

ساختار جریان نوسانی و انتقال حرارت از دو سیلندر مربعی گرم پشت سرهم

امین اطمینان^۱

Etminan.amin@gmail.com

چکیده

بررسی جریان اطراف موانع با سطح مقطع‌های متفاوت و تعیین ضرایب نیروهای وارد بر آنها از طرف جریان، از اهمیت زیادی برخوردار است. همچنین تعیین میزان انتقال حرارت از این اجسام در مدارهای الکترونیکی جهت خنک‌کاری صحیح ارزش بالایی دارد. در این تحقیق بطور عددی در محدوده اعداد رینولدز $Re=1-200$ جریان اطراف موانع مربعی شکل پشت سرهم با فواصل مختلف بررسی شده است. با حل معادلات ناویر-استوکس و انرژی، کمیت‌های مختلف میدان جریان سیال و دما بدست آمده است. در محدوده اعداد رینولدز بررسی شده هر دو رژیم جریان‌های دائم و غیردائم بوجود می‌آیند. برای فاصله بین سیلندری $G=5$ عدد رینولدز بحرانی در محدوده $Re=35-40$ تعیین شده است. اثر افزایش عدد رینولدز و تغییر فاصله بین موانع بر الگوی جریان، میدان دما و همچنین کمیت‌های کلی جریان مطالعه شده است. مقایسه نتایج مختلف بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی و عددی موجود توافق خوبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه:

حجم محدود- جریان آرام- شبیه‌سازی عددی- ریزش گردابه- انتقال حرارت

۱- مقدمه

جریان اطراف اجسام با شکل‌های مختلف، یکی از مسائل مهم در مهندسی مکانیک است. از این دسته جریان‌ها می‌توان به جریان اطراف ساختمان و سازه‌های بلند، پایه‌های پل‌ها و سازه‌های دریایی، همچنین جریان اطراف مولدهای اغتشاش در مبدل‌های حرارتی اشاره کرد. زمانیکه جسمی در معرض جریان قرار دارد، در محل برخورد جریان با دیواره‌های جسم، نیروهای فشاری و اصطکاکی از طرف جریان بر جسم وارد خواهند شد. یک جسم جریان‌بند، جسمی است که سطح مقطع در مقابل جریان نسبتاً بزرگی داشته باشد. جریان پس از عبور از چنین جسمی، در ناحیه پشت آن می‌تواند یک ناحیه چرخشی و ویک بزرگ ایجاد نماید. به علاوه اجسام خط جریانی از قبیل ایرفویل‌ها نیز در زوایای حمله بزرگ می‌توانند شبیه به یک جسم جریان‌بند عمل کنند. همچنین جسمی که سطح مقطع مقابل جریان بزرگ‌تری داشته باشد، جسم جریان‌بندتر محسوب می‌شوند. ماتسوموتو در یک گردآوری به بررسی جریان عبوری از اجسام با سطح مقطع‌های مختلف و نحوه قرارگیری متفاوت پرداخته است [۱]. گانتر شو به بررسی اثر افزایش عدد رینولدز بر رفتار جریان اطراف اجسام با خاصیت جریان‌بندی کمتر و بیشتر پرداخته است [۲]. بررسی آزمایشگاهی آنها در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ($Re=10^4-10^7$) نشان داد که جریان اطراف اجسام دوبعدی می‌تواند کاملاً سه‌بعدی باشد. همچنین ساریگلو و یووز نیز بطور تجربی به بررسی جریان اطراف سیلندرهایی مربعی و دایره‌ای با شعاع هیدرولیکی مشابه پرداختند [۳].

در اعداد رینولدز بسیار کم، جریان کاملاً به سطح جسم چسبیده و جدایش جریان رخ نمی‌دهد. با افزایش عدد رینولدز، خطوط جریان از لبه‌های فرار جسم جدا شده و یک جفت ناحیه گردابه‌ای متقارن در پشت جسم ایجاد می‌شود. با افزایش بیشتر عدد رینولدز، ابعاد نواحی گردابه‌ای بوجود آمده، بزرگتر شده تا اینکه از حالت دائم خارج و بصورت یکی در میان از سطح جسم جدا و در جریان پایین دست ریزش می‌یابند. به این پدیده ناپایدار که با افزایش عدد رینولدز قدرتمندتر هم می‌شود، ریزش گردابه گویند. در این گذر، جریان از حالت دائم به حالت غیر دائم- تناوبی تبدیل می‌شود. ارتعاش بوجود آمده به واسطه ریزش گردابه، یکی از نگرانی‌های اصلی در مورد سازه‌هایی است که در معرض جریان قرار دارند. برای قادر بودن در جلوگیری کردن از ایجاد نیروهای آئرودینامیکی مخرب وارد بر سازه‌ها، ابتدا بایستی منشأ ایجاد این نیروها بطور واضح مشخص شود. مطالعات انجام شده، شباهت‌هایی بین جریان اطراف یک جسم جریان‌بند و دو جسم جریان‌بند را نشان می‌دهد. در این نوع جریان‌ها بعلاوه وجود دو جسم در مسیر جریان و اثر متقابل آنها

بر رفتار جریان اطراف یکدیگر، بر پیچیدگی‌های بررسی جریان اطراف یک جسم تنها می‌افزاید. این نوع جریان‌ها را می‌توان بر اساس تعداد، نحوه قرارگیری، شکل سطح مقطع جسم جریان‌بند و آزاد یا محصور بودن جریان تقسیم‌بندی نمود. تاتسوتانی و همکاران جریان ناپایای دوبعدی غیرقابل تراکم حول دو سیلندر مربعی با ابعاد متفاوت در حالت پشت سرهم در یک کانال با عرض ۲۰ برابر عرض سیلندر بزرگ را به دو روش آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند [۴]. آنها تأثیر فاصله بین سیلندرها بر رفتار جریان را برای $Re=200-1600$ بررسی کردند. جریان سیال و انتقال حرارت از دو سیلندر مستطیلی پشت سرهم در یک کانال توسط والنسیا شبیه‌سازی عددی شد [۵، ۶]. نتایج تحقیقات او نشان داد که وجود سیلندرهایی مستطیلی در برابر جریان، باعث افزایش ضریب اصطکاک شده و افت فشار را هم افزایش می‌دهد. روسالس و همکاران جریان اطراف دو سیلندر مربعی باندازه‌های متفاوت و نحوه قرارگیری مختلف نسبت به هم در یک کانال را به طور عددی شبیه‌سازی کردند [۷]. آنها نقش سیلندر بالادست، بر رفتار جریان اطراف سیلندر پایین‌دست را مطالعه کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که ضریب پسا سیلندر پایین دست با حرکت به طرف دیواره‌های کانال کاهش یافته و همچنین بیشترین مقدار عدد استروهل زمانی بدست می‌آید که سیلندرها در مرکز کانال و پشت سرهم قرار دارند. میزوشیما و آکیناگا بطور عددی به بررسی پدیده ریزش گردابه از یک ردیف سیلندر مربعی هم اندازه پرداختند [۸]. آنها عدد رینولدز بحرانی را برای فواصل بین سیلندری متفاوت تعیین نمودند و همچنین دریافتند که ریزش گردابه از سیلندرها می‌تواند هم فاز یا با اختلاف فاز باشد، که فاصله بین سیلندرها مشخص‌کننده این موضوع است. اطمینان و سوهانکار تأثیر فاصله بین سیلندری $G=2-5$ را بر رفتار جریان اطراف دو سیلندر مربعی و انتقال حرارت از آنها در اعداد رینولدز $Re=100,150,200$ مطالعه کردند [۹]. همچنین آنها اختلاف فاز ریزش گردابه از سیلندرها و میزان انتقال حرارت از آنها را مورد بررسی قرار دادند. بعلاوه ین و همکاران مشخصه‌های جریان اطراف دو سیلندر مربعی پشت سر هم نصب شده در یک مخزن آب را به روش آزمایشگاهی مطالعه نمودند [۱۰]. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه عددی جریان عبوری از دو مانع پشت سر هم با مقطع مربعی جهت یافتن اثرات تغییر عدد رینولدز و فاصله بین موانع بر ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت از موانع دما ثابت است. شکل (۱) هندسه در نظر گرفته شده را در شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد. با انجام محاسبات در محدوده اعداد رینولدز $Re=1-200$ ، عدد پراتل $Pr=0.71$ و فاصله بین

