

بررسی جریان گرما-شاره حول استوانه نوسانگر زاویه‌ای محصور همراه با صفحه جداگر

سید اسماعیل رضوی
آریا قیاسی*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

در پژوهش پیش رو به بررسی جریان لایه‌ای گذرنده از یک استوانه نوسانگر زاویه‌ای همراه با صفحه جداگر و محصور در کانال پرداخته می‌شود. از شبکه پویا با استفاده از شبیه سازی فنرهای خطی و پیچشی در تغییر شکل شبکه و روش لاگرانژی اویلری دلخواه برای مدل‌سازی نوسانات استوانه به کمک نرم افزار Ansys-Fluent استفاده شده است. برای گسسته‌سازی عبارت‌های جابجایی در معادلات مومنتوم از طرح Quick و برای عبارات پخش از طرح بالا دست مرتبه دوم استفاده شده است. برای پیوند دادن فشار و سرعت از الگوریتم PISO استفاده شده است. پس از صحت سنجی نتایج با مطالعات موجود، تأثیر پارامترهای مهم مانند فرکانس نوسان، طول صفحه جداگر و عدد رینولدز روی نیروهای وارد بر استوانه و همچنین انتقال گرما مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که استفاده همزمان از نوسان و صفحه جداگر می‌تواند تأثیر مثبت و منفی در کاهش ضریب پسا و افزایش انتقال گرما داشته باشد. در نهایت $F=2$ و $L=0.5$ به عنوان بهترین حالت انتخاب شد.

واژه‌های کلیدی: استوانه نوسانی، انتقال گرما، صفحه جداگر، جریان در کانال.

The investigation of thermo-flow over a rotationally oscillating confined circular cylinder with a splitter plate

S. E. Razavi
A. Ghiasi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

In this study the laminar incompressible flow and the heat transfer from a rotationally oscillating circular cylinder with an attached splitter plate is investigated. Dynamic grid is used employing improved linear and torsional spring analogy which is coupled with the solver by the Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulation for modeling the oscillation of cylinder by the aid of ANSYS FLUENT. The convection terms are discretized by QUICK, also diffusion terms have been discretized by second-order upwind scheme. For coupling the pressure and velocity fields, the PISO algorithm was employed. After verification of numerical solution with previous investigations, parametric studies were performed by changing oscillation frequency, splitter plate length and Reynolds number. It was observed that simultaneous usage of oscillation and splitter plate can have both positive and negative effects on drag reduction and heat transfer increment. Finally $F=2$ and $L=0.5$ were chose as the best combination.

Keywords: Oscillating cylinder, Heat Transfer, Splitter Plate, Channel flow.

پسا می‌باشد.

۱- مقدمه

جریان حول استوانه به عنوان یک مسأله پایه برای درک ساختار ریزش گردابه‌ها^۱ شناخته می‌شود. با تشکیل گردابه‌ها در پشت استوانه و سپس پراکنده شدن آنها، نیروهای تناوبی^۲ به استوانه وارد می‌شود که در صورت عدم کنترل منجر به ارتعاشات القاء شده^۳ توسط جریان می‌گردد. [۲،۱]

از کاربردهای این نوع جریان می‌توان به طراحی مبادله‌کن‌های گرمایی، جریان حول میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای و کابل‌های فولادی پل‌های معلق اشاره کرد. استفاده از روشهای فعال (مانند نوسان استوانه) و غیر فعال (مانند صفحه جداگر) برای کنترل جریان و کاهش ضریب پسا بسیار متداول است. صفحه‌های جداگر می‌توانند به صورت متصل و غیر متصل به استوانه به کار برده شوند. نوسان عرضی، طولی یا زاویه‌ای استوانه راه دیگری برای کنترل جریان و کاهش ضریب

کومار و همکاران [۳] با روش تجربی به بررسی ساختار پراکنده شدن گردابه‌ها از یک استوانه نوسانگر زاویه‌ای پرداختند. نتایج بدست آمده نشان داد که پدیده قفل شدگی^۴ جریان در بازه خاصی از فرکانس بی‌بعد روی می‌دهد که این بازه علاوه بر دامنه نوسان به موقعیت پایین دست از استوانه وابسته است. کوی و همکاران [۴] به روش عددی به بررسی ارتعاشات القا شده بر استوانه با مقطع مربع شکل و مستطیل شکل پرداختند. شبیه سازی آنها متمرکز بر بررسی تأثیر زاویه حمله بر پاسخ استوانه بود. آنها دریافتند که پاسخ استوانه با سطح مقطع مربع تحت تأثیر نوسان در زاویه حمله صفر درجه، $22/5$ درجه و 45 درجه و پاسخ استوانه با سطح مقطع مستطیل تحت تأثیر زاویه حمله صفر درجه و 90 درجه قرار دارد. ری و کریستوفیدز [۵] به صورت عددی به مطالعه نیروی پسی وارد بر یک استوانه نوسانگر زاویه‌ای محصور در کانال پرداختند. یک سیستم کنترل حلقه باز برای کاهش نیروی پسی وارد بر استوانه طراحی گردید. محفوظ و بدر [۶] با

