مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1397، دوره 18، شماره 02، ص‌ص 135-146

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی ساختار جریان اطراف دو سیلندر مربعی و مثلثی پشت سر هم

اسماعیل جان‌زمین[1]، علی‌اکبر دهقان[2*]، علیرضا موحدی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

3- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

* یزد، صندوق پستی 741-89195، adehghan@yazd.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 02 آبان 1396
پذیرش: 14 دی 1396
ارائه در سایت: 05 بهمن 1396

کلید واژگان:
سیلندر مثلثی
سیلندر مربعی
نیروهای آیرودینامیکی
فشار سطحی
آرایش پشت سر هم

چکیده

در این مطالعه، مشخصات جریان حول دو سیلندر دو بعدی با مقاطع مربع و مثلث متساوی الاضلاع در آرایش پشت سر هم به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در تونل باد مدار باز مادون صوت با حداکثر اغتشاشات جریان آزاد 0.3 درصد انجام شده است. بررسی‌ها در آرایش پشت سرهم با جابه جا کردن سیلندر مربعی پایین دست در راستای جریان در فواصل مختلف از سیلندر مثلثی بالادست انجام شده است. اندازه‌گیری‌ها در این مطالعه با استفاده از دستگاه‌های فشارسنج 32 کاناله، دستگاه اندازه‌گیری نیرویی و جریان سنج سیم داغ انجام شده است. سیلندر مربعی در فواصل مختلف و اعداد رینولدز 26000 و 37000 و 46000 و 51000 در پایین دست سیلندر مثلثی قرار گرفته است. در این مطالعه نیروهای برآ و پسای متوسط و نوسانی وارد بر سیلندر مربعی در فواصل مختلف اندازه‌گیری شده است. همچنین توزیع فشار متوسط و نوسانی روی سطح دو سیلندر در فواصل مختلف از یکدیگر اندازه‌گیری شده است. فرکانس ریزش گردابه در آرایش دو سیلندر پشت سر هم با استفاده از جریان سنج سیم داغ و نوسانات فشار سطحی سیلندرهای بالادست و پایین دست اندازه گیری و مقایسه شده است. از مهم‌ترین نتایج مطالعه حاضرمی‌توان به مشاهده دو الگوی مختلف برای جریان اشاره کرد که در فواصل کمتر از فاصله‌ی بحرانی، ریزش گردابه از سیلندر بالادست رخ نمی‌دهد. در فواصل بیشتر از فاصله‌ی بحرانی ریزش گردابه از هر دو سیلندر مثلثی و مربعی اتفاق می‌افتد. فاصله بحرانی برای این آرایش سه برابر طول ضلع سطح مقطع سیلندرها به دست آمد.

Experimental investigation of flow structure around two dimensional square and triangular tandem cylinders

Esmaeil Janzamin[1], Ali Akbar Dehghan[2*], Alireza Movahdi[3]

Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
* P.O.B. 89195-741, Yazd, Iran, adehghan@yazd.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 October 2017
Accepted 04 January 2018
Available Online 25 January 2018

Keywords:
Triangular cylinder
Square cylinder
Aerodynamic forces
Surface pressure
Tandem arrangement

ABSTRACT

In this study, the flow characteristics around two tandem square and equilateral triangle cylinders have been experimentally investigated. Experiments were conducted in an open-circuit subsonic wind tunnel with maximum free-stream turbulence level of 0.3%. Investigations for tandem arrangement were performed by moving the downstream square cylinder along the flow direction at various distances from the upstream triangular cylinder. Measurements were performed using 32-channel pressure transducer, three-component balances and hotwire anemometer. Square cylinder was placed at various distances from the upstream triangular cylinder and the flow Reynolds numbers were chosen to be 26000, 37000, 46000, and 51000. In this study, the mean and fluctuating lift and drag forces were measured for square cylinder at different spacings. Also, the distribution of mean and fluctuating surface pressure on the two-cylinders were measured. The vortex shedding frequency was measured by using both hotwire and surface pressure fluctuations on both cylinders and the results obtained by these two different measurement methods were compared. One of the most important outcome of the present study is the observation of two different flow patterns. It is noticed that the vortex shedding from the upstream cylinder was eliminated for cylinder distances lower than the critical spacing while for distances more than the critical spacing, the vortex shedding occurs from both triangular and square cylinders. The critical distance for this arrangement was obtained to be around three times of the length of the side length of the cylinders.

1- مقدمه

صرف نظر از جنبه علمی شناخت فیزیک جریان در اطراف دو سیلندر با آرایش پشت سر هم، وجود اجسام و اشیاء به این شکل در طبیعت موجب شده است که پژوهشگران مطالعات مختلفی را پیرامون این موضوع انجام دهند. هندسه‌های سیلندری شکل در حوزه های مختلف کاربرد دارند. از جمله کاربردهای مهندسی جریان در اطراف سیلندرها در آرایش‌های مختلف از قبیل پشت سر هم، می‌توان به خطوط انتقال دوتایی صنعت نفت و گاز ، دو پل معلق موازی، لوله‌های مبدل حرارتی، کابل‌ها، خطوط لوله، جابه‌جایی مواد

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

E. Janzamin, A. A. Dehghan, A. Movahdi, Experimental investigation of flow structure around two dimensional square and triangular tandem cylinders, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 135-146, 2018 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

آلاینده در اطراف آسمان‌خراش‌های متوالی و ارابه‌های فرود هواپیماها نام برد. در جریان حول سیلندرهای متوالی با آرایش پشت سر هم عامل مهم و تاثیرگذار در الگوهای جریان و ضرایب آیرودینامیکی سیلندرها فاصله‌ی بین دو سیلندر است [1].

در دهه‌های اخیر، تحقیقات زیادی روی جریان اطراف سیلندرهای متوالی با آرایش پشت سرهم با هندسه‌های گوناگون انجام شده است. در هریک از این مطالعات، با توجه به نظر محققین، جریان حول سیلندرها از دیدگاه خاصی بررسی شده است که از جمله می‌توان به بررسی ضرایب نیرو [2-6]، ریزش‌گردابه [7,3]، اعداد استروهال [7,3]، توزیع فشار [9,8,4]، الگوهای جریان[10,5] اشاره کرد. در مطالعات پیشین نیز اکثراً دو الگوی جریان با تغییر فاصله بین دو سیلندر بیان شده است[3-5]. الگوی جریان شماره یک که لایه‌ی برشی جدا شده از لبه سیلندر مثلثی در پایین دست سیلندر مربعی فرود می‌آید. در این حالت یک ناحیه گردابه‌ای شبه پایا در بین دو سیلندر تشکیل می‌شود. در الگوی جریان شماره یک ریزش گردابه از سیلندر پایین دست اتفاق می‌افتد. در الگوی جریان شماره دو جدایش متناوب لایه برشی از سیلندر بالادست، تشکیل گردابه‌هایی قوی در ناحیه پشت سیلندر و ریزش گردابه از سیلندر بالادست در بین دو سیلندر اتفاق می‌افتد. در فواصل بین دو سیلندر، فاصله‌ای که تغییر الگوی جریان از الگوی شماره یک به دو رخ می‌دهد، فاصله‌ی بحرانی نامیده شده که از اهمیت خاصی برخوردار است.

تاکنون مطالعات زیادی روی جریان حول دو سیلندر متوالی انجام شده است. ساکامتو و همکاران [4] طی یک مطالعه تجربی نیروهای آیرودینامیکی متوسط، نوسانی، عدد استروهال و توزیع فشار نوسانی را برای دو سیلندر مربعی متوالی با آرایش پشت سرهم در فواصل مختلف مورد بررسی قرار دادند. از نتایج این کار می‌توان به ارائه دو الگوی متفاوت برای جریان بسته به فاصله‌ی بین دو سیلندر اشاره کرد. فاصله‌ی 3 برابر طول سیلندر به عنوان فاصله‌ی بحرانی تشخیص داده شد که بعد از این فاصله ریزش گردابه از دو سیلندر اتفاق می‌افتد. ایگاراشی [5] اثر استفاده از یک سیلندر دایره‌ای کوچک در بالادست سیلندر مربعی برای کنترل جریان حول آن در فواصل مختلف بین آنها را به صورت تجربی با استفاده از اندازه‌گیری توزیع فشار سطحی مورد بررسی قرار داد. نشان داده شد، نیروی پسای سیلندر مربعی برای فواصل مختلف بین دو سیلندر در محدوده d/D بین 0.1 تا 0.2، برای فاصله‌ی بین دو سیلندر بزرگتر از فاصله‌ی بحرانی، حدود 50 درصد کاهش می‌یابد (d قطر سیلندر دایره‌ای و D طول ضلع سطح مقطع سیلندر مربعی هستند). در فواصل بین دو سیلندر کمتر از فاصله‌ی بحرانی نیروی پسا حدود 70 درصد کاهش می‌یابد. لو و همکاران [6] به روش تجربی با استفاده از انتگرال‌گیری توزیع فشار سطحی نیروهای آیرودینامیکی وارد بر دو سیلندر مربعی ثابت و همجنین دارای ارتعاش را در دو آرایش پشت سر هم و در کنار هم مورد بررسی قرار دادند. با تغییر در فاصله‌ی بین دو سیلندر و نوسان یکی یا هر دو سیلندر، ضرایب بی‌بعدی همچون ضرایب برآ، پسا و ضریب فشار متوسط و نوسانی محاسبه و گزارش شد. از نتایج این کار می‌توان به این مورد اشاره کرد که هنگامی که سیلندر بالادست در آرایش پشت سرهم نوسان می‌کند فاصله‌ی بحرانی کاهش می‌یابد. کیم و همکاران [7] با استفاده از PIV[1] جریان اطراف دو سیلندر مربعی پشت سر هم را بررسی نموده و ورتیستیه، شدت آشفتگی و انرژی جنبشی آشفتگی را به دست آوردند. طبق نتایج به دست آمده از این مطالعه در فاصله‌ی بحرانی 2.5 برابر طول سیلندر کمترین مقدار عدد استروهال رخ می‌دهد. سلام و همکاران [9,8] با بررسی تجربی و عددی جریان حول سیلندرهای مثلثی (با ابعاد کوچکتر از مربعی) و مربعی توزیع فشار و ضریب پسا را در فواصل و اعداد رینولدز مختلف به دست آوردند. از مهم‌ترین نتایج این مطالعه می‌توان به این مورد اشاره کرد که الگو و روند تغییرات توزیع فشار سطحی بیشتر به هندسه سیلندرها بستگی دارد؛ در حالی که فاصله بین دو سیلندر و اعداد رینولدز متفاوت تنها در مقدار ضریب فشار تاثیر گذار است. همچنین قرارگیری سیلندر مثلثی در بالادست سیلندر مربعی نیروی پسای وارد بر سیلندر مربعی را در بیشترین حالت به میزان 49% کاهش می‌دهد که به علت تاخیر در جدایش جریان از سیلندر مربعی است. سامیون و همکاران [10] بررسی عددی نویز آیرودینامیکی ناشی از جریان اطراف سیلندر مربعی و قرار دادن یک سیلندر مثلثی برای کاهش نویز منتشر شده از سیلندر مربعی را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق اثر قرار گیری سه نمونه سیلندر مثلثی در دنباله سیلندر مربعی در عدد رینولدز 22000 به صورت عددی با استفاده از مدل آشفتگیk-w sst با نرم افزار اوپن فوم[2] بررسی شده است. از مهم‌ترین نتایج مطالعه مذکور، کاهش سطح نویز به علت کاهش نوسانات نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سیلندر مربعی و مثلثی است. همچنین ریزش گردابه که در فاصله بین دو سیلندر رخ می‌دهد باعث تشدید نیروهای نوسانی وارد به سیلندر مثلثی و در نتیجه سطح بالاتری از نویز منتشرشده می‌شود.

