

## مطالعه تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد حرارتی سیلندر مجهز به تیر الاستیک به عنوان مولد گردابه درون یک کانال

**چکیده:** در پژوهش حاضر به بررسی عددی عملکرد حرارتی جریان حول یک سیلندر متصل به تیر الاستیک به عنوان مولد گردابه انعطاف پذیر درون یک کانال دارای شار حرارتی ثابت پرداخته شده است. مسئله حاضر در دسته بندی اندرکنش سیال و سازه قرار می گیرد که به روش اویلری-لاگرانژی دلخواه و به صورت ناپایا حل شده است. رژیم جریان آرام و حل در بازه صفر تا ۱۰ ثانیه انجام شده است. در پژوهش حاضر تأثیر طول تیر الاستیک و سطح مقطع سیلندر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مطالعه تأثیر مولد گردابه انعطاف پذیر بر الگوی جریان و مشخصه های حرارتی، نمودارهای توزیع سرعت، دمای استاتیکی، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه شده اند. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان می دهد که مولد گردابه انعطاف پذیر تأثیر به سزایی در افزایش نرخ انتقال حرارت دارد؛ به طوری که تا ۱۴ برابر باعث بهبود عدد ناسلت موضعی جریان می گردد. همچنین معیار ارزیابی عملکرد بر حسب اعداد رینولدز مختلف محاسبه و گزارش شدند که نتایج نشان می دهد مولد گردابه انعطاف پذیر می تواند تا ۶/۷ برابر باعث بهبود عملکرد حرارتی کانال شود.

**واژه های راهنما:** مولد گردابه انعطاف پذیر، افزایش انتقال حرارت، اندرکنش سیال و سازه، تحلیل عددی، جریان آرام

امیرحسین حق شنو  
کلیشمی  
دانشجوی کارشناسی ارشد

حامد محدث دیلمی\*  
دانشیار

یونس پور غلام

لیلاکوهی  
دانشجوی دکتری،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه گیلان، رشت

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱  
بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸

Amirhosein  
haghsheno Klishomi  
Msc Student

Hamed Mohaddes  
Deylami\*  
Associate Professor

Younes Pourgholam  
Leylakoochi  
PhD Student,  
Faculty of Mechanical  
Engineering,  
University of Guilan,  
Rasht

## Study of the effects of geometric parameters on the thermal performance of a cylinder equipped with an elastic beam as a vortex generator inside a channel

**Abstract:** This study investigates the flow around a cylinder attached to an elastic beam inside a channel subjected to a constant heat flux. The flow is laminar and analyzed using unsteady fluid-structure interaction, employing the arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method for numerical simulation. The effects of the elastic beam length and the type of cylinder are examined. Velocity and static temperature distributions are analyzed, along with the Nusselt number and friction factor. The results indicate that the flexible vortex generator significantly enhances heat transfer, with the local Nusselt number increasing by up to 14 times. Additionally, the overall thermal performance of the channel can improve by up to 6.7 times across different Reynolds numbers. These findings highlight the effectiveness of flexible vortex generators in improving heat transfer in channel flows and provide valuable insights for thermal engineering applications.

**Keywords:** Flexible vortex generator, Heat transfer enhancement, Fluid-structure interaction, Numerical analysis, Laminar flow

## ۱- مقدمه

ناپایدار و افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [۷]. نتایج نشان داد که عدد ناسلت تا ۴۸٪ نسبت به حالت صلب بهبود می‌یابد. شیخی‌زاد و همکاران نیز تأثیر پارامترهای هندسی مولد گردابه انعطاف‌پذیر را در یک میکروکانال سه‌بعدی بررسی کردند [۸]. افزایش پهنای مولد از ۰/۱۵ تا ۰/۳ میلی‌متر موجب افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی عدد ناسلت شد. همچنین، افزایش سرعت جریان ورودی بین ۱/۷۱ تا ۳/۴۲ متر بر ثانیه سبب کاهش افت فشار و بهبود انتقال حرارت گردید. امینی و حبیبی با بررسی هم‌زمان یک سیلندر مستطیلی و تیر مرتعش متصل به آن نشان دادند که آرایش خطی این ساختار نسبت به نوع زیگزاگی، ظرفیت حرارتی بالاتری دارد و می‌تواند تا ۱۹۰٪ انتقال حرارت را نسبت به حالت صلب بهبود بخشد [۹]. ساتی و همکاران در یک پژوهش عددی به بررسی تأثیر یک تیر مرتعش متصل به سیلندر دایروی بر انتقال حرارت درون یک مینی‌کانال پرداختند [۱۰]. نتایج نشان داد که این آرایش باعث تشکیل بیشتر گردابه‌ها در پایین دست جریان می‌شود. همچنین به دلیل تعامل سیال با تیر، میزان نوسانات در نوک آن به‌طور قابل توجهی افزایش پیدا خواهد کرد که این مشاهده منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت درون مینی‌کانال می‌شود. مطالعه پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که سطح مقطع سیلندر نیز با توجه به شرایط مختلف عدد رینولدز ورودی، می‌تواند عاملی مؤثر بر نرخ انتقال حرارت باشد؛ موضوعی که تاکنون کمتر به‌طور جامع مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حوسبی و همکاران، پره‌های انعطاف‌پذیر به عنوان مولد گردابه در کانال‌هایی با دیواره‌های گرم بررسی شدند. نتایج نشان داد که افزایش طول پره‌ها موجب افزایش عدد ناسلت تا ۸۲٪ و در عین حال کاهش افت فشار می‌شود [۱۱].

مرور مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که شکل سطح مقطع سیلندر و طول مؤثر تیر الاستیک دو پارامتر کلیدی هستند که نقش به‌سزایی در تغییر الگوی جریان و بازده حرارتی دارند. نوآوری اصلی پژوهش حاضر مطالعه‌ای تأثیر هندسه سیلندر بر ریزش گردابه‌های ایجاد شده و نیز اثر عدد رینولدز به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر جریانی بر انتقال حرارت است. نتایج این تحقیق می‌تواند دیدی جامع و مسیری روشن برای پژوهش‌های آینده در زمینه مهندسی حرارت فراهم سازد.

## ۲- تشریح مسئله

## ۲-۱- دامنه محاسباتی

مسئله مورد بررسی، شامل برهم‌کنش سیال و سازه در حضور یک سیلندر متصل به تیر الاستیک می‌باشد. هدف از به‌کارگیری مولد گردابه، افزایش نرخ انتقال حرارت در کانال است. کانال مورد

موضوع بهینه‌سازی نرخ انتقال حرارت و کنترل جریان سیال در کانال‌ها همواره مورد توجه مهندسان و پژوهشگران بوده است [۱]. یکی از روش‌های کارآمد در این زمینه، استفاده از مولدهای گردابه است. این تجهیزات با افزایش اختلاط جریان اصلی و لایه مرزی، همچنین ایجاد گردابه در مسیر حرکت سیال موجب کاهش ضخامت لایه مرزی و در نتیجه افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند [۲].