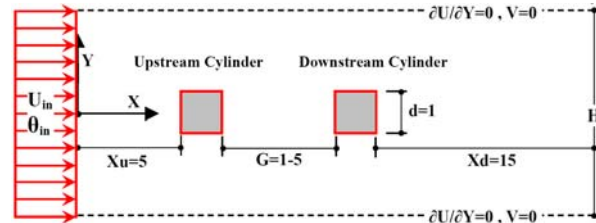
$$Nu = \frac{hd}{k} = -\frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{wall} \quad (5)$$

که h , k به ترتیب ضرایب انتقال حرارت جابجایی و رسانایی هستند و n امتداد عمود بر وجه سیلندرهاست.

جهت حل عددی معادلات از یک کد حجم محدود مبتنی بر الگوریتم SIMPEL و شبکه جابجا نشده استفاده شده است. در گسسته‌سازی معادلات، روش کوئیک برای ترم‌های جابجایی و روش کرانک-نیکلسون مرتبه دوم برای ترم زمانی بکار گرفته شده‌اند. همچنین گام زمانی 0.025 در اجراهای کامپیوتری در نظر گرفته می‌شود. در ورودی دامنه حل جریان یکنواخت $v_{in} = \theta_{in} = 0, U_{in} = 1$ بر دیوارهای سیلندرها شرط عدم لغزش و دمای ثابت یکنواخت $U_w = V_w = 0, \theta_w = 1$ در مرزهای بالا و پایین شرط دیوار بدون اصطکاک و در خروجی شرط مرزی جریان توسعه یافته استفاده شده است. برای حل عددی مسأله، بایستی میدان محاسباتی نشان داده شده در شکل (۱) را شبکه‌بندی کرد. بعلاوه وجود مرزهای جامد سیلندرها در مسیر جریان، از شبکه غیریکنواخت استفاده می‌شود. بدین منظور، در نواحی اطراف سیلندرها به اندازه ابعاد سیلندرها، شبکه‌های غیریکنواخت و به کمک توابع توزیع تانژانت هایدربولیک ایجاد شده است. در دیگر نواحی از شبکه‌هایی یکنواخت به اندازه آخرین شبکه تولید شده در نواحی با توزیع غیر یکنواخت شبکه، استفاده شده است. استفاده از تابع توزیع تانژانت هایدربولیک، علاوه بر کاهش خطای دنباله، تداخل بهتر نواحی با توزیع شبکه یکنواخت و غیریکنواخت را فراهم می‌سازد.

در شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) توزیع اندازه حجم‌های کنترل به ترتیب در امتداد محورهای X و Y نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین تراکم حجم‌های کنترل در مجاورت دیواره سیلندرها می‌باشد. همچنین در نواحی دور از دیواره سیلندرها، از شبکه‌های یکنواخت استفاده شده است. اندازه بدون بعد بزرگترین کوچکترین حجم کنترل به ترتیب در مجاورت دیواره سیلندرها برابر با 0.053 و در نواحی با توزیع یکنواخت برابر با 0.18 می‌باشد. عبارتی دیگر اندازه بزرگترین حجم کنترل در حدود 34 برابر کوچکترین حجم کنترل خواهد بود. در فاصله بین سیلندرها به علت تشکیل، رشد و ریزش نواحی چرخشی تشکیل شده پشت سیلندر بالادست و تأثیر بسزا بر رفتار جریان اطراف سیلندر پایین دست از شبکه‌های یکنواخت با اندازه کوچکتر در مقایسه با دیگر نواحی یکنواخت دامنه حل ایجاد شده است.

سیلندری مختلف بانک اطلاعاتی برای پارامترهای مختلف جریان و انتقال حرارت با شرایط مرزی در نظر گرفته شده بدست خواهد آمد.



شکل (۱): نحوه قرار گیری سیلندرها در مقابل جریان

۲- معادلات حاکم، روش حل عددی و شرایط مرزی

معادلات حاکم بر مسأله معادلات ناویر-استوکس و انرژی می‌باشند که برای جریان ناپایای دوبعدی غیر قابل تراکم در فرم بقایی و بصورت بدون بعد زیر ارائه شده‌اند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم در امتداد محور X :

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial(UU)}{\partial X} + \frac{\partial(VU)}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

معادله مومنتوم در امتداد محور Y :

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + \frac{\partial(UV)}{\partial X} + \frac{\partial(VV)}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{\partial(U\theta)}{\partial X} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial Y} = \frac{1}{\text{RePr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

