

بررسی تجربی اندازه‌گیری نیروی پسای اجسام پهن با استفاده از روش اختلاف مومنتوم

محمد جواد ایزدی یزدی^{۱*}، عبدالامیر بک خوشنویس^۲

۱- مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ورامین-پیشوا، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

دریافت: زمستان ۹۶ پذیرش: بهار ۹۷

چکیده

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسای اجسام پهن با استفاده از توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال در پایین‌دست مدل، می‌توان نیروی پسای اجسام پهن را اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق تجربی، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست مدل (استوانه بیضوی و دایره‌ای)، بررسی شده و حداقل فاصله‌ای که در آن اغتشاش‌های جریان را بتوان با دقت قابل قبولی همگن در نظر گرفت، معین شده است. شدت اغتشاش‌های جریان پایین‌دست استوانه بیضوی و دایره‌ای با افزایش فاصله (x/B) کاهش می‌یابند. به طوری که حداکثر شدت اغتشاش‌ها در فاصله ۲۰ برابر قطر پایین‌دست استوانه دایره‌ای، با توجه به عدد رینولدز، به حدود ۱۴٪ کاهش یافته و خطا در حدود ۲٪ می‌باشد و برای استوانه بیضوی، به حدود ۱۰٪ کاهش یافته و خطا در حدود ۲٪ می‌باشد. در فاصله ۲۵ برابر قطر پایین‌دست استوانه دایره‌ای و بیضوی، حداکثر شدت اغتشاش‌ها به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۸٪ کاهش یافته و خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای حدود ۱٪ می‌باشد. در این تحقیق، توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست استوانه در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ بررسی شده است.

*عهده‌دار مکاتبات: javadezadi2014@gmail.com

کلیدواژه‌گان: توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسای اجسام پهن، تنش‌های رینولدز، جریان‌سنج سیم داغ.

Experimental Investigation of Bluff Bodies Drag Measurement Using the Wake Survey Method

Mohammad Javad Ezadi Yazdi^{1*}, Amir Bak Khoshnevis²

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Varamin-Pishva Branch, Tehran, Iran

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

Abstract

One of the methods for measuring the drag force is the momentum difference (or wake survey) method. In this method, using velocity and turbulence intensity distributions at the model downstream, drag coefficient is determined. In this experimental investigation, turbulence intensity downstream of a model (circular and elliptical cylinders) has been studied and minimum distance in which the flow turbulence can be considered with acceptable uniformity (homogeneity), has been determined. Turbulence intensities at the downstream of the elliptical and circular cylinders decrease with increase in x/B ratio. At x/B = 20, depending on Re number, the maximum turbulence intensity is about 14% and the error is about 2% and for elliptical cylinder is reduced to 10% and the error is about 2%. At x/B = 25, the maximum turbulence intensity is reduced to about 12% and 8%, respectively and the error is about 1%. In this study, a hot wire anemometer has been used to investigate velocity distribution and air flow turbulence intensity at the downstream of the cylinder at Reynolds numbers of 15000 and 30000.

Keywords : Velocity Profile, Turbulence Intensity, Drag Coefficient, Reynolds Stress, Hot-Wire Anemometer.

۱- مقدمه
یکی از مشخصه‌های کمی جریان هوا بر روی اجسام، نیروها و گشتاورهای اعمالی از طرف جریان هوا بر روی جسم است. به‌طورکلی، نیروهای اعمالی از طرف جریان هوا به مدل، به سه دسته روش اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند که عبارت‌اند از: ۱- اندازه‌گیری مومنتوم در ناحیه دنباله جسم، ۲- اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل، ۳- اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورها با استفاده از بالانس‌ها. هرکدام از روش‌های

۲- مقدمه
یکی از مشخصه‌های کمی جریان هوا بر روی اجسام، نیروها و گشتاورهای اعمالی از طرف جریان هوا بر روی جسم است. به‌طورکلی، نیروهای اعمالی از طرف جریان هوا به مدل، به سه دسته روش اندازه‌گیری و بررسی می‌شوند که عبارت‌اند از: ۱- اندازه‌گیری مومنتوم در ناحیه دنباله جسم، ۲- اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل، ۳- اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورها با استفاده از بالانس‌ها. هرکدام از روش‌های

است، گلدشتاین^۲ [۴] فشار استاتیکی ناحیه دنباله را مطابق معادله ۴، به صورت شدت اغتشاش‌های سه‌بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله ۵ ارائه نمود.

$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (۴)$$

$$C_d = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left(\frac{\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2}}{U_\infty^2}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (۵)$$

v', w' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله ۵ به معادله‌ی اصلاح شده ون دام مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $u' = v' = w'$ ، معادله ۵ ساده شده و می‌توان با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به دست آورد. لو^۳ و برگ^۴ [۵]، با استفاده از روش اختلاف مومنتوم، ضریب پسی استوانه که ناحیه دنباله آن بسیار مغشوش و سه‌بعدی است را با استفاده از معادله اصلاح شده ون دام بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از لوله پیتوت و جریان‌سنج سیم داغ، فشار دینامیکی و مؤلفه‌های نوسانی سرعت جریان را اندازه‌گیری کرده و نیروی پسی استوانه را به دست آوردند. در فاصله‌های نزدیک به استوانه سهم عبارت تنش رینولدز بالا بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست این مقدار کاهش یافته است.

اردکانی^۵ و ایروانی^۶ [۶]، به بررسی تجربی جریان هوا در پایین‌دست سیم‌های چند رشته‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اختلاف مومنتوم ضریب نیروی پسا برای سیم‌های چند رشته‌ای و مقتول را اندازه‌گیری و مقایسه کردند. نشان دادند که در عدد رینولدز ۲۰۰۰، ضریب نیروی پسی سیم چند رشته‌ای ۱۶٪ از مقتول بزرگ‌تر است که این مقدار با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. همچنین اردکانی و همکاران [۷] به بررسی ضریب پسا در سیم‌های چند رشته‌ای در بازه عدد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ به روش اختلاف مومنتوم پرداختند.

اخیرا ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۸، ۹] 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 با افزایش G/B ضریب پسا در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ نسبت به ۱۵۰۰۰ کاهش می‌یابد.

