



Experimental Investigation of the Frequency Spectra of Vortex Shedding from a Triangular Bluff Body at Different Flow Angles

Ehsan Ardekani, Foad Farhani, Mohammad Ali Ardekani*

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

ABSTRACT: The base of the vortex flowmeter is the linear relationship $Q=kf$ (k is a constant and f is vortex shedding frequency). Therefore, the accuracy of the flow meter is only a function of the vortex shedding frequency measurement accuracy. To determine the frequency measurement accuracy, it is necessary to investigate its frequency spectrum. In this research, vortex shedding and its frequency spectrum downstream of an equilateral triangular model of 10 mm side have been investigated experimentally in a closed-type wind tunnel using a hot-wire anemometer. The vortex shedding frequency spectra were fitted using the normal Gauss distribution, and based on the expected confidence level, the accuracy of the frequency measurement and its changes were quantified using the standard deviation of the normal distribution. Results show for $Re > 1200$, the Strouhal number variation is independent of the Re number, and it is only a function of the flow angle. Also, for a 95% confidence level, the maximum frequency measurement error for the triangular model is 1.53% for $\alpha = 60^\circ$ and 2.46% for $\alpha = 0^\circ$. The standard deviation of the frequency spectra has an increasing trend streamwise, however, it is constant spanwise outside the wake region. When the flow angle is in the range of $18^\circ < \alpha < 23^\circ$, the measurement error increases to about 9%.

Review History:

Received: Jun. 03, 2024

Revised: Aug. 04, 2024

Accepted: Sep. 09, 2024

Available Online: Sep. 20, 2024

Keywords:

Hot-wire Anemometer

Strouhal Number

Triangular Model

Vortex Flowmeter

Vortex Shedding Frequency Spectrum

1- Introduction

Vortex shedding from bluff bodies, which causes the vibration of the body or the bodies in its downstream, is an important fluid flow phenomenon. This phenomenon is the basis of the working of vortex shedding flowmeters [1].

The Strouhal number ($St = \frac{fd}{U}$) is used to study the vortex shedding phenomenon, where d is the bluff body characteristic length, U is the free stream velocity and f is the vortex shedding frequency. Also, the frequency spectrum near the vortex shedding frequency should be studied. Knowing the vortex shedding frequency spectrum, the uncertainty in measuring the vortex shedding frequency can be determined.

Various researchers have investigated the vortex shedding from bluff bodies, especially the triangle shape. The reported research is mainly numerical for $Re < 200$ and experimental and numerical for $Re > 200$. Kumar and Dalal [2] performed a numerical investigation of the vortex shedding from an equilateral triangle with the triangle vertex facing the flow for $80 < Re < 200$ and blockage ratios of 0.083 to 0.33. They found that the critical Reynolds increases with an increase in blockage ratio: the critical Reynolds number is about 40 at a blockage ratio of 0.083, and it is about 64 at a blockage ratio of 0.33. Derakhshandeh and Mahboob [3] studied numerically

the flow downstream of an equilateral triangle for $Re < 200$. They showed that the critical Reynolds number for a triangle model with the triangle vertex facing the flow is about 38.04. Luo et al. [4] studied the flow downstream of the triangle, square, and trapezoidal bluff models using wind and water tunnels. Their results indicate that the Strouhal number depends on the flow angle related to the model, reaching its maximum at a flow angle of 22° .

In experimental work, Ardekani et al. [5] investigated the vortex shedding from a triangular model for use in a vortex flowmeter and/or for calibration of hot-wire anemometer at low velocities. They used a wind tunnel and a hot-wire probe to study the airflow distribution, flow turbulence, and vortex shedding from an equilateral triangular model of 10 mm side. They showed that the variation of the Strouhal number with the flow angle is significant. They also showed that the flow angle has negligible effects on the velocity distribution and the flow turbulence intensity.

This paper presents the experimental study of the vortex shedding and its frequency spectrum from a triangular model at different flow angles and Reynolds numbers. Also, the vortex shedding downstream of the model, and its frequency spectrum streamwise and spanwise, were studied.

*Corresponding author's email: ardekani@irost.ir



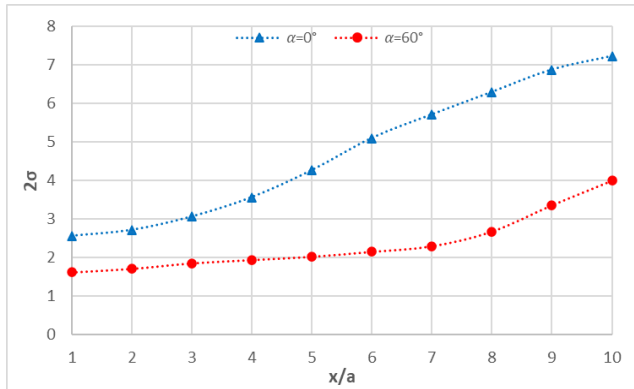


Fig. 1. Value of 2σ downstream of the model in the longitudinal direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

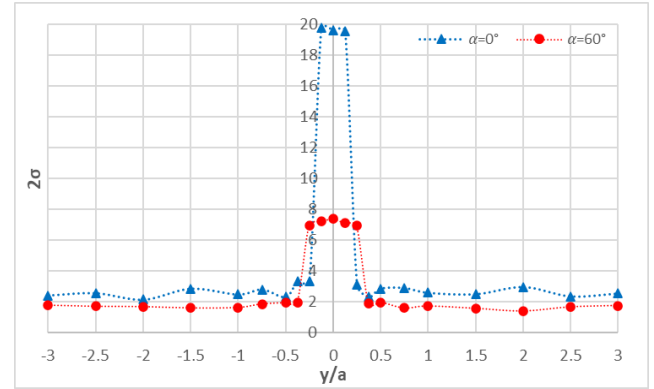


Fig. 2. Value of 2σ downstream of the model in the lateral direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

2- Experimental Method

All the experiments were done using the wind tunnel at the Mechanical Engineering Department, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST). A single-sensor hot-wire probe was used to measure the vortex shedding frequency. A traverse mechanism was used to place the probe at any desired position in the wind tunnel. Data was acquired and transferred to a computer for further processing using an A/D card. The two-dimensional experimental model was an equilateral triangle of 10 mm side and 150 mm length. A rotating mechanism was used to rotate the model through different angles. In this research, the flow downstream of the model was studied for different flow angles and $1200 < Re < 15000$.

3- Results and Discussion

Results show that for $Re > 1200$, the Strouhal number is independent of the Reynolds number. However, the Strouhal number varies with the flow angle (α). Also, the minimum Strouhal number is 0.135 at $\alpha = 60^\circ$, and the maximum value is 0.23 for $\alpha = 20^\circ, 100^\circ$. Additionally, the standard deviation at $\alpha = 60^\circ$ equals 0.765, which is lower than other angles. Hence, the placement of the triangular model at $\alpha = 60^\circ$ is more suitable for flowmetry applications.

According to Figure 1 the vortex shedding frequency amplitude is small near the model and it initially increases with distance from the model and then decreases with further distance. The results show that with an increase in distance in the longitudinal direction the standard deviation increases. Therefore, the probe should be placed at a closer longitudinal distance from the model to reduce the vortex frequency measurement error.

Other results show that at $\frac{x}{a} = 2$, and in the range $-0.35 < \frac{y}{a} < 0.35$, the vortex shedding does not occur. Also, the amplitude of the vortex shedding frequency is higher in the wake region and it reduces with distance from this region

and approaches zero. There are no appreciable variations at $-3 < \frac{y}{a} < -0.35$ and $0.35 < \frac{y}{a} < 3$. (see Fig. 2)

The last result shows that the standard deviation value and the amplitude of the vortex shedding frequency are different at different flow angles. For $\alpha = 18^\circ$ to 23° , the 2σ value equals 9%. Therefore, the placement of the model at these angles is not suitable for vortex flowmetry.

4- Conclusions

The following conclusions can be mentioned:

Considering a 95% confidence level, at $\alpha = 60^\circ$, the maximum error in measuring vortex shedding frequency is 1.53%, and for $\alpha = 0^\circ$ the error equals 2.46%.

The wake region downstream of the model affects the standard deviation of the spectrum of the vortex shedding frequency. With an increase from the model along the longitudinal direction, up to $\frac{x}{a} = 4$, the standard deviation shows no significant variation, showing an increase thereafter.

The variation of the standard deviation of the vortex shedding frequency spectrum is negligible in the lateral direction (perpendicular to the flow direction). However, the variations increase in the separation region.

References

- [1] M. Ardekani, Air flow measurement in experimental fluid mechanics, Iranian Research Organization on Science and Technology, Iran, (2014). (in persian)
- [2] A. Kumar De, A. Dalal, Numerical study of laminar forced convection fluid flow and heat transfer from a triangular cylinder placed in a channel, Journal of Heat transfer, 129(5) (2007). 646-656.
- [3] J. Derakhshandeh, M.M. Alam, A review of bluff body wakes, Ocean Engineering, 182 (2019) 475-488.
- [4] S. Luo, M.G. Yazdani, Y. Chew, T. Lee, Effects of incidence and afterbody shape on flow past bluff cylinders, Journal of wind engineering and industrial

aerodynamics, 53(3) (1994) 375-399.
[5] E. Ardekani, A. Teymourtash, M.A. Ardakani,
Experimental Investigation on Flow Downstream of a

Triangular Bluff Body at Different Angles, Amirkabir
Journal of Mechanical Engineering, 53(1 (Special Issue))
(2021) 427-436. (in persian).



بررسی تجربی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلی در زاویه‌های مختلف جریان

احسان اردکانی، فواد فرحانی، محمد علی اردکانی*

پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰

کلمات کلیدی:

طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها
عدد استروهل
مدل مثلی
جریان سنج سیم‌داغ
دبی سنج گردابه‌ای

خلاصه: مبنای عملکرد دبی‌سنج گردابه‌ای رابطه خطی $Q = kf$ (k عدد ثابت و f فرکانس ریزش گردابه‌ها) است. لذا دقت دبی‌سنج فقط تابعی از دقت اندازه‌گیری فرکانس داده‌ها می‌باشد. به منظور مشخص نمودن دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، نیاز است که طیف فرکانسی آن بررسی شود. در این تحقیق تجربی، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلی متساوی‌الاضلاع به ضلع ۱۰ میلی‌متر در پایین دست مدل با استفاده از تونل باد و دستگاه جریان سنج سیم‌داغ اندازه‌گیری و با استفاده از توزیع نرمال گاوس برازش شده است. با توجه به سطح اطمینان مورد نظر، دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بررسی و تغییرات آن با استفاده از انحراف معیار توزیع نرمال، کمی‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد تغییرات عدد استروهل برای اعداد رینولدز بالاتر از ۱۲۰۰ مستقل از عدد رینولدز بوده ولی به زاویه جریان وابسته است. با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها برای مدل مثلی در زاویه 60° و 53.1° و برای زاویه 0° این خطا 2.46% می‌باشد. میزان انحراف معیار طیف فرکانسی در جهت جریان دارای روند افزایشی بوده ولی در جهت عمود بر جریان خارج از ناحیه جدایش، ثابت می‌باشد. هنگامی که زاویه جریان در بازه $23^\circ < \alpha < 18^\circ$ است، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تا حدود ۹٪ افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه‌پهن، از پدیده‌های مهم جریان سیالات می‌باشد که شناخت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. ریزش گردابه‌ها از یک جسم لبه‌پهن باعث ارتعاش جسم و یا ارتعاش اجسام پایین دست آن می‌شود. لذا بررسی آن برای سازه‌هایی که در معرض جریان باد قرار دارند، اهمیت دارد. همچنین این پدیده اساس کار دبی‌سنج‌های گردابه‌ای نیز می‌باشد [۱]. دبی‌سنج‌های گردابه‌ای از نوع دبی‌سنج‌های خطی بوده که دارای مزیت‌هایی از جمله دقت بالا، بازه اندازه‌گیری مناسب، قابلیت استفاده در سیالات و فشارهای مختلف می‌باشد [۲]. مهمترین خصوصیت این نوع دبی‌سنج عدم نیاز آن به کالیبراسیون به صورت متناوب است. در این نوع دبی‌سنج، فرکانس ریزش گردابه‌های ناشی از جسم لبه‌پهن اندازه‌گیری شده و با استفاده از آن، سرعت و یا دبی جریان هوا را می‌توان اندازه‌گیری نمود. همچنین با استفاده از ریزش گردابه‌ها، می‌توان جریان بالادست ناحیه جدایش را مغشوش نموده و ناحیه جدایش را کاهش و یا به تعویق انداخت.

