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 پسا، روش اختلاف مومنتوم می‌باشد. در این روش با استفاده از توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال در پایین‌دست مدل، می‌توان نیروی پسا 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. به‌طوری‌که حداکثر شدت اغتشاش‌ها در فاصله ۲۰ برابر قطر پایین‌دست استوانه دایره‌ای، با توجه به عدد رینولدز، به حدود ۱۴٪ کاهش‌یافته و خطا در حدود ۲٪ می‌باشد و برای استوانه بیضوی، به حدود ۱۰٪ کاهش‌یافته 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٪ کاهش‌یافته و خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا 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**

کلیدواژگان: توزیع سرعت، شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا، تنش‌های رینولدز، جریان‌سنج سیم داغ.

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

Mohammad Javad Ezadi Yazdi[1*], Amir Bak Khoshnevis[2]

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.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

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

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[1] [۳]، با اعمال معادلات پیوستگی و بقاء مومنتوم خطی به حجم کنترلی که جسم را در برگرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مطابق معادله زیر ارائه کرد:

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

(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 به‌صورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله زیر بیان نمود:

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

(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 به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

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

(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 است، گلدشتاین[2] [۴] فشار استاتیک ناحیه دنباله را مطابق معادله ۴، به‌صورت شدت اغتشاش‌های سه‌بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله ۵ ارائه نمود.

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

(۴)

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

(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 جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاش‌ها در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به دست آورد. لو[3] و برگ[4] [۵]، با استفاده از روش اختلاف مومنتوم، ضریب پسای 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 پسای استوانه را به دست آوردند. در فاصله‌های نزدیک به استوانه سهم عبارت تنش رینولدز بالا بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست این مقدار کاهش‌یافته است.

اردکانی[5] و ایروانی[6] [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 مفتول را اندازه‌گیری و مقایسه کردند. نشان دادند که در عدد رینولدز ۲۰۰۰، ضریب نیروی پسای سیم چند رشته‌ای ۱۶٪ از مفتول 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 بازهٔ 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 دنبالهٔ 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 پسای سیال روی یک استوانه بیضوی با و بدون نصب سیم اغتشاش ساز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بهترین حالت ممکن، در زاویهٔ نصب ۲۳/۷ درجه، ضریب پسا به میزان ۵۶/۵ ٪ کاهش می‌یابد.

آنتونیا[7] و راجاگوپالان[8] [۱۲]، ضریب نیروی پسای استوانه را در عدد رینولدز ۵۶۰۰۰ و تا فاصله ۶۰ برابر قطر در پایین‌دست آن، با استفاده از

[1] Van Dam

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

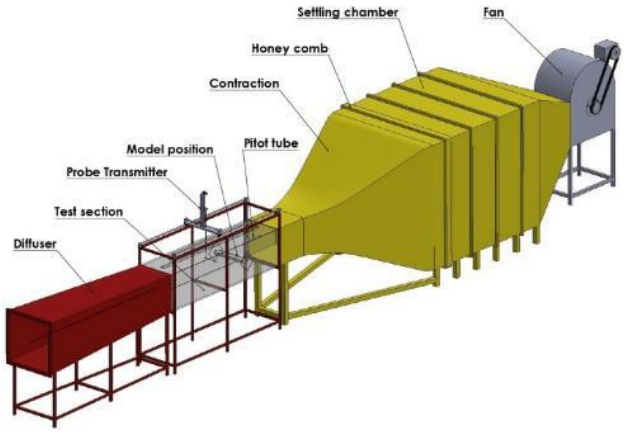
جریان‌سنج سیم داغ با پراب دوبعدی اندازه‌گیری نمودند. در فاصله x/D=۵ عبارت تنش‌های رینولدز تقریباً سهمی حدود ٪۲۲ از کل ضریب پسا را دارد و این مقدار با افزایش فاصله از استوانه کاهش می‌یابد، به‌طوری‌که در x/D=۲۰ این عبارت تنها حدود ٪۵ از مقدار کل ضریب پسا را به خود اختصاص داده است.

