلول ها در دامنه محاسباتی برای مینی کانال و مولد گردابه.



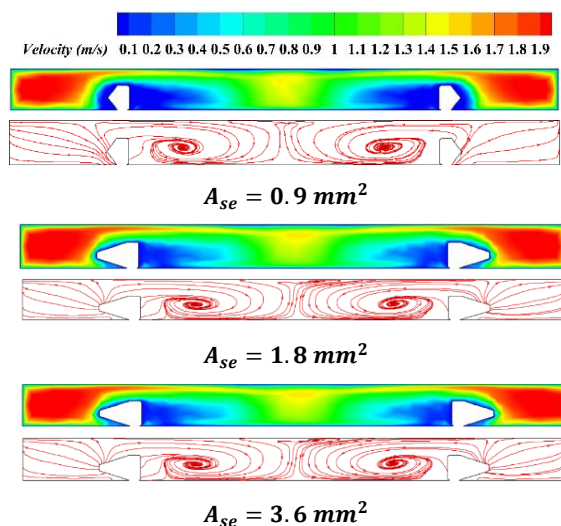
شکل (3): استقلال از شبکه دامنه محاسباتی برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت.

به همین جهت، این تعداد شبکه به عنوان تعداد سلول مناسب در دامنه محاسباتی مطالعه حاضر انتخاب شده است. به منظور ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج، از روابط همبستگی ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین برای مینی کانال ها استفاده شده است. رابطه همبستگی برای ضریب اصطکاک عبارت است از [17]:

$$f_0 = 0.316Re^{-0.25} \quad (11)$$

مقایسه نتایج رابطه همبستگی ضریب اصطکاک برای مینی کانال ها که توسط بلازیوس [17] ارائه شده است با کار حاضر نشان می دهد که نتایج عددی حاضر از دقت خوبی برخوردار بوده به طوری که بیشترین انحراف از داده های بلازیوس کمتر از 5٪ است. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل 4 نمایش داده شده است. مقایسه رابطه همبستگی (شکل 5) برای عدد ناسلت میانگین که توسط دی طوس - بولتر [18] برای جریان آشفته در مینی کانال ها ارائه شده است، با کار حاضر تأییدی بر دقت قابل قبول محاسبات در تحقیق حاضر است. بر اساس این رابطه عدد ناسلت برای مینی کانال در جریان آشفته به شیوه زیر محاسبه می شود [18]:

افزایش A_{se} باعث تقویت گردابه‌ها می‌شود؛ اما به دلیل افزایش سرعت در ناحیه بین مولد گردابه و دیواره مینی کانال، مقاومت جریان در این ناحیه افزایش پیدا خواهد کرد. به همین دلیل بزرگ‌ترین مقدار ضریب اصطکاک برای Case 1 و Case 2 هنگامی رخ می‌دهد که میزان مساحت سطح نوک‌تیز بیشینه و برابر با $A_{se}=3.6 \text{ mm}^2$ است. کمترین میزان ضریب اصطکاک در موارد مطالعه شده متعلق به Case 1 است. هنگامی که سطح نوک‌تیز برابر با $A_{se}=0.9 \text{ mm}^2$ است، ضریب اصطکاک در عدد رینولدز 3300 برابر با $1/6$ است؛ بنابراین باتوجه به نمودار ضریب اصطکاک می‌توان نتیجه گرفت که ضریب اصطکاک با سطح نوک‌تیز رابطه مستقیم دارد و افزایش سطح، تأثیر قابل توجهی بر افت فشار خواهد داشت. باتوجه به نتایج به دست آمده از تأثیر سطح نوک‌تیز بر مشخصه‌های جریانی می‌توان گفت افزایش سطح نوک‌تیز باعث می‌شود که شدت گردابه‌ها در جریان اصلی قوی‌تر شود؛ اما ضریب اصطکاک نیز در جریان بیشتر می‌شود و این اثر با افزایش عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد.



شکل (6): توزیع میدان سرعت و خطوط جریان در عدد رینولدز 3300 برای Case 1.

