



Experimental Investigation of Strength of Vortex Shedding from a Semicircular Cylinder Dual Bluff Body

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ardekani E.¹,
Farhani F.¹,
Ardekani M.A.^{1*}

How to cite this article

Ardekani E., Farhani F., Ardekani M.A., Experimental Investigation of Strength of Vortex Shedding from a Semicircular Cylinder Dual Bluff Body. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(01):33-41.

¹ Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran-Iran

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), Tehran-Iran.

ardekani@irost.ir

Article History

Received: January 8, 2025
Accepted: March 1, 2025
ePublished: March 16, 2025

ABSTRACT

One of the methods to improve the performance of the vortex flowmeter, especially for low flowrate, is to use a dual bluff model that increases the vortex shedding frequency. In this experimental research work, the vortex shedding from a dual cylindrical bluff model of semicircular cross-section, at different l/d ratios, where d is the diameter and l is the distance between the two semicircular cylinders in series is measured and investigated using a wind tunnel and hot-wire anemometer. Results show that the Strouhal number for dual bluff body depends on the Reynolds number and l/d . In the range of $0/8 \leq l/d < 2$, the Strouhal number has changes and jumps compared to the Reynolds number. Therefore, it is not suitable for vortex flowmeter application. also show that the velocity frequency spectrum, it can be determined that the highest value of the turbulent intensity is related to the oscillating velocity with the vortex shedding frequency, and therefore, to investigate the strength of vortex shedding frequency, the turbulent intensity was investigated, that the value of turbulent intensity depends on Reynolds number and l/d . Considering the standard deviation of the repeatability of the Strouhal number reading and also the strength of the vortex shedding frequency (investigation of the turbulent intensity), for $0 < l/d < 0/8$ and $2 \leq l/d \leq 3$, a dual cylindrical bluff model of semicircular cross-section, placed in series, is suitable for vortex flowmeter application

Keywords Dual Bluff Body, Reynolds Number, Strouhal Number, Turbulent Intensity, Vortex Flowmeter, Vortex Shedding

CITATION LINKS

1-On the wake and drag of bluff bodies. 2-Review on vortex flowmeter—Designer perspective. 3-Evaluation of uncertainty in a vortex flowmeter measurement. 4-Flow modeling and experimental investigation of a vortex shedding flow meter. 4- Flow modeling and experimental... 5-Vortex shedding mechanisms in single and dual bluff bodies. 6-Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body. 7-Response of a dual triangulate bluff body vortex flowmeter to oscillatory flow. 8-Stabilization of Vortex Shedding in a Three-Dimensional Flow in a Circular Pipe. 9-Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 1st report, flow control and flow patterns. 10-Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. 11-Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 2nd report, effect of boundary layer suction. 12-Design conditions for optimal dual bluff body vortex flowmeters. 13-The development of dual bluff body vortex flowmeters. 14-Study on hydrodynamic vibration in dual bluff body vortex flowmeter. Chinese 15-A review of experiments on stationary bluff body wakes. 16-How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide. 17-Experimental study of drag coefficient of multistrand wires using single normal hot-wire anemometer probe. 18-Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures. 19-Hot-wire calibration using vortex shedding. 20-Determination of flow angle from measurements of vortex shedding frequency downstream of a triangular bluff model using a single-sensor hot-wire probe. 21- Experimental study of flow around polygonal cylinders. 22-Experimental Investigation of the Frequency Spectra of Vortex Shedding from a Triangular Bluff Body at Different Flow Angles.

بررسی تجربی قدرت ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای

احسان اردکانی^۱، فواد فرحانی^۱، محمد علی اردکانی^{*}

^۱ مهندسی مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

چکیده

یکی از روش‌ها، برای بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای، به‌ویژه برای دبی‌های کم، استفاده نمودن از جسم لبه‌پهن دوتایی می‌باشد که سبب تقویت فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌شود. در این تحقیق تجربی با استفاده از تونل باد و جریان‌سنج سیم‌داغ، ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی با سطح مقطع نیم‌دایره بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار عدد استروهل برای مدل دوتایی به عدد رینولدز و نسبت بی‌بعد l/d (قطر l و شعاع d استوانه نیم‌دایره‌ای) بستگی دارد. در بازه $0/8 \leq l/d < 2$ عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز دارای تغییرات و پرش می‌باشد، لذا مناسب استفاده در دبی‌سنج نمی‌باشد. با بررسی طیف فرکانسی سرعت لحظه‌ای، می‌توان تشخیص داد که بیش‌ترین مقدار از شدت اغتشاش‌ها مربوط به سرعت نوسانی با فرکانس ریزش گردابه‌ها است و از این رو برای بررسی قدرت سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها، شدت اغتشاش‌ها بررسی شد که مقدار آن به عدد رینولدز و نسبت l/d بستگی دارد. با توجه به میزان انحراف معیار عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز و همچنین قدرت فرکانس ریزش گردابه‌ها (بررسی شدت اغتشاش‌ها) استفاده از مدل دوتایی با سطح مقطع نیم‌دایره برای فاصله $0 < l/d < 0/8$ و $2 \leq l/d \leq 3$ جهت استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ریزش گردابه‌ها، عدد استروهل، عدد رینولدز، مدل دوتایی، شدت اغتشاش‌ها، دبی‌سنج گردابه‌ای

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

* نویسنده مسئول: ardekani@irost.ir

۱- مقدمه

برای اولین بار ایده ساخت دبی‌سنج بر اساس ریزش گردابه‌ها و با فرض ثابت بودن عدد استروهل توسط روشکو پیشنهاد شد [1]. وی نشان داد که عدد استروهل ریزش گردابه‌های ناشی از یک استوانه با مقطع دایره در محدوده اعداد رینولدز بالاتر از ۳۰۰، ثابت و مقدار آن تقریباً ۰/۲۰۵ بوده و مستقل از عدد رینولدز است. از مزایای این نوع دبی‌سنج نداشتن قطعات متحرک، افت فشار کم، قابلیت اطمینان بالا، عدم حساسیت به خواص سیال و دما می‌باشد. همچنین دبی‌سنج گردابه‌ای نیازی به کالیبراسیون متناوب ندارد [2-3]. با این حال، دبی‌سنج گردابه‌ای معایب خاص خود، نظیر تأثیر نویز و صدا بر اندازه‌گیری دبی و حساسیت پایین در دبی‌های کم را دارا می‌باشد. تین و ایوانگلیستی [4]، بیان کردند که نوسان‌های فشار ناشی از جریان در سیستم سیالاتی و همچنین نویز محیط، به طور قابل توجهی بر دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تأثیر داشته و عدم قطعیت آن را افزایش می‌دهد. آن‌ها بیان کردند

که در اعداد رینولدز کم، نسبت سیگنال به نویز، آن قدر بالا نیست که بتوان با استفاده از پیژوالکتریک فرکانس ریزش گردابه‌ها را با دقت اندازه‌گیری کرد، در نتیجه اندازه‌گیری دبی جریان در سرعت‌های کم محدود می‌شود.