همچنین در پژوهشی دیگر خوشنویس و همکاران [۱۰، ۱۱] به بررسی تجربی کاهش ضریب پسی سیال روی یک استوانه بیضوی با و بدون نصب سیم اغتشاش ساز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بهترین حالت ممکن، در زاویه نصب ۲۳/۷ درجه، ضریب پسا به میزان ۵۶/۵٪ کاهش می‌یابد.

آنتونیا^۷ و راجاگوپالان^۸ [۱۲]، ضریب نیروی پسی استوانه را در عدد رینولدز ۵۶۰۰۰ و تا فاصله ۶۰ برابر قطر در پایین‌دست آن، با استفاده از

فوق دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشند و در موارد مختلفی می‌توانند به کار روند. در روش اندازه‌گیری مومنتوم، با اندازه‌گیری جریان هوا پایین‌دست مدل، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. مزیت استفاده از روش اندازه‌گیری مومنتوم، این است که در این روش، می‌توان به بررسی کمی و کیفی جریان هوا در ناحیه دنباله پشت مدل، نظیر توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها و ... پرداخت که در دو روش دیگر این امکان وجود ندارد [۱، ۲]. همچنین استفاده از روش‌های بالانس و اندازه‌گیری توزیع فشار، برای برخی از مدل‌ها و به‌خصوص مدل‌های با ابعاد کوچک، مشکل می‌باشد.

در رابطه با روش اختلاف مومنتوم، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون دام^۱ [۳]، با اعمال معادلات پیوستگی و بقاء مومنتوم خطی به حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مطابق معادله زیر ارائه کرد:

$$C_d = \int \left[\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \frac{1}{q_\infty} \int \tau_{xx} \cdot d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (۱)$$

$p_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله یا بالادست مدل، $p_{s,w}$ فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل، U سرعت محلی، U_∞ سرعت جریان آزاد، τ_{xx} تنش برشی و L نیز طول مشخصه مدل می‌باشد که برای استوانه مورد بررسی ارتفاع سطح مقطع استوانه در نظر گرفته می‌شود. مقدار τ_{xx} را می‌توان به صورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله زیر بیان نمود:

$$\tau_{xx} = \mu \left(2 \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) - \rho \overline{u'^2} - 2 \overline{U \rho u'} - \overline{\rho' u'} - \overline{\rho' u'^2} \quad (۲)$$

که در آن ρ' نوسانات چگالی و u' نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد می‌باشد. مقدار مؤلفه تنش لزجی در معادله ۲ در جریان‌های با اعداد رینولدز بالا، بسیار کمتر از مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز خواهد بود. همچنین برای جریان‌های تراکم ناپذیر، نوسانات چگالی را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. از این رو معادله ۱ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

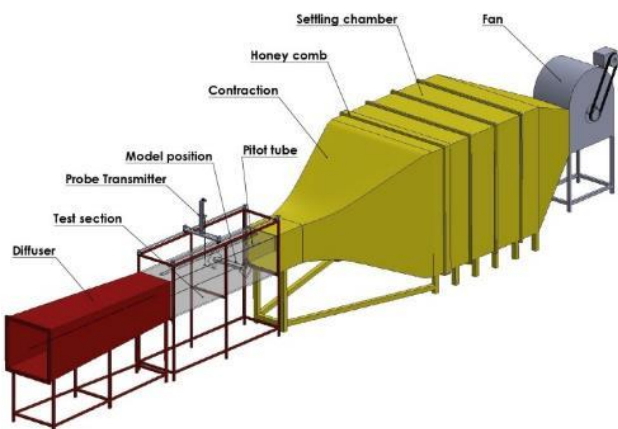
$$C_d = \int \left[\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty}\right) d\left(\frac{y}{L}\right) - \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (۳)$$

معادله ۳ به معادله ون دام مشهور است. این معادله را در هر نقطه‌ای در پایین‌دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمود، کاربرد دارد. با توجه به معادله ۳، می‌توان آن را به سه انتگرال تقسیم نمود که انتگرال اول آن، عبارت اختلاف فشار، انتگرال دوم عبارت اختلاف مومنتوم و انتگرال سوم عبارت تنش‌های رینولدز می‌باشد. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دنباله جسم دشوار

² Goldstein
³ Lu
⁴ Bragg
⁵ Ardakani
⁶ Iravani
⁷ Antonia
⁸ Rajagopalan

¹ Van Dam

تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم 0.1 میلی‌متر در سه جهت می‌باشد. حرکت این مکانیزم 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 بیضوی مورد استفاده در این آزمایش، از جنس آلومینیوم با آلیاژ ۷۰۲۳ به قطر بزرگ $42/4$ میلی‌متر و ارتفاع سطح مقطع $21/2$ میلی‌متر و طول 390 میلی‌متر بوده و آزمایش‌ها در اعداد رینولدز 15000 و 30000 (بر اساس ارتفاع سطح مقطع استوانه $Re = U_{\infty} B / \nu$) انجام شده است. جدول ۱ مشخصات استوانه‌های مورد استفاده و سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. همچنین ضریب نیروی پسای استوانه‌های فوق، طبق منحنی‌های ارائه شده توسط لیندزی^۱ [۱۷] (برای استوانه بیضوی) و شلیختینگ^۲ [۱۸] (برای استوانه دایره‌ای) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴، در جدول ارائه شده است. توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست استوانه و در فاصله‌های بی بعد شده 25 ، 10 ، 15 ، 20 ، 5 ، $2/5$ ، 1 ، $x/B=0/25$ ، اندازه‌گیری شده است.



شکل ۱ تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- اتاق آرامش ۶- نازل ۷- اتاق آزمون ۸- استوانه دایره‌ای.

جریان سنج سیم داغ با پراب دوبعدی اندازه‌گیری نمودند. در فاصله $x/D=5$ عبارت تنش‌های رینولدز تقریباً سهمی حدود 22% از کل ضریب پسا را دارد و این مقدار با افزایش فاصله از استوانه کاهش می‌یابد، به طوری که در $x/D=20$ این عبارت تنها حدود 5% از مقدار کل ضریب پسا را به خود اختصاص داده است.

با توجه به بحث‌ها و تحقیقات انجام گرفته، در صورتی که بخواهیم با استفاده از روش اختلاف مومنتوم، ضریب نیروی پسا را برای جریان‌هایی که اغتشاش آن‌ها زیاد و غیرهمگن است، اندازه‌گیری نماییم، باید در فواصل مناسب در پایین دست، 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 پایین دست مدل همگن شوند، می‌توان تنها با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی [۱۳]، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود.

