

بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله جریان در اطراف یک استوانه بیضوی در اعداد رینولدز مختلف

محمد جواد ایزدی یزدی
 دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
 عبدالامیر بک خوشنویس*
 دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

در این پژوهش، به بررسی ویژگی‌های دنباله جریان در اطراف یک استوانه بیضوی با استفاده از روش تجربی پرداخته شده است. بدین منظور، یک استوانه با سطح مقطع بیضوی با نسبت محور ۱:۲ از جنس آلومینیوم در تونل باد تحت اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰، مورد آزمایش قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های موجود، به بررسی مشخصه‌های دنباله جریان و ضرایب پسای این مدل در حالات مختلف پرداخته شده است. به منظور اندازه‌گیری سرعت و شدت اغتشاش‌ها، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. شدت اغتشاش‌های جریان آزاد دستگاه تونل باد ۰/۱۵ درصد می‌باشد که از این نظر دارای دقت بالایی است. آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دنباله استوانه بیضوی نشان می‌دهند که افزایش عدد رینولدز باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت میانگین می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز، شدت اغتشاش دنباله کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز در یک نسبت محوری ثابت، عرض دنباله باریک‌تر می‌شود و عدد استروهال دنباله مربوط به گردابه کارمن افزایش می‌یابد. مشخص شد که با افزایش عدد رینولدز پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت کاهش می‌یابند.

واژه‌های کلیدی: تونل باد، استوانه بیضوی، ضریب پسا، عدد استروهال، جریان‌سنج سیم داغ.

Experimental Investigation of Characteristics of the Flow Wake Around an Elliptic Cylinder at Different Reynolds Numbers

M. J. Ezadi Yazdi
 A. Bak Khoshnevis

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Abstract

In this study, the characteristics of flow wake around an elliptic cylinder have been investigated experimentally. To this end, a cylinder with elliptic cross section with an axis ratio of $AR=2$ of Aluminum at Reynolds numbers of 15000 and 30000 has been tested in the wind tunnel. Using existing methods the characteristics of a flow wake and drag coefficients of the model in the different cases have been investigated. To measure the mean velocity and turbulence intensity, the hot-wire anemometry has been used. Free-stream turbulence intensity of wind tunnel is 0.15 percent which in this sense, it has high accuracy. The experiments indicates that the increase in Reynolds number causes significant changes in the mean velocity profile. The results show that by increasing the Reynolds number, the turbulence intensity in the wake increases. The results show that by increasing the Reynolds number at a constant axis ratio, the width of wake becomes narrow, and the Strouhal number of wake associated with the Karman vortex increases. It is found that by increasing the Reynolds number, the parameters of drag coefficient and velocity defect reduce.

Keywords: Wind tunnel, Elliptic cylinder, Drag coefficient, Strouhal number, Hot Wire Anemometry.

۱- مقدمه

محدوده‌ی ۸۵۰۰۰ تا ۳۱۲۰۰۰ می‌باشد، عدد رینولدز حاضر بر اساس محور بزرگ استوانه محاسبه شده بود.

مجموعه‌ای از مطالعات تجربی بر روی رفتار جریان‌های پایا و ناپایا اطراف استوانه بیضوی توسط مودی و همکاران [۱۳-۱۶] گزارش شده است. توزیع‌های فشار میانگین و نوسانی، ضرایب برآ، پسا، گشتاور و عدد استروهال و همچنین ویژگی‌های دنباله‌ی نزدیک در عدد رینولدز زیربحرانی مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها شرح دادند که در محدوده‌ی عدد رینولدز مورد بررسی، رژیم جریان بحرانی را شامل می‌شود و اینکه ویژگی‌های آیرودینامیکی هیچ وابستگی به عدد رینولدز را نشان نمی‌دهند. با وجود توصیفات آن‌ها، ضرایب برآ و گشتاور برای یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۲:۵، تغییرات زیاد با عدد رینولدز، به‌ویژه در زاویه‌های حمله‌ی کوچک‌تر از ۲۰ درجه را نشان داد [۱۴].

به‌طور کلی، ضریب پسا استوانه بیضوی در زاویه‌ی حمله‌ی کوچک نسبت به استوانه دایره‌ای کاملاً پایین‌تر است. اوتا و همکاران [۱۷، ۱۸]

جریان حول استوانه‌ها کاربردهای گسترده‌ای در مسائل مهندسی از قبیل برج‌های خنک‌کننده، مبدل‌های حرارتی، دودکش‌ها، راکتورهای هسته‌ای و سازه‌های دریایی دارند. در نتیجه، تعداد زیادی از محققان این نوع از جریان را مطالعه کرده‌اند. بسیاری از این مطالعات در ارتباط با استوانه‌های دایره‌ای بود [۱-۴]. در مقابل، مطالعات کمی درباره‌ی جریان حول یک استوانه بیضوی وجود دارد. ضرایب برآ و گشتاور یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۱:۶، یک وابستگی شدید به عدد رینولدز را نشان می‌دهد [۵]. علاوه بر این، مطالعات تجربی و نظری برای جریان در اعداد رینولدز پایین و میانگین گزارش شده است [۶-۱۰].

شیبائر [۱۱، ۱۲] پارامترهای سرعت و آشفتگی در لایه مرزی اطراف یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۱:۲/۹۶ در $\alpha = 0$ را اندازه‌گیری نمود که در آن α نشان دهنده‌ی زاویه حمله بود. نتایج او نشان داد که رژیم عدد رینولدز بحرانی وجود دارد که در آن عدد رینولدز در

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: khosh1966@yahoo.com

نشان دادند که میانگین ضریب انتقال حرارت استوانه‌های بیضوی نسبت به استوانه‌های دایره‌ای تقریباً برابر یا کمی بالاتر است.

اوتا و همکاران [۱۹] به بررسی تجربی جریان اطراف یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۱:۳ در رژیم عدد رینولدز بحرانی بر اساس اندازه-گیری‌های فشار استاتیک میانگین در طول سطح استوانه و سرعت با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ در دنباله نزدیک، پرداختند. آن‌ها نشان دادند که عدد رینولدز بحرانی به ازای زاویه حمله α متفاوت است و در نزدیکی زاویه حمله ۵ تا ۱۰ درجه به حداقل مقدار خودش می‌رسد. همچنین در عدد رینولدز بحرانی ضرایب برآ، پسا و گشتاور به‌طور ناپیوسته تغییر می‌کنند.

این ویژگی‌های استوانه بیضوی می‌تواند برای به کار انداختن یک مبدل حرارتی با کارایی بالا به منظور صرفه‌جویی در انرژی و استفاده‌ی مؤثر از آن بسیار مفید باشد [۲۰، ۲۱]. برای چنین هدفی، اطلاعات مربوط به ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه بیضوی باید در یک محدوده‌ی وسیعی از عدد رینولدز مشخص شود. علاوه بر آن‌ها، خواص عمومی دینامیک سیالاتی استوانه‌های بیضوی مابین استوانه‌های دایره‌ای ($AR=1$) و صفحات مسطح ($AR=\infty$) قرار دارد. استوانه‌های بیضوی کاربردهای گسترده‌ای در مهندسی داشته و می‌توانند به‌عنوان یک ابزار انفعالی مؤثر به‌منظور کنترل جریان به کار روند.

دیلنی و سورنسن [۲۲] پارامترهای ضریب پسا و عدد استروهال را برای یک استوانه بیضوی با نسبت محور ۱:۲ در زاویه‌های حمله ۰ تا ۹۰ درجه، بررسی نمودند. نتایج آن‌ها در $\alpha = 90^\circ$ ، ویژگی‌های جریان زیربحرانی را شامل شد، اما نتایج آن‌ها در $\alpha = 0^\circ$ ، گذر جریان از زیربحرانی به حالت فوق بحرانی را نشان داد. همچنین نشان دادند که عدد استروهال در محدوده عدد رینولدز بحرانی به طور پیوسته تغییر می‌کند.