با توجه به بحث‌ها و تحقیقات انجام گرفته، درصورتی‌که 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 پایین‌دست، اندازه‌گیری‌های لازم انجام شود. درصورتی‌که 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. درصورتی‌که اغتشاش‌های جریان هوا در ناحیه پایین‌دست 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 پایین‌دست مدل در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ 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 پایین‌دست استوانه (بیضوی و دایره‌ای) در اعداد رینولدز مختلف اندازه‌گیری و ارائه شده است.

۲- تجهیزات آزمایشگاهی

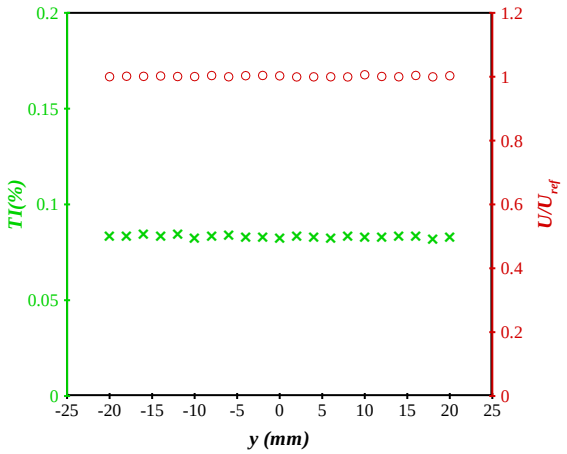
کلیه آزمایش‌ها با استفاده از تونل باد مدارباز در دانشگاه حکیم سبزواری انجام پذیرفته است. شکل ۱ تونل باد فوق را نشان می‌دهد که از نوع مدارباز و دمشی می‌باشد. این تونل باد دارای مقطع اتاق آزمون به ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی‌متر مربع و طول ۱۶۸ سانتی‌متر است. این تونل برای مطالعه جریان‌های دو بعدی حول یک استوانه 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 ۴ متر بر ثانیه الی ۲۸ متر بر ثانیه قابل تنظیم می‌باشد. به‌منظور به دست آوردن جریان مناسب، در اتاق آرامش این تونل باد، تعداد ۴ عدد توری قرارگرفته که دو عدد آن قبل از لانه زنبوری و دو عدد آن بعد از لانه زنبوری قرار دارد. شکل ۲، تغییرات سرعت بی‌بعد 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. به‌منظور اندازه‌گیری پروفیل سرعت جریان هوا و شدت اغتشاش‌ها در پایین‌دست استوانه، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ ساخت شرکت فراسنجش صبا استفاده شده است. پراب مورد استفاده از نوع یک‌بعدی بوده و سنسور آن از جنس تنگستن ۵ میکرونی است. دستگاه جریان‌سنج سیم به همراه پراب، 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 Flow ware تجزیه و تحلیل می‌شود. برای جابجایی پراب از مکانیزم انتقال‌دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم ۰/۰۱ 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، به‌منظور اندازه‌گیری فشار کل جریان هوا استفاده شده است. استوانه بیضوی مورد استفاده در این آزمایش، از جنس آلومینیوم با آلیاژ ۷۰۲۳ به قطر بزرگ ۴۲/۴ میلی‌متر و ارتفاع سطح مقطع ۲۱/۲ میلی‌متر و طول ۳۹۰ میلی‌متر بوده و آزمایش‌ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ (بر اساس ارتفاع سطح مقطع استوانه $Re = U_\infty . B/\vartheta$) 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[1] [۱۷] (برای استوانه بیضوی) و شلیختینگ[2] [۱۸] (برای استوانه دایره‌ای) به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴، در جدول ارائه شده است. توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های آن در پایین‌دست استوانه و در فاصله‌های بی‌بعد شده ۲۵ و ۲۰،۱۵،۱۰، ۵، ۲/۵، ۱، x/B=۰/۲۵ ، اندازه‌گیری شده است.



