

بررسی انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری از سیلندره‌های بیضوی دوار

دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
sakkakimilad@gmail.com

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
vajdi@uma.ac.ir

دانشجوی کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
m.najafiershadi@gmail.com

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
f_moghanlou@uma.ac.ir

میلاد سکاکی

محمد وجدی*

میثم نجفی ارشادی

فرهاد صادق مغانلو

چکیده

در این تحقیق انتقال گرمای جابه‌جایی از سیلندره‌های دوار مورد بررسی قرار گرفته است. سیلندرها از نوع بیضوی با نسبت قطرهای ۰/۵، ۰/۶۲۵ و ۱ با آهنگ چرخش ۰/۵، ۱ و ۱/۵ می‌باشند. معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتم و انرژی با روش‌های عددی حل و خطوط جریان، بردارهای سرعت و کانتور دما استخراج شده است. تحلیل عددی برای رینولدز ثابت در محدوده جریان لایه ای با روش المان محدود توسط نرم افزار تجاری Comsol صورت گرفته است. برای شبیه‌سازی جریان چرخشی حول سیلندر، ناحیه‌ی حل به دو ناحیه‌ی چرخشی و ثابت تقسیم و به یکدیگر کوپل گردید. با تغییر آهنگ چرخش، میزان انتقال گرما و خطوط جریان در هر یک از حالات ارائه شده است. جریان به صورت ناپایا تحلیل شده که لحظه‌ی شروع تحلیل برابر با شروع ناگهانی سیلندر به چرخش است. نتایج نشانگر افزایش انتقال گرما در تمامی نسبت قطرها با افزایش نسبت چرخش است. در نسبت چرخش بالاتر گردابه‌ها در مسیر دوران دیواره‌ی جامد بالاجبار حذف شده و سریعاً به لبه‌ی سیلندر منتقل می‌گردند. از نظر نسبت انتقال گرما به نیروی پسا، بهترین حالت استوانه‌ی دوار است. **واژه‌های کلیدی:** انتقال گرمای جابه‌جایی، سیلندر بیضوی دوار، عدد ناسلت، تحلیل عددی، آهنگ انتقال گرما، روش المان محدود.

Investigation of Forced Convective Heat Transfer around Rotating Elliptic Cylinders

M. Sakkaki

M. Vajdi

M. Najafi Ershadi

F. Sadegh Moghanlou

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Abstract

In this research, convective heat transfer in a flow over rotating elliptic cylinders with various axis ratios and rotation rates is investigated numerically. The governing equations including continuity, momentum and energy equations are solved by numerical finite element method. The rotating cylinder was assumed at a constant temperature and heat dissipation to the flow was defined. Numerical analysis was performed by means of COMSOL Multiphysics software. Two domains were defined in the geometry, the rotating one with constant velocity and the second one was assumed to be stationary and the domains are paired to each other. The heat transfer rate and streamlines are obtained for all cases. The unsteady flow is studied when the cylinder starts to rotate suddenly. The results indicate an increase in heat transfer by increasing the rotational ratio. In the higher rotational ratios, the vortices in rotational path of the solid wall are removed and immediately transferred to the edge of the cylinder. In terms of the ratio of heat transfer to drag force, rotating cylinder with axis ratio of unity is the best one.

Keywords: Convective heat transfer, Rotating elliptic cylinder, Nusselt number, numerical study, Heat transfer rate, Finite Element Method.

۱- مقدمه

یکی دیگر از روش‌های غیر فعال برای افزایش ضریب عمومی انتقال گرما، استفاده از تشدید گردابه‌ها به کمک هندسه سطح است که در تحقیق ایوب و همکاران [۴] مورد توجه قرار گرفته است. جریان حول سیلندرها به دلیل امکان جدایش جریان نیز می‌تواند از راهکارهای افزایش آهنگ انتقال گرما باشد [۱۸]. سیلندره‌های دوار باعث تغییر الگوی جریان و تشدید انتقال گرما می‌گردند. اگرچه سیلندره‌های دورانی پیکربندی ساده‌ای دارند اما بررسی جریان و انتقال گرما حول آن‌ها پیچیده بوده و نیازمند مطالعات عددی، بررسی نتایج آزمایشگاهی و انجام تحلیل‌های دقیق بر روی این مبحث است.

پس از آن که پرانتل [۵] در تحقیق خود به بررسی اثرات چرخش سیلندر بر روی جدایی لایه‌های مرزی پرداخت، افراد مختلفی این موضوع را به صورت نظری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. چرخش

انتقال گرما به خاطر کاربرد فراوان در صنایع همچون صنایع پلاستیک و شیشه، صنایع غذایی و فرایند‌های شیمیایی و به خصوص مبادله‌کن‌های گرمایی همواره مورد علاقه مهندسان بوده است [۱۷]. هرچه میزان ضرایب انتقال گرما در مبادله‌کن‌ها بیشتر باشد، ابعاد آنها کوچکتر خواهد شد. برای بهبود ضرایب انتقال گرما جابجایی می‌توان از روش‌های فعال و غیر فعال استفاده نمود. در برخی تحقیقات تمرکز بر روی افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی است که می‌توان به تحقیق گروسی و همکاران [۱] اشاره نمود. افزایش سطح انتقال گرما و استفاده از مبادله‌کن‌های گرمایی فشرده راهکار دیگری می‌تواند باشد که می‌توان به استفاده از مواد متخلخل [۲] یا پره‌ها [۳] اشاره نمود.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: vajdi@uma.ac.ir

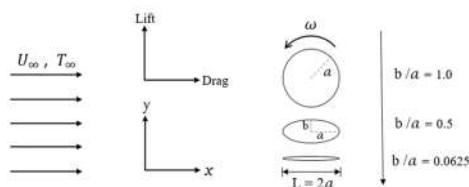
سیلندر به علت حرکت سطوح جانبی و تغییر جهت سرعت در بالا و پایین آن، باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در توزیع سرعت و فشار در طرفین و در مشخصه های دنباله جریان می شود. این تغییرات، پروفیل سرعت متوسط، پروفیل شدت اغتشاش ها، عدد استروهل، ضریب پسا، زاویه جدایش جریان را شامل می شود. لاگت و اوهرینگ [۶] یکی از اولین افرادی بودند که جریان حول سیلندر بیضوی چرخان را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نتایج عددی دو بعدی را برای یک سیلندر بیضوی چرخان در داخل یک سیال ساکن و همچنین در داخل جریان یکنواخت ارائه کردند. شبیه سازی ها در رینولدز ۴۰۰ و ۲۰۰۰ برای چرخش در سیال ساکن و در رینولدز ۲۰۰ برای چرخش در جریان یکنواخت انجام شد. آن ها دریافتند که یک جفت گردابه در هر نیم دور چرخش تشکیل می شود. همچنین گردابه های لبه عقبی قوی تر از گردابه های لبه پیشروی است. لاگت و اوهرینگ این مساله را بیشتر به گردابه های تشکیل شده در پشت سطح ایرفویل و تاثیر گردابه ها در چرخه های قبلی نسبت دادند. در مطالعه ای آن ها، حداکثر نیروی پسا درست قبل از اینکه صفحه به جریان عمودی برسد رخ می دهد و حداکثر نیروی برآ درست بعد از آن که صفحه به موقعیت افقی برسد، رخ می دهد.

