



## بررسی عددی نرخ انتقال حرارت اطراف سیلندر بیضوی همدمای تحت جریان پالسی

فاطمه قنبری<sup>۱</sup> و امیر امیدوار<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

<sup>۲</sup> استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۴/۰۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۳۱

### چکیده

در این پژوهش، اثرات فرکانس و دامنه بی‌بعد جریان پالسی بر نرخ انتقال حرارت اطراف سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $e=0.2$  و  $0.6$  و تحت زوایای مختلف  $90^\circ$ ،  $60^\circ$ ،  $30^\circ$  و  $0^\circ$   $\theta$  و همچنین برای نسبت بیضویت  $e=1$  (سیلندر دایروی) بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا جریان اطراف سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  تحت جریان پالسی و غیرپالسی حل شده، در ادامه با نتایج حاصل از سیلندر بیضوی تحت زوایای حمله و نسبت بیضویت مختلف مقایسه شده است؛ بنابراین، جریان پالسی عبوری روی سیلندر بیضوی، در محدوده عدد استروهال پالسی  $St=(0.1-2)$  و دامنه بی‌بعد جریان پالسی  $A=0.75$  در عدد رینولدز  $Re=100$ ، مورد بررسی قرار گرفته است. در تمام حالات، سیلندر بیضوی دمایی ثابتی بیشتر از دمایی سیال اطراف را دارد. جریان پالسی از عواملی است که می‌تواند روی نرخ انتقال مؤثر واقع شود، برطبق نتایج بیان شده در این پژوهش، جریان پالسی روی سیلندر بیضوی، در مواردی می‌تواند سبب افزایش نرخ انتقال حرارت شود؛ اما در صورت کلی، تغییر در مقدار عدد ناسلت در جریان پالسی، وابسته به فرکانس و دامنه بی‌بعد جریان پالسی است.

**کلمات کلیدی:** جریان پالسی؛ سیلندر بیضوی؛ نسبت بیضویت؛ نرخ انتقال حرارت؛ عدد استروهال.

## Numerical Investigation of Heat Transfer Rate Around Isothermal Elliptical Cylinder under Pulsating Flow

F. Ghanbari<sup>1</sup>, A. Omidvar<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> M.S. Student, Mech. Eng., Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

<sup>2</sup> Assis. Prof., Mech. Eng., Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran.

### Abstract

In this study, the effects of frequency and dimensionless amplitude of the pulsating flow on the rate of heat transfer around elliptical cylinders with elliptical ratio of  $e=0.2$  and  $0.6$  under different angles  $\theta=0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$  and also for elliptical ratio of  $e=1$  (circular cylinder) has been investigated. For this purpose, the flow around a cylinder with elliptical ratio of  $e=1$  under pulsating and unpulsating flow been solved and then the results of elliptical cylinder under different angles of attack and elliptical ratio compared. So, pulsating flow over the cylinder, in the range of pulsating Strouhal number  $St=(0.1-2)$  and dimensionless amplitude of pulsating flow  $A=0.75$  in Reynolds number of  $Re=100$  has been studied. In all cases, elliptical cylinder have fixed temperature more than the temperature of the surrounding fluid. The pulsating flow is a factor that can be effective on the rate of heat transfer, according to results presented in this study, pulsating flow over elliptical cylinder, in some cases can increase the heat transfer rate. But in general, changes in the rate of heat transfer depend on the frequency and dimensionless amplitude of pulsating flow.

**Keywords:** Pulsating Flow; Elliptical Cylinder; Elliptical Ratio; Rate of Heat Transfer; Strouhal Number.

## ۱- مقدمه

افزایش انتقال حرارت، یک موفقیت مهندسی قابل توجه است و به عنوان پتانسیلی جهت کاهش مصرف انرژی در نظر گرفته می‌شود که به ویژه در صنعت مورد نیاز است. افزایش انتقال حرارت، سبب افزایش بازده سیستم‌های حرارتی می‌شود؛ بنابراین مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی کاهش می‌یابد. جریان پالسی، جریانی با دامنه و فرکانس مشخص است که از توابع مختلف سینوسی یا تابع پله و غیره استفاده می‌شود، سرعت در جریان پالسی شامل، یک ترم ثابت به اضافه یک ترم نوسانی است. بررسی رفتار جریان و مطالعه روی اعداد بدون بعد اطراف اجسام غوطه‌ور، از مهم‌ترین مسائل مورد بررسی در مهندسی است، بنابراین در این مطالعه، به بررسی اثرات دامنه و فرکانس جریان پالسی بر نرخ انتقال حرارت از سیلندر بیضوی پرداخته شده است و مطالعه روی نرخ انتقال حرارت از سیلندر بیضوی تحت جریان پالسی، تاکنون انجام نشده است.

طبق مطالعات انجام گرفته روی جریان پالسی دیده شده که در بعضی موارد جریان پالسی، به عنوان یک عامل افزایشنده نرخ انتقال حرارت معرفی شده است، اما در برخی به عنوان عامل کاهشنده انتقال حرارت و یا عاملی بی‌تأثیر نام برده می‌شود. در اکثر موارد جریان پالسی، به عنوان یک عامل افزایشنده نرخ انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود، چون جریان پالسی با ایجاد آشفتگی در خود جریان به عنوان یک روش مؤثر جهت بهبود در نرخ انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شود.

جریان پالسی در بسیاری از زمینه‌های مهندسی کاربرد دارد، بنابراین می‌توان به مواردی از جمله، جریان درون بدن انسان، مبدل‌های حرارتی فشرده، سیستم خنک‌سازی راکتور هسته‌ای، تولیدات صنعتی از جمله، محفظه احتراق ضربانی، سیستم‌های خنک‌ساز برقی، صنایع ذوب فلزات، صنایع شیمیایی، تکنولوژی ساخت مواد غذایی، موتورهای سوخت داخلی، کمپرسورهای رفت و برگشتی اشاره کرد.

## ۲- اشاره به مراجع

تحقیقات مختلفی روی اجسام تحت جریان پالسی و غیرپالسی انجام شده که برخی از آنها در این بخش بیان شده است. در ابتدا جریان اطراف سیلندر بیضوی تحت جریان

غیرپالسی در مراجع [۱-۷] بیان شده است. چانگ و یه<sup>۱</sup> [۱]، تحلیل تئوری چگالش انتقال حرارت در لوله بیضوی در بخار اشباع شده ثابت در جریان آرام دو بعدی را مورد بررسی قرار دادند. عملکرد انتقال حرارت، می‌تواند با افزایش مکش در دیواره افزایش یابد. نیروهای تنش سطحی، تأثیر مهمی روی عدد ناسلت محلی دارد، اما بر عدد ناسلت متوسط تأثیر کمی می‌گذارد.

سهیم و سانتوسو<sup>۲</sup> [۲]، انتقال حرارت جابه‌جایی از سیلندر بیضوی را به صورت عددی با استفاده از روش اختلاف محدود مطالعه کردند. نتیجه محاسبات، تغییر مهمی در ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد؛ اما در مقابل سیلندرهای بیضوی با نسبت بیضویت کمتر از ۱، انتقال حرارت بالاتری نسبت به سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت ۱ (دایروی) دارند. عباسی و اسداللهی طاهری<sup>۳</sup> [۳]، انتقال حرارت جابه‌جایی ناپایای اجباری روی یک سیلندر افقی و مایل با مقطع بیضوی را مورد بررسی قرار دادند. کاهش عدد پرانتل، منجر به عقب افتادن نوسانات عدد ناسلت خواهد شد، این پدیده در اعداد رینولدز بالاتر مشاهده خواهد شد. هنگامی که گردابه‌ها شروع به چرخش می‌کند، در پشت ناحیه گردابه، نوسانات بزرگی در زاویه برخورد ۹۰° مشاهده شده است. ابدرابوو<sup>۴</sup> همکاران [۴]، مشخصه‌های انتقال حرارت اطراف سیلندر افقی گرم‌شده با برش عرضی مختلف (مربعی، مستطیلی، لوزی و بیضوی) را آزمایشگاهی بررسی کردند. بالاترین عدد ناسلت برای سیلندر بیضوی مشاهده شده است، بنابراین متوسط عدد ناسلت برای سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت ۱ (دایروی)، پایین‌ترین مقدار را در مقایسه با دیگر سیلندرها دارا است.

عباسی و اسداللهی طاهری [۵]، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از سطح استوانه افقی با سطح مقطع بیضوی در زاویه حمله ۰°-۹۰° را با در نظر گرفتن شرط مرزی شار ثابت و دما ثابت برای هوا با عدد پرانتل ۰/۷ در محدوده عدد رینولدز ۵-۱۰۰ Re با نسبت بیضوی ۰/۲ و ۰/۶ بررسی کردند.

<sup>1</sup> Chang, Yeh

<sup>2</sup> Sahim, Santoso

<sup>3</sup> Abbassi, A. Taheri

<sup>4</sup> Abd-Rabbo

نشان می‌دهد، در محدوده عدد رینولدز ۱۷۱۴۴-۴۰۸۷ = Re، طراحی دسته‌لوله بیضوی، انتقال حرارت را ۳۵/۹۸٪ افزایش می‌دهد.

رانوت<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱]، به بهینه‌سازی شکل دسته لوله بیضوی با در نظر گرفتن الگوریتم ژنتیک پرداختند. بهینه‌سازی با سه هدف انجام شد، بیشینه نرخ انتقال حرارت خارجی لوله‌ها، کمینه افت فشار برای جریان داخلی و خارجی است. شبیه‌سازی عددی از جریان در لوله با دامنه متناوب و شبیه‌سازی سیال در ناحیه پوسته در دو دامنه متناوب و غیرمتناوب انجام شده است. خان<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲]، آزمایشی از جریان خنک‌کننده هوای عبوری از آرایش هم‌راستا لوله‌های بیضوی انجام دادند. با تغییر عدد رینولدز، نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت تغییر می‌کند.