به عنوان مثال با مغشوش نمودن جریان در دیفیوزرهای زاویه باز می‌توان ناحیه جدایش را کنترل و در نتیجه ضریب بازبایی فشار و یا راندمان دیفیوزر را افزایش داد [۳، ۴].

برای بررسی پدیده ریزش گردابه‌ها معمولاً از عدد استروهل $St = \frac{fd}{U}$ (استفاده می‌شود، که در آن d اندازه مشخصه جسم لبه‌پهن به عنوان مثال طول ضلع یک مثلث متساوی‌الاضلاع، U سرعت جریان آزاد و f فرکانس ریزش گردابه‌ها می‌باشد. علاوه بر بررسی عدد استروهل، نیاز است که طیف فرکانسی اطراف فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها) نیز بررسی شود. با شناخت طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، می‌توان عدم قطعیت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص نمود. مدل مثلی متساوی‌الاضلاع از جمله اجسام لبه‌پهن غیرمتمقار است که ریزش گردابه‌های ناشی از آن، می‌تواند کاربردهای مختلفی داشته باشد. در این ارتباط تحقیقات مختلفی انجام پذیرفته است.

سریکانت^۱ و همکاران [۵] پدیده ریزش گردابه‌های ناشی از یک مثلث

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ardekani@irost.ir



بررسی کردند. آنها زاویه‌های مختلف رأس مدل مثلثی (30° ، 45° ، 60°) و 90° را در عدد رینولدز ۵۲۰ مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که ناحیه جدایش و ضریب نیروی پسا، با افزایش زاویه رأس مدل مثلثی افزایش یافته ولی عدد استروهل به صورت خطی کاهش می‌یابد. لو^۸ و همکاران [۱۰] جریان پایین دست اجسام لبه‌پهن نامتقارن مانند اجسام مثلثی، مربعی و دوزنقه‌ای را با استفاده از تونل‌های باد و آب بررسی کردند. هدف از تحقیق آن‌ها، تعیین مقادیر فرکانس ریزش گردابه‌ها، ضرایب نیروی برا و پسا اجسام لبه‌پهن، در اعداد رینولدز ۲۱۰۰ و ۳۴۰۰۰ بود. در این مطالعه، همچنین تغییرات عدد استروهل با زاویه جریان برای مدل‌های مختلف لبه‌پهن بررسی شد. نتایج نشان داد که عدد استروهل به زاویه جریان نسبت به مدل بستگی دارد و در زاویه جریان 22° به حداکثر مقدار خود می‌رسد. آن‌ها با استفاده از روش مرئی‌سازی، فاصله بین گردابه‌های متوالی پایین دست مدل مثلثی را مشخص نموده که تقریباً $1/8$ برابر اندازه ضلع مثلث است.

در یک تحقیق تجربی، اردکانی و همکاران [۱۱] ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلثی را برای به‌کارگیری در دبی‌سنج گردابه‌ای و یا کالیبراسیون جریان‌سنج‌های سیم‌داغ در سرعت‌های پایین، مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور، با استفاده از تونل باد و جریان‌سنج سیم‌داغ، توزیع جریان هوا، توزیع شدت اغتشاش‌های جریان و ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلث متساوی الاضلاع به ضلع ۱۰ میلی‌متری را بررسی کردند. آنها نشان دادند که تغییرات عدد استروهل با زاویه جریان قابل توجه است. برای مثال، عدد استروهل در زاویه جریان 20° به حداکثر مقدار خود برابر 0.23 و در زاویه جریان 60° به حداقل مقدار خود برابر 0.135 می‌رسد. نتایج آنها همچنین نشان داد که زاویه جریان بر توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان تأثیر معنی‌داری ندارد. آنها به این نتیجه رسیدند برای کالیبراسیون جریان‌سنج‌های سیم‌داغ، علاوه بر اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد نیز ضروری است. آنها نشان دادند هنگامی که پراب سیم‌داغ در ناحیه $x/a = 2/5$ و $2/5 \leq y/a \leq 5/2$ قرار می‌گیرد (x فاصله از مبدا مختصات در جهت جریان، y فاصله از مبدا مختصات عمود بر جهت جریان و a اندازه ضلع مثلث است)، سرعت اندازه‌گیری شده برابر با سرعت جریان آزاد بوده و شدت اغتشاش جریان کم‌تر از ۶٪ است. همچنین، مشاهدات سوامیناتان^۹ و همکاران در رابطه با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ برای اندازه‌گیری سرعت جریان، نشان می‌دهد

متساوی‌الاضلاع که رأس آن رو به جریان بوده را به صورت عددی برای اعداد رینولدز کمتر از ۸۰ بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد برای اعداد رینولدز از ۵۰ تا ۸۰، تغییرات عدد استروهل در محدوده 0.18 تا 0.192 بوده و برای اعداد رینولدز کمتر از ۵۰، ریزش گردابه‌ها اتفاق نمی‌افتد. کومار^۱ و دلال^۲ [۶] ریزش گردابه‌های ناشی از یک مدل مثلث متساوی الاضلاع که رأس آن رو به جریان است را به صورت عددی در محدوده اعداد رینولدز ۸۰ تا ۲۰۰ و نسبت انسداد 0.083 تا 0.33 بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت انسداد، عدد رینولدز بحرانی (ریزش گردابه‌ها قبل از این عدد اتفاق نمی‌افتد) افزایش می‌یابد. برای مثال، در نسبت انسداد 0.083 ، عدد رینولدز بحرانی حدود ۴۰ بوده و در نسبت انسداد 0.33 ، این عدد حدود ۶۴ می‌باشد. عدد استروهل در نسبت‌های انسداد 0.083 و 0.33 ، به ترتیب 0.2 و 0.25 گزارش شده است. نتایج آنها نشان داد که برای نسبت انسداد کمتر از 0.083 ، عدد استروهل و عدد رینولدز بحرانی مستقل از نسبت انسداد هستند. درخشنده^۳ و محبوب^۴ [۷] در مطالعه مروری خود، فرکانس ریزش گردابه‌ها و الگوی جریان آن را برای اجسام لبه‌پهن متقارن و غیرمتقارن نظیر استوانه با مقطع دایره، مثلث، مربع و مستطیل را بر حسب اعداد رینولدز طبقه‌بندی و بررسی کردند. بر اساس مطالعه مروری انجام شده، تحقیق برای اعداد رینولدز پایین‌تر از ۴۵۰ به صورت عددی توسط پژوهشگران انجام شده است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد برای مثلثی که رأس آن رو به جریان است، عدد استروهل با افزایش عدد رینولدز در بازه ۵۰ تا ۲۵۰ افزایش قابل توجه داشته و در بازه اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۶۰۰ تغییرات عدد استروهل نسبت به عدد رینولدز قابل ملاحظه نیست. زیتون^۵ و همکاران [۸] جریان پایین دست مدل مثلث متساوی الاضلاع را در اعداد رینولدز کمتر از ۲۰۰ به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی برای مدل مثلثی شکل که رأس آن رو به جریان قرار دارد، برابر $38/04$ می‌باشد. برای حالتی که ضلع مثلث در برابر جریان هوا قرار داده شود، عدد رینولدز بحرانی برابر $34/8$ است. آنها همچنین نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز از ۴۰ به ۲۰۰، عدد استروهل از 0.12 به 0.2 افزایش یافته و پس از آن ثابت می‌ماند. آگراوال^۶ و همکاران [۹] پدیده ریزش گردابه‌ها در پایین دست مدل مثلثی را با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ و سرعت‌سنجی تصویر ذرات^۷

- 1 Kumar
- 2 Dalal
- 3 Derakhshandeh
- 4 Mahbub
- 5 Zeitoun
- 6 Agrawal
- 7 Particle Image Velocimetry (PIV)

8 Luo
9 Swaminathan

۲۸ قابل تنظیم است. مقطع اتاق آزمون تونل باد $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ است و به منظور یکنواخت نمودن سرعت جریان هوا و کاهش اغتشاش‌های آن، از ۴ سری توری با مش ۲۰ و ۲۴ به همراه لانه‌زنبوری در اتاق آرامش استفاده شده است. همچنین نسبت ورودی به خروجی نازل تونل باد، ۱۲ می‌باشد. غیریکنواختی سرعت تونل باد کمتر از $1/10\%$ و مقدار شدت اغتشاش‌های تونل باد $(Tu = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \times 100\%)$ که در آن u' ، اختلاف سرعت لحظه‌ای $U(t)$ و سرعت متوسط U است) در مرکز اتاق آزمون، کمتر از $2/10\%$ می‌باشد.

ریزش گردابه‌های ناشی از مدل با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ ساخت شرکت فرانسجس صبا اندازه‌گیری شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک بعدی و سیم پراب از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرون است. به منظور جابه‌جایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده پراب استفاده شده است. این مکانیزم دارای دقت جا به جایی 0.1 mm در سه بعد می‌باشد که با استفاده از رایانه حرکت آن قابل کنترل است. داده‌های اخذ شده توسط جریان‌سنج سیم‌داغ از طریق کارت اخذ داده از نوع نشنال اینسترومنتس^۲ به رایانه ارسال و توسط نرم افزار فلوویر^۳ تجزیه و تحلیل می‌شود. عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ برابر $1/57\%$ به دست می‌آید [۱۵]. با فرض توزیع نرمال گاوس و ضریب پوشش ۲، پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای طبق مرجع [۱۵] به صورت جدول ۱ ارایه می‌شود.