ملاحظه می‌شود که در مطالعات قبلی جریان حول سیلندرهای متوالی با آرایش پشت سرهم برای سیلندرهای با مقاطع یکسان دایره‌ای، مربعی و مثلثی بررسی شده است. برای سیلندرها با ابعاد متفاوت هم تعداد محدودی مطالعه روی سیلندرهای متوالی پشت سر هم دایره-مربع، مثلث-مربع انجام شده است. در کنار پژوهش‌های ذکر شده، هدف از مطالعه تجربی حاضر، بررسی تجربی تأثیر قرارگیری سیلندر مثلثی در بالادست سیلندر مربعی در فواصل مختلف بین دو سیلندر است. چرا که فاصله‌ی بین دو سیلندر از پارامترهای مهم در جریان حول دو سیلندر پشت سرهم بوده و تعیین فاصله‌ی بحرانی برای چنین جریان‌هایی بسیار مهم است. در مطالعه حاضر ابعاد ضلع سیلندرها با مقاطع مربع و مثلث یکسان است که مطابق اطلاعات نویسندگان، در مطالعات گذشته برای سیلندرهای پشت سرهم بررسی نشده است. همچنین در مطالعه حاضر، بررسی جامعی بر روی جریان اطراف سیلندرهای مثلثی و مربعی انجام شده است و بین نتایج به دست آمده از تجهیزات مختلف شامل دستگاه اندازه‌گیری نیرویی، سنسورهای فشار سطحی و جریان سنج سیم داغ ارتباط برقرار شده است. به‌علاوه، در مطالعه حاضر، برای به دست آوردن فرکانس ریزش گردابه از نوسانات فشارسطحی سیلندر بالادست و پایین دست استفاده و مقایسه شده که در مطالعات پیشین چنین پژوهشی انجام نشده است.

2- تجهیزات آزمایشگاهی و روند انجام آزمایش‌ها

در این بخش ابتدا به معرفی تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده در آزمایش‌ها پرداخته شده و سپس روند انجام آزمایش‌ها بیان شده است.

2-1- تونل باد

مطالعه تجربی حاضر در تونل باد سرعت پایین مدار باز دانشگاه یزد دارای طول اتاق آزمون 2.4m و ابعاد سطح مقطع 457 mm×457 mm صورت گرفته

[1] Particle Image Velocimetry

[2] OpenFOAM

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

است. حداکثر سرعت تونل باد در حدود 25 m/s و شدت آشفتگی جریان آزاد در تمام سرعت‌های آزمایش کم‌تر از0.3 درصد است. به منظور بررسی تجربی جریان پیرامون سیلندرهای پشت سر هم مثلثی و مربعی دو بعدی، به دلیل نیاز به عبور سنسورهای فشار از درون سیلندرها دو سیلندر یکی با مقطع مثلث متساوی الاضلاع با طول ضلع 50mm و دیگری با مقطع مربعی به طول ضلع 50mm، هر دو با ارتفاعی برابر با عرض مقطع آزمون تونل باد دانشگاه یزد(l)، یعنی 457mm و از جنس پلکسی گلس ساخته شد. سطوح سیلندرها کاملاً صیقلی بوده تا بتوان از اثرات زبری سطح صرف نظر کرد. نسبت انسداد سیلندر تقریباً 0.1 (نسبت مقطع در مقابل جریان سیلندر به مقطع اتاق آزمون) است. عدد رینولدز با رابطه (1) محاسبه می‌شود که در رابطه مذکور، U_∞ سرعت جریان بالادست، D طول ضلع سطح مقطع سیلندرها و 10^{-5} ν =1.45×m^2/s لزجت سینماتیکی هوا است. برای ایجاد امکان مقایسه با مطالعات پیشین آزمایش‌ها در چهار سرعت بالادست U_∞=7.6, 10.8, 13.4, 14.9 m/s به ترتیب متناظر با اعداد رینولدز تقریبی 26000, 37000, 46000, 51000 انجام شدند.

$$\mathrm{Re} = \frac{U_\infty D}{\upsilon} \tag{1}$$

2-2- دستگاه اندازه‌گیری نیرویی تونل باد

نیروهای آیرودینامیکی از جمله نیروهای برآ و پسا و نیز گشتاور پیچشی وارد بر سیلندر با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نیرویی TQ-TE81 با دقت 2% مقدار اندازه‌گیری سنجیده شده است. فرکانس داده برداری دستگاه اندازه‌گیری نیرویی در این آزمایش‌ها 100 Hz بوده و داده‌های خروجی به صورت لحظه‌ای با زمان ثبت شد.

3-2- دستگاه اندازه‌گیری فشارسنج 32 کاناله

برای اندازه‌گیری فشار لحظه‌ای روی وجه های سیلندرهای مثلثی و مربعی از دستگاه مبدل فشار 32 کاناله با دقت 0.1% کل محدوده‌ی عملکردی سنسور[1] استفاده شده است. داخل این دستگاه به تعداد کانال‌های خروجی، سنسورهای فشار قرار دارد که توسط کارت مبدل آنالوگ به دیجیتال مقادیر لحظه‌ای فشار را به کامپیوتر برای پردازش‌های بعدی انتقال می‌دهد. آفست-گیری مقادیرخروجی این دستگاه به صورت نرم افزاری انجام می‌شود.

4-2- دستگاه جریان سنج سیم داغ

در این مطالعه ثبت نوسانات سرعت به کمک جریان سنج سیم داغ، با مدار دما ثابت ساخت شرکت فرا سنجش صبا انجام شد. زیرا این تجهیز از بهترین تجهیزات اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه است. این جریان سنج سیمی از جنس تنگستن، به ضخامت 5μm و به طول تقریبی 1.5 mm دارد. پراب این دستگاه نیز توسط یک انتقال دهنده داخل اتاق آزمون در راستای Z،Y،X به حرکت در می‌آید. پراب به کمک یک نگهدارنده، به انتقال دهنده وصل می‌شود. قبل از شروع اندازه‌گیری، دستگاه سیم داغ به صورت استاتیکی و دینامیکی کالیبره شده است.

در کلیه آزمایش‌های مطالعه‌ی حاضر سیلندر مربعی توسط میله‌ای به قطر 12mm به دستگاه اندازه‌گیری نیرویی جهت بررسی نیروهای آیرودینامیکی و ضرایب مربوطه متصل شده است. سیلندر مثلثی بالادست به دریچه تعبیه شده روی اتاق آزمون تونل متصل و ثابت شده است. آزمایش-های مورد نیاز در فواصل مختلف بین دو سیلندر انجام شده‌اند. این فواصل در محدوده 0.5 تا 7 برابر طول ضلع سطح مقطع سیلندرها در نظر گرفته شده اند. در "شکل 1" پارامترهای موجود در مساله تعریف و معرفی شده‌اند که L فاصله‌ی بین دو سیلندر است.

3- تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا به دلیل نداشتن مرجع مشابه با مطالعه حاضر و عدم امکان اعتبارسنجی تجهیزات و روش‌های تجربی، نتایج مختصری از آزمایش‌های صورت گرفته روی تک سیلندر مربعی ارائه شده است. در ادامه نتایج جریان حول دو سیلندر با مقاطع مثلث متساوی الاضلاع و مربع در آرایش پشت سر هم با ابعاد یکسان ارائه می‌شود. نتایج مربوط به پارامترهای مختلف جریان شامل ضرایب متوسط و نوسانی فشار، نیروهای برآ و پسای و نیز محاسبه‌ی عدد استروهال از تجهیزات متفاوت برای اعداد رینولدز و فواصل مختلف گزارش می‌شوند.

1-3- ضریب پسا متوسط برای تک سیلندر مربعی

نیروهای برآ و پسا با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نیرویی سنجیده شده است. ضریب پسا طبق رابطه‌ی (2) تعریف می‌شود که C_D ضریب پسا، F_D نیروی پسا، ρ چگالی سیال، U_∞ سرعت جریان بالادست و Dl سطح پیشانی سیلندر مربعی است[11].

$$C_D = \frac{F_D}{{}^1\!/_2\,\rho U_\infty{}^2 Dl} \tag{2}$$

در آزمایش‌های مربوط به این بخش، سیلندر مربعی مورد مطالعه توسط میله‌ای به قطر 12mm به دستگاه اندازه‌گیری نیرویی متصل شده است. این آزمایش در زاویه حمله صفر درجه و چهار عدد رینولدز جریان انجام شده است. نتایج نیروی پسای سیلندر مربعی در چهار عدد رینولدز که از دستگاه اندازه‌گیری نیرویی به دست آمده در "شکل 2" با نتایج تجربی درنینو [12] و نایزلی [13] مقایسه شده است.

در زاویه حمله صفر به علت تقارن موجود در الگوهای متوسط جریان گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر متقارن هستند. بنابراین توزیع فشار متوسط روی سطح بالایی و پایینی متقارن است. در نتیجه، نیروی برآی متوسط در هر چهار عدد رینولدز برابر صفر خواهد بود. اما به علت وجود اختلاف فشار بین دو سطح بالادستی و پایین‌دستی نیروی پسا مقدار دارد. نتایج بدست آمده برای ضریب پسای متوسط تطابق خوبی با مراجع دارند. لازم به ذکر است که در بازه اعداد رینولدز مورد بررسی ضرایب بی بعد برآ و پسا وابستگی به عدد رینولدز جریان نداشته و تقریباً با تغییر عدد رینولدز ثابت هستند.