توزیع دما بر بروی سطح می‌تواند بر میزان نرخ انتقال حرارت از سطح داغ به سیال تأثیرگذار باشد [19 و 20]. شکل 8 میزان تغییرات دما را در ناحیه دارای شار حرارتی (L_2) برای پیکربندی‌های مختلف نشان می‌دهد.

با بررسی شکل 8 درمی‌یابیم که در Case 2 بیشینه دما بر روی سطح، بیشتر از Case 1 است و این میزان برابر با 330 K است. هر دو نمودار دارای چهار نقطه کمینه هستند که محل قرارگیری مولدهای گردابه را نمایش می‌دهد. در Case 2 کمترین مقدار دما در اولین ردیف از مولدهای گردابه و با مقدار 303 K و در Case 1 این مقدار برابر با 306 K است. همچنین در هر دو آرایش از مولد گردابه با افزایش سطح نوک‌تیز، میزان دمای سطح به صورت

می‌کند گردابه‌های طولی بزرگ‌تری در بین دو مولد تشکیل می‌شوند. به دلیل بهبود اختلاط سیال، ناشی از حضور گردابه‌ها و جریان چرخشی این مشاهده می‌تواند بر نرخ انتقال حرارت تأثیر قابل توجهی داشته باشد. همچنین یک گردابه کوچک، چسبیده به دیوار بالایی مینی کانال در حال رشد است که به سبب بزرگ‌تر شدن گردابه اصلی در هسته جریان است. این گردابه کوچک که به گردابه القایی^۱ معروف است با عدد رینولدز و قوی‌تر شدن گردابه اصلی رابطه مستقیم دارد. با بررسی توزیع سرعت جریان حول مولدهای گردابه می‌توان استنباط کرد که حول هر مولد گردابه به دلیل ایجاد اختلاف سرعت در دو سمت مولد گردابه که باعث ایجاد تغییر در گرادیان فشار می‌شود، یک گردابه طولی بزرگ در ناحیه کم‌سرعت تشکیل شده است. با افزایش سطح نوک‌تیز و بزرگ‌تر شدن تغییرات میدان سرعت جریان، فاصله طولی گردابه‌ها کمتر شده و شدت آنها افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش مساحت نوک‌تیز، سرعت جریان در نواحی محدود شده بین دیواره مینی کانال و مولد گردابه در حال افزایش است. این مشاهده نیز دلیلی دیگر برای توجیه قوت گرفتن گردابه‌ها با افزایش سطح نوک‌تیز است. بررسی خطوط جریان در شکل 6 نشان می‌دهد که با افزایش مساحت سطح نوک‌تیز هسته و مرکز گردابه‌های، بین دو مولد گردابه قدرت بیشتری پیدا کرده و بزرگ‌تر می‌شوند. انتظار می‌رود به دلیل رشد گردابه‌ها و افزایش افت فشار در مسیر جریان با افزایش سطح نوک‌تیز میزان افت‌های اصطکاک و در نتیجه ضریب اصطکاک در مینی کانال بزرگ‌تر شود. اگرچه برای افزایش نرخ انتقال حرارت رشد گردابه‌ها در جریان امری مطلوب تلقی می‌گردد؛ اما باید توجه شود که با افزایش قدرت و شدت گردابه‌ها ضریب اصطکاک نیز در مینی کانال افزایش پیدا خواهد کرد. یکی دیگر از اثرات مشهود حضور گردابه‌های طولی در پایین دست جریان، کاهش ضخامت لایه مرزی هیدرولیکی است که با افزایش سطح نوک‌تیز و بزرگ‌تر شدن گردابه‌ها این پدیده مشهودتر است.

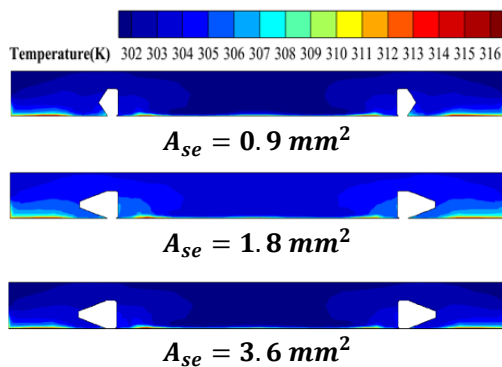
به منظور بررسی تأثیر افزایش سطح نوک‌تیز بر ضریب اصطکاک، شکل 7 این پارامتر را برحسب اعداد رینولدز مختلف برای Case 1 و 2 نسبت به مینی کانال بدون حضور مولد گردابه ارزیابی می‌کند.