¹ Vortex Shedding

² Periodic Forces

³ Flow Induced Vibration

⁴ Lock-on effect

روش عددی به بررسی انتقال گرمای جابجایی و الگوهای جریان روی یک استوانه با نوسان چرخشی نسبت به محور مرکز خود که در مقابل یک جریان یکنواخت قرار داده شده است، پرداختند. پارامترهای مختلفی از قبیل عدد رینولدز، عدد پرناتل، دامنه نوسان چرخشی و فرکانس نوسان مورد بررسی قرار گرفت. پدیده قفل‌شدگی تشخیص داده شد و تأثیر آن روی توزیع گرما مشاهده شد. نتایج نشان دادند که در ناحیه قفل‌شدگی انتقال گرما افزایش چشمگیری دارد. پارک و غریب [۷] به صورت تجربی و با بادنسج لیزر داپلر^۱ به بررسی انتقال گرمای جابجایی اجباری روی یک استوانه نوسانی در جریان یکنواخت در یک تونل آب پرداختند. آنها مشاهده کردند که افزایش در فرکانس طبیعی گردابه‌ها باعث افزایش در انتقال گرما می‌شود. همچنین مشاهده شد که افزایش در آهنگ انتقال گرما با مقدار فاصله‌ای که در آن گردابه‌ها در پشت استوانه پشت سر هم به چرخش درمی‌آیند رابطه معکوس دارد. برای مثال با کاهش این فاصله، انتقال گرما افزایش می‌یابد. گائو و همکاران [۸] با روش تجربی به بررسی افزایش انتقال گرما یک استوانه داغ نوسانی در جهت طولی پرداختند. در این آزمایش از دود برای نمایان کردن ساختار جریان استفاده شد. همچنین ۳۰ ترموکوپل برای محاسبه دمای سطح استوانه مورد استفاده قرار گرفت. آنها در فرکانس بدون بعد ۲ همگامی گردابه‌های ایجاد شده را با فرکانس تحریک مشاهده کردند و از طرفی دیده شد که این گردابه‌ها در این فرکانس به صورت غیرمتقارن قرار گرفته‌اند. همچنین در فرکانس‌های ۲.۵ و ۳ این همگامی با گردابه‌های متقارن وجود دارند. برای فرکانس‌های تحریک کمتر از ۱.۵ تمامی گردابه‌ها به شکل غیرمتقارن می‌باشند. همچنین افزایش فرکانس تحریک به دو برابر فرکانس طبیعی باعث افزایش هرچه بیشتر انتقال گرما شد. در مطالعه‌ای دیگر، محفوظ و بدر [۹] به صورت عددی با روش برش سری‌ها به بررسی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی برای یک استوانه نوسانی عرضی در داخل یک سیال ساکن پرداختند. درنهایت به این نتیجه رسیدند که تأثیر دامنه و فرکانس نوسان روی انتقال گرما بسیار متأثر از عدد گراشف است. در حالت جابجایی اجباری یعنی عدد گراشف صفر، افزایش عدد کالگن- کارپنتر باعث به وجود آمدن تعداد بیشتری گردابه و در نتیجه افزایش انتقال گرما می‌شود. در حالی که در اعداد گراشف بالا تأثیر نوسان روی انتقال گرما فقط در اعداد کاولگن- کارپنتر بالاست که تأثیر قابل توجهی دارد. فو و تانگ [۱۰] با روش عددی و المان محدود گالرکین به بررسی انتقال گرما و الگوهای جریان از یک استوانه داغ در جریان یکنواخت پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که برهمکنش میان استوانه و گردابه‌ها، شکل جریان را در پشت استوانه مشخص می‌کند. آنها بیان کردند که خصوصیات جریان و انتقال گرما در ناحیه قفل‌شده به صورت تناوبی خواهد بود و در آخر به این نکته اشاره کردند که در این ناحیه انتقال گرما بسیار زیاد است. در مطالعه‌ای دیگر، فو و تانگ [۱۱] به بررسی عددی تأثیر دیوارهای گرما داده شده در یک کانال روی انتقال گرما یک استوانه در حال نوسان پرداختند. تأثیر خارج از مرکز قرار گرفتن استوانه در کانال و همچنین گرفتگی کانال روی ویژگی‌های انتقال گرما بررسی و بحث

^۱Laser Doppler Anemometer

شده است. آنها نتیجه گرفتند که مکان و قطر استوانه تأثیر به سزایی در انتقال گرما دارد. یانگ [۱۲] با روش عددی المان محدود گالرکین به مطالعه در زمینه جریان ناپایا و انتقال گرما در یک کانال همراه با یک استوانه با مقطع مربعی شکل که در حال نوسان است، پرداخت. او به این نتیجه رسید که جریان ناپایای ناشی از گردابه‌های عرضی به صورت بزرگ و فعال در پشت استوانه ایجاد می‌شود. این گردابه‌های عرضی، هسته‌های جریان‌های پرسرعت و دما پایین را به سمت قسمت‌های گرما داده شده کانال سوق می‌دهد. همچنین نواحی دما بالای دیوار به سمت قسمت‌های دما پایین گردابه‌ها حرکت می‌کنند و با آنها مخلوط می‌شوند. شرمین پوتیانوم [۱۳] در رساله دکترای خود به صورت تجربی به بررسی رابطه میان ساختار جریان و انتقال گرما در یک استوانه نوسانی در داخل یک تونل آب پرداخت. او به این نتیجه رسید که ساختار جریان و انتقال گرما تأثیر بسیار زیادی روی هم دارند به طوری که تعداد و نوع گردابه‌های ایجاد شده روی افزایش انتقال گرما تأثیر مستقیم دارند. همچنین او عنوان کرد که سرعت عرضی استوانه به خاطر تأثیر روی چرخش گردابه‌ها به انتقال گرما کمک می‌کند. پلاکز و همکاران [۱۴] به صورت عددی به مطالعه جریان گذرنده از یک استوانه نوسانگر با نوسانات عرضی پرداختند و تأثیر فرکانس نوسان بر ضرایب برآ و پسا را بررسی نمودند و نتایج بدست آمده را با مطالعات قبلی مقایسه کردند. خو و ژو [۱۵] به بررسی انتقال مومنوم و گرما در جریان پشتی آشفته برای یک استوانه ساکن به روش تجربی پرداختند که تحت تأثیر نوسانات استوانه بالادست خود قرار گرفته است. آنها بیان کردند که نوسانات استوانه بالادستی باعث تغییر در فرکانس گردابه‌های استوانه پایینی می‌شود که خود آن در حالت قفل‌شدگی با فرکانس نوسان قرار دارد. سلیک و همکاران [۱۶] به صورت عددی و با روش المان طیفی به بررسی جریان یک استوانه نوسانی داخل یک کانال به همراه یک صفحه جداگر در بالادست استوانه پرداختند. آنها مشاهده کردند که فرکانس طبیعی یک استوانه ساکن محصور تقریباً دو برابر یک استوانه غیر محصور است. همچنین بیان کردند که وجود دیوارهای کانال باعث به وجود آمدن هسته‌های گردابه‌ای جدیدی می‌شود که به پیچیده‌تر شدن جریان می‌انجامد.

رضوی و همکاران [۱۷] با روش حجم محدود و با شبکه بی‌سازمان تأثیرات طول صفحه جداگر ثابت را بر روی میدان سرعت و دما بر روی استوانه با مقطع دایره‌ای در اعداد رینولدز پایین بررسی کرده‌اند. با افزایش طول صفحه جداگر، ضریب پسا و عدد ناسلت متوسط بر روی سطح به خاطر پایدار شدن ناحیه پشت استوانه کاهش می‌یابد. ولی به خاطر افزایش سطح انتقال گرما، در کل آهنگ انتقال گرما از سطح به سیال افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر سلیک و همکاران [۱۸] به بررسی افزایش انتقال گرما برای یک استوانه عایق داخل یک کانال گرما داده شده پرداختند. آنها گزارش کردند که وجود استوانه ساکن و همچنین استوانه نوسانی باعث افزایش در انتقال گرما در دیواره‌ها نسبت به کانال خالی می‌شود. یانگ و فو [۱۹] با روش عددی المان محدود به بررسی جریان انتقال گرما از یک استوانه مستطیلی نوسانی در جریان یکنواخت پرداختند. تأثیرات عدد رینولدز، دامنه نوسان، سرعت نوسان و نسبت طول به عرض مستطیل روی ساختار جریان و ویژگی‌های انتقال گرما بررسی شده است. نتایج نشان داد که برهمکنش میان استوانه مستطیلی نوسانی با گردابه‌های ایجاد