ابراهیم و گوما<sup>۸</sup> [۱۳]، معیار عملکرد حرارتی از دسته‌لوله بیضوی را مورد بررسی قرار دادند. بهترین عملکرد حرارتی از مبدل حرارتی با لوله‌های بیضوی با کمترین مقدار در عدد رینولدز، نسبت محور و زاویه برخورد صفر به دست می‌آید. مبدل حرارتی با به کار بردن آرایشی از لوله‌های بیضوی، توزیع مهمی از مصرف انرژی را دارا است.

در مورد جریان پالسی اطراف سیلندر بیضوی با زوایای حمله و نسبت بیضویت کمتر از یک ( $e < 1$ ) تحت جریان پالسی، مطالعه‌ای صورت گرفته است؛ اما جریان پالسی روی سیلندر با نسبت بیضویت  $e = 1$  (سیلندر دایروی) و دسته لوله‌های آن، مطالعات مختلفی صورت گرفته است. مراجع [۲۱-۱۴] مطالعات مربوط به جریان پالسی اطراف سیلندر با نسبت بیضویت  $e = 1$  است:

ال‌سومیلی و تامپسون<sup>۹</sup> [۱۴]، انتقال حرارت را از روی یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e = 1$  در جریان پالسی در حضور و عدم‌حضور محیط متخلخل بررسی کردند. به طور کلی فاکتور افزایش انتقال حرارت در درجه اول به محدوده دامنه و بعد به عدد استروهال بستگی دارد. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از محیط متخلخل، بالاترین افزایش انتقال حرارت را در جریان ضربانی می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که استوانه با شرط مرزی شار ثابت، اعداد ناسلت بزرگتری نسبت به شرط مرزی دما ثابت دارند. عبدالعزیز و همکاران [۶]، مطالعه آزمایشگاهی و تئوری از مشخصه‌های انتقال حرارت و رفتار سیال از هر تک سیلندر بیضوی و جریان پایین دست دو تا سیلندر بیضوی با آرایش هم‌راستا را انجام دادند. عدد ناسلت متوسط پایین سیلندر در محدوده ۷۲٪-۱۵٪ برای تک سیلندر بیضوی برپایه فاصله سیلندرها بیشتر است.

لاچت و هاسلینگ<sup>۲</sup> [۷]، جریان آرام عبوری از سیلندرهایی بیضوی در زوایای مختلف را بررسی کردند. شبیه‌سازی عددی از ریزش گردابه با اعتبارسنجی از آزمایش تونل آب برای جریان دوبعدی عبوری از جسم‌ها در عدد رینولدز ۳۰۰ پرداخته شده است. برای یک سیلندر بیضوی باریک با زاویه حمله ۴۵°، کمترین ریزش گردابه در  $Re = 30$  ایجاد می‌شود.

در مورد جریان اطراف دسته لوله‌های بیضوی تحت جریان غیرپالسی نیز، مطالعاتی انجام شده است که در مراجع [۸-۱۳] آورده شده است. از جمله لطفی<sup>۳</sup> و همکاران [۸]، مطالعه سه بعدی روی جریان و انتقال حرارت در مبدل حرارتی با لوله‌های بیضوی با وجود پره‌های موجی شکل با استفاده از چهار نمونه مولدگردابه انجام دادند. نتایج عددی نشان می‌دهد که مولدگردابه در آرایش مناسب با لوله‌های بیضوی، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شده است.

تیلور و اوکلن<sup>۴</sup> [۹] با شبیه‌سازی عددی فرمول انتقال حرارت برای جریان گاز در مبدل حرارتی لوله‌پره با لوله‌های بیضوی را به دست آوردند. در این مطالعه، بیش از ۱۳/۷٪ عدد ناسلت کمتر از مقادیر آزمایشگاهی برای جریان هوا به دست آمده است. حمید<sup>۵</sup> و همکاران [۱۰]، شبیه‌سازی دو بعدی روی جریان سیال و ویژگی‌های انتقال حرارت در دسته‌لوله‌های بیضوی انجام دادند. نتایج عددی با در نظر گرفتن زاویه و تعداد لوله برای معرفی ارتباط بین بردار سرعت و محدوده گردایان دما بررسی شده است. بهینه‌سازی

<sup>1</sup> Abdel Aziz

<sup>2</sup> Lugt, Haussling

<sup>3</sup> Lotfi

<sup>4</sup> Taler, Oclen

<sup>5</sup> Hamid

<sup>6</sup> Ranut

<sup>7</sup> Khan

<sup>8</sup> Ibrahim, Gomaa

<sup>9</sup> Al-Sumaily, Thompson

که انتقال حرارت جابه‌جایی از سیلندر و لوله فین‌دار، خیلی حساس به فرکانس جریان پالسی است. اگر از لوله پره‌دار استفاده شود، افزایش بسزایی در نرخ انتقال حرارت در فرکانس‌های بالا مشاهده می‌شود و در فرکانس‌های پایین، انتقال حرارت خیلی محسوس نمی‌باشد. در حالت کلی می‌توان گفت که انتقال حرارت در فرکانس بالا افزایش یافته و در فرکانس‌های کمتر کاهش می‌یابد.

هوچای<sup>۶</sup> و همکاران [۲۲]، آزمایشی روی نرخ انتقال حرارت از یک سیلندر مربعی گرم شده در یک کانال با وجود جریان پالسی را انجام دادند. زمانی که جریان اطراف جسم با دو فرکانس نوسان داشته باشد، امکان ایجاد تشدید در ریزش گردابه و فرکانس‌های ارتعاشی خواهد شد که به این پدیده اطراف جسم، پدیده قفل‌شدگی<sup>۷</sup> گفته می‌شود. قفل‌شدگی برای سیلندر مربعی در حضور جریان پالسی مشاهده می‌شود. وقتی که فرکانس پالسی در محدوده قفل‌شدگی باشد، انتقال حرارت از سیلندر مربعی افزایش می‌یابد. آوایی<sup>۸</sup> و همکاران [۲۳]، انتقال حرارت جابه‌جایی آرام از یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  در معرض جریان نوسانی در فرکانس پایین با متوسط سرعت صفر را بررسی کردند. هنگامی که سرعت متوسط عبوری کوچک باشد یا هنگامی که از مقدار کم افزایش می‌یابد، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. استگل<sup>۹</sup> [۲۴] جریان اطراف تک سیلندرهایی را در جریان پالسی بررسی کرد. شش سیلندر برای شبیه‌سازی جریان پالسی انتخاب شده است، یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  و سیلندرهایی مستطیلی با نسبت طول به عرض ۳، ۲، ۱،  $B/A=0.62$  است و یک سیلندر در  $B/A=1$  در جریان با زاویه  $45^\circ$  مورد بررسی قرار گرفته است. در سیلندرهایی با نسبت بیضویت  $e=1$ ، لوزی و  $B/A=2$ ، نوع شبه متقارن را نشان می‌دهد که دنباله نزدیک ظاهری متقارن دارد و گردابه دور تنش ورتکس نامتقارنی را نشان می‌دهد. برای سیلندرهایی با ۱ و  $B/A=0.62$  نیروی برآ نسبت به جریان یکنواخت کاهش می‌یابد که رفتار شبه متقارن در دامنه نیروها ایجاد می‌شود.

ال‌سومیلی و همکاران [۱۵]، به بررسی جابه‌جایی اجباری روی سیلندر دمای ثابت با نسبت بیضویت  $e=1$  در کانال متخلخل افقی پرداختند. برای جریان پالسی درجه غیرتعادل با افزایش دامنه ضربان و کاهش فرکانس ضربان کاهش می‌یابد.

سلیمفندیجال<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶]، انتقال حرارت ناپایا از یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  در جریان پالسی را بررسی کردند. هدف به دست آوردن مدل غیرخطی دینامیکی از انتقال حرارت جریان پالسی است. سلیمفندیجال و اوزتاپ<sup>۲</sup> [۱۷]، با شبیه‌سازی به پیش‌بینی عملکرد حرارتی از جریان پالسی اجباری در یک پله عقب‌رو با یک استوانه ثابت در معرض جریان نانوسیال پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، با افزایش فرکانس، کسر حجمی نانو ذرات و عدد رینولدز، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. یک افزایش خطی در نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات مشاهده می‌شود؛ چون افزایش کسر حجمی نانو ذرات هدایت حرارتی را بالا می‌برد و با انرژی بیشتر به سیال شتاب می‌دهد. سلیمفندیجال و اوزتاپ [۱۸]، شبیه‌سازی عددی جهت شناسایی خنک‌سازی بلوک‌های گرم شده در جریان کانال پالسی با یک سیلندر چرخان انجام شده است. نرخ انتقال حرارت برای هر صفحه از بلوک‌ها، با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

هانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۹] جریان جابه‌جایی طبیعی ناپایا متناوب و انتقال حرارت در یک محفظه بسته شامل، یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  مرکزی را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی و دامنه دمای پالسی افزایش می‌یابد.