در مطالعات گذشته، رفتار جریان سیال در حضور مولدها و اثر آن‌ها بر بهبود انتقال حرارت از طریق آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی مورد بررسی قرار گرفته است. اوگاوا و همکاران با نصب مولدهای گردابه بالک مانند درون یک کانال نشان دادند که تشکیل گردابه در مسیر جریان باعث افزایش قابل توجه نرخ انتقال حرارت در دیواره‌ها می‌شود؛ به‌گونه‌ای که عدد ناسلت نسبت به حالت بدون مولد حدود ۵۰٪ افزایش یافت [۳]. همچنین مشخص شد که وجود مولد گردابه سبب افزایش افت فشار می‌گردد که این افزایش به زاویه، ارتفاع و نحوه آرایش مولدها بستگی دارد.

نجاتی و همکاران استفاده از مولد گردابه دارای حفره را به‌عنوان رویکردی غیرفعال برای افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار در رژیم‌های جریان آرام و آشفته بررسی کردند [۴]. نتایج آنها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، ضریب انتقال حرارت در هر دو رژیم جریان افزایش می‌یابد. همچنین ابراهیمی و همکاران عملکرد یک میکروکانال بدون مولد گردابه و چهار میکروکانال مجهز به مولد گردابه با آرایش‌های متفاوت را مقایسه کردند. یافته‌ها حاکی از آن داشت که استفاده از مولد گردابه، بسته به نوع آرایش، موجب افزایش ۲ تا ۲۵ درصدی عدد ناسلت در بازه اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۱۱۰۰ و در عین حال، افزایش افت فشار می‌شود [۵].

مولدهای گردابه به‌طور کلی در دو گروه اصلی صلب و انعطاف‌پذیر طبقه‌بندی می‌شوند. نوع صلب در برابر نیروهای جریان بدون تغییر شکل باقی می‌ماند؛ در حالی که اگر نیروی وارد شده از سوی سیال از تنش تسلیم ماده فراتر رود، تغییر شکل ایجاد شده و مولد، حالت انعطاف‌پذیر پیدا می‌کند [۶].

تمرکز پژوهش حاضر بر بررسی اثر مولدهای گردابه انعطاف‌پذیر بر انتقال حرارت و رفتار جریان در کانال‌ها است. دادوند و همکاران در پژوهشی بر روی یک میکروکانال نشان دادند که قرارگیری یک تیر مرتعش به‌عنوان مولد گردابه انعطاف‌پذیر در کنار یک سیلندر دایروی موجب ایجاد گردابه‌های

حل شده است. این نرم افزار مبتنی بر روش المان محدود بوده که برای حل مسئله پیشرو قابلیت‌های مناسبی ارائه می‌دهد. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی حاکم بر دامنه سیال که از معادلات اوپلری-لاگرانژی دلخواه ناشی می‌شوند به شرح زیر است [۱۲]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \Big|_x + (u - u_g) \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot u \quad (۱)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_x + ((u - u_g) \cdot \nabla) u \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho F \quad (۲)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [u(p + \rho E)] = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) + \varphi \quad (۳)$$

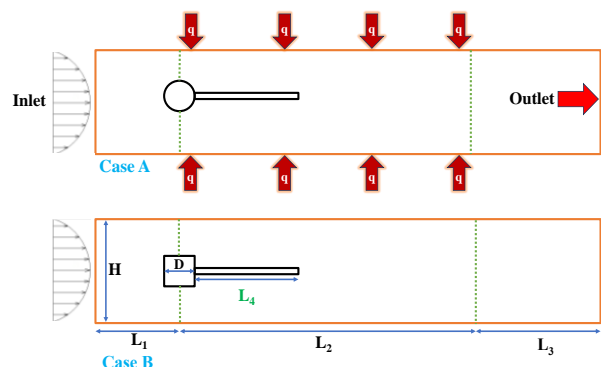
در معادله پیوستگی  $\rho$  چگالی سیال،  $u$  سرعت سیال و  $u_g$  سرعت شبکه متحرک است. همچنین در معادله مومنتوم  $\sigma$  نشان‌دهنده تنش سیال و  $F$  نشان‌دهنده نیروی حجمی است. در معادله انرژی نیز ترم‌های  $E$  انرژی کل،  $T$  دما،  $p$  فشار،  $k$  رسانایی حرارتی و  $\varphi$  نشان‌دهنده اتلافات ویسکوز می‌باشند. همچنین معادله حرکت برای مرز جامد با استفاده از معادلات دیدگاه اوپلری-لاگرانژی دلخواه به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\rho_s \frac{\partial^2 d_s}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma_E \quad (۴)$$

در معادله فوق  $\rho_s$  بیانگر چگالی مرز جامد،  $d_s$  جابه‌جایی آن و  $\sigma_E$  تنش است.

در حل معادلات فوق برای ترم‌های شامل جملات فشار و سرعت سیال از گسسته‌سازی P2+P2 با صرف نظر اثرات گرانش و اینرسی (جریان استوکس) بر دامنه حل استفاده شده است. ترم‌های در برگیرنده جملات دما با استفاده از گسسته‌سازی خطی، محاسبه شار حرارتی و اعمال شرط هموارسازی<sup>۲</sup> آن در مرز حل می‌شوند. علاوه بر آن ترم‌های معادله حاکم بر مرز جامد از گسسته‌سازی مرتبه دوم لاگرانژی استفاده می‌کنند. جریان تراکم‌ناپذیر بوده و معادلات به روش جداسازی شده<sup>۳</sup> و گذرا با زمان حل می‌شوند. در تنظیمات مرتبط با حلگر در بخش متغیرهای وابسته<sup>۴</sup>، برای متغیرهای فشار، میدان جابه‌جایی و دما از مقیاس<sup>۵</sup>،  $10^{-3}$  و برای میدان سرعت از مقیاس ۱ استفاده شده است. همچنین باقی‌مانده‌های ناشی از حل عددی به صورت اتوماتیک تنظیم شده است؛ اما به صورت میانگین برای جملات

بررسی دارای سه قسمت  $L_1$  برابر با  $0/8$  متر،  $L_2$  برابر با  $1/7$  متر و  $L_3$  برابر با  $0/82$  متر می‌باشد. ارتفاع کانال  $H$  برابر با  $41$  سانتی‌متر و همچنین قطر سیلندر  $D$  برابر با  $10$  سانتی‌متر است. مولد گردابه با توجه به شکل (۱) در دو حالت سطح مقطع دایره‌ای (Case A) و مربعی (Case B) در فاصله  $20$  سانتی‌متری از ورودی کانال و با سه طول مختلف  $350$ ،  $175$  و  $116$  میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور درک بهتر مشخصه‌های جریان، مطالعه حاضر در سه عدد رینولدز  $50$ ،  $100$  و  $200$  حول سیلندر و همچنین  $410$ ،  $820$  و  $1640$  بر حسب قطر هیدرولیکی کانال انجام شده است. با توجه به اعداد رینولدز پژوهش حاضر، رژیم جریان آرام می‌باشد. همچنین شبیه‌سازی جریان سیال با استفاده از نرم افزار کامسول مالتی‌فیزیکس انجام شده است. شبیه‌سازی مسئله به صورت دوبعدی با فرض خواص ترموفیزیکی ثابت برای سیال و سازه به صورت گذرا حل می‌شود. لازم به ذکر است که در کار حاضر، گلیسیترین به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ دامنه محاسباتی پژوهش حاضر