$$\frac{H}{2} \leq y \leq \frac{H}{2} \quad (1)$$

$$u(y) = u_{max} \left(1 - \left(\frac{y}{H/2} \right)^2 \right)$$

که در آن u_{max} سرعت سیال در مرکز کانال و H عرض کانال است. در خروجی کانال سیال به محیط تخلیه می‌گردد و شرط مرزی دیریکله برقرار است. دیوارهای کانال عایق در نظر گرفته شده‌اند و شرط عدم لغزش روی آنها برقرار است. دمای استوانه و صفحه جداگر برابر و ثابت است و شرط عدم لغزش بر روی آنها برقرار می‌باشد. اندازه‌های کانال از مقاله سلیک و همکاران [۱۸] برگرفته شده است، به‌طوری که فاصله مرکز استوانه از دیوارهای بالایی و پایینی برابر با $1.5D$ ، از ورودی $4D$ و از خروجی برابر با $27D$ در نظر گرفته شده است. استوانه به همراه صفحه جداگر با فرمول زیر نوسان می‌کند:

$$\theta = A \sin(2\pi f_0 t) \quad (2)$$

دامنه نوسان ثابت و برابر $\frac{\pi}{18}$ فرض شده است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان عبارتند از معادله پیوستگی، مومنتوم در جهت x و y و معادله انرژی. با استفاده از روش لاگرانژی-اویلری دلخواه [۲۳ و ۲۴] این معادلات به شکل زیر در خواهند آمد:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + (u_j - \psi_j) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (u_j - \psi_j) \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} \quad (5)$$

ν لزجت سینماتیکی، u_j مولفه سرعت، T دما، p فشار، ψ_j سرعت حرکت شبکه، α ضریب نفوذ گرمایی می‌باشد. در صورت عدم حرکت شبکه، $\psi_j = 0$ خواهد شد، که در این حالت معادلات به شکل عادی خود برای یک مختصات ثابت در فضا تبدیل می‌شوند. عدد رینولدز،

عدد پرانتل، ناسلت لحظه‌ای و متوسط به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Re = \frac{u_{ave} D}{\nu} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hD}{k} = \frac{\left| \frac{\partial T}{\partial n} \right| D}{T_s - T_0} \quad (8)$$

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\pi D \tau} \int_0^{\tau} \int_0^{2\pi} Nu(\theta, t) d\theta dt \quad (9)$$

عدد پرانتل ثابت و برابر 0.7 فرض شده است.

۴- استقلال از شبکه و صحت سنجی نتایج

۴-۱- استقلال از شبکه

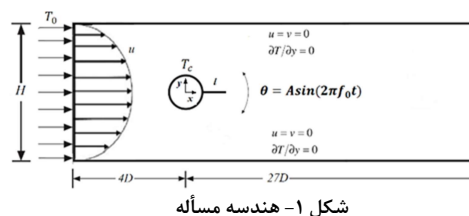
برای بررسی استقلال از شبکه چندین شبکه‌بندی با اندازه سلول‌های مختلف در نظر گرفته شد و مسئله برای جریان یکنواخت روی یک استوانه ساکن همراه با صفحه جداگر در عدد رینولدز 160 حل گردید. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. شبکه سوم با 13607 سلول مناسب ارزیابی شد.

شده از مستطیل، حالت جریان پشت سر را تنظیم می‌کند. مقدار انتقال گرما نیز به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. هوانگ و یانگ [۲۰] به مدلسازی جریان گذرنده از یک استوانه با دو صفحه جداگر در جلو و پشت استوانه، با هدف کاهش ضریب پسا پرداختند. آنها دریافتند که در هر رینولدز یک مقدار کمینه برای ضریب پسا وجود دارد که در فاصله خاصی که صفحات جداگر از استوانه دارند اتفاق می‌افتد. پیا و همکاران [21] به بررسی حساسیت جریان گذرنده از یک استوانه نوسانگر به آشفتگی در مسیر خطوط جریان پرداختند. آنها دریافتند که بسته به حرکت استوانه در جهت ساعتگرد یا پاد ساعتگرد انتقال نیرو از سیال به سازه می‌تواند افزایش یا کاهش یابد.

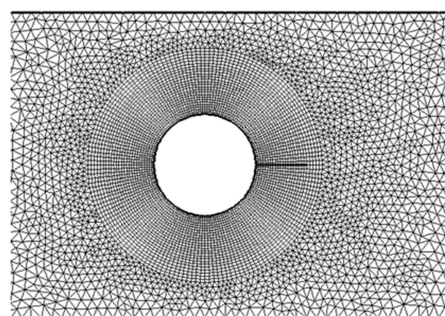
تاکنون مطالعات زیادی در زمینه تأثیر نوسان و صفحه جداگر به طور همزمان بر انتقال گرما و ضریب پسای استوانه محصور صورت نگرفته است. لذا هدف این پژوهش بررسی اثر استفاده همزمان روش‌های فعال و غیر فعال بر انتقال حرارت و ضریب پسای استوانه محصور در کانال خواهد بود. در این تحقیق بررسی جریان لایه‌ای سیال و انتقال گرمای استوانه همراه با صفحه جداگر متصل به آن درون کانال بررسی می‌شود. تأثیرات پارامترهای مهم اعم از عدد رینولدز، فرکانس نوسان و طول صفحه جداگر روی نحوه تشکیل گردابه‌ها و همچنین انتقال گرما مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- هندسه و شرایط مرزی

در این پژوهش جریان سیال تراکم ناپذیر، لایه‌ای و دو بعدی در نظر گرفته شده و انتقال گرما از یک استوانه نوسانی همراه با یک صفحه جداگر متصل در یک کانال بررسی گردیده است. هندسه مسئله در شکل ۱ و قسمت میانی شبکه در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه مسئله

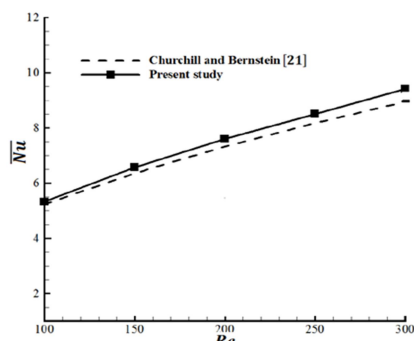


شکل ۲- قسمت میانی شبکه

جریان با دمای ثابت وارد کانال می‌شود و پروفیل سرعت در ورودی توسعه‌یافته طبق معادله زیر وارد کانال می‌شود:

محصور با دمای ثابت در مقابل یک جریان یکنواخت می پردازیم. نتایج با رابطه تجربی چرچیل و برنشتاین، موجود در کتاب هولمن [۲۲] مقایسه و رسم شده اند. این نتایج عدد ناسلت متوسط را نسبت به عدد رینولدز در پرانتل 0.7 نشان می دهد.