خوشنویس و همکاران [۲۳] به بررسی تجربی کاهش ضریب پسای سیال روی یک استوانه بیضوی به‌وسیله سیم اغتشاش‌ساز پرداختند. آن‌ها دو سیم را در زوایای ۰، ۲۳/۷ و ۴۰/۹ درجه بر روی سطح استوانه نصب کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بهترین حالت ممکن، در زاویه نصب ۲۳/۷ درجه، ضریب پسا به میزان ۵۶/۵٪ کاهش می‌یابد.

کوکابییک و دالیسیو [۲۴] محاسبات عددی جریان اطراف یک استوانه بیضوی مایل که در یک خط در حال نوسان می‌باشد را با جریان پایا در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و نسبت محور ۰/۵ ارائه دادند. آن‌ها اثرات زاویه انحراف و نسبت سرعت را بررسی کردند و مشاهده نمودند که دو شکل متفاوتی از خیابان گردابه، وابسته به مقادیر زاویه انحراف وجود دارد.

اخیراً ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۲۵] به بررسی تجربی اثرات نسبت فضای خالی (G/B) و عدد رینولدز (Re) بر روی تداخل لایه مرزی با دنباله یک استوانه بیضوی پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که تداخل دنباله با لایه مرزی در مؤلفه نوسانی سرعت نسبت به سرعت متوسط سریع‌تر می‌باشد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، بیشتر مطالعات انجام شده به بررسی ویژگی‌های آیرودینامیکی از جمله ضریب پسا، برآ، گشتاور، توزیع فشار و همچنین فرکانس تشکیل گردابه (عدد استروهال) در نسبت محوری و زوایای حمله مختلف در محدوده رژیم جریان

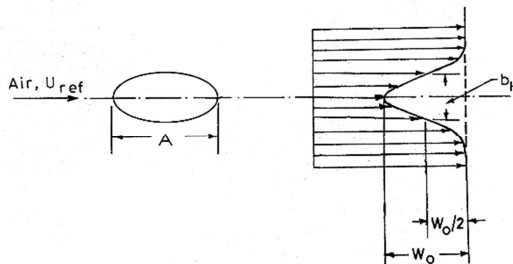
بحرانی و زیر بحرانی پرداخته شده است [۱۳-۱۶، ۱۹]. در هیچکدام از مطالعات ذکر شده به بررسی روند تغییر پروفیل‌های سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها پرداخته نشده است. لذا هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثرات افزایش عدد رینولدز بر روی ویژگی‌های دنباله جریان در اطراف یک استوانه بیضوی در رژیم جریان زیر بحرانی می‌باشد، به‌گونه‌ای که روند تغییر پروفیل‌های سرعت، شدت اغتشاش‌ها و عدد استروهال و در نهایت ضریب پسا در اعداد رینولدز ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ مقایسه می‌گردد.

۲- پارامترهای مورد بررسی

شدت اغتشاش‌ها پارامتر مهمی است که کیفیت جریان سیال را مشخص می‌کند. شدت اغتشاش‌ها به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\%Tu = \frac{U_{r.m.s}}{U_{ref}} \times 100 = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

پارامترهای نقصان سرعت (W_0) و پهنای دنباله (b_h) در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- پارامترهای نقصان سرعت (W_0) و پهنای دنباله (b_h).

پارامتر نقصان سرعت بی‌بعد از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\frac{W_0}{U_{ref}} = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{ref}} \quad (2)$$

عدد استروهال، از اعداد بدون بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به‌صورت بی‌بعد بیان می‌کند و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

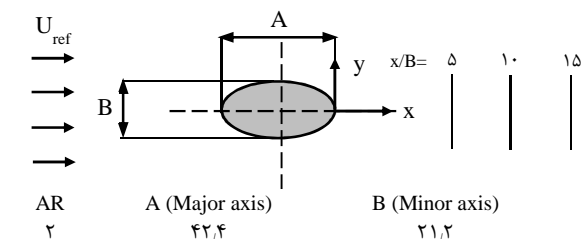
$$St = \frac{fB}{U_{ref}} \quad (3)$$

نسبت انسداد، قطر کوچک استوانه بیضوی تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد تعریف می‌شود. اگر برای استوانه بیضوی نسبت انسداد کمتر از ۰/۰۸ انتخاب شود، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. برای مثال طبق تحلیل آلونسو و همکاران [۲۶] و فلاین و ایزنر [۲۷] با انتخاب نسبت انسداد کمتر از ۰/۰۸، مقدار ضریب پسا کمتر از ۳ درصد خطا خواهد داشت. با توجه به مشخصات تونل باد و استوانه، نسبت انسداد در آزمایش‌های فوق ۰/۰۵۳ درصد می‌باشد که تأثیری در نتایج به دست آمده نمی‌گذارد:

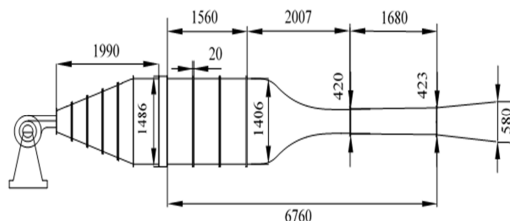
$$(blockage\ ratio)\ \beta = \frac{B}{H} = 0.053 \quad (4)$$

جریان سنج سیم داغ به همراه پروب، دارای فرکانس قطع ۵ کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ از طریق کارت A/D (آنالوگ به دیجیتال) به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار مربوطه (Flow ware) تجزیه و تحلیل می‌شوند. برای حرکت پروب در نقاط مختلف از یک سازوکار دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این سازوکار انتقال پروب ۰/۰۱ میلی‌متر است. حرکت این سازوکار انتقال‌دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می‌شود. همچنین از لوله استاتیکی پیتوت به همراه مبدل الکترونیکی فشار، به منظور اندازه‌گیری فشار کل جریان هوا استفاده شده است. استوانه استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس آلومینیوم بوده با آلیاژ ۷۰۲۳ و دارای طول ۳۹۰ میلی‌متر، قطر بزرگ ۴۲/۴ میلی‌متر و قطر کوچک ۲۱/۲ میلی‌متر می‌باشد. به علت صیقلی بودن مدل از اثرات زبری سطح در نتایج آزمایش‌ها صرف نظر شده است.

برای بررسی دنباله استوانه بیضوی، پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها برای هشت موقعیت طولی در پشت استوانه اندازه‌گیری و در نهایت ضریب پسا محاسبه شده است. نتایج برای دو عدد رینولدز مختلف نشان داده شده است. اعداد رینولدز انتخابی با توجه به مشخصات تونل باد ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انتخاب شده‌اند (عدد رینولدز بر اساس قطر کوچک استوانه محاسبه شده است $Re = U_{ref} \cdot B / \theta$). داده‌برداری برای هشت موقعیت طولی ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰، ۵، ۲/۵، ۱، ۰/۲۵ $x/B =$ و برای ارتفاع $y/B = (-۴, +۴)$ انجام شده است. با تغییر سرعت جریان هوا (عدد رینولدز) و با توجه به تفاوت قابل ملاحظه در پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها به ازای اعداد رینولدز مختلف، نتایج آزمایش‌ها در اعداد رینولدز جداگانه نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمای هندسی از استوانه بیضوی و محورهای مختصات (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۴- نمای شماتیک تونل باد (ابعاد به میلی‌متر).