خواص ترموفیزیکی گلیسیترین عبارت است از: چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$ ، لزجت دینامیکی  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ، ضریب هدایت حرارتی  $0/3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$  و همچنین گرمای ویژه  $2350 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ . تیر الاستیک نیز با چگالی  $1000 \text{ kg/m}^3$ ، مدول یانگ  $5/6 \text{ MPa}$  و نسبت پواسون  $0/4$  در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲- معادلات حاکم و مندولوژی

همانطور که عنوان شد مطالعه حاضر در دسته‌بندی مسائل چند فیزیک<sup>۱</sup> قرار می‌گیرد که توسط نرم افزار کامسول به شیوه عددی

<sup>4</sup> Dependent variables

<sup>5</sup> Scale

<sup>1</sup> Multiphysics problem

<sup>2</sup> Apply smoothing to boundary fluxes

<sup>3</sup> Segregated

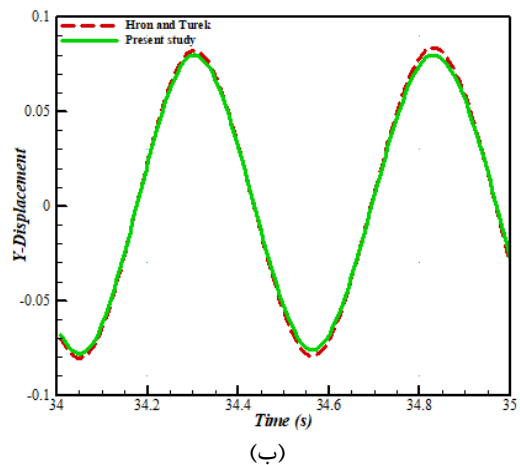
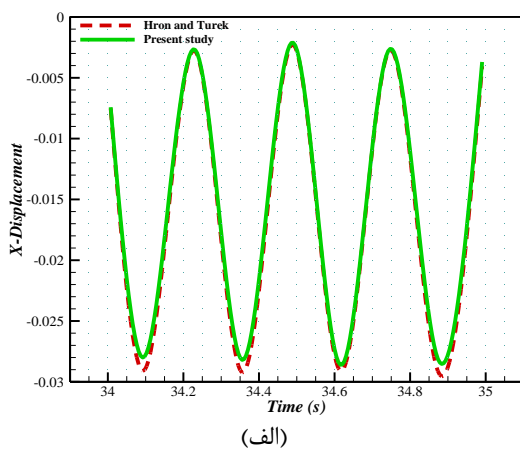
در معادله (۹) زیروند ۰ نشان دهنده ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در کانال بدون حضور مولد گردابه می باشد.

#### ۴-۲- شرایط مرزی

همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است جریان سیال با یک پروفیل توسعه یافته با دمای ثابت  $T_{in} = 293/15 \text{ K}$  وارد کانال می شود و در مرز جامد شرط عدم لغزش برای سرعت برقرار است. در ناحیه  $L_2$  شار ثابت  $q = 1000 \text{ W/m}^2$  به دیواره کانال وارد می شود. در خروجی کانال شرط فشار اتمسفر لحاظ گردیده است. لازم به ذکر است در شبیه سازی عددی، خواص ترموفیزیکی مواد ثابت فرض شده است و جریان تراکم ناپذیر می باشد. در خروجی نیز گرادیان متغیرهای مسئله همچون دما و سرعت در راستای جریان صفر است ( $\partial/\partial n = 0$ ).

#### ۵-۲- اعتبارسنجی

برای صحت سنجی نتایج پژوهش حاضر در بخش اندرکنش سیال و ساز از مطالعه هورن و تورک به عنوان مرجع استفاده شده است [۱۳].



شکل ۲ مقایسه نتایج پژوهش حاضر برای جابه جایی نوک تیر الاستیک با پژوهش هورن و تورک [۱۳]؛ الف- جابه جایی در راستای X ب- جابه جایی در راستای Y

شامل سرعت و فشار جریان حدود  $10^{-3}$  و برای دما  $10^{-7}$  به دست آمده است. جهت درک بهتر از روند حل عددی، جدول (۱) سایر تنظیمات و جزئیات مربوطه را نمایش می دهد.

جدول ۱ تنظیمات حلگر برای حل ناپایا مسئله حاضر در نرم افزار

نوع حل	گذرا با زمان		
حلگر	جداسازی شده با متد مستقیم		
معادلات	انتقال	مونتوم خطی	مکانیک
	حرارت در سیالات	برای سیال	جامدات
مدل انتخاب شده	آرام گذرا با زمان	آرام گذرا با زمان	کرنش صفحه ای
	PARDISO	PARDISO	PARDISO
مدل حل مستقیم	مدل حل مستقیم		

#### ۳-۲- پارامترهای محاسباتی

عدد رینولدز برابر است با:

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

که در تحلیل های دوبعدی قطر هیدرولیکی به صورت  $D_h = 2H$  تعریف می شود. عدد ناسلت میانگین مکانی برای ارزیابی میزان انتقال حرارت برابر است با:

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^x Nu_x(x, t) dx \quad (6)$$

با میانگین گیری از زمان و مکان، عدد ناسلت کل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\overline{Nu} = \frac{1}{L} \frac{1}{t} \int_0^L \int_0^t Nu(x, t) dt dx \quad (7)$$

ضریب اصطکاک بر حسب قطر هیدرولیکی و سرعت جریان به صورت زیر بیان می گردد:

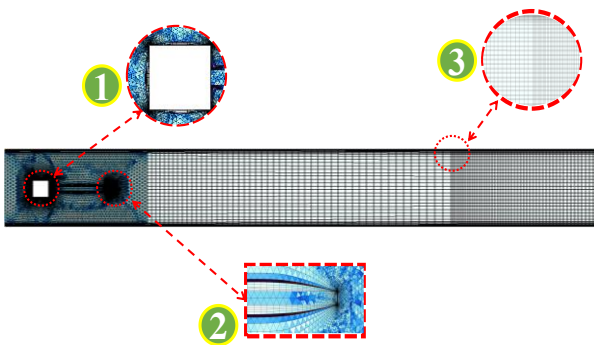
$$f = \frac{2D_h \Delta P}{\rho U^2 L} \quad (8)$$

که در آن  $\Delta P$  میانگین افت فشار در ورودی و خروجی کانال است. معیار ارزیابی عملکرد<sup>۱</sup>، پارامتری است که به عنوان میزان کارآمدی سیستم در مقایسه با یک کانال خالی بدون حضور مولد گردابه ارائه می گردد:

$$PEC = \frac{(\overline{Nu}/\overline{Nu}_0)}{(\overline{f}/\overline{f}_0)^{1/3}} \quad (9)$$

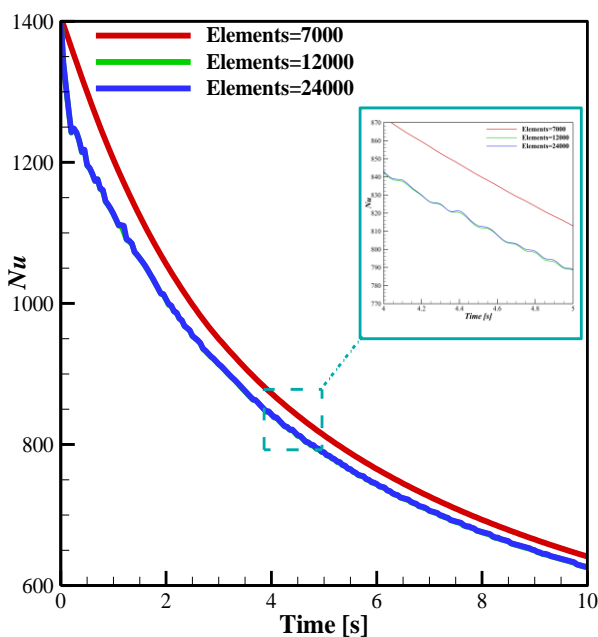
<sup>1</sup> Performance Evaluation Criteria

دلیل فیزیک مسئله و شبیه‌سازی درست حرکت تیر الاستیک، از شبکه‌بندی متحرک<sup>۲</sup> در ناحیه حضور تیر استفاده شده است.