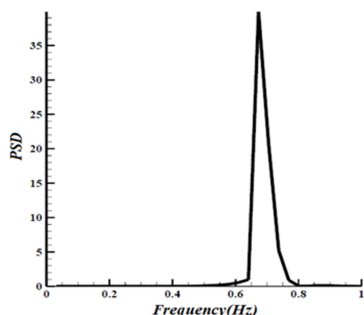
$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} [1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}]^{4/5} \quad (11)$$



شکل ۵- مقایسه ناسلت متوسط در رینولدزهای مختلف با رابطه چرچیل و برنشتاین [۲۱]

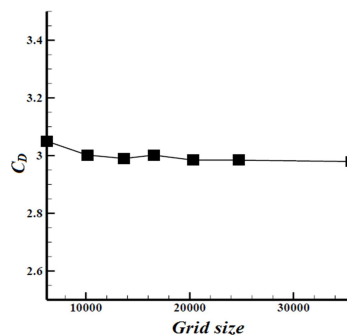
۵- تعریف حالت قفل شدگی

اگر فرکانس تشکیل گردابه ها در پشت جسم برابر با فرکانس تحریک جسم برای نوسان باشد، نمودار ضریب برآ تقریباً به شکل سینوسی خالص درخواهد آمد و تنها یک فرکانس در نمودار ضریب برآ قابل مشاهده خواهد بود. جالب است که این حالت تنها برای فرکانس تحریک برابر با فرکانس تشکیل گردابه ها اتفاق نمی افتد، بلکه تا محدوده معینی نسبت به این مقدار، این پدیده رخ می دهد. برای مثال ممکن است در فرکانسی برابر با ۹۰ درصد فرکانس تشکیل گردابه ها این اتفاق رخ دهد [۱۴]. برای دامنه های مختلف این محدوده متفاوت است؛ یعنی دامنه و فرکانس نوسان هر دو در اینکه آیا جریان قفل شده هست یا نه تأثیرگذارند. برای تشخیص حالت قفل شدگی از روش رسم نمودار چگالی طیفی قدرت^۱ ضریب برآ استفاده شده است. شکل ۶ نمودار چگالی طیف قدرت را در حالت قفل شده و قفل نشده نشان می دهد.

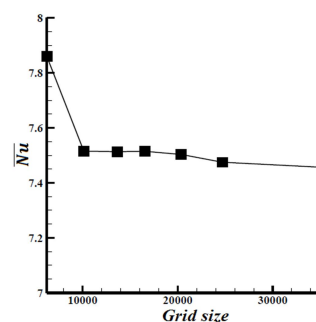


(الف)

¹ Power Spectral Density



(الف)



(ب)

شکل ۳- استقلال از شبکه

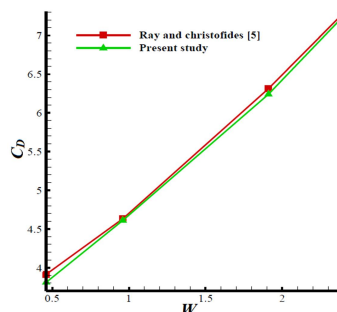
(الف) میدان سرعت (ب) میدان دما

۴-۲- صحت سنجی استوانه نوسانی

در شکل ۴ ضریب پسای بدست آمده در دامنه های مختلف برای فرکانس بدون بعد 1.07 با نتایج عددی به دست آمده توسط ری و کریستوفیدز [۵] که با مدلسازی استوانه نوسانگر زاویه ای محصور در کانال به کمک نرم افزار Comsol بدست آمده، مقایسه شده است. W دامنه بدون بعد است به صورت زیر تعریف می شود:

$$W = \frac{AD}{2u_{ave}} \quad (10)$$

که A دامنه نوسان، D قطر استوانه و u_{ave} سرعت متوسط جریان می باشد.



شکل ۴- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج ری و کریستوفیدز برای ضریب درگ [۵]

۴-۳- صحت سنجی انتقال گرما از یک استوانه

در این قسمت به صحت سنجی انتقال گرما از یک استوانه غیر

جدول ۲- فرکانس ریزش گردابه‌ها

Re	L				
	۰	۰/۲۵	۰/۵	۰/۷۵	۱
۵۰	-	-	-	-	-
۱۰۰	۰/۳۵۲۳	۰/۳۴۳۹	-	-	-
۱۶۰	۰/۵۶۱۱	۰/۵۵۰۱	۰/۵۷۵	۰/۶۱۱۳	۰/۶۲۵۲
۲۰۰	۰/۷۰۰۲	۰/۶۷۷۶	۰/۷۱۴۵	۰/۷۵۶۲	۰/۷۷۱۹

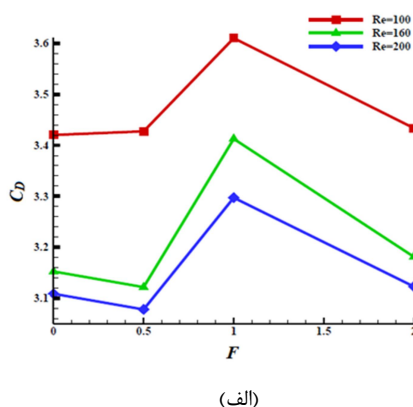
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بعضی از حالت‌های خاص، فرکانسی وجود ندارد. چون گردابه ای در پشت استوانه تشکیل نشده است. از جدول بالا پیداست که برای طول بدون بعد صفحه‌های جداگر صفر، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ گردابه‌ها به ترتیب در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۱۶۰ و ۲۰۰ شروع به شکل‌گیری می‌کنند. برای حالت‌هایی (در استوانه ساکن) که در آن‌ها گردابه‌ای تشکیل نشده است، تنها جریان حول استوانه ساکن مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، چرا که نمی‌توان فرکانسی برای نوسان استوانه به دست آورد.

۸- بررسی و تحلیل نتایج

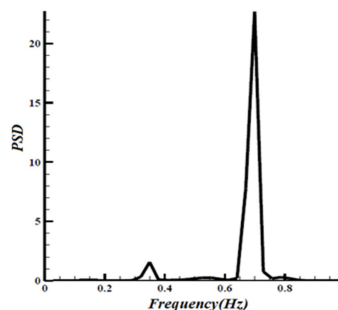
در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی استوانه نوسانی همراه با صفحه جداگر در داخل کانال می‌پردازیم. در ادامه تأثیر عوامل مختلف اعم از عدد رینولدز، طول صفحه جداگر و فرکانس نوسانی روی توزیع‌های مربوط به دما و سرعت نشان داده شده است.

