

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

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

۱- مریب، 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 پایین دست مدل، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد. در این تحقیق تجربی، شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست 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 پایین دست استوانه بیضوی و دایره‌ای با افزایش فاصله (x/B) کاهش می‌یابند. به طوری که حداقل شدت اغتشاش‌ها در فاصله ۲۰ برابر قطر پایین دست استوانه دایره‌ای، با توجه به عدد رینولدز، به حدود ۱۴٪ کاهش یافته و خطأ در حدود ۰.۲٪ می‌باشد و برای استوانه بیضوی، به حدود ۱۰٪ کاهش یافته و خطأ در حدود ۰.۲٪ می‌باشد. در فاصله ۲۵ برابر قطر پایین دست استوانه دایره‌ای و بیضوی، حداقل شدت اغتشاش‌ها به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۸٪ کاهش یافته و خطأ اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا حدود ۱٪ می‌باشد. در این تحقیق، توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست استوانه در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ با استفاده از جریان‌سنجد سیم داغ بررسی شده است.

* عهدهدار مکاتبات: javadezadi2014@gmail.com

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

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

Mohammad Javad Ezadi^{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 1%. 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.

اعمالی از طرف جریان هوا به مدل، به سه دسته روش اندازه‌گیری و

۱- مقدمه

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. هر کدام از روش‌های

یکی از مشخصه‌های کمی جریان هوا بر روی اجسام، نیروها و گشتاورهای

اعمالی از طرف جریان هوا بر روی جسم است. به طور کلی، نیروهاي

است، گلشتاین^۲ [۴] فشار استاتیک ناحیه دنباله را مطابق معادله ^۴، به- صورت شدت اغتشاش‌های سه بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله ۵ ارائه نمود.

$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{2} \rho (\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2) \quad (4)$$

$$C_d = 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left(\frac{\bar{v}^2 + \bar{w}^2 - \bar{u}^2}{U_\infty^2} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (5)$$

w' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشد. معادله ۵ به معادله اصلاح شده ون دام مشهور است. با فرض شدت اغتشاش‌های همگن و یا به عبارت دیگر $w' = u' = v'$ ، معادله ۵ ساده شده و می- توان با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پراب یک بعدی و فقط با اندازه- گیری 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 پسای استوانه که ناحیه دنباله آن بسیار مغلوش و سه بعدی است را با استفاده از معادله اصلاح شده ون دام بررسی نمودند. آن‌ها با استفاده از لوله پیتوت و جریان سنج 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 پایین دست این مقدار کاهش یافته است. اردکانی^۵ و ایروانی^۶ [۶]، به بررسی تجربی جریان هوا در پایین دست سیم‌های چند رشته‌ای پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش اختلاف مومنتوم ضریب نیروی پسا برای سیم‌های چند رشته‌ای و مفتول را اندازه- گیری 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 بازه عدد رینولدز ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ به روش اختلاف مومنتوم پرداختند.

اخیراً ایزدی یزدی و بک خوشنویس^۷ [۸، ۹] به بررسی تجربی اثرات نسبت فضای خالی (G/B) و عدد رینولدز (Re) بر روی تداخل لایه مزدی 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 پسای 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^۸ و راجاگوپالان^۹ [۱۲]، ضریب نیروی پسای استوانه را در عدد رینولدز ۵۶۰۰۰ و تا فاصله ۶۰ برابر قطر در پایین دست آن، با استفاده از

فوق دارای مزایا و معایب خاص خود می‌باشد و در موارد مختلفی می- توانند به کار روند. در روش اندازه‌گیری مومنتوم، با اندازه‌گیری جریان هوا پایین دست 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، نظریه 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 ابسطه 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 برگرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مطابق معادله زیر ارائه کرد:

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

$p_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله یا بالادست مدل، U_∞ سرعت محلی، U سرعت محیطی، L 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:

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

که در آن $'$ 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 روش می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$C_d = \int \left[\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + 2 \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) - \frac{\bar{u}^2}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (3)$$