در این مقاله جریان پایین دست مدل در اعداد رینولدز 15000 و 30000 برای دو استوانه بیضوی و دایره‌ای با ارتفاع سطح مقطع یکسان بررسی شده و با استفاده از نتایج آن می‌توان تشخیص داد در چه فاصله‌ای مجاز خواهیم بود که با استفاده از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. همچنین در این مقاله توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در پایین دست استوانه (بیضوی و دایره‌ای) در اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری و ارائه شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

کلیه آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد مدارباز در دانشگاه حکیم سبزواری انجام پذیرفته است. شکل ۱ تونل باد فوق را نشان می‌دهد که از نوع مدارباز و دمشی می‌باشد. این تونل باد دارای مقطع اتاق آزمون به ابعاد 40×40 سانتی‌متر مربع و طول 168 سانتی‌متر است. این تونل برای مطالعه جریان‌های دوبعدی حول یک استوانه دایره‌ای استفاده شده است و نتایج آن در مراجع [۱۶-۱۴] ارائه شده است. کنترل سرعت جریان هوا با استفاده از کنترل دور فن در بازه 4 متر بر ثانیه الی 28 متر بر ثانیه قابل تنظیم می‌باشد. به منظور به دست آوردن جریان مناسب، در اتاق آرامش این تونل باد، تعداد 4 عدد توری قرار گرفته که دو عدد آن قبل از لانه زنبوری و دو عدد آن بعد از لانه زنبوری قرار دارد. شکل ۲، تغییرات سرعت بی بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن را در محل استقرار استوانه نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، تغییرات سرعت و یا به عبارت دیگر گرادیان فشار در این منطقه ناچیز می‌باشد. به منظور اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌ها در پایین دست استوانه، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ساخت شرکت فرانسجس صبا استفاده شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک‌بعدی بوده و سنسور آن از جنس تنگستن 5 میکرونی است. دستگاه جریان‌سنج سیم به همراه پراب، دارای فرکانس قطع 5 کیلوهرتز می‌باشد. داده‌های اندازه‌گیری شده توسط جریان‌سنج سیم داغ از طریق کارت A/D (آنالوگ به دیجیتال) به رایانه ارسال و توسط نرم‌افزار Flow ware

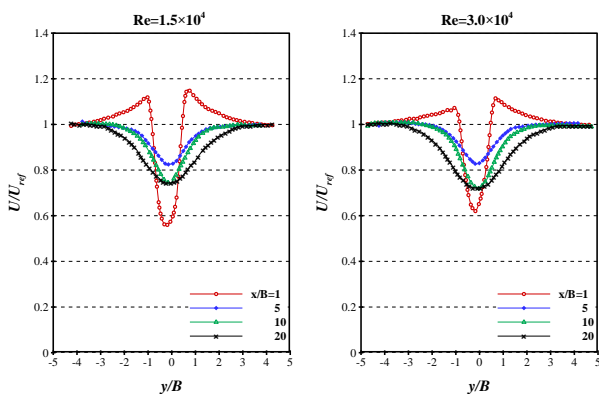
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۱/۲۱
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۱/۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۰/۶۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۰/۶۱

۳- نتایج و بحث

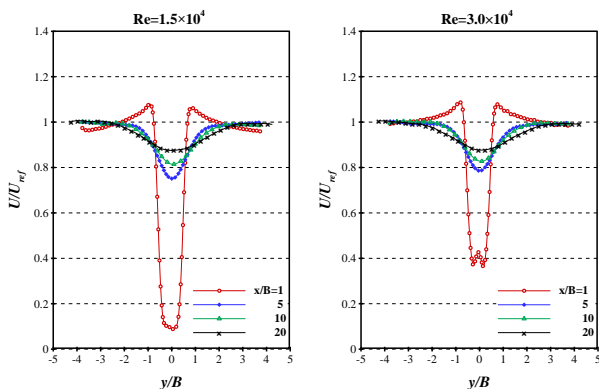
همان گونه که بیان شد، آزمایش‌ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انجام شده است. ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ برای استوانه دایره‌ای ۱/۲۱ و استوانه بیضوی ۰/۶۲ بوده و برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۶۱ می‌باشد.

۳-۱- بررسی پروفیل سرعت متوسط

همان طور که در مقدمه بیان شد، به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا استوانه و یا هر جسم دیگر، نیاز است که عبارت‌های اختلاف فشار، اختلاف مومنتوم و تنش‌های رینولدز اندازه‌گیری شوند که مجموع این سه عبارت برابر ضریب نیروی پسا استوانه و یا جسم مورد نظر می‌باشد. برای اندازه‌گیری عبارت اختلاف مومنتوم، نیاز است که سرعت در ناحیه دنباله جسم (استوانه) اندازه‌گیری شود.

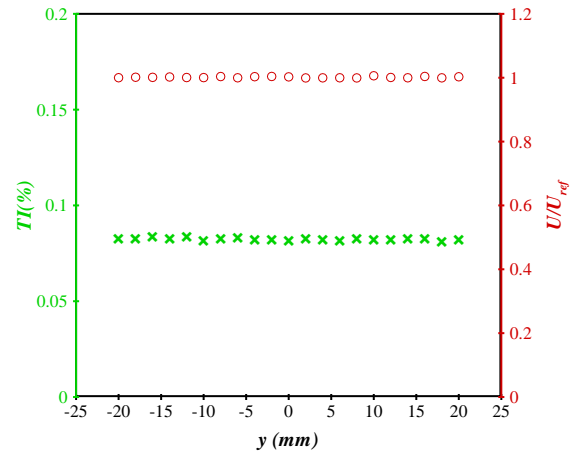


شکل ۵ پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه دایره‌ای.

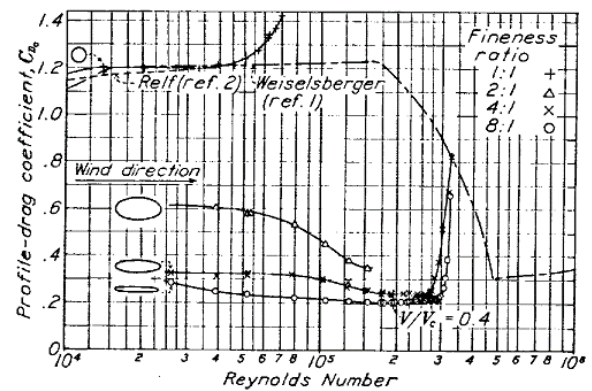


شکل ۶ پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه بیضوی.