این بررسی نشان می‌دهد، هنگامی که در Case 1 سطح نوک‌تیز برابر با $A_{se}=3.6 \text{ mm}^2$ است، میزان ضریب اصطکاک تا 130٪ نسب به مینی کانال بدون حضور مولد گردابه افزایش پیدا کرده است. همچنین افزایش سطح نوک‌تیز در Case 2 در عدد رینولدز 5500 تا 120٪ باعث افزایش ضریب اصطکاک شده است. این تأثیر نامطلوب با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد و در موارد بررسی شده، Case 1 بیشترین میزان ضریب اصطکاک را دارا است. همان‌طور که در شکل 6 به این موضوع اشاره شد اگرچه

¹Induced Vortex

شکل (۸): نمودار تغییرات دمای موضعی در طول L_2 الف) Case 1
ب) Case 2.

نکته حائز اهمیت این است که هنگامی که سیال با سطح مولد گردابه برخورد می‌کند، به دلیل تشکیل گردابه‌ها طولی در پایین دست جریان میزان تماس سیال و سطح داغ بیشتر می‌شود و به همین دلیل در محل قرارگیری ردیف‌های مولد گردابه دمای سطح به طور چشمگیری نزولی می‌شود. این تأثیر زمانی که سیال از مولد گردابه دور می‌شود کاهشی شده و دوباره در ردیف‌های بعد به صورت تناوبی تکرار می‌شود. یکی دیگر از نکات مهم که در شکل ۸ مشهود است میزان بیشتر نوسانات دما در حالت بیشینه برای Case 2 است.

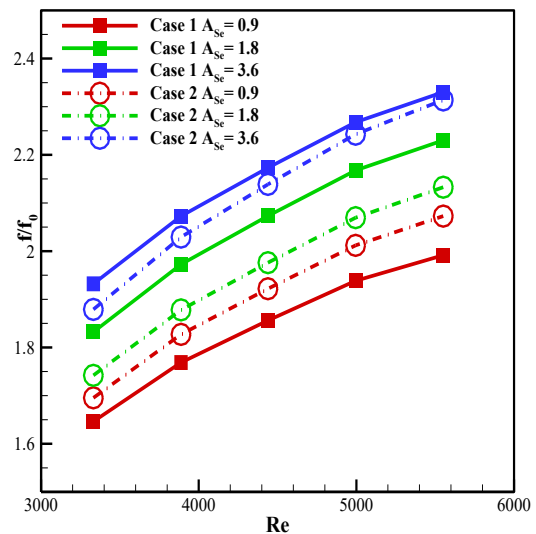


شکل (۹): توزیع دما استاتیکی در عدد رینولدز

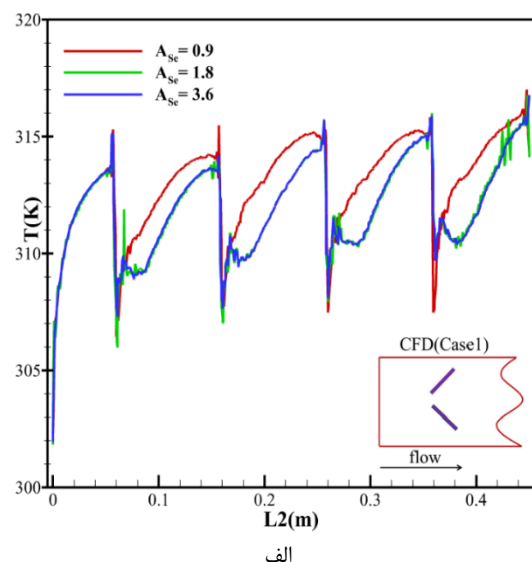
3300 برای Case 1.