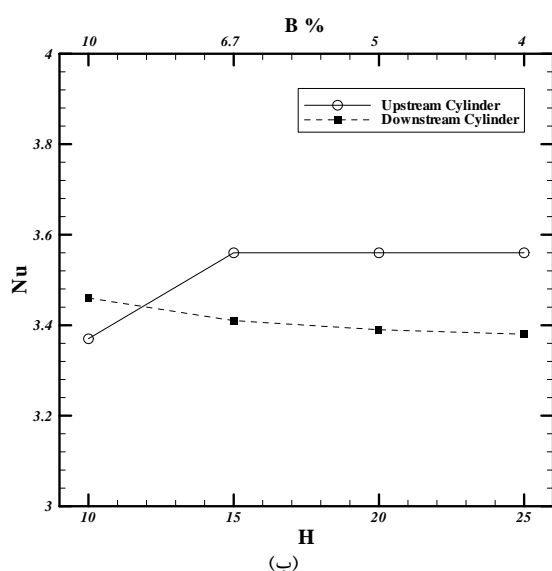
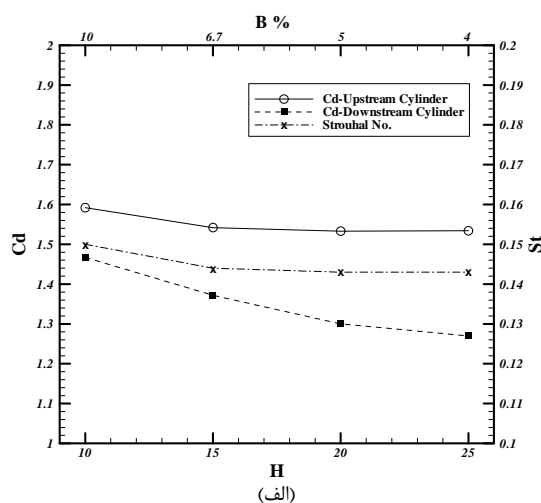
کلیه معادلات قبل به کمک روابط زیر بدون بعد شده‌اند:

$$\tau = \frac{t u_{in}}{d}, P = \frac{p}{\rho u_{in}^2}, U = \frac{u}{u_{in}}, V = \frac{v}{u_{in}}, \theta = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}$$

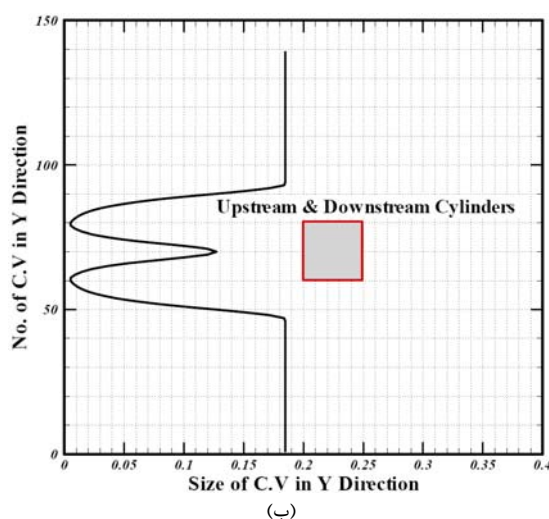
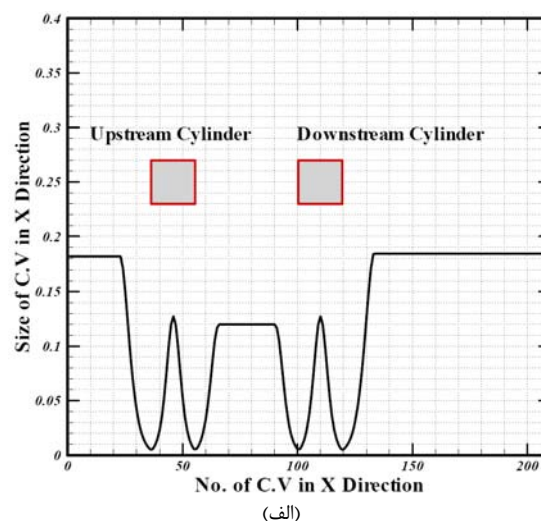
ضمناً کلیه ابعاد هندسی با پهنای سیلندرها، d بی‌بعد شده‌اند. بعلاوه برای بدون بعد کردن دما، از دمای سیلندرها T_w و دمای سیال ورودی T_{in} استفاده شده است.

معادلات پیش با توجه به ثابت بودن لزجت و چگالی سیال و با فرض قابل صرف‌نظر بودن پخش ویسکوز، بدست آمده‌اند. اعداد رینولدز، استروهال و پرانتل به صورت $\text{Pr} = \nu / \alpha, \text{St} = fd / u_{in}, \text{Re} = u_{in} d / \nu$ تعریف می‌شوند، که در آنها u_{in} سرعت جریان ورودی d ابعاد سیلندرها و f فرکانس ریزش گردابه هستند. همچنین α, ν, ρ به ترتیب چگالی، لزجت سینماتیکی سیال و ضریب پخش حرارتی هستند و ثابت فرض می‌شوند. عدد نوسلت موضعی بوسیله گرادیان دما عمودی بر دیوارهای سیلندرها بصورت زیر محاسبه می‌شود:

مسیر جریان و اثر متقابل آنها بر رفتار جریان عرضی اطراف یکدیگر، مطالعه نسبت انسداد لازم به نظر می‌رسد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که $H = 20 \times d$ ($B = 5\%$) نیز وجود مرزهای آزاد را تأیید می‌نماید. در شکل‌های (۳-الف و ۳-ب) اثر تغییر نسبت انسداد بر پارامترهای مختلف جریان نشان داده شده است. با توجه به اینکه مرزهای بالا و پایین میدان حل، بعنوان مرز بدون اصطکاک در نظر گرفته می‌شود، انتخاب H کوچک باعث اعمال یکنواختی میدان سرعت در نزدیکی این مرزها خواهد شد، در حالی که در واقعیت فیزیکی، جریان اطراف سیلندرها به فضای بیشتری برای تطبیق با جریان پس زده شده بوسیله سیلندرها نیاز دارد که این می‌تواند منجر به افزایش غیر واقعی سرعت موثر جریان در اطراف سیلندرها شود.



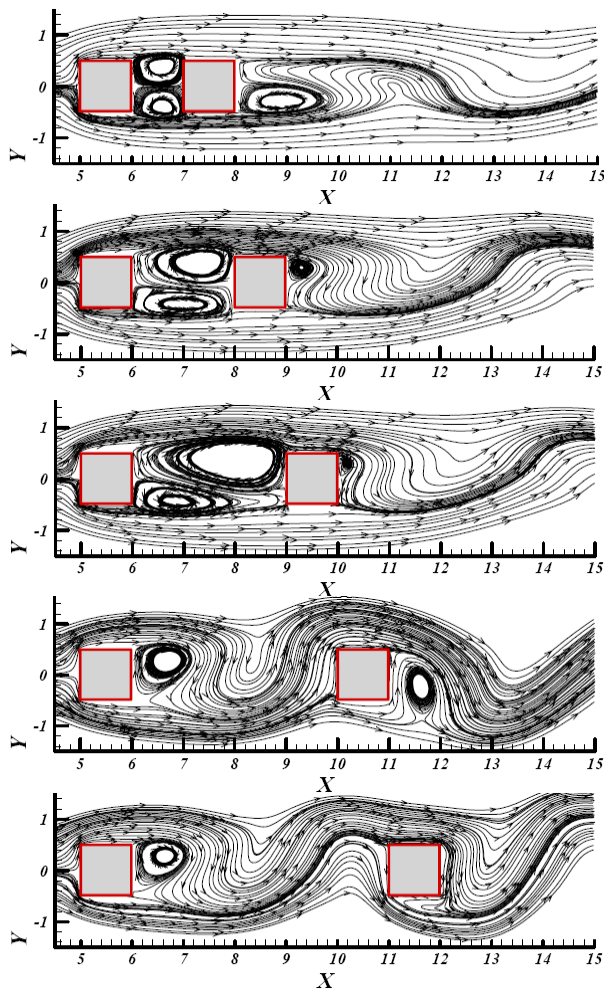
شکل (۳): اثر تغییر نسبت انسداد بر الف) ضریب پسا و عدد استروهال
ب) عدد نوسلت