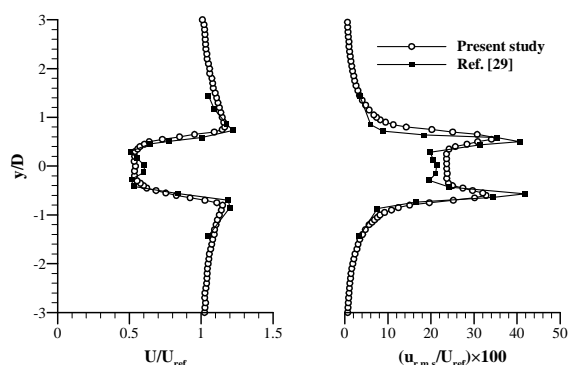
همچنین اگر نسبت منظری، طول استوانه تقسیم بر قطر کوچک استوانه تعریف شود، با توجه به ابعاد استوانه در این آزمایش‌ها مقدار نسبت منظری ۱۸/۴۰ می‌باشد. با توجه به تحقیقات منتشر شده در این زمینه، نسبت منظری در آزمایش‌ها را معمولاً بیشتر از ۲۰ در نظر می‌گیرند که با توجه به مقدار ضریب پسا در این تحقیق، پارامتر نسبت منظری هم مناسب بوده و تأثیری بر نتایج نخواهد داشت:

$$\beta = \frac{L}{B} = 18.40 \quad (۵)$$

برای بررسی بیشتر می‌توان به تحقیق ویلیامسن [۲۸] رجوع کرد.

۳- اعتبارسنجی

در ابتدا، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان‌سنج سیم داغ، پروفیل بی‌بعد سرعت میانگین و شدت اغتشاش کار حاضر برای استوانه دایره‌ای با نتایج تحقیق تاناکا و ناگانو [۲۹] در شکل ۲ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتیجه کار حاضر و کار تاناکا و ناگانو [۲۹] مشاهده می‌شود.

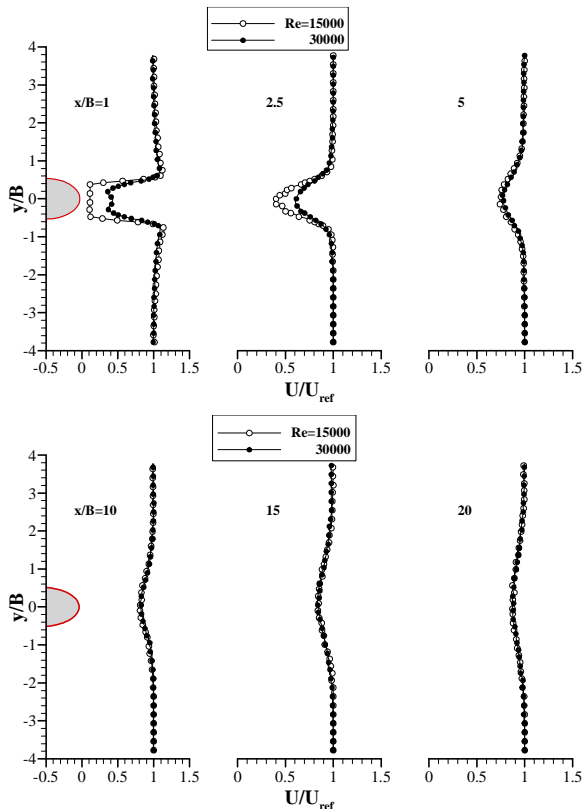


شکل ۲- مقایسه‌ی (الف) پروفیل‌های بی‌بعد سرعت میانگین و (ب) شدت اغتشاش برای مطالعه حاضر و مرجع [۲۹].

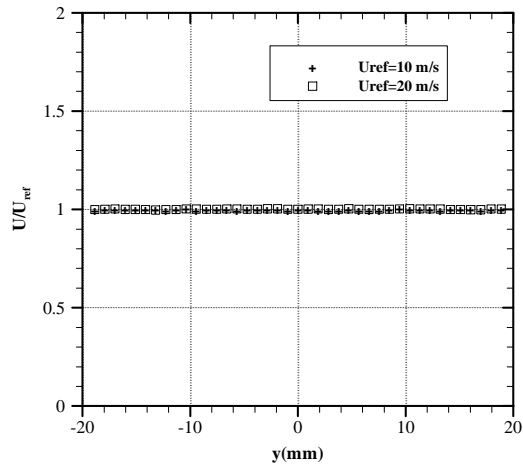
۴- تجهیزات آزمایشگاهی

تونل باد در این آزمایش از نوع مدار باز و دمشی بوده که دارای اتاقک آزمایشی از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این دستگاه، کاربرد آن انجام آزمایش جریان‌های آشفته گاز و یا هوا می‌باشد. سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت است که توانایی اندازه‌گیری سرعت میانگین، شدت اغتشاش‌ها و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه را دارد. در شکل ۳ نمای شماتیکی از استوانه بیضوی، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و محورهای مختصات و در شکل ۴ طرحواره‌ای از تونل باد نشان داده شده است. یکنواختی پروفیل سرعت میانگین در ورودی تونل باد توسط جریان‌سنج سیم داغ بررسی شد (شکل ۵الف)). شدت اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاقک آزمون کمتر از ۰/۱۵٪ است (شکل ۵ب)). پروب یک‌بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای حسگری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد. دستگاه

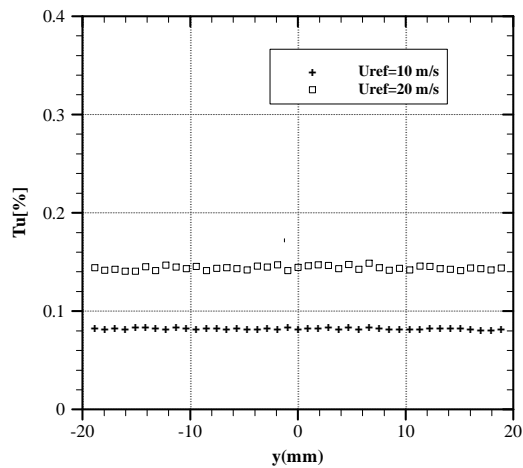
در شکل ۶ پروفیل سرعت میانگین به ازای اعداد رینولدز متفاوت و در موقعیت‌های ۲۰ و ۱۵، ۱۰، ۵، ۲٫۵، ۱ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که افزایش عدد رینولدز (افزایش سرعت جریان هوای ورودی) باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت میانگین می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، پروفیل‌های سرعت با توجه به طبیعت متغیر و غیر دائم مؤلفه‌های نوسانی سرعت، در طول یک دوره تناوب متقارن می‌باشند. با توجه به اینکه گردابه‌ها به صورت لحظه‌ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده ولی با توجه به شکل ۶، حتی در مقاطع اولیه نزدیک به استوانه هم پروفیل‌های سرعت میانگین رسم شده، کاملاً متقارن می‌باشند. توجه این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه‌ها در پشت استوانه لحظه‌ای بوده و به صورت تکراری در طول دوره تناوب خود تکرار می‌شوند. حال اگر زمان داده‌برداری در یک نقطه از زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها بیشتر باشد، می‌توان با محاسبه میانگین زمانی سرعت در نقاط مورد نظر، سرعت میانگین در هر نقطه را به دست آورد که اثرات نامتقارن بودن سرعت‌های لحظه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. در شکل ۶ زمان داده‌برداری تقریباً ۵۰۰ برابر زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت استوانه، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می‌یابد که در نهایت پروفیل سرعت میانگین یکنواخت‌تر می‌شود. در فاصله‌های نزدیک استوانه به علت وجود جدائی و جریان‌های برگشتی، افت جریان بیشتر می‌شود که با دور شدن از مدل، افت جریان کمتر شده و در داخل دنباله یکنواخت‌تر می‌شود.