خزیمه نژاد و میربزرگی [۷] با اجرای یک شبیه سازی دو بعدی، انتقال گرما از یک استوانه داغ به یک محفظه بسته مربعی سرد را به طور پارامتری مطالعه و اثر تغییر قطر استوانه بر آهنگ این انتقال گرما را بررسی کرده اند. نتایج به دست آمده نشان داد که الگوهای خطوط جریان، دما و مقادیر عدد ناسلت به عدد رایلی و نیز نسبت قطر استوانه به طول مشخصه محفظه وابسته هستند. در این حالت مراکز گردابه های ایجاد شده در اطراف استوانه در نیمه پایین محفظه به نسبت قطر استوانه به طول مشخصه محفظه و عدد رایلی وابسته است. همچنین مشاهده شد با افزایش عدد رایلی و نسبت قطر استوانه به طول مشخصه محفظه، آهنگ انتقال گرما از محفظه نیز افزایش می یابد.

کوالهیرو و همکاران [۸] به بررسی تجربی جریان گذرنده از یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۲/۵ در نزدیکی صفحه تخت پرداختند. آزمایش ها در یک تونل هیدرودینامیکی عمودی با اغتشاشات پایین برای اعداد رینولدز زیر ۲۰۰۰ انجام شد. از روش مرئی سازی جریان به منظور شناسایی جدایش لایه مرزی، منطقه چرخشی، فرآیند ریزش گردابه و دیگر ساختار های جریان استفاده کردند. نتایج آن ها نشان داد که تداخل لایه مرزی و دنباله استوانه بیضوی بر فرآیند تشکیل گردابه و ریزش گردابه تاثیر زیادی دارد. امین و کانتی داس [۹] به بررسی عددی جریان گذرنده از استوانه های دایره ای و بیضوی با نسبت های محوری متفاوت در نزدیکی دیواره پرداختند. آن ها تلاش کردند یک درک فیزیکی از جریان، شامل تداخل های لایه برشی جدا شده از استوانه و لایه مرزی دیواره انجام گیرد. مشاهده شد که هر دو استوانه (دایره ای و بیضوی) تاثیر زیادی بر تغییرات دینامیک دنباله و لایه مرزی دیواره دارد. هو [۱۰] به صورت عددی جریان سه بعدی حول یک سیلندر بیضوی چرخان در محدوده رینولدز ۲۰۰ و با در نظر گرفتن نسبت های مختلف قطرهای بیضی بررسی نمود. نتایج این مطالعه نشان داد که در سرعت های دورانی کم، الگوی ریزش گردابه ها متناوب است، در حالیکه وقتی سرعت چرخش به حد کافی بالا باشد گردابه ها ممکن است نزدیک بال تشکیل شوند. نیک و همکاران [۱۱]

یک سیلندر بیضوی چرخان با ۳ آهنگ چرخش و به ازای ۵ نسبت محوری متفاوت را در رینولدز ۱۰۰ شبیه سازی کردند. آن ها ادعا کردند که امتزاج گردابه های لبه های عقبی سیلندر برای شکل گیری و ریزش گردابه های شناور بسیار مهم است. آن ها همچنان نیروی برآی تولید شده توسط سیلندر بیضوی نازک را به اثر مگنوس نسبت دادند، هر چند که مطالعات تجربی گذشته که توسط واکر [۱۲] انجام شد حاکی از آن نبود. اما علی رغم وجود این تناقض در مطالعات، نیک و همکاران ویژگی ها و مشخصات دنباله ای جریان سیلندر چرخشی را پیش بینی و ارائه دادند. متاسفانه مطالعه آن ها تنها به تغییرات مقادیر آهنگ چرخشی α در رژیم آشفته گردابه های متناوب محدود می شود.

الگوی جریان و آهنگ انتقال گرما حول سیلندرهایی دورانی به عدد رینولدز (Re) که تعیین کننده نوع رژیم جریان است، آهنگ چرخش (α) که به عنوان نسبت سرعت زاویه ای به سرعت جریان آزاد تعریف می شود و نسبت قطرهای سیلندر (AR)، بستگی دارد [۱۹]. در مطالعات پیشین همگی این متغیرها به طور همزمان مد نظر قرار نگرفته و برخی از کارها فقط دو متغیر را شامل می شوند. هدف از کار حاضر شبیه سازی عددی و بررسی جریان و آهنگ انتقال گرما حول سیلندر دوار در اعداد رینولدز، نسبت قطرها، آهنگ چرخش های متفاوت می باشد. همچنین ضریب پسا، آهنگ انتقال گرما، عدد ناسلت و نسبت آهنگ انتقال گرما به نیروی پسا با در نظر گرفتن سه پارامتر مهم فوق در شرایط مختلف محاسبه شده است. نسبت آهنگ انتقال گرما به نیروی پسا یکی از پارامترهای مهم در بررسی می باشد و در واقع ارتباط بین نتایج هیدرودینامیکی و گرمایی است که در تعیین بهترین شرایط کاری می تواند مدنظر قرار گیرد که متاسفانه در کارهای پیشین به این پارامتر پرداخته نشده است.



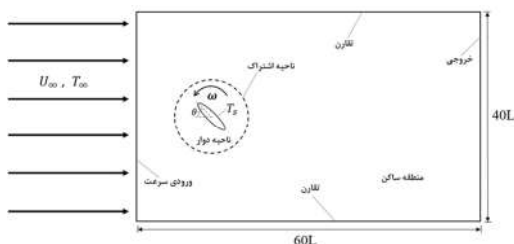
شکل ۱- طرحواره سیلندر دوار دو بعدی در یک جریان عرضی یکنواخت. (جهت مثبت نیرو برآ و پسا نشان داده شده است)

۲- هندسه و شرح مسئله

در مطالعه حاضر، جریان سیال حول سیلندر دوار دوبعدی به صورت عددی بررسی شده است. جریان یکنواخت از روی سیلندر عبور نموده و سیلندر به طور آبی در لحظه $t=0$ با سرعت زاویه ای ثابت ω در جریان آزاد یکواخت موازی با سرعت U_∞ شروع به حرکت می کند. مطابق شکل ۱ نسبت قطرهای سیلندر $AR=b/a$ ، که به صورت نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی تعریف می شود، و در حالت های بررسی شده این نسبت از ۰/۰۶۲۵ تا ۱ تغییر می کند. به عنوان نمونه، $AR=1$ نشان دهنده یک سیلندر دایره ای می باشد. علاوه بر این، نسبت سرعت α که با معادله (۱) تعریف می شود در حالت های بررسی شده از ۰/۵ تا ۱/۵ با گام ۰/۵ متغیر است. در تمامی موارد، عدد رینولدز، براساس U_∞ و طول مشخصه $L=2a$ ، طبق معادله (۲) تعریف شده و برابر ۲۰۰

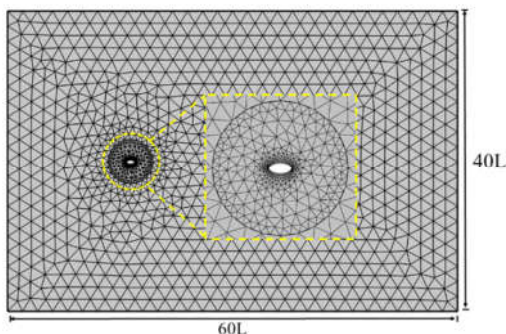
جدول ۲- آزمون استقلال از ابعاد دامنه‌ی محاسباتی

اندازه دامنه	C_d
$20L \times 30L$	$3/101$
$40L \times 60L$	$2/773$
$80L \times 120L$	$2/774$



شکل ۲- دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

با توجه به وجود گرادیان‌های سرعت در نزدیکی دیواره سیلندر، مش بندی در نزدیکی سیلندر ریزتر در نظر گرفته شده است. در حالیکه در فواصل دورتر از مش بندی درشت‌تری استفاده شده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از مش به کار برده شده نشان داده شده است.