۸-۱- بررسی نیروهای وارده بر استوانه

شکل ۶ مقدار ضریب پسای متوسط وارد بر استوانه را به ازای اعداد رینولدز و فرکانس نوسان در طول‌های صفحه جداگر متفاوت نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۶- چگالی طیف قدرت

(الف) در ناحیه قفل شدگی (Re=200, F=1, L=0) (ب) خارج از ناحیه قفل شدگی (Re=200, F=0.5, L=0)

علاوه بر حالت F=1 که برای تمامی موارد جریان در ناحیه قفل شده قرار دارد، قفل شدگی در بعضی موارد در سایر فرکانس‌ها هم رخ می‌دهد که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱- موارد قفل شدگی خارج از F=1

Re	F	L
۱۶۰	۲	۰/۷۵
۱۶۰	۲، ۰/۵	۱
۲۰۰	۲، ۰/۵	۰/۷۵
۲۰۰	۲، ۰/۵	۱

۶- روش حل عددی

از روش لاگرانژی اویلری دلخواه و شبکه پویا برای مدل‌سازی نوسانات استوانه استفاده شده است و نرم‌افزار 16 Ansys-Fluent به کار رفته است. برای گسسته‌سازی عبارت‌های جابجایی در معادلات مومنوم از طرح 'Quick' و برای عبارت پخش از طرح بالا دست مرتبه دوم استفاده شده است. برای پیوند دادن فشار و سرعت از الگوریتم PISO^۳ استفاده شده است.

۷- بررسی فرکانس طبیعی تشکیل گردابه‌ها

همان‌طور که از تعریف $F = \frac{f}{f_s}$ پیداست، برای پیدا کردن فرکانس نوسان استوانه (f) نیاز به دانستن فرکانس طبیعی گردابه‌های تشکیل‌شده در پشت استوانه ساکن برای همان هندسه استوانه (از نظر طول صفحه جداگر و عدد رینولدز) است. با رسم نمودار چگالی طیفی قدرت ضریب برآ در رینولدزهای مختلف برای استوانه ساکن فرکانس ریزش گردابه مشخص می‌شود. مقادیر این فرکانس‌ها در جدول ۲ تنظیم شده است. طول بدون بعد صفحه جداگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = l/D \quad (۱۲)$$

^۱ Scheme

^۲ Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics

^۳ Pressure Implicit with Splitting of Operators

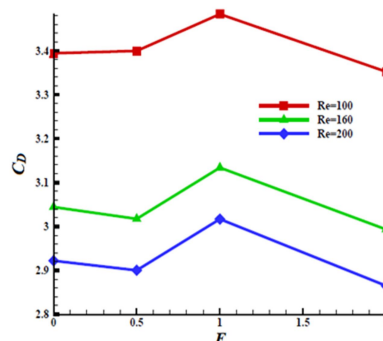
تا وقتی که طول صفحه جداگر کمتر یا برابر نصف قطر استوانه است با افزایش فرکانس ابتدا ضریب پسا کاهش می یابد، با رسیدن به فرکانس بدون بعد ۱ شاهد افزایش چشمگیر ضریب پسا خواهیم بود و با گذشتن از این فرکانس دوباره شاهد کاهش ضریب پسا هستیم. این موضوع را می توان در خاصیت قفل شدگی جریان جستجو کرد. به محض خارج شدن جریان از این حالت، مقدار ضریب پسا کاهش می یابد. این کاهش در ضریب پسا، با افت بیشتری در طول های صفحه جداگر بالاتر همراه است. اما با بیشتر شدن طول صفحه جداگر با افزایش فرکانس نوسان شاهد افزایش ضریب پسا خواهیم بود. افزایش ضریب پسا پس از فرکانس بدون بعد ۱ در دو نمودار آخر به دلیل باقی ماندن جریان در حالت قفل شدگی است و از این مورد می توان نتیجه گرفت که افزایش طول صفحه جداگر بیش از نصف قطر استوانه به همگامی^۱ فرکانسی گردابه ها کمک می کند و موجب توسعه ناحیه قفل شدگی جریان می شود. نکات حائز اهمیت در جدول ۳ گردآوری شده است.

جدول ۳ - بیشینه درصد افت در ضریب پسا نسبت به حالت استوانه

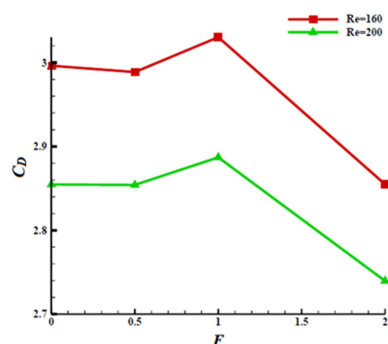
طول های صفحه جداگر مختلف	عدد رینولدز مربوط به بیشینه افت	درصد افت ضریب پسا
صفر	۲۰۰	۰/۹۷٪
۰/۲۵	۱۶۰	۱/۶۷٪
۰/۵	۱۶۰	۴/۶۸٪

شکل ۸ مقدار ضریب پسای متوسط وارد بر استوانه را به ازای اعداد رینولدز و طول صفحه جداگر فرکانس های نوسانی متفاوت نشان می دهد.

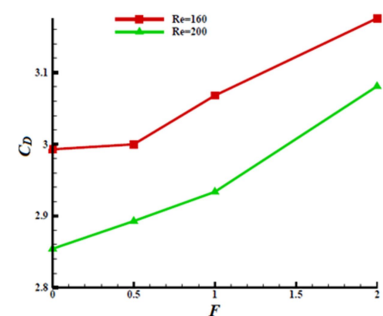
با توجه به شکل ۸ میتوان گفت که برای استوانه ساکن افزایش عدد رینولدز باعث کاهش ضریب پسا میگردد، همچنین افزایش طول صفحه جداگر موجب کاهش ضریب پسا می شود به جز در رینولدز ۵۰ که با افزایش طول صفحه جداگر ضریب پسا تقریباً ثابت می ماند. در سایر حالات میتوان مشاهده نمود که با افزایش طول صفحه جداگر تا نصف قطر استوانه ضریب پسا کاهش می یابد، با افزایش طول صفحه جداگر بیش از این مقدار ضریب پسا افزایش یافته است. به طور کلی وجود صفحه جداگر دو پیامد خواهد داشت پایدارتر شدن جریان و به تعویق انداختن ریزش گردابه ها و در نتیجه همین امر افت ضریب پسا را ناشی می شود. اما با افزایش طول صفحه جداگر بیش از شعاع استوانه باعث همگام شدن ریزش گردابه ها با فرکانس نوسان استوانه می گردد و موجب تولید گردابه های قوی تری می گردد که باعث افزایش ضریب پسا می شود.