شکل ۴ نحوه شبکه‌بندی و میزان خمیدگی آن برای دامنه محاسباتی پژوهش حاضر

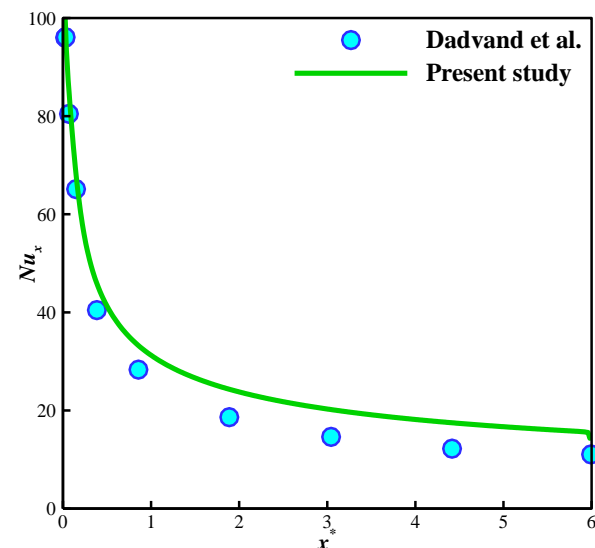
در هر حل عددی مطالعه شبکه به منظور دستیابی به حلی پایدار و پاسخی دقیق امری حیاتی تلقی می‌گردد. به همین منظور در شکل (۵) به مطالعه میزان تغییرات عدد ناسلت با شبکه بر حسب زمان برای Case B پرداخته شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که تعداد شبکه با المان‌های ۱۲۰۰۰ و ۲۴۰۰۰ جواب‌های تقریباً یکسانی را برای عدد ناسلت گزارش می‌کنند و اختلافی کمتر از ۱ درصد دارند. به منظور دستیابی به حلی پایدار با هزینه محاسباتی بهینه، شبکه‌ای با ۱۲۰۰۰ المان به عنوان تعداد شبکه مناسب برای پژوهش حاضر انتخاب شده است.



شکل ۵ مقایسه عدد ناسلت بر حسب زمان در تعداد شبکه‌های متفاوت برای Case A

در شکل (۲) میزان جابه‌جایی نوک تیر در راستاهای X و Y نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعه هورن و تورک از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و هر دو مطالعه روند مشابهی را برای این دو پارامتر نمایش می‌دهند.

به منظور ارزیابی مشخصه‌های حرارتی، مقایسه نتایج مطالعه حاضر با مطالعه دادوند و همکاران [۷] در شکل (۳) ارائه شده است. در این پژوهش عدد ناسلت موضعی در طول میکروکانال با طول  $3000 \mu\text{m}$  و ارتفاع  $500 \mu\text{m}$  در رژیم جریان آرام با عدد رینولدز ۱۰۰۰ بدون حضور مولد گردابه شبیه‌سازی شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج پژوهش حاضر از دقت قابل قبولی برای ارزیابی مشخصه‌های حرارتی همچون توزیع دما و عدد ناسلت برخوردار است و میانگین خطا با پژوهش ذکر شده حدود ۱۰٪ است.



شکل ۳ مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعه دادوند و همکاران [۷] برای عدد ناسلت موضعی در طول کانال

## ۲-۶- شبکه‌بندی و استقلال حل از شبکه محاسباتی

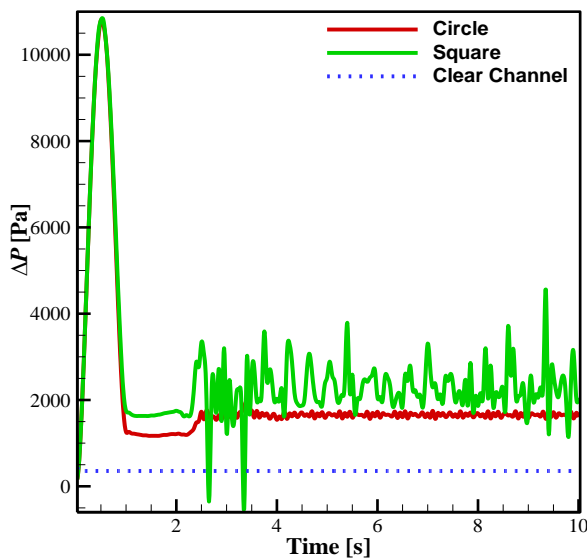
شکل (۴) به صورت هم‌زمان نحوه شبکه‌بندی و میزان خمیدگی آن در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در اطراف مولد گردابه از شبکه‌بندی بی‌سازمان به شکل مثلثی استفاده شده است. همچنین تراکم شبکه‌بندی در اطراف مولد گردابه بسیار بالا و اندازه المان‌ها ریزتر در نظر گرفته شده است تا ریزش گردابه‌ها به صورت دقیق‌تری مدل‌سازی شود. در پایین دست جریان و دورتر از مولد گردابه از شبکه‌بندی با سازمان و با شکل مربعی استفاده شده است. همچنین به منظور پیش‌بینی دقیق لایه مرزی هیدرولیکی و حرارتی، تراکم و توزیع شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره کانال بسیار بالا می‌باشد. لازم به ذکر است به

<sup>2</sup> Moving mesh

<sup>1</sup> Skewness

## ۳- نتایج

مقایسه با یک کانال در شرایط یکسان و بدون حضور مولد گردابه انعطاف‌پذیر پرداخته است. به دلیل وجود گردابه‌های بیشتر در Case B میزان نوسانات افت فشار بر حسب زمان به طور چشم‌گیری در این ساختار بیشتر است. این در حالی است که برای سیلندر با سطح مقطع دایروی (Case A) میزان افت فشار تقریباً پس از دو ثانیه الگوی رفتاری ثابت و پرپودیکی را طی می‌کند. بررسی شکل (۷) نشان می‌دهد که به دلیل وجود گردابه‌های بیشتر در Case B این ساختار باعث تولید افت فشار بیشتری در کانال می‌شود.



شکل ۷ مقایسه تغییرات افت فشار با کانال بدون مولد گردابه بر حسب زمان برای سیلندر با سطح مقطع‌های متفاوت در عدد رینولدز ۱۶۴۰

برای درک بهتر تأثیر سطح مقطع سیلندر بر الگوی جریان، در شکل (۸) به مطالعه ضریب اصطکاک کل بر حسب اعداد رینولدز پرداخته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در اعداد رینولدز مشابه، Case B دارای ضریب اصطکاک بزرگتری است. همچنین میزان اختلاف در ضریب اصطکاک کلی روندی صعودی داشته؛ به گونه‌ای که با افزایش عدد رینولدز سیلندر با مقطع مربعی اختلاف بیشتری در ضریب اصطکاک نسبت به حالت دایروی از خود نشان می‌دهد.