به منظور بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای و افزایش حساسیت آن در دبی‌های کم، تحقیقات زیادی انجام شده است. یکی از روش‌ها، برای بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای به‌ویژه برای دبی‌های کم، استفاده نمودن از جسم لبه‌پهن دوتایی است. بدین صورت که دو جسم لبه‌پهن با یک فاصله از یکدیگر به صورت سری قرار می‌گیرند [5-7]. پنگ و همکارانش [7]، در یک تحقیق تجربی، ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی با سطح مقطع مثلثی که به صورت سری قرار دارند را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که تکرارپذیری فرکانس ریزش گردابه‌ها و حساسیت سیگنال به نویز اجسام دوتایی مناسب بوده و آن را برای استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای نیز پیشنهاد دادند. هوندا و یاماساکی [8] با استفاده از دو جسم لبه‌پهن سری، حساسیت دبی‌سنج گردابه‌ای برای دبی‌های کم و همچنین تکرارپذیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را افزایش دادند. ایگاراشی [9] [11]، تکرارپذیری فرکانس ریزش گردابه‌ها و قدرت گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی با سطح مقطع دایره و نیم‌دایره به قطر d که با یک فاصله l ، از یکدیگر به صورت سری قرار دارند را بررسی نمود. نتایج نشان داد، هنگامی که فاصله بی‌بعد شده مدل دوتایی (l/d) ، حدود ۰/۱۵ تا ۰/۱۶ است، ریزش گردابه‌های ناشی از جسم دوتایی، منظم‌تر و قوی‌تر می‌باشد. همچنین وی نشان داد، برای جسم دوتایی با سطح مقطع مثلث و نیم‌دایره که به صورت سری و با فاصله بی‌بعد $0/16 \leq l/d \leq 0/15$ از یکدیگر قرار دارند، ریزش گردابه‌ها قوی‌تر و منظم‌تر می‌شود. بنتلی و بنسون [12]، ریزش گردابه‌های ناشی از ترکیب‌های سری اجسام لبه‌پهن با سطح مقطع مستطیل شکل را به صورت تجربی بررسی نمودند و دریافتند که برای برخی از ترکیب‌های اجسام دوتایی، فرکانس ریزش گردابه‌ها تکرارپذیری مناسب‌تری را در طیف وسیعی از سرعت جریان، نسبت به یک جسم لبه‌پهن مستطیلی شکل منفرد دارد. بنتلی و همکارانش [13]، جسم دوتایی لبه‌پهن که ترکیبی از جسم اول با سطح مقطع مستطیل و جسم دوم با سطح مقطع مثلث بوده و به صورت سری قرار گرفته‌اند را به صورت تجربی و با استفاده از تصویربرداری بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که در برخی از فاصله‌های میان دو جسم، فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن دوتایی از لحاظ تکرارپذیری بهتر از جسم لبه‌پهن تکی بوده، همچنین قدرت ریزش گردابه‌ها نیز بهبود یافته است. فو و یانگ [14]، در یک تحقیق عددی، ارتعاش ناشی از ریزش گردابه‌های دو جسم لبه‌پهن با سطح مقطع مثلث که به صورت سری قرار دارند را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که نسبت سیگنال به نویز گردابه‌ها افزایش یافته و در نتیجه استفاده از جسم لبه‌پهن دوتایی در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای را پیشنهاد دادند.

می‌باشد. سرعت تونل باد با استفاده از کنترل دور از ۲ تا ۲۸ متر بر ثانیه قابل تنظیم است. غیریکنواختی سرعت تونل باد کمتر از ۰/۱٪ و مقدار شدت اغتشاش‌های تونل باد در مرکز اتاق آزمون، کمتر از ۰/۲٪ است. فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از مدل دوتایی، با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فرانسجش صبا اندازه‌گیری شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی می‌باشد. سیم پراب از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرون است. عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ برابر ۱/۵۷٪ به دست می‌آید [16]. با فرض توزیع نرمال گاوس و ضریب پوشش ۲، پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای طبق مرجع [16] به صورت جدول ۱ ارائه می‌شود.

جدول ۱) پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ [16]

عدم قطعیت در استفاده از لوله پیتوت و فشارسنج الکترونیکی	۰/۰۰۶
برای سرعت‌های بیش‌تر از ۲/۵ m/s	
عدم قطعیت در استفاده از مکانیزم انتقال دهنده	۰/۰۰۳
عدم قطعیت در ارسال داده‌ها از طریق کارت A/D	۰/۰۰۰۷
عدم قطعیت ناشی از تغییرات دمای محیطی [17]	۰/۰۰۲
عدم قطعیت برازش منحنی کالیبراسیون	۰/۰۰۴

همچنین تأثیر تغییرات دمای محیط بر اندازه‌گیری سرعت به صورت نرم‌افزاری اصلاح شده است [18]. به منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت جابه‌جایی ۰/۱ میلی‌متر در سه بعد می‌باشد که با استفاده از رایانه حرکت آن قابل کنترل است. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت اخذ داده از نوع آن‌آی (NI) به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار فلویور (Flow ware) تجزیه و تحلیل شده و سرعت لحظه‌ای مشخص می‌شود. با اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای، می‌توان سرعت متوسط، شدت اغتشاش‌ها و سرعت نوسانی جریان را تعیین نموده و با استفاده از تبدیل فوریه، سرعت نوسانی را از حوزه زمان به حوزه فرکانس تغییر داده و در نتیجه می‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را به دست آورد. مدل مورد استفاده در این تحقیق، مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر که دارای شکاف یک بعدی در امتداد قطر آن (مطابق شکل (۱)) می‌باشد، همچنین محور مختصات در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل (۲)، تصویر مدل لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای را در تونل باد نشان می‌دهد که با استفاده از پیچ‌های تنظیم، می‌توان فاصله بین دو استوانه نیم‌دایره‌ای را تنظیم نمود.