مدل مورد استفاده در این تحقیق به شکل مثلث متساوی‌الاضلاع به ضلع 10 mm و طول 150 mm است، لذا نسبت طول به ضلع مدل ۱۵ بوده و می‌توان مدل را دوبعدی فرض نمود. شکل ۱ محور مختصات و زاویه چرخش مدل را نشان می‌دهد. به منظور تغییر زاویه مدل از مکانیزم چرخان استفاده می‌شود که از طریق رایانه حرکت دورانی آن قابل کنترل است.

شکل ۲- الف تصویر مدل مثلثی همراه با مکانیزم چرخان و پراب جریان سنج سیم‌داغ را نشان می‌دهد. میزان دوران موتور پله‌ای مکانیزم چرخان به ازای هر پالس 0.72° است. شکل ۲- ب تصویری از تجهیزات مورد استفاده نظیر جریان‌سنج سیم‌داغ، مکانیزم انتقال دهنده، فشارسنج الکترونیکی و سیستم اخذ داده‌ها را نشان می‌دهد. برای کالیبراسیون جریان‌سنج سیم‌داغ و اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد بالادست مدل، از لوله استاتیکی پیتوت به همراه فشار سنج از نوع Omega استفاده شده است.

که شدت اغتشاش جریان کمتر از 6% تأثیر کمی بر دقت اندازه‌گیری سرعت جریان آزاد دارد [۱۲].

نگ^۱ و همکاران [۱۳] مکانیزم ریزش گردابه‌ها در زوایای مختلف جریان پایین‌دست یک مدل مثلث متساوی‌الاضلاع را به صورت عددی بررسی نمودند. آنها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی به زاویه جریان بستگی دارد. به عنوان مثال، عدد رینولدز بحرانی برای محدوده $18^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ برابر ۳۵ است. نتایج همچنین نشان داد که در عدد رینولدز ۸۰، در تمامی زاویه‌ها ریزش گردابه‌ها اتفاق می‌افتد.

تحقیقات متعددی در ارتباط با پدیده ریزش گردابه‌های ناشی از اجسام لبه‌پهن به خصوص مدل مثلثی انجام گرفته است که معمولاً در اعداد رینولدز کمتر از ۲۰۰ به صورت عددی و در اعداد رینولدز بزرگ‌تر از ۲۰۰ به صورت عددی و تجربی است. بررسی‌ها نشان می‌دهد در ارتباط با تأثیر عدد رینولدز، زاویه جریان، نسبت انسداد، زاویه رأس مدل، ناحیه جدایش و ... تحقیقات فراوانی انجام شده، ولیکن هنوز موارد متعددی نظیر شکل‌های توسعه یافته لبه‌پهن، جریان‌های غیرنیوتونی، جریان‌های دارای شتاب، جریان‌های نوسانی و ... وجود دارد که در این زمینه‌ها تحقیقات قابل توجهی انجام نگرفته است [۱۴]. همچنین در ارتباط با طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها و قدرت آن گزارشی ارائه نگردیده است. اهمیت طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها بدین جهت است که عدم قطعیت و یا دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را می‌توان مشخص کرد.

در این مقاله، ریزش گردابه‌های ناشی از مدل مثلثی و طیف فرکانسی آن در زاویه‌های مختلف جریان به صورت تجربی در اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفته و همچنین ریزش گردابه‌ها و طیف فرکانسی آن در پایین‌دست مدل در جهت‌های طولی و عرضی نیز بررسی و نتایج آن ارائه شده است. طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها با استفاده از منحنی نرمال گاوس برازش شده و با استفاده از آن، عدم قطعیت و یا دقت اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها بررسی و نتایج آن ارائه می‌شود که نتایج به دست آمده دارای کاربرد در طراحی دبی‌سنج گردابه‌ای است.

۲- روش آزمایش

کلیه آزمایش‌ها در آزمایشگاه تونل باد پژوهشکده مکانیک سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران انجام شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مدار بسته می‌باشد که سرعت آن با استفاده از کنترل دور از ۲ تا m/s

2 National Instruments (NI)

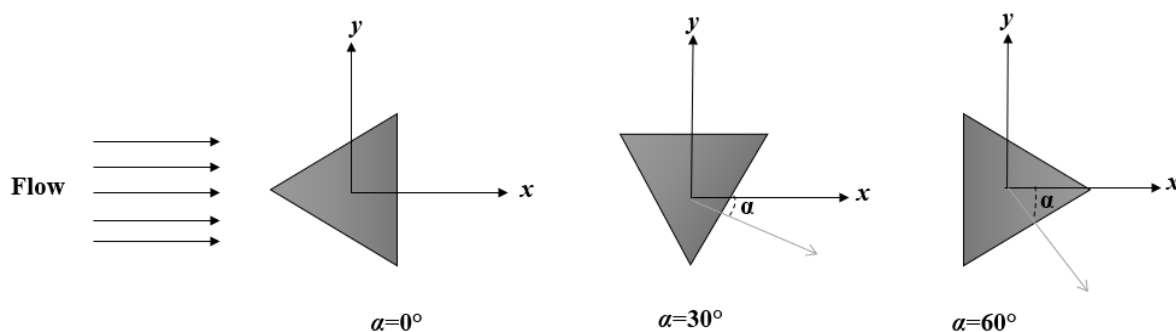
3 FlowWare

1 Ng

جدول ۱. پارامترهای عدم قطعیت اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای با استفاده از جریان‌سنج سیم‌داغ [۱۵]

Table 1. The instantaneous velocity measurement uncertainty parameters using hot-wire anemometer [15]

۰/۰۰۶	عدم قطعیت در استفاده از لوله پیتوت و فشارسنج الکترونیکی برای سرعت‌های بیش‌تر از ۲/۵ m/s
۰/۰۰۳	عدم قطعیت در استفاده از مکانیزم انتقال دهنده
۰/۰۰۰۷	عدم قطعیت در ارسال داده‌ها از طریق کارت A/D
۰/۰۰۲	عدم قطعیت ناشی از تغییرات دمای محیطی [۱۶]
۰/۰۰۴	عدم قطعیت برازش منحنی کالیبراسیون



شکل ۱. محور مختصات و زاویه چرخش مدل

Fig. 1. The coordinates and model rotation angle

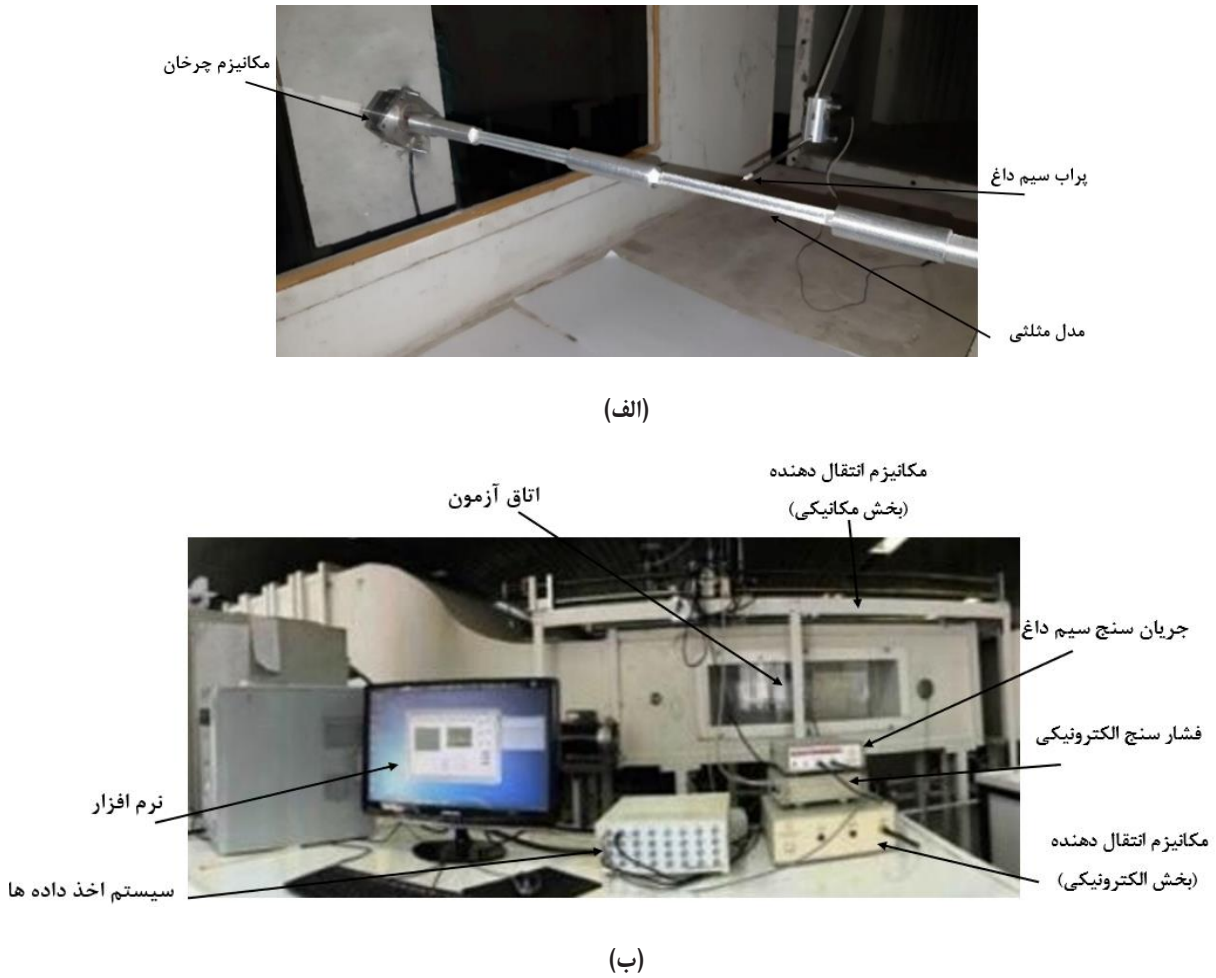
حاکم، عدد استروهال ریزش گردابه‌ها به دست آمده و نتایج را می‌توان با نتایج سایر محققین مقایسه نمود. در این تحقیق، فرکانس حاکم و همچنین طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در پایین‌دست مدل مثلی در راستای جریان (در جهت x) و عمود بر آن (در جهت y) بررسی گردیده و سپس با استفاده از مکانیزم چرخان، زاویه مدل نسبت به جریان تغییر داده شده و ریزش گردابه‌های جریان پایین‌دست مدل اندازه‌گیری و تحلیل می‌شود.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی پدیده ریزش گردابه‌ها و تأثیر زاویه مدل مثلی