2-3- ضریب متوسط فشار سطحی

توزیع فشار اطراف سیلندر از پارامترهای موثر در توصیف الگوی جریان اطراف سیلندر و تعیین مقادیر پارامترهای مختلف جریان است. در این بخش ابتدا

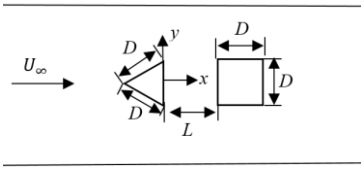


Fig. 1 Schematic geometry and definition of different parameters

شکل 1 تعریف پارامترهای موجود در مساله مورد بررسی

[1] Full scale

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

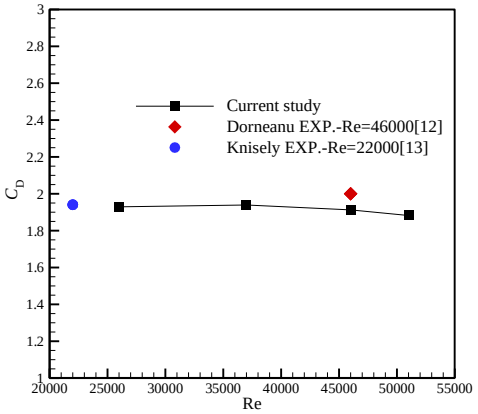


Fig. 2 Mean drag coefficient for square cylinder for four Reynolds numbers at zero angle of attack

شکل 2 ضریب پسای متوسط سیلندرمربعی برای چهار عدد رینولدز در زاویه حمله صفر درجه

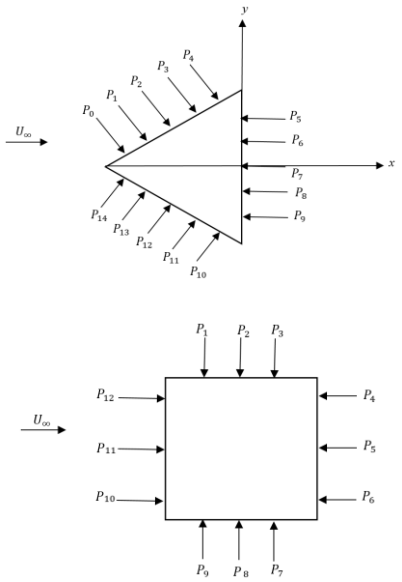
توزیع فشار برای تک سیلندر مربعی و در ادامه توزیع فشار اطراف دو سیلندر مثلثی و مربعی در فواصل مختلف بین دو سیلندر بیان می‌شود.

"شکل 3" موقعیت سوراخ‌های فشار سطحی را روی هر دو سیلندر مربعی و مثلثی نمایش می‌دهد. به منظور اندازه‌گیری فشار سطحی سیلندر مربعی، 12 سوراخ فشار با قطر 1mm در فواصل معین روی سطح سیلندر در مقطع وسط سیلندر در نظر گرفته شده است. سوراخ‌های در نظر گرفته شده برای اندازه‌گیری فشار با استفاده از شیلنگ‌هایی با طول یکسان به دستگاه فشارسنج وصل شده و پس از آفست‌گیری مقادیر لحظه‌ای فشار توسط سنسورها اندازه‌گیری می‌شوند. در این خصوص، C_P ضریب فشار با استفاده از رابطه‌ی (3) محاسبه می‌شود[11].

$$C_P = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^{\,2}} \qquad (3)$$

که P فشار سطحی ثبت شده و P_0 فشار استاتیک جریان بالادست هستند. "شکل 4" ضریب فشار سطحی متوسط برای سیلندر مربعی در زاویه حمله صفر برای سه عدد رینولدز را نشان می‌دهد. در "شکل 4" ، نتایج به دست آمده با نتایج مطالعات دورنینو [12] و لی [14] مقایسه گردیده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده برای ضریب فشار متوسط از دقت خوبی برخوردار هستند. همان طور که مشخص است، مطابق انتظار برای چنین هندسه‌هایی با لبه‌های تیز به دلیل نقاط جدایی ثابت، تغییر عدد رینولدز تأثیر چشم‌گیری بر روی توزیع ضریب فشار متوسط ندارد. در زاویه حمله صفر درجه، جریان سیال عبوری از روی سیلندر مربعی در گوشه‌های بالا و پایین وجه بالادستی جدا می‌شود. در این زاویه به علت تقارن هندسی سیلندر نسبت به جریان عبوری، توزیع فشار روی سطح بالایی و پایینی یکسان است؛ در نتیجه مقدار ضریب فشار متوسط روی این دو سطح تقریباً یکسان است. ضریب فشار سیلندر مربعی در نقطه‌ی سکون واقع در وجه بالادستی سیلندر به مقدار یک می‌رسد.

در ادامه، پس از اعتبارسنجی روش تجربی مورد استفاده در مطالعه حاضر، نتایج اندازه‌گیری‌های فشار سطحی دو سیلندر مثلثی و مربعی در آرایش پشت سرهم ارائه می‌شود. به منظور اندازه‌گیری فشار سطحی سیلندر مثلثی، 15 سوراخ فشار با قطر 1 mm در فواصل معین روی سطح سیلندر در مقطع وسطی سیلندر در نظر گرفته شده است. موقعیت سوراخ های فشار سیلندر مثلثی در زاویه حمله صفر درجه، به نحوی است که P_2،P_7،P_{12} به ترتیب نشان‌دهنده فشار در وسط وجه پایینی، پشتی و بالایی سیلندر هستند.



(a) (الف)

(b) (ب)

Fig. 3 Coordinate system and positions of surface pressure taps on (a) Triangular cylinder (b) Square cylinder

شکل 3 محورمختصات و موقعیت سوراخ های فشار سطحی روی (الف) سیلندر مثلثی (ب) سیلندر مربعی

آزمایش‌های اندازه‌گیری فشارسطحی سیلندرهای مثلثی و مربعی در فواصل مختلف بین دو سیلندر انجام شده‌اند. در این بخش به علت تغییر الگوهای جریان در فواصل مختلف بین دو سیلندر برای نمونه فواصلL/D=1,3,7 انتخاب شده و ضرایب فشار سطحی سیلندرها گزارش شده است. در شکل‌های 5b,d,f نمودارهای توزیع ضرایب متوسط فشار اطراف سیلندر مثلثی بالادست در فواصل L/D=1,3,7 و اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. به علت تقارن موجود در هندسه مورد بررسی، در فواصل مختلف بین دو سیلندر ضرایب فشار در وجوه بالایی و پایینی سیلندر مثلثی یکسان است. آشفتگی و غیریکنواختی جریان بالادست، خطای ساخت مدل سیلندر و خطای ابزار اندازه‌گیری می‌تواند دلایل تفاوت جزئی در توزیع فشار وجوه بالا و پایین باشد. فشار نقاط 1 و13 در وجه بالا و پایین به علت مجاورت با نقطه سکون بیشتر از فشار بقیه نقاط در وجه بالا و پایین بوده است. از نقطه صفر تا 4 ضریب فشار به علت افزایش سرعت، کاهش و به همین ترتیب از نقطه 10 تا 14 ضریب فشار به علت کاهش سرعت، افزایش می‌یابد. فاصله‌ی بین دو سیلندر بیشترین تأثیر را روی ضرایب فشار وجه پشتی سیلندر مثلثی دارد. ضرایب فشار نقاط 5 تا 9 روی وجه پشتی سیلندر مثلثی به علت قرار گرفتن در ناحیه کم فشار بین دو سیلندر در فاصله‌ی L/D=1,3 و ناحیه دنباله پشت سیلندر در فاصله‌ی L/D=7، منفی و تقریباً ثابت است. در زاویه حمله صفر درجه، جدایش در دو گوشه عقبی سیلندر مثلثی اتفاق افتاده و طبیعتاً بازنشست جریان روی هیچ‌کدام از سطوح اتفاق نمی‌افتد. الگوی توزیع فشار سیلندر مثلثی در بیش‌ترین فاصله (L/D=7) که تأثیر قرارگیری سیلندر پایین دست تقریباً از بین رفته، به الگوی توزیع فشار تک سیلندر مثلثی نزدیک شده که تقریباً با نتایج مرجع [15] مطابقت دارد. نتایج ارائه شده بیانگر این است که ضریب متوسط فشار سطحی در این محدوده سرعت، حساسیت چندانی نسبت به تغییرات عدد رینولدز ندارد. تا زمانی که نقاط جدایش جریان روی گوشه های عقبی ثابت باشد و تغییر مکان ندهد، الگوی توزیع فشار تقریباً تابع عدد رینولدز نیست.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

همچنین در شکل‌های 5a,c,e نتایج توزیع فشار سیلندر مربعی پایین دست در فواصل L/D=1,3,7 و اعداد رینولدز مختلف گزارش شده است. لازم به توضیح است که اندازه‌گیری‌ها برای فواصل مختلف انجام شده است و سه فاصله‌ی فوق پس از بررسی نتایج و مشاهده‌ی تغییر در مشخصات جریان انتخاب شده‌اند. الگوی توزیع فشار برای اعداد رینولدز متفاوت در فواصل مختلف یکسان بوده است. در فواصل مختلف بین دو سیلندر، جریان سیال عبوری از روی هر دو سیلندر مربعی و مثلثی در گوشه‌های بالا و پایین وجوه جدا می‌شود. در این فواصل به علت تقارن هندسی سیلندرها نسبت به جریان عبوری و متقارن بودن جریان حول سیلندرها، توزیع فشار روی سطح بالایی و پایینی تقریباً یکسان است. علت اینکه ضریب فشار در فاصله‌ی نزدیک L/D=1 در سطوح بالایی و پایینی دقیقاً یکسان نیست می‌تواند ناشی از عدم یکنواختی کامل جریان برخوردی به سیلندر مربعی، خطای ساخت مدل و غیره باشد[9]. با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر تأثیر عدم یکنواختی جریان برخوردی به سیلندر پایین دست کمتر شده است. در فاصله‌ی L/D=3,7 تقارن خوبی در توزیع فشار متوسط سطوح بالایی و پایینی وجود دارد. در فاصله‌ی L/D=1 ضریب فشار در وجه‌های جلویی و پشتی سیلندر به دلیل قرار گیری در ناحیه کم فشار بین دو سیلندر و ناحیه دنباله سیلندر مربعی منفی و تقریباً ثابت شده است. همچنین در فاصله‌ی L/D=1 در وسط وجه بالایی سیلندر مربعی افزایشی در ضریب فشار به وجود می‌آید. این افزایش ضریب فشار را می‌توان به بازنشست جریان روی این وجه نسبت داد. تغییر فاصله بین دو سیلندر بیشترین تأثیر را روی وجه رو به جریان سیلندر مربعی دارد. مقادیر ضرایب فشار در فواصل L/D=1,3 در وجوه بالایی و پایینی به علت قرار گیری در ناحیه دنباله سیلندر بالادست منفی شده است. همچنین ضرایب فشار روی وجه پشت به جریان سیلندر مربعی به علت قرارگیری در ناحیه دنباله سیلندرمنفی شده است[4].