در این تحقیق در ابتدا شکاف مدل دوتایی را صفر نموده و مدل را به صورت استوانه‌ی دایره‌ای یک‌پارچه درآورده، سرعت جریان و شدت اغتشاش‌های آن و همچنین ریزش گردابه‌ها پایین‌دست

همچنین در ارتباط با الگوی جریان پایین‌دست جسم لبه‌پهن دوتایی با سطح مقطع دایره‌ای که به صورت سری قرار دارند، تحقیقات گوناگونی به‌صورت عددی و تجربی انجام گرفته است [15]. این الگوها به فاصله بی‌بعد l/d (فاصله دو مرکز دایره) و عدد رینولدز بستگی دارد، که این الگوها را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود: (الف) هنگامی که فاصله بی‌بعد دو استوانه دایره‌ای به اندازه کافی کم بوده که جریان جدا شده از جسم اول به جسم دوم برخورد نمی‌کند، و تحت تأثیر ناحیه جدایش جسم اول می‌باشد و دو جسم، مانند یک جسم در نظر گرفته می‌شود. (ب) با افزایش فاصله بی‌بعد دو استوانه دایره‌ای، جریان جدا شده از استوانه اول به استوانه دوم برخورد می‌کند. به عبارت دیگر، لایه‌های برشی جریان جدا شده از استوانه دایره‌ای اول، دوباره روی سطح استوانه دایره‌ای دوم برخورد کرده و ممکن است در شکاف دو استوانه گردابه ایجاد شود. (ج) با افزایش بیش‌تر فاصله بی‌بعد دو استوانه دایره‌ای به مقدار کافی، پدیده پرش اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، ریزش گردابه‌ها قبل از رسیدن به جسم دوم کامل می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به منظور کاهش خطای غیر خطی بودن عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز و همچنین افزایش قدرت فرکانس ریزش گردابه‌ها مخصوصاً در دبی‌های کم، از جسم لبه‌پهن دوتایی سری استفاده می‌شود.

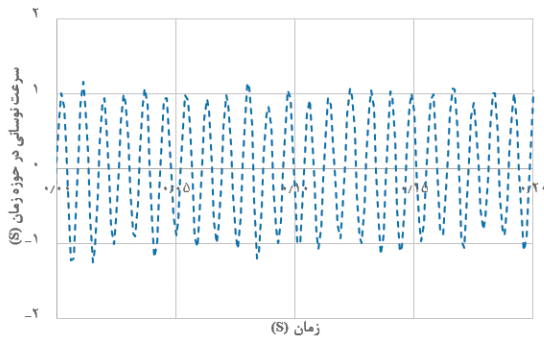
در این مقاله تجربی، تأثیر فاصله میان دونیمه جسم لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای و تغییرات عدد رینولدز بر روی فرکانس و قدرت (شدت اغتشاش‌ها) ریزش گردابه‌های ناشی از آن مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین خطای غیرخطی بودن عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز مطالعه گردید. نتایج این تحقیق به طراحان این امکان را می‌دهد که با تعیین فاصله بهینه میان دونیمه جسم لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای، به مدل لبه‌پهن مورد نظر با ویژگی‌های زیر برای استفاده در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای دست یابند:

- در بازه وسیعی از سرعت‌های جریان، فرکانس ریزش گردابه‌ها با سرعت جریان به صورت خطی تغییر کند و یا به عبارت دیگر، عدد استروهل از عدد رینولدز مستقل باشد.
- قدرت ریزش گردابه‌ها به اندازه کافی زیاد باشد که با استفاده از وسایل اندازه‌گیری نظیر سنسور پیزوالکتریک یا جریان‌سنج سیم‌داغ بتوان فرکانس آن را به درستی تعیین کرد.

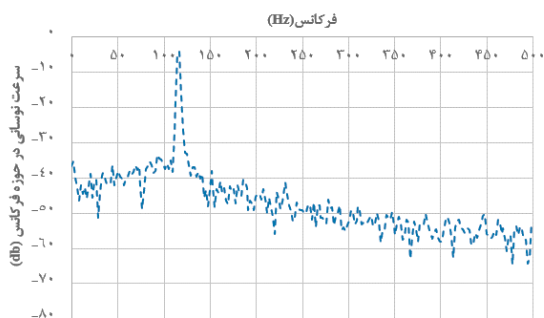
۲- روش آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مدار بسته با سطح مقطع اتاق آزمون ۶۰×۶۰ سانتی‌متر مربع است و نسبت نازل تونل باد فوق ۱۲

گردابه‌ها، نیاز است که سرعت نوسانی جریان از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شود که این امر با استفاده از تبدیل فوریه و اصل نایکوئیست (Nyquist) انجام می‌شود. شکل (۳-ب) طیف فرکانسی سرعت نوسانی را نشان می‌دهد که فرکانس حاکم در آن ۱۲۶ هرتز است.



(الف)



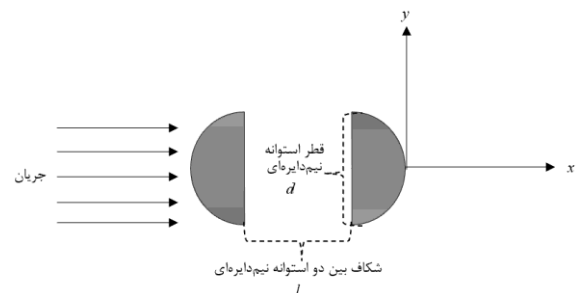
(ب)

شکل ۳ (الف) اسپلوگرام و (ب) طیف فرکانسی سرعت نوسانی جریان، پایین‌دست مدل دوتایی با نسبت $l/d = 0/15$ در فاصله $x/d = 2$ و $y/d = 2$ در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰

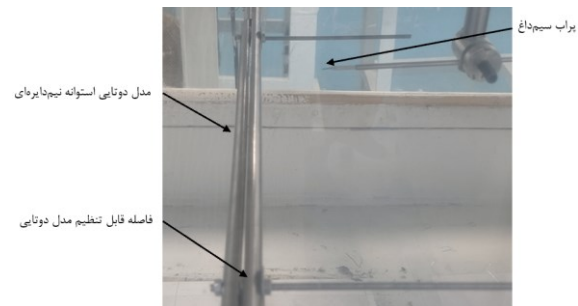
شکل (۴)، تغییرات عدد استروهمال بر حسب عدد رینولدز را برای مدل استوانه دایره‌ای، استوانه نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن رو و پشت به جهت جریان است و مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای برای نسبت‌های مختلف بی‌بعد l/d نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۴) عدد استروهمال برای مدل استوانه دایره‌ای حدود $0/205$ است. که با توجه به مرجع [15]، نتایج به دست آمده، مشابه نتایج سایر محققین می‌باشد. برای استوانه نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن رو به جهت جریان است، عدد استروهمال حدود $0/22$ بوده ولی برای مدل استوانه نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن پشت به جهت جریان است، عدد استروهمال حدود $0/14$ می‌باشد. با توجه به فیزیک جریان و هندسه مدل لبه‌پهن، با بررسی تحقیقاتی که با استفاده از مرئی‌سازی در مرجع [21] انجام شده، می‌توان تشخیص داد که الگوی جریان و اعداد استروهمال به دست آمده برای مدل استوانه نیم‌دایره در هر دو حالت (رو و پشت به جهت جریان)، مشابه الگوی جریان برای مدل لبه‌پهن مثلث متساوی‌الاضلاع در دو حالت رأس رو به جهت جریان و ضلع رو به

مدل بررسی می‌شود. سپس فاصله شکاف مدل دوتایی را افزایش داده و آزمایش‌ها تکرار می‌شوند. تغییرات فاصله شکاف مدل دوتایی در این تحقیق در بازه $0/075 \leq l/d \leq 3$ (د قطر و l شکاف بین دو استوانه نیم‌دایره‌ای) بوده و بازه عدد رینولدز این تحقیق نیز ۱۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ می‌باشد.



شکل ۱ مدل لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای به همراه محور مختصات



شکل ۲ تصویر مدل لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره در تونل باد

۳- بررسی نتایج

در دبی سنج گردابه‌ای می‌بایست عدد استروهمال ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن مستقل از عدد رینولدز باشد. به عبارت دیگر رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها با سرعت جریان باید خطی باشد. عدد استروهمال طبق رابطه (۱) تعریف می‌شود.

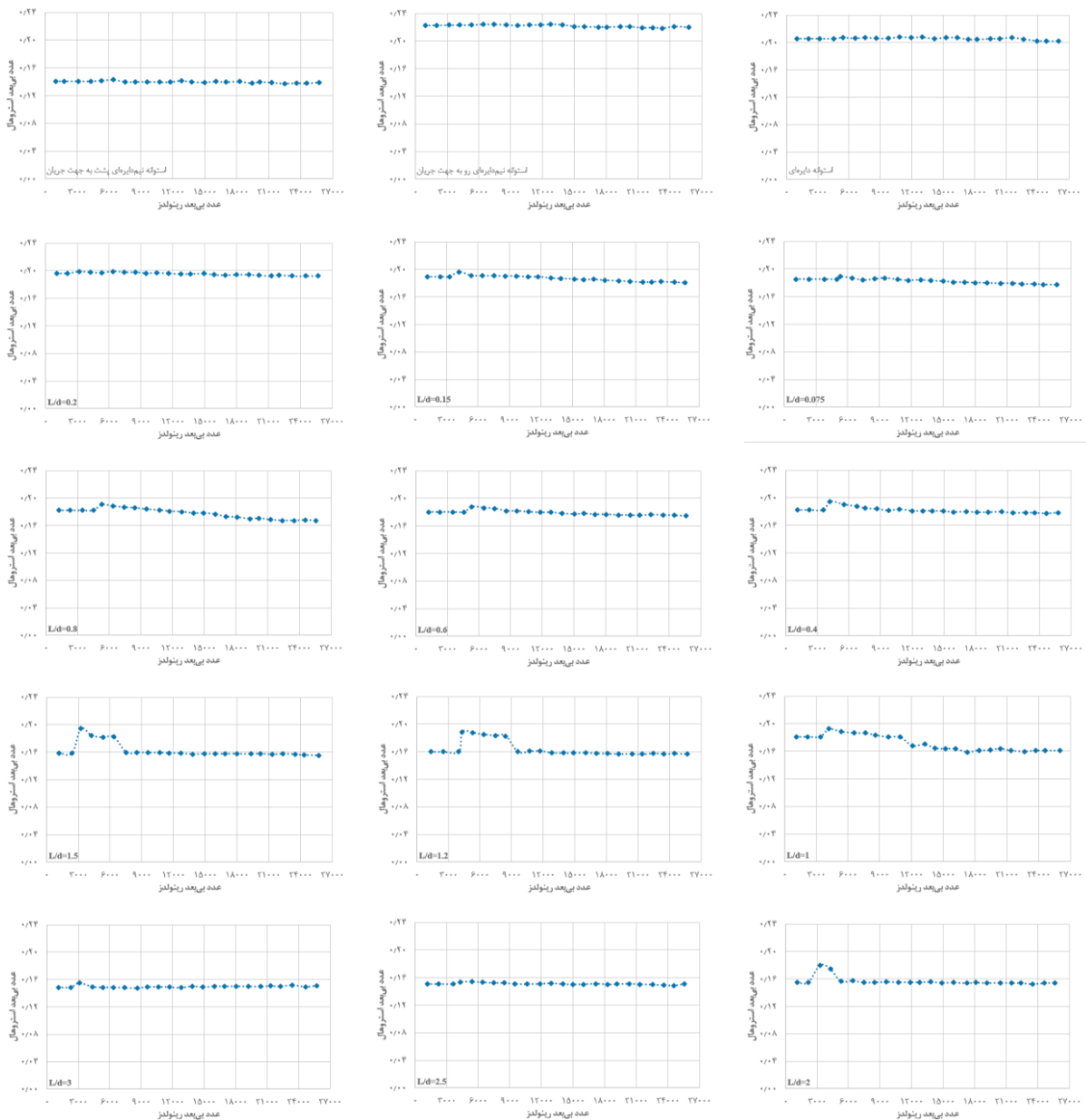
$$St = \frac{f \times d}{U} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، f فرکانس ریزش گردابه‌ها، d قطر مدل و U سرعت متوسط جریان آزاد است. با تعیین سرعت نوسانی می‌توان فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود. شکل (۳-الف) اسپلوگرام سرعت نوسانی پایین‌دست مدل دوتایی با نسبت $l/d = 0/15$ و در فاصله $x/d = 2$ و $y/d = 2$ در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ را نشان می‌دهد. در این فاصله، سرعت جریان هوا برابر سرعت جریان آزاد و همچنین شدت اغتشاش‌های جریان کمتر از ۶٪ می‌باشد، لذا این نقطه برای اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد و فرکانس ریزش گردابه‌ها مناسب است [19].