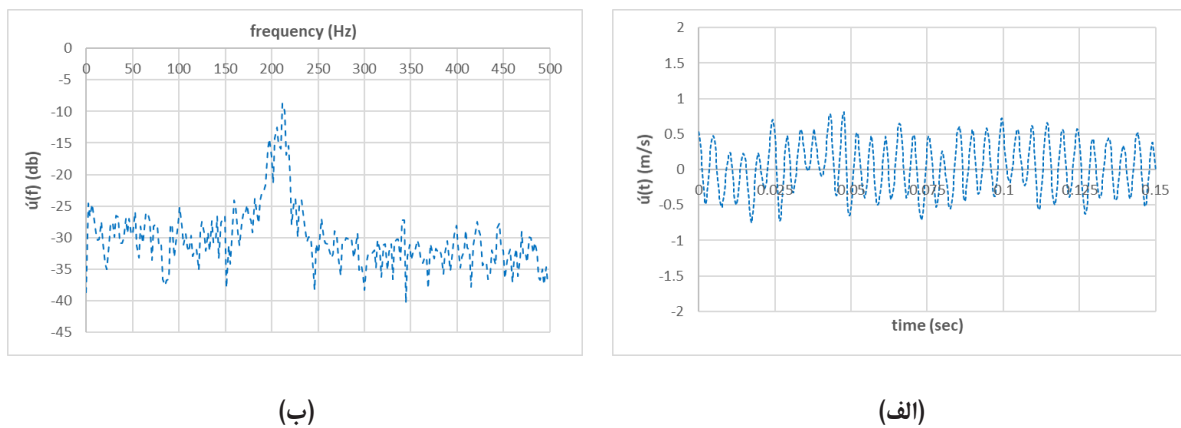
در ابتدا با استفاده از منحنی‌های مطابق شکل ۳، فرکانس ریزش گردابه‌ها اندازه‌گیری شده است. در شکل ۴ از مرجع [۱۱] فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت جریان در چند زاویه مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۴ رابطه فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان هوا به صورت خطی است و شیب این خطوط با زاویه جریان نسبت به مدل تغییر می‌کند. همچنین، شیب فرکانس ریزش گردابه‌ها در زاویه 0° که در

در این تحقیق، ابتدا مدل در زاویه صفر درجه نسبت به جریان قرار می‌گیرد (مطابق شکل ۱). سپس با استفاده از مکانیزم انتقال دهنده، محل مناسب پراب که در آن فرکانس ریزش گردابه‌ها به وضوح دیده می‌شود مشخص شده و اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در اعداد رینولدز ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰۰ انجام می‌گردد. مطابق شکل ۳-الف، سرعت نوسانی جریان در ناحیه‌ای که گردابه‌ها در آن به وضوح دیده می‌شود، به صورت سینوسی و یا نزدیک به سینوسی می‌باشد [۱]. برای به دست آوردن فرکانس حاکم و همچنین طیف فرکانسی سرعت نوسانی جریان، با استفاده از تبدیل فوریه، سرعت نوسانی جریان از حوزه زمان (شکل ۳-الف) به حوزه فرکانس (شکل ۳-ب) تبدیل شده و فرکانس حاکم به عنوان فرکانس ریزش گردابه‌ها مشخص می‌شود. به منظور بررسی و تحلیل طیف فرکانسی گردابه‌ها، منحنی اطراف فرکانس حاکم با استفاده از منحنی استاندارد گاوس برازش شده و انحراف معیار و عدم قطعیت آن بررسی می‌شود. با استفاده از فرکانس



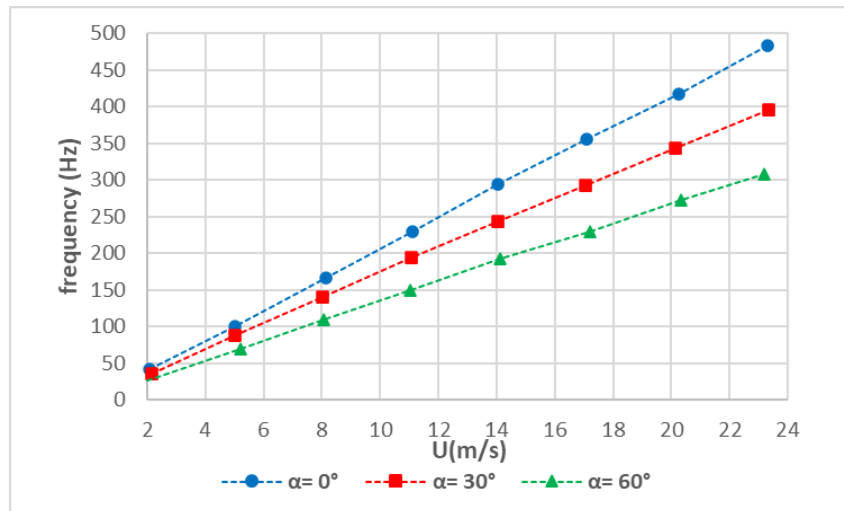
شکل ۲. (الف) تصویر مدل مثلثی در اتاق آزمون تونل باد به همراه مکانیزم چرخان (ب) تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق

Fig. 2. (a) Picture of the triangular model in the wind tunnel test section along with the rotating mechanism, (b) the equipment used in this research



شکل ۳. (الف) اسیلوگرام سرعت لحظه‌ای در حوزه زمان (ب) طیف نوسانات سرعت در حوزه فرکانس در $Re = 6700$ و $\frac{y}{a} = 2$

Fig. 3. (a) Oscillogram of the instantaneous velocity in the time domain, (b) the u-fluctuation spectrum for $Re = 6700$ and $(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2)$



شکل ۴. فرکانس ریزش گردابه‌ها بر حسب سرعت در زاویه‌های مختلف در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Fig. 4. The vortex shedding frequency at different flow angles and distance ($\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2$) [11]

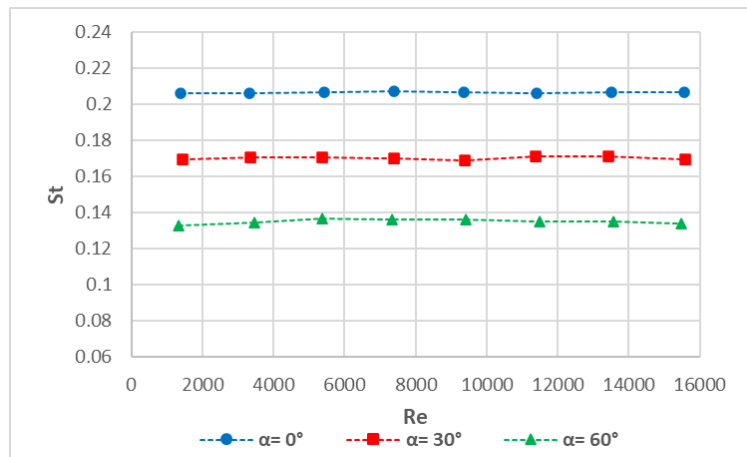
تقارن می‌باشد. همچنین منحنی شکل ۶ نیز دارای مقدار کمینه نسبی در زاویه 60° می‌باشد. با توجه به شکل ۶ تغییرات عدد استروهل در ناحیه کمینه با زاویه جریان زیاد نیست، لذا قرار دادن مدل در زاویه 60° برای کاربردهای دبی‌سنجی مناسب می‌باشد. در نتیجه به دلیل گرادیان نزدیک به صفر عدد استروهل نسبت به تغییرات زاویه جریان نسبت به مدل، خطای نصب مدل در دبی‌سنج کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات عدد استروهل نسبت به زاویه جریان در محدوده زوایای 18° تا 23° بسیار شدید است.

۳-۲- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در زمان‌های مختلف

همان‌گونه که بیان شد، به منظور بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، سرعت نوسانی جریان با استفاده از تبدیل فوریه و با در نظر گرفتن اصل نایکویست از حوزه زمان به حوزه فرکانس تبدیل شده است. با توجه به اینکه نوسانات سرعت جریان با زمان تغییر می‌کند، در نتیجه احتمال تغییر در طیف فرکانسی وجود دارد. شکل ۷ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. محور افقی شکل ۷، با استفاده از فرکانس حاکم (فرکانس ریزش گردابه‌ها (f_v)) بی‌بعد شده و بر مبنای درصد نشان داده شده است. برای تحلیل و کمی‌سازی داده‌ها، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، با استفاده از توزیع نرمال گاوس برازش شده است. لازم به ذکر است بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را می‌توان با توزیع نرمال گاوس بیان نمود. چگالی

آن رأس مدل مثلی در مقابل جریان هوا قرار دارد (شکل ۱) از دو زاویه دیگر بیش‌تر است. این موضوع به دلیل حرکت جریان بر روی سطح مثلث و ایجاد گرادیان سرعت بالاتر در جهت عمود بر سطح می‌باشد. به منظور بررسی بهتر، داده‌های فرکانس ریزش گردابه‌ها و سرعت جریان در شکل ۴، با استفاده از اعداد استروهل و رینولدز بی‌بعد شده و به صورت شکل ۵ ارائه شده است [۱۱]. شکل ۵ منحنی عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز را در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل برای اعداد رینولدز بالاتر از 1200 ، عدد استروهل از عدد رینولدز مستقل بوده و برای اعداد رینولدز مختلف ثابت می‌باشد ولی با زاویه جریان نسبت به مدل تغییر می‌کند که به دلیل تشابه هندسی و سینماتیکی جریان می‌باشد.

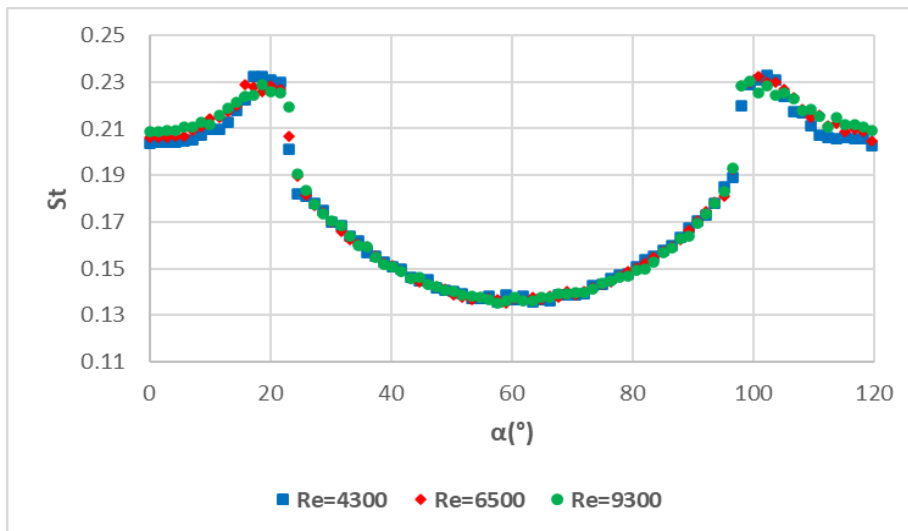
شکل ۶ از مرجع [۱۱] تغییرات عدد استروهل بر حسب زاویه جریان نسبت به مدل در اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، منحنی‌ها در اعداد رینولدز مختلف بر روی یکدیگر منطبق می‌باشند. کمترین مقدار عدد استروهل 0.135 است و در زاویه‌های نزدیک به 60° رخ می‌دهد و بیشترین مقدار عدد استروهل 0.23 بوده و در زاویه‌های نزدیک به 20° و 100° اتفاق می‌افتد. ذکر این نکته ضروری است که مدل مورد استفاده مثلث متساوی‌الاضلاع بوده و مرکز مختصات آن در مرکز هندسی مدل (شکل ۱) قرار گرفته، لذا چرخش آن نسبت به جهت جریان (محور x) دارای تقارن می‌باشد. بر این اساس، منحنی شکل ۶ نسبت به زاویه 60° دارای