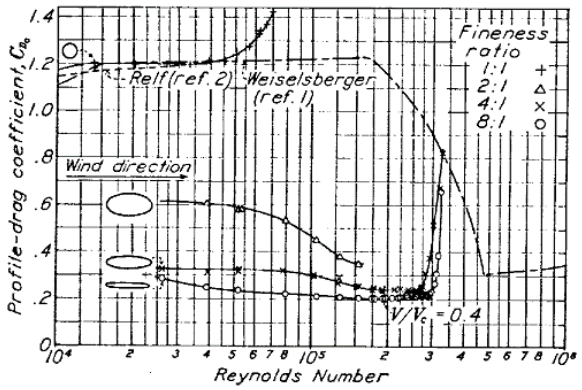
شکل ۱ تونل باد دمنده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- اتاق آرامش ۶- نازل ۷- اتاق آزمون ۸- استوانه دایره‌ای.

[1] Lindsey
[2] Schlichting

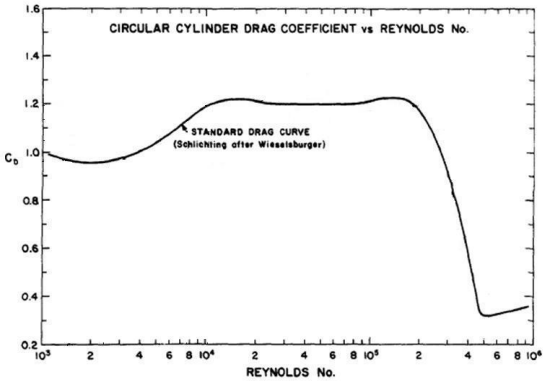
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]



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

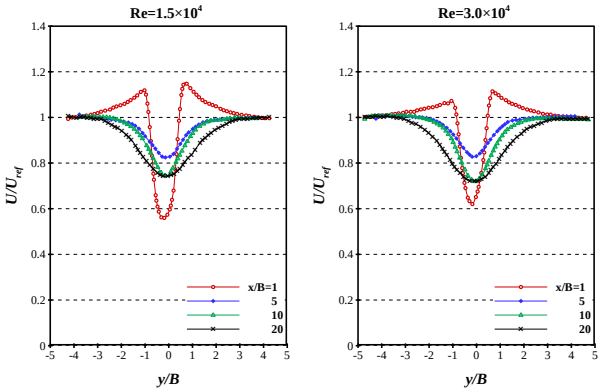
ضریب نیروی پسا مطابق منحنی‌های ارائه شده	عدد رینولدز	سرعت جریان هوا (m/s)	B (minor axis)	A (major axis)	AR
۱/۲۱	۱۵۰۰۰	۱۰	۲۱/۲	۲۱/۲	۱
۱/۲	۳۰۰۰۰	۲۰	۲۱/۲	۲۱/۲	۱
۰/۶۲	۱۵۰۰۰	۱۰	۲۱/۲	۴۲/۴	۲
۰/۶۱	۳۰۰۰۰	۲۰	۲۱/۲	۴۲/۴	۲

۳- نتایج و بحث

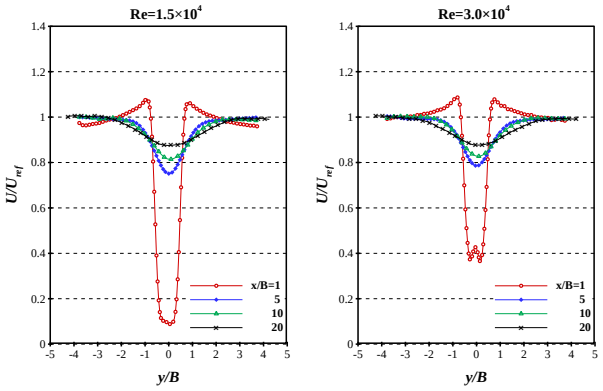
همان‌گونه که بیان شد، آزمایش‌ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انجام شده است. ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ برای استوانه دایره‌ای ۱/۲۱ و استوانه بیضوی ۰/۶۲ بوده و برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۶۱ می‌باشد.

۳-۱- بررسی پروفیل سرعت متوسط

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، به‌منظور اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای 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 پسای استوانه و یا جسم موردنظر 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.