شکل (۲): توزیع اندازه حجم‌های کنترل شبکه ایجاد شده،
الف) در امتداد محور X ب) در امتداد محور Y

برای ایجاد میدان محاسباتی مناسب، بایستی شرایط مرزی منطبق بر واقعیت‌های فیزیکی بر مسأله اعمال شود. انتظار می‌رود اگر عرض میدان محاسباتی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شود، جریان در مرزهای بالا و پایین دامنه حل به شرایط جریان آزاد میل کند. این به منزله اثر ناچیز مرزهای مذکور بر رفتار جریان در نواحی اطراف سیلندرهاست. بعبارتی دیگر این مرزها باید به اندازه کافی دور از سیلندرها باشند، تا شرط مرزی جریان آزاد را ارضا نمایند. نسبت عرض سیلندرها به عرض میدان حل $B = \frac{d}{H}$ را نسبت انسداد گویند. در مرجع بررسی دقیق و با جزئیات، اثر نسبت انسداد بر رفتار جریان اطراف یک سیلندر مربعی انجام شده است [۱۱]. در آنجا نشان داده شد که اگر $H = 20 \times d$ ($B = 5\%$) باشد، مرزها بطور مناسبی دور از سیلندر واقع شده‌اند. در تحقیق حاضر بعلاوه وجود دو سیلندر در

سیلندر بالادست آغاز می‌شود در محدوده $G=1-2$ قرار دارد. بعلاوه بررسی‌های انجام شده نشان‌دهنده کاهش فاصله بین سیلندری بحرانی با افزایش عدد رینولدز جریان است. عبارتی دیگر کاهش فاصله بین سیلندری موجب افزایش عدد رینولدز بحرانی خواهد شد. مثلاً برای فاصله بین سیلندری $G=2$ عدد رینولدز بحرانی در محدوده $Re < 100$ است در حالیکه برای فاصله بین سیلندری $G=1$ عدد رینولدز بحرانی در محدوده $Re > 100$ قرار دارد.



شکل (۴): خطوط جریان لحظه‌ای نواحی اطراف سیلندرها برای $G=1-5$, $Re=100$

در محدوده جریان غیردائم- تناوبی محاسبه مقادیر متوسط پارامترهای مختلف جریان و میدان متوسط‌گیری شده، با متوسط گیری زمانی برای تعداد صحیحی از دوره تناوب جریان انجام شده است. همچنین برای محاسبه مقادیر متوسط عدد نوسلت سیلندرها و وجوه مختلف آنها علاوه بر متوسط‌گیری زمانی، متوسط‌گیری مکانی نیز انجام گرفته است.

این افزایش سرعت، باعث افزایش عدد استروهال و کاهش بیشتر فشار خصوصاً در ناحیه مکش پشت سیلندرها شده و در نتیجه ضریب پسا افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود بیشترین تغییرات منحنی پارامترهای مختلف رسم شده در شکل‌های مذکور با کاهش نسبت انسداد از 10% تا $6/7\%$ است. همچنین ملاحظه می‌شود، کاهش بیشتر نسبت انسداد از $6/7\%$ تا مقدار 4% ، تغییرات بسیار ناچیزی بر نتایج بدست آمده برای کمیت‌های مختلف میدان جریان سیال و انتقال حرارت سیلندرها دارد. این در حالی است که در اثر کاهش هرچه بیشتر نسبت انسداد عرض میدان محاسباتی گسترش یافته و مدت زمان اجرای برنامه‌های کامپیوتری در اثر افزایش تعداد حجم‌های کنترل دامنه حل افزایش چشمگیری خواهد داشت. در نتیجه از استفاده شده است. افزایش چشمگیری خواهد داشت. در نتیجه از استفاده شده است. برای کلیه شبیه سازی های این تحقیق استفاده شده است.

۳- ارائه نتایج

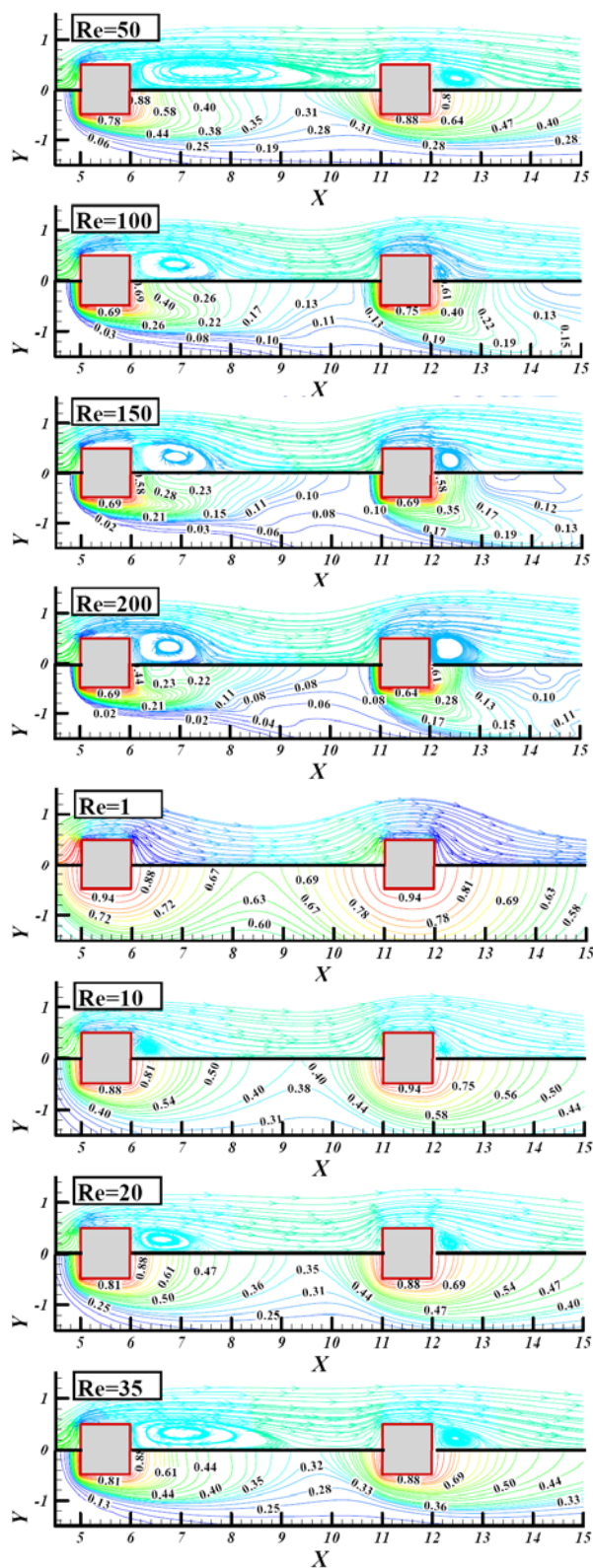
برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، مقادیر مختلف پارامترهای جریان با نتایج موجود برای هندسه یک سیلندری مقایسه شده است. علت این موضوع عدم وجود نتایج هندسه دو سیلندری برای اعداد رینولدز و شرایط مرزی مورد نظر در تحقیق حاضر است. حداکثر اختلاف مشاهده شده برای اعداد استروهال و عدد نوسلت متوسط سیلندر به ترتیب 5% و $2/4\%$ است. نتایج کامل این مقایسه در مرجع آورده شده است [۱۲]. در مطالعه حاضر جریان اطراف دو سیلندر با مقطع مربعی در محدوده اعداد $Re=1-200$ در جریان آرام و دوبعدی بررسی شده است. برای فاصله بین سیلندری $G=5$ در محدوده اعداد $Re \leq 35$ جریان بصورت دائم باقی مانده در حالیکه در محدوده اعداد $Re \geq 40$ جریان غیر دائم- تناوبی بوجود می‌آید. عدد رینولدز بحرانی نشان دهنده آغاز ریزش گردابه از هر دو سیلندر است که برای فاصله بین سیلندری $G=5$ در محدوده $Re=35-40$ تعیین شده است.