شکل ۵. منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب عدد رینولدز در زاویه‌های مختلف مدل و در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Fig. 5. The Strouhal number variations with Reynolds number for different flow angles and at the distance

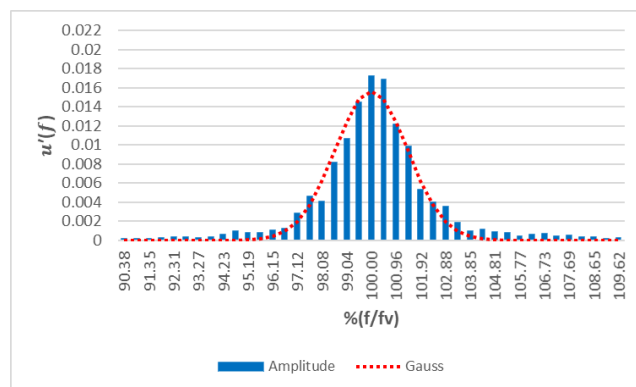
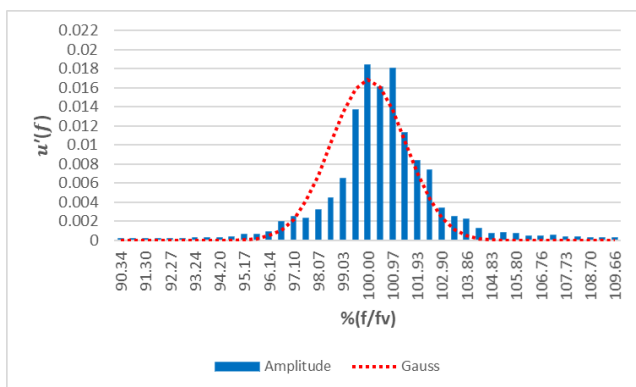
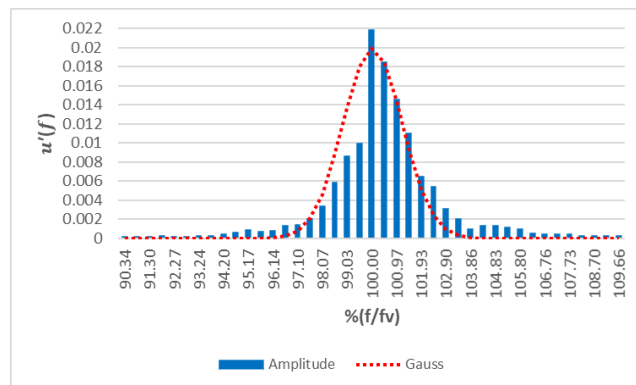
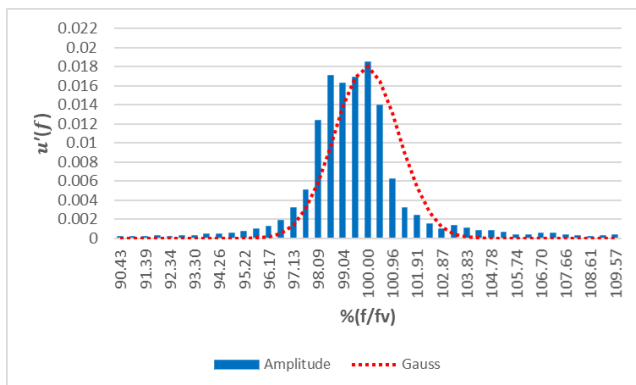
$$\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right) [11]$$



شکل ۶. منحنی تغییرات عدد استروهل بر حسب زاویه جریان نسبت به مدل در اعداد رینولدز مختلف و در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ [۱۱]

Fig. 6. The Strouhal number variations with flow angle for different Reynolds numbers and at the distance

$$\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right) [11]$$



شکل ۷. طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در زمان‌های مختلف برای زاویه 0° و $Re = 6700$

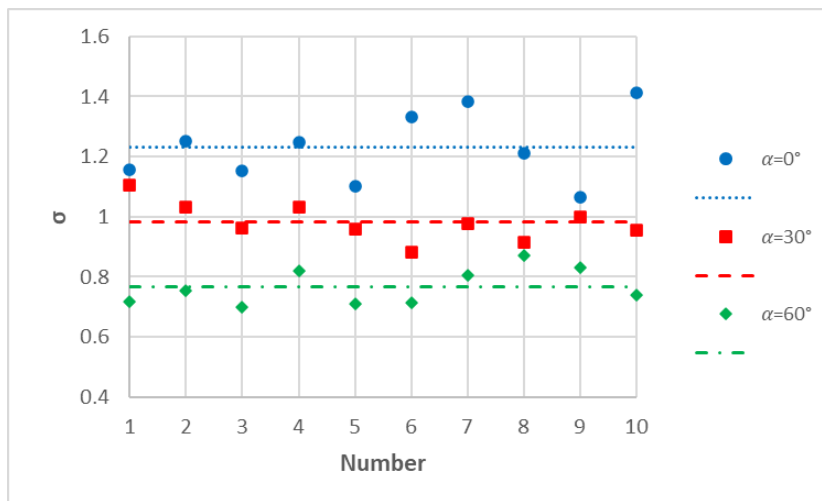
Fig. 7. The frequency spectrum of the vortex u -fluctuation and the normal Gauss distribution at different times and for 0° flow angle and $Re = 6700$

درصدی نرمال‌ایز شده است، بنابراین مقدار میانگین در رابطه فوق برابر ۱۰۰ خواهد بود و همچنین مقدار چولگی نمودارهای فوق کم‌تر از ۰/۵ می‌باشد که بیان کننده این موضوع است که می‌توان داده‌های فوق را با توزیع نرمال گاوس تحلیل کرد. به منظور بررسی و مشخص نمودن عدم قطعیت در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، از معکوس جدول نرمال گاوس استفاده می‌شود. با توجه به جدول ارائه شده در مرجع [۱۷]، برای بازه σ ، عدم قطعیت ۳٪، برای بازه 2σ ، عدم قطعیت داده‌ها ۵٪ و برای بازه 3σ ، عدم قطعیت داده‌ها ۳٪ می‌باشد. لذا با مشخص نمودن انحراف از معیار (σ) در منحنی‌های به دست آمده، می‌توان عدم قطعیت ریزش گردابه‌ها

توزیع نرمال گاوس به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود که منحنی آن به صورت زنگوله‌ای می‌باشد [۱۷].

$$\left(\frac{f}{f_v}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\left(\frac{f}{f_v} - 1.00\right)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، نسبت فرکانس طیف به فرکانس حاکم و σ انحراف از معیار می‌باشد. با توجه به اینکه محور افقی شکل ۷، به صورت



شکل ۸. تکرارپذیری مقدار انحراف معیار منحنی برازش شده گاوس برای یک دوره ۱۰ تایی در زوایای ۰°، ۳۰° و ۶۰°

Fig. 8. Repeatability of the standard deviation values fitted using the Gauss distribution for a set of ten periods and for 0°, 30°, and 60° flow angles

جدول ۲. مقادیر $\bar{\sigma}$ و % ε برای زوایه‌های مختلف و ۱۰ بار تکرار

Table 2. Values of the $\bar{\sigma}$ and % ε for different angles and ten repeats

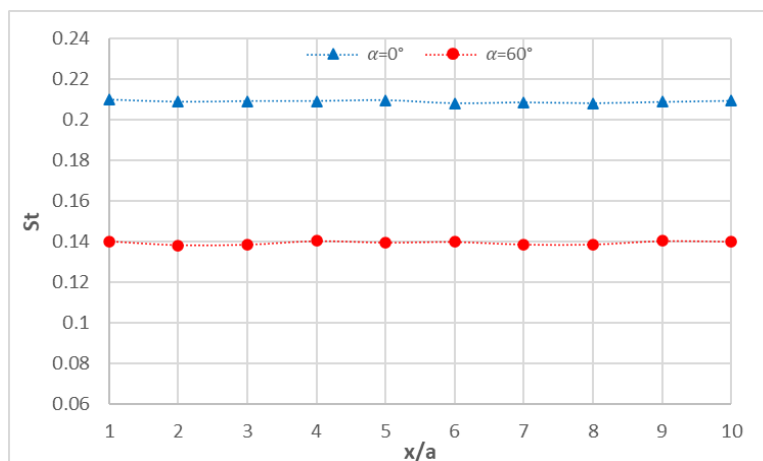
زاویه	$\bar{\sigma}$	% ε
۰	۱/۲۳	۸٪
۳۰	۰/۹۸	۵٪
۶۰	۰/۷۶۵	۵٪

به عبارت دیگر به احتمال ۶۸٪ اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها دارای خطایی حدود ۰/۹۸٪ می‌باشد. در صورتی که سطح اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شود، خطای اندازه‌گیری در بازه ۲ σ و یا به عبارت دیگر $\pm ۱/۹۶$ خواهد بود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که میزان متوسط انحراف از معیار منحنی برازش شده گاوس برای مدل با زاویه ۰° برابر ۱/۲۳ و برای زاویه ۶۰° برابر ۰/۷۶۵ است. این بدان معنی است که احتمال خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها برای مدل مثلی در زاویه ۶۰° کم‌تر از دو زاویه دیگر بوده و در نتیجه عدم قطعیت در این زاویه کم‌تر است. لذا قرار دادن مدل مثلی در زاویه ۶۰° برای کاربرد دبی‌سنج گردابه‌ای مناسب‌تر

را مشخص نمود.

شکل ۸ تکرارپذیری مقدار انحراف معیار منحنی برازش شده گاوس را برای ۱۰ بار اندازه‌گیری نشان می‌دهد. به منظور بررسی تغییرات انحراف معیار σ نسبت به زمان، از پارامتر
$$\% \varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\sigma_i - \bar{\sigma}|}{\bar{\sigma}} \times 100$$
 استفاده می‌شود که در این رابطه σ_i انحراف معیار توزیع نرمال گاوس و $\bar{\sigma}$ انحراف معیار متوسط می‌باشد. جدول ۲ مقادیر $\bar{\sigma}$ و % ε برای زوایه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۸ و جدول ۲، در زاویه ۳۰° مقدار متوسط σ برابر ۰/۹۸ می‌باشد. این بدان مفهوم است که به احتمال ۶۸٪ داده‌های اندازه‌گیری شده در بازه $\pm ۰/۹۸$ فرکانس حاکم است و یا



شکل ۹. تغییرات عدد استروهل بر حسب فاصله بی بعد شده $(\frac{x}{a})$ در $\frac{y}{a} = 2$ برای زوایای 0° ، 60° و $Re = 6700$

Fig. 9. Variations of the Strouhal number with the dimensionless distance $(\frac{x}{a})$ at $\frac{y}{a} = 2$ for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

گردابه‌ها می‌باشد.