شکل ۳- نمونه‌ای از مش به کار برده شده

در شبیه سازی ناپایا میبایست بررسی استقلال نتایج از اندازه گام زمانی نیز صورت گیرد، گام زمانی در این بررسی برابر $T_{rot}/0.0125$ (دوره تناوب سیلندر) در نظر گرفته شده است. این مقدار براساس آزمون استقلال گام به گام زمانی انتخاب شده است. جدول ۳ نشان می‌دهد که کاهش گام زمانی به 0.00625 منجر به تغییر ضریب پسا در حدود یک درصد می‌شود و در این تحقیق از این مقدار خطا صرف نظر شده است.

شرایط مرزی بکار رفته در تحلیل در شکل ۲ نشان داده شده و به قرار زیر است:

- ورودی: مقدار سرعت جریان آزاد برابر $U_{\infty} (m/s)$ و دمای آن برابر $T_{\infty} (K)$ می‌باشد.
- خروجی: دبی خروجی برابر دبی ورودی و فشار نسبی خروجی برابر صفر می‌باشد.
- برای مرزهای بالایی و پایینی ناحیه حل، شرط تقارن اعمال

در نظر گرفته می‌شود.

$$\alpha = \frac{\omega a}{U_{\infty}} \quad (1)$$

$$Re = \frac{U_{\infty} L}{\nu} \quad (2)$$

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که جریان در این عدد رینولدز، لایه ای است [۱۳]. عدد ناسلت (Nu) برای جریان توسط معادله (۳) تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{h L}{k_f} \quad (3)$$

که در آن h ضریب انتقال گرمای همرفتی، L طول مشخصه و $k_f (W/(m \cdot ^\circ C))$ رسانایی گرمایی سیال بر اساس دمای فیلم سیال است. همچنین نیروی برآ و پسا به ترتیب عمود و موازی با جهت جریان آزاد بوده و به ترتیب با جهت مثبت محور x و y همسو هستند و ضرایب آن توسط معادلات (۴) و (۵) تعریف می‌شوند:

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 L} \quad (4)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 L} \quad (5)$$

بنابراین در این بررسی ۹ حالت بر مبنای نسبت قطرهای بیضی و آهنگ چرخش مد نظر قرار گرفته است. جدول ۱ خلاصه‌ی از حالات مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- حالات مختلف مورد بررسی

شماره حالت	نسبت قطرهای بیضی	آهنگ چرخش
۱	0.625	0.5
۲	0.625	۱
۳	0.625	1.5
۴	0.5	0.5
۵	0.5	۱
۶	0.5	1.5
۷	۱	0.5
۸	۱	۱
۹	۱	1.5

۳- روش عددی

شبیه سازی عددی با روش المان محدود در نرم افزار Comsol انجام شده است. به منظور حل مسئله که شامل مرزهای متحرک است، از تکنیک شبکه متحرک استفاده شده که به موجب آن معادلات حاکم در یک چارچوب کلی با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی دلخواه حل می‌شوند [۲۰].

شکل ۲ دامنه محاسبات را با اندازه $60L$ در $40L$ نشان می‌دهد که به دو ناحیه متفاوت شامل یک ناحیه دوار و یک ناحیه ساکن تقسیم شده است. اندازه‌ی دامنه محاسباتی فوق توسط آزمون استقلال از شبکه تعیین شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که با تغییر اندازه شبکه از $60L$ در $40L$ به $120L$ در $80L$ ، ضریب پسا برای سیلندر با آهنگ چرخش 0.5 و نسبت قطر 0.625 ، حدود ۱٪ تغییر می‌کند.

شده است.

– دیواره سیلندر: شرط مرزی دیواره‌ی بدون لغزش با دمای ثابت T_s برای سیلندر مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳- آزمون استقلال از گام زمانی

ضریب پسا	گام زمانی بی‌بعد
۱/۴۵۸	$0.00625T_{rot}$
۱/۴۵۷	$0.0125T_{rot}$

۴- معادلات حاکم

در شبیه سازی حاضر، جریان سیال با سرعت U_∞ و دمای T_∞ از روی سطح سیلندر دوار با دمای سطح دیواره و ثابت T_s عبور می‌کند. بنابراین به منظور شبیه سازی جریان دو بعدی و ناپایای سیال لزج تراکم ناپذیر حول سیلندر چرخان باید معادلات حاکم بر میدان سیال حل شوند که شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم در راستای x و y و معادله انرژی می‌باشند که به ترتیب به قرار زیر است [۱۸ و ۲۶]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

که در آن u و v به ترتیب سرعت در راستای x و y بر حسب (m/s)، T (K)، دما، P (Pa) فشار سیال، C_p (J/(kg.K)) گرمایی ویژه سیال، μ (Pa.s) لزجت دینامیکی و k (W/(m.K)) رسانایی گرمایی می باشد. در معادلات (۷) و (۸) از اثرات گرانش صرف نظر شده است. همچنین در معادله (۹) که تحت عنوان معادله انرژی تعریف شده است مطابق مرجع [۱۸] با توجه به پایین بودن مرتبه سرعت از تلفات اصطکاکی صرف نظر شده است.

طبیعت معادلات اساسی فوق به گونه ای است که می‌توان با انتگرال گیری کلی روی حجم کنترل ها مجهولات مسئله را بدست آورد و به تحلیل جریان پرداخت. از آنجایی که در اغلب موارد این انتگرال گیری به صورت تحلیلی مشکل می‌باشد، لذا از روش عددی استفاده می‌گردد [۲۱]. در حل عددی توسعه یافته از روش حجم محدود برای گسسته سازی معادلات استفاده شده است، اما تحلیل هندسه بر پایه روش المان محدود بنا شده است. به گونه ای که در این حل، از روش المان محدود در برخورد با هندسه استفاده می‌شود، لذا می‌توان از انعطاف پذیری هندسی روش المان محدود استفاده کرد [۲۲]. روش حجم محدود با انتگرال گیری از معادلات بر روی یک حجم کنترل به کمک نظریه گوسی پیاده سازی می‌شود. در این روش فضای محاسباتی به المان‌های کوچک تقسیم شده و سطوح حجم

کنترل بر روی صفحه میانی هر یک از المان ها تعریف می‌شود [۱۵] و [۱۶].

در پژوهش حاضر از روش المان محدود برای حل معادلات اساسی استفاده شده است. گسسته سازی معادله پیوستگی با استفاده از روش گالرکین انجام گرفته است. از آنجا که معادله مومنتوم ذاتا غیر خطی است، گسسته سازی با روش گالرکین ساده منجر به ناپایداری در حل می‌گردد مخصوصا در کار حاضر که تغییرات دورانی جسم به کار رفته باعث تغییرات زیاد در میدان سرعت سیال می شود [۲۳ و ۲۴]. از این رو معادلات مومنتوم با روش حداقل مربعات گالرکین گسسته سازی شده است. معادلات انتقال گرما نیز با روش حداقل مربعات گالرکین شبیه سازی گردید [۲۵].