در شکل (۴) خطوط جریان نواحی اطراف سیلندرها برای $Re=100$ و فواصل بین سیلندری مختلف نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود برای فاصله بین سیلندری $G=1$ جریان اطراف سیلندر بالادست و ناحیه بین سیلندری بطور دائم بوده و ریزش گردابه تنها از سیلندر پایین دست رخ می‌دهد. با افزایش فاصله بین سیلندری تقارن جریان در ناحیه بین سیلندری محو شده و ریزش گردابه از هر دو سیلندر آغاز می‌شود. با این بررسی دریافت می‌شود که برای عدد رینولدز $Re=100$ فاصله بین سیلندری بحرانی که ریزش گردابه از

زمانی شده (تصاویر سمت راست) برای فاصله بین سیلندری $G=5$

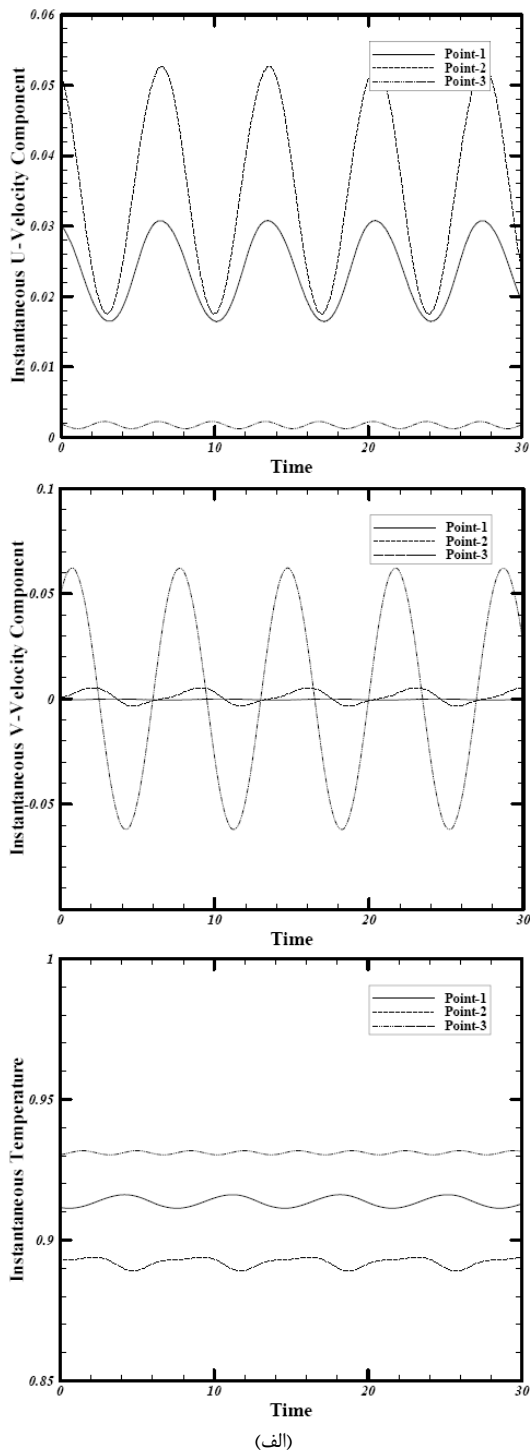
در شکل (۵) الگوی جریان نواحی اطراف سیلندرها نشان داده شده است. در محدوده جریان دائم، الگوی جریان لحظه‌ای و در محدوده جریان غیردائم، الگوی جریان متوسط‌گیری شده زمانی مشاهده می‌شود. نیمه بالایی تصاویر، خطوط جریان رنگ شده توسط فشار و نیمه پایینی، خطوط هم‌دما را نشان می‌دهند. در نیمه بالایی شکل (۵) مشاهده می‌شود که برای $Re=1$ خطوط جریان کاملاً به جداره سیلندرها چسبیده و پدیده جدایش جریان رخ نمی‌دهد. با افزایش عدد رینولدز و افزایش اینرسی جریان جدایش جریان رخ داده و نواحی گردابه‌ای در پشت سیلندرها بوجود می‌آیند. محل جدایش جریان همواره بر لبه‌های فرار سیلندر پایین‌دست قرار دارد این در حالی است که برای $Re \geq 125$ محل جدایش جریان از لبه‌های فرار سیلندر بالادست به لبه‌های فرار به لبه‌های حمله سیلندر بالادست دو ناحیه چرخشی چسبیده به وجوه بالایی و پایینی سیلندر بوجود می‌آید. با افزایش عدد رینولدز، این نواحی چرخشی در امتداد وجوه مذکور امتداد یافته و در جهت جریان عرضی نیز گسترش می‌یابند. بطوریکه بر نواحی چرخشی پشت سیلندر بالادست امتداد می‌یابند.