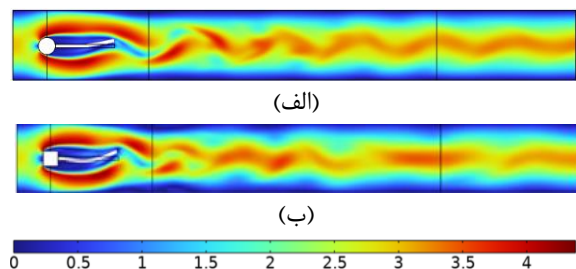
### ۳-۲- تأثیر نوع سطح مقطع سیلندر بر مشخصه‌های حرارتی

شکل (۹) توزیع دمای استاتیکی و لایه مرزی حرارتی را برای سطح مقطع متفاوت سیلندر نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در هر دو ساختار در مرکز کانال دمای سیال

در این بخش، نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا تأثیر نوع سطح مقطع سیلندر بر رفتار جریان سیال و ویژگی‌های حرارتی آن ارزیابی می‌شود. در ادامه، با بررسی اثر عدد رینولدز و تحلیل عملکرد هیدرولیکی و حرارتی کانال، بهینه‌ترین آرایش سیلندر و تیر الاستیک به عنوان مولد گردابه‌ی انعطاف‌پذیر تعیین خواهد شد. همچنین به منظور درک عمیق‌تر از نقش تیر الاستیک در کنترل جریان و افزایش نرخ انتقال حرارت، اثر این پارامتر به طور جامع مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۱- تأثیر نوع سطح مقطع سیلندر بر الگوی جریان

در این بخش به بررسی تأثیر نوع سطح مقطع سیلندر بر الگوی جریان می‌پردازیم. شکل (۶) خطوط جریان و توزیع سرعت را برای هر دو سطح نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با برخورد جریان به سیلندر به دلیل ایجاد نقطه سکون، یک ناحیه پر سرعت در اطراف آن ایجاد شده و این نواحی به سمت دیواره کانال کشیده شده‌اند. همچنین به دلیل وجود تیر الاستیک، هسته اصلی جریان در کانال، دارای نواحی با سرعت بیشینه و با حرکت سینوسی می‌باشد. خطوط جریان در Case A نشان می‌دهد که گردابه‌ها در حال شکل‌گیری در پشت سیلندر می‌باشند.

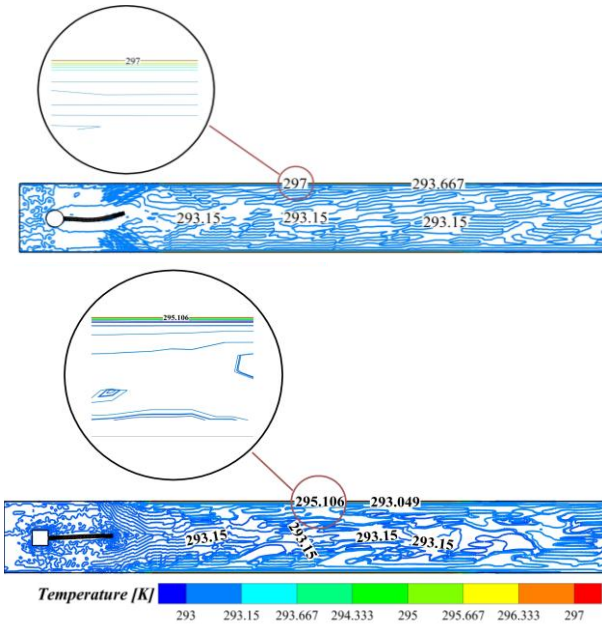


شکل ۶ توزیع سرعت و خطوط جریان در عدد رینولدز ۱۶۴۰ و  $t = 5s$  برای الف- Case A - ب- Case B

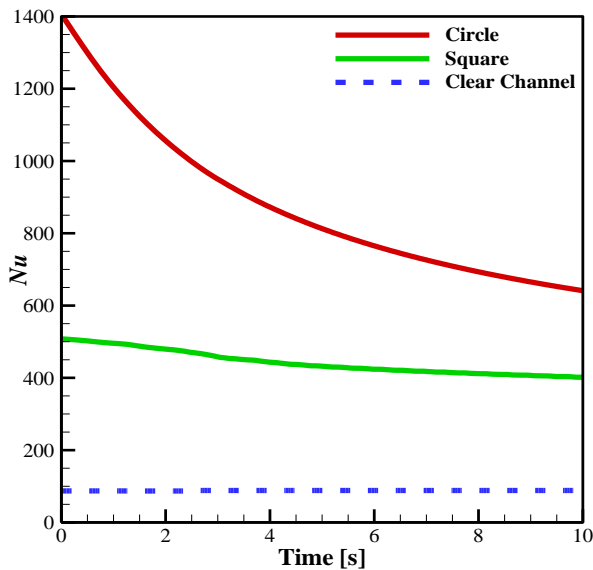
بررسی خطوط جریان برای Case B نشان می‌دهد که در سطح مقطع مربعی ایجاد گردابه‌ها سرعت بیشتری داشته و با حرکت تیر این گردابه‌ها به سمت دیواره کانال هدایت می‌شوند. گردابه‌های ایجاد شده می‌توانند منجر به تغییر در نرخ انتقال حرارت و نیز افت فشار درون کانال شوند.

تفاوت در سطح مقطع سیلندر می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر افت فشار درون کانال داشته باشد. به همین جهت شکل (۷) به بررسی افت فشار ایجاد شده توسط ساختارهای متفاوت در

شده است؛ اما در مقایسه با مقطع دایروی این نرخ افزایش انتقال حرارت کمتر است.



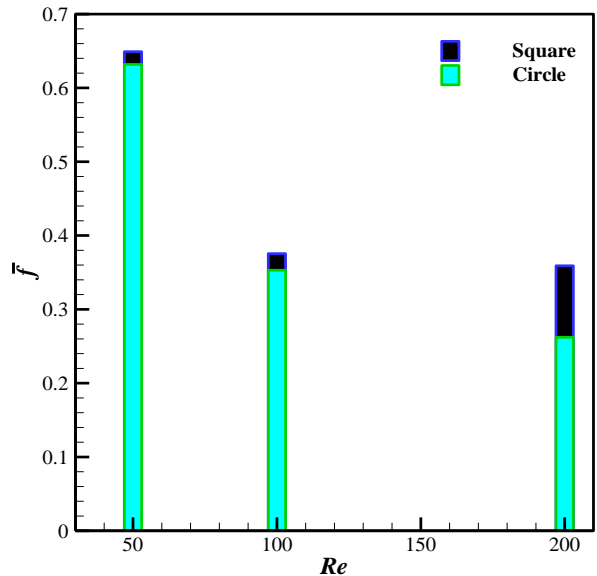
شکل ۹ توزیع دمای استاتیکی در  $t = 5s$  برای سیلندر با سطح مقطع مختلف در عدد رینولدز ۱۶۴۰



شکل ۱۰ مقایسه تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان برای سیلندر با سطح‌های مقطع مختلف و کانال بدون حضور مولد گردابه

علاوه بر آن مقایسه عدد ناسلت نشان می‌دهد که سیلندر با مقطع دایروی توانایی بهتری در خنک‌کاری کانال در شرایط یکسان دارد. با افزایش گام‌های زمانی و پایا شدن جریان عدد ناسلت در هر دو ساختار دایروی و مربعی سیری نزولی را طی می‌کند که شیب این روند نزولی در سیلندر با مقطع دایروی بزرگتر می‌باشد. با مقایسه مشخصه‌های جریان و حرارتی در می‌یابیم که در Case A اگرچه رشد گردابه‌ها سرعت کندتری

تقریباً یکسان است. اگرچه در Case A دمای ماکزیمم بزرگتری در دیواره کانال مشاهده می‌شود؛ اما در این ساختار گردایان دما نیز بزرگتر خواهد بود و بنابراین انتظار می‌رود Case A عد ناسلت بزرگتری در شرایط یکسان داشته باشد.