شکل ۶- پروفیل‌های سرعت میانگین (U/U_{ref}) بی‌بعد در ایستگاه‌های مختلف (x/B) در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰.



(الف)



(ب)

شکل ۷- در ورودی اتاق آزمون تونل باد: (الف) یکنواختی سرعت میانگین جریان. (ب) شدت اغتشاش جریان آزاد.

۵- نتایج و بحث

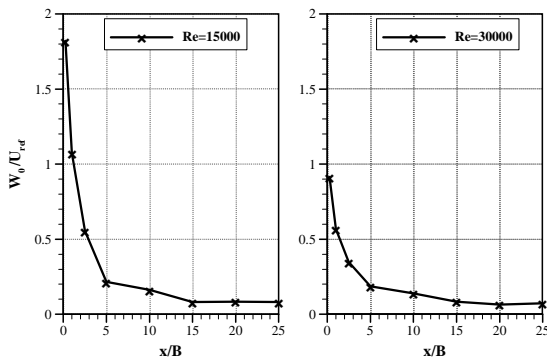
همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق به بررسی دنباله استوانه بیضوی در هشت موقعیت طولی مختلف و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پرداخته شده است.

۵-۱- بررسی پروفیل سرعت میانگین

در این سری از آزمایش‌ها به بررسی پروفیل سرعت میانگین در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پرداخته شده است.

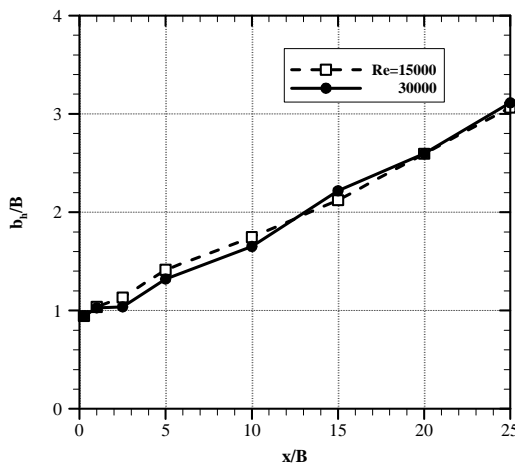
در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ با توجه به مشخصات تونل باد حداقل سرعت جریان هوای قابل قبول، ۱۰ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با مشخصات استوانه، عدد رینولدزی که می‌توان در آزمایش‌ها به آن دست پیدا کرد، ۱۵۰۰۰ می‌باشد و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ سرعت جریان هوای ورودی ۲۰ متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است.

از طرفی در سه ایستگاه $x/B=0.25, 1, 2.5$ در شکل ۷ مشخص است که شیب تغییرات برای پارامتر نقصان سرعت بی‌بعد در عدد رینولدز 15000 نسبت به 30000 بیشتر است. وجود شیب شدید در پروفیل نقصان سرعت بی‌بعد از نرخ تغییر سرعت یعنی $\partial/\partial x (\Delta u)$ حکایت دارد. این پارامتر نیز با میزان نرخ اضمحلال رابطه دارد. لذا باید نرخ اضمحلال در این پروفیل بیشتر از دیگری باشد که این مهم با توجه به شکل ۶ قابل تشخیص است که کمینه مقدار مربوط به پروفیل سرعت میانگین برای عدد رینولدز 15000 در ایستگاه‌های دور از مدل با پروفیل سرعت برای عدد رینولدز 30000 منطبق می‌شود.



شکل ۷- تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد بر حسب x/B در اعداد رینولدز 15000 و 30000 .

در شکل ۸، نمودار پهنای دنباله استوانه در اعداد رینولدز 15000 و 30000 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پهنای دنباله روندی افزایشی دارد. در دنباله نزدیک (ناحیه چرخشی)، پهنای دنباله در هر دو عدد رینولدز نسبت به سایر ایستگاه‌ها مقدار کم‌تری دارد و از ایستگاه $x/B=2.5$ به بعد افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. از $x/B=2.5$ تا $x/B=10$ ، مقدار پهنای دنباله در عدد رینولدز 15000 نسبت به رینولدز 30000 بیشتر می‌باشد؛ اما در منطقه ریزش گردابه (ایستگاه‌های پایانی)، این مقدار برای هر دو حالت تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین افزایش پهنای دنباله منجر به افزایش منطقه تنش برشی می‌گردد.



شکل ۸- تغییرات پهنای دنباله بی‌بعد بر حسب x/B در اعداد رینولدز 15000 و 30000 .

از طرفی در شکل ۶ دیده می‌شود که پروفیل‌های سرعت میانگین برای هر دو عدد رینولدز از ایستگاه $x/B=5$ به بعد بسیار نزدیک به هم می‌باشند. این مسئله به این دلیل است که نرخ اضمحلال گردابه بر اثر تماس با لایه برشی دنباله در عدد رینولدز 15000 نسبت به 30000 بیشتر است.

در ایستگاه اول (دقیقاً پشت مدل) به دلیل کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل به وجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از دنباله به جریان پتانسیل در بالا و پایین مدل شدید است؛ به عبارت دیگر سرعت در بالا و پایین مدل گرادیان شدیدی پیدا می‌کند و U/U_{ref} از حدود 0.1 تا $1/2$ تغییر می‌کند (U_{ref} سرعت جریان آزاد است). به تدریج با دور شدن از مدل این گرادیان از بین می‌رود (شکل ۶ را ببینید). همچنین طبق رابطه $(u_B - u_{min})/(y_B - y_{min})$ ، تغییرات گرادیان سرعت در شکل ۶ برای ایستگاه اول در عدد رینولدز 15000 برابر $3/5$ و در عدد رینولدز 30000 نیز برابر $1/65$ است.

نکته قابل توجه دیگری که در موقعیت $x/B=1$ مشاهده می‌شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل‌های سرعت مقاطع نزدیک به مدل می‌باشد. علت این مطلب را می‌توان در مومنوم لایه مرزی ایجاد شده بر سطوح مدل دانست. بدین صورت که در مقاطع نزدیک به مدل، مومنوم موجود در لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطوح استوانه، با از بین رفتن لایه مرزی باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نهایت افزایش سرعت آن‌ها می‌شود که این مطلب در مقاطع دورتر پشت مدل اثر خود را از دست داده و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی‌باشد.

در منطقه‌ی خیلی نزدیک به دنباله ($x/B \ll 2.5$)، پروفیل‌ها در منطقه‌ی چرخشی بلافاصله پشت استوانه شکل ۷ می‌باشند. در پایین- دست منطقه‌ی چرخشی پروفیل‌های سرعت میانگین U شکل می‌باشند. پروفیل‌های U شکل در منطقه‌ی ریزش گردابه ($x/B \gg 10$)، می‌توانند باعث رشد آشفتگی و افزایش اختلاط شوند.

همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود کمینه سرعت در داخل دنباله در عدد رینولدز 30000 نسبت به عدد رینولدز 15000 در ایستگاه‌های 5 و 2.5 ، $x/B=1$ بسیار کمتر می‌باشد و در ایستگاه‌های پایانی تقریباً به مقدار یکسانی می‌رسد. در ایستگاه‌های پایانی تغییرات پروفیل سرعت میانگین برای هر دو عدد رینولدز یکسان می‌باشد که این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدائی جریان از موقعیت‌های ابتدایی به موقعیت‌های انتهایی داده‌برداری دانست.