تغییر در الگوی ضریب فشار در شکل‌های 5a,c,e به علت تغییر در الگوهای جریان است. در الگوی جریان شماره یک لایه برشی جدا شده از سیلندر مثلثی در پشت سیلندر مربعی (برای فواصل خیلی نزدیک بین دو سیلندر) و یا بر روی سطوح جانبی سیلندر مربعی (برای فواصل بیشتر) فرود می‌آید. در این الگو در فاصله‌ی بین دو سیلندر یک ناحیه گردابه‌ای شبه پایا تشکیل شده که فشار در این ناحیه منفی است. در هندسه مورد بررسی در مطالعه حاضر، الگوی شماره‌ی یک برای فواصل L/D<3 برقرار است. در الگوی جریان شماره دو جریان جداشده از سیلندر مثلثی در بین دو سیلندر فرود می‌آید و سیلندر دوم در معرض ریزش گردابه‌های سیلندر بالادست قرار می‌گیرد. این الگو برای فواصل L/D>3 برقرار است. لازم به ذکر است که فاصله L/D=3 رفتاری دوگانه دارد. بدین معنی که در بعضی از زمان‌ها لایه برشی جداشده از سیلندر بالادست در بین دو سیلندر و در بعضی از زمان‌ها بر روی سطوح جانبی سیلندر پایین دست فرود می‌آید.

در فاصله‌ی L/D=7 در ابتدا ضریب فشار در وجه بالایی سیلندر مربعی افزایش یافته است. سپس در وجه پشت به جریان به علت قرارگیری در ناحیه دنباله ضریب فشار منفی و تقریباً یکسان شده است. در وجه پایینی مقدار ضریب فشار شبیه الگوی افزایشی در وجه بالایی کاهش می‌یابد. برای الگوی جریان شماره دو در فاصله‌ی L/D=7 به علت فرود لایه برشی و برخورد مستقیم جریان به وجه جلویی سیلندر مربعی ضرایب فشار مثبت شده است. بیشینه مقدار ضریب فشار در فاصله‌ی L/D=7 وجه جلویی در نقطه سکون تک سیلندر مربعی به مقدار 0.2 می‌رسد. دلیل نرسیدن ضریب فشار در این نقطه به عدد یک، کاهش سرعت جریان برخوردی به سیلندر بوده که به علت قرارگیری سیلندر مثلثی در بالادست سیلندر مربعی است. دلیل تغییر الگوی جریان و نحوه توزیع ضریب فشار روی سطح سیلندر مربعی در فواصل L/D>3، تغییر الگوی جریان از شماره‌ی یک به دو است. با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل‌های 5a,c,e برای چهار عدد رینولدز مشاهده می‌شود که ضرایب متوسط فشار، با تغییر عدد رینولدز، تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند. مقادیر ضریب فشار منفی در فواصل مختلف بین دو سیلندر برای تعداد نقاط بیشتری رخ می‌دهدکه این امر نشان می‌دهد تشکیل گردابه و جدایی جریان در بخش قابل توجهی از سطوح سیلندر مربعی اتفاق می‌افتد. با مقایسه "شکل 4" و "شکل 5" می‌توان چنین نتیجه گرفت که ضریب فشار منفی ایجاد شده روی سطح بالادستی سیلندر مربعی در آرایش پشت سرهم عامل بیشترین کاهش در ضریب پسا سیلندر مربعی در مقایسه با حالت تک سیلندر می‌شود.

3-3- نوسانات فشار سطحی روی سطح سیلندر مربعی

عامل تمامی نوسانات نیروهای وارد بر سیلندر و مشخصات جریان پس از برخورد به سیلندر، پدیده ریزش گردابه است. لذا فرکانس ریزش گردابه یکی از پارامترهای مهم در مطالعه جریان حول سیلندر است. ضریب فشار سطحی نوسانی با رابطه (4) به دست می‌آید که P_{rms} و $C_{\mathrm{P_{rms}}}$ به ترتیب جذر میانگین مربعات (rms) فشار و ضریب فشار است. سوراخ‌های فشار سطحی روی چهار وجه سیلندر با لوله‌هایی به دستگاه مبدل فشار متصل شده و نوسانات فشار سطحی با استفاده از نرم‌افزار فشارسنج اندازه گیری شده است. طول و قطر لوله‌های متصل از سوراخ فشار به دستگاه مبدل فشار به ترتیب 25cm و 1.1mm است. ابعاد طول و قطر لوله تا حد امکان کوتاه و کوچک انتخاب شده‌اند تا بتوان اثرات حضور لوله‌ها را تا حد امکان کم نمود[11].

$$C_{\mathrm{P_{rms}}} = \frac{P_{\mathrm{rms}}}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}{}^{2}} \tag{4}$$

"شکل 6" نمودار ضریب فشار نوسانی برای سه فاصله‌ی L/D=1,3,7 در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. نوسانات فشار روی سطوح به شدت آشفتگی جریان بستگی دارد. در فاصله‌ی L/D=1 ضریب نوسانات در همه‌ی سطوح سیلندر مربعی کوچک است. این موضوع آشفتگی نه چندان زیاد جریان را اطراف سطوح سیلندر مربعی نشان می‌دهد. به علت شکل‌گیری جریان شبه پایا بین دو سیلندر، جریان اطراف سیلندر مربعی پایدارتر و دارای نوسانات کمتر است. در فاصله‌ی L/D=3 الگوی توزیع فشار نوسانی تغییر می‌کند. در این فاصله الگوی جریان از شماره‌ی یک به دو تغییر می‌کند. مقادیر

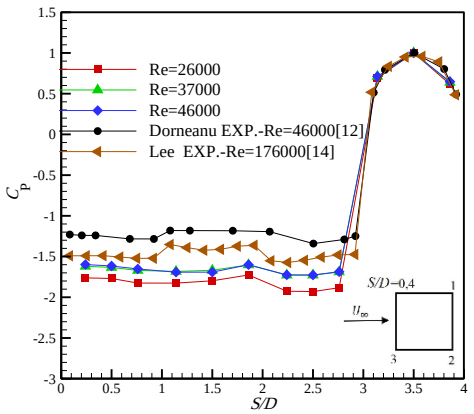
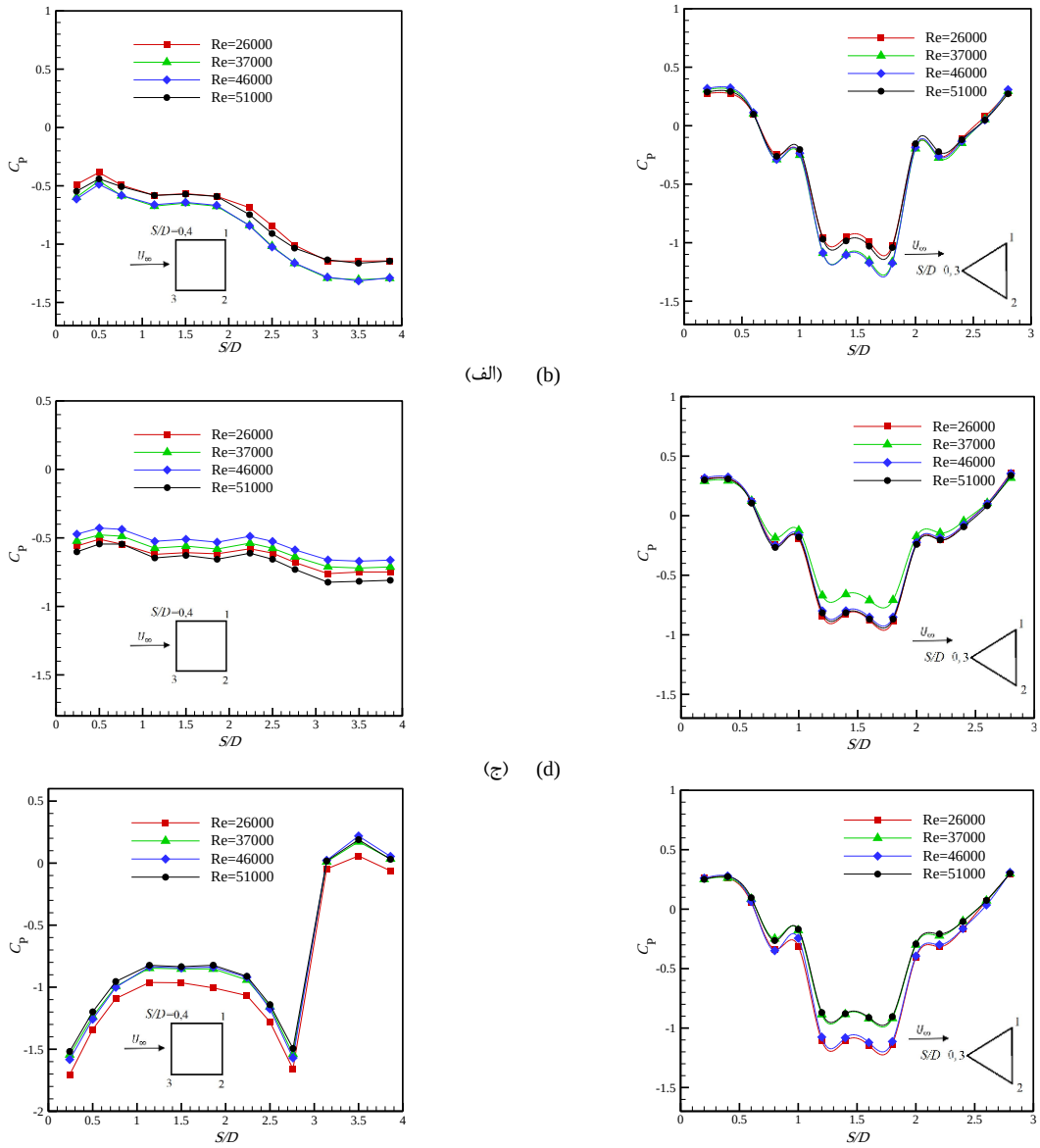


Fig. 4 Mean Cp distribution on the square cylinder surface for three Reynolds numbers

شکل 4 توزیع فشار متوسط اطراف سیلندرمربعی برای سه عدد رینولدز مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]



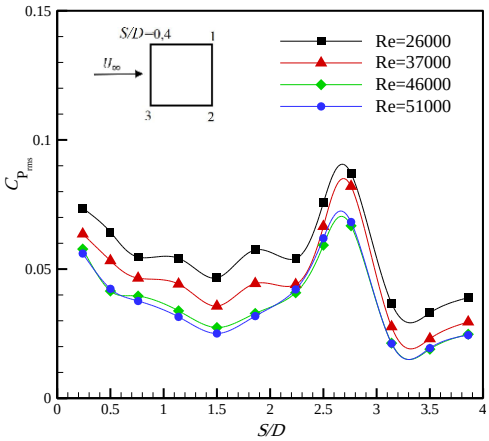
(a) (الف) (b) (ب)

(c) (ج) (d) (د)

(e) (ه) (f) (و)

Fig. 5 Mean Cp distribution on the cylinders surfaces at different spacing*(L/D)* and for different Reynolds numbers: square cylinder (a) *L/D*=1, (c) *L/D*=3, (e) *L/D*=7, triangular cylinder (b) *L/D*=1,(d) *L/D*=3, (f) *L/D*=7