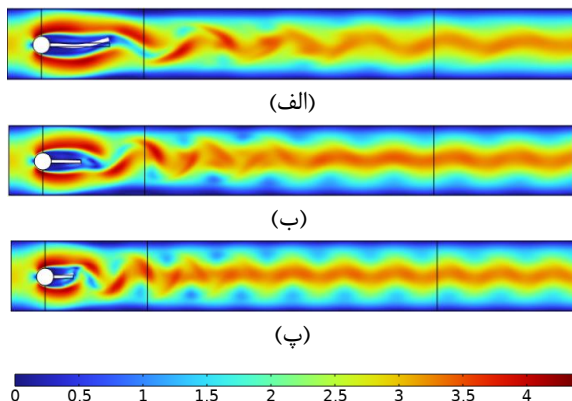


شکل ۸ مقایسه ضریب اصطکاک کل در اعداد رینولدز مختلف برای سیلندر با سطح مقطع‌های متفاوت

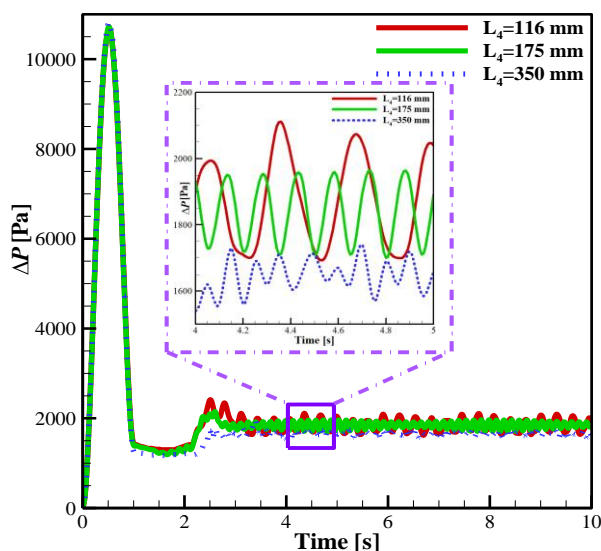
همچنین بررسی شکل (۹) نشان می‌دهد به دلیل حضور مولد گردابه، ضخامت لایه مرزی حرارتی نسبت به ابعاد کانال بسیار کوچک است. علت این امر ایجاد بی‌نظمی‌های شدید ایجاد شده توسط گردابه‌های درهم تنیده ساختار سیلندر و تیر الاستیک است که با افزایش شدید اختلاط سیال نرخ انتقال حرارت به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد.

به منظور ارزیابی این دو ساختار در افزایش نرخ انتقال حرارت، در شکل (۱۰) به محاسبه عدد ناسلت بر حسب زمان پرداخته شده است. بر اساس این نمودار حضور مولد گردابه انعطاف‌پذیر تأثیر چشم‌گیری بر افزایش نرخ انتقال حرارت دارد به طوری که مولد گردابه انعطاف‌پذیر با سطح مقطع دایروی می‌تواند در بهترین حالت ممکن تا حدود ۱۴ برابر نسبت به یک کانال بدون حضور مولد گردابه منجر به بهبود انتقال حرارت شود. همانطور که در مطالعه شکل (۹) مشاهده شد ایجاد گردابه‌های متعدد و رفتار غیر قابل پیش‌بینی جریان باعث می‌شود که انتقال حرارت جابجایی به صورت اجباری به طرز قابل توجهی افزایش یابد. علاوه بر آن می‌توان از بررسی شکل (۱۰) نتیجه گرفت که به دلیل سرعت و تعداد زیاد گردابه‌ها در Case B عملاً سیال فرصت چندانی برای تبادل انرژی و انتقال حرارت با سطح گرم پیدا نمی‌کند. اگرچه در سیلندر با مقطع مربعی هم افزایش انتقال حرارت نسبت به یک کانال خالی چشم‌گیر بوده و تقریباً ۵ برابر

ناحیه بیشتر شده، بنابراین افت فشار و به تبع آن افت اصطکاکی درون کانال افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲ توزیع سرعت و خطوط جریان در عدد رینولدز ۱۶۴۰ برای طول متفاوت تیر الاستیک؛ الف-  $L_4 = 350$  mm - ب-  $L_4 = 175$  mm - پ-  $L_4 = 116$  mm

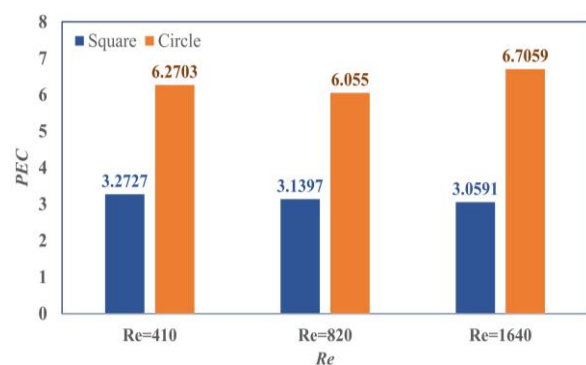


شکل ۱۳ تغییرات افت فشار بر حسب زمان درون کانال برای طول‌های متفاوت تیر الاستیک در عدد رینولدز ۱۶۴۰

### ۳-۴- بررسی تأثیر طول تیر الاستیک بر مشخصه‌های حرارتی

طول تیر الاستیک علاوه بر تأثیر روی الگوی جریان می‌تواند منجر به تغییر در مشخصه‌های حرارتی نیز شود. در شکل (۱۴) میزان تغییرات عدد ناسلت برای طول‌های مختلف بر حسب زمان رسم شده است. میزان عدد ناسلت در طول ۳۵۰ میلی‌متر از تمامی موارد بررسی شده کمتر است. همچنین بررسی میزان تغییرات عدد ناسلت نشان می‌دهد که بیشترین میزان آن با روندی نوسانی مربوط به طول ۱۷۵ میلی‌متر می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر

دارد؛ اما پایداری مناسب‌تر جریان نشان می‌دهد که در این آرایش، انتقال حرارت از سطح تولیدکننده شار گرمایی به هسته اصلی جریان بهتر صورت می‌گیرد. برای ارزیابی و درک بهتر هر ساختار بر الگوی جریان و انتقال حرارت لازم است میزان ارزیابی عملکرد آنها محاسبه گردد. به همین منظور شکل (۱۱) به مقایسه معیار ارزیابی عملکرد هر کدام از آرایش‌ها بر حسب عدد رینولدز پرداخته است. این نمودار نشان می‌دهد که در بازه اعداد رینولدز مطالعه شده در این پژوهش معیار ارزیابی عملکرد در Case A حدوداً دو برابر Case B می‌باشد. می‌توان ادعا کرد که اگر هدف مطلوب گرفتن بیشترین بازده خنک‌کاری از این سیستم باشد، سیلندر با مقطع دایروی انتخاب مناسب‌تری است.