۵- بررسی استقلال از شبکه

برای بررسی استقلال از شبکه، شبکه بندی‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته اند. در جدول ۴ ضرایب پسا هر شبکه بندی بر حسب تعداد شبکه برای سیلندر با مشخصات $AR=0.0625$ و $\alpha=0.5$ آمده است.

جدول ۴- آزمون استقلال از مش برای سیلندر با مشخصات

$\alpha=0.5$ و $AR=0.0625$

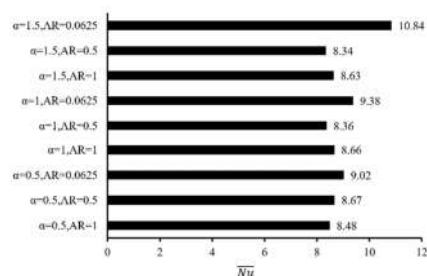
تعداد سلول‌ها	۱۹۸۱	۲۴۹۴	۲۶۶۲	۳۱۱۸
C_d	۲/۷۷۲	۲/۸۰۶	۲/۷۳۹	۲/۷۳۶

همانطور که مشاهده می‌شود بعد از شبکه دارای ۲۶۶۲ سلول، با افزایش تعداد شبکه تغییر محسوسی در ضریب پسا مشاهده نمی‌شود. لذا در این تحقیق از شبکه با تعداد مش ۲۶۶۲ که دارای شبکه‌بندی سازمان یافته مثلثی می‌باشد استفاده شده است. لازم به ذکر است آزمون استقلال از شبکه برای تمامی حالت‌ها انجام شده است ولی در اینجا به ذکر یک مورد اکتفا شده است.

۶- اعتبار سنجی

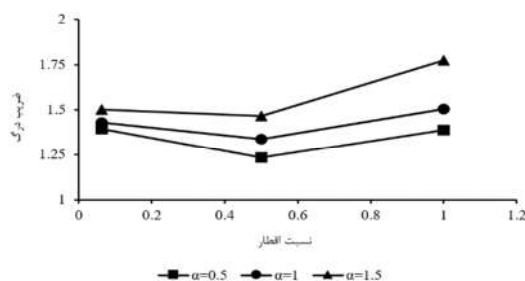
قبلا استقلال از گام زمانی جدول ۳، استقلال از دامنه جدول ۲ و استقلال از شبکه شکل ۴ برای سیلندر با مشخصات $AR=0.0625$ و $\alpha=0.5$ بررسی شد. برای اعتبارسنجی و صحت نتایج، ضرایب پسا مطالعه حاضر با ضرایب پسا در منبع [۱۳] مقایسه شده است. این مقایسه برای سیلندر با مشخصات $AR=0.0625$ و $\alpha=0.5$ انجام شده است. مطابق شکل ۵ مطابقت خوبی بین کار حاضر و مرجع [۱۳] مشاهده می‌شود. از آنجا که نتایج با نتایج مقالات معتبر همخوانی دارد بنابراین برای سایر حالات می‌توان از درستی نتایج اطمینان حاصل کرد.

[۱۴] مقدار ناسلت متوسط برای استوانه ساکن و بدون چرخش برابر ۶/۷۳ گزارش شده است، بنابراین بر اساس شکل ۷، دوران باعث افزایش ۲۵ درصدی ناسلت متوسط نسبت به حالت بدون دوران شده است.

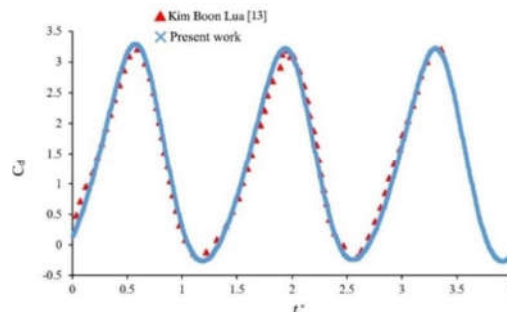


شکل ۷- ناسلت متوسط برحسب نسبت قطرها و آهنگ چرخش‌های متفاوت و $Re=200$

در شکل ۸ ضریب پسا برای سیلندرها نشان داده شده است. افزایش آهنگ چرخش برای هر سه نسبت قطر، منجر به افزایش ضریب پسا شده است. اما در آهنگ چرخش ثابت، ضریب پسا برای نسبت قطر ۱/۵ بیشتر از سایر حالات است. دلیل این موضوع بیشتر بودن سطح تماس سیال و سیلندر است. کمترین مقدار ضریب پسا در سیلندر با نسبت قطر ۰/۵ است که در این حالت سطح تماس با سیال کاهش یافته است، اما بدلیل جدایش کمتر جریان و تولید گردابه‌های کوچکتر نسبت به سیلندر با نسبت قطر ۰/۰۶۲۵، ضریب پسا کمتر است. برای بررسی بیشتر این موضوع، خطوط جریان و کانتور سرعت برای یک زمان بی‌بعد مشخص در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، گردابه‌های بزرگتری در اطراف سیلندر با نسبت قطرهای کمتر تشکیل شده و نیروی پسای بزرگتری را بوجود آورده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای ضریب پسا، به خوبی دیده می‌شود که تقابل دو عامل سطح و تولید گردابه روی ضریب پسا اهمیت می‌یابد. با توجه به شکل ۸ و در نظر گرفتن شکل ۹ می‌توان دریافت که حالت $AR=1$ یعنی دایره، سطح پیرامونی بزرگتری نسب به شکل $AR=0.5$ دارد. این امر باعث میشود تا نیروی اصطکاکی و به تبع آن ضریب پسا حالت $AR=0.5$ کمتر از حالت $AR=1$ باشد. در حالت $AR=0.0625$ سطح در معرض اصطکاک باز هم بیشتر کاهش یافته است اما با توجه به شکل ۹ به خوبی واضح است که گردابه‌های تشکیل شده بزرگ تر شده و در نتیجه سهم پسا فشاری به طرز قابل توجهی افزایش یافته است. از این رو نیروی پسا دوباره افزایش یافته است.