اختلاف سرعت بین جریان آزاد و کمترین سرعت در دنباله برای هر ایستگاه از ابتدای آن‌ها در نزدیکی مدل تا انتهای آن‌ها در ناحیه‌ای دورتر در پایین دست جریان، نرخ کاهشی دارد. این اختلاف سرعت را نقصان سرعت می‌نامند. در واقع پروفیل نقصان سرعت بی‌بعد، این قابلیت را دارد که نمایی از رفتار بیشینه سرعت سیال در دنباله و همچنین تغییرات آن را نشان دهد. در شکل ۷ نمودار پارامتر نقصان سرعت بی‌بعد بر حسب x/B نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که قله‌ی پروفیل‌های سرعت (کمینه سرعت موجود در دنباله) تا $x/B=15$ کاهش پیدا کرده و از این ایستگاه تا $x/B=25$ روند ثابتی دارد.

۵-۲- برآورد کاهش سرعت

وقتی یک جسم جامد در داخل سیال ساکن کشیده می‌شود در پشت آن دنباله تشکیل می‌شود. سرعت‌ها در دنباله، کوچک‌تر از جریان اصلی هستند و افت سرعت دنباله به افت مومنوم منجر می‌شود که ناشی از کشش روی جسم است. به موازات زیاد شدن فاصله از جسم، پهنای دنباله زیاد می‌شود و اختلاف بین سرعت دنباله و سرعت در خارج از آن کوچک‌تر می‌گردد. در مورد مسائل مربوط به جت‌ها و دنباله‌های متلاطم، معمولاً فرض می‌کنیم طول اختلاط l متناسب با عرض جت می‌باشد [۳۰].

$$\frac{l}{b} = \beta = \text{const} \quad (۶)$$

با در نظر گرفتن معادلات تنش برشی اغتشاشی و جایگذاری پارامترهای مربوطه در معادلات مزبور خواهیم داشت [۳۰]:

$$U_{\infty} \frac{db}{dx} \propto \frac{1}{b} u_1 = \beta u_1 \quad (۷)$$

که در آن $u_1 = U_{\infty} - u$ می‌باشد. اگر فرض کنیم دنباله حاصل، از نتیجه‌ی قرار گرفتن استوانه در مسیر جریان باشد و h, d به ترتیب ارتفاع و بیشینه ضخامت استوانه باشد، در این صورت نیروی کشش (D) و مومنوم (J) برابر است با [۳۰]:

$$D = \frac{1}{2} C_D U_{\infty}^2 h B, \quad J \propto \rho U_{\infty} u_1 h B \quad (۸)$$

با معادل قرار دادن معادلات کشش و مومنوم خواهیم داشت [۳۰]:

$$\frac{u_1}{U_{\infty}} \propto \frac{C_D B}{2b} \quad (۹)$$

در نهایت با جایگذاری معادله (۷) در معادله (۹) خواهیم داشت [۳۰]:

$$2b \frac{db}{dx} \propto \beta C_D d \quad (۱۰)$$

همچنین برای دنباله دو بعدی داریم [۳۰]:

$$b \propto (\beta x C_D B)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۱)$$

اگر معادله (۱۱) را در معادله (۱۰) جایگزین نماییم در می‌یابیم که میزان تقعر در منحنی سرعت در پایین‌دست جریان برای دنباله دوبعدی برابر است با [۳۰]:

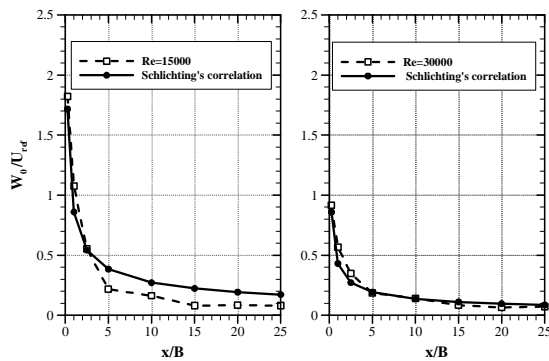
$$\frac{u_1}{U_{\infty}} \propto \left(\frac{C_D B}{\beta x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۲)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت متناسب با $1/\sqrt{x}$ کاهش می‌یابد. در نتیجه برای معادله ۱۱، C (عامل تساوی معادله ۱۱) وجود دارد که معادله را از حالت تناسب خارج کرده و آن را به تساوی تبدیل کند. با محاسبه ضریب C برای هر دو حالت (عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰) به رابطه ۱۳ خواهیم رسید:

$$\Delta U_m = 38.3/\sqrt{x} \quad (۱۳)$$

که در رابطه (۱۳)، $\Delta U_m = U_{ref} - U_0$ ، بیشینه کاهش سرعت و U_0 سرعت سیال در مرکز دنباله است.

همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود تطابق خوبی بین نتایج مطالعه حاضر و رابطه‌ی اصلاح شده‌ی شلختینگ [۳۰] مشاهده می‌گردد.



شکل ۹- مقایسه نقصان سرعت بی‌بعد برای مطالعه حاضر در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ و رابطه اصلاح شده‌ی شلختینگ.

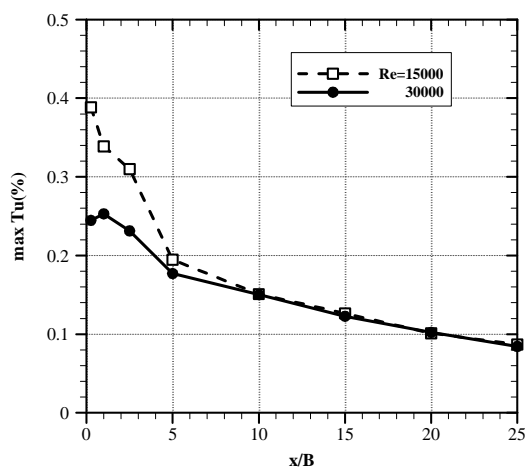
۵-۳- بررسی شدت اغتشاش‌ها

در این سری از آزمایش‌ها به بررسی شدت اغتشاش‌ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پرداخته شده است.

در شکل ۱۰ نمودار شدت اغتشاش‌ها به ازای اعداد رینولدز مختلف در ۲۰ و ۱۵، ۱۰، ۵، ۲٫۵، ۱ x/B نشان داده شده است. پروفیل‌های شدت اغتشاش‌ها طبق رابطه سرعت رینولدز که به صورت $u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_i$ بیان می‌شود، قسمتی از خطوط جریان آزاد است که بعد از ورود به دنباله و تغییر به صورت خطوط جریان گردابه‌ای، به اغتشاش‌های جریان تبدیل می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز، شدت اغتشاش‌های دنباله کاهش می‌یابد. با توجه به نمودار شدت اغتشاش‌ها، افزایش عدد رینولدز باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در اغتشاش‌های داخل دنباله تا ایستگاه $x/B=5$ می‌شود؛ اما از این ایستگاه به بعد تغییرات شدت اغتشاش‌ها تقریباً یکسان می‌باشد. با توجه به شکل‌های ۶ و ۱۰ مشخص است که در هر ایستگاه یک رفتار مشابه مشاهده می‌شود. از این لحاظ که اگر در ایستگاه $x/B=5$ هر دو پروفیل سرعت تقریباً بر هم منطبق می‌شوند، از طرفی دقیقاً در همان ایستگاه نیز دو پروفیل اغتشاشی تقریباً بر هم منطبق می‌شوند. این در حالی است که مقدار سرعت میانگین در شکل ۶ در دنباله در حال افزایش است، ولی اغتشاش‌ها در شکل ۱۰ در دنباله در حال کاهش

چرخشی در نزدیک استوانه و جریان‌های یکنواخت در فاصله‌های دور از استوانه می‌باشد.