شکل 5 توزیع ضریب متوسط فشار اطراف سیلندرها با اعداد رینولدز و فواصل مختلف : سیلندر مربعی (الف) *L/D*=1، (ج) *L/D*=3، (ه) *L/D*=7، سیلندر مثلثی (ب) *L/D*=1، (د) *L/D*=3، (و) *L/D*=7

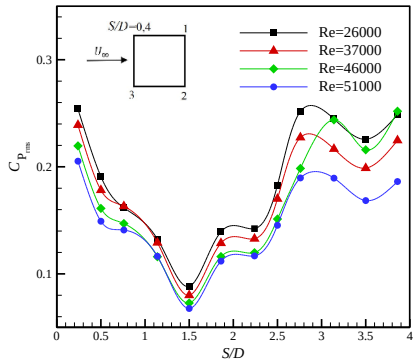


(a) (الف)

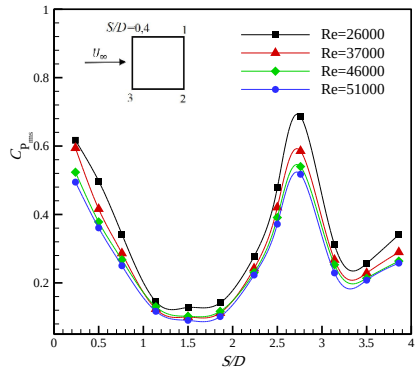
توزیع فشار نوسانی در فواصل *L/D*>3 بسیار بیشتر می‌شود به علت آشفتگی جریان اطراف سیلندر پایین دست بیشتر شده است. این آشفتگی جریان به ویژه روی وجوه جانبی بیشتر شده که دلیل این امر وجود گردابه‌های اطراف وجوه جانبی سیلندر است. هنگامی که سیلندر مربعی در فاصله‌ی *L/D*=7 قرار می‌گیرد ریزش گردابه‌هایی متناوب از هر دو سیلندر بالادست و پایین دست شروع می‌شود. در نتیجه، نوسانات پارامترهای جریان، در دنباله[1] افزایش می‌یابد. بنابراین ضریب فشار نوسانی در همه‌ی سطوح سیلندر مربعی مقادیری بیش‌تر نسبت به دیگر فواصل اختیار می‌کند. به دلیل این که در فاصله‌ی *L/D*=3 شروع ریزش گردابه از سیلندر بالادست رخ می‌دهد، نوسانات ضریب فشار در سطوح سیلندر مربعی در مقایسه با حالت *L/D*=1 به میزان قابل توجهی بیش‌تر شده است. کاهش سریع نوسانات فشار در امتداد سطوح

[1] wake

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]



(b) (ب)



(c) (ج)

Fig. 6 RMS Cp distribution on the square cylinder surface for different spacing(L/D) and for different Reynolds numbers (a) L/D=1, (b) L/D=3, (c) L/D=7

شکل 6 توزیع فشار نوسانی اطراف سیلندر مربعی با اعداد رینولدز مختلف در فواصل (الف) L/D=1، (ب) L/D=3، (ج) L/D=7

جانبی سیلندر پایین دست در فواصل مختلف بین دو سیلندر به علت فرود آمدن متناوب لایه‌ی برشی جدا شده از سیلندر بالادست است. همچنین این موضوع را می‌توان به تولید شدت آشفتگی قابل توجهی که توسط سیلندر بالادست صورت می‌گیرد نسبت داد [14].

4-3- ضریب پسا متوسط سیلندر مربعی در پایین دست سیلندر مثلثی

در این بخش از مطالعه حاضر، تأثیر فاصله بین دو سیلندر در محدوده 0.5- L/D=7 و اعداد رینولدز مختلف بر نیروهای آیرودینامیکی سیلندر مربعی بررسی شده است. مشابه مطالب بیان شده برای تک سیلندر مربعی، به علت تقارن موجود در هندسه مورد بررسی، متوسط ضریب برآی مربوط به سیلندر مربعی در آرایش پشت سر هم نیز برابر صفر است.

"شکل 7" نمودار تغییرات ضریب پسا سیلندر مربعی قرار گرفته در پایین دست سیلندر مثلثی برای فواصل مختلف بین دو سیلندر را نشان می‌دهد. الگوی روند تغییرات ضریب پسای سیلندر مربعی مشابه روند تغییرات مطالعه وانگ [1] برای دو سیلندر مربعی پشت سرهم است. در عدد رینولدز 26000، کمترین و بیشترین مقدار ضریب پسا برای سیلندر مربعی به ترتیب برابر با 0.02 و 0.824 در فواصل L/D=3 و L/D=7 اتفاق می‌افتد. در فاصله‌ی L/D=3 ضریب پسا تقریباً صفر شده و تغییر علامت ضریب پسا برای فواصل کمتر و بیشتر از این فاصله، از منفی به مثبت رخ می‌دهد. این فاصله که کمترین اندازه ضریب پسا و همچنین تغییر الگوی توزیع فشار متوسط و نوسانی را دارد به عنوان فاصله‌ی بحرانی معرفی می‌شود. الگوی جریان شماره یک را به

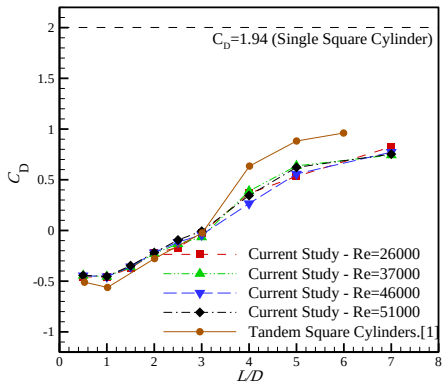


Fig.7 Variation of mean drag coefficient for the downstream cylinder with L/D at different Reynolds numbers

شکل 7 تغییرات ضریب پسای متوسط سیلندر پایین دست با فواصل و اعداد رینولدز مختلف

دو ناحیه می‌توان تقسیم کرد. لایه برشی جداشده از سیلندر بالادست در محدوده‌ی L/D<1 در پشت سیلندر پایین دست و در محدوده‌ی L/D=1-3 روی سطح سیلندر پایین دست فرود می‌آید. در الگوی شماره یک ریزش گردابه از سیلندر پایین دست رخ می‌دهد. در الگوی جریان شماره‌ی یک پهنای دنباله جداشده از سیلندرها با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر بزرگتر شده است. در این الگو ناحیه گردابه‌ای شبه پایا در فاصله‌ی بین دو سیلندر تشکیل می‌شود و به علت شکل‌گیری این ناحیه فشار در سطح پشتی سیلندر بالادست منفی شده و مقدار (قدر مطلق) آن با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندرکاهش می‌یابد. بنابراین فشار در سطوح جلویی و پشتی سیلندر مربعی منفی شده و همچنین مقدار این فشار در سطح جلویی سیلندر مربعی بیشتر است. در نتیجه ضریب پسای سیلندر مربعی منفی می‌شود. مقدار ضریب پسا در فواصل L/D<3 در مقایسه‌ی با تک سیلندر مربعی بسیارکمتر است. زیرا لایه‌ی برشی جداشده از سیلندر بالادست بر روی وجوه سیلندر مربعی یا پایین دست فرود آمده و ریزش گردابه از سیلندر پایین دست رخ می‌دهد. این موضوع باعث بیش‌ترین کاهش در مقدار ضریب پسا می‌شود. در الگوی جریان شماره یک با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر ضریب پسا افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که اندازه‌ی فشار منفی در سطح جلویی سیلندر پایین دست کاهش می‌یابد و در نتیجه اختلاف فشار سطوح جلویی و پشتی سیلندر بیشتر می‌شود [4]. در الگوی جریان شماره دو L/D>3 جدایش لایه برشی جدا شده از سیلندر بالادست باعث ایجاد چرخش‌های قوی در بین دو سیلندرو باعث ریزش گردابه‌های متناوبی در ناحیه پشت سیلندر بالادست می‌شود. در این الگوی جریان با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد. چرا که فشار منفی ایجاد شده روی وجه بالادستی سیلندر مربعی افزایش یافته و نهایتاً در فاصله‌ی $L/D \geq 5$ این فشار مثبت می‌شود. لذا اختلاف فشار بین سطوح جلویی و پشتی سیلندر مربعی پایین دست بیشتر شده و بنابراین مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد. در فواصل بیش‌تر از L/D=3 سرعت جدایش لایه برشی از سیلندر بالادست افزایش می‌یابد که باعث افزایش اندازه‌ی فشار منفی روی سطح جلویی سیلندر پایین دست می‌شود (شکل‌های5a,c,e). در نتیجه ضریب پسای سیلندر پایین دست در مقایسه با مقدار به دست آمده برای سیلندر مربعی تنها کمتر می‌شود. حتی در فاصله‌ی L/D=7 به علت این که سیلندر پایین دست در ناحیه دنباله سیلندر بالادست قرار دارد، سرعت جریان برخوردی به آن کمتر از سرعت جریان بالادست است. همچنین شدت آشفتگی جریان برخوردی به دلیل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

حضور سیلندر بالادست زیاد است. این عوامل باعث می‌شوند ضریب پسا در این فاصله حداکثر به 0.824 برسد. این مقدار تقریباً نصف ضریب پسای سیلندر مربعی تنها یعنی 1.94 است.

در "شکل 7" اثر تغییر عدد رینولدز در فواصل مختلف بر ضریب پسای سیلندر مربعی بررسی شده است. همان گونه که در "شکل 7" مشخص است، تغییر عدد رینولدز بر ضریب پسا خیلی اثرگذار نیست. دلیل این امر این است که در هندسه‌های مورد بررسی نقاط جدایش که همان لبه‌های تیز هستند ثابت است. لذا تغییر سرعت نمی‌تواند تغییر به سزایی در الگوی جریان در هر فاصله بین دو سیلندر ایجاد کند. ولی فاصله بین دو سیلندر پارامتری بسیار تأثیرگذار بر الگوی جریان و در نتیجه نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سیلندر پایین دستی است. دلیل اهمیت فاصله بین دو سیلندر محل فرود لایه‌های برشی جدا شده از سیلندر بالادستی است. این لایه‌ها می‌توانند پشت سیلندر پایین دست، روی سیلندر پایین دست و یا بین دو سیلندر فرود بیایند. در هر حالت الگوی جریان و در نتیجه مقدار نیروی آیرودینامیکی وارد بر سیلندر کاملاً با حالات دیگر متفاوت است.