در شکل (۶-الف) الگوی دمای جریان لحظه‌ای نواحی اطراف سیلندرها برای عدد رینولدز $Re=100$ و فواصل بین سیلندری مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله بین سیلندری تقارن الگوی دما در فضای بین سیلندری محو شده و تراکم خطوط هم‌دما در مجاورت دیوارهای سیلندرها افزایش می‌یابد. افزایش تراکم خطوط هم‌دما به منزله افزایش گرادیان دما و افزایش انتقال حرارت از دیوارهای گرم سیلندرها خواهد بود. همچنین تعداد نواحی گرم جدا شده و ریزش یافته در جریان پایین‌دست سیلندرها بیانگر افزایش سرعت انتقال حرارت از سیلندرها در مقابل افزایش فاصله بین سیلندری است. در شکل (۶-ب) الگوی دمای جریان لحظه‌ای نواحی اطراف سیلندرها برای فاصله بین سیلندری $G=5$ در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. برای عدد رینولدز $Re=1$ بواسطه تقارن الگوی خطوط جریان و توزیع فشار نواحی اطراف سیلندرها، الگوی دمایی متقارنی وجود دارد. در حالیکه با افزایش عدد رینولدز الگوی متقارن توزیع دما از بین خواهد رفت. بعلاوه در عدد رینولدز $Re=50$ بواسطه بزرگ بودن ناحیه چرخشی بین سیلندری تقریباً تمام فضای بین سیلندرها از نواحی گرم پر شده است. این در حالی است که با افزایش عدد رینولدز و کوچک شدن ابعاد نواحی چرخشی بین

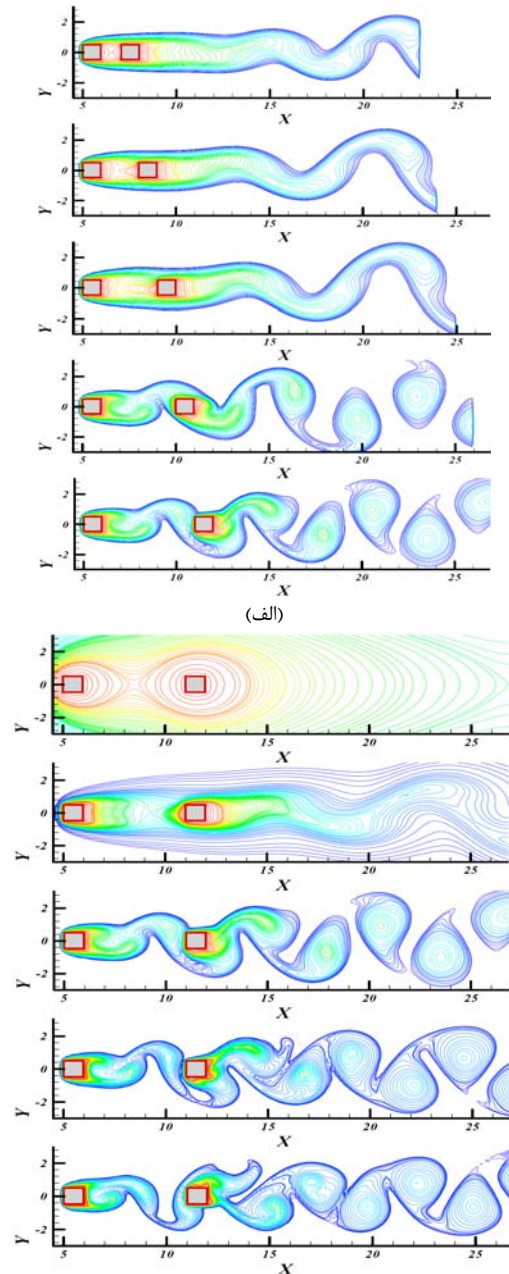


شکل (۵) خطوط جریان رنگ شده توسط فشار (نیمه بالایی تصاویر) و دما ثابت (نیمه پایینی تصاویر) نواحی اطراف سیلندرها در اعداد رینولدز مختلف در محدوده جریان دائم (تصاویر سمت چپ) و جریان غیردائم-متوسط‌گیری (تصاویر سمت راست)

در شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) تغییرات زمانی مؤلفه‌های سرعت و دمای جریان لحظه‌ای در نقاط مشخص شده اطراف سیلندرها نشان داده شده است. نقاط به ترتیب شماره در مجاورت میانه دیواره بالایی، لبه فرار بالایی (یا پایینی) و مجاورت میانه دیواره پشتی انتخاب شده‌اند.

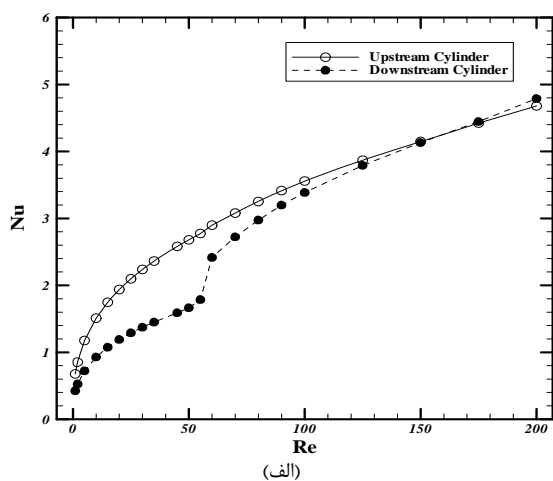


سیلندری، گرادیان دمایی در مجاورت دیوار پشتی سیلندر بالادست و دیوار جلویی سیلندر پایین دست افزایش می‌یابد. بعلاوه با افزایش عدد رینولدز گرادیان دمایی مجاور دیوارهای سیلندرها افزایش یافته و انتقال حرارت از سیلندرها نیز افزایش می‌یابد.

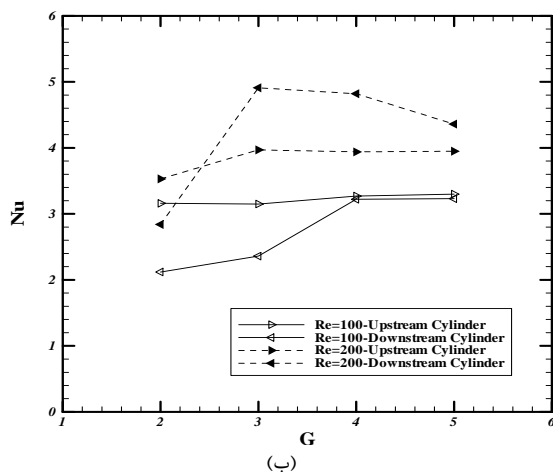


شکل (۶) الگوی دمایی لحظه‌ای نواحی اطراف سیلندرها در مقابل (الف) افزایش فاصله بین سیلندری $G=1-5$ برای $Re=100$ ، (ب) افزایش عدد رینولدز $Re=1,500, 1,000, 1,500, 2,000$ برای $G=5$

در شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) تغییرات عدد نوسلت متوسط سیلندرها در مقابل افزایش عدد رینولدز برای فاصله بین سیلندری $G=5$ و افزایش فاصله بین سیلندری برای اعداد رینولدز $Re=100, 200$ نشان داده شده است. عدد نوسلت متوسط سیلندرها با میانگین‌گیری مکانی از مقادیر توزیع عدد نوسلت وجوه مختلف سیلندرها در میدان متوسط‌گیری شده زمانی به دست آمده‌اند. افزایش عدد رینولدز جریان که به منزله افزایش اینرسی جریان است، موجب تراکم هر چه بیشتر خطوط هم دما در نواحی اطراف سیلندرها خواهد شد. تراکم خطوط هم دما (گرادیان شدیدتر) خود موجب افزایش اختلاف دمای سیلندرها و سیال مجاور می‌شود. این امر موجب افزایش انتقال حرارت از دیوارهای سیلندرها و به دنبال آن افزایش عدد نوسلت سیلندرها می‌شود.



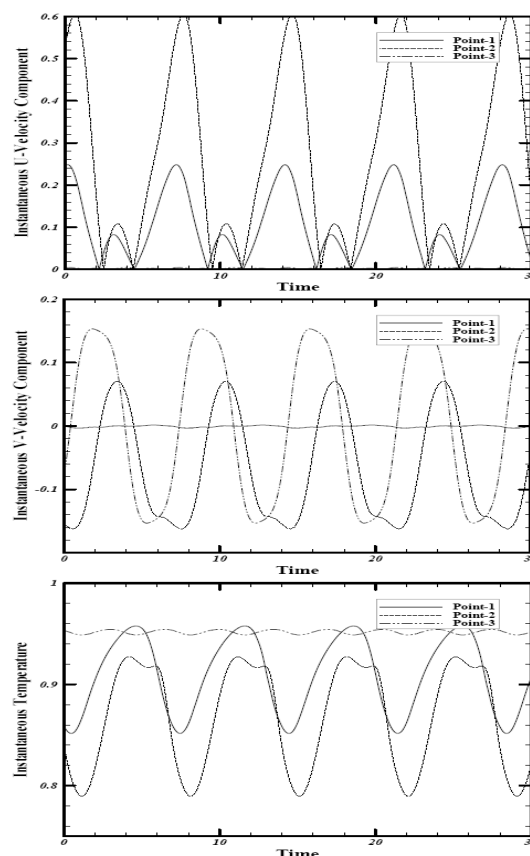
(الف)



(ب)

شکل (۸): تغییرات عدد نوسلت سیلندرها در مقابل الف) افزایش عدد رینولدز برای $G=5$ ب) افزایش فاصله بین سیلندری برای $Re=100, 200$

در شکل (۸-الف) تغییرات عدد نوسلت سیلندر پایین‌دست، افزایش نسبتاً شدیدی در محدوده اعداد رینولدز $Re=55-60$ دارد. علت این



(ب)

شکل (۷): تغییرات زمانی مؤلفه سرعت و دما در نقاط مشخص شده برای $G=5$ در اطراف، نقطه ۱ در مجاورت میانه دیواره بالایی، نقطه ۲ در مجاورت لبه فرار بالایی و نقطه ۳ در مجاورت میانه دیواره پستی

فاصله عمودی بدون بعد نقاط فوق تا دیواره‌های سیلندرها یا امتداد آنها برابر با 0.3 است. ملاحظه می‌شود نوسانات پارامترهای مشخص مربوط به سیلندر پایین‌دست بیش از سیلندر بالادست است. علت این امر قرار داشتن سیلندر بالادست در مسیر جریان برخوردی به سیلندر پایین‌دست است. همچنین بیشترین و کمترین نوسانات مؤلفه افقی سرعت و دما به ترتیب مربوط به نقاط ۲ و ۳ می‌باشد. نقطه ۳ بواسطه قرار گرفتن در ناحیه ویک سیلندرها دارای نوسانات کمتری است. این در حالی است که نقطه ۲ در معرض جریان طولی و عرضی ناشی از ریزش گردابه قرار داشته و بدین علت نوسانات مذکور در این ناحیه بیش از دیگر نواحی اطراف سیلندرها خواهد بود. همچنین نوسانات مؤلفه عمودی سرعت در نقطه ۳ بیشترین مقدار را دارد. علت این موضوع ناشی از امتداد قرارگیری دیوار پستی و لایه مرزی بوجود آمده در تشکیل، رشد و ریزش گردابه‌های پشت سیلندرها است.

حالی است که محل جدایش جریان همواره بر لبه‌های فرار سیلندر پایین‌دست قرار دارد. با تغییر محل جدایش جریان از لبه‌های فرار به لبه‌های حمله سیلندر بالادست، دو ناحیه چرخشی چسبیده به وجوه بالایی و پایینی آن بوجود می‌آید. همچنین با افزایش عدد رینولدز و فاصله بین سیلندرها سرعت ریزش نواحی گردابه‌ای نیز افزایش خواهد یافت.

همچنین ویژگی‌های انتقال حرارت، خطوط هم دما و عدد نوسلت سیلندرها برای $Pr=0.71$ ارائه شده است. بررسی‌ها نشان داد که افزایش عدد رینولدز جریان موجب افزایش تراکم خطوط هم دما در نواحی اطراف سیلندرها می‌شود. این امر باعث افزایش اختلاف دمای جداره‌های سیلندرها و سیال مجاور آنها می‌شود. در نتیجه انتقال حرارت از دیواره‌های سیلندرها نیز افزایش خواهد یافت. بیشترین و کمترین تراکم خطوط هم دما به ترتیب در مجاورت وجه جلویی و پشتی سیلندرها هستند. در نتیجه بیشترین و کمترین میزان انتقال حرارت به ترتیب از وجه جلویی و پشتی سیلندرها نیز می‌باشد. عدد نوسلت متوسط سیلندرها با میانگین‌گیری از مقادیر توزیع عدد نوسلت بر وجوه مختلف سیلندرها در میدان متوسط‌گیری شده محاسبه می‌شود. بعلاوه بررسی‌ها نشان‌دهنده افزایش عدد نوسلت سیلندرها در مقابل افزایش عدد رینولدز و فاصله بین سیلندرها است.