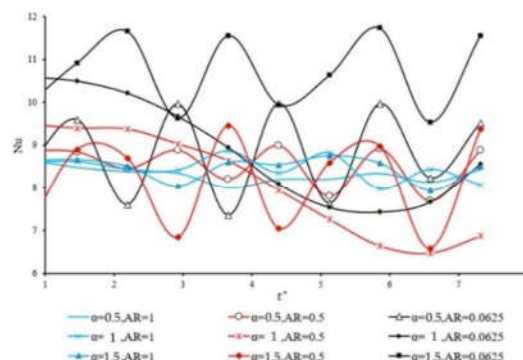
شکل ۸: تغییرات ضریب پسا بر حسب آهنگ‌های چرخش و نسبت قطره‌های مختلف در $Re=200$



شکل ۵- ضرایب پسا مرجع [۱۳] و ضرایب پسا کار حاضر برای سیلندر بیضوی چرخان با مشخصات $AR=0.0625$ و $\alpha=0.5$ در $Re=200$

۷- بحث و نتایج

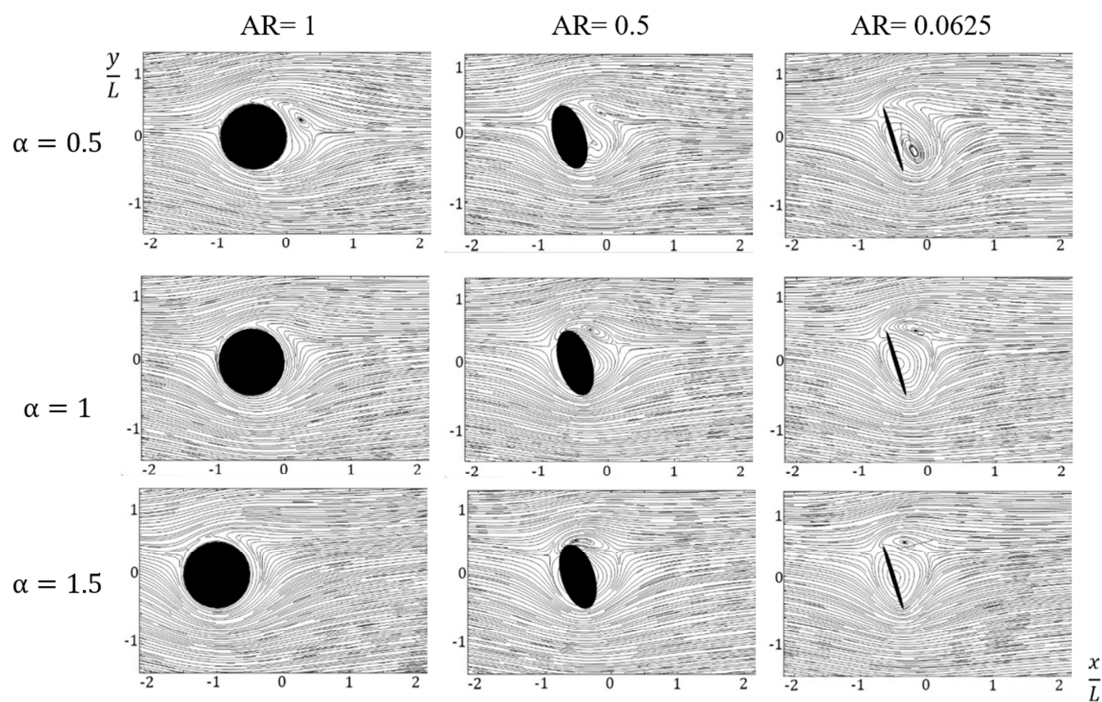
با شبیه سازی جریان و اعتبار سنجی نتایج مطابق شکل ۵، در این بخش به بررسی حالات مختلف معرفی شده در جدول ۱ پرداخته شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی انرژی برای حالت های مختلف به صورت عدد ناسلت در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶، به طور کلی تاثیر AR در نوسانات Nu بیشتر از α است و در آهنگ چرخش ثابت با افزایش AR نوسانات ناسلت بیشتر می‌شود. کمترین نوسان ناسلت در سیلندر با آهنگ چرخش $\alpha=0.5$ و بیشترین نوسان در سیلندر با آهنگ چرخش $\alpha=1.5$ رخ داده است. مطابق شکل ۶ میزان تغییر نوسانات ناسلت در نسبت قطرهای $AR=1$ بسیار کمتر از سایر موارد است. همچنین دوره تناوب ناسلت در $\alpha=1$ بزرگتر از سایر موارد است که دلیل آن برابری سرعت نوک قطر بزرگ با سرعت جریان آزاد است.



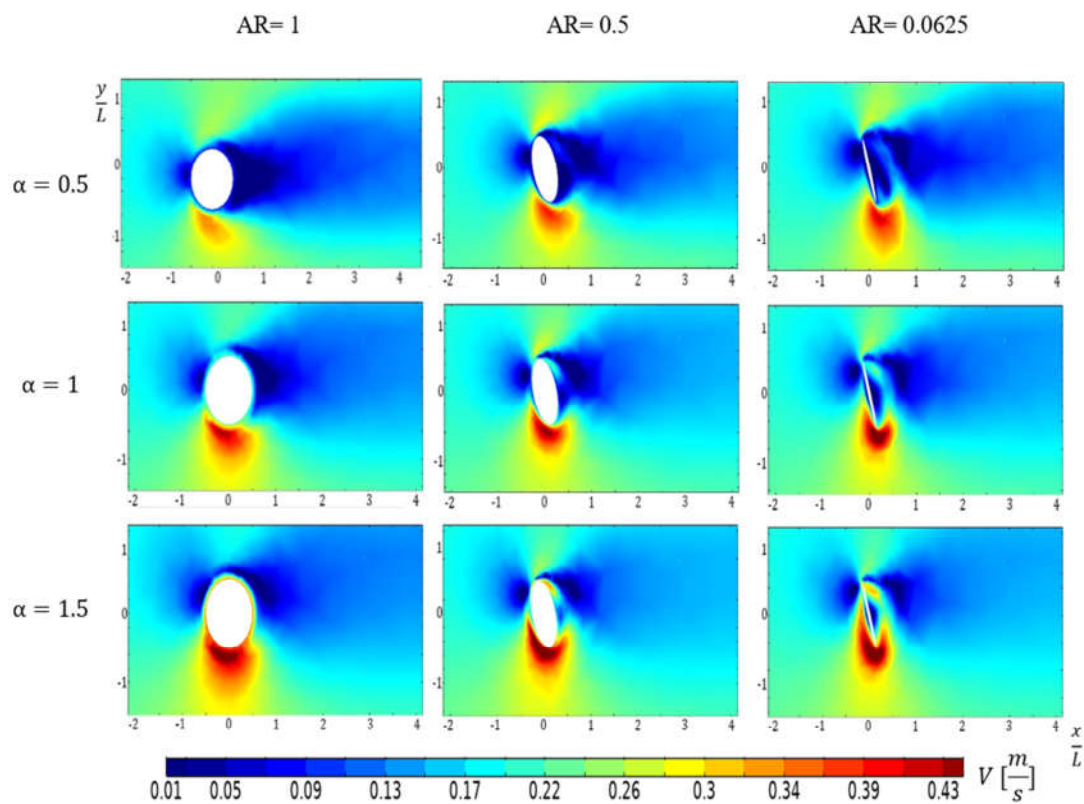
شکل ۶- تغییرات Nu برحسب زمان بی بعد برای $\alpha=0.5, 1, 1.5$ و $AR=0.0625, 0.5, 1$ در $Re=200$

در شکل ۷ مقدار ناسلت متوسط برای سرعت‌های دورانی و نسبت قطرهای مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، تاثیر آهنگ چرخش α بر ناسلت متوسط جریان بیشتر از تاثیر نسبت قطر (AR) است. کمترین تغییرات ناسلت متوسط بر حسب آهنگ چرخش برای $AR=1$ است. بیشترین بازه تغییرات ناسلت متوسط برای سیلندر با $AR=0.0625$ است. بیشترین ناسلت متوسط مربوط به سیلندر با $\alpha=0.0625$ و $\alpha=1.5$ و کمترین ناسلت متوسط برای $\alpha=0.5$ و $AR=1.5$ است.