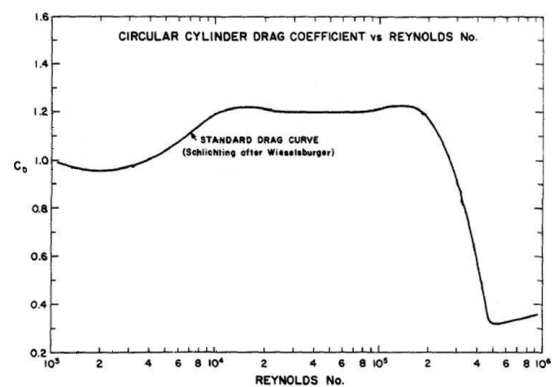
شکل‌های ۵ و ۶، سرعت‌های بی‌بعد شده در پایین‌دست استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی در فواصل بی‌بعد x/B برای اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و



شکل ۲ تغییرات سرعت بی‌بعد شده جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن در امتداد اتاق آزمون، در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه.



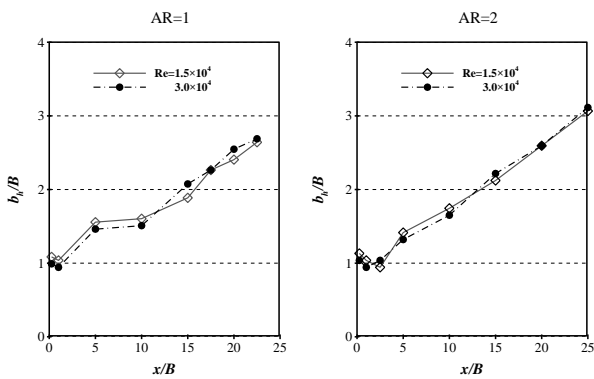
شکل ۳ تغییرات ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه‌های بیضوی [۱۷].



شکل ۴ تغییرات ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه دایره‌ای [۱۸].

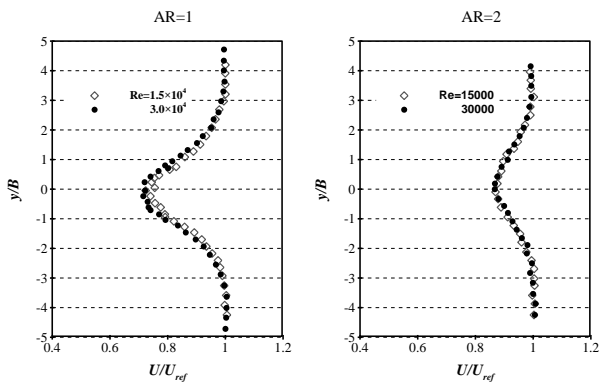
جدول ۱ مشخصات استوانه‌های مورد آزمایش و سرعت جریان هوا

AR	A (major axis)	B (minor axis)	سرعت جریان هوا (m/s)	عدد رینولدز	ضریب نیروی پسا مطابق منحنی‌های ارائه شده



شکل ۸ توزیع پهنای بی بعد شده ناحیه دنباله استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

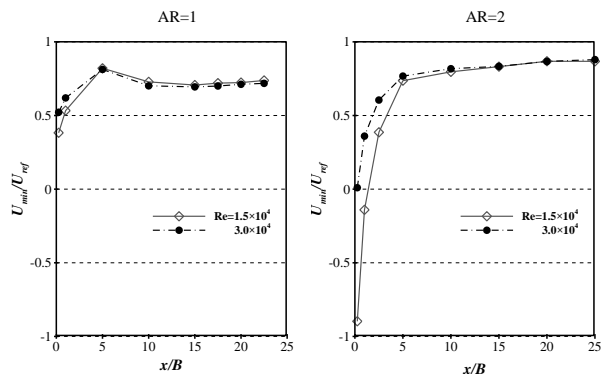
شکل ۹، توزیع سرعت در فاصله $x/B=20$ ، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، در استوانه دایره‌ای نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار بزرگتر و پهنای ناحیه دنباله در همان عدد رینولدز، بیشتر است. در نتیجه ضریب نیروی پسا برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار کمتری خواهد بود. این موضوع با توجه به شکل ۴ توجه-پذیر است؛ اما در استوانه بیضوی نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای هر دو عدد رینولدز تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۹ پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد شده در فاصله ۲۰ برابر قطر استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

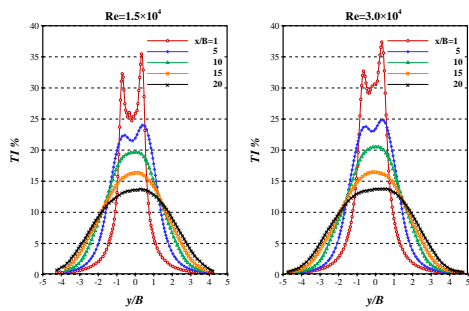
با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان عبارت اختلاف مومنتوم در معادلات ۱ و ۵ را به دست آورد. توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم در پایین دست استوانه بر حسب x/B برای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، مقدار ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم در فاصله‌های نزدیک به استوانه یا کمتر از $x/B=5$ ناچیز بوده و حدود سهمی کمتر از ۵٪ ضریب نیروی پسا را به خود اختصاص می‌دهد.

۳۰۰۰۰ بر حسب فاصله بی بعد شده قائم بر ناحیه دنباله y/B را نشان می‌دهند. در فاصله $x/B=1$ جریان علاوه بر نقصان سرعت، دارای سرعت اضافی (سرعت بیشتر از سرعت جریان آزاد) می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست نقصان سرعت کاهش یافته و پدیده سرعت اضافی نیز از بین می‌رود ولی پهنای ناحیه دنباله افزایش می‌یابد. در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مشابه حالت قبل، در نزدیکی استوانه ($x/B=1$) سرعت اضافی با شدت کمتری مشاهده می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت در پایین دست استوانه، بیشترین نقصان سرعت و یا کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین دست استوانه بررسی می‌شود. شکل ۷، تغییرات کمترین سرعت بی بعد شده در پایین دست استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی برای اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۷، نقصان سرعت در نزدیکی استوانه زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین دست این مقدار کاهش می‌یابد. در استوانه دایره‌ای هنگامی که $x/B > 10$ می‌شود کمترین سرعت در ناحیه دنباله به مقدار حدود ۰/۷۲ سرعت جریان آزاد و در استوانه بیضوی به مقدار حدود ۰/۸ سرعت جریان آزاد می‌رسد. با افزایش فاصله پایین دست مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است در فواصل کمتر از $x/B < 5$ پروفیل سرعت، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) می‌باشد.