سونگ<sup>۴</sup> و همکاران [۲۰]، انتقال جرم از یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  تحت جریان پالسی را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. عدد شروود با افزایش دامنه جریان پالسی افزایش می‌یابد و در اعداد رینولدز بالا، اثر ضربان بر عدد شروود کاهش می‌یابد. پروایز و بیس<sup>۵</sup> [۲۱] نشان دادند

<sup>1</sup> Selimefendigil

<sup>2</sup> Öztop

<sup>3</sup> Huang

<sup>4</sup> Sung

<sup>5</sup> Perwaiz, Base

<sup>6</sup> H. Ji

<sup>7</sup> Lock-on

<sup>8</sup> Iwai

<sup>9</sup> Steggel

در آرایش دسته‌لوله جابه‌جاشده<sup>۶</sup> با نسبت بیضویت  $e=1$  برای جریان پالسی و پایا انجام دادند. جریان پالسی، باعث می‌شود که فرکانس ریزش گردابه در فرکانس‌های مختلفی نسبت به فرکانس طبیعی در جریان پایا تشکیل شود. کونستانتیندس و همکاران [۳۱]، آزمایشی روی جریان پالسی و پایا آرایش شبه‌شطرنجی<sup>۷</sup> سیلندرها با نسبت بیضویت  $e=1$  در محدوده عدد رینولدز  $1100-12900$  انجام دادند. در جریان پایا، آرایش شبه‌شطرنجی اثرات مخربی روی ریزش گردابه تناوبی در مقایسه با حالت هم‌راستا و جابه‌جاشده دارد؛ اما آرایش شبه‌شطرنجی نسبت به آرایش هم‌راستا، نتیجه بهتری بر نرخ رسوب‌گذاری و انتقال حرارت دارد. نرخ رسوب در این حالت، ۱۲٪ کمتر از آرایش هم‌راستا است؛ در حالی که در افت فشارهای زیاد نرخ انتقال حرارت، حدود ۱۸٪ افزایش می‌یابد. کونستانتیندس و همکاران [۳۲]، مطالعه آزمایشگاهی و عددی روی اثرات جریان پالسی عبوری از دسته‌لوله‌ها با نسبت بیضویت  $e=1$  در رژیم زیر بحرانی انجام دادند. سه آرایش هم‌راستا، جابه‌جا شده و نامتقارن در دو بعد بررسی شده است. دامنه نوسانات سرعت با قفل‌شدگی افزایش می‌یابد، وقتی که فرکانس پالسی تقریباً دو برابر فرکانس ریزش گردابه باشد، اولین مود قفل‌شدگی ایجاد می‌شود و هنگامی که فرکانس پالسی نزدیک به فرکانس ریزش باشد، دومین مود قفل‌شدگی مشاهده می‌شود. کونستانتیندس و همکاران [۳۳]، ارتباط بین قفل‌شدگی ریزش گردابه و انتقال حرارت از دسته‌لوله‌ها با نسبت بیضویت  $e=1$  را مورد بررسی قرار دادند. مشاهده شد، پالسی بودن جریان، عامل افزایش انتقال حرارت محسوب می‌شود. در جریان عبوری پالسی، قفل‌شدگی باعث می‌شود که فشار روی لوله‌ها افزایش پیدا کند. خایبالی‌نایا<sup>۸</sup> و همکاران [۳۴]، به طور آزمایشگاهی ضریب انتقال حرارت از دسته‌لوله‌ها با نسبت بیضویت  $e=1$  را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که فرآیند افزایش انتقال حرارت با پالسی کردن جریان سیال در مقایسه با تبادل حرارت در جریان پایا، تقریباً ۱۷٪ افزایش می‌یابد و بیشترین اثر در فرکانس  $0/5$  و دامنه  $1/2D$  به

بوریاس<sup>۱</sup> [۲۵]، نیروهای سیال و الگوهای گردابه از یک سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  را بررسی کردند که در جریان هارمونیک و غیرهارمونیک قرار گرفته است. الگوی موج غیرهارمونیک که اثر قابل ملاحظه‌ای روی مکانیزم تشکیل گردابه و نیروهای اعمال شده روی سیلندر دارد، اختلالات را کنترل می‌کند. لاین<sup>۲</sup> و همکاران [۲۶]، جریان پالسی عبوری از یک سیلندر را به عنوان یک مدل آزمایشگاهی و عددی از جریان خون در یک شش مصنوعی بررسی کردند. در اعداد استوکس بزرگ تشکیل گردابه بعد از سیلندر مشاهده می‌شود و افزایش در اختلاط اکسیژن در خون زیاد می‌شود. مطالعات صورت گرفته تحت جریان پالسی روی دسته لوله‌ها شامل موارد زیر است: لاین و همکاران [۲۷]، جریان پالسی عبوری از دو سیلندر با آرایش مختلف را به طور آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. ساختار گردابه وابستگی زیادی به آرایش سیلندرها دارد، اندازه و استحکام گردابه به عدد رینولدز و عدد استوکس بستگی دارد.

زدراوکویچ<sup>۳</sup> [۲۸] دو سیلندر موازی با نسبت بیضویت  $e=1$  در آرایش متفاوت تحت نوسان ایجاد شده در جریان را مورد بررسی قرارداد. نتایج نشان می‌دهد که تداخل جریان به فاصله بین دو سیلندر و جهت جریان آزاد وابسته است. ریزش گردابه زمانی ایجاد می‌شود که فرکانس نوسان ریزش گردابه، به فرکانس طبیعی نزدیک باشد.

کونستانتیندس<sup>۴</sup> و همکاران [۲۹]، مشخصه‌های جریان ریزش گردابه از دسته‌لوله هم‌راستا<sup>۵</sup> با نسبت بیضویت  $e=1$  را در جریان پالسی و پایا، مورد بررسی قرار دادند. با افزایش در عدد رینولدز، دامنه نوسانات سرعت در رابطه با ریزش گردابه و سطح آشفتگی در دسته لوله افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد جریان پالسی، ریزش گردابه از ردیف اول و قفل‌شدگی را تحریک می‌کند. در هر موقعیت، اولین ردیف در دسته‌لوله‌ها یک گردابه مؤثری را ایجاد می‌کند که سبب می‌شود، سطح آشفتگی در دسته لوله‌ها افزایش یابد. کونستانتیندس و همکاران [۳۰]، آزمایشی روی ریزش گردابه

<sup>1</sup> Bouris

<sup>2</sup> Lin

<sup>3</sup> Zdravkovich

<sup>4</sup> Konstantinidis

<sup>5</sup> In-line

<sup>۶</sup> Staggered

<sup>۷</sup> Semi-staggered

<sup>۸</sup> Khaibullina

۴ به ترتیب بیانگر، معادله پیوستگی، معادله مومنتوم در راستای  $x$ ، معادله مومنتوم در راستای  $y$  و معادله انرژی است. معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم در راستای  $x$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S \quad (2)$$

معادله مومنتوم در راستای  $y$ :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(Tu)}{\partial x} + \frac{\partial(Tv)}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + S \quad (4)$$

در تمام این روابط، خواص سیال ثابت فرض شده است. عدد رینولدز جریان تنها پارامتر حاکم بر جریان است که به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (5)$$

عدد رینولدز تابعی از سرعت متوسط  $u$  و طول سیلندر  $L$  است که طول سیلندر مانند مطالعه سرینیواسان<sup>۶</sup> [۳۷] در معادلات، طول جسم در راستای عمود بر جریان است که این طول برای سیلندر با نسبت بیضویت ۱، همان قطر سیلندر است، ولی برای نسبت بیضویت‌های کمتر از ۱، طول تصویر شده جسم در راستای عمود بر جریان (۷) است (شکل ۱). آب به عنوان سیال کاری در نظر گرفته شده است. خصوصیات آب در دمای فیلم سیال طبق رابطه ۶ از مرجع [۳۸] استفاده شده است.

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} \quad (6)$$

عدد ناسلت تابعی از ضریب انتقال حرارت  $h$  و طول سیلندر  $L$  و ضریب هدایت حرارتی سیال  $k$  است، در حالی که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی  $h$ ، خود تابعی از شار حرارتی عبور از روی سطح  $Q$  و دمای سیلندر  $T_w$  و دمای محلی سیال  $T_\infty$  در دوردست است و در نهایت تابعی از سطح

دست می‌آید. مولکاهی<sup>۱</sup> و همکاران [۳۵]، اثر جریان پالسی روی ضریب پسا و انتقال حرارت در سیلندره‌های مربعی گرم شده هم‌راستا را به طور آزمایشگاهی، مورد بررسی قرار دادند. رابطه ضریب اصطکاک و عدد رینولدز بر حسب فرکانس، برای ردیف‌های مختلف آرایش لوله‌های مربعی بیان شده است. لی‌یانگ<sup>۲</sup> [۳۶]، به بررسی الگوی جریان اطراف دسته‌لوله‌های با نسبت بیضویت  $e=1$  هم‌راستا، جابه‌جا شده در جریان پایا و پالسی توربولانسی پرداخت. ضریب می‌تواند ساختار جریان و نرخ انتقال حرارت را در محدود اولین و دومین ردیف لوله‌ها تغییر دهد. پالسی بودن باعث می‌شود، انتقال حرارت در ناحیه جلویی ردیف دوم لوله‌ها افزایش یابد، چون باعث ریزش گردابه متناوب پشت اولین سیلندر و باعث اختلاط بیشتر سیال می‌شود؛ بنابراین نرخ انتقال حرارت در جلوی سیلندر دوم افزایش یابد.