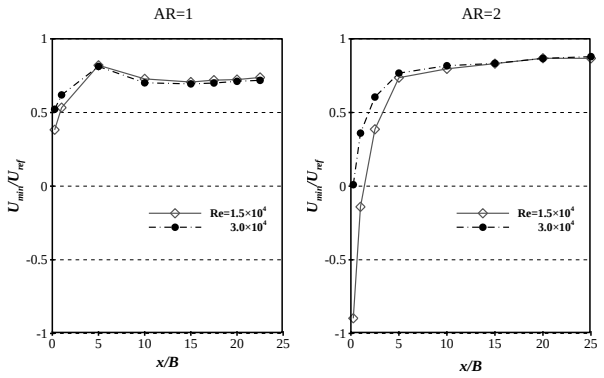


شکل ۶ پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد شده در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه بیضوی.

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

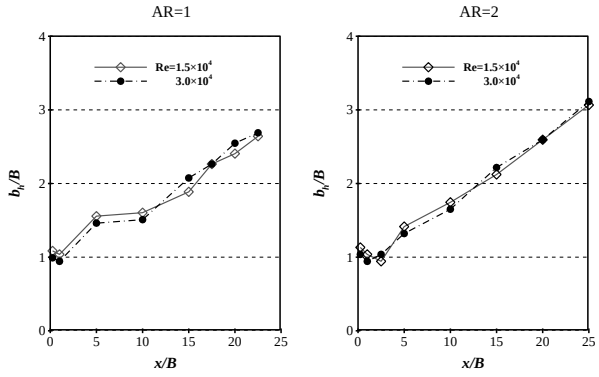
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

۳۰۰۰۰ بر حسب فاصله بی‌بعد شده قائم بر ناحیه دنباله y/B را نشان می‌دهند. در فاصله x/B=۱ 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=۱) سرعت اضافی با شدت کمتری مشاهده می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر توزیع سرعت در پایین‌دست استوانه، بیشترین نقصان سرعت و یا کمترین سرعت در ناحیه دنباله پایین‌دست استوانه بررسی می‌شود. شکل ۷، تغییرات کمترین سرعت بی‌بعد شده در پایین‌دست 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 پایین‌دست این مقدار کاهش می‌یابد. در استوانه دایره‌ای هنگامی‌که $x/B > 10$ 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 پایین‌دست مقدار آن تقریبا ثابت می‌ماند. لازم به ذکر است در فواصل کمتر از $x/B < 5$ پروفیل سرعت، دارای جریان اضافی (سرعت بیشتر از جریان آزاد) می‌باشد.



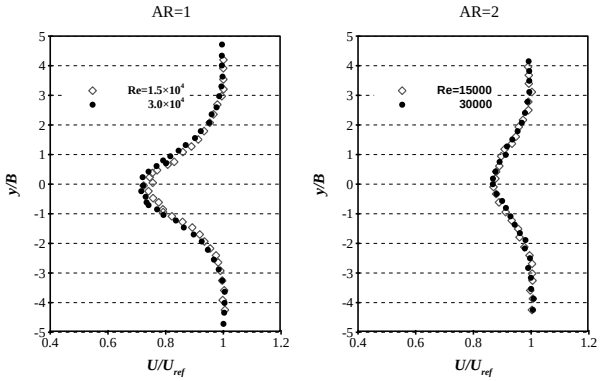
شکل ۷ تغییرات کم‌ترین سرعت بی‌بعد شده در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

پهنای ناحیه دنباله نیز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری عبارت اختلاف مومنتوم دارد. شکل ۸، توزیع پهنای ناحیه دنباله پایین‌دست استوانه را در اعداد رینولدز مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، پهنای ناحیه دنباله، با افزایش فاصله در پایین‌دست استوانه، افزایش می‌یابد. پهنای ناحیه دنباله تا x/B=۱۵، با شیب نسبتاً زیادی افزایش‌یافته و پس از آن روند افزایش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین پهنای ناحیه دنباله با افزایش عدد رینولدز، افزایش یافته است.