شکل ۹ توزیع دمای استاتیکی را برای Case 1 در هسته اصلی جریان و برای مقادیر مختلف از A_{se} نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش A_{se} ، به دلیل تشکیل گردابه‌های بزرگ‌تر ضخامت لایه مرزی حرارتی کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش سطح نوک تیز ضخامت لایه مرزی حرارتی بین دو باله و در نزدیکی دیواره دارای شار حرارتی نازک‌تر شده است. همچنین بین دو باله که محل استقرار گردابه‌ها اصلی در این آرایش است لایه مرزی حرارتی بسیار کوچک‌تر از نواحی بیرونی است. این ناحیه درست متعلق به محل استقرار گردابه‌های اصلی ایجاد شده توسط مولدهای گردابه چین دار اصلاح شده است. علاوه بر آن بررسی شکل ۹ نشان می‌دهد که میزان سطح نوک تیز رابطه مستقیمی با میزان تغییرات دما در جریان دارد. می‌توان نتیجه گرفت، هنگامی که سطح نوک تیز زیاد شود، اندازه گردابه‌های ایجاد شده در مسیر جریان افزایش یافته و بنابراین انتقال حرارت بیشتر درون لایه‌های سیال نفوذ می‌کند. در بررسی شکل ۶ مشاهده شد که با افزایش سطح نوک تیز گردابه القایی ایجاد شده در مرکز مینی کانال چسبیده به دیواره بالایی بزرگ‌تر می‌شود. بر اساس این مشاهده توزیع دما در $A_{se} = 3.6 \text{ mm}^2$ یکنواخت‌تر

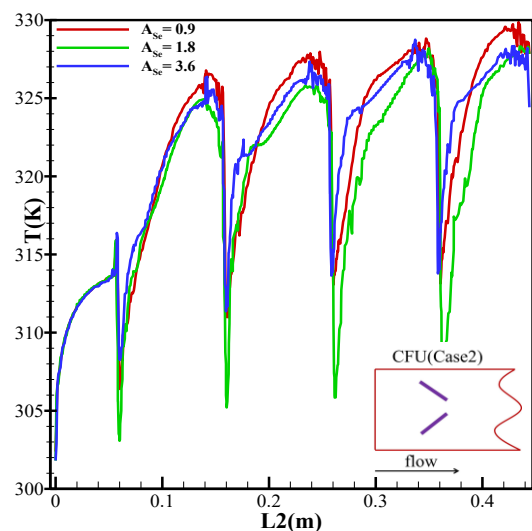
نسبی کاهش می‌یابد و این تغییر در Case 2 مشهودتر است و تا ۳ درجه بیشینه دما کاهش می‌یابد.



شکل (۷): ضریب اصطکاک بر حسب عدد رینولدز برای Case 1 و Case 2.