۵- فهرست علائم

B	نسبت انسداد
Cd	ضریب نیروی پسای کل وارد بر سیلندرها
Cl	ضریب نیروی برآ وارد بر سیلندرها
d	ابعاد سیلندرهای مربعی
f	فرکانس ریزش گردابه
G	فاصله بدون بعد بین سیلندرها
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
H	عرض میدان محاسبات
k	ضریب انتقال حرارت رسانایی
n	امتداد عمود بر دیواره سیلندرها
Nu	عدد نوسلت
p	فشار
P	فشار بدون بعد
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهل
t	دما

موضوع کوچک شدن ابعاد نواحی چرخشی بین سیلندری است که فرصت بیشتری جهت انتقال حرارت سیال گرم با جریان آزاد و از دست دادن دما پیش از برخورد با وجه جلویی سیلندر پایین‌دست را بوجود می‌آورد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که برای محدوده اعداد رینولدز $Re \geq 125$ به علت تغییر محل جدایش جریان از لبه‌های فرار به لبه‌های حمله سیلندر بالادست و تشکیل دو ناحیه چرخشی چسبیده به وجوه بالایی و پایینی آن، میزان انتقال حرارت از آن وجوه در مقایسه با وجوه مشابه سیلندر پایین دست کاهش یافته و این امر موجب افزایش نسبی عدد نوسلت سیلندر پایین‌دست نسبت به سیلندر بالادست خواهد شد. بیشترین و کمترین میزان انتقال حرارت و عدد نوسلت به ترتیب مربوط به وجه جلویی و پشتی سیلندرهاست. علت این موضوع تشکیل ناحیه سکون در مجاورت وجه جلویی و تشکیل ناحیه چرخشی در پشت سیلندرها می‌باشد.

در شکل (۸-ب) تغییرات عدد نوسلت سیلندرها در مقابل افزایش فاصله بین سیلندری برای اعداد رینولدز $Re=100,200$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر فاصله بین سیلندری، بیشترین تأثیر را بر عدد نوسلت سیلندر پایین‌دست دارد. بدین دلیل که افزایش فاصله سیلندرها موجب افزایش تبادل حرارتی سیال گرم با محیط سرد اطراف پیش از برخورد به سیلندر پایین‌دست شده و این امر گرازیان دما در نواحی مجاور دیواره‌های سیلندر پایین‌دست و میزان انتقال حرارت از آن را افزایش داده است. تغییرات نسبتاً شدید منحنی عدد نوسلت سیلندر پایین‌دست ناشی از تغییرات شدید الگوی جریان در فاصله بین سیلندری با افزایش فاصله سیلندرها از یکدیگر است. در نتیجه سرعت ریزش گردابه‌ها و سرعت انتقال حرارت از سیلندر پایین‌دست نیز افزایش خواهد یافت.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به مطالعه و بررسی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت اطراف دو سیلندر مربعی هم اندازه دو بعدی در محدوده جریان آرام ($1 \leq Re \leq 200$) و فواصل بین سیلندری متفاوت پرداخته است. بررسی‌ها نشان داد که برای $G=5$ جریان در محدوده $Re \leq 35$ دائم است. در حالی که در محدوده $Re \geq 40$ غیر دائم می‌شود. گذر از حالت دائم به حالت غیر دائم-تناوبی در محدوده $Re=35-40$ رخ می‌دهد. بر اساس محل و نحوه جدایش جریان سه حالت متفاوت مشاهده می‌شود. اول: آغاز جدایش جریان از لبه‌های فرار سیلندرها در محدوده $1 < Re \leq 2$ برای سیلندر بالادست و $2 < Re \leq 5$ برای سیلندر پایین دست. دوم: آغاز ریزش گردابه از لبه‌های فرار سیلندرها در محدوده $35 < Re \leq 40$. سوم: آغاز جدایش جریان از لبه‌های حمله سیلندر بالادست در محدوده $100 < Re \leq 125$. این در

- [5] Valencia, A., "Unsteady Flow and Heat Transfer in a Channel with a Built-in Tandem of Rectangular Cylinders", Numerical Heat Transfer, 1996, Part A, 26, pp. 613-623.
- [6] Valencia, A., "Numerical Study of Self-Sustained Oscillatory Flows and Heat Transfer in Channels with a Tandem of Transverse Vortex Generators", Heat and Mass Transfer, 1998, 33, pp. 465-470.
- [7] Rosales, J. L., Ortega, A. and Humphrey, J. A. C., "A Numerical Simulation of the Convective Heat Transfer in Confined Channel Flow Past Square Cylinders: Comparison with Inline and Offset Tandem Pairs", Int. J. of Heat and Mass Transfer, 2001, 44, pp. 587-603.
- [8] Mizushima, J. and Akinaga, T., "Vortex Shedding from a Row of Square Bars", Fluid Dynamics Research, 2003, 32, pp. 179-191.
- [۹] اطمینان، ا. و سوهانکار، ا.، "مطالعه جریان و انتقال حرارت غیردائم اطراف دو سیلندر در یک خط"، پانزدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۶.
- [10] Yen, S. C., San, K. C. and Chuang, T. H., "Interactions of Tandem Square Cylinders at Low Reynolds numbers. Experimental Thermal and Fluid Science", accepted for publication, 2007.
- [11] Sohankar, A., Norberg, C. and Davidson, L., "Low-Reynolds-Number Flow Around a Square Cylinder at Incidence: Study of Blockage", Onset of Vortex Shedding and Outlet Boundary Condition, Int. J. for Numer. Meth. In Fluids, 1998, 26, pp. 39-56.
- [۱۲] اطمینان، ا.، "شبیه‌سازی عددی جریان سیال و انتقال حرارت حول دو سیلندر با مقطع مربعی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۱۳۸۵.
- u مولفه سرعت در امتداد جریان
- U مولفه سرعت بدون بعد در امتداد جریان
- v مولفه سرعت عمود بر امتداد جریان
- V مولفه سرعت بدون بعد عمود بر امتداد جریان
- x مختصات در امتداد جریان
- X مختصات بدون بعد در امتداد جریان
- Xd فاصله بدون بعد سیلندر پایین‌دست تا مرز خروجی
- Xu فاصله بدون بعد سیلندر بالادست تا مرز ورودی
- y مختصات عمود بر امتداد جریان
- Y مختصات بدون بعد عمود بر امتداد جریان
- علائم یونانی**
- α ضریب پخش حرارتی
- θ دمای بدون بعد
- ν لزجت سینماتیکی
- ρ چگالی سیال
- τ زمان بدون بعد
- ۶- مراجع**
- [1] Matsumoto, M., "Vortex Shedding of Bluff Bodies A Review", J. Fluids and Structures, 1999, 13, pp. 791-811.
- [2] Günter Schewe, "Reynolds-number Effects in Flow Around More-or-less Bluff Bodies", J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2001, 89, pp. 1267-1289.
- [3] Sarioglu, M. and Yavuz, T., "Subcritical Flow Around Bluff Bodies", AIAA, 2002, 40, 7, pp. 1257-1268.
- [4] Tatsutani, K., Devarakonda, R. and Humphrey, J. A. C., "Unsteady Flow and Heat Transfer for Cylinder Pairs in a Channel", Int. J. Heat Mass Transfer, 1993, 13, pp. 3311-3328.