برای مشخص شدن تاثیر دوران بر میزان انتقال گرما، ناسلت متوسط با مقدار ناسلت در حالت $\alpha=0$ مقایسه شده است. در مرجع

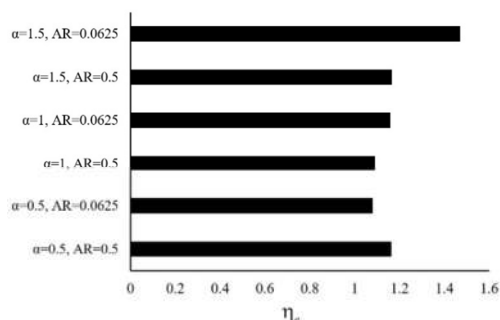


شکل ۹- خطوط جریان برای نسبت قطر ها و آهنگ های چرخش متفاوت در $Re = 200$ و در زمان $t^* = 15.838$



شکل ۱۰- کانتور سرعت برای نسبت قطر ها و آهنگ های چرخش متفاوت در $Re = 200$ و در زمان $t^* = 15.838$

بیشتر انتقال گرما در مقابل افزایش ضریب پسا است [۲۷]. در بین سیلندرهایی بیضوی مورد مطالعه، بیشترین افزایش انتقال گرما در برابر میزان افزایش ضریب پسا مربوط به آهنگ چرخش ۱ و نسبت قطر ۰/۰۶۲۵ است و بدترین شرایط نیز در حالت در نسبت چرخش ۵/۰ و نسبت قطر ۰/۰۶۲۵ رخ می دهد. از طرف دیگر بررسی شکل ۱۱ نشان می دهد که در تمامی هندسه های بررسی شده ضریب عملکرد بالاتر از ۱ می باشد. این بدین معنی است که ایده ی دوران سیلندر بیضوی تأثیری بیشتری بر افزایش انتقال گرما نسبت به افزایش ضریب پسا دارد.



شکل ۱۱- تغییرات معیار عملکرد برای حالت های مختلف

در شکل ۱۲ کانتورهای دما برای تمامی حالات در یک زمان بی بعد مشخص آورده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، انتقال گرما در استوانه بیشتر از دو حالت دیگر است که دلیل آن بیشتر بودن سطح تماس سیلندر با سیال است. گرمای منتشر شده از سیلندر به سیال در پشت سیلندر حرکت نموده است، اما راستای جریان افقی نبوده و در نتیجه کانتور دما به سمت بالا متمایل شده است. دلیل این پدیده سرعت دورانی سیلندر و هدایت سیال به سمت بالا در وضعیت نشان داده شده است. با دوران سیلندر، سیال تمایل به حرکت در امتداد سیلندر و پیروی از خط سیر سیلندر را دارد. در مورد سیلندر بیضوی باریکتر، اثرات دمای سیلندر در دنباله ی جریان سریعتر محو شده است که این محو شدگی با افزایش آهنگ چرخش شدت بیشتر می یابد.

با توجه به اینکه شبیه سازی در شرایط ناپایا بوده است، در شکل ۱۳ کانتورهای سرعت، دما و خطوط جریان برای سیلندر بیضوی باریک با آهنگ چرخش ۵/۰ در چهار لحظه متفاوت نشان داده شده است. مشخص است که برای حالت دورانی همواره گردابه هایی در اطراف سیلندر مشاهده می شود، حتی زمانی که سیلندر کاملاً افقی واقع شده است (۷۵/۱۷ = t^*). همانطور که از شکل پیداست، گردابه ها به طور متناوب در اطراف سیلندر تشکیل شده و از بین می روند که باعث ماهیت نوسانی انتقال گرما و نیروی پسا در چنین هندسه هایی می باشد.

مطابق شکل ۱۰ مشاهده می گردد در تمامی حالات سرعت جریان در قسمت پایین بیشتر از قسمت بالایی سیلندر می باشد که دلیل آن چرخش پادساعتگرد سیلندر است. همچنین سرعت جریان در قسمت پایین و بالا برای سیلندر استوانه ای کمترین مقدار را نسبت به سیلندرهایی بیضوی دارد. در تمامی نسبت قطر ها با افزایش آهنگ چرخش محل گردابه ها به سمت نوک قطر بزرگتر هدایت شده است و همچنین گردابه ها سریعتر محو شده اند، چراکه زمان حضور گردابه ها در مرکز با افزایش آهنگ چرخش کاهش یافته و بدنه سیلندر در حال چرخش گردابه ها را سریعتر از مرکز شکل دور می کند. جدایش جریان در لبه حمله سیلندرهایی بیضوی (لبه بالایی در شکل ۹) نسبت به استوانه شدیدتر بوده و نواحی سرعت کم و زیاد بزرگتری نسبت به استوانه در دامنه حل مشاهده می شود. همچنین در مرکز سیلندر بیضوی باریکتر، با توجه به رابطه ی سرعت دورانی و سرعت خطی، ناحیه ساکنی دیده می شود که در سایر سیلندرها وجود ندارد.

یکی از مزایای شکل های خط جریانی مانند هوا برها کاهش نیروی پسا است، بنابراین یکی از پارامترهای مهم در کاربرد چنین هندسه هایی کاهش نیروی پسا است. در این تحقیق علاوه بر افزایش انتقال گرما به مقدار نیروی پسا نیز توجه شده و به منظور بیان بهتر مفهوم اثر همزمان تغییرات آهنگ انتقال گرما و نیروی پسا مطابق مرجع [۲۷] معیاری بی بعد تحت عنوان معیار عملکرد (η_e) معرفی شده است که به صورت معادله (۱۰) تعریف می گردد:

$$\eta_e = \frac{j/j_s}{f/f_s} \quad (10)$$

که در آن j ضریب کولبرن، f ضریب پسا و j_s و f_s ضریب کولبرن و ضریب پسا برای حالت پایه می باشد. در این تحقیق دایره دوار به عنوان هندسه پایه در نظر گرفته شده است و عملکرد شکل های دیگر با آن مقایسه شده است. در رابطه ۱۰ ضریب کولبرن به صورت معادله (۱۱) تعریف می شود [۲۷]:

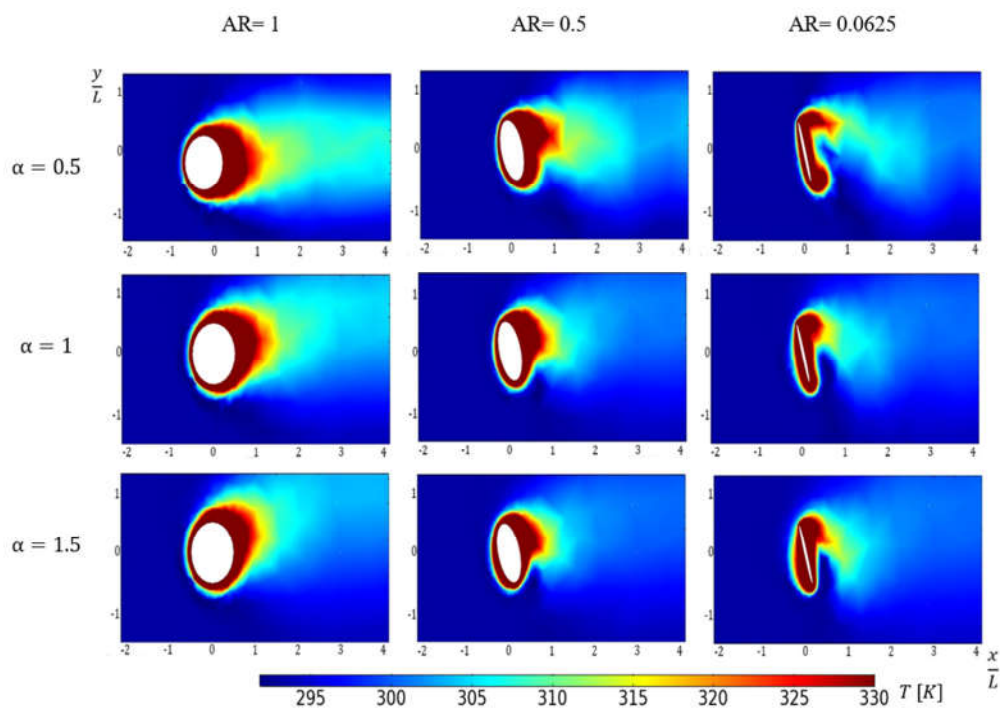
$$j = St \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