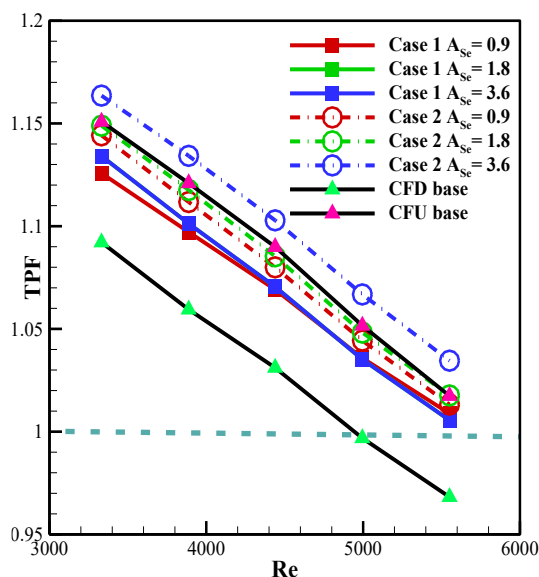


الف



ب

چشمگیرتر است به‌طوری که مولد گردابه چین‌دار اصلاح‌شده نسبت به مولد گردابه چین‌دار که در مرجع [11] معرفی شده است تا 5٪ موجب بهبود در ضریب عملکرد حرارتی در عدد رینولدز 3300 می‌شود. در Case 2 در ابتدا با افزودن سطح نوک‌تیز ضریب عملکرد حرارتی کاهش پیدا کرده است؛ اما به‌مرور اثرات افزایش انتقال حرارت بر افت اصطکاکی غلبه کرده و به‌طور میانگین 2٪ باعث افزایش ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال در مقایسه با مولد گردابه چین‌دار ارائه‌شده توسط دیلمی و لیلیا کوهی [11] در آرایش یکسان شده است. نکته مهم دیگر این است که مولد گردابه چین‌دار اصلاح‌شده می‌تواند تا 17٪ در بهترین حالت باعث بهبود در عملکرد هیدرولیکی - حرارتی مینی کانال شود. می‌توان گفت اثر افزودن سطح نوک‌تیز باعث بهبود عملکرد در مولدهای گردابه چین‌دار می‌شود.



شکل (11): مقایسه ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال برای مقادیر مختلف از سطح نوک‌تیز باحالت پایه.

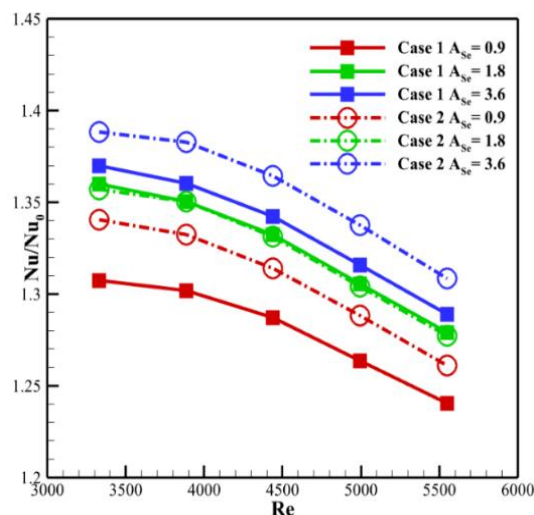
7- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر اثرات اصلاح‌کردن مولد گردابه چین‌دار از منظر جریانی و حرارتی در رژیم جریانی آشفته مورد بررسی قرار گرفت. برای درک بهتر اثر اصلاح مولد گردابه، در اعداد رینولدز مختلف نتایج ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و ضریب عملکرد حرارتی با مینی کانال بدون مولد گردابه در همین ابعاد مقایسه شد.

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

- به دلیل افزایش سطح برخورد سیال با مولد گردابه، افت فشار اصطکاکی بیشتر خواهد شد و به‌موجب این امر ضریب اصطکاک با افزایش عدد رینولدز رشد پیدا می‌کند. به‌طوری که در بیشترین حالت در حضور مولد گردابه چین‌دار اصلاح‌شده ضریب اصطکاک در عدد رینولدز 5500 تا 130٪ زیاد می‌شود.

بوده و نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا کرده است. همچنین بررسی این شکل نشان می‌دهد، با افزایش سطح نوک‌تیز مقادیر دما حول مولدهای گردابه در حال کوچک‌تر شدن است. انتظار می‌رود که این مشاهده بر افزایش انتقال حرارت تأثیر مطلوبی بگذارد و کمک کند که حرارت بیشتری از سطح گرفته و به سیال داده شود.



شکل (10): مقایسه تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز برای Case 1 و Case 2.