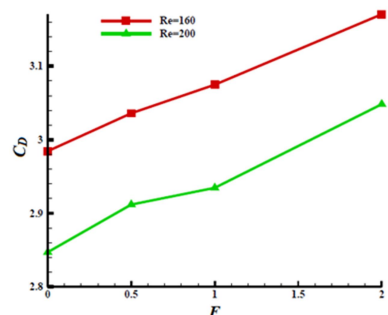
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۷- ضریب پسای متوسط نسبت به عدد رینولدز در فرکانس های نوسانی و طول صفحه جداگر متفاوت

(الف) $L=0$ (ب) $L=0.25$ (ج) $L=0.5$ (د) $L=0.75$ (ه) $L=1$

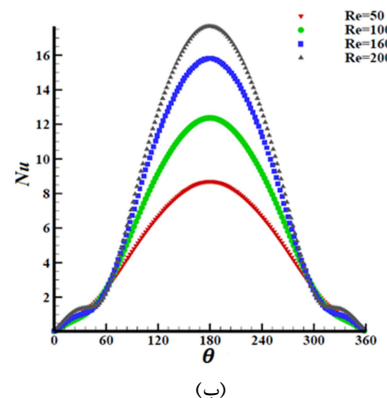
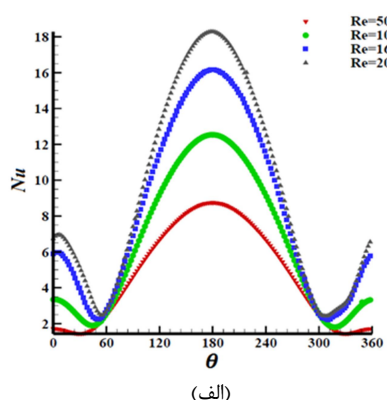
¹ Synchronization

۸-۲- بررسی انتقال گرما

در شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع عدد ناسلت محلی نسبت به مختصه زاویه‌ای استوانه به ازای اعداد رینولدز مختلف برای ترکیبات فرکانس نوسان و طول صفحه جداگر مختلف نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمودارها برای لحظه‌ای که استوانه در زاویه صفر درجه قرار دارد رسم شده اند.

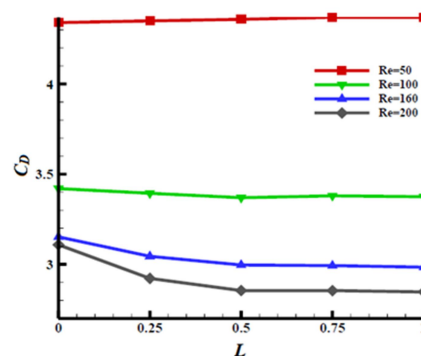
در حالت کلی افزایش عدد رینولدز، افزایش عدد ناسلت روی استوانه را ناشی می‌شود. این به دلیل تعامل انرژی بیشتر جریان (سرعت بالاتر) با سطح گرم استوانه است. همچنین بررسی دقیق نمودارها نشان می‌دهد که اختلاف در عدد ناسلت برای اعداد رینولدز مختلف در جلوی استوانه نسبت به پشت استوانه بیشتر است. همچنین افزایش طول صفحه جداگر سبب کاهش ناسلت محلی در پشت استوانه می‌گردد. مقایسه نمودارها در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که تغییر فرکانس تأثیر چندانی بر توزیع ناسلت محلی ندارد.

حال در این قسمت به بررسی تأثیر سه عامل ذکر شده بر روی عدد ناسلت متوسط روی استوانه پرداخته شده است. شکل ۱۱ می‌تواند به درک بهتر حالت قفل‌شدگی جریان کمک کند. لازم به ذکر است که ناسلت متوسط تنها برای استوانه محاسبه گردیده است و تنها انتقال حرارت از استوانه مورد بررسی قرار گرفته است و انتقال حرارت از صفحه جداگر در نظر گرفته نشده است.

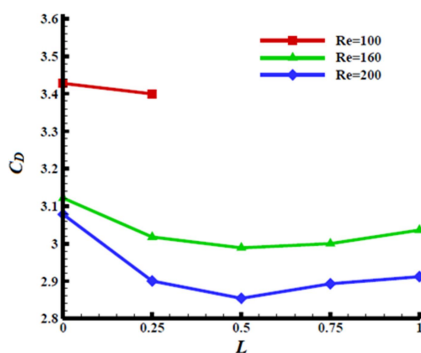


شکل ۹- تأثیر طول صفحه جداگر بر ناسلت محلی

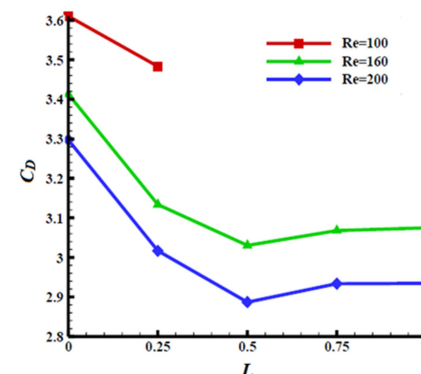
(الف) $L=0$ ، $F=0$ (ب) $L=1$ ، $F=0$



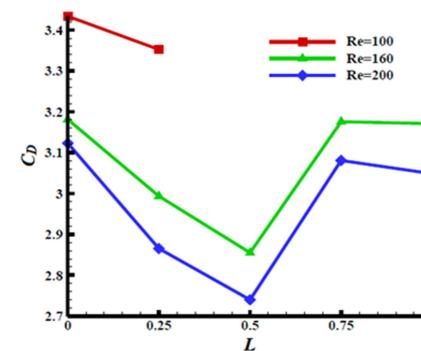
(الف)



(ب)



(ج)

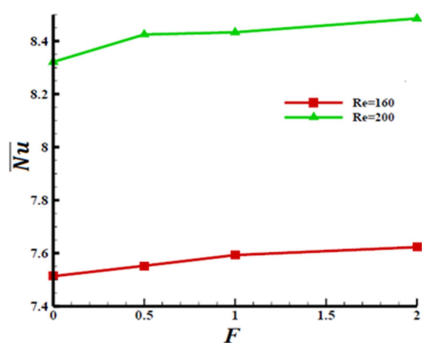


(د)

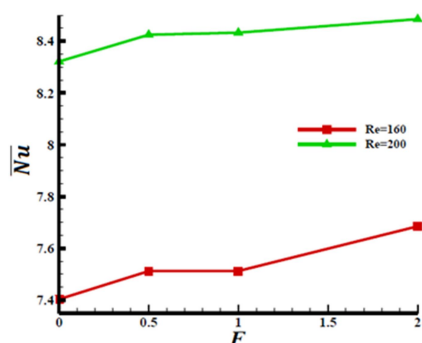
شکل ۸- ضریب پسای متوسط نسبت به عدد رینولدز در

فرکانس‌های نوسانی و طول صفحه جداگر متفاوت

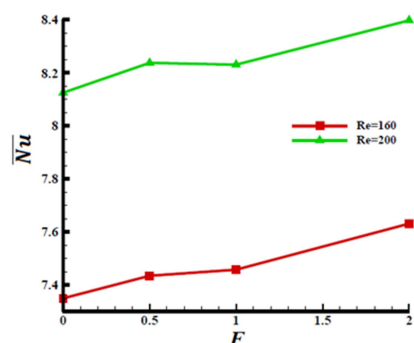
(الف) $F=0$ (ب) $F=0.5$ (ج) $F=1$ (د) $F=2$