3-5- ضرایب پسا و برآی نوسانی

بررسی مشخصات نوسانی جریان حول اجسام جریان بند به اندازه مشخصات متوسط جریان اهمیت دارد. کمیت دیگری که در بررسی جریان اطراف سیلندرهای مربعی و مثلثی مورد بررسی قرار گرفت، جذر میانگین مربعات (rms) نیروی پسا و برآ سیلندر مربعی است. ضرایب برآ و پسای نوسانی به ترتیب در روابط (5) و (6) تعریف و محاسبه شده است[11].

$$C_{L_{rms}} = \frac{F_{L_{rms}}}{1/2\,\rho U_\infty{}^2 Dl} \tag{5}$$

$$C_{D_{rms}} = \frac{F_{D_{rms}}}{1/2\,\rho U_\infty{}^2 Dl} \tag{6}$$

که $F_{D_{rms}}$ و $F_{L_{rms}}$ به ترتیب نیروهای پسا و برآی نوسانی وارد بر سیلندر مربعی هستند. کمیت جذر میانگین مربعات نیروهای پسا و برآ را می‌توان به عنوان معیاری از قدرت ریزش گردابه از سیلندر تلقی کرد. اساساً نوسانات نیروی پسا ناشی از نوسانات فشار سطحی روی وجوه هندسه جریان بند است. در شکل‌های 8 و 9 به ترتیب تغییرات جذر میانگین مربعات ضریب پسا و برآ نوسانی سیلندر مربعی در فواصل و اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. برای فواصل $L/D<3$، یعنی فاصله‌ای که در بین دو سیلندر گردابه‌های شبه پایا تشکیل می‌شود مقدار ضریب پسای نوسانی کوچک است. برای فواصل $L/D<3$، هر دو سیلندر در ارتباط با ناحیه گردابه شبه پایا در بین دو سیلندر هستند و مانند یک جسم عمل می‌کنند و مقدار ضریب نوسانی پسا کوچک است. برای فواصل $L/D>3$ که ریزش گردابه از هر دو سیلندر رخ می‌دهد مقدار نوسانات نیروی پسا بزرگتر شده است. در فاصله‌ی $L/D=3$ یعنی در فاصله بحرانی مقدار ضریب پسای نوسانی بیشینه می‌شود. به علت این که، از فاصله‌ی $L/D=3$ جدایش لایه برشی باعث ایجاد گردابه‌های قوی در منطقه پشت هر دو سیلندر می‌شود. بنابراین در این فاصله جریان اطراف سیلندر مربعی بیش‌ترین نوسانات را دارد. روند تغییرات برآی نوسانی هم مشابه با پسای نوسانی است. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 مشاهده می‌شود مقادیر ضرایب برآ و پسای نوسانی با عدد رینولدز تغییر می‌کند. دلیل این امر را می‌توان به تغییر فشار نوسانی اطراف سیلندر مربعی با عدد رینولدز ("شکل 6") که منشا ضرایب نیروی نوسانی است، ارتباط داد.

3-6- تحلیل فرکانسی جریان

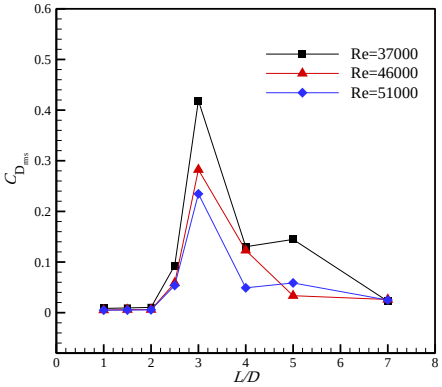


Fig. 8 Variation of RMS drag coefficient of the square cylinder with *L/D* at three Reynolds numbers

شکل 8 تغییرات ضریب پسا نوسانی سیلندر مربعی با فواصل مختلف بین دو سیلندر در سه عدد رینولدز

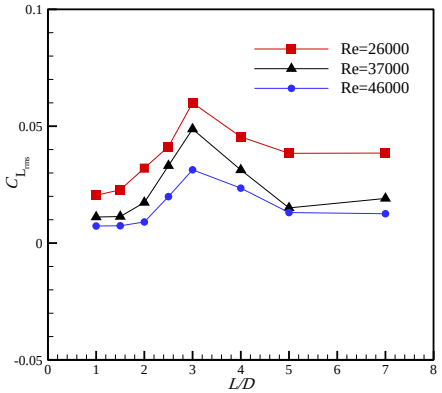


Fig. 9 Variation of RMS lift coefficient of the square cylinder with *L/D* at three Reynolds numbers

شکل 9 تغییرات ضریب برآی نوسانی سیلندر مربعی با فواصل مختلف بین دو سیلندر در سه عدد رینولدز

عدد استروهال به نحوی فرکانس غالب ریزش گردابه را بیان می‌کند. با افزایش عدد استروهال ریزش گردابه از سیلندر سریع‌تر می‌شود. در بخش دیگری از این مطالعه تاثیر تغییر فاصله بین دو سیلندر در فرکانس ریزش گردابه در پایین دست سیلندر مربعی بررسی شد. در این بخش، از دو روش متفاوت به بررسی و محاسبه مقدار عدد استروهال پرداخته شد. در ابتدا فرکانس ریزش گردابه با استفاده از داده های نوسانات فشار سطحی محاسبه گردید و سپس به کمک جریان‌سنج سیم داغ که از جمله بهترین روش‌های اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه است، اندازه‌گیری شده است. مقادیر فرکانس ریزش گردابه و در نهایت اعداد استروهال متناظر در فواصل متفاوت بین دوسیلندر و اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری و محاسبه شده است. عدد استروهال با رابطه‌ی (7) محاسبه می‌شود[11].

$$\mathrm{St} = \frac{fD}{U_\infty} \tag{7}$$

که f فرکانس ریزش گردابه است که از سیگنال نوسانات فشار سطحی یا سیگنال نوسانات سرعت در ناحیه دنباله به دست می‌آید.

برای محاسبه عدد استروهال از نوسانات فشار سطحی سنسور شماره 4 از سیلندر مثلثی و سنسور شماره 6 از سیلندر مربعی به عنوان نمونه انتخاب شدند. در سیگنال سنسورهای مناسب برای این کار قله‌های فرکانس ریزش گردابه واضح‌تر است. در این بخش کلیه تحلیل‌ها روی داده‌های ثبت شده توسط این دو سنسور انجام می‌شود. در "شکل 10" به عنوان نمونه برای

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

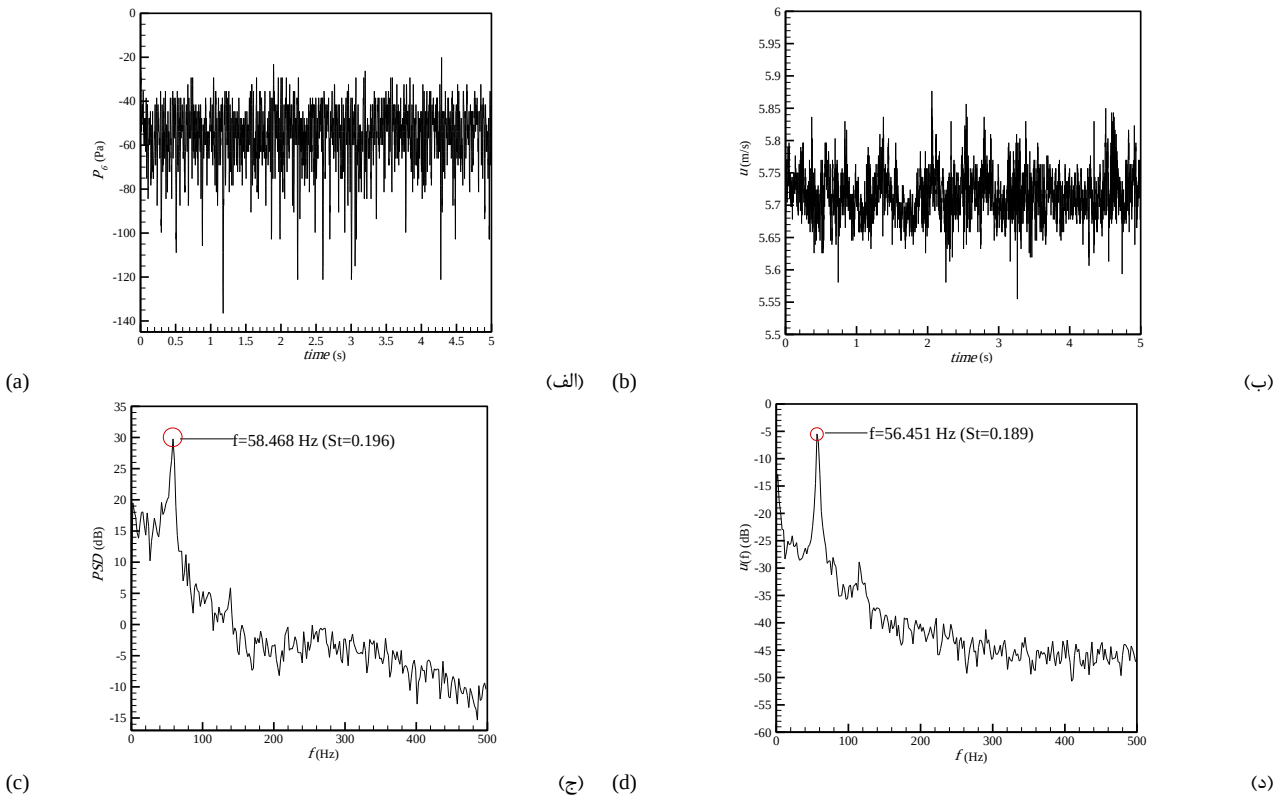


Fig. 10 Characteristics of the fluctuating flow: a sample spectra for square cylinder: (a,c) Fluctuations of surface pressure in time and frequency domains measured on downstream cylinder; (b,d) Fluctuations of streamwise velocity component in time and frequency domains measured in the wake region

شکل 10 مشخصات نوسانی جریان: (الف و ج) نوسانات سنسور فشار سطحی سیلندر پایین دست در حوزه زمان و فرکانس، (ب و د) نوسانات مولفه‌ی سرعت افقی اندازه‌گیری شده در ناحیه دنباله در حوزه زمان و فرکانس

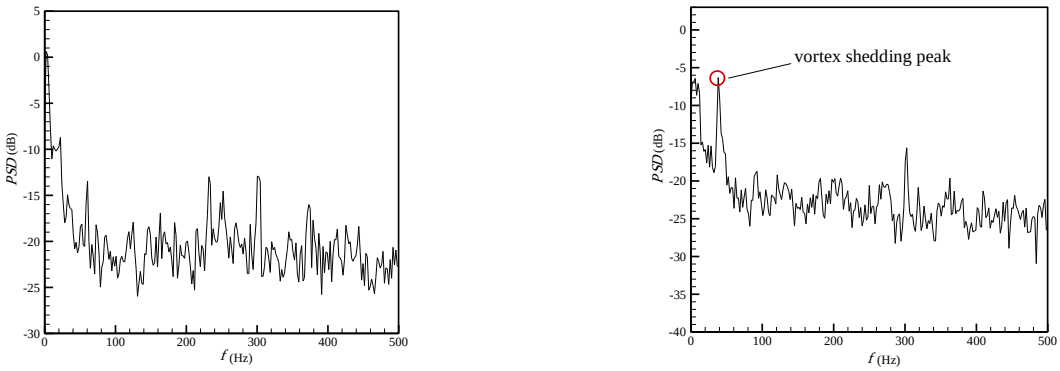
Re=51000 و L/D=7، نوسانات فشار سطحی سوراخ P_6 و نوسانات مولفه‌ی سرعت افقی گیری شده در ناحیه دنباله در حوزه‌ی زمان و فرکانس نشان داده شده است. مدت زمان داده برداری 5 ثانیه با فرکانس 1000Hz بوده است. همان گونه که در "شکل 10.c" مشخص است، قله نوسانات فشار مربوط به سنسور P_6 روی سیلندر مربعی در فرکانس 58.468 Hz رخ می‌دهد. این فرکانس معادل فرکانس ریزش گردابه است. از "شکل 10.d" قله نوسانات سرعت افقی ناحیه دنباله سیلندرها در فرکانس ریزش گردابه‌ی 56.451 Hz مشاهده می‌شود. اختلاف 2 Hz در فرکانس ریزش گردابه شکل‌های 10c,d به علت اختلاف دقت اندازه‌گیری دو وسیله جریان سنج سیم داغ و فشارسنج 32 کاناله بوده است. قله نوسانات در حوزه فرکانس یا به عبارت دیگر بیشترین مقدار دامنه نوسانات در فرکانسی برابر با فرکانس ریزش گردابه است.