برای مقایسه نرخ انتقال حرارت در مینی کانال، در حضور مولدهای گردابه چین‌دار اصلاح‌شده میزان تغییرات عدد ناسلت با عدد رینولدز محاسبه شده و نتایج آن در شکل 10 نمایش داده‌شده است. در بین موارد مطالعه شده، Case 2 هنگامی که $A_{se} = 3.6 \text{ mm}^2$ باشد، بیشترین میزان افزایش عدد ناسلت را با مقدار 1/39 نسبت به مینی کانال، بدون حضور مولد گردابه دارد. این مقدار نشان می‌دهد که مولد گردابه چین‌دار اصلاح‌شده می‌تواند تا 39٪ باعث بهبود نرخ انتقال حرارت شود. پس از آن بیشترین عدد ناسلت به Case 1 در همین مقدار از A_{se} و عدد رینولدز 3300 با مقدار 1/37 تعلق دارد. نحوه رفتار نمودار به‌گونه‌ای است که تأثیر مطلوب افزایش انتقال حرارت با عدد رینولدز در حال کم‌شدن است. با توجه به نتایج مشخص است که سطح نوک‌تیز هم باعث افزایش انتقال حرارت در طول مینی کانال می‌شود و هم ضریب اصطکاک را افزایش می‌دهد. برای جمع‌بندی لازم است تا نتایج حضور سطح نوک‌تیز در مولد گردابه چین‌دار، به‌صورت کلی در یک ارزیابی نهایی مورد بررسی قرار گیرد تا تعیین شود که اثر افزایش کدام مورد غالب‌تر است. برای دستیابی به چنین هدفی لازم است ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال مورد بررسی قرار گیرد.

شکل 11 نشان می‌دهد که نوک‌تیز کردن سطح مولد گردابه چین‌دار تأثیر به‌سزایی بر افزایش ضریب عملکرد حرارتی مینی کانال خواهد داشت. این روند بهبود عملکرد، در Case 1

- Analysis and Calorimetry. 2021 Sep;145:2795-808. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09795-5>
- [2] Nejati Barzoki F, Sheikhzadeh GA, Khoshvaght Aliabadi M, Abbasian Arani AA. Hydrothermal performance of trapezoidal fin equipped with vortex generator and hole: Investigation of the effect of vortex generator and hole position. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2021 May 22;53(3 (Special Issue)):1963-80. DOR 10.22060/mej.2020.17218.6558
- [3] A. Rosta Abkenar, N. Amanifard, H. Mohhades Deylami, F. Dolati, Experimental Investigation of Flow and Heat Transfer in a Smooth Channel Affected by Vortex Generator with a Punched Hole, Amirkabir J. Mech. Eng., 50(2) (2018) 271-284. DOR 10.22060/mej.2016.770
- [4] Ghazanfarian J, Nobari MR. A numerical study of convective heat transfer from a rotating cylinder with cross-flow oscillation. International journal of heat and mass transfer. 2009 Nov 1;52(23-24):5402-11. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2009.06.036>
- [5] Zheng Y, Yang H, Mazaheri H, Aghaei A, Mokhtari N, Afrand M. An investigation on the influence of the shape of the vortex generator on fluid flow and turbulent heat transfer of hybrid nanofluid in a channel. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021 Jan; 143:1425-38. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09415-2>
- [6] Jalayeri A, Soltanipour H, Rezazadeh S. Simultaneous Effects of a Vortex Generator and Magnetic Field on Ferrofluid Convective Heat Transfer in a 3D Channel: First and Second Law Analyses. AUT Journal of Mechanical Engineering. 2024 Jun 1;8(2):85-108. DOR <https://doi.org/10.22060/ajme.2024.22788.6075>
- [7] Ke Z, Chen CL, Li K, Wang S, Chen CH. Vortex dynamics and heat transfer of longitudinal vortex generators in a rectangular channel. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Apr 1;132:871-85. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2018.12.064>
- [8] Awais M, Bhuiyan AA. Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities. Thermal Science and Engineering Progress. 2018 Mar 1;5:524-45. DOI <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.02.007>
- [9] Ebrahimi A, Roohi E, Kheradmand S. Numerical study of liquid flow and heat transfer in rectangular microchannel with longitudinal vortex generators. Applied Thermal Engineering. 2015 Mar 5; 78:576-83. DOI <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.006>
- [10] Esmailzadeh 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 Oct1; 125:1414-25. DOI <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.115>
- [11] Leylakoochi YP, Deylami HM. Enhancing the thermal performance of a minichannel using a new design of corrugated rectangular winglet pair as vortex generator. International Journal of Heat and Fluid Flow. 2026 Jan 1; 117:110051. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jheatfluidflow.2025.110051>
- [12] Tang LH, Chu WX, Ahmed N, Zeng M. A new configuration of winglet longitudinal vortex generator to enhance heat transfer in a rectangular channel. Applied Thermal Engineering. 2016 Jul 5;104:74-84. DOI <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.056>
- [13] 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 Jan 5;236:121448. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09795-5>