که در آن St عدد بی بعد استانتون و Pr عدد بی بعد پرانتل می باشد که به ترتیب به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) معرفی می شوند:

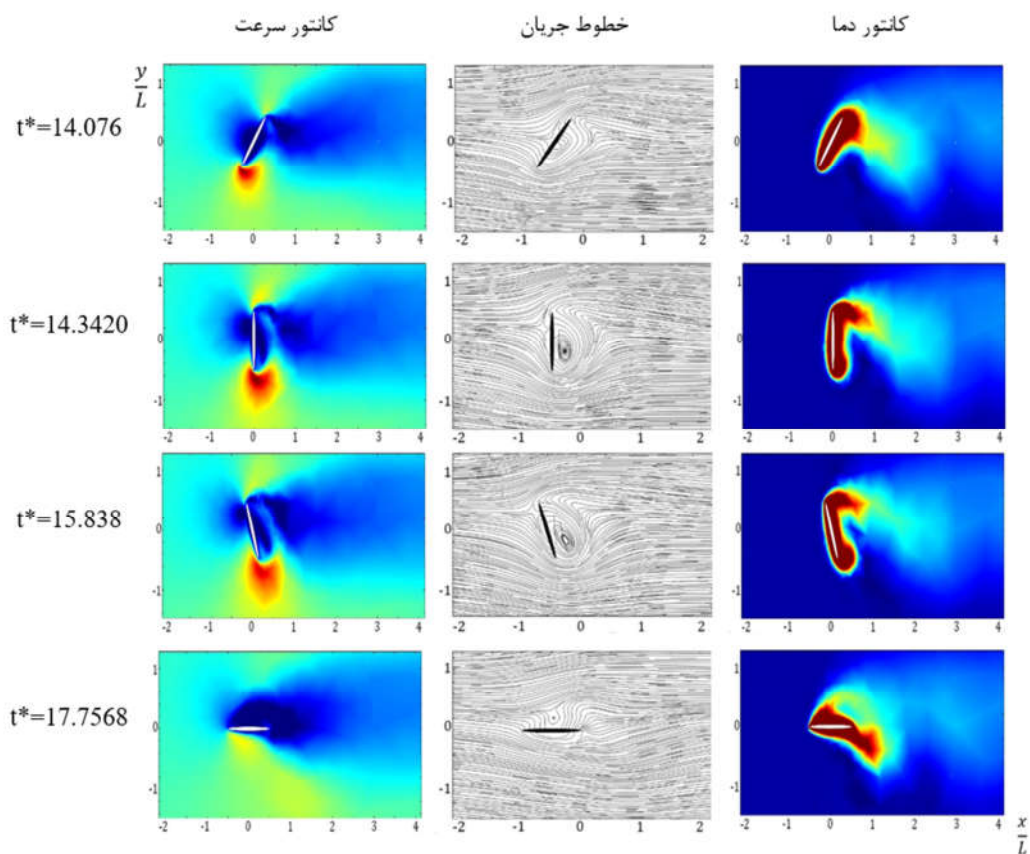
$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \quad (12)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (13)$$

جهت بررسی تأثیر همزمان تغییرات ضریب پسا و آهنگ انتقال گرما در پژوهش حاضر، معیار عملکرد مطابق رابطه (۱۰) به ازای سه مقدار آهنگ چرخش ۵/۰، ۱۰/۵ و ۵/۰ و نسبت قطرهای ۱/۵ و ۰/۰۶۲۵ نسبت به سطح مقطع دایره ای ($AR=1$) محاسبه شده است. بالا بودن مقدار بازده، نشانگر این است که میزان بهبود انتقال گرما بیشتر از میزان افزایش نیروی پسا است. در شکل ۱۱ مقادیر $\eta_e \geq 1$ نشانگر افزایش



شکل ۱۲- کانتور دما برای نسبت قطر ها و آهنگ های چرخش متفاوت در $Re = 200$ و در زمان $t^* = 15.838$



شکل ۱۳- کانتور سرعت، دما و خطوط جریان برای حالت $AR = 0.0625$ و $\alpha = 0.5$ در $Re = 200$

۸- نتیجه گیری

جریان ناپایا حول سیلندرهایی بیضی و استوانه‌ای دوار در این تحقیق بررسی شده است. بررسی به صورت عددی و روش المان محدود انجام شده است که برای اینکار از نرم افزار Comsol استفاده گردیده است. چندین نسبت چرخش و نسبت قطرهای متفاوت مد نظر قرار گرفته است. معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی حل شده و نتایج حاصل به قرار زیر است:

- بهترین حالت برای انتقال گرمای بیشتر و نیروی پسای کمتر، استوانه‌ای دوار با نسبت چرخش ۰/۵ می‌باشد.
- بدترین حالت برای انتقال گرمای بیشتر و نیروی پسای کمتر، سیلندر بیضی با نسبت ۰/۰۶۲۵ با نسبت چرخش ۰/۵ است.
- آهنگ چرخش برای هر سه نسبت قطر، منجر به افزایش ضریب پسای می‌گردد.
- به طور کلی تاثیر b/a در نوسانات Nu بیشتر از α است و در آهنگ چرخش ثابت با افزایش b/a نوسانات ناسلت بیشتر می‌شود.
- میزان تغییر نوسانات ناسلت در نسبت قطرهای b/a=1 بسیار کمتر از سایر موارد است.