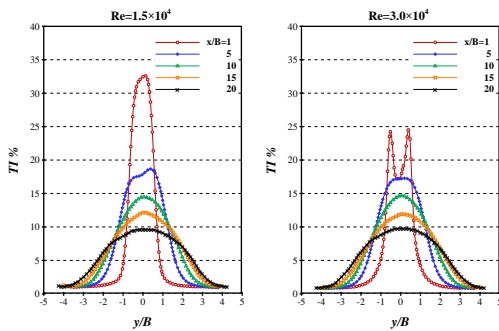


شکل ۷ تغییرات کمترین سرعت بی بعد شده در پایین دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

پهنای ناحیه دنباله نیز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری عبارت اختلاف مومنتوم دارد. شکل ۸، توزیع پهنای ناحیه دنباله پایین دست استوانه را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، پهنای ناحیه دنباله، با افزایش فاصله در پایین دست استوانه، افزایش می‌یابد. پهنای ناحیه دنباله تا $x/B=15$ ، با شیب نسبتاً زیادی افزایش یافته و پس از آن روند افزایش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین پهنای ناحیه دنباله با افزایش عدد رینولدز، افزایش یافته است.

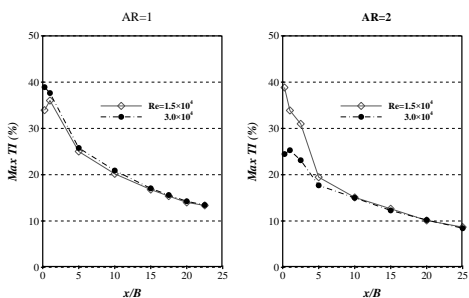


شکل ۱۱ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه دایره‌ای.



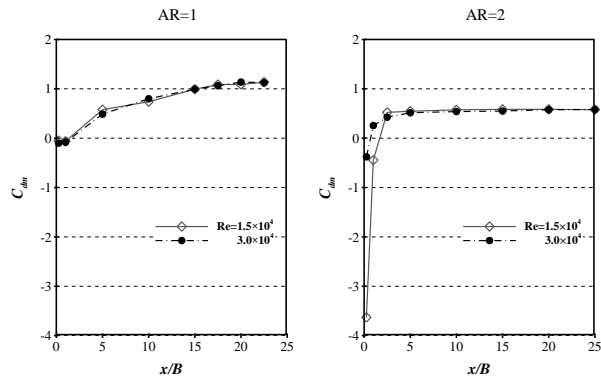
شکل ۱۲ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه بیضوی.

شدت اغتشاش‌ها^۱ طبق رابطه $Tu = \sqrt{u'^2} / U_{ref}$ بیان می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی استوانه زیاد بوده و برای استوانه دایره‌ای تا حدود ۳۹٪ افزایش می‌یابد. اما در استوانه بیضوی شدت اغتشاش‌ها با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد به طوری که در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۳٪ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۲۵٪ می‌باشد. در فواصل بسیار نزدیک به استوانه $x/B=1$ ، شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله بیشینه نبوده ولی با افزایش پایین‌دست، $x/B > 10$ بیشینه مقدار شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله اتفاق افتاده و از شدت آنها کاسته می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات شدت اغتشاش‌ها در پایین‌دست استوانه، در شکل ۱۳، توزیع حداکثر شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳ توزیع حداکثر اغتشاش جریان هوا در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

مطابق شکل ۱۳، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی استوانه بالا بوده و برای استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۴٪ و رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۳۹٪ است و با افزایش فاصله در پایین‌دست تا $x/B=20$



شکل ۱۰ توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتوم بر حسب فاصله در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

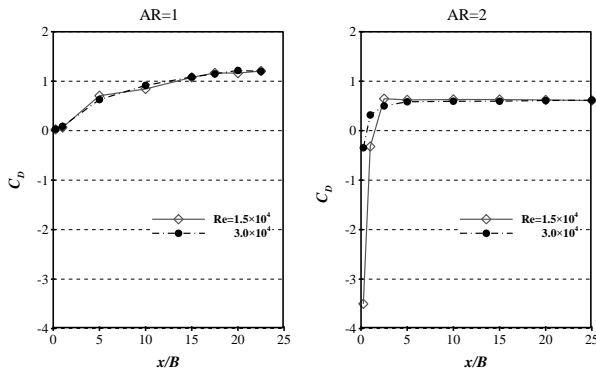
با افزایش فاصله در پایین‌دست، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از مومنتوم افزایش یافته و در فاصله $x/B=10$ ، این عبارت برای استوانه دایره‌ای معادل ۸۷٪ ضریب نیروی پسا و برای استوانه بیضوی معادل ۹۱٪ می‌باشد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین‌دست استوانه، شیب افزایش ضریب نیروی پسا ناشی از مومنتوم، کاهش یافته ولی همچنان روند آن صعودی می‌باشد. به طوری که در فاصله ۲۰ برابر قطر استوانه، این مقدار برای استوانه دایره‌ای به حدود ۹۳٪ و برای استوانه بیضوی به حدود ۹۴٪ ضریب پسا می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ضریب نیروی پسا ناشی از مومنتوم وابسته به عدد رینولدز بوده به طوری که در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و در $x/B=20$ ، برای استوانه دایره‌ای برابر ۱/۱۳۷ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ برابر ۱/۱۳۷ می‌باشد و برای استوانه بیضوی در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و در $x/B=20$ ، برابر ۰/۵۷۶ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ برابر ۰/۵۸۴ می‌باشد که این موضوع بیان کننده تغییرات ضریب نیروی پسا با عدد رینولدز بوده و با مقادیر ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱ هم‌خوانی دارد. عبارت مهم دیگر برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، عبارت تنش‌های رینولدز می‌باشد.