### ۳- بیان مساله

جریان آرام ناپایای از روی سیلندر بیضوی در دمای ثابت  $T_w$  در آب با دمای  $T_\infty$  حل شده است و جریان غیرقابل تراکم است. ابتدا هندسه‌های مورد نظر در نرم‌افزار گمبیت، ترسیم و شبکه‌بندی شده است، شبکه ایجاد شده، ساختاری است و در نزدیک دیواره‌های جامد تمرکز شبکه محاسباتی بیشتر می‌باشد و اندازه تمام سلول‌ها در اطراف سیلندر یکسان است. جهت حل عددی، از نرم‌افزار دینامیک سیال محاسباتی<sup>۳</sup> فلوئنت<sup>۴</sup> ۱۶ بر مبنای حجم محدود<sup>۵</sup> استفاده شده است. در این مدل‌سازی عدد ناسلت محاسبه شده است. برای کوپل کردن فشار با سرعت از الگوریتم SIMPLE و دقت مرتبه دوم برای منفصل‌سازی معادلات مومنتوم و انرژی استفاده شده است.

### ۴- معادلات حاکم و شرایط مرزی

با استفاده از معادلات ناویر استوکس، معادلات حاکم بر جریان سیال را می‌توان به صورت زیر بیان کرد، معادله ۱ تا

<sup>1</sup> Mulcahey

<sup>2</sup> Liang

<sup>3</sup> CFD

<sup>4</sup> Fluent

<sup>5</sup> Finite volume

<sup>6</sup> Srinivasan

مرز خروجی در حدود  $30 \cdot D$  از سیلندر فاصله دارد و پس از آن به بررسی فواصل مرز ورودی، بالا و پایینی سیلندر پرداخته شده است. فواصل مرز ورودی، بالا و پایین سیلندر متغیر در نظر گرفته شده است تا جایی که اثرات این فواصل روی نتایج حاصل از جریان ناچیز شود. دامنه محاسباتی با دقت بالایی انتخاب شده است و جهت تعیین دامنه، به بررسی عدد ناسلت سیلندر بیضوی پرداخته شده است. عدد ناسلت با افزایش فاصله مرز ورودی و بالا و پایین سیلندر بررسی شده است و زمانی که تأثیر دامنه محاسباتی بر نتایج حاصل از عدد ناسلت ناچیز شود، دامنه مناسب انتخاب می‌شود. طبق نتایج حاصل از محاسبات، فاصله مرز ورودی و مرز بالا و پایین از سیلندر  $12L$  در نظر گرفته شده است.

شکل ۱ شرایط مرزی در دامنه محاسباتی را نشان می‌دهد. در تمام حالات دمای سیال  $T_{\infty} = 293K$  و دمای سیلندر  $T_W = 313K$  در نظر گرفته شده است.

شرط عدم لغزش طبق رابطه ۱۱، یک شرط اختصاصی برای مولفه‌های سرعت در دیوارهای جامد است.

$$U_x = 0, U_y = 0 \quad (11)$$

در اینجا شرط عدم لغزش به همراه شرط دما ثابت به عنوان شرایط مرزی دیواره سیلندر انتخاب شده است. در تمام محاسبات، ورودی و مرز بالا و پایین سیلندر در دمای ثابت  $T_{\infty}$  است.

سیلندر  $A_c$  مورد بررسی است که در روابط (۷-۸) بیان شده است:

$$\bar{h} = \frac{\bar{Q}}{A_c(T_W - T_{\infty})} \quad (7)$$

$$\frac{\bar{h}L}{k} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Nu_D dt \quad (8)$$

برای بررسی جریان پالسی، عدد استروهل مهم واقع می‌شود، عدد استروهل تابعی از فرکانس جریان پالسی  $f$ ، طول سیلندر  $L$  و سرعت متوسط جریان  $U$  است:

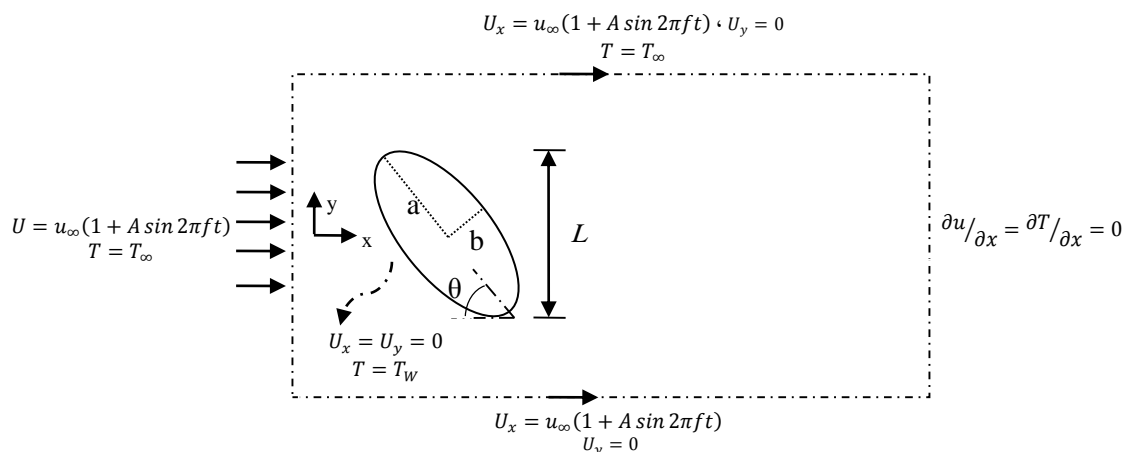
$$St = \frac{fL}{U} \quad (9)$$

سیلندر بیضوی که در شکل ۱ نشان داده شده است، تحت زوایای مختلف  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  و  $90^\circ$  با نسبت بیضویت  $e = 0.2, 0.6$ ، مورد مطالعه قرار گرفته است. به نسبت قطر کوچک بیضی  $b$  به قطر بزرگ بیضی  $a$ ، نسبت بیضویت (رابطه ۱۰) گفته می‌شود:

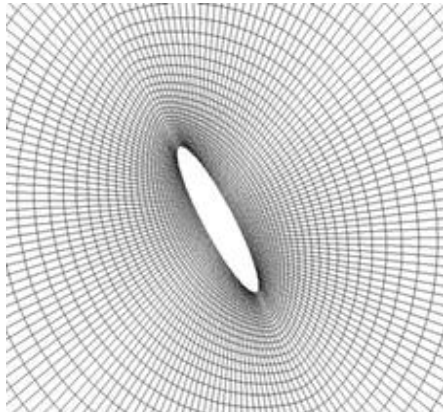
$$e = b/a \quad (10)$$

جهت مقایسه نتایج حاصل از جریان، سطح تبادل حرارت از سیلندرهایی بیضوی در هر نسبت بیضویت یکسان در نظر گرفته شده است؛ بنابراین محاسبات در سطحی ثابت از سیلندر بیضوی در نسبت بیضویت مختلف، مورد بررسی قرار گرفته است.

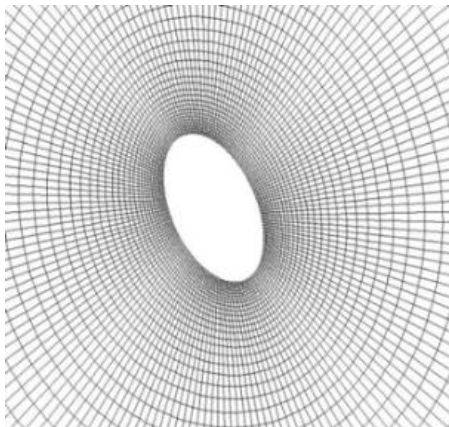
به منظور دستیابی به اطلاعات جریان در فواصل دور از سیلندر و همچنین تأکید بر صحت شرط مرزی انتخاب شده،



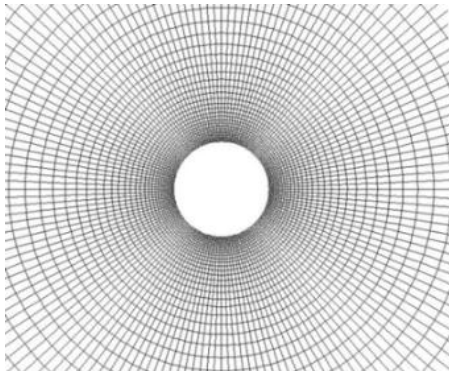
شکل ۱- سیلندر بیضوی شکل تحت زاویه  $\theta$  و تعیین شرایط مرزی



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲- بخشی از شبکه محاسباتی اطراف، الف) سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $e = 0.2$  تحت زاویه  $60^\circ$ ، ب) سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $e = 0.6$  تحت زاویه  $60^\circ$  و ج) سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $e = 1$  (دایروی)

تغییرات عدد ناسلت در جریان پالسی و غیر پالسی اطراف سیلندر بیضوی بررسی شده است.

ورودی و مرز بالا و پایین سیلندر، در ابتدا تحت جریانی با سرعت ثابت و سپس جهت اعمال جریان پالسی با سرعت پالسی در نظر گرفته می‌شود. تابع سرعت در جریان پالسی شامل، یک ترم ثابت به اضافه یک ترم نوسانی است [۱۴] که به صورت رابطه ۱۲ نشان داده می‌شود.

$$U = u_{\infty} (1 + A \sin(2\pi ft)) \quad (12)$$

در حالی که  $u_{\infty}$  سرعت ثابت،  $A$  دامنه بی‌بعد جریان پالسی،  $f$  فرکانس جریان پالسی و  $t$  زمان است.