در بخش بعدی از مطالعه حاضر عدد استروهال به دست آمده از نوسانات فشار سیلندر مثلثی بالادست مورد مطالعه قرار گرفته است. برای نمونه "شکل 11" نوسانات فشار در حوزه فرکانس در فاصله‌ی L/D=1,4 در عدد رینولدز جریان 51000 را نشان می‌دهد. برای فواصل نزدیک بین دو سیلندر به دلیل این که ریزش گردابه‌ای از سیلندر بالادست رخ نمی‌دهد، قله قابل توجهی در نتایج نوسانات فشار در حوزه فرکانس که نشانگر فرکانس ریزش گردابه باشد دیده نمی‌شود ("شکل 11.a"). در فواصل L/D>3 که ریزش گردابه از سیلندر بالادست رخ می‌دهد یک قله در نوسانات فشار سطحی سوراخ فشار P_4 سیلندر بالادست مثلثی دیده می‌شود ("شکل 11.b"). این قله با فرکانس نوسانات فشار سطحی سیلندر پایین دست هماهنگ است. بنابراین در این فواصل عدد استروهال به دست آمده از سیلندر بالادست و پایین دست یکسان است. یعنی ریزش گردابه از دو سیلندر با فرکانسی مشابه رخ می‌دهد. لازم به ذکر است که قله‌ای که در "شکل 11" در فرکانس 300 Hz مشاهده شده منشا آیرودینامیکی نداشته و طبق بررسی‌های انجام شده مربوط به خود تونل باد بوده است. لذا به محض وصل شدن برق تونل باد این قله به طیف سرعت و فشار اضافه می‌شود.

همانطور که در قسمت‌های پیشین این مطالعه بیان شد، یکی از اهداف مطالعه حاضر محاسبه عدد استروهال از روش‌های مختلف و مقایسه آنها با یکدیگر است. هدف آزمایش‌های این بخش، استفاده از نوسانات سرعت برای محاسبه عدد استروهال است. به همین منظور نوسانات سرعت در ناحیه دنباله‌ی دو سیلندر مثلثی و مربعی با استفاده از جریان سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است. برای به دست آوردن محل مناسب قرارگیری پراب درون اتاق آزمون ابتدا پراب در موقعیت y/D=1 و x/D=0 قرار داده شده است ("شکل 2" را ببینید). سپس پراب به سمت پایین‌دست تا موقعیت x=20cm با گام 2.5cm حرکت داده شده و در هر مرحله داده‌های نوسانی سرعت ذخیره شده است. مدت زمان و فرکانس داده برداری به ترتیب 5 ثانیه و 1000 Hz بوده است. مشخص گردید در همه فواصل، در صورت قرار گرفتن پراب در پایین دست سیلندر مربعی تغییرات سرعت به شکل سینوسی می‌رسد. در حالی که برای برخی فواصل با قرار گرفتن پراب در بین دو سیلندر نیز قله واضحی در طیف نوسانات سرعت مشاهده گردید. نهایتاً روش محاسبه عدد استروهال از روش نوسانات سرعت، مشابه قسمت قبلی نوسانات فشار سطحی است.

"شکل 12" عدد استروهال به دست آمده برای سیلندر مربعی از فرکانس

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]



(a) (الف) (b) (ب)

Fig. 11 Fluctuations of surface pressure measured on the triangular cylinder (a) L/D=1 (b) L/D=4

شکل 11 نوسانات فشار سطحی روی سیلندر مثلثی در حوزه فرکانس (الف)L/D=1 (ب)L/D=4

نوسانات فشار سطحی و نوسانات سرعت افقی در ناحیه‌ی دنباله این سیلندر در فواصل متفاوت بین دو سیلندر و در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. الگوی روند این تغییرات عدد استروهال مشابه با الگوی روند تغییرات مطالعات وانگ [1] و کیم [7] برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم است. برای فواصل L/D<3 هر دو سیلندر بالادست و پایین دست با ناحیه گردابه‌ای شبه پایا در ارتباط با هم هستند و مانند یک جسم عمل می‌کنند. در فواصل نزدیک بین دو سیلندر به دلیل این که ریزش گردابه از سیلندر بالادست رخ نمی‌دهد فرکانس ریزشی در نوسانات سرعت ثبت شده در بین دو سیلندر دیده نشده است. برای فواصل نزدیک بین دو سیلندر فرکانس ریزش گردابه از سیگنال نوسانات سرعت به دست آمده در پایین دست سیلندر مربعی به دست آمده است.

"شکل 13" عدد استروهال محاسبه شده از نوسانات فشار سطحی سوراخ فشار P_4 وجه بالایی سیلندر بالادست مثلثی در فواصل و اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که قله‌ای در نوسانات فشار سطحی سیلندر مثلثی در فواصل نزدیک بین دو سیلندر دیده نشده است. لذا در این فواصل برای تغییرات عدد استروهال در "شکل 13" مقادیری گزارش نشده است. عدد استروهال با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر افزایش یافته است. برای بیشترین فاصله (L/D=7) عدد استرهال تقریباً به عدد تک سیلندر مثلثی در مراجع [17,16] رسیده است. برای فواصل L/D>3 فضای کافی در بین دو سیلندر برای شروع چرخش‌های قوی ناشی از جدایش متناوب لایه‌ی برشی از سیلندر بالادست ایجاد می‌شود. در نتیجه یک قله‌ای در نتایج نوسانات فشار سطحی سیلندر بالادست و نوسانات سرعت در ناحیه بین دو سیلندر توسط جریان سنج سیم داغ ایجاد شده که نمایانگر فرکانس ریزش گردابه است. در ابتدا عدد استروهال با افزایش فاصله بین دو سیلندر کاهش می‌یابد. سپس عدد استروهال در L/D=3 به کمترین مقدار خود می‌رسد. در ادامه با افزایش فاصله‌ی بین دو سیلندر عدد استروهال افزایش می‌یابد. دلیل کوچک بودن عدد استروهال در نزدیکی L/D=3 این است که پهنای ناحیه جدایش پشت سیلندرهای بالادست و پایین دست بیشتر شده است. بنابراین گردابه‌ها بزرگتر شده و زمان تشکیل آنها بیش‌تر و در نتیجه فرکانس و عدد استروهال کاهش می‌یابد. برای فواصل L/D<3 که دو سیلندر مانند یک جسم عمل می‌کنند هر عاملی که باعث افزایش اندازه‌ی گردابه‌ها و در نتیجه افزایش ضریب پسا شود عدد استروهال را کاهش می‌دهد و برعکس این رابطه نیز برقرار است. با افزایش فاصله بین دو سیلندر پهنای دنباله بزرگتر شده است. لذا ناحیه کم فشار پشت سیلندر پایین دست بزرگتر می‌شود. در نتیجه اختلاف فشار بالادست و پایین دست بیش‌تر و ضریب پسا افزایش یافته است("شکل 5"). بنابراین عدد استروهال کاهش می‌یابد. در فواصل L/D>3 عدد استروهال برای هر دو سیلندر بالادست و پایین دست به علت ریزش گردابه‌های به صورت هماهنگ از هر دو سیلندر، یکسان شده است.

4- عدم قطعیت نتایج

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی ما در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت[1] اندازه‌گیری نامیده می‌شود. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به صورت آماری است. بنابراین، نتیجه یک اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود [18]. بیشینه‌ی عدم قطعیت نسبی مربوط به متغیرهای مورد بررسی آزمایش از جمله ضریب فشار 3.4% [19] و ضرایب نیروهای آیرودینامیکی 1.768% برآورد شده است. برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها به عنوان نمونه تکرارپذیری ضریب پسا در "شکل 15"نشان داده شده است.

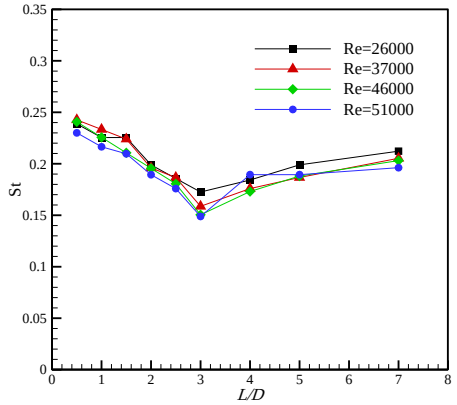
5- نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب در این پژوهش در ارتباط با بررسی جامع مشخصات جریان حول سیلندرهای با مقاطع مثلثی و مربعی در آرایش پشت سرهم در فواصل و اعداد رینولدز مختلف خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج تجربی به شرح زیر ارائه می‌گردد.