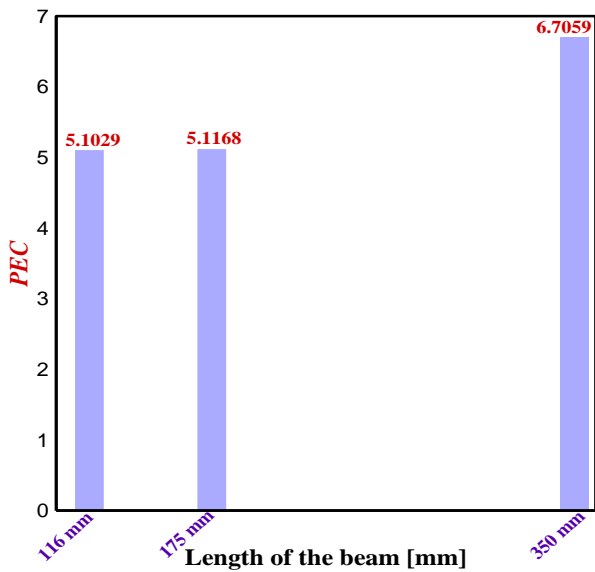


شکل ۱۱ مقایسه معیار ارزیابی عملکرد سیلندر با سطح مقطع‌های متفاوت بر حسب عدد رینولدز

### ۳-۳- بررسی تأثیر طول الاستیک بر الگوی جریان

باتوجه به بررسی‌های انجام شده در بخش‌های پیشین مشاهده شد که سیلندر با مقطع دایروی دارای عملکرد حرارتی بهتری برای افزایش نرخ انتقال حرارت در کانال است. هدف از این بخش مطالعه تأثیر طول تیر الاستیک بر الگوی جریان و نیز انتخاب بهینه آن به منظور افزایش هرچه بیشتر ظرفیت حرارتی این سیستم می‌باشد.

با بررسی توزیع سرعت و خطوط جریان در شکل (۱۲) در می‌یابیم، هنگامی که طول تیر الاستیک برابر با ۱۷۵ میلی‌متر می‌باشد حرکت گردابه‌ها از پشت سیلندر به سمت دیواره کانال و مرکز آن با راحتی بیشتری اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر در این طول، جابه‌جایی نوک تیر الاستیک به حرکت و نیز تشکیل گردابه‌ها کمک بیشتری می‌کند. همچنین مطالعه افت فشار برای طول‌های مختلف نشان می‌دهد (شکل (۱۳)) که این مشخصه جریان، رابطه‌ای عکس با افزایش طول تیر دارد؛ به طوری که بیشترین نوسانات افت فشار، مربوط به طول ۱۱۶ میلی‌متر است. می‌توان این پدیده را اینگونه توجیه کرد که ناحیه تحت تأثیر جریان حول سیلندر بزرگ‌تر می‌شود و مقاومت جریان در این



شکل ۱۵ معیار ارزیابی عملکرد برای مولد گردابه انعطاف‌پذیر درون کانال با طول‌های متفاوت تیر الاستیک در عدد رینولدز ۱۶۴۰

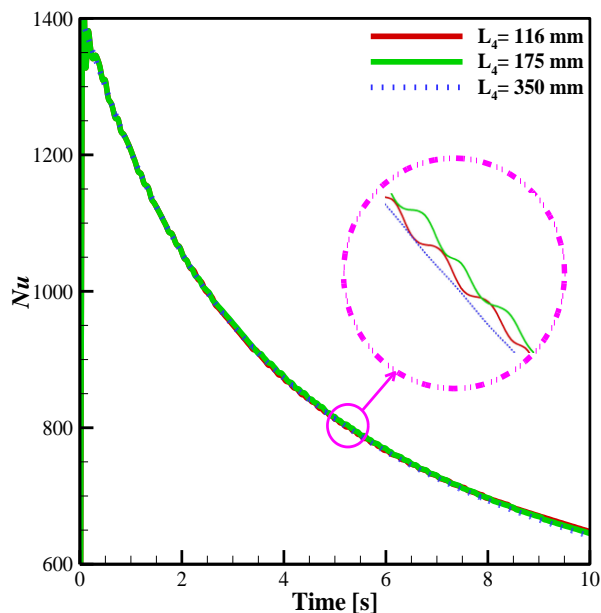
#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به مطالعه و شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی سیلندر متصل به یک تیر الاستیک به‌عنوان مولد گردابه انعطاف‌پذیر درون یک کانال با دیواره دارای شار حرارتی پرداخته شده است. در این مطالعه تأثیر نوع سطح مقطع سیلندر بر الگوی جریان و مشخصه‌های حرارتی مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. همچنین به‌منظور ارزیابی و مطالعه دقیق رفتار این ساختار (سیلندر متصل به تیر الاستیک) در رژیم جریان آرام، تأثیر عدد رینولدز و طول تیر الاستیک بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصل از پژوهش حاضر را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

- در مقایسه ریزش گردابه پشت سیلندرهایی با مقطع دایروی و مربعی تفاوت اصلی در نحوه جدایش جریان و ساختار دنباله مشاهده می‌شود. در مقطع دایروی، جدایش لایه مرزی تدریجی و وابسته به عدد رینولدز بوده و گردابه‌ها منظم‌تر و نوسانات ملایم‌تر است؛ در حالی که در مقطع مربعی، جدایش ناگهانی در گوشه‌ها به تشکیل لایه‌های برشی قوی‌تر، دنباله آشفته‌تر و نوسانات عرضی شدیدتر منجر می‌شود.
- بر این اساس انتظار می‌رود اختلاط بیشتر در حالت مربعی، انتقال حرارت را افزایش دهد؛ اما نتایج حاضر نشان می‌دهد در پیکربندی سیلندر متصل به تیر الاستیک، مقطع دایروی عملکرد حرارتی بهتری دارد.

در بررسی این نمودار این است که اگرچه هر دو طول ۱۷۵ و ۱۱۶ میلی‌متر رفتاری نوسانی و پریودیک برای عدد ناسلت دارند؛ اما مقدار ماکزیمم عدد ناسلت در طول ۱۱۶ میلی‌متر برابر با میزان مینیمم آن در طول ۱۷۵ میلی‌متر می‌باشد. مطالعه تأثیر طول تیر الاستیک نشان می‌دهد که نمی‌توان الگویی ثابت برای ارتباط آن با روند تغییرات عدد ناسلت پیش‌بینی کرد. علت اصلی این مشاهده به تغییر در رفتار و الگوی جریان با طول‌های مختلف تیر باز می‌گردد. می‌توان استنباط کرد که حرکت جریان سرد هسته اصلی<sup>۱</sup> و بالادست در طول ۱۷۵ میلی‌متر به سمت دیوارهای گرم کانال راحت‌تر روی می‌دهد و این امر باعث افزایش اختلاط سیال و نرخ انتقال حرارت خواهد شد.