مطابق شکل (۳-الف) سرعت نوسانی نزدیک به موج سینوسی می‌باشد که مشخص‌کننده پدیده ریزش گردابه‌ها است [20]. به منظور تعیین فرکانس حاکم و یا به عبارت دیگر فرکانس ریزش

تقسیم می‌شوند. در نسبت‌های بی‌بعد کم‌تر از $0/8$ ، الگوی جریان بدین صورت است که جریان جدا شده از جسم اول به جسم دوم برخورد نمی‌کند و دو جسم مانند یک جسم در نظر گرفته می‌شود. در نسبت‌های بی‌بعد بیش‌تر از 2 ، ریزش گردابه‌ها قبل از رسیدن به جسم دوم کامل می‌شود و در نسبت‌های بی‌بعد $2 < l/d \leq 0/8$ ، جریان جدا شده از جسم اول به جسم دوم برخورد می‌کند. به عبارت دیگر لایه‌های برشی جریان جدا شده از جسم اول، دوباره روی سطح جسم دوم برخورد کرده و ممکن است در شکاف دو جسم گردابه ایجاد شود.

جهت جریان می‌باشد [22]. همچنین برای مدل استوانه دایره‌ای، استوانه نیم‌دایره‌ای در هر دو حالت (قسمت محدب آن رو و پشت به جهت جریان) در بازه‌ی اعداد رینولدز آزمایش شده، عدد استروهل مستقل از عدد رینولدز می‌باشد. با بررسی منحنی‌های شکل (۴) برای مدل دوتایی، مقدار عدد استروهل به نسبت l/d بستگی دارد. مطابق شکل فوق، در نسبت‌های $l/d < 0/8$ یا $2 \geq l/d$ ، تغییرات عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز ثابت و بدون پرش بوده و در بازه $2 < l/d \leq 0/8$ عدد استروهل دارای تغییرات و پرش می‌باشد. با توجه به مرجع [15]، به نظر می‌رسد مشابه مدل دوتایی استوانه دایره‌ای الگوهای جریان به سه گروه



شکل ۴ تغییرات عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز برای نسبت‌های مختلف l/d

کمتر از ۲٪ می‌باشد. همچنین این مقدار در بازه $0/8 \leq l/d < 2$ بالا بوده و تا حدود ۷٪ افزایش می‌یابد که نشان دهنده تغییرات و پخش عدد استروهاال نسبت به عدد رینولدز می‌باشد. به عبارت دیگر در این بازه رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها نسبت به سرعت جریان، غیر خطی بوده، لذا این بازه مناسب استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای نمی‌باشد.

شکل (۶)، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین‌دست مدل استوانه دایره‌ای و مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره برای نسبت‌های مختلف بی بعد شده l/d را، در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰ نشان می‌دهد.

محور عمودی شکل (۶) به صورت لگاریتمی (دسی بل) است. فرکانس حاکم همان فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌باشد که برای مدل استوانه دایره‌ای ۱۲۶ هرتز است. لازم به ذکر است که شدت اغتشاش‌های جریان در حوزه فرکانس به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

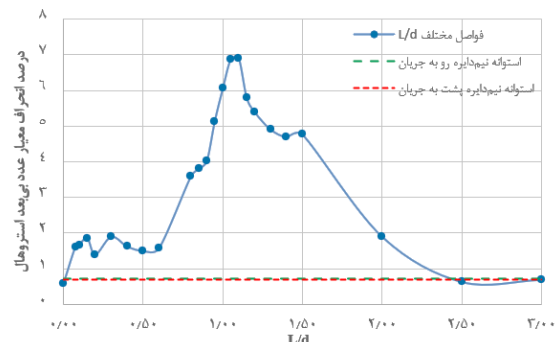
$$\%Tu = \frac{1}{U} \sum_{i=1}^N u'_f \times 100 \quad (3)$$

با توجه به رابطه‌ی (۳)، شدت اغتشاش‌ها متناسب با مجموع دامنه‌های طیف فرکانسی می‌باشد. با بررسی منحنی‌های شکل (۶) می‌توان تشخیص داد که بیشترین سهم از مقدار شدت اغتشاش‌ها مربوط به سرعت نوسانی با فرکانس ریزش گردابه‌ها است. لذا برای بررسی قدرت ریزش گردابه‌ها، می‌توان شدت اغتشاش‌های آن را بررسی نمود. شکل (۷)، شدت اغتشاش‌های جریان پایین‌دست مدل دوتایی در فاصله‌ی $x/d = 1/5$ و $y/d = 1/5$ بر حسب عدد رینولدز نشان می‌دهد. در این فاصله ریزش گردابه‌ها به وضوح مشاهده می‌شود [20].

به منظور بررسی خطای غیر خطی بودن عدد استروهاال نسبت به عدد رینولدز، میزان انحراف معیار عدد استروهاال طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