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

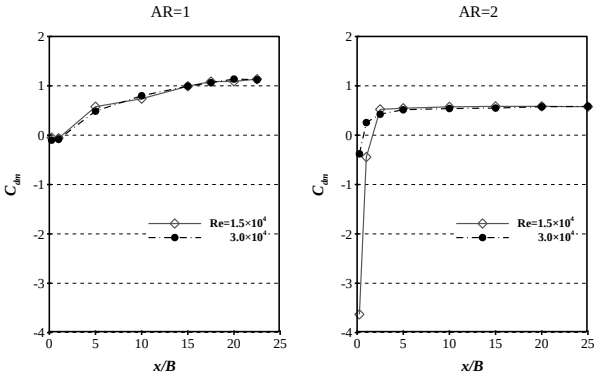
شکل ۹، توزیع سرعت در فاصله x/B=۲۰، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، در استوانه دایره‌ای نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار بزرگتر و پهنای ناحیه دنباله در همان عدد رینولدز، بیشتر است. در نتیجه ضریب نیروی پسا برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ مقدار کمتری خواهد بود. این موضوع با توجه به شکل ۴ توجیه-پذیر است؛ اما در استوانه بیضوی نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای هر دو عدد رینولدز تقریبا یکسان می‌باشد.



شکل ۹ پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد 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 یا ۵ را به دست آورد. توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم در پایین‌دست 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=۵ ناچیز بوده و حدود سهمی کمتر از ۵۰٪ ضریب نیروی پسا را به خود اختصاص می‌دهد.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

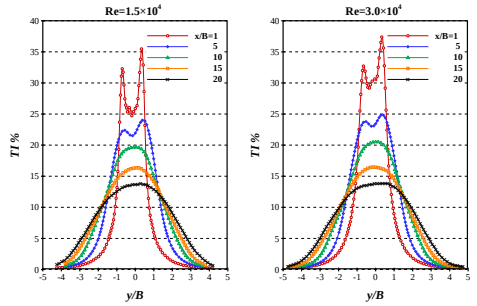


شکل ۱۰ توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم بر حسب فاصله در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف.

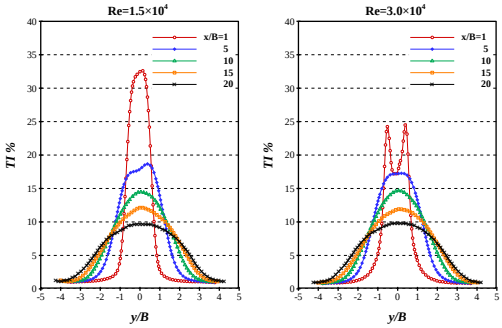
با افزایش فاصله در پایین‌دست، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از مومنتوم افزایش یافته و در فاصله x/B=۱۰، این عبارت برای استوانه دایره‌ای معادل ۸۷٪ ضریب نیروی پسا و برای استوانه بیضوی معادل ۹۱٪ می‌باشد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست استوانه، شیب افزایش ضریب نیروی پسای ناشی از مومنتوم، کاهش یافته ولی همچنان 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 پسای ناشی از مومنتوم وابسته به عدد رینولدز بوده به طوری که در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و در x/B=۲۰، برای استوانه دایره‌ای برابر ۱/۰۸۹۸ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ برابر ۱/۱۳۷ می‌باشد و برای استوانه بیضوی در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ و در x/B=۲۰، 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 جریان‌سنج سیم داغ با پراب سه بعدی استفاده شود که مشکلات زیادی به همراه دارد. در صورتی که در ناحیه پایین-دست 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.

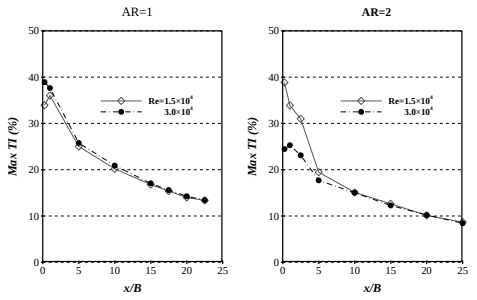


شکل ۱۱ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین‌دست استوانه دایره‌ای.