۳-۲- بررسی پروفیل شدت اغتشاش‌ها

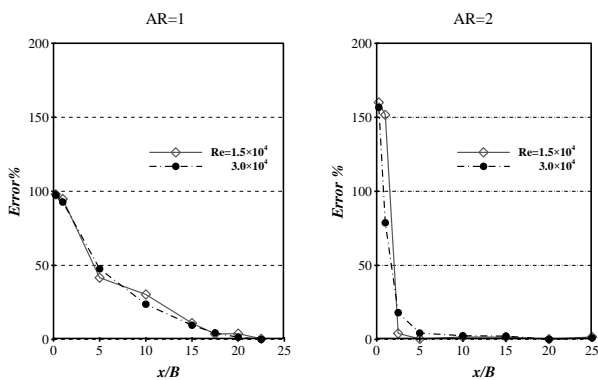
طبق معادله ۳، عبارت تنش‌های رینولدز اثر کاهنده روی ضریب نیروی پسا دارند. در صورتی که طبق معادله ون دام اصلاح شده یا معادله ۵، بخواهیم عبارت اختلاف فشار در ناحیه دنباله را بر حسب شدت اغتشاش‌ها بیان کنیم، مجبور به اندازه‌گیری سه بعدی شدت اغتشاش‌ها خواهیم بود و در این حالت اثر آن مطابق معادله ۵، مثبت خواهد بود. در این حالت حتماً باید از جریان سنج سیم داغ با پراب سه بعدی استفاده شود که مشکلات زیادی به همراه دارد. در صورتی که در ناحیه پایین‌دست استوانه شدت اغتشاش‌های جریان هوا همگن شوند، می‌توان با استفاده از پراب یک بعدی، اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری نموده و عبارت‌های اختلاف فشار و تنش‌های رینولدز را مطابق فرضیه گلدشتاین یا معادله ۴ مشخص نمود. بدین منظور توزیع شدت اغتشاش‌های جریان در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای استوانه دایره‌ای در شکل ۱۱ و برای استوانه بیضوی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

^۱ Turbulence Intensity

جریان هوا همگن نبوده و نمی‌توان در این نواحی از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی استفاده کرد. با افزایش فاصله در پایین دست، خطای اندازه‌گیری کاهش یافته بطوری که در فاصله $x/B=20$ مقدار خطا حدود $1/5\%$ تا 4% برای استوانه دایره‌ای و حدود 2% برای استوانه بیضوی می‌باشد. در این حالت می‌توان شدت اغتشاش‌های جریان هوا را تقریباً همگن فرض کرد.



شکل ۱۵ توزیع ضریب نیروی پسی استوانه در فواصل مختلف پایین دست برای اعداد رینولدز مختلف.

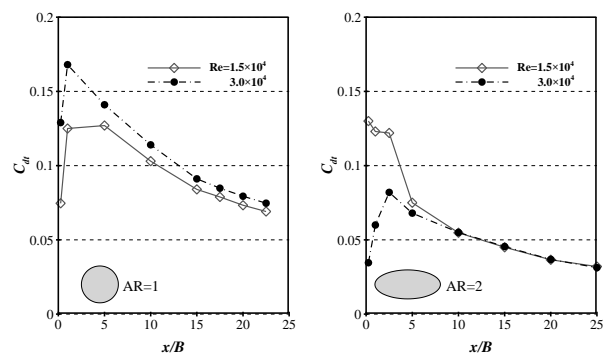


شکل ۱۶ خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسی استوانه در اعداد رینولدز مختلف. با توجه به شکل ۱۶، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که شدت اغتشاش‌ها حدود 10% یا کمتر از آن باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر از 10% خواهد بود. همان‌گونه که بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسی، باید سه عبارت اختلاف مومنتوم، اختلاف فشار و تنش‌های رینولدز را اندازه‌گیری نمود. با استفاده از فرضیه گلدشتاین، می‌توان عبارت اختلاف فشار را به صورت شدت اغتشاش‌ها تبدیل کرده و مطابق معادله ۵ با اندازه‌گیری سه بعدی شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسی را اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری سه بعدی شدت اغتشاش‌ها امری دشوار می‌باشد، لذا در صورتی که بخواهیم تنها با استفاده از پراب یک بعدی شدت اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم، داده‌برداری باید در فاصله کافی پایین دست مدل انجام شود، یعنی در مکانی که شدت اغتشاش‌ها تقریباً همگن می‌شوند.

به منظور اعتبارسنجی، نتایج مطالعه حاضر با نتایج لیندزی [۱۷] مقایسه شده است که تطابق بسیار خوب کار حاضر با نتایج تجربی لیندزی را نشان می‌دهد (شکل ۱۷ را ببینید).

شدت اغتشاش‌ها با شیب نسبتاً زیادی کاهش یافته و به حدود 14% می‌رسد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست، این شیب کاهش یافته و در $x/B=25$ به حدود 10% کاهش می‌یابد. در استوانه بیضوی در عدد رینولدز 15000 حداکثر شدت اغتشاش‌ها حدود 39% و در عدد رینولدز 30000 حدود 25% می‌باشد و با افزایش فاصله در پایین دست تا $x/B=20$ شدت اغتشاش‌ها با شیب نسبت زیادی کاهش یافته و به حدود 10% می‌رسد و در $x/B=25$ به حدود 8% کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴، توزیع ضریب نیروی پسی ناشی از تنش‌های رینولدز برای اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب نیروی پسی ناشی از تنش‌های رینولدز در فواصل نزدیک به استوانه زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین دست x/B کاهش می‌یابد. تا $x/B=15$ این کاهش شدید بوده و پس از آن روند کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب نیروی پسی ناشی از تنش‌های رینولدز در استوانه دایره‌ای افزایش می‌یابد اما در استوانه بیضوی کاهش می‌یابد. به طوری که مقدار آن در $x/B=5$ برای استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز 30000 برابر $0/141$ و در فاصله $x/B=20$ حدود $0/0794$ خواهد بود و در استوانه بیضوی مقدار آن در $x/B=5$ برابر $0/068$ و در فاصله $x/B=20$ حدود $0/0368$ می‌باشد.