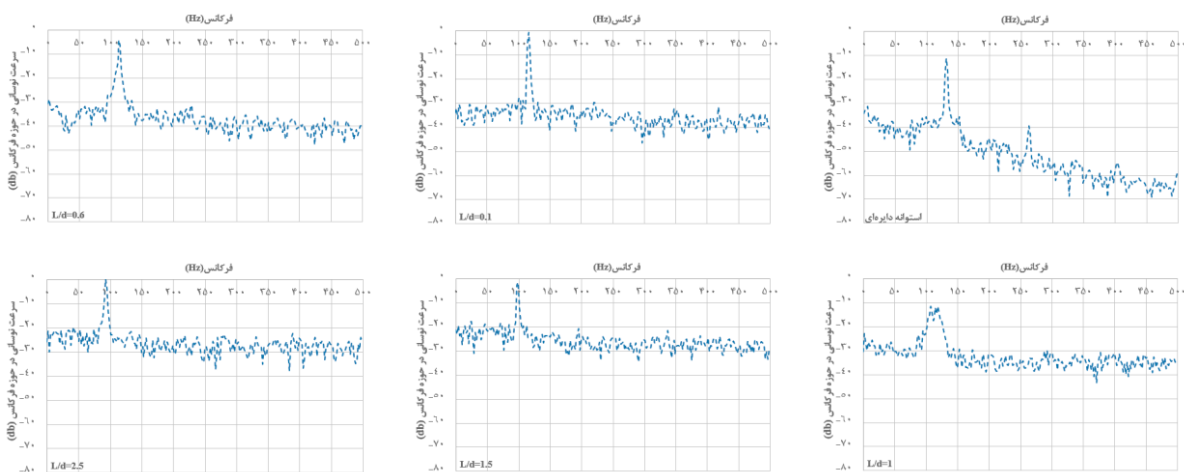
$$\% \varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_i - \bar{S}|}{\bar{S}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، \bar{S} عدد استروهاال متوسط و S_i عدد استروهاال در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد. شکل (۵)، این انحراف معیار را بر حسب نسبت بی‌بعد l/d و همچنین برای استوانه دایره‌ای، استوانه نیم‌دایره با قسمت محدب رو به جهت جریان و پشت به جهت جریان نشان می‌دهد.

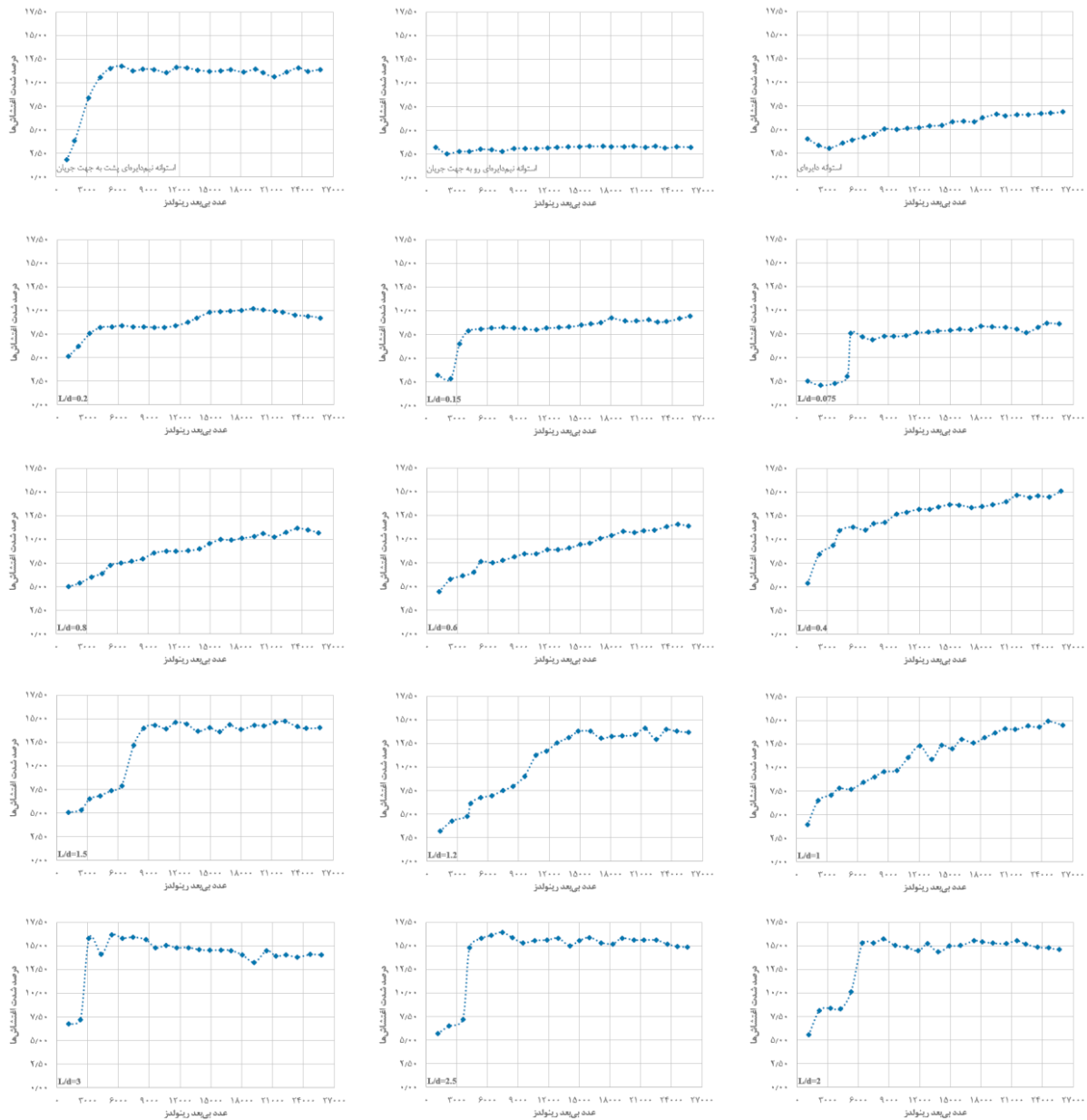


شکل ۵) میزان انحراف معیار عدد استروهاال در بازه اعداد رینولدز ۱۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ بر حسب فاصله شکاف بی‌بعد شده

مطابق شکل فوق، میزان انحراف معیار عدد استروهاال برای استوانه دایره‌ای و استوانه نیم‌دایره در هر دو صورت (پشت و رو به جهت جریان) حدود ۷٪ می‌باشد. مقدار انحراف معیار عدد استروهاال برای مدل دوتایی به نسبت بی‌بعد l/d بستگی دارد. میزان انحراف از معیار عدد استروهاال در بازه‌های $2 \leq l/d < 3$ و $0 < l/d < 0/8$



شکل ۶) طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین‌دست مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره برای نسبت‌های مختلف l/d در عدد رینولدز ۱۰۵۰۰