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

شدت اغتشاش‌ها[1] طبق رابطه $Tu=\sqrt{(\overline{u'^2})}/U_{ref}$ 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 به‌طوری که در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۳٪ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۲۵٪ می‌باشد. در فواصل بسیار نزدیک به استوانه x/B=۱، شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله بیشینه نبوده ولی با افزایش پایین‌دست، x/B > ۱۰ بیشینه مقدار شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله اتفاق افتاده و از شدت آنها کاسته می‌شود. به‌منظور 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.

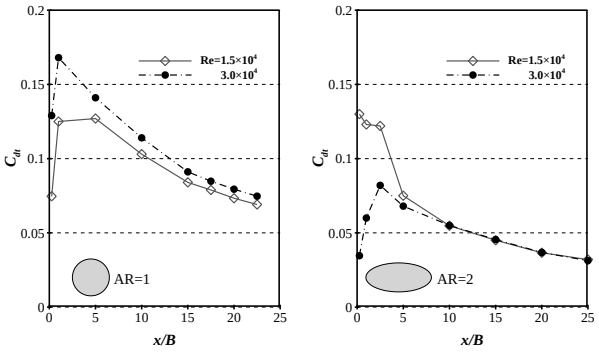
مطابق شکل ۱۳، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی استوانه بالا بوده و برای استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۴٪ و رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۳۹٪ است و با افزایش فاصله در پایین‌دست تا x/B=۲۰،

[1] Turbulence Intensity

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

شدت اغتشاش‌ها با شیب نسبتاً زیادی کاهش‌یافته و به حدود ۱۴٪ می‌رسد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین‌دست، این شیب کاهش یافته و در x/B=۲۵ به حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در استوانه بیضوی در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ حداکثر شدت اغتشاش‌ها حدود ۳۹٪ و در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ حدود ۲۵٪ می‌باشد و با افزایش فاصله در پایین‌دست تا x/B=۲۰، شدت اغتشاش‌ها با شیب نسبت زیادی کاهش‌یافته و به حدود ۱۰٪ می‌رسد و در x/B=۲۵ به حدود ۸٪ کاهش می‌یابد.

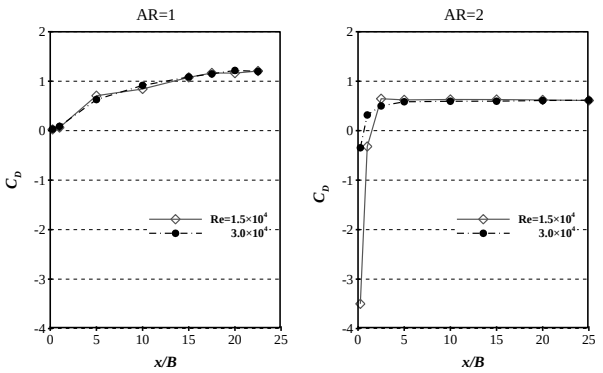
شکل ۱۴، توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز برای اعداد رینولدز مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز در فواصل نزدیک به استوانه زیاد بوده و با افزایش فاصله در پایین‌دست x/B، کاهش می‌یابد. تا x/B=۱۵، این کاهش شدید بوده و پس از آن روند کاهش با شیب کمتری ادامه می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب نیروی پسای ناشی از تنش‌های رینولدز در استوانه دایره‌ای افزایش می‌یابد اما در استوانه بیضوی کاهش می‌یابد. به طوری که مقدار آن در x/B=۵ برای استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ برابر ۰/۱۴۱ و در فاصله x/B=۲۰ حدود ۰/۰۷۹۴ خواهد بود و در استوانه بیضوی مقدار آن در x/B=۵ برابر ۰/۰۶۸ و در فاصله x/B=۲۰ حدود ۰/۰۳۶۸ می‌باشد.