شکل ۱۴ توزیع ضریب نیروی پسی ناشی از تنش‌های رینولدز در پایین دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

۳-۳- بررسی ضریب پسی

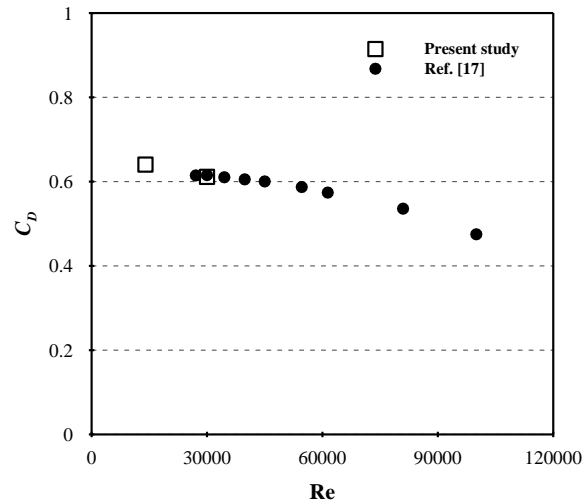
در این بخش به بررسی ضریب پسی در استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی در اعداد رینولدز 15000 و 30000 پرداخته شده است. در فواصل نزدیک به مدل، اغتشاش‌های جریان هوا همگن نمی‌باشد. در صورتی که اغتشاش‌های جریان در پایین دست استوانه همگن فرض شوند، می‌توان از معادله ون دام اصلاح شده برای مشخص نمودن ضریب نیروی پسی استفاده کرد. شکل ۱۵ نتایج حاصل از معادله ۵ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۵ در فواصل نزدیک به استوانه، ضریب نیروی پسی بسیار کوچک‌تر از مقدار واقعی است و با افزایش فاصله در پایین دست به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. شکل ۱۶، خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسی در پایین دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف بر حسب مکان اندازه‌گیری بی بعد شده x/B را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶، در صورتی که اندازه‌گیری‌های اختلاف مومنتوم و تنش‌های رینولدز در فاصله $x/B=1$ انجام شود، خطایی حدود 92% برای استوانه دایره‌ای و حدود 80% برای استوانه بیضوی خواهیم داشت. این موضوع نشان دهنده آن است که اغتشاش‌های

نامطلوبی بر دقت جریان سنج سیم داغ داشته به طوری که خطا برای تغییر ۱ درجه سلسیوس دمای محیط حدود ۲٪ ایجاد می‌شود که اصلاح نمودن، آن را می‌تواند به ۰/۱ درصد کاهش دهد [۱۹، ۲۰]. با توجه به توضیح‌های ارائه شده می‌توان خطای کلی اندازه‌گیری را حدود ۳٪ در نظر گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، اندازه‌گیری به روش اختلاف مومنتوم می‌باشد. در این روش با اندازه‌گیری توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال پایین دست مدل می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. در این مقاله جریان هوا پایین دست استوانه با سطح مقطع بیضوی و دایره‌ای، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ به صورت تجربی و با استفاده از جریان سنج سیم داغ بررسی شده و نتایج زیر حاصل شد:

- به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا با استفاده از روش اختلاف مومنتوم نیاز است که عبارت‌های توزیع سرعت، توزیع شدت اغتشاش‌های جریان هوا و توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله، پایین دست استوانه اندازه‌گیری شوند. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می‌توان فشار استاتیکی و سرعت جریان هوا را تماماً اندازه‌گیری نمود، در صورتیکه با استفاده از جریان سنج سیم داغ می‌توان توزیع سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌های آن را به سادگی اندازه‌گیری نمود، ولی اندازه‌گیری توزیع فشار استاتیکی در ناحیه دنباله با این روش امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا برای حل این مشکل، می‌توان با استفاده از فرضیه گلدشتاین، توزیع فشار استاتیکی را با شدت اغتشاش‌های جریان هوا معادل‌سازی نموده و با استفاده از پراب سه‌بعدی، مؤلفه‌های اغتشاشی جریان هوا را اندازه‌گیری نمود.
- با بررسی توزیع سرعت در پایین دست استوانه مشخص شد که در نواحی نزدیک به استوانه، جریان هوا علاوه بر نقصان سرعت در دنباله، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) نیز می‌باشد. با افزایش فاصله بی‌بعد شده در پایین دست استوانه، نقصان سرعت در دنباله کاهش یافته و در استوانه دایره‌ای هنگامی که $x/B > 10$ می‌شود کم‌ترین سرعت در ناحیه دنباله به مقدار حدود ۰/۷۲ سرعت جریان آزاد و در استوانه بیضوی به مقدار حدود ۰/۸ سرعت جریان آزاد می‌رسد. با افزایش فاصله پایین دست مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. پهنای ناحیه دنباله با افزایش فاصله بی‌بعد x/B در پایین دست استوانه و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. افزایش پهنای ناحیه دنباله تا فاصله $x/B=15$ با شیب نسبتاً زیادی همراه است و پس از آن روند افزایش با شیب کمتری ادامه می‌یابد.
- ضریب نیروی پسا ناشی از عبارت اختلاف مومنتوم (در نظر نگرفتن فشار و تنش‌های رینولدز)، با افزایش فاصله بی‌بعد x/B در پایین دست استوانه، افزایش می‌یابد. در فاصله حدود $x/B=5$ ، ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتوم حدود



شکل ۱۷ تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه بیضوی در مطالعه حاضر و مرجع [۱۷].

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

- عدم قطعیت جریان سنج (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،

اندازه‌گیری با دستگاه جریان سنج سیم داغ مانند دستگاه‌های دیگر دارای خطا می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای جریان سنج سیم داغ را می‌توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک پذیری کارت A/D و تغییرات دما دانست. کالیبراسیون جریان سنج سیم داغ با استفاده از تونل باد و لوله پیتوت در جریان با شدت اغتشاش ۰/۱٪ انجام شده است. خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت کمتر از ۰/۳٪ می‌باشد. پس از کالیبره نمودن جریان سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چند جمله‌ای درجه ۵ برازش نموده که خطای آن نیز کمتر از ۰/۵٪ خواهد بود. کارت A/D مورد استفاده ۱۲ بیتی بوده و بازه آن بین $+10$ و -10 ولت است و در صورتی که تطبیق دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کمتر از ۰/۰۵٪ می‌باشد. تغییرات دما تأثیر

علائم یونانی

 μ لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$) ρ چگالی (kgm^{-3})