به منظور بررسی کمی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، مقدار انحراف از معیار آنها (σ) بررسی می‌شود. شکل ۱۱ مقدار 2σ که معرف سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد را در پایین دست مدل بر حسب $\frac{x}{a}$ نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۱، با افزایش فاصله در پایین دست مدل مقدار 2σ ، افزایش می‌یابد. برای مدل مثلی با زاویه 0° ، در صورتی که پراب اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در فاصله $\frac{x}{a} = 1$ قرار گیرد، حداکثر بازه‌ی خطای اندازه‌گیری با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حدود ۲/۵۵٪ و در فاصله $\frac{x}{a} = 10$ حدود ۷/۳۳٪ خواهد بود. همچنین هنگامی که مدل مثلی در زاویه 60° نسبت به جریان قرار دارد، با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪ حداکثر خطای اندازه‌گیری در $\frac{x}{a} = 1$ ، ۱/۶۱٪ و در $\frac{x}{a} = 10$ حدود ۴٪ می‌باشد. با توجه به شکل ۱۱، به منظور کاهش خطای اندازه‌گیری، پراب باید در فاصله‌های طولی نزدیک به مدل قرار گیرد.

۳-۴- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد عرضی

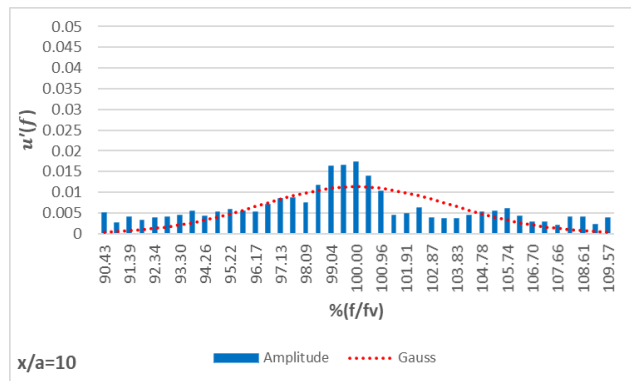
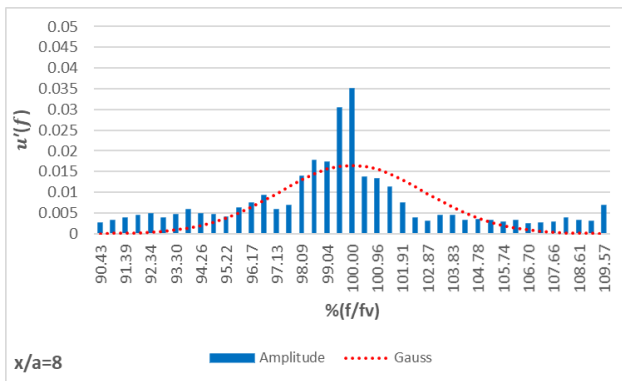
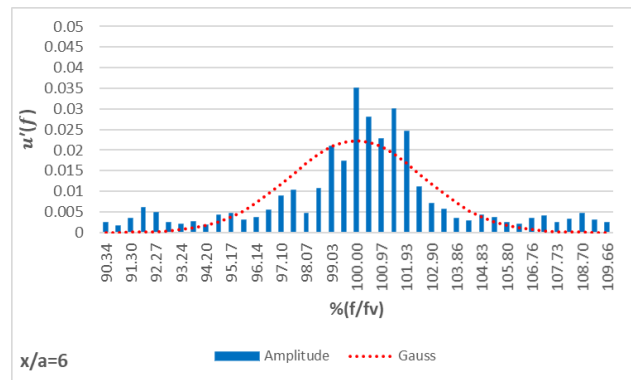
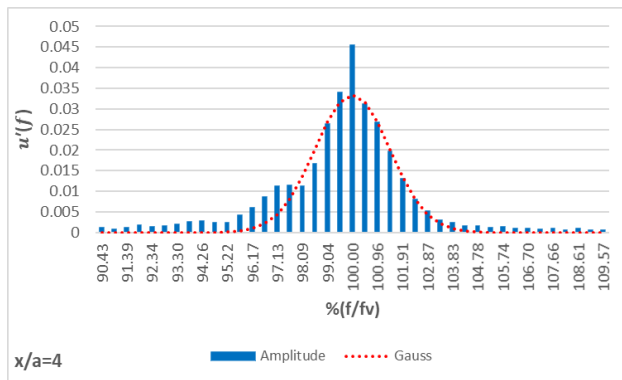
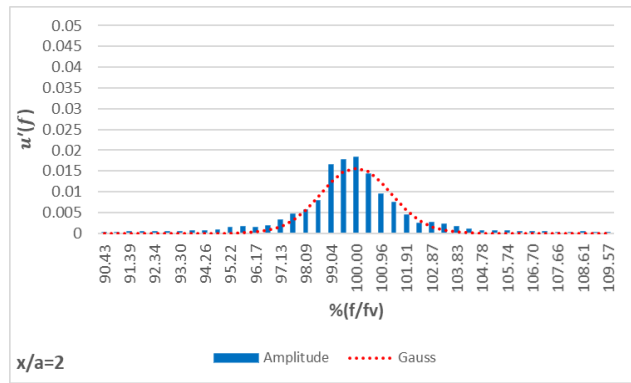
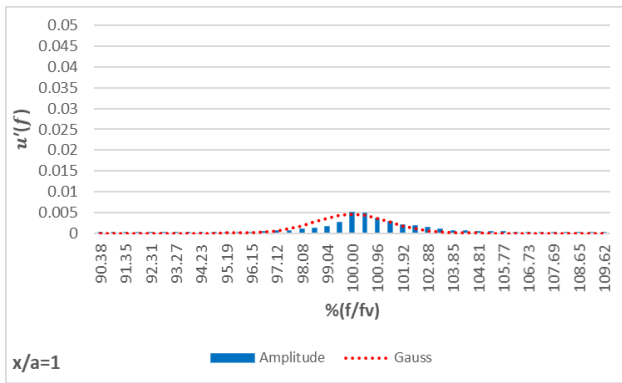
پایین دست اجسام لبه‌پهن از جمله مدل مثلی، ناحیه‌های جدایش،

می‌باشد.

۳-۳- بررسی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد طولی

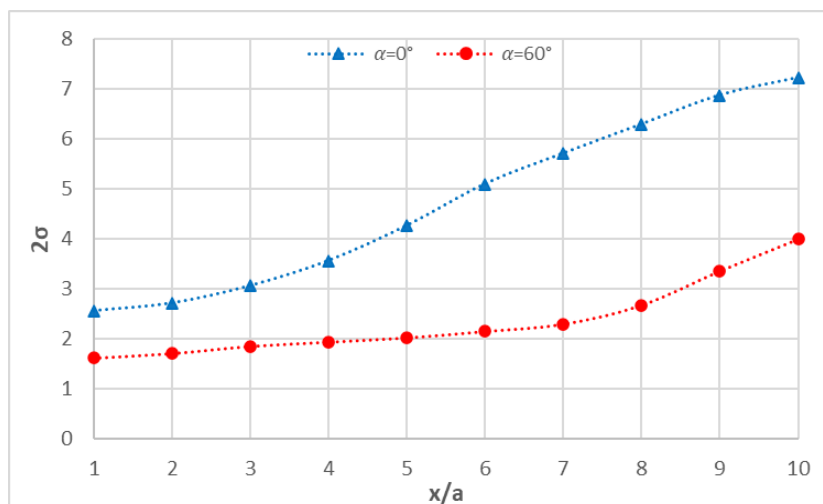
با توجه به این که در پایین دست مدل، ناحیه جدایش وجود دارد و این ناحیه بر روی پروفیل سرعت و شدت اغتشاش‌های آن تأثیر می‌گذارد، مناسب است که فرکانس ریزش گردابه‌ها و طیف آن در امتداد طولی (در جهت جریان) پایین دست مدل، بررسی شود. ناحیه جدایش در پایین دست مدل، با افزایش فاصله از مدل پهن‌تر شده که باعث گسترده‌تر شدن توزیع شدت اغتشاش‌های جریان نیز می‌شود [۱۸، ۱۹]. شکل ۹ تغییرات عدد استروهل پایین دست مدل بر حسب $\frac{x}{a}$ در فاصله $\frac{y}{a} = 2$ ، خارج از ناحیه جدایش را نشان می‌دهد. شکل فوق نشان می‌دهد که عدد استروهل تا فاصله $\frac{x}{a} = 10$ ثابت بوده و تغییرات آن ناچیز و کمتر از ۰/۱٪ است.

شکل ۱۰ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد طولی (در جهت جریان) که با استفاده از منحنی نرمال گاوس، برازش شده است، را نشان می‌دهد. محور افقی منحنی‌های شکل ۱۰ با استفاده از فرکانس ریزش گردابه‌ها بی‌بعد شده‌اند. مطابق شکل فوق، مقدار دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها در نزدیکی مدل ($\frac{x}{a} = 1$) کم و حدود ۰/۰۰۵ می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل دامنه فرکانس ریزش گردابه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این افزایش و کاهش توصیف کننده مراحل تقویت و تضعیف ریزش



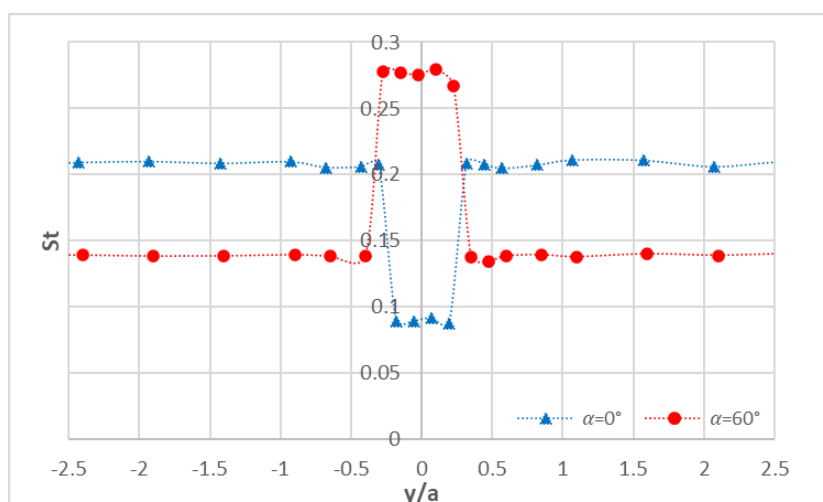
شکل ۱۰. طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در امتداد طولی در $\frac{y}{a} = 2$ برای زاویه 0° و $Re = 6700$

Fig. 10. The frequency spectrum of the vortex shedding u-fluctuation and the normal Gauss distribution in the longitudinal direction at $\frac{y}{a} = 2$ and for 0° flow angle and $Re = 6700$



شکل ۱۱. مقدار 2σ پایین دست مدل در امتداد طولی در زوایای 0° ، 60° و $Re = 6700$

Fig. 11. Value of 2σ downstream of the model in the longitudinal direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$