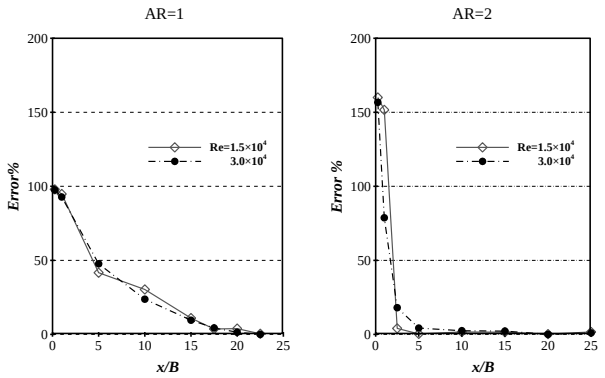
شکل ۱۴ توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولدز در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف

۳-۳- بررسی ضریب پسا

در این بخش به بررسی ضریب پسا در استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ پرداخته شده است. در فواصل نزدیک به مدل، اغتشاش‌های جریان هوا همگن نمی‌باشد. در صورتی که اغتشاش‌های جریان در پایین‌دست استوانه همگن فرض شوند، می‌توان از معادله ون دام اصلاح شده برای مشخص نمودن ضریب نیروی پسا استفاده کرد. شکل ۱۵ نتایج حاصل از معادله ۵ را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۵ در فواصل نزدیک به استوانه، ضریب نیروی پسا بسیار کوچک‌تر از مقدار واقعی است و با افزایش فاصله در پایین‌دست به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. شکل ۱۶، خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا در پایین‌دست استوانه برای اعداد رینولدز مختلف بر حسب مکان اندازه‌گیری بی‌بعد شده x/B را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶، در صورتی که اندازه‌گیری‌های اختلاف مومنتوم و تنش‌های رینولدز در فاصله x/B=۱ انجام شود، خطایی حدود ۹۲٪ برای استوانه دایره‌ای و حدود ۸۰٪ برای استوانه بیضوی خواهیم داشت. این موضوع نشان دهنده آن است که اغتشاش‌های جریان هوا همگن نبوده و نمی‌توان در این نواحی از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک بعدی استفاده کرد. با افزایش فاصله در پایین‌دست، خطای اندازه‌گیری کاهش یافته بطوری‌که در فاصله x/B=۲۰ مقدار خطا حدود ۱/۵٪ تا ۴٪ برای استوانه دایره‌ای و حدود ۲٪ برای استوانه بیضوی می‌باشد. در این حالت می‌توان شدت اغتشاش‌های جریان هوا را تقریبا همگن فرض کرد.



شکل ۱۵ توزیع ضریب نیروی پسای استوانه در فواصل مختلف پایین‌دست برای اعداد رینولدز مختلف.

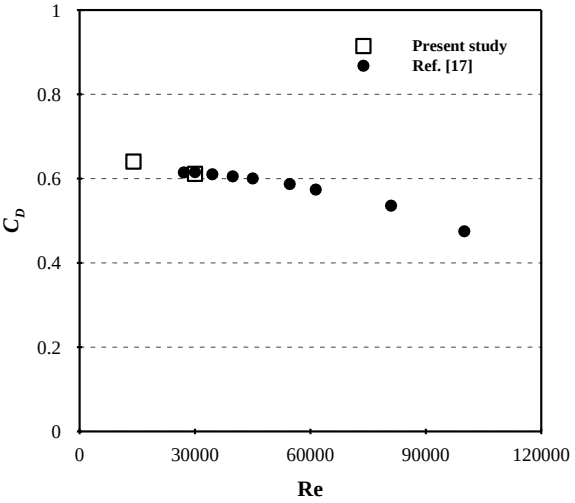


شکل ۱۶ خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای استوانه در اعداد رینولدز مختلف .

با توجه به شکل ۱۶، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی‌که شدت اغتشاش‌ها حدود ۱۰٪ یا کمتر از آن باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر از ۱۰٪ خواهد بود. همان‌گونه که بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، 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 سه‌بعدی شدت اغتشاش‌ها، ضریب نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری سه‌بعدی شدت اغتشاش‌ها امری دشوار می‌باشد، لذا در صورتی‌که بخواهیم تنها با استفاده از پراب یک‌بعدی شدت اغتشاش‌های جریان را اندازه‌گیری کنیم، داده‌برداری باید در فاصله کافی پایین‌دست مدل انجام شود، یعنی در مکانی که شدت اغتشاش‌ها تقریباً همگن می‌شوند.