زیر نویسها

 ∞ مقدار کمیتها در جریان آزاد

ref مقدار کمیتها در جریان آزاد

۷- مراجع

- [1] W. H. Rae, A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*: John Wiley, 1984.
- [2] M. A. Ardakani, *Low-speed wind tunnel (design principles and application)*, Tehran: Khajeh Nasir Toosi University, 2008. (in Persian فارسی)
- [3] C. P. Van Dam, Recent experience with different methods of drag prediction, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
- [4] 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.
- [5] B. Lu, M. B. Bragg, Experimental Investigation of the Wake-Survey Method for a Bluff Body with Highly Turbulent Wake, *AIAA-3060*, 2002.
- [6] M. A. Ardakani, E. Irvani, Experimental investigation of airflow at downstream of multi strand cables, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 54-63, 2013. (In Persian فارسی)
- [7] M. Ardekani, F. Farhani, A. Nourmohammadi, Experimental study of drag coefficient of multi-strand wires using single normal hot-wire anemometer probe, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 50, pp. 237-244, 2016.
- [8] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Wake-boundary layer interaction behind an elliptic cylinder at different Reynolds numbers, *Journal of Turbulence*, pp. 1-24, 2018.
- [9] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Experimental Investigation of Flow Characteristics around an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 4, No. 2, pp. 19-35, 2016. (In Persian فارسی)
- [10] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Experimental Investigation of Characteristics of the Flow Wake Around an Elliptic Cylinder at Different Reynolds Numbers, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 47, No. 4, pp. 55-64, 2018. (In Persian فارسی)
- [11] A. Bak Khoshnevis, S. Nazari, M. J. Ezadi Yazdi, Experimental Investigation of the Characteristics of the Flow around an Elliptic Cylinder in the Presence of a Tripping Wire, *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 39-54, 2016. (In Persian فارسی)
- [12] R. Antonia, S. Rajagopalan, Determination of drag of a circular cylinder, *AIAA journal*, Vol. 28, No. 10, pp. 1833-1834, 1990.
- [13] M. A. Ardakani, *Hotwire Anemometer*, Tehran: khajeh nasir toosi university of technology publications, 2006. (In Persian فارسی)
- [14] A. Bak Khoshnevis, M. J. Ezadi Yazdi, E. Gholiepour Asrami, Introducing new relationship between high-order moments in the turbulent plain wake behind a circular cylinder, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 45, No. 3, pp. 39-49, 2015. (In Persian فارسی)
- [15] M. J. Ezadi Yazdi, A. Bak Khoshnevis, Experimental investigation of the characteristics of the wake of a rotating circular cylinder at different Reynolds numbers and speed ratios, *Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 1, pp. 51-64, 2016. (In Persian فارسی)
- [16] A. Bak Khoshnevis, M. J. Ezadi Yazdi, Experimental investigation effect of the rotational cylinder on the reducing of the drag coefficient by hot-wire anemometry, *Journal of*

کمتر از ۵۰٪ از ضریب نیروی پسا استوانه را شامل می‌شود. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست این مقدار افزایش می‌یابد. به طوری که در فاصله $x/B=10$ ، ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتوم برای استوانه دایره‌ای معادل ۸۷٪ ضریب نیروی پسا و برای استوانه بیضوی معادل ۹۱٪ می‌باشد. در فاصله ۲۰ برابر قطر استوانه، این مقدار برای استوانه دایره‌ای به حدود ۹۳٪ و برای استوانه بیضوی به حدود ۹۴٪ ضریب پسا می‌رسد.

- عبارت تنش‌های رینولدز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری صحیح ضریب نیروی پسا دارد. شدت اغتشاش‌های جریان هوا در فاصله حدود $x/B=1$ ، برای استوانه دایره‌ای برابر ۳۵٪ الی ۳۹٪ و برای استوانه بیضوی برابر ۲۵٪ الی ۳۳٪ می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست از شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاسته می‌شود. تا فاصله حدود $x/B=20$ از شدت اغتشاش‌ها تا مقدار زیاد کاسته شده و پس از آن روند کاهش با شیب کمتر ادامه می‌یابد. در فاصله $x/B=25$ ، شدت اغتشاش‌ها حدود ۸٪ بوده که بستگی به عدد رینولدز دارد.
- استفاده از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی به منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، هنگامی صحیح است که اغتشاش‌های جریان هوا همگن شود. در این حالت می‌توان با استفاده از فرضیه گلدستاین و با اندازه‌گیری توزیع سرعت جریان هوا، ضریب نیروی پسا را به دست آورد. هر چقدر شدت اغتشاش‌های جریان هوا کمتر باشد، فرض همگن بودن اغتشاش‌های آن صحیح‌تر است. هنگامی که از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی استفاده شود، ضریب نیروی پسا اندازه‌گیری شده در فواصل کمتر از $x/B=5$ ، دارای خطایی در حدود ۴۵٪ تا ۶۵٪ می‌باشد. در فاصله $x/B=20$ خطای اندازه‌گیری حدود ۱/۵٪ تا ۴٪ برای استوانه دایره‌ای و حدود ۲٪ برای استوانه بیضوی می‌باشد. برای فواصل بزرگتر از $x/B=20$ این خطا به کمتر از ۲٪ کاهش می‌یابد که در این شرایط حداکثر شدت اغتشاش‌ها حدود ۸٪ می‌باشد.

۶- فهرست علائم

 $AR = A/B$ نسبت محوری استوانه L طول مشخصه مدل $P_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله (pas) $P_{s,w}$ فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل (pas) q_{∞} فشار دینامیکی جریان آزاد (pas) Re عدد رینولدز U_{ref} سرعت جریان آزاد (ms^{-1}) $U_{r.ms}$ شدت اغتشاش‌ها (ms^{-1}) U سرعت محلی (ms^{-1}) u', v', w' سرعت‌های نوسانی در جهت‌های x, y, z τ_{xx} تنش برشی (Nm^{-2}) ρ' چگالی نوسانی (kgm^{-3})

Mechanical Engineering, Vol. 46, No. 2, pp. 19-30, 2016. (In Persian فارسی)

- [17] W. Lindsey, *Drag of cylinders of simple shapes*: Citeseer, 1938.
- [18] H. Schlichting, *Boundary-layer theory*, 1968.
- [19] F. Jorgenson, *How to Measure Turbulence with Hot Wire Anemometers*, *Dantec Dynamics*, 2004.
- [20] S. Yavuzkurt, A guide to uncertainty analysis of hot-wire data, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.