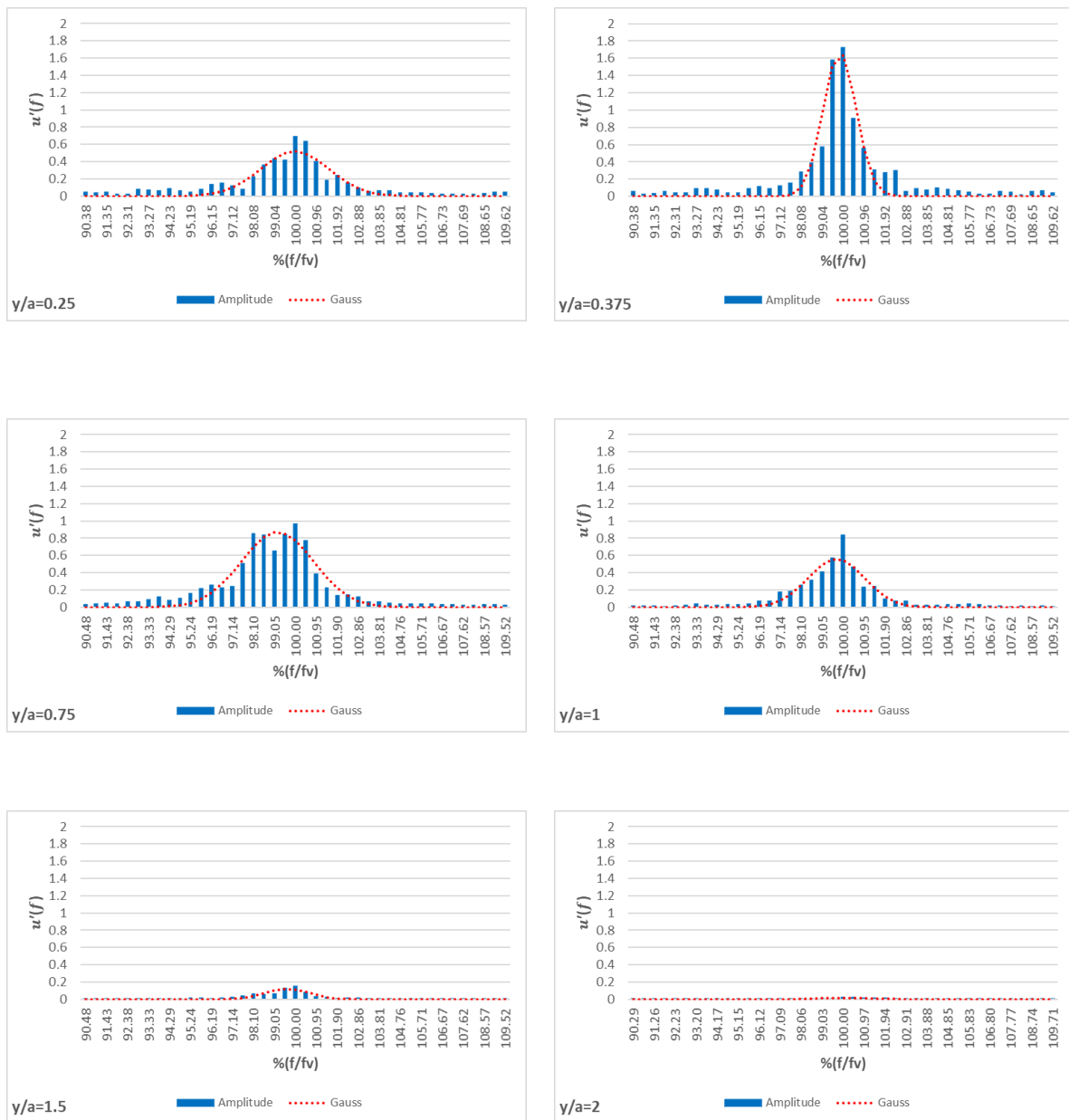
شکل ۱۲. تغییرات عدد استروهال بر حسب فاصله بی بعد شده $(\frac{y}{a})$ در $\frac{x}{a} = 2$ برای زوایای 0° ، 60° و $Re = 6700$

Fig. 12. Variations of the Strouhal number with the dimensionless distance $(\frac{y}{a})$ at $\frac{x}{a} = 2$ for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

عدد استروهال بر حسب $\frac{y}{a}$ در امتداد عرضی مدل (عمود بر جهت جریان) در فاصله $\frac{x}{a} = 2$ را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در بازه حدود $-\frac{0.35}{a} < \frac{y}{a} < \frac{0.35}{a}$ ، عدد استروهال تغییرات زیادی داشته و با عدد استروهال نقاط دیگر تفاوت دارد که بیان کننده عدم وجود گردابه قوی در این

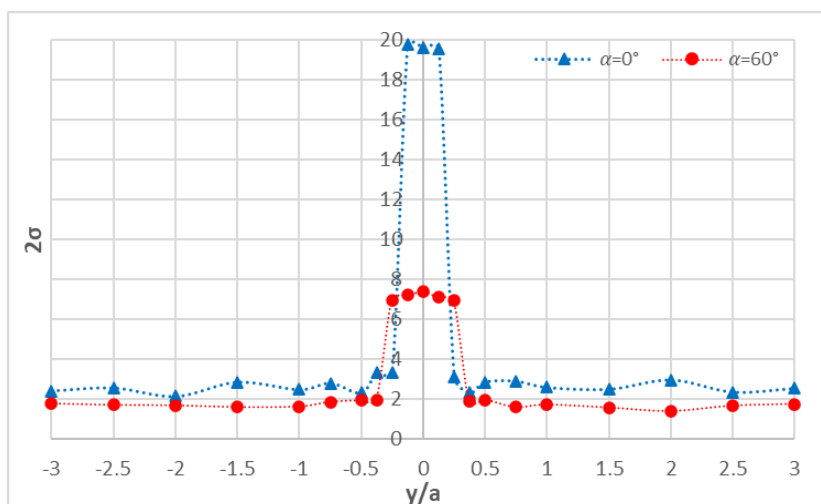
جریان آزاد^۱ و سرعت بالاتر از جریان آزاد^۲ وجود دارد [۱۹]. این نواحی بر ریزش گردابه‌ها، طیف فرکانسی و قدرت آن تأثیر دارد. شکل ۱۲ تغییرات

-
- 1 Free Stream
 - 2 Over Flow



شکل ۱۳. طیف فرکانسی سرعت نوسانی ریزش گردابه‌ها و توزیع نرمال گاوس در امتداد عرضی در $\frac{x}{a} = 2$ برای زاویه 0° و $Re = 6700$

Fig. 13. The spectrum of the vortex shedding frequency and the normal Gauss distribution in the lateral direction at $\frac{x}{a} = 2$ and for 0° flow angle and $Re = 6700$



شکل ۱۴. مقدار 2σ پایین دست مدل در امتداد عرضی در $\frac{x}{a} = 2$ برای زوایای 0° و 60° و $Re = 6700$

Fig. 14. Value of 2σ downstream of the model in the lateral direction for 0° and 60° flow angles and $Re = 6700$

منطقه است، به عبارت دیگر این ناحیه، ناحیه جدایش می‌باشد. شکل ۱۳، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد عرضی (در جهت عمود بر جریان) را نشان می‌دهد. این شکل نیز با استفاده از منحنی نرمال گاوس برازش شده است. مطابق شکل فوق، دامنه فرکانسی ریزش گردابه‌ها در ناحیه نزدیک دنباله، بیش‌تر می‌باشد و با دور شدن از آن، کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود. به منظور کمی‌سازی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، شکل ۱۴ مقدار 2σ که معرف سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد، را در امتداد عرضی نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق مقدار 2σ تا زاویه‌های مختلف جریان نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق، مقدار 2σ تا زاویه 18° کمتر از $2/2$ ٪ می‌باشد ولی در زوایای حدود 18° تا 23° این مقدار به حدود ۹٪ افزایش می‌یابد، به عبارت دیگر با سطح اطمینان ۹۵٪، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها در زوایای 18° تا 23° حدود ۹٪ می‌باشد. لذا قرار دادن مدل در این زاویه‌ها برای کاربردهایی نظیر زاویه‌سنجی و یا دبی‌سنجی مناسب نیست.

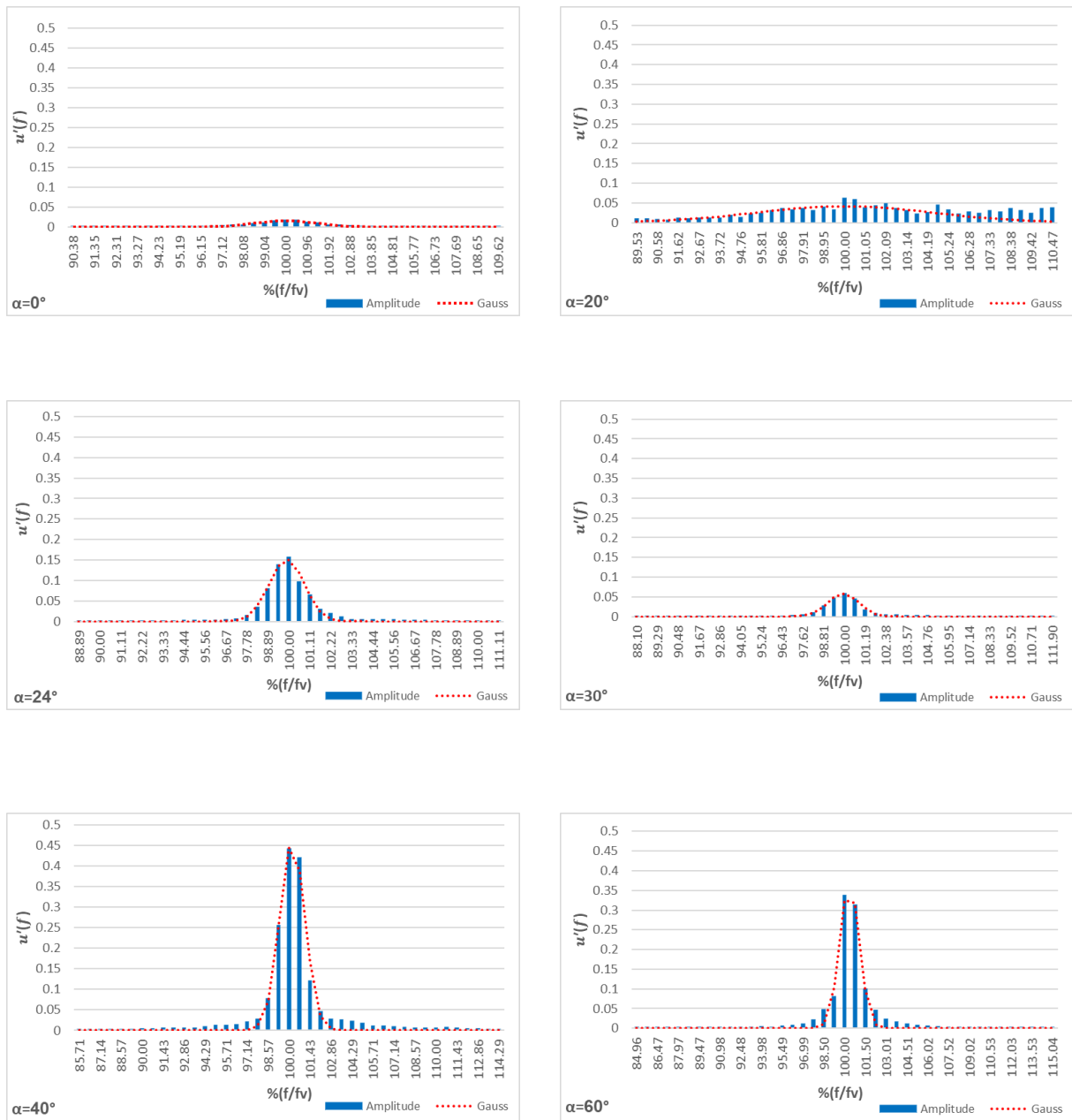
۴- نتیجه‌گیری

بررسی و شناخت فرکانس ریزش گردابه‌های پایین‌دست مدل مثلی و طیف فرکانسی آن دارای اهمیت بوده و می‌تواند دارای کاربردهایی در طراحی و ساخت دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای باشد. در این مقاله، طیف فرکانسی ریزش