(ج)



(د)

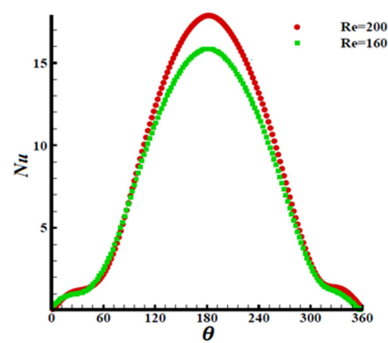


(ه)

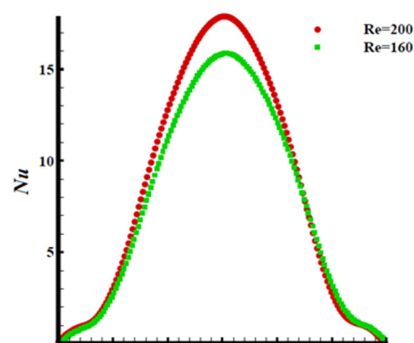
شکل ۱۱- ناسلت متوسط نسبت به عدد رینولدز در فرکانس‌های نوسانی و طول صفحه جداگر متفاوت

(الف) $L=0$ (ب) $L=0.25$ (ج) $L=0.5$ (د) $L=0.75$ (ه) $L=1$

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بیشتر موارد افزایش فرکانس موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد زیرا نوسان موجب می‌شود تا تعامل بیشتری بین سطح استوانه و جریان وجود داشته باشد، همچنین نوسان در فرکانس بالاتر ریزش گردابه را سریعتر می‌کند که باعث افزایش انتقال گرما می‌گردد. نکات حائز اهمیت در جدول ۴ گردآوری شده است.



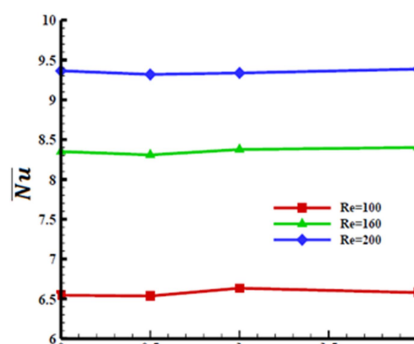
(الف)



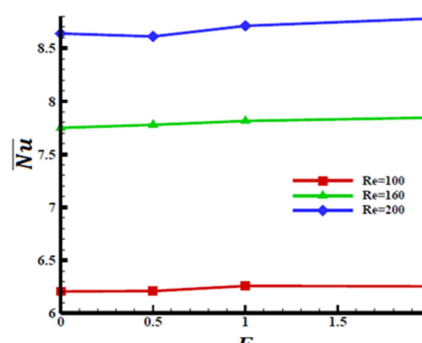
(ب)

شکل ۱۰- تأثیر فرکانس نوسان بر ناسلت محلی

(الف) $F=1$ ، $L=1$ (ب) $F=2$ $L=1$



(الف)

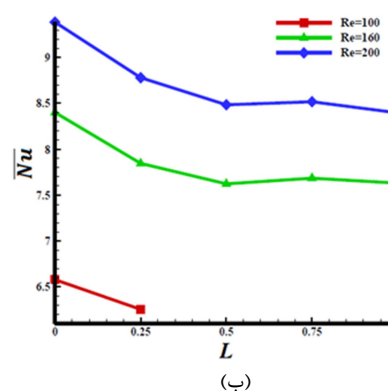
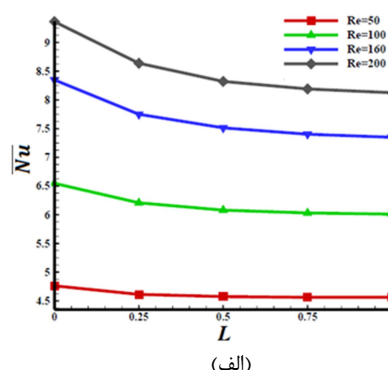


(ب)

جدول ۴- بیشینه درصد افزایش عدد ناسلت نسبت به حالت استوانه

طول صفحه جداگر	عدد رینولدز مربوط به بیشینه افزایش	درصد افزایش انتقال گرما
صفر	۱۰۰	۰/۴۵٪
۰/۲۵	۲۰۰	۱/۶۲٪
۰/۵	۲۰۰	۱/۹۳٪
۰/۷۵	۱۶۰	۳/۷۸٪
۱	۱۶۰	۳/۹۵٪

در شکل ۱۲ تأثیر طول صفحه جداگر روی عدد ناسلت متوسط استوانه نشان داده شده است.



شکل ۱۲- ناسلت متوسط نسبت به عدد رینولدز در فرکانسهای نوسانی و طول صفحه جداگر متفاوت
F=2 (ب) F=0 (الف)

از شکل‌های بالا کاملاً مشهود است که عدد ناسلت متوسط استوانه با افزایش طول صفحه جداگر، سیر نزولی را طی می‌کند. در تمامی فرکانس‌های نوسانی حالت طول صفحه جداگر صفر، دارای تفاوت بسیار بیشتری در مقدار عدد ناسلت است؛ یعنی اینکه وجود صفحه جداگر خود باعث کاهش عدد ناسلت می‌شود و طول آن تأثیر اندکی روی انتقال گرما دارد. علت این امر پایدارتر شدن جریان در پشت استوانه و کاهش تعامل جریان با استوانه بدلیل ضخیم تر شدن لایه مرزی گرمایی است که به کاهش انتقال حرارت می‌انجامد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت اضافه کردن صفحه جداگر به پشت استوانه نوسانی، نه تنها

باعث افزایش در انتقال گرما نخواهد شد بلکه باعث کاهش یافتن آن می‌شود.

۹- نتیجه‌گیری

جریان لایه‌ای و ناپایدار گذرنده از یک استوانه نوسانگر زاویه‌ای همراه با صفحه جداگر در یک کانال مورد بررسی قرار گرفت، در پایان می‌توان، به‌صورت زیر نتیجه‌گیری کرد:

- ۱- موارد قفل شدگی جریان تعیین گردید.
- ۲- به طور کلی استفاده از نوسان زاویه‌ای در کاهش ضریب پسا مؤثر است اما استفاده همزمان از صفحه جداگر با طولی بیش از شعاع استوانه باعث افزایش موارد قفل شدگی و در نتیجه افزایش ضریب پسا می‌گردد.
- ۳- مشخص شد که افزایش فرکانس نوسانی به خاطر درگیری بیشتر سطح استوانه با جریان ورودی، باعث تعامل انرژی بیشتری می‌شود. در نتیجه این موضوع باعث افزایش انتقال گرما خواهد شد.
- ۴- استفاده از صفحه جداگر باعث ضخیم‌تر شدن لایه مرزی گرمایی و کاهش انتقال گرما می‌شود و به طبع افزایش طول آن نیز کاهش بیشتر انتقال گرما را در پی دارد.
- ۵- بهترین حالت را می‌توان در $L=0.5$ و $F=2$ در نظر گرفت زیرا کاهش چشمگیر ضریب پسا و افزایش عدد ناسلت نسبت به استوانه ساکن و بدون صفحه جداگر در این مورد مشاهده شد.