- با افزایش سطح نوک تیز شده، نرخ انتقال حرارت افزایش می یابد در نتیجه دمای سطح دارای شار حرارتی به صورت موضعی به مرور کمتر شده و همچنین میزان عدد ناسلت تا 40 نسبت به مینی کانال بدون حضور مولد گردابه افزایش پیدا خواهد کرد.
- اثر مطلوب افزایش سطح مقطع نوک تیز بر پیکربندی جریان پایین (Case 1) بیشتر بوده و میزان ضریب عملکرد حرارتی تا 5٪ نسبت به حالت پایه آن افزایش پیدا خواهد کرد.
- در پیکربندی جریان بالا (Case 2) اگرچه در ابتدا با نوک تیز شدن مولد گردابه به دلیل افزایش ضریب اصطکاک، ضریب عملکرد کاهش پیدا می کند، اما کم، کم اثرات افزایش انتقال حرارت بر این عملکرد نامطلوب غلبه کرده و ضریب عملکرد حرارتی حدود 2٪ نسبت به حالت پایه افزایش می یابد.

8- فهرست علائم

مساحت سطح چین دار	A_{cd}
قطر هیدرولیکی	D_h
ضریب اصطکاک	f
ضریب اصطکاک برای کانال خالی	f_0
ارتفاع مینی کانال	H
ارتفاع مولد گردابه	H_{VG}
ضریب انتقال حرارت جابه جایی	h
طول مینی کانال	L
طول مولد گردابه	L_{VG}
ناسلت میانگین	Nu
ناسلت میانگین برای کانال خالی	Nu_0
فاصله طولی باله	P_t
فاصله از ناحیه تست تا اولین مولد گردابه	P_l
عدد رینولدز	Re
سرعت سیال	U
عمق مینی کانال	W
ضریب انتقال حرارت هدایتی	λ
چگالی	ρ
ویسکوزیته دینامیکی	μ
افت فشار در طول کانال	ΔP
ورودی	in
خروجی	out
دیواره	w

9- مراجع

- [1] 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

- [19] Yang Z, Gu J, Luo X, Qin Z, Zhou S, Wang P, Zhao W. An RSM approach to optimize the thermal performance of novel type vortex generators. *Progress in Nuclear Energy*. 2024 Feb 1;167:104978. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104978>
- [20] nemati, M., mohamadzade, H., sefid, M. Investigation the Effect of Direction of Wall Movement on Mixed Convection in Porous Enclosure with Heat Absorption/Generation and Magnetic Field. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2020; 9(1): 99-115. (persian) **DOR:**<https://dor.isc.ac/dor/DOR:20.1001.1.23223278.1399.9.1.7.5>
- [14] Hosseini. Numerical investigation of the transition process from the optimal operating point to the maximum load of the Francis turbine. *Journal of Aerospace Mechanics*. 2024; 20(3):109-128.(persian) **DOR** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.3.8.4>
- [15] 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 (persian) **DOR** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.4.5.3>
- [16] Eftekhari, H., Amanifard, N., Mohaddes Deylami, H. Determination the Performance Instability Range and Analysis of the Effect of Blade Tip and Hub Vortices in a Reversible Axial Flow Fan. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*, 2024; 12(2): 167-188. (persian) **DOR** <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1402.12.2.12>
- [17] Srivastava K, Sahoo RR. Effect of pitch and angle of attack on thermal performance of new envelope and delta vortex generators for TEG: An experimental and numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*. 2024 Jan 1;195:108671. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108671>
- [18] Yang Z, Gu J, Luo X, Qin Z, Zhou S, Wang P, Zhao W. An RSM approach to optimize the thermal performance of novel type vortex generators. *Progress in Nuclear Energy*. 2024 Feb 1;167:104978. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104978>