در مرز خروجی دامنه محاسباتی تغییرات سرعت و دما در راستای  $y$  صفر است، بنابراین:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

### ۵- استقلال از شبکه محاسباتی

در روش‌های عددی، یکی از مباحث مهم، تأثیر اندازه شبکه بر نتایج حاصل از شبیه‌سازی است؛ همچنین، بدست آوردن نتایج مستقل از شبکه، از اهداف هر تحقیق عددی است. شبکه تولید شده و تعداد حجم‌کنترل‌های به وجود آمده، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج بدست آمده و مدت زمان اجرای برنامه کامپیوتری دارند. با افزایش تعداد حجم‌کنترل‌ها در جهت‌های  $x$ ،  $y$  و کوچک‌تر نمودن ابعاد حجم‌کنترل‌ها، خصوصاً در نزدیکی مرزهای جامد، می‌توان رفتار جریان را بطور دقیق و به همراه جزئیات بیشتر بررسی کرد.

اثر نقاط شبکه محاسباتی به تعداد ۹۱۴۰، ۴۴۵۰، ۱۸۰۸۰ و ۲۶۱۷۸ بر عدد ناسلت سیلندر بیضوی در زوایای حمله و نسبت بیضویت مختلف بررسی شده است. زمانیکه تعداد نقاط شبکه محاسباتی ۱۸۰۸۰ عدد است، تغییر کمی در نتایج وجود دارد، پس این حالت به عنوان شبکه نهایی جهت انجام محاسبات در نظر گرفته شده است. شکل ۲، نمایی از جزئیات شبکه محاسباتی اطراف سیلندر بیضوی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲ نشان می‌دهد، شبکه محاسباتی اطراف جسم جامد کوچک‌تر است و با دور شدن از سطح جسم شبکه بزرگ‌تر می‌شود.

### ۶- بحث و نتایج

با استفاده از حل عددی معادلات ۱ تا ۴ و شرایط مرزی ۱۱ تا ۱۳، جریان اطراف سیلندر بیضوی شبیه‌سازی شده است. ابتدا شبکه مناسب اطراف سیلندر انتخاب می‌شود، سپس



است، رابطه ۱۵ عدد ناسلت سیلندر بیضوی تحت زاویه  $30^\circ$  را نشان می‌دهد و جدول ۲ نتایج را بیان کرده است.

$$\overline{Nu} = 0.806 \times Pe^{0.304} \quad (15)$$

جدول ۱- اعتبارسنجی عدد ناسلت سیلندر بیضوی

در رینولدز ۴۰			
زاویه حمله	عدد ناسلت	حاضر عدد ناسلت [۴۰]	درصد خطا/%
۰	۲/۰۱۵۴	۲/۰۱۰۵	۰/۲۴
۹۰	۴/۰۸۸۴	۳/۹۷۹۱	۲/۷۴

جدول ۲- اعتبارسنجی عدد ناسلت سیلندر بیضوی در زاویه

$30^\circ$ و رینولدز ۵			
عدد پراتنل	عددناسلت حاضر	عدد ناسلت رابطه (۱۶)	مرجع [۴۱]
۱	۱/۲۹۲۵	۱/۳۱۴۶	۱/۳۲۳۰
۵	۲/۱۴۴۶	۲/۱۴۴۴	۲/۱۱۹۰

جهت اعتبارسنجی عدد ناسلت سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $e = 1$  تحت جریان پالسی، از نتایج مقاله ال‌سامالی و تامپسون [۱۴] استفاده شده است. در این مقاله سیلندر بین دو تا صفحه با نسبت انسداد  $0.25$  در آب مورد مطالعه قرار گرفته است. نسبت انسداد به نسبت دهانه ورودی به قطر سیلندر تعریف می‌شود، نتایج در جدول ۳ گزارش شده است.

جدول ۲-۲- تأثیر فرکانس جریان پالسی بر نرخ انتقال

#### حرارت

در شکل ۳ تغییرات عدد ناسلت سیلندر بیضوی شکل، تحت زاویه  $\theta = 0^\circ$  برحسب عدد استروهل در نسبت بیضویت‌های ۱ و  $0.6$ ،  $0.2$  تحت جریان پالسی و غیرپالسی را نشان می‌دهد.

در زاویه  $\theta = 0^\circ$  در جریان غیرپالسی اطراف سیلندرهایی بیضوی با افزایش نسبت بیضویت، عدد ناسلت افزایش داشته است و بیشترین نرخ انتقال حرارت در نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) رخ داده است. عدد ناسلت با افزایش عدد استروهل، ابتدا روند افزایشی داشته تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و پس از آن نسبت به پیک روند کاهشی دارد.

#### ۱-۶- اعتبارسنجی حل عددی

بایستی روش حل عددی انتخاب شده اعتبارسنجی شود. پس از اطمینان حاصل کردن از صحت روش عددی، مسئله مطرح شده با این روش حل می‌شود. ابتدا نتایج حاصل از جریان آرام ناپایا روی سیلندر بیضوی  $e = 1$  اعتبارسنجی می‌شود. چرچیل و برنشتاین [۳۹]، رابطه (۱۴) را جهت بررسی عدد ناسلت روی سیلندر بیضوی  $e = 1$  (دایروی) ارائه داده‌اند:

$$\overline{Nu} = 0.3 + \frac{0.62 \times Re_D^{0.5} \times Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \times \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (14)$$

این رابطه برای تمام گستره  $Re_D Pr > 0.2$  استفاده می‌شود که در آن خواص سیال در دمای فیلم محاسبه می‌شوند. آزمایشات زیادی جهت به دست آوردن عدد ناسلت سیلندر بیضوی در  $e = 1$  انجام شده است و نتایج به شدت تحت تأثیر گسترش لایه مرزی طبیعی است. جریان آب از روی سیلندر بیضوی در نسبت بیضویت ۱ عبور می‌کند بنابراین در عدد رینولدز ۱۰۰ و عدد پراتنل  $5/44$  بر طبق خواص آب در دمای فیلم سیال، اعتبارسنجی انجام شده است. طبق این رابطه، عدد ناسلت  $10/833$  برای سیلندر بیضوی در  $e = 1$  است و طبق شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش، عدد ناسلت  $11/1009$  گزارش شده است که خطای حاصل از محاسبات با مرجع بیان شده  $2/4\%$  است.

در مورد جریان اطراف سیلندر بیضوی شکل، مقاله‌ای از بهارتی و همکاران [۴۰] برای سیالات غیرنیوتنی ارائه شده است که در  $n = 1$  و رینولدز ۴۰، عدد پراتنل ۱ و نسبت بیضویت  $e = 0.2$  اعتبارسنجی انجام شده است که در جدول ۱ نتایج گزارش داده شده است.

دالشیو و دنیس<sup>۱</sup> [۴۱]، انتقال حرارت اجباری از سیلندر بیضوی همدم را بررسی کردند. محاسبات در اعداد رینولدز ۵ و ۲۰ و در اعداد پراتنل و زوایای مختلف انجام شده است. روابط مختلفی برای عدد ناسلت سیلندر بیضوی ارائه شده

<sup>1</sup> Blockage Ratio

<sup>1</sup> D'alessio, Dennis

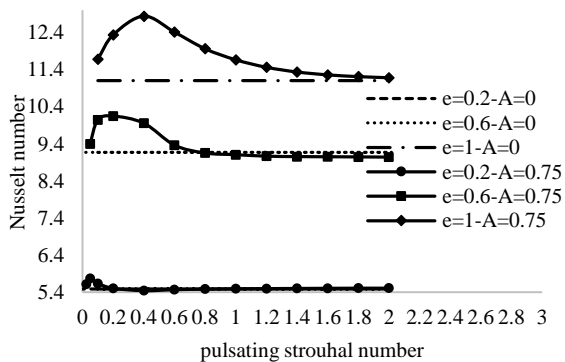
جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت سیلندر دایروی در

جریان پالسی				
عدد رینولدز	دامنه بی بعد	عدد استروهال	عدد ناسلت حاضر	عدد ناسلت مرجع [۱۴]
		غیرپالسی	۲/۳۸	۲/۳۸
۱	۰/۷	۰/۱	۲/۳۵۸۰	۲/۳۲
		۲	۲/۳۸۰۰	۲/۳۸
		غیرپالسی	۱۵/۲۲	۱۵/۲۲
		۰/۵	۱۵/۵۰۰۴	۱۵/۳۳
۱۰۰	۰/۵	۱	۱۵/۸۰۲۸	۱۵/۵۵
		۱/۵	۱۵/۵۷۶۷	۱۵/۴۱
		۲	۱۵/۵۳۲۰	۱۵/۳۱
		غیرپالسی	۲۳/۸۵	۲۳/۸۵
		۰/۱	۲۴/۲۲۰۰	۲۴/۰۰
		۰/۳	۲۶/۷۶۹۰	۲۶/۱۷
۲۵۰	۰/۷	۰/۵	۲۴/۷۰۹۷	۲۴/۲۷
		۰/۸	۲۶/۳۲۵۶	۲۶/۰۶
		۲	۲۴/۳۸۰۰	۲۴/۳۷

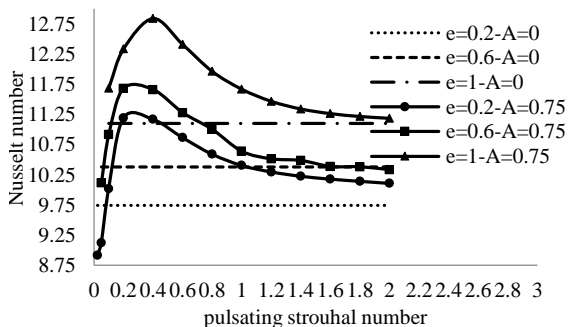
۰/۰۵ عدد ناسلت، بیشترین افزایش را نسبت به دیگر اعداد استروهال داشته است. این افزایش نسبت به جریان غیرپالسی ۲/۸۲٪ است.