۱۰- نمادها

u	مؤلفه افقی سرعت (ms^{-1})
y	مؤلفه عرضی مکان (m)
H	عرض کانال (m)
T	دما (K)
v	مؤلفه عمودی سرعت (ms^{-1})
θ	جابجایی زاویه‌ای (rad)
θ	مؤلفه مماسی مکان روی سطح استوانه (deg)
A	دامنه نوسان (rad)
f	فرکانس (Hz)
t	زمان (s)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
x	مؤلفه طولی مکان (m)
Re	عدد رینولدز
D	قطر استوانه (m)
Pr	عدد پرانتل
Nu	عدد ناسلت
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
n	بردار نرمال سطح
C_D	ضریب پسا
W	دامنه بی‌بعد
L	نسبت طول صفحه جداگر به قطر استوانه
F	فرکانس بدون بعد

علائم یونانی

ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
-------	--

ψ	سرعت شبکه (ms^{-1})
α	پخشندگی گرمایی (m^2s^{-1})
τ	دوره نوسان (s)
زیر نویس ها	
c	مربوط به استوانه
ave	مقدار متوسط
max	بیشینه
s	مربوط به ریزش گردابه
0	مربوط به ورودی

۱۱- مراجع

- [15] Xu G., Zhou Y., Momentum and heat transfer in a turbulent cylinder wake behind a streamwise oscillating cylinder, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 48, No. 19, pp. 4062-4072, 2005.
- [16] Celik B., Akdag U., Gunes S., Beskok A., Flow past an oscillating circular cylinder in a channel with an upstream splitter plate, *Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 10, 2008.
- [17] Razavi S. E., Farhangmehr V., Barar F., Impact of a splitter plate on flow and heat transfer around circular cylinder at low Reynolds numbers, *Journal of Applied Science*, Vol. 8, No. 7, pp. 1286-1292, 2008.
- [18] Celik B., Raisee M., Beskok A., Heat transfer enhancement in a slot channel via a transversely oscillating adiabatic circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 4, pp. 626-634, 2010.
- [19] Suh-Jenq Yang, Wu-Shung Fu, Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating rectangular cylinder in a cross flow, *Numerical Heat Transfer*, Vol 39, No. 6, pp. 569-591, 2010.
- [20] Jong-Yeon Hwang, Kyung-Soo Yang, Drag reduction on a circular cylinder using dual detached splitter plates, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, Vol 95, No.7, pp. 551-564, 2007
- [21] Sofia Peppas and George S. Triantafyllou, Sensitivity of two dimensional flow past transversely oscillating cylinder to streamwise cylinder oscillations, *Physics of Fluids*, Vol 28, pp 1021-10215, 2016.
- [22] Holman J.P., *Heat Transfer*, 10th Edition, pp. 319-320, (Translated by M.H. Kashanihesar, Gh. Malekzade), Nama Publications, 2010.
- [23] Nithiarasu P., An arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) formulation for free surface flows using the characteristic-based split (CBS) scheme, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol 48, pp 1415-1448, 2005.
- [24] ANSYS FLUENT 2016 Documentation.
- [1] Fujisawa, Ugata, Suzuki, A study on drag reduction of a rotationally oscillating circular cylinder at low Reynolds number, *Journal of visualization*, Vol. 8, No. 1, pp. 41-48, 2005.
- [2] Sungho Choi, Haecheon Choi, Sangmo Kang. Characteristics of flow over a rotationally oscillating cylinder at low Reynolds number, *Journal of Physics of Fluids*, Vol 14, No. 8, pp. 2767-2777, 2008.
- [3] S. Kumar C., Lopez O., Probst G., Francisco D., Askari and Y. Yang, Heat transfer from a cylinder oscillating in a cross-flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 735, pp. 307-346, 2013.
- [4] Zhendong Cui., Ming Zhao, Bin Teng, Lian Cheng. Two-dimensional numerical study of vortex induced vibration and galloping of square and rectangular cylinders in steady flow, *Ocean Engineering*, Vol 106, pp. 189-206, 2015.
- [5] Prasenjit Ray, Panagiotis D. Christofides, Control of flow over a cylinder using rotational oscillations, *Journal of Computers and Chemical Engineering* 29, No. 8, pp. 877-885, 2005.
- [6] Mahfouz F. M., Badr H. M., Forced convection from a rotationally oscillating cylinder placed in a uniform stream, *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 43, No. 17, pp. 3093-3104, 2000.
- [7] Park H. G. and Gharib M., Experimental study of heat convection from stationary and oscillating circular cylinder in cross flow, *Journal of heat transfer*, Vol 123, No. 1, pp. 51-62, 2001.
- [8] Gau C., Wu S.X. and Su H.S., Synchronization of vortex shedding and heat transfer enhancement over a heated cylinder oscillating with small amplitude in streamwise direction, *Journal of heat transfer*, Vol 123, No. 6, pp 1139-1148, 2001.
- [9] Mahfouz F. M. and Badr H. M., Mixed convection from a cylinder oscillating vertically in a quiescent fluid, *Heat and mass transfer*, Vol 38, No. 6, pp. 477-486, 2002.
- [10] Wu-Shung Fu, Bao-Hong Tong, Numerical investigation of heat transfer from a heated oscillating cylinder in a cross flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, No. 14, pp. 3033-3043, 2002.
- [11] Wu-Shung Fu, and Bao-Hong Tong, Effects of Eccentricity of Cylinder and Blockage Ratio on Heat Transfer an Oscillating Cylinder in a Channel Flow, *International communications in heat and mass transfer*, Vol. 30, No. 3, pp. 401-412, 2003.
- [12] Yang S.J., Numerical study of heat transfer enhancement in a channel flow using an oscillating vortex generator, *Heat and mass transfer*, Vol 39, No. 3, pp. 257-265, 2003.
- [13] Tait Sherman Pottebaum, *The relationship between near-wake structure and heat transfer for an oscillating circular cylinder in cross-flow*, Phd Thesis, California Institute of Technology, California, 2003.
- [14] Antoine Placzek, Jean-Francois Sigrist, Aziz Hamdouni, Numerical simulation of an oscillating cylinder in a cross-flow at low Reynolds number: Forced and free oscillations, *Computers & Fluids*, Vol 38, No. 1, pp. 80-100, 2009.