در شکل ۱۱، بیشینه شدت اغتشاش‌ها در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. بیشینه شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ روندی کاهشی دارد، اما در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ روند افزایشی-کاهشی دارد. همچنین مشاهده می‌گردد که در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ بیشینه شدت اغتشاش‌ها نه در $x/B=0$ بلکه در $x/B=1$ رخ می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌گردد بیشینه شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ بیشتر از عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ می‌باشد که این روند در ایستگاه‌های پایانی یکسان می‌باشد.



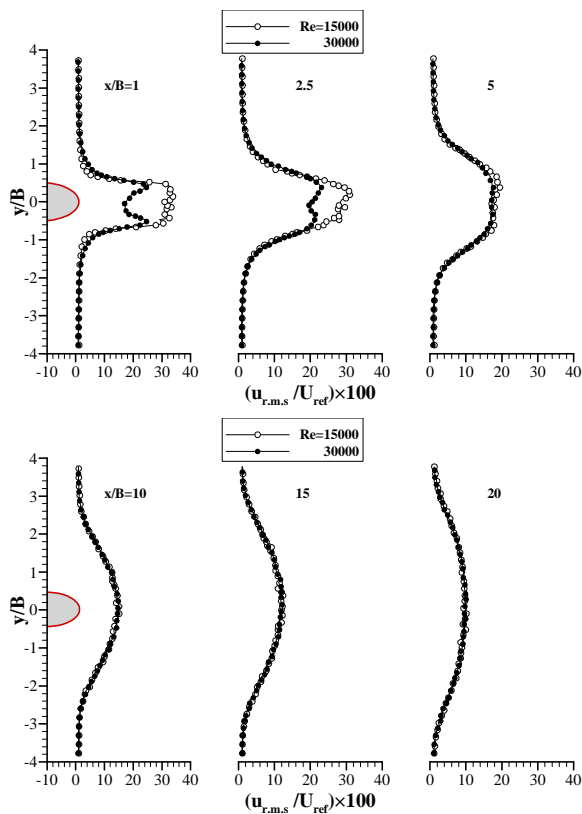
شکل ۱۱- تغییرات بیشینه شدت اغتشاش‌ها بر حسب x/B در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰.

۵-۴- بررسی عدد استروهاال

همان‌طور که در مشخصات دستگاه جریان‌سنج سیم داغ گفته شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج شونده از پشت استوانه می‌باشد که با استفاده از آن، سرعت سیال و قطر استوانه می‌توان عدد استروهاال را به دست آورد. برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه باید پراب را در محل مناسبی قرار داده و سپس فرکانس را به دست آورد. با توجه به بالا بودن پاسخ فرکانسی دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ نسبت به سیستم‌های سرعت-سنج دیگر، مناسب است تا از این امکان استفاده کرده و با پردازش نتایج خام به دست آمده، نمودارهای با مفهومی از آنالیز طیفی دنباله جریان نشان داده شود.

تعیین فرکانس گردابه توسط حسگر سیم داغ: حسگر سیم داغ، میزان نوسانات جریان سیال در تونل باد را به صورت نوسان در زمان و به عبارتی در حوزه زمان دریافت می‌کند و با استفاده از تبدیل سریع فوری، آن را به حوزه فرکانس برده و در نمایش‌گر به صورت دامنه نوسان برحسب فرکانس نوسان نشان می‌دهد. در تونل باد مورد آزمایش، بیشینه فرکانس داده‌برداری ΔKHz انتخاب شده است. در حوزه فرکانس، می‌توان دامنه تمامی نوسانات (با فرکانس‌های مختلف) جریان که توسط سنسور اندازه‌گیری می‌شود را مشاهده نمود. از بین تمامی نوسانات جریان پشت مدل، مسلم است که نوسانات گردابه‌های کارمن

است. دلیل این امر همان رابطه سرعت رینولدز $u_i = \bar{u}_i + \hat{u}_i$ است. چرا که مقدار مؤلفه افقی سرعت جریان آزاد u_i ثابت و تغییرناپذیر است. پس باید یک تعادل بین تغییرات مربوط به سرعت میانگین \bar{u}_i و شدت اغتشاش‌های \hat{u}_i به وجود آید. لذا آهنگ این تغییرات یکسان است.



شکل ۱۰- پروفیل‌های شدت اغتشاش‌های $(u_{r.m.s}/U_{ref}) \times 100$ بی بعد در ایستگاه‌های مختلف (x/B) در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰.

همچنین در اعداد رینولدز مختلف مشاهده می‌گردد که نمودار شدت اغتشاش‌ها دارای دو مقدار حداکثر در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در موقعیت‌های $x/B=1$ و 2.5 در پروفیل شدت اغتشاش‌ها علاوه بر دو مقدار حداکثر قبلی، یک مقدار حداکثر دیگر در مرکز دنباله روی می‌دهد که ناشی از تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل شدت اغتشاش‌ها دارای دو ناحیه اکستریم در روی مرز دنباله می‌باشد که با دور شدن از استوانه این نقاط یکنواخت‌تر شده و اکستریم‌ها از بین می‌روند. همچنین در این نواحی شاهد بیشینه تنش برشی خواهیم بود که در خارج از مرکز دنباله روی می‌دهد. همچنین میزان اغتشاش‌ها بر روی لایه‌های برشی تشکیل شده بر روی سطوح استوانه در تمامی ایستگاه‌ها به جز $x/B=1$ برابر می‌باشد. در $x/B=1$ میزان اغتشاش در لایه‌های برشی سطوح استوانه در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ نسبت به ۱۵۰۰۰ بیشتر می‌باشد. همچنین با افزایش فاصله از استوانه، شدت اغتشاش‌ها در داخل و روی مرز دنباله استوانه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در فواصل دورتر از استوانه نمودار شدت اغتشاش‌ها یکنواخت می‌شود. این پدیده ناشی از وجود جریان‌های برگشتی و

دارای بیشترین دامنه هستند. بنابراین فرکانس مربوط به بیشترین دامنه، در واقع همان مقدار فرکانس گردابه کارمن است.

در مقاله حاضر برای استخراج عدد استروهل، اندازه‌گیری‌ها در فاصله طولی ۵۰ میلی‌متری (بیشترین فرکانس مربوط به بالاترین دامنه) از پشت مدل انجام شده است.

در جدول ۱ مقادیر عدد استروهل به ازای اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ محاسبه و با نتایج تجربی مودی و ویلاند [۱۳] مقایسه شده است. نتیجه به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در این بازه از اعداد رینولدز، عدد استروهل در محدوده عدد رینولدز زیر بحرانی به مقدار جزئی افزایش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با افزایش عدد رینولدز، عدد استروهل دنباله مربوط به گردابه کارمن افزایش می‌یابد.

جدول ۱- مقادیر عدد استروهل برای استوانه بیضوی در اعداد رینولدز مختلف

AR	Re	St	
۲	۱۵۰۰۰	۰٫۲۱۷۸	مطالعه حاضر
۲	۳۰۰۰۰	۰٫۲۱۸۷	مطالعه حاضر
۲	۲۰۰۰۰	۰٫۲۱۶۰	مودی و ویلاند [۱۳]

۶- اندازه‌گیری نیروی پسا با روش اختلاف مومنتوم

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، استفاده از روش اختلاف مومنتوم است. در رابطه با روش اختلاف مومنتوم، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون دام [۳۱] با معادلات پیوستگی و مومنتوم خطی برای حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مشخص نمود.

گلدشتاین [۳۲] فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مشخص کرد. برای استفاده از معادله ارائه شده توسط گلدشتاین نیاز به اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله و همچنین اغتشاش‌ها به صورت سه‌بعدی می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل، شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاهش یافته و اغتشاش‌ها را می‌توان همگن فرض نمود. در این حالت با استفاده از جریان‌سنج با پراب یک‌بعدی [۳۳] می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد.