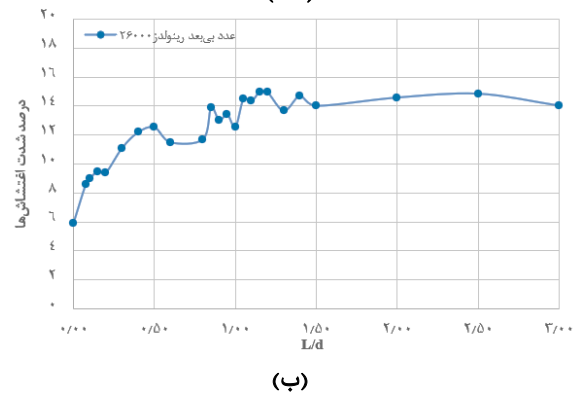
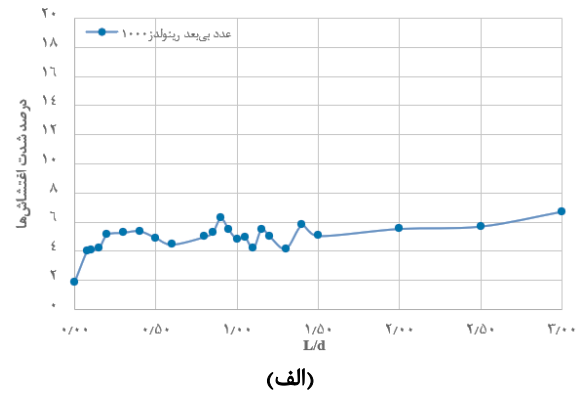
شکل ۷) تغییرات شدت اغتشاش‌های جریان هوا بر حسب عدد رینولدز برای نسبت‌های مختلف L/d

نسبت بی بعد L/d بستگی دارد که با افزایش این نسبت، بیشتر می‌شود و در محدوده بعضی از اعداد رینولدز، تغییرات آن بسیار شدید بوده و سریعاً به مقدار حد اکثر می‌رسد. همان‌گونه که بیان شد، یکی از مشکلات دبی‌سنج گردابه‌ای، تأثیر نویز و یا اغتشاش‌های نوسانی جریان بر روی اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها است که می‌تواند بر عملکرد دبی‌سنج تأثیر داشته باشد [4]. این موضوع برای اعداد رینولدز پایین و یا به عبارت دیگر در دبی‌های کم از اهمیت بیشتری برخوردار است. بدین منظور قدرت ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن دوتایی در اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۲۶۰۰۰ مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. شکل (۸)، تغییرات شدت اغتشاش‌های جریان هوا بر حسب نسبت‌های بی‌بعد L/d برای اعداد رینولدز ۱۰۰۰ و ۲۶۰۰۰ را نشان می‌دهد.

مطابق شکل (۷) شدت اغتشاش‌های ناشی از مدل استوانه دایره‌ای، استوانه نیم‌دایره در هر دو صورت (پشت و رو به جهت جریان) و مدل دوتایی با نسبت‌های مختلف L/d ، با افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. این افزایش برای مدل استوانه دایره‌ای کم بوده و از مقدار حدود ۳٪ در اعداد رینولدز پایین تا حدود ۷٪ در اعداد رینولدز بالا افزایش یافته است، همچنین این تغییرات در مدل استوانه نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن رو به جهت جریان است از مقدار حدود ۲/۵٪ تا حدود ۳/۵٪ می‌باشد ولی افزایش شدت اغتشاش‌ها برای مدل استوانه نیم‌دایره‌ای که قسمت محدب آن پشت به جهت جریان است بالا بوده و مقدار آن از حدود ۲٪ در عدد رینولدز ۱۰۰۰ تا مقدار حدود ۱۱/۵٪ در عدد رینولدز ۲۶۰۰۰ افزایش می‌یابد. شیب تغییرات شدت اغتشاش‌ها برای مدل دوتایی به

رینولدز نسبت به جسم لبه‌پهن منفرد، می‌باشد. در این تحقیق تجربی از مدل دوتایی استوانه نیم‌دایره استفاده شده که با استفاده از نتایج به دست آمده، این امکان را به طراحان می‌دهد که با تعیین فاصله بهینه میان دونیمه یک جسم لبه‌پهن دوتایی استوانه نیم‌دایره‌ای، به مدل لبه‌پهن مورد نظر برای استفاده در دبی‌سنج‌های گردابه‌ای دست یابند. نتایج این تحقیق به اختصار بیان می‌گردد:

- مقدار عدد استروهل برای مدل دوتایی به نسبت l/d و عدد رینولدز بستگی دارد. در بازه $0/8 \leq l/d < 2$ ، عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز دارای تغییرات و پرش می‌باشد، لذا مناسب استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای نمی‌باشد. در نسبت‌های $l/d < 0/8$ و یا $l/d \geq 2$ ، تغییرات عدد استروهل مستقل از عدد رینولدز است.
- میزان انحراف معیار عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز در بازه ۱۰۰۰ تا ۲۶۰۰۰ برای مدل دوتایی به فاصله میان دونیمه جسم لبه‌پهن بستگی دارد و در بازه $2 < l/d < 3$ کم‌تر از ۲٪ می‌باشد. همچنین این میزان انحراف از معیار در بازه $0/8 \leq l/d < 2$ بالا بوده و تا حدود ۷٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تغییرات و پرش عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز در این بازه می‌باشد. به عبارت دیگر رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها نسبت به سرعت جریان غیر خطی بوده، لذا این بازه مناسب استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای نمی‌باشد.
- با بررسی طیف فرکانسی سرعت لحظه‌ای، می‌توان تشخیص داد که بیشترین سهم از مقدار شدت اغتشاش‌ها مربوط به سرعت نوسانی با فرکانس ریزش گردابه‌ها است. لذا برای بررسی قدرت سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها، می‌توان شدت اغتشاش‌های آن را بررسی نمود.
- میزان شدت اغتشاش‌های ناشی از مدل استوانه دایره‌ای و استوانه نیم‌دایره‌ای (در هر دو حالت) به عدد رینولدز بستگی داشته و با افزایش عدد رینولدز، این مقدار افزایش می‌یابد و از یک عدد رینولدزی به بعد تقریباً ثابت می‌باشد. برای مدل دوتایی میزان شدت اغتشاش‌ها علاوه بر عدد رینولدز به نسبت بی‌بعد l/d وابسته است و مطابق مدل‌های استوانه دایره‌ای و نیم‌دایره‌ای (در هر دو حالت) با افزایش عدد رینولدز، شدت اغتشاش‌ها افزایش می‌یابد.
- با توجه به اهمیت بیش‌تر قدرت در اعداد رینولدز پایین، در عدد رینولدز ۱۰۰۰، با افزایش l/d از ۰ تا ۰/۸، مقدار شدت اغتشاش‌ها و در نتیجه قدرت ریزش گردابه‌ها نسبت به مدل استوانه دایره‌ای به میزان ۲ برابر افزایش