شکل ۱۴ بررسی میزان تغییرات عدد ناسلت بر حسب زمان برای طول‌های مختلف تیر الاستیک در عدد رینولدز ۱۶۴۰

برای ارزیابی کلی تأثیر طول تیر الاستیک بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی مولد گردابه انعطاف‌پذیر درون کانال لازم است تا معیار ارزیابی عملکرد تحلیل و محاسبه گردد.

شکل (۱۵) میزان تغییرات معیار ارزیابی عملکرد را برای تیر با طول‌های متفاوت نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار در می‌یابیم که بیشترین معیار ارزیابی عملکرد متعلق به تیر الاستیک با طول ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد. اگرچه در طول‌های ۱۱۶ و ۱۷۵ میلی‌متر میزان تغییرات عدد ناسلت بیشتر بوده و نیز این دو طول عدد ناسلت کلی بالاتری را نشان دادند؛ اما افزایش افت فشار در طول کانال در این دو مقدار باعث کاهش کلی عملکرد حرارتی سیستم شده است.

<sup>۱</sup> Core flow

$PEC$	معیار ارزیابی عملکرد
$q$	شار حرارتی (W)
$Re$	عدد رینولدز
$T$	دما (K)
$T_{in}$	دمای ورودی (K)
$t$	زمان (s)
$U_{in}$	سرعت ورودی (m/s)
$u$	سرعت (m/s)
$u_g$	سرعت شبکه متحرک (m/s)
<b>علائم یونانی</b>	
$\rho$	چگالی ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	تنش ( $N/m^2$ )
$\varphi$	اتلافات ویسکوز (1/s)
$\mu$	لزجت دینامیکی (Pa/s)
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$s$	جامد
$g$	شبکه
$0$	پارامتر بدون حضور مولد گردابه

## ۶- مراجع

- [1] A. R. Abkenar, et al., "Experimental investigation of flow and heat transfer in a smooth channel affected by vortex generator with a punched hole," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 50, no. 2, p. 271–284, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.032>.
- [2] A.A. Abbasian Arani, and S. Gholami Ghale Nazeri, "Effect of Vortex Generator on a wavy Wall heat exchanger performance for turbulent nanofluid flow under a magnetic field," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 2, p. 493–508, 2020, <http://doi.org/10.22060/mej.2018.13975.5767>.
- [3] S. Ogawa, and S. Usui, "Heat transfer enhancement by vortex generators for compact heat exchanger of automobiles," *Open Journal of Fluid Dynamics*, vol. 8, no. 03, p. 321, 2018, <https://doi.org/104236/ojfd.2018.83020>.
- [4] F. Nejati Barzoki, et al., "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*, vol. 53(3 (Special Issue)), p. 1963–1980, 2021, <http://doi.org/10.22060/mej.2020.17218.6558>
- [5] A. Ebrahimi, E. Roohi, and S. Kheradmand, "Numerical study of liquid flow and heat transfer in rectangular microchannel with longitudinal vortex generators," *Applied Thermal Engineering*, vol. 78,

- این رفتار ناشی از ماهیت اندرکنش سیال و سازه (FSI) است؛ به گونه‌ای که کوپل دینامیکی بین نوسان تیر و میدان جریان، ساختار گردابه‌ها و الگوی اختلاط حرارتی را باز تنظیم می‌کند. در مقطع دایروی، هماهنگی مناسب‌تر بین نوسان سازه و ریزش گردابه‌ها منجر به تقویت انتقال حرارت در مجاورت دیواره‌ها می‌شود. به طور کمی، حضور سیلندر متصل به تیر الاستیک می‌تواند تا ۶/۱ برابر ضریب اصطکاک و تا ۱۴ برابر عدد ناسلت کل را افزایش دهد که بیانگر پتانسیل بالای این سازوکار در بهبود عملکرد حرارتی است.
- ارزیابی معیار عملکرد در اعداد رینولدز مختلف نشان داد هر دو پیکربندی نسبت به کانال بدون مولد گردابه انعطاف‌پذیر برتری دارند؛ اما Case A توازن مناسب‌تری بین افزایش انتقال حرارت و افت فشار ایجاد می‌کند. همچنین طول تیر الاستیک پارامتر تعیین‌کننده‌ای است؛ به گونه‌ای که با کاهش طول تیر، شدت گردابه‌ها و نوسانات افزایش یافته و ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود. بنابراین بیشترین افت فشار مربوط به کمترین طول تیر بوده و بین طول تیر و افت فشار رابطه‌ای معکوس برقرار است.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهد در سامانه سیلندر متصل به تیر نوسانی، مقطع دایروی گزینه مناسب‌تری برای بهبود انتقال حرارت است و انتخاب بهینه طول تیر می‌تواند ابزار مؤثری برای کنترل همزمان بازده حرارتی و افت فشار باشد.

## ۵- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

$D$	قطر (m)
$D_h$	قطر هیدرولیکی (m)
$d_s$	جابجایی (m)
$E$	انرژی (J)
$F$	نیرو حجمی (N)
$f$	ضریب اصطکاک
$f_0$	ضریب اصطکاک بدون حضور مولد
$\bar{f}$	ضریب اصطکاک میانگین
$\bar{f}_0$	ضریب اصطکاک میانگین بدون حضور مولد
$H$	ارتفاع کانال (m)
$K$	ضریب هدایت حرارتی (W/m.k)
$L$	طول کانال (m)
$Nu_x$	عدد ناسلت موضعی
$\bar{Nu}$	عدد ناسلت میانگین
$\bar{Nu}_0$	عدد ناسلت میانگین بدون حضور مولد گردابه
$n$	راستای نرمال
$P$	فشار (Pa)

- [10] A. K. Soti, R. Bhardwaj, and J. Sheridan, "Flow-induced deformation of a flexible thin structure as manifestation of heat transfer enhancement," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 84, p. 1070–1081, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.048>.
- [11] Havasi, et al., "Synergistic effects of vortex generators and elastic walls on enhancement of heat transfer in microchannels," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 164, p. 108855, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108855>.
- [12] M. Keshavarz, S. Habibi, and Y. Amini, "Heat transfer enhancement in a microchannel using active vibrating piezoelectric vortex generator," *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, vol. 12, no. 6, p. 191–204, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.09.004>.
- [13] S. Turek, and J. Hron, "Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow, in Fluid-structure interaction: modelling, simulation, optimisation," *Springer*. p. 371–385, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.018>.
- p. 576–583, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.006>.
- [6] W. Wu, et al., "Optimization of microchannel heat sinks with flexible vortex generators using GWO-SVR: A CFD and machine learning approach" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 164, p. 108900, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108900>.
- [7] A. Dadvand, et al., "Enhancement of heat and mass transfer in a microchannel via passive oscillation of a flexible vortex generator," *Chemical Engineering Science*, vol. 207, p. 556–580, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.11>.
- [8] M. Sheikhezad Saravani, H. Mohaddes Deylami, and 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," *Aerospace Mechanics*, vol. 20, no. 4, p. 71–86, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.aermech.2025.100011>.
- [9] Y. Amini, and S. Habibi, "Effects of multiple flexible vortex generators on the hydrothermal characteristics of a rectangular channel," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 175, p. 107454, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110746>.