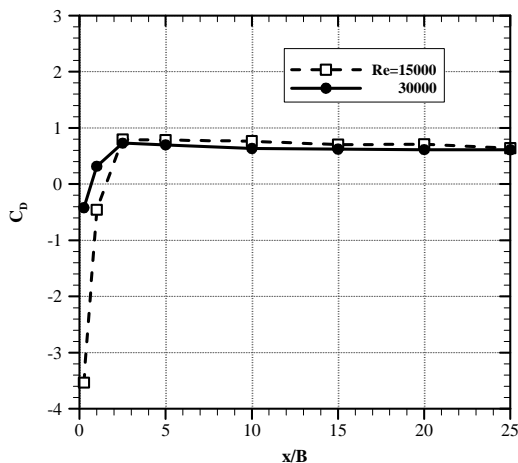
با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $u' = v' = w'$ ، می‌توان از معادله ۱۴ برای بدست آوردن ضریب پسا استفاده کرد (برای توضیحات بیشتر به مرجع [۳۴] رجوع شود):

$$C_D = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \frac{u'^2}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (14)$$

اگر بخواهیم با روش اختلاف مومنتوم، ضریب نیروی پسا را برای جریان‌هایی که اغتشاش آن‌ها زیاد و غیر همگن است، اندازه‌گیری کنیم، باید در فواصل مناسب در پایین‌دست، اندازه‌گیری‌های لازم انجام شود. در صورتی که نیاز باشد در فاصله نزدیک‌تر نیروی پسا اندازه‌گیری شود، لازم است علاوه بر اندازه‌گیری سرعت جریان هوا، تنش‌های رینولدز نیز اندازه‌گیری شوند. بنابراین شناخت تنش‌های رینولدز و مقدار آن از

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در صورتی که اغتشاش‌های جریان هوا در ناحیه پایین‌دست مدل همگن شوند، می‌توان تنها با استفاده از جریان-سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به دست آورد.

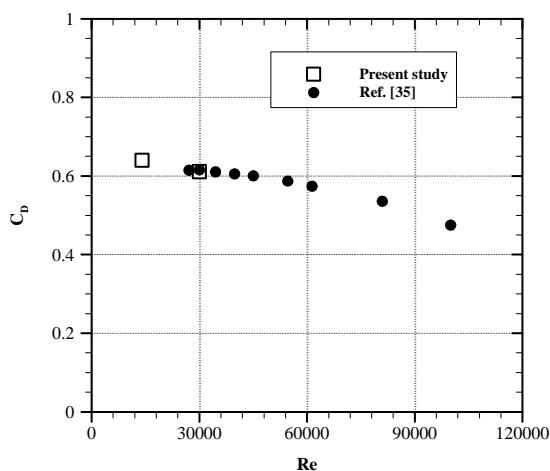
نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش عدد رینولدز ضریب پسا کاهش می‌یابد (شکل ۱۲ را ببینید).



شکل ۱۲- تغییرات ضریب پسا بر حسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری (x/B) در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰.

در تحقیق حاضر به علت صاف بودن سطوح مدل، نیروی پسای اصطکاکی بسیار ناچیز است و از طرف دیگر به علت درهم بودن رژیم جریان آزاد، بیشتر نیروی پسای وارده به استوانه، به علت گرادیان فشار ایجاد شده در جلو و عقب مدل می‌باشد.

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاضر با نتایج لیندزی [۳۵] مقایسه شده است که تطابق بسیار خوب کار حاضر با نتایج تجربی لیندزی را نشان می‌دهد (شکل ۱۳ را ببینید).



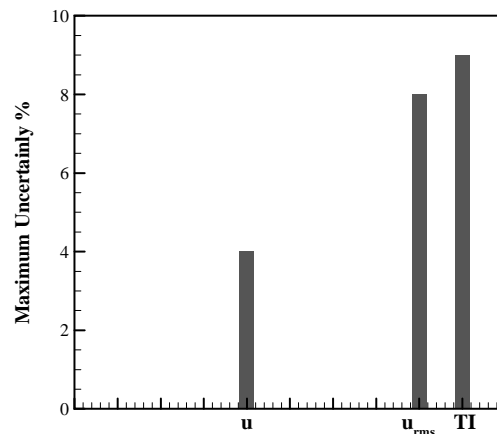
شکل ۱۳- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه بیضوی در مطالعه حاضر و مرجع [۳۵].

۷- 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 اندازه‌گیری نامیده می‌شود. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به صورت آماری است. بنابراین، نتیجه‌ی یک اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود. عدم قطعیت سرعت لحظه‌ای به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از:

- عدم قطعیت جریان‌سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و...)
- عدم قطعیت کالیبراسیون؛
- عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال؛
- عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط؛
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت.

در این تحقیق عدم قطعیت‌های مورد اشاره، مطابق با روند مطرح شده در مطالعات محققین [۳۶، ۳۷] با یکدیگر ترکیب شده تا عدم قطعیت کلی به دست آید. از آنجا که سرعت لحظه‌ای کمیتی است که مستقیماً از طریق آزمایش‌ها به دست می‌آید، عدم قطعیت سایر پارامترها را نیز می‌توان با استفاده از عدم قطعیت اندازه‌گیری مؤلفه‌های متوسط و نوسانی سرعت به دست آورد. بیشینه عدم قطعیت کمیت‌های مختلف در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۴- بیشینه عدم قطعیت کمیت‌های مختلف در مطالعه حاضر.

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله جریان اطراف یک استوانه بیضوی در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پرداخته شد. لازم به ذکر است اعداد رینولدز انتخابی در محدوده‌ی رژیم جریان زیربحرانی بودند. به منظور انجام آزمایش‌ها از تونل باد دمنده مدارباز استفاده گردید. داده برداری برای ۸ مقطع طولی پشت استوانه انجام گرفت. برای بررسی پدیده‌های ذکر شده، پروفیل‌های سرعت میانگین و

شدت اغتشاش‌ها به دست آمد و توسط آن پارامترهای ضریب پسا، نقصان سرعت، پهنای دنباله و بیشینه شدت اغتشاش‌ها محاسبه گردید. نتایج به دست آمده نشان دادند که پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها به مقدار عدد رینولدز استوانه وابسته است. در ادامه به ارائه نتایج به دست آمده دیگر از این تحقیق پرداخته شده است:

- نتایج به دست آمده نشان دادند که پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها به محل داده‌برداری بستگی دارد (منطقه نزدیک دنباله و دور از دنباله) و با افزایش فاصله از استوانه، پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها یکنواخت‌تر و عریض‌تر می‌شوند. همچنین پارامترهای نقصان سرعت و ضریب پسا با توجه به موقعیت داده برداری تغییر می‌کنند.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد به منظور دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید موقعیت داده برداری تا حد ممکن دور از استوانه انتخاب شود.
- داده‌های به دست آمده از این تحقیق حاکی از این است که با افزایش عدد رینولدز، کمینه سرعت میانگین و شدت اغتشاش‌ها در داخل دنباله به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابند که با دور شدن از مدل (منطقه دور از دنباله) تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسند.
- آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دنباله استوانه بیضوی نشان دادند که افزایش عدد رینولدز باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت میانگین می‌شود. افزایش عدد رینولدز منجر به کاهش پهنای دنباله و بیشینه شدت اغتشاش‌ها در دنباله نزدیک می‌گردد. همچنین مقدار پارامتر نقصان سرعت و ضریب پسا با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابند.