منطقه است، به عبارت دیگر این ناحیه، ناحیه جدایش می‌باشد. شکل ۱۳، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها در امتداد عرضی (در جهت عمود بر جریان) را نشان می‌دهد. این شکل نیز با استفاده از منحنی نرمال گاوس برازش شده است. مطابق شکل فوق، دامنه فرکانسی ریزش گردابه‌ها در ناحیه نزدیک دنباله، بیش‌تر می‌باشد و با دور شدن از آن، کاهش یافته و به صفر نزدیک می‌شود.

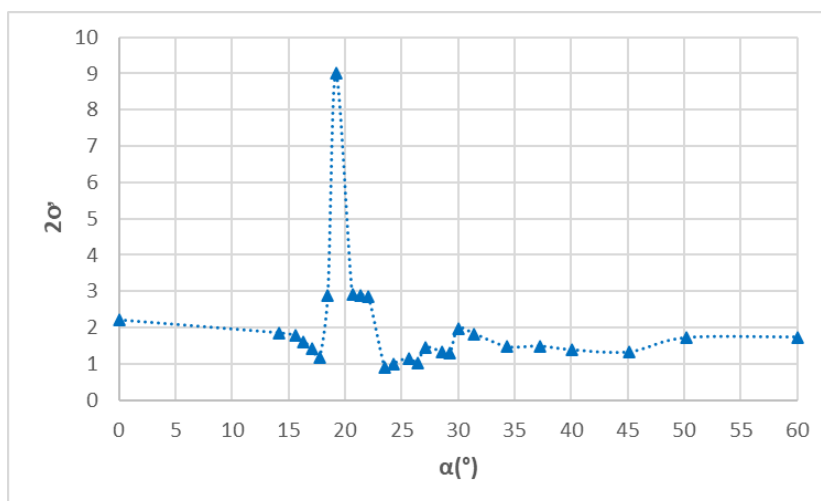
به منظور کمی‌سازی طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها، شکل ۱۴ مقدار 2σ که معرف سطح اطمینان ۹۵٪ می‌باشد، را در امتداد عرضی نشان می‌دهد. مطابق شکل فوق مقدار 2σ در فاصله $0.35 < \frac{y}{a} < 3$ و $-3 < \frac{y}{a} < -0.35$ برای مدل مثلی در زاویه 0° حدود $2/67$ و در زاویه 60° حدود $1/7$ بوده و تغییرات قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است اگر چه مقدار 2σ در این فاصله تغییر نمی‌کند ولی مطابق شکل ۱۳، قدرت ریزش گردابه‌ها با افزایش فاصله از مدل به شدت کاهش می‌یابد.

۳-۵- بررسی تغییرات طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها با زاویه جریان شکل ۱۵ طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین‌دست مدل در فاصله



شکل ۱۵. طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها پایین دست مدل و توزیع نرمال گاوس در $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ برای زاویه‌های مختلف و $Re = 6700$

Fig. 15. The spectrum of the vortex shedding frequency and the normal Gauss distribution at $\left(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2\right)$ for different flow angles and $Re = 6700$



شکل ۱۶. مقدار 2σ بر حسب زاویه جریان در $\frac{x}{a} = 2$ و $\frac{y}{a} = 2$ و $Re = 6700$

Fig. 16. Value of 2σ with flow angle at $(\frac{x}{a} = 2, \frac{y}{a} = 2)$ and $Re = 6700$

۲/۴۶٪ می‌باشد. تکرار آزمایش‌ها نشان می‌دهد که میزان انحراف (σ)، در زمان‌های مختلف در زاویه 60° حدود ۵٪ می‌باشد.

ناحیه دنباله پایین‌دست مدل بر روی میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها تأثیر دارد. با افزایش فاصله از مدل در امتداد طولی، مقدار انحراف از معیار تا فاصله $\frac{x}{a} = 4$ برای زاویه 60° تغییرات زیادی نداشته و پس از آن افزایش می‌یابد.

تغییرات میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها (σ)، در امتداد عرضی (جهت عمود بر جریان) ناچیز می‌باشد، ولی در ناحیه جدایش این تغییرات افزایش می‌یابد.

میزان انحراف از معیار طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها به زاویه جریان بستگی دارد. برای زاویه‌های $0^\circ \leq \alpha < 18^\circ$ و $23^\circ < \alpha \leq 60^\circ$ میزان انحراف از معیار ناچیز بوده و حدود ۰/۴۵ تا ۱/۱ می‌باشد. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها حدود ۰/۹٪ تا ۲/۲٪ خواهد بود، ولی در زوایای $18^\circ \leq \alpha \leq 23^\circ$ ، خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها تا حدود ۹٪ افزایش می‌یابد.

منابع

گردابه‌ها پایین‌دست مدل مثلی به صورت تجربی بررسی شده و نتایج آن به شرح زیر بیان می‌شود:

عدد استروهال ریزش گردابه‌ها برای اعداد رینولدز بزرگتر از ۱۲۰۰، مستقل از عدد رینولدز بوده ولی به زاویه جریان هوا نسبت به مدل وابسته است. در زاویه 20° ، عدد استروهال بیشترین مقدار خود (۰/۲۳) و در زاویه 60° (هنگامی که ضلع مثلث در مقابل جریان است) کمترین مقدار خود (۰/۱۳۵) را دارد. در این زاویه تغییرات عدد استروهال نسبت به زاویه مدل کم بوده، لذا قرارگیری مدل در این زاویه، برای کاربرد دبی‌سنج از نوع گردابه‌ای مناسب است.

به منظور بررسی عدم قطعیت در اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها، با استفاده از توزیع نرمال گاوس، طیف فرکانسی ریزش گردابه‌ها برازش شده و با در نظر گرفتن میزان سطح اطمینان و با استفاده از مقدار انحراف از معیار توزیع نرمال گاوس (σ) می‌توان عدم قطعیت و یا حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها را مشخص کرد. برای مدل مثلی که در زاویه 60° قرار دارد، با در نظر گرفتن سطح اطمینان ۹۵٪، حداکثر خطای اندازه‌گیری فرکانس ریزش گردابه‌ها ۱/۵۳٪ و برای زاویه 0° این خطا حدود

- cylinders, *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 53(3) (1994) 375-399.
- [11] E. Ardekani, A. Teymourtash, M.A. Ardakani, Experimental Investigation on Flow Downstream of a Triangular Bluff Body at Different Angles, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 53(1 (Special Issue)) (2021) 427-436. (in persian)
- [12] M. Swaminathan, G. Rankin, K. Sridhar, A note on the response equations for hot-wire anemometry, (1986).
- [13] Z.Y. Ng, T. Vo, W.K. Hussam, G.J. Sheard, Two-dimensional wake dynamics behind cylinders with triangular cross-section under incidence angle variation, *Journal of Fluids and Structures*, 63 (2016) 302-324.
- [14] B. Forouzi Feshalami, S. He, F. Scarano, L. Gan, C. Morton, A review of experiments on stationary bluff body wakes, *Physics of Fluids*, 34(1) (2022).
- [15] F.E. Jørgensen, How to measure turbulence with hot-wire anemometers: a practical guide, *Dantec dynamics*, 2001.
- [16] M. Ardekani, F. Farhani, Experimental study on response of hot wire and cylindrical hot film anemometers operating under varying fluid temperatures, *Flow Measurement and Instrumentation*, 20(4-5) (2009) 174-179.
- [17] V. Seshadri, *The inverse Gaussian distribution: statistical theory and applications*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [18] M. Ardekani, F. Farhani, A. Nourmohammadi, Experimental study of drag coefficient of multistrand wires using single normal hot-wire anemometer probe, *Flow Measurement and Instrumentation*, 50 (2016) 237-244.
- [19] M. Ardekani, Hot-wire calibration using vortex shedding, *Measurement*, 42(5) (2009) 722-729.
- [1] M. Ardekani, Air flow measurement in experimental fluid mechanics, *Iranian Research Organization on Science and Technology*, Iran, (2014). (in persian)
- [2] R.W. Miller, *Flow measurement engineering handbook*, United States: N. p., (1983). Web.
- [3] Y. Jinwen, Z. Yufei, C. Haixin, Flow Control Mechanisms of the Karman-Vortex Generator in Conical Diffuser Separation, *7TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS)*, (2017), 405-413.
- [4] J. Yang, Y. Zhang, H. Chen, S. Fu, Flow separation control in a conical diffuser with a Karman-vortex generator, *Aerospace Science and Technology*, 106 (2020) 106076.
- [5] S. Srikanth, A. Dhiman, S. Bijjam, Confined flow and heat transfer across a triangular cylinder in a channel, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(11) (2010) 2191-2200.
- [6] A. Kumar De, A. Dalal, Numerical study of laminar forced convection fluid flow and heat transfer from a triangular cylinder placed in a channel, *Journal of Heat transfer*, 129(5) (2007).646-656.
- [7] J. Derakhshandeh, M.M. Alam, A review of bluff body wakes, *Ocean Engineering*, 182 (2019) 475-488.
- [8] O. Zeitoun, M. Ali, A. Nuhait, Convective heat transfer around a triangular cylinder in an air cross flow, *International Journal of Thermal Sciences*, 50(9) (2011) 1685-1697.
- [9] N. Agrwal, S. Dutta, B.K. Gandhi, Experimental investigation of flow field behind triangular prisms at intermediate Reynolds number with different apex angles, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 72 (2016) 97-111.
- [10] S. Luo, M.G. Yazdani, Y. Chew, T. Lee, Effects of incidence and afterbody shape on flow past bluff

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Eskandari Sani, *Redesign of energy recovery device to keep the production recovery constant*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 56(5) (2024) 679-698.

DOI: [10.22060/mej.2024.23245.7733](https://doi.org/10.22060/mej.2024.23245.7733)