به منظور اعتبارسنجی، نتایج مطالعهٔ 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).

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]



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

۴- عدم قطعیت نتایج

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری ها 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 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،

اندازه‌گیری با دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مانند دستگاه‌های دیگر دارای خطا می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای جریان‌سنج سیم داغ را می‌توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک پذیری کارت A/D و تغییرات دما دانست. کالیبراسیون جریان‌سنج 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 جریان‌سنج 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 ۱۰+ و ۱۰- ولت است و در صورتی که تطبیق دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کمتر از ٪۰/۰۵ می‌باشد. تغییرات دما تأثیر نامطلوبی بر دقت جریان‌سنج 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 پایین‌دست مدل می‌توان نیروی پسا را اندازه-گیری نمود. در این مقاله جریان هوا پایین‌دست استوانه با سطح مقطع بیضوی و دایره‌ای، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ به‌صورت تجربی و با استفاده از جریان‌سنج 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، پایین‌دست استوانه اندازه‌گیری شوند. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می‌توان فشار استاتیکی و سرعت جریان هوا را تؤاماً اندازه‌گیری نمود، در صورتیکه با استفاده از جریان‌سنج 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 اندازه-گیری نمود.
- با بررسی توزیع سرعت در پایین‌دست 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 پایین‌دست استوانه، نقصان سرعت در دنباله کاهش‌یافته و در استوانه دایره‌ای هنگامی که $x/B > ۱۰$ 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 پایین‌دست مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. پهنای ناحیه دنباله با افزایش فاصله بی‌بعد x/B در پایین‌دست استوانه و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می-یابد. افزایش پهنای ناحیه دنباله تا فاصله x/B=۱۵ 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 پایین‌دست استوانه، افزایش می‌یابد. در فاصله حدود x/B=۵، ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتوم حدود

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

کمتر از ۵۰٪ از ضریب نیروی پسا استوانه را شامل می‌شود. با افزایش بیشتر فاصله در پایین‌دست این مقدار افزایش می‌یابد. به‌طوریکه در فاصله x/B=۱۰، 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=۱، برای استوانه دایره‌ای برابر ۳۵٪ الی ۳۹٪ و برای استوانه بیضوی برابر ۲۵٪ الی ۳۳٪ می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین‌دست از شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاسته می‌شود. تا فاصله حدود x/B=۲۰ از شدت اغتشاش‌ها تا مقدار زیاد کاسته شده و پس از آن روند کاهش با شیب کمتر ادامه می‌یابد. در فاصله x/B=۲۵، 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 گلدشتاین و با اندازه‌گیری توزیع سرعت جریان هوا، ضریب نیروی پسا را به‌دست آورد. هر چقدر شدت اغتشاش‌های جریان هوا کمتر باشد، فرض همگن بودن اغتشاش‌های آن صحیح‌تر است. هنگامی‌که از جریان‌سنج سیم داغ با پراب یک‌بعدی استفاده شود، ضریب نیروی پسای اندازه‌گیری شده در فواصل کمتر از x/B=۵، دارای خطایی در حدود ۴۵٪ تا ۶۵٪ می‌باشد. در فاصله x/B=۲۰ خطای اندازه‌گیری حدود ۱/۵٪ تا ۴٪ برای استوانه دایره‌ای و حدود ۲٪ برای استوانه بیضوی می‌باشد. برای فواصل بزرگتر از x/B=۲۰، 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})
$U_{r.m.s}$	شدت اغتشاش‌ها (ms^{-1})
U	سرعت محلی (ms^{-1})
u', v', w'	سرعت‌های نوسانی در جهت‌های x, y و z
τ_{xx}	تنش برشی (Nm^{-2})
ρ'	چگالی نوسانی (kgm^{-3})

علائم یونانی

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

زیرنویس‌ها

∞	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. Iravani, 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 multistrand 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*

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]

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.

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.3.6.0]