۹- فهرست علائم

نسبت محوری استوانه	AR = A/B
قطر بزرگ استوانه بیضوی (mm)	A
قطر کوچک استوانه بیضوی (mm)	B
پهنای دنباله (mm)	b _h
ضریب پسا	C _D
فرکانس گردابه کارمن (Hz)	f
طول مشخصه مدل	L
عدد رینولدز	Re
عدد استروهل	St
درصد شدت اغتشاش‌ها	% Tu
سرعت جریان آزاد (ms ⁻¹)	U _{ref}
مربع نوسانات سرعت (ms ⁻¹)	U _{r.m.s}
سرعت محلی (ms ⁻¹)	U
سرعت سیال در مرکز دنباله (ms ⁻¹)	U ₀
سرعت‌های نوسانی در جهت‌های X, Y, و Z	u', v', w'
پارامتر نقصان سرعت (ms ⁻¹)	W ₀
محورهای مختصات (اندازه‌گیری شده از لبه ابتدایی استوانه بیضوی) (mm)	x, y
علائم یونانی	
لزجت دینامیکی (kgm ⁻¹ s ⁻¹)	μ
چگالی (kgm ⁻³)	ρ

زیرنویس‌ها

مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد ∞
 مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد ref

۱-۰ مراجع

- [۲۳] بک خوشنویس عبدالامیر، نظری سجاد، ایزدی یزدی محمد جواد، "بررسی تجربی ویژگی‌های جریان در اطراف یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز"، فصلنامه علمی-پژوهشی مکانیک سیالات و آیرودینامیک، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۳۹-۵۴، پاییز و زمستان ۱۳۹۵.
- [24] S. Kocabiyik., and S. D'Alessio., "Numerical study of flow around an inclined elliptic cylinder oscillating in line with an incident uniform flow", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 23, No. 2, pp. 279-302, 2004.
- [25] M. J. Ezadi Yazdi., and A. Bak Khoshnevis., "Wake-boundary layer interaction behind an elliptic cylinder at different Reynolds numbers", *Journal of Turbulence*, pp. 1-24, 2018. <https://doi.org/10.1080/14685248.2018.1472382>.
- [26] G. Alonso., J. Meseguer., A. Sanz-Andrés., and E. Valero., "On the galloping instability of two-dimensional bodies having elliptical cross-sections", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 8, pp. 438-448, 2010.
- [27] M. R. Flynn., and A. D. Eisner., "Verification and validation studies of the time-averaged velocity field in the very near-wake of a finite elliptical cylinder", *Fluid Dynamics Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 273-288, 2004.
- [28] C. H. Williamson., "Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder", *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 10, pp. 2742-2744, 1988.
- [29] H. Tanaka., and S. Nagano., "Study of flow around a rotating circular cylinder", *Bulletin of JSME*, Vol. 16, No. 92, pp. 234-243, 1973.
- [30] H. Schlichting., "Boundary-layer theory", pp. 731-741, 1968.
- [31] C. P. Van Dam., "Recent experience with different methods of drag prediction", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
- [32] S. Goldstein., "A note on the measurement of total head and static pressure in a turbulent stream", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 155, No. 886, pp. 570-575, 1936.
- [۳۳] اردکانی محمد علی، "جریان‌سنج سیم داغ"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۳.
- [۳۴] ایزدی یزدی محمد جواد، بک خوشنویس عبدالامیر، "بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله سیلندر دایره‌ای جرخان در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف"، فصلنامه علمی-پژوهشی مکانیک سیالات و آیرودینامیک، دوره ۴، شماره ۱، صفحه ۵۱-۶۴، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [35] W. Lindsey., "Drag of cylinders of simple shapes", *Citeseer*, 1938.
- [36] S. Yavuzkurt., "A guide to uncertainty analysis of hot-wire data", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.
- [37] F. Jorgenson., "How to measure turbulence with hot wire anemometers", *Dantec Dynamics*, 2004.
- [1] M. M. Zdravkovich., "Flow around circular cylinders", Vol. 2, Applications, Oxford University Press, 2003.
- [2] K. Lam., J. Li., and R. So., "Force coefficients and Strouhal numbers of four cylinders in cross flow", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 18, No. 3, pp. 305-324, 2003.
- [3] D. Sumner., and M. Richards., "Some vortex-shedding characteristics of the staggered configuration of circular cylinders", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 3, pp. 345-350, 2003.
- [4] A. Mussa., P. Asinari., and L.-S. Luo., "Lattice Boltzmann simulations of 2D laminar flows past two tandem cylinders", *Journal of Computational Physics*, Vol. 228, No. 4, pp. 983-999, 2009.
- [5] D. William., and A. Brown., "Experiments on an elliptic cylinder in the compressed air tunnel", No. 1817, British ARC, 1937.
- [6] S. Taneda., "Visual study of unsteady separated flows around bodies", *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 17, pp. 287-348, 1976.
- [7] M. Tatsuno., "Secondary flow around an oscillating elliptic cylinder", *Kyushu University Research Institute Applied Mechanics Reports*, Vol. 27, pp. 99-110, 1979.
- [8] G. Parkinson., and T. Jandali., "A wake source model for bluff body potential flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 40, No. 03, pp. 577-594, 1970.
- [9] N. Ness., Y.-T. T. Lin., and H.-F. Wang., "Laminar separated flow over nonlifting ellipses", *AIAA Journal*, Vol. 13, pp. 688-690, 1975.
- [10] K. Shintani., A. Umemura., and A. Takano., "Low-Reynolds-number flow past an elliptic cylinder", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 136, pp. 277-289, 1983.
- [11] G. Schubauer., "Air flow in a separating laminar boundary layer", Thesis, Johns Hopkins University, 1935.
- [12] G. Schubauer., "Air flow in the boundary layer of an elliptic cylinder", DTIC Document, No. 639, 1939.
- [13] V. Modi., and E. Wiland., "Unsteady aerodynamics of stationary elliptic cylinders in subcritical flow", *AIAA Journal*, Vol. 8, No. 10, pp. 1814-1821, 1970.
- [14] V. Modi., and A. Dikshii., "Near-wakes of elliptic cylinders in subcritical flow", *AIAA Journal*, Vol. 13, No. 4, pp. 490-497, 1975.
- [15] V. Modi., and L. Jeong., "On some aspects of unsteady aerodynamics and vortex induced oscillations of elliptic cylinders at subcritical Reynolds number", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 100, No. 2, pp. 354-362, 1978.
- [16] V. Modi., and A. Dikshit., "Mean aerodynamics of stationally elliptic cylinders in subcritical flow", *Proceedings of the 3th International Conference on Wind Effects on Buildings and Structure*, Tokyo, pp.345-355, 1971.
- [17] T. Ota., S. Aiba., T. Tsuruta., and M. Kaga., "Forced convection heat transfer from on elliptic cylinder of axis ratio 1:2", *Bulletin of JSME*, Vol. 26, No. 212, pp. 262-267, 1983.
- [18] T. Ota., H. Nishiyama., and Y. Taoka., "Heat transfer and flow around an elliptic cylinder", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 10, pp. 1771-1779, 1984.
- [19] T. Ota., H. Nishiyama., and Y. Taoka., "Flow around an elliptic cylinder in the critical Reynolds number regime", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 149-155, 1987.
- [20] T. Ota., and H. Nishiyama., "Flow around two elliptic cylinders in tandem arrangement", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 108, No. 1, pp. 98-103, 1986.
- [21] T. Ota., H. Nishiyama., J. Kominami., and K. Sato., "Heat transfer from two elliptic cylinders in tandem arrangement", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 108, No. 3, pp. 525-531, 1986.
- [22] N. K. Delany., and N. E. Sorensen., "Low-speed drag of cylinders of various shapes", *NACA Tech. Note*, No. 3038, 1953.