در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت سیلندر بیضوی شکل، تحت زاویه  $\theta = 30^\circ$  برحسب عدد استروهال در نسبت بیضویت‌های ۱، ۰/۶ و ۰/۲ تحت جریان پالسی و غیرپالسی را نشان می‌دهد. در جریان پالسی و غیرپالسی در این زاویه نیز با افزایش نسبت بیضویت، عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند.

پیک عدد ناسلت در نسبت بیضویت ۰/۶، در عدد استروهال پالسی ۰/۲ ایجاد شده است که ۱۴/۸۶٪ افزایش نسبت به جریان غیرپالسی دیده شده است و پیک عدد ناسلت در نسبت بیضویت ۰/۲ در همین عدد استروهال ۰/۲ ایجاد شده است که ۱۲/۵۲٪ افزایش نسبت به جریان غیرپالسی گزارش شده است.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال جریان پالسی در زاویه  $0^\circ$  و نسبت بیضویت ۰/۲، ۰/۶ و ۱



شکل ۴- نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال جریان پالسی در زاویه  $30^\circ$  و نسبت بیضویت ۰/۲، ۰/۶ و ۱

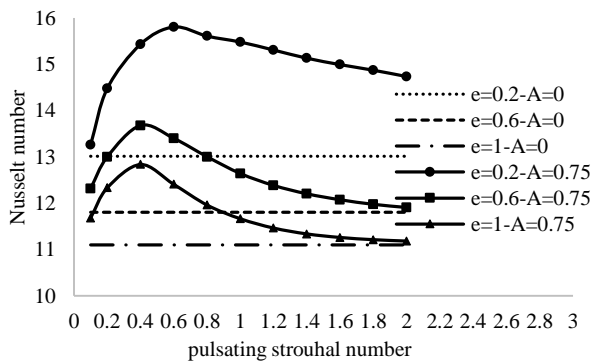
در جریان پالسی در زاویه  $\theta = 0^\circ$  نیز مانند جریان غیرپالسی با افزایش نسبت بیضویت در هر عدد استروهال، عدد ناسلت با افزایش نسبت بیضویت افزایش دارد، چون طول عمود بر راستای جریان افزایش پیدا می‌کند.

در نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) و  $A=0/75$  و عدد استروهال پالسی ۰/۴ پیک عدد ناسلت نسبت به عدد ناسلت تحت جریان غیرپالسی ۱۲/۰۸٪ افزایش دارد.

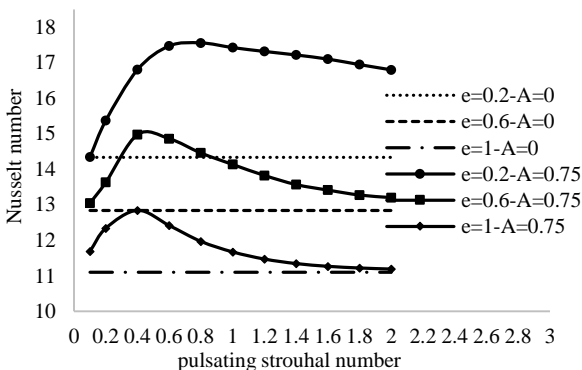
در نسبت بیضویت ۰/۶ و  $A=0/75$  و زاویه  $\theta = 0^\circ$  از عدد استروهال پالسی ۰/۰۵ تا ۰/۸ عدد ناسلت نسبت به جریان غیرپالسی افزایش دارد و از عدد استروهال ۰/۸ تا ۲، کاهش ناچیزی در عدد ناسلت نسبت به جریان غیرپالسی وجود دارد. در عدد استروهال ۰/۲ ماکزیمم افزایش عدد ناسلت ۱۰/۶۴٪، بیشتر از عدد ناسلت تحت جریان غیرپالسی است.

در نسبت بیضویت ۰/۲ و  $A=0/75$  و زاویه  $\theta = 0^\circ$  در عدد استروهال بین ۰/۲۵ تا ۰/۲، عدد ناسلت افزایش داشته است و در استروهال‌های بالاتر افزایش در عدد ناسلت نسبت به جریان غیرپالسی وجود نخواهد داشت. در عدد استروهال

در هر دو نسبت بیضویت، هم مقدار عدد ناسلت و هم درصد افزایش کمتر از عدد ناسلت روی سیلندر با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) است. در کل می‌توان نتیجه گرفت، در محیطی برابر از سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت‌های مختلف، زمانی که سیلندر بیضوی در نسبت بیضویت‌های کمتر و زوایای بالاتر نسبت به مسیر جریان قرار داشته باشند، نرخ انتقال حرارت افزایش بیشتری نسبت به سیلندر با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) خواهد داشت. در زوایای  $60^\circ$  و  $90^\circ$  از سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $0.2$ ، جریان پالسی بیشترین تأثیر را جهت افزایش در عدد ناسلت دارد، از عدد استروهال  $2-4$  درصد افزایش عدد ناسلت بین  $15\%-25\%$  است.



شکل ۵- نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال جریان پالسی در زاویه  $60^\circ$  و نسبت بیضوی  $0.2$ ،  $0.6$  و  $1$

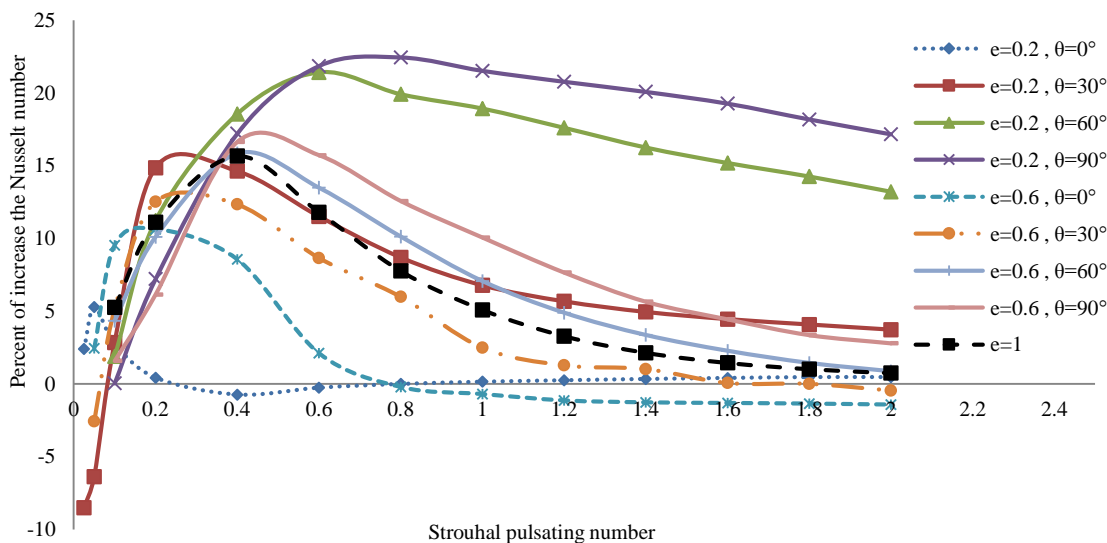


شکل ۶- نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال جریان پالسی در زاویه  $90^\circ$  و نسبت بیضوی  $0.2$ ،  $0.6$  و  $1$

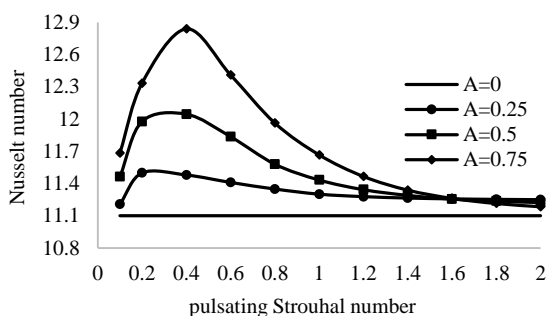
در شکل ۵ تغییرات عدد ناسلت سیلندر بیضوی شکل، تحت زاویه  $\theta = 60^\circ$  بر حسب عدد استروهال در نسبت بیضویت‌های  $0.2$ ،  $0.6$  و  $1$  تحت جریان پالسی و غیرپالسی را نشان می‌دهد. برخلاف نتایج مربوط به زاویه  $0^\circ$  و  $30^\circ$ ، در زاویه  $60^\circ$  در جریان غیرپالسی و چون زاویه حمله افزایش پیدا کرده، در اعداد استروهال مساوی از جریان پالسی با کاهش نسبت بیضویت عدد ناسلت افزایش داشته است. پیک عدد ناسلت برای  $e=0.6$  در زاویه حمله  $60^\circ$  و عدد استروهال پالسی  $0.6$ ،  $21/41\%$  است؛ در حالی که در  $e=0.2$  و زاویه حمله  $60^\circ$ ، پیک‌ها در فرکانس‌های پایین‌تری نسبت به  $e=0.6$  اتفاق می‌افتد، در این حالت پیک عدد ناسلت در عدد استروهال  $4/10$  است و  $15/84\%$  افزایش در مقدار ناسلت وجود دارد.