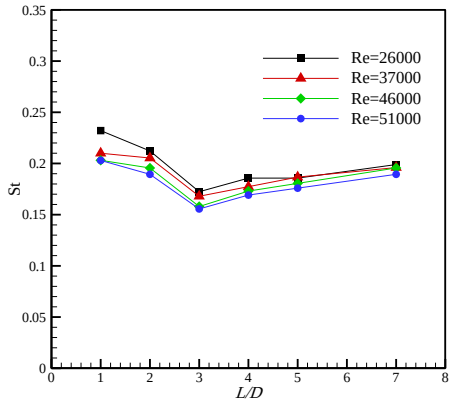
در مطالعه حاضر، ابتدا ضرایب پسا و ضرایب فشار اطراف سیلندر مربعی پایین دست بررسی شده است. سپس ضرایب فشار متوسط و نوسانی هر دو سیلندر مربعی و سیلندر مثلثی در فواصل مختلف بین دو سیلندر تعیین شده است. با بررسی نتایج مشخص شد که بیشترین ضریب فشار تک سیلندر مربعی در نقطه سکون برابر با 1 و بیشترین مقدار ضریب فشار در آرایش پشت سرهم برابر با 0.2 در فاصله‌ی L/D=7 به دست می‌آید. در فاصله‌ی L/D=3 تغییر الگوی جریان رخ می‌دهد. در الگوی جریان شماره یک ضرایب فشار در وجه جلویی سیلندر مربعی منفی شده است. در الگوی جریان شماره دو ضریب فشار متوسط در وجه جلویی سیلندر مربعی به علت فرود لایه برشی جداشده از سیلندر بالادست در بین دو سیلندر مثبت شده است. همچنین با تغییر الگوی جریان، ضرایب فشار سطحی متوسط و نوسانی به ویژه در وجه جلویی تغییر می‌کند. مقادیر ضریب فشار منفی در فواصل

[1] uncertainty

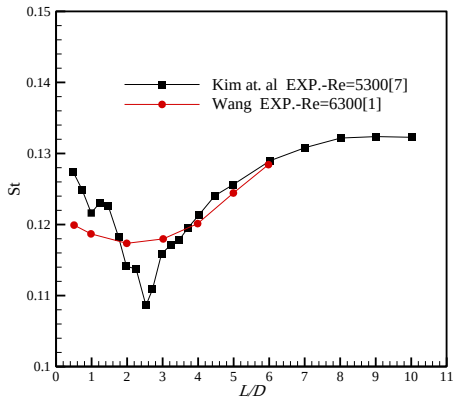
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]



(a) (الف)



(b) (ب)



(c) (ج)

Fig. 12 Variation of Strouhal number (St) with *L/D* at different Reynolds numbers (a) obtained from surface pressure fluctuations on the downstream cylinder (b) obtained from horizontal velocity fluctuations (c) Results from references [1, 7] on two tandem square cylinders

شکل 12 تغییرات عدد استروهال با فواصل متفاوت بین دو سیلندر و اعداد رینولدز مختلف (الف) به دست آمده از نوسانات فشار سطحی سیلندر مربعی (ب) به دست آمده از نوسانات سرعت افقی (ج) نتایج مطالعات [7,1] برای دو سیلندر مربعی پشت سر هم

مختلف بین دو سیلندر برای تعداد نقاط بیشتری رخ می‌دهدکه این امر نشان می‌دهد تشکیل گردابه و جدایی جریان در بخش قابل توجهی از سطوح سیلندر مربعی اتفاق می‌افتد. با مقایسه نمودارها می‌توان چنین نتیجه گرفت که ضریب فشار منفی ایجاد شده روی سطح بالادستی سیلندر مربعی در آرایش پشت سرهم باعث بیشترین کاهش در ضریب پسا سیلندر مربعی در مقایسه با حالت تک سیلندر می‌شود.

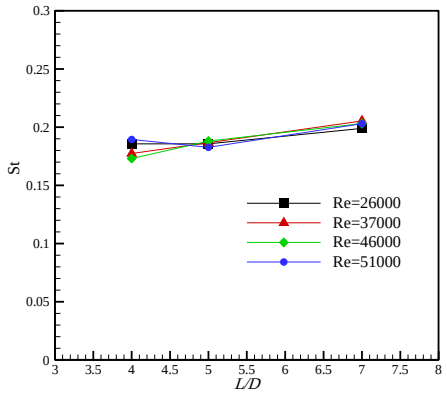


Fig. 13 Variation of Strouhal number (St) obtained from surface pressure fluctuations on the upstream cylinder with L/D at different Reynolds numbers

شکل 13 تغییرات عدد استروهال به دست آمده نوسانات فشار سطحی سیلندر بالادست در فواصل و اعداد رینولدز مختلف

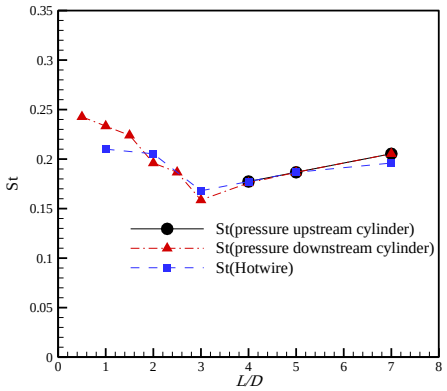


Fig. 14 Comparison of variation of Strouhal number (St) obtained from different equipment with *L/D* at Reynolds number 37000

شکل 14 مقایسه تغییرات عدد استروهال جریان به دست آمده از تجهیزات مختلف با فواصل مختلف در عدد رینولدز 37000

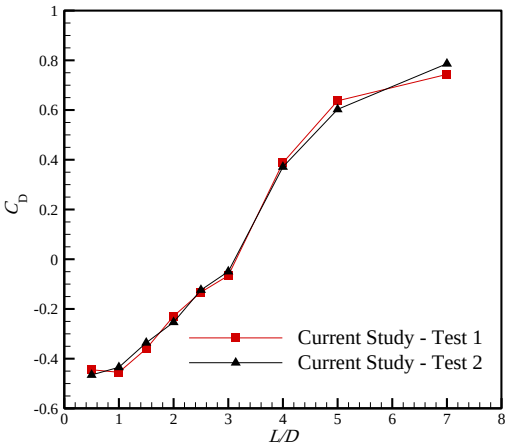


Fig. 15 Repeatability test of mean drag coefficient for the downstream cylinder at Reynolds number 37000

شکل 15 تکرارپذیری اندازه‌گیری ضریب پسای متوسط سیلندر پایین دست در عدد رینولدز 37000

در بخش بعدی مطالعه‌ی حاضر، نیروهای آیرودینامیکی وارد بر سیلندر مربعی که در پایین دست سیلندر مثلثی در فواصل مختلف از آن قرار گرفته ،تعیین شده است. با بررسی نمودارها مشخص شد که کمترین مقدار ضریب پسا در هر چهار عدد رینولدز در فاصله‌ی *L/D*=3 اتفاق می‌افتد. فاصله‌ی *L/D*=3 بین

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]

دو سیلندر را می‌توان به عنوان فاصله‌ی بحرانی برای این نوع آرایش قرارگیری سیلندرها معرفی کرد. در این فاصله تغییر الگوی جریان رخ می‌دهد. در فاصله‌ی بحرانی مقدار ضریب پسا نوسانی بیشینه شده است.

فرکانس ریزش گردابه در مطالعه حاضر از دو روش اندازه گیری و محاسبه شده است. روش اول محاسبه عدد استروهال با استفاده از اندازه گیری نوسانات فشار سطحی سیلندر بالادست و پایین دست که بیشترین دامنه نوسانات فشار سطحی در فرکانس معادل با فرکانس ریزش گردابه است. روش دوم استفاده از نوسانات سرعت در ناحیه دنباله‌ی سیلندرها برای محاسبه عدد استروهال است. عدد استروهال محاسبه شده از دو روش ذکر شده، در یک نمودار ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج تطابق خوبی دارد. کمترین مقدار عدد استروهال در فاصله‌ی بحرانی $L/D=3$ مشاهده شده است. فواصل $L/D<3$ هر دو سیلندر مانند یک سیلندر عمل می‌کنند و با افزایش فاصله بین دو سیلندر، عدد استروهال کاهش می‌یابد. فواصل $L/D>3$ ریزش گردابه‌ای هماهنگی از هر دو سیلندر رخ می‌دهد و با افزایش فاصله عدد استروهال افزایش می‌یابد. آزمایش‌ها در اعداد رینولدز مختلف تکرار و مشخص شد که ضرایب آیرودینامیکی پسا و برآ و همچنین ضریب فشار متوسط وابستگی چندانی به اعداد رینولدز ندارند.

6- مراجع

[1] X. Wang, Z. Hao, J. X. Zhang, S. Tan, Flow around two tandem square cylinders near a plane wall, *Experiments in Fluids*, Vol. 55, No. 10, pp. 1818-1828, 2014.

[2] A. Ajilian Momtaz, A. Farshidianfar, Study of effects of control cylinders usage with different arrangements on vortex-induced vibrations in Lock-in area, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 105-117, 2013. (in Persian فارسی)

[3] P. Dey, A. K. Das, Steady flow over triangular extended solid attached to square cylinder–A method to reduce drag, *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 6, No. 3, pp. 929-938, 2015.

[4] H. Sakamoto, H. Hainu, Y. Obata, Fluctuating forces acting on two square prisms in a tandem arrangement, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 26, No. 1, pp. 85-103, 1987.

[5] T. Igarashi, Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 69, No. 5, pp. 141-153, 1997.

[6] P. C. Lu, C. M. Cheng, C. W. Cheng, Aerodynamic forces on two stationary and oscillating square prisms in tandem and side by side arrangements, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 21, No. 5, pp. 535-546, 1998.

[7] M. K. Kim, D. K. Kim, S. H. Yoon, D. H. Lee, Measurements of the flow fields around two square cylinders in a tandem arrangement, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 397-407, 2008.

[8] N. Salam, I. Wardana, S. Wahyudi, D. widhiyanuriyawan, fluid flow through triangular and square cylinders, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 8, No. 2, pp. 193-200, 2014.

[9] N. Salam, I. Wardana, S. Wahyudi, D. widhiyanuriyawan, pressure distribution of fluid flow through triangular and square cylinders, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 8, No. 3, pp. 263-267, 2014.

[10] S. R. L. Samion, M. S. M. Ali, A. Abu, C. J. Doolan, R. Z. Y. Porteous, Aerodynamic sound from a square cylinder with a downstream wedge, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 53, No. 5, pp. 85-94, 2016.

[11] Y. Tamura, A. Kareem, *Advanced Structural Wind Engineering*, First Edittion, pp. 305-320, NewYork: Springer, 2013.

[12] J. Dorneanu, A. Mueller, P. Rambaud, E. Weide, A. Hirschberg, Tonal and silent wake modes of a square rod at incidence, *ACTA Acustica United with Acustica*, Vol. 102, No. 3, pp. 419-422, 2016.

[13] C. W. Knisely, Strouhal numbers of rectangular cylinders at incidence: a review and new data, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 4, No. 4, pp. 371-393, 1990.

[14] B. Lee, The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 69, No. 2, pp. 263-282, 1975 .

[15] T. Okamoto, M. Yagita, K. Ohtsuka, Experimental investigation of the wake of a wedge, *Bulletin of JSME*, Vol. 20, No. 141, pp. 323-328, 1977.

[16] A. Protos, V. Goldschmidt, G. H. Toebes, Hydroelastic forces on bluff cylinders, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 90, No. 3, pp. 378-386, 1968.

[17] C. Twigg-Molecey, W. D. Baines, Aerodynamic forces on a triangular cylinder, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 99, No. 4, pp. 803-818, 1973.

[18] A. Movahedi, A. Sohankar, M. Dehghan Manshadi, Experimental investigation of turbulent flow around a 3d square cylinder with wall effect, *Sharif Mechanical Engineering Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 65-77, 2014. (in Persian فارسی)

[19] S. Gowing, *Pressure and Shear Stress Measurement Uncertainty for DARPA SUBOFF experiment*, DTIC, Maryland, pp.1-25, 1990.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1397.18.2.28.7]