شکل ۸) تغییرات شدت اغتشاش‌های جریان هوا بر حسب نسبت‌های بی‌بعد l/d در عدد رینولدز الف: ۱۰۰۰ و ب: ۲۶۰۰۰

با توجه به تعریف شدت اغتشاش‌ها (رابطه‌ی (۳))، سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و یا به عبارت دیگر قدرت گردابه‌ها، به شدت اغتشاش‌ها و سرعت متوسط جریان آزاد به صورت مستقیم بستگی دارد. از این‌رو در سرعت‌های پایین (دبی‌های کم)، شدت اغتشاش‌ها و رابطه آن با l/d اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند. تغییرات شدت اغتشاش‌ها برای عدد رینولدز ۱۰۰۰ و به عبارت دیگر در سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه (شکل ۸-الف)، نشان می‌دهد که با افزایش نسبت بی‌بعد l/d از ۰ تا ۰/۸، مقدار شدت اغتشاش‌ها و در نتیجه قدرت ریزش گردابه‌ها به میزان ۲ برابر قدرت ریزش گردابه‌های مدل استوانه دایره‌ای، افزایش یافته است. همچنین در بازه‌ی $2 < l/d < 3$ ، قدرت ریزش گردابه‌ها حدود ۳ برابر قدرت ریزش گردابه‌های مدل استوانه دایره‌ای ($l/d = 0$) می‌باشد. لذا انتخاب این نسبت‌ها برای دبی‌سنج پیشنهاد می‌شود. با توجه به شکل (۸-ب)، در عدد رینولدز ۲۶۰۰۰ که سرعت در آن معادل ۲۴ متر بر ثانیه است، قدرت گردابه‌ها که متناسب با سرعت جریان و شدت اغتشاش‌ها می‌باشد به اندازه کافی قوی و مناسب است.

۴- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌ها، برای بهبود عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای به‌ویژه برای دبی‌های کم، استفاده از جسم لبه‌پهن دوتایی سری است. هدف از این امر، تقویت فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از آن به منظور کاهش خطای غیر خطی بودن عدد استروهل نسبت به عدد

13- Bentley JP, Benson RA, Shanks AJ. The development of dual bluff body vortex flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1996;7(2):85-90.

14- Fu, X. & Yang, Huayong. Study on hydrodynamic vibration in dual bluff body vortex flowmeter. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2001; 9. 123-128.

15- Forouzi Feshalami B, He S, Scarano F, Gan L, Morton C. A review of experiments on stationary bluff body wakes. *Physics of Fluids*. 2022;34(1).

16- Jørgensen FE. How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide. *Dantec dynamics*; 2001.

17- Ardekani MA, Farhani F, Nourmohammadi A. Experimental study of drag coefficient of multistrand wires using single normal hot-wire anemometer probe. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2016;50:237-44.

18- Ardekani MA, Farhani F. Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2009;20(4-5):174-9.

19- Ardekani MA. Hot-wire calibration using vortex shedding. *Measurement*. 2009;42(5):722-9.

20- Ardekani E, Farhani F, Ardekani MA. Determination of flow angle from measurements of vortex shedding frequency downstream of a triangular bluff model using a single-sensor hot-wire probe. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2024;100:102731.

21- Xu SJ, Zhang WG, Gan L, Li MG, Zhou Y. Experimental study of flow around polygonal cylinders. *Journal of fluid mechanics*. 2017;812:251-78.

22- Ardekani E, Farhani F, Ardekani MA. Experimental Investigation of the Frequency Spectra of Vortex Shedding from a Triangular Bluff Body at Different Flow Angles. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*. 2024;56(5):679-98.

یافته و برای نسبت $2 < l/d < 3$ قدرت ریزش گردابه‌ها حدود ۳ برابر قدرت ریزش گردابه‌های ناشی از مدل استوانه دایره‌ای می‌باشد.

- با توجه به میزان انحراف معیار عدد استروهمال نسبت به عدد رینولدز و همچنین قدرت فرکانس ریزش گردابه‌ها (بررسی شدت اغتشاش‌ها)، استفاده از مدل دوتایی با سطح مقطع نیم‌دایره برای فاصله بی‌بعد $0 < l/d < 3$ و $2 \leq l/d \leq 3$ جهت استفاده در دبی‌سنج گردابه‌ای پیشنهاد می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافع برای اظهار وجود ندارد.

منابع

1- Roshko A. On the wake and drag of bluff bodies. *Journal of the aeronautical sciences*. 1955;22(2):124-32.

2- Venugopal A, Agrawal A, Prabhu SV. Review on vortex flowmeter—Designer perspective. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011;170(1-2):8-23.

3- Sun Z, Zhang H, Zhou J. Evaluation of uncertainty in a vortex flowmeter measurement. *Measurement*. 2008;41(4):349-56.

4- Thinh ND, Evangelisti J. Flow modeling and experimental investigation of a vortex shedding flow meter. In *ASME FEDSM 1997* (Vol. 97, pp. 109-118).

5- Bentley JP, Mudd JW. Vortex shedding mechanisms in single and dual bluff bodies. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2003;14(1-2):23-31.

6- Peng J, Fu X, Chen Y. Flow measurement by a new type vortex flowmeter of dual triangulate bluff body. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2004;115(1):53-9.

7- Peng J, Fang M. Response of a dual triangulate bluff body vortex flowmeter to oscillatory flow. *Flow measurement and instrumentation*. 2014;35:16-27.

8- HONDA S, YAMASAKI H. Stabilization of Vortex Shedding in a Three-Dimensional Flow in a Circular Pipe. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*. 1981;17(7):764-9.

9- Igarashi T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 1st report, flow control and flow patterns. *Bulletin of JSME*. 1978;21(154):656-64.

10- Igarashi T. Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem: 1st report. *Bulletin of JSME*. 1981;24(188):323-31.

11- IGARASHI T. Flow characteristics around a circular cylinder with a slit: 2nd report, effect of boundary layer suction. *Bulletin of JSME*. 1982;25(207):1389-97.

12- Bentley JP, Benson RA. Design conditions for optimal dual bluff body vortex flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*. 1993;4(4):205-13.