در شکل ۶ تغییرات عدد ناسلت سیلندر بیضوی شکل، تحت زاویه  $\theta = 90^\circ$  بر حسب عدد استروهال در نسبت بیضویت‌های  $0.2$ ،  $0.6$  و  $1$  تحت جریان پالسی و غیرپالسی را نشان می‌دهد. عدد ناسلت تحت جریان پالسی نسبت به جریان غیرپالسی افزایش داشته است. در جریان پالسی و غیرپالسی با کاهش نسبت بیضویت، عدد ناسلت افزایش داشته است. در نسبت بیضویت  $0.6$ ، پیک عدد ناسلت در عدد استروهال  $6/06$  است که عدد ناسلت  $21/85\%$  افزایش نسبت به جریان غیرپالسی دارد. در زاویه  $90^\circ$  نیز، پیک عدد ناسلت در دو نسبت بیضویت  $0.6$  و  $0.2$  در یک فرکانس رخ نمی‌دهد. در نسبت بیضویت  $0.2$  پیک عدد ناسلت در عدد استروهال پالسی  $4/04$  ایجاد می‌شود که عدد ناسلت  $16/63\%$  افزایش داشته است.

نمودارهای ۳ تا ۶ مقادیر مربوط به عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال را تحت جریان پالسی و غیرپالسی نشان می‌دهد. نمودار ۷، افزایش عدد ناسلت تحت جریان پالسی نسبت به جریان غیرپالسی را بصورت دقیق‌تر بررسی کرده است. بر طبق این نمودار می‌توان نتیجه گرفت، در نسبت بیضویت  $0.2$  در زوایای  $30^\circ$ ،  $60^\circ$  و  $90^\circ$  نیز در نسبت بیضویت  $0.6$  در زوایای  $60^\circ$  و  $90^\circ$  در اعداد استروهال زیادی در بازه  $2-10$  درصد افزایش در عدد ناسلت، بیشتر از سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) تحت جریان پالسی است، چون طول عمود بر راستای جریان در این زوایا نسبت به سیلندر دایروی بیشتر است. در زاویه  $0^\circ$



شکل ۷- نمودار درصد افزایش عدد ناسلت بر حسب عدد استروهال سیلندر بیضوی در زوایا و نسبت بیضویت مختلف



شکل ۸- نمودار تغییرات عدد ناسلت سیلندر با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) بر حسب عدد استروهال و دامنه بی بعد جریان پالسی در  $Re=100$

در شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت ۰/۶ و زاویه  $90^\circ$  بر حسب عدد استروهال و دامنه جریان پالسی در  $Re=100$  گزارش شده است، بنابراین، با افزایش دامنه جریان پالسی نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. در دامنه ۰/۲۵ و اعداد استروهال ۰/۲-۰/۱ کاهش در عدد ناسلت وجود دارد و از عدد استروهال ۲-۱/۴ تغییری در مقدار عدد ناسلت مشاهده نشده است؛ بنابراین در دامنه ۰/۲۵ در اعداد استروهال ۱/۴-۰/۲ افزایش ناچیزی در عدد ناسلت مشاهده شده است، بیشترین افزایش در عدد استروهال ۰/۶ است. در دامنه ۰/۵ و عدد استروهال ۰/۶ پیک عدد ناسلت ۸/۳۴٪ افزایش دارد و در نهایت در دامنه ۰/۷۵

### ۳-۶- تأثیر دامنه بی بعد جریان پالسی بر نرخ انتقال حرارت

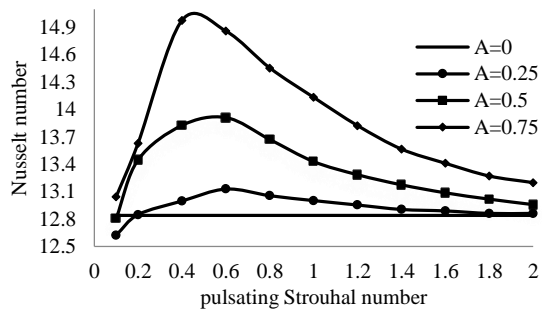
در این بخش هدف بررسی تأثیر دامنه بی بعد جریان پالسی بر نرخ انتقال حرارت از سیلندر بیضوی در فرکانس‌های مختلف است. در شکل ۸، عدد ناسلت سیلندر با نسبت بیضویت  $e=1$  در دامنه بی بعد ۰، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ در عدد رینولدز ۱۰۰ گزارش شده است. در هر دامنه جریان پالسی، نرخ انتقال حرارت بیشتر از جریان غیرپالسی است. در محدوده عدد استروهال ۱/۲-۰/۱ با افزایش دامنه جریان پالسی نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود، ولی از عدد استروهال ۱/۲ به بعد با افزایش دامنه جریان پالسی، تغییرات ناچیزی در مقدار عدد ناسلت مشاهده شده است. با افزایش دامنه جریان پالسی، بیشینه عدد ناسلت در اعداد استروهال مختلفی رخ داده است. بیشترین افزایش عدد ناسلت در دامنه ۰/۷۵ و عدد استروهال ۰/۴ است که ۱۵/۶۵٪ افزایش نسبت به جریان غیرپالسی دارد و در دامنه ۰/۵ و عدد استروهال ۰/۴ افزایش ۸/۴۹٪ مشاهده شده است. در نهایت در دامنه ۰/۲۵ و عدد استروهال ۰/۲ بیشترین افزایش ۳/۵۷٪ وجود دارد؛ بنابراین مشاهده می‌شود، افزایش دامنه جریان پالسی می‌تواند در بعضی از فرکانس‌ها، سبب افزایش قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت شود، چون نرخ تغییرات در سرعت ورودی بیشتر می‌شود.

می‌دهد و باعث تغییر محدوده دمایی می‌شود و این باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. دلیل مناسبی برای کاهش یافتن نرخ انتقال حرارت در فرکانس‌های بالا طبق مطالعه ایشان پیدا نشده است.

#### ۷- جمع‌بندی

جهت بررسی نرخ انتقال حرارت از سیلندر بیضوی، سطح تبادل حرارت از سیلندر بیضوی در هر نسبت بیضویت یکسان در نظر گرفته شده است. هدف بررسی نرخ انتقال حرارت با تغییر در نسبت بیضویت و زاویه جسم جریان‌بند است. زمانی که مشخصه‌های جریان با یکدیگر مقایسه می‌شود، باید به این نکته توجه کرد که سیلندر بیضوی در چه نسبت بیضویت و تحت چه زاویه‌ای، مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

- در جریان غیرپالسی نرخ انتقال حرارت از سیلندر بیضوی تحت زوایای  $60^\circ$  و  $90^\circ$ ، بیشتر از سیلندر با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایروی) است، اما در زوایای  $0^\circ$  و  $30^\circ$  نرخ انتقال حرارت کمتر است.
- با افزایش دامنه بی‌بعد جریان پالسی، نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند؛ اما با افزایش فرکانس جریان پالسی (عدد استروهال)، نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند و به بیشینه مقدار می‌رسد و پس از آن عدد ناسلت با افزایش فرکانس جریان پالسی کاهش پیدا می‌کند.
- با افزایش زاویه سیلندر بیضوی برای نسبت بیضویت کوچکتر از یک، نرخ انتقال حرارت تحت جریان پالسی و غیرپالسی در هر نسبت بیضویت افزایش پیدا می‌کند.
- در زاویه‌های  $0^\circ$  و  $30^\circ$  با افزایش نسبت بیضویت نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند، اما در زاویه‌های  $60^\circ$  و  $90^\circ$  با افزایش نسبت بیضویت، نرخ انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. این مطلب نشان می‌دهد، هر چه طول عمود بر راستای جریان سیلندر بیضوی بیشتر باشد، نرخ انتقال حرارت بیشتر است.
- در زوایای  $60^\circ$  و  $90^\circ$  از سیلندر بیضوی با نسبت بیضویت  $0.2$ ، نرخ انتقال حرارت افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد، در این زوایا نرخ انتقال حرارت



شکل ۹- نمودار تغییرات عدد ناسلت سیلندر با نسبت

بیضویت  $0.6$  و زاویه  $90^\circ$  بر حسب عدد استروهال و دامنه بی‌بعد جریان پالسی در  $Re=100$

که افزایش قابل ملاحظه‌ای در عدد ناسلت وجود دارد، در عدد استروهال  $0.4$  پیک عدد ناسلت  $1.6/63$  نسبت به جریان غیرپالسی داشته است.

براساس نتایج ارائه شده در بخش ۶-۲ و ۶-۳ و براساس مرجع [۲۹] بیان شده است که جریان پالسی، باعث افزایش حرکت جابه‌جایی سیال می‌شود؛ بنابراین سبب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. بر طبق مرجع [۲۱] نیز مشاهده شده است، در فرکانس‌های کم عدد ناسلت کم است و با افزایش فرکانس، عدد ناسلت زیاد شده است و دوباره با افزایش فرکانس، عدد ناسلت کم شده است؛ بنابراین بیان شده که در جریان پالسی زمانی که عدد ناسلت کم باشد، متوسط تنش برشی روی دیوار اطراف سیلندر کم است و زمانی که عدد ناسلت زیاد باشد، متوسط تنش برشی روی دیوار افزایش پیدا می‌کند. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که انتقال حرارت از سیلندر دایروی تحت جریان پالسی، حالت سیستم را نسبت به جریان غیرپالسی به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد. ضخامت لایه مرزی روی سیلندر، به عنوان فاکتور اصلی است که تحت جریان پالسی تغییر می‌کند؛ بنابراین مقاومت حرارتی، باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. این دیدگاه توسط ریچاردسون بیان شده است، کسی که نشان می‌دهد که پروفیل سرعت برای جریان پالسی نزدیک دیوار نسبت به جریان غیرپالسی، شیب بیشتری دارد. در رابطه با نوسانات هارمونیک نیز، شلیختنگ هم عقیده با لاین است، هنگامی که نوسانات هارمونیک به جریان افزوده می‌شود، باعث می‌شود که جسم گرادیان فشار زیادی را تحمل کند. این گرادیان فشار زیادی، محدوده سرعت را به طور زیادی تغییر