معادله ۳ به معادله ون دام مشهور است. این معادله را در هر نقطه‌ای در پایین دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به طور 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 انتقال دهنده استفاده شده است که دقت این مکانیزم 0.1 میلیمتر در سه جهت می-باشد. حرکت این مکانیزم انتقال دهنده توسط رایانه و نرم‌افزار کنترل می-شود. 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 آلیاز 7023 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) $(Re = U_\infty \cdot B / \theta)$ انجام شده است. جدول ۱ مشخصات استوانه‌های مورد استفاده و سرعت جریان هوا را نشان می‌دهد. همچنین ضریب نیروی پسی 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 و 50 ، 100 ، 150 ، 200 ، 250 ، 300 ، 350 ، 400 ، 450 ، 500 ، 550 ، 600 ، 650 ، 700 ، 750 ، 800 ، 850 ، 900 ، 950 ، 1000 ، 1050 ، 1100 ، 1150 ، 1200 ، 1250 ، 1300 ، 1350 ، 1400 ، 1450 ، 1500 ، 1550 ، 1600 ، 1650 ، 1700 ، 1750 ، 1800 ، 1850 ، 1900 ، 1950 ، 2000 ، 2050 ، 2100 ، 2150 ، 2200 ، 2250 ، 2300 ، 2350 ، 2400 ، 2450 ، 2500 ، 2550 ، 2600 ، 2650 ، 2700 ، 2750 ، 2800 ، 2850 ، 2900 ، 2950 ، 3000 ، 3050 ، 3100 ، 3150 ، 3200 ، 3250 ، 3300 ، 3350 ، 3400 ، 3450 ، 3500 ، 3550 ، 3600 ، 3650 ، 3700 ، 3750 ، 3800 ، 3850 ، 3900 ، 3950 ، 4000 ، 4050 ، 4100 ، 4150 ، 4200 ، 4250 ، 4300 ، 4350 ، 4400 ، 4450 ، 4500 ، 4550 ، 4600 ، 4650 ، 4700 ، 4750 ، 4800 ، 4850 ، 4900 ، 4950 ، 5000 ، 5050 ، 5100 ، 5150 ، 5200 ، 5250 ، 5300 ، 5350 ، 5400 ، 5450 ، 5500 ، 5550 ، 5600 ، 5650 ، 5700 ، 5750 ، 5800 ، 5850 ، 5900 ، 5950 ، 6000 ، 6050 ، 6100 ، 6150 ، 6200 ، 6250 ، 6300 ، 6350 ، 6400 ، 6450 ، 6500 ، 6550 ، 6600 ، 6650 ، 6700 ، 6750 ، 6800 ، 6850 ، 6900 ، 6950 ، 7000 ، 7050 ، 7100 ، 7150 ، 7200 ، 7250 ، 7300 ، 7350 ، 7400 ، 7450 ، 7500 ، 7550 ، 7600 ، 7650 ، 7700 ، 7750 ، 7800 ، 7850 ، 7900 ، 7950 ، 8000 ، 8050 ، 8100 ، 8150 ، 8200 ، 8250 ، 8300 ، 8350 ، 8400 ، 8450 ، 8500 ، 8550 ، 8600 ، 8650 ، 8700 ، 8750 ، 8800 ، 8850 ، 8900 ، 8950 ، 9000 ، 9050 ، 9100 ، 9150 ، 9200 ، 9250 ، 9300 ، 9350 ، 9400 ، 9450 ، 9500 ، 9550 ، 9600 ، 9650 ، 9700 ، 9750 ، 9800 ، 9850 ، 9900 ، 9950 ، 10000 ، 10050 ، 10100 ، 10150 ، 10200 ، 10250 ، 10300 ، 10350 ، 10400 ، 10450 ، 10500 ، 10550 ، 10600 ، 10650 ، 10700 ، 10750 ، 10800 ، 10850 ، 10900 ، 10950 ، 11000 ، 11050 ، 11100 ، 11150 ، 11200 ، 11250 ، 11300 ، 11350 ، 11400 ، 11450 ، 11500 ، 11550 ، 11600 ، 11650 ، 11700 ، 11750 ، 11800 ، 11850 ، 11900 ، 11950 ، 12000