۹- نمادها

T_{∞}	دمای جریان آزاد، K
T^*	دمای بی بعد
T_s	دمای سطح سیلندر، K
T_{rot}	دوره تناوب سیلندر، s
X^*	راستای افقی بی بعد مختصات
Y^*	راستای عمودی بی بعد مختصات
x	راستای افقی مختصات
y	راستای عمودی مختصات
t^*	زمان بی بعد
U_{∞}	سرعت جریان آزاد، m/s
a	شعاع کوچک بیضی m
b	شعاع بزرگ بیضی m
h	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی، W/m ² -K
k_f	رسانایی گرمایی سیال، W/m-K
C_d	ضریب پسای
C_l	ضریب برآ
L	طول مشخصه، m
C_p	گرمای ویژه سیال J/kg-K
Re	عدد بی بعد رینولدز
Nu	عدد بی بعد ناسلت
Pr	عدد بی بعد پرانتل
St	عدد بی بعد استانتون

η_e معیار عملکرد

P^* فشار بی بعد

P فشار، Pa

U^* مولفه ی افقی بی بعد سرعت

V^* مولفه ی عمودی بی بعد سرعت

u مولفه ی افقی سرعت، m/s

v مولفه ی عمودی سرعت، m/s

F_d نیروی پسای، N

F_l نیروی برآ، N

$\dot{Q}$ آهنگ انتقال گرما w

Nu ناسلت متوسط

علائم یونانی

ρ چگالی، kg/m³

ω سرعت زاویه ای چرخش سیلندر rad/s

α آهنگ چرخش سیلندر

μ لزجت دینامیکی Pa.s

ν لزجت سینماتیکی m²/s

زیر نویس

f سیال

۱۰- مراجع

- [1] Agyenim, F., Eames, P. and Smyth, M., A comparison of heat transfer enhancement in a medium temperature thermal energy storage heat exchanger using fins. *Solar Energy*, 83(9), pp.1509-1520, 2009.
- [2] Odabace, M., Hooman, K. and Gurgenci, H., Metal foam heat exchangers for heat transfer augmentation from a cylinder in cross-flow. *Transport in Porous Media*, 86(3), pp.911-923, 2011.
- [3] Garoosi, F., Hoseininejad, F. and Rashidi, M.M., Numerical study of heat transfer performance of nanofluids in a heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 105, pp.436-455, 2016.
- [4] Ayub, Z.H., Yang, D., Khan, T.S., Al-Hajri, E. and Ayub, A.H., Performance characteristics of a novel shell and tube heat exchanger with shell side interstitial twisted tapes for viscous fluids application. *Applied Thermal Engineering*, 134, pp.248-255, 2018.
- [5] Prandtl, L., Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung. *Verhandl. III, Internat. Math.-Kong., Heidelberg, Teubner, Leipzig, 1904*, pp.484-491, 1904.
- [6] Lugt, H.J. and Ohring, S., Rotating elliptic cylinders in a viscous fluid at rest or in a parallel stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 79(1), pp.127-156, 1977.
- [7] خزیمه نژاد حجت، میربرزگی سید علی. تحلیل عددی انتقال حرارت از یک استوانه داغ با قطرهای مختلف به یک محفظه بسته مربعی سرد. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*. د. ۱۳، ش. ۹، ص ۹۲-۱۰۲. ۱۳۹۲.
- [8] Cavalheiro, Mauricio Grisi, Emanuel Rocha Woiski, and Edson Del Rio Vieira. "Experimental Study of Flow Past an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate." *Conference At Belem do Para, Berzil*. 2014.

- a ZrB₂ microchannel heat sink: a numerical approach. *Ceramics International*, 46(2), pp.1730-1735, 2020.
- [26] Sakkaki, M., Moghanlou, F.S., Vajdi, M., Asl, M.S., Mohammadi, M. and Shokouhimehr, M., Numerical simulation of heat transfer during spark plasma sintering of zirconium diboride. *Ceramics International*, 2019.
- [27] Ralph L. Webb., Nae-Hyun Kim., Principles of enhanced heat transfer, 2 edition, Taylor & Francis, 2005.
- [9] Amin, S. and Das, D.K., Numerical Investigation of the Wake Affected Unsteadiness on Flat Plate Boundary Layer. *Journal of Mechanical Engineering*, 43(1), pp.15-22, 2013.
- [10] Ruifeng, H., Three-dimensional flow past rotating wing at low Reynolds number: a computational study. *Fluid Dynamics Research*, 47(4), p.045503, 2015.
- [11] Naik, S.N., Vengadesan, S. and Prakash, K.A., Numerical study of fluid flow past a rotating elliptic cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 68, pp.15-31, 2017.
- [12] Walker, J.A., Rotational lift: something different or more of the same?. *Journal of Experimental Biology*, 205(24), pp.3783-3792, 2002.
- [13] Lua, K.B., Lu, H. and Lim, T.T., Rotating elliptic cylinders in a uniform cross flow. *Journal of Fluids and Structures*, 78, pp.36-51, 2018.
- [14] Bouakkaz, R., Talbi, K., Ouazzazi, M., Khelili, Y. and Salhi, F., EFFECT OF ROTATION RATES ON THE LAMINAR FLOW AND HEAT TRANSFER PAST A CIRCULAR CYLINDER. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(2), pp.519-529, 2015.
- [15] Ehghaghi MB, Vajdi M., Numerical and Experimental Study of splitter blades effect on the centrifugal pump performance. *Modares Mechanical Engineering*. 15(3), 2015.
- [16] Ehghaghi M.B. , Vajdi M., Namazizadeh M, Hajipour M., Experimental and numerical study of double splitter blades effect on the centrifugal pump performance. *Modares Mechanical Engineering* 17 (3), pp.196-204, 2017.
- [۱۷] فلاح کیوان، شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت سیال غیرنیوتنی گذرنده از روی سیلندر دایروی چرخان با روش شبکه بولتزمن. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۲، ص ۲۰۹-۲۱۸، ۱۳۹۷.
- [۱۸] سجودی عطا، طلعتی کلاسر فرامرز، نیشابوری ریحانه، تحلیل عددی جریان آرام سیال غیر نیوتنی اطراف استوانه دوار. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۱، ش. ۲، ص ۵۸-۵۳، ۱۳۹۰.
- [۱۹] زاغیان رضا، نصر اصفهانی وحید، ثقیان محسن، بررسی عددی ناپایایی عبور جریان لایه ای از روی یک استوانه‌ی مثلثی چرخان در جریان آزاد. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۹، ش. ۳، ص ۱۷۱-۱۶۳، ۱۳۹۸.
- [۲۰] احقاقی میر بیوک، کوزه گر غیاثی کیهان، وجدی محمد، تاثیر تغییر هندسه پروانه پمپ گریز از مرکز در پدیده کاویتاسیون. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۳، ص ۱۸-۹، ۱۳۹۷.
- [۲۱] احقاقی میر بیوک، کوزه گر غیاثی کیهان، وجدی محمد، بررسی تاثیر تعداد پره ها بر روی عملکرد پمپ گریز از مرکز. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۴، ص ۴۶-۳۹، ۱۳۹۷.
- [۲۲] احقاقی میر بیوک، شروانی تبار محمدتقی، وجدی محمد، نمایی از پدیده زاده، بررسی عددی بهبود عملکرد پمپ گریز از مرکز روغن با پره‌های جدا کننده. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۴، ص ۱۸-۹، ۱۳۹۵.
- [23] Moghanlou, F.S., Vajdi, M., Sha, J., Motallebzadeh, A., Shokouhimehr, M. and Asl, M.S., A numerical approach to the heat transfer in monolithic and SiC reinforced HfB₂, ZrB₂ and TiB₂ ceramic cutting tools. *Ceramics International*, 45(13), pp.15892-15897, 2019.
- [24] Moghanlou, F.S., Vajdi, M., Motallebzadeh, A., Sha, J., Shokouhimehr, M. and Asl, M.S., Numerical analyses of heat transfer and thermal stress in a ZrB₂ gas turbine stator blade. *Ceramics International*, 45(14), pp.17742-17750, 2019.
- [25] Vajdi, M., Moghanlou, F.S., Niari, E.R., Asl, M.S. and Shokouhimehr, M., Heat transfer and pressure drop in