مولفه عمود بر جریان، m	$y$	بیشتر از سیلندر با نسبت بیضویت ۱ (سیلندر دایرویی)، تحت جریان پالسی است.
چگالی، $\text{kg. m}^{-3}$	$\rho$	به طور کلی می توان به این نتیجه رسید که جریان پالسی را به عنوان عاملی جهت افزایش انتقال حرارت می توان در نظر گرفت، اما افزایش در عدد ناسلت بستگی به دامنه و فرکانس جریان پالسی دارد.
ویسکوزیته، $\text{kg. s}^{-1}. \text{m}^{-1}$	$\mu$	
پخشندگی گرمایی، $\text{m}^2. \text{s}^{-1}$	$\alpha$	

### ۹- مراجع

- [1] Chang TB, WY Yeh (2011) Theoretical investigation into condensation heat transfer on horizontal elliptical tube in stationary saturated vapor with wall suction. Appl Therm Eng 31(5): 946-953.
- [2] Sahim K, Santoso D (2013) Convective heat transfer from a heated elliptic cylinder at uniform wall temperature. IJEEE 4(1): 133-140.
- [3] Abbassi A, Taheri HA (2005) Numerical analysis of unsteady-state laminar forced convection over an inclined, horizontal cylinder at constant heat flux. 16th international symposium on transport phenomena.
- [4] Abd-Rabbo MA, Berbish NS, Mohammad MA, Mandour MM (2013) Forced convection heat transfer from three dimensional bodies in cross-flow. Engineering Research Journal, Helwan University 137: M1-M19.
- [5] Abbassi A, Taheri HA (2010) Numerical solution of laminar forced convection flow around an angled horizontal elliptical cylinder and the impact of alternative vortices.
- [6] Abdel Aziz AA, Abdalla NSB, Hanafi S (2006) Flow and heat transfer characteristics around a combination of elliptic cylinders in-line Eighth International Congress of Fluid Dynamics & Propulsion.
- [7] Lugt HJ, Haussling HJ (1972) Laminar flows past elliptic cylinders at various angles of attack. DTIC Document.
- [8] Lotfi B, et al (2014) 3D numerical investigation of flow and heat transfer characteristics in smooth wavy fin-and-elliptical tube heat exchangers using new type vortex generators. Energy 73: 233-257.
- [9] Taler D, Oclen P (2014) Determination of heat transfer formulas for gas flow in fin-and-tube heat exchanger with oval tubes using CFD simulations. Chem Eng.Proces 83: 1-11.
- [10] Hamid MO, Zhang B, Yang L (2014) Application of field synergy principle for optimization fluid flow and convective heat transfer in a tube bundle of a pre-heater. Energy 76: 241-253.

### ۸- فهرست علائم

دامنه بی بعد جریان پالسی	$A$
سطح سیلندر	$A_c$
فرکانس جریان پالسی، $\text{s}^{-1}$	$f$
ضریب انتقال حرارت جابه جایی، $\text{w. m}^{-2}. \text{K}^{-1}$	$h$
قطر سیلندر، m	$L$
ضریب رسانایی حرارتی، $\text{w. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$	$k$
عدد ناسلت	$Nu$
فشار، Pa	$P$
عدد پراتل	$Pr$
شارحرارتی جابه جایی، $\text{w. m}^{-2}$	$Q$
عدد رینولدز	$Re$
عدد استروهل	$st$
زمان، s	$t$
دوره تناوب، s	$T$
دمای فیلم سیال، K	$T_f$
دمای ورودی، K	$T_{in}$
دمای دیوار سیلندر، K	$T_{wall}$
سرعت، $\text{m. s}^{-1}$	$U$
مولفه ثابت سرعت، $\text{m. s}^{-1}$	$U_0$
سرعت در راستای $y$ ، $\text{m. s}^{-1}$	$V$
مولفه در راستای جریان، m	$x$

- [25] Bouris DEK (2011) Numerical study of fluid forces and vortex patterns in the wake of a circular cylinder subject to harmonic and non-harmonic inflow velocity perturbations. IUTAM Symposium on Bluff Body Flows.
- [26] Lin YC, et al (2006) Pulsatile flow past a cylinder: An experimental model of flow in an artificial lung. *ASAIO J* 52(6): 614-623.
- [27] Lin Y, et al (2008) Pulsatile flow past multiple cylinders: A model study of blood flow in an artificial lung. in 4th Kuala Lumpur International Conference on Biomedical Engineering 2008. Springer.
- [28] Zdravkovich M (1988) Review of interference-induced oscillations in flow past two parallel circular cylinders in various arrangements. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 28(1): 183-199.
- [29] Konstantinidis E, et al (2000) On the flow and vortex shedding characteristics of an in-line tube bundle in steady and pulsating crossflow. *Chem Eng Res Des* 78(8): 1129-1138.
- [30] Konstantinidis E, Balabani S, Yianneskis M (2002) A study of vortex shedding in a staggered tube array for steady and pulsating cross-flow. *J Fluids Eng Trans ASME* 124(3): 737-746.
- [31] Konstantinidis E, Castiglia D, Balabani S (2005) An experimental study of steady and pulsating cross-flow over a semi-staggered tube bundle. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci* 219(3): 283-298.
- [32] Liang C, Papadakis G, Luo X (2009) Effect of tube spacing on the vortex shedding characteristics of laminar flow past an inline tube array: a numerical study. *Comput Fluids* 38(4): 950-964.
- [33] Konstantinidis E, Balabani S, Yianneskis M (2003) Relationship between vortex shedding lock-on and heat transfer: Implications for tube bundles in cross-flow. *Chem Eng Res Des* 81(6): 695-699.
- [34] Khaibullina A, et al (2014) Heat transfer at in-line tube bank under low-frequency asymmetrical impulses impact on fluid flow. in EPJ Web of Conferences. EDP Sciences.
- [35] Mulcahey T, Pathak M, Ghiaasiaan S (2013) The effect of flow pulsation on drag and heat transfer in an array of heated square cylinders. *Int J Therm Sci* 64: 105-120.
- [36] Liang C (2005) Large eddy simulation of the turbulent flow and heat transfer in tube bundles. University of London.
- [37] Srinivasan K (2005) On a separation criterion for symmetric elliptic bluff body flows. arXiv preprint physics/0511250.
- [38] Jiji LM, Jiji LM (2006) Heat convection. Springer.
- [11] Ranut P, et al (2014) Multi-objective shape optimization of a tube bundle in cross-flow. *Int J Heat Mass Transf* 68: 585-598.
- [12] Khan MG, Fartaj A, Ting DSK (2004) An experimental characterization of cross-flow cooling of air via an in-line elliptical tube array. *Int J Heat Fluid Flow* 25(4): 636-648.
- [13] Ibrahim TA, Gomaa A (2009) Thermal performance criteria of elliptic tube bundle in crossflow. *Int J Therm Sci* 48(11): 2148-2158.
- [14] Al-Sumaily GF, Thompson MC (2013) Forced convection from a circular cylinder in pulsating flow with and without the presence of porous media. *Int J Heat Mass* 61: 226-244.
- [15] Al-Sumaily GF, Sheridan J, Thompson MC (2013) Validation of thermal equilibrium assumption in forced convection steady and pulsatile flows over a cylinder embedded in a porous channel. *Int Commun Heat Mass Transf* 43: 30-38.
- [16] Selimefendigil F, Föllner S, Polifke W (2012) Nonlinear identification of unsteady heat transfer of a cylinder in pulsating cross flow. *Comput Fluids* 53: 14-1.
- [17] Selimefendigil F, Öztop HF (2013) Identification of forced convection in pulsating flow at a backward facing step with a stationary cylinder subjected to nanofluid. *Int Commun Heat Mass Transf* 45: 111-121.
- [18] Selimefendigil F, Öztop HF (2014) Numerical study and identification of cooling of heated blocks in pulsating channel flow with a rotating cylinder. *Int J Therm Sci* 79: 132-145.
- [19] Huang Z, Zhang W, Xi G (2015) Natural convection in square enclosure induced by inner circular cylinder with time-periodic pulsating temperature. *Int J Heat Mass* 82: 16-25.
- [20] Sung HJ, Hwang KS, Hyun JM (1994) Experimental study on mass transfer from a circular cylinder in pulsating flow. *Int J Heat Mass* 37(15): 2203-2210.
- [21] Perwaiz J, Base T (1992) Heat transfer from a cylinder and finned tube in a pulsating crossflow. *Exp Therm Fluid Sci* 5(4): 506-512.
- [22] Ji TH, Kim SY, Hyun JM (2008) Experiments on heat transfer enhancement from a heated square cylinder in a pulsating channel flow. *Int J Heat Mass* 51(5): 1130-1138.
- [23] Iwai H, et al (2004) Laminar convective heat transfer from a circular cylinder exposed to a low frequency zero-mean velocity oscillating flow. *Int J Heat Mass* 47(21): 4659-4672.
- [24] Steggel N (1998) A numerical investigation of the flow around rectangular cylinders. University of Surrey.

- to power-law fluids. *Int J Heat Mass* 51(7): 1838-1853.
- [41] D'Alessio SJD, Dennis SCR (1995) Steady laminar forced convection from an elliptic cylinder. *J Eng Math* 29(2): 181-193.
- [39] Incropera F, DeWitt D (2002) *Fundamentals of heat and mass transfer*. 5th edn. John Wiley & Sons, New York.
- [40] Bharti R, Sivakumar P, Chhabra R (2008) Forced convection heat transfer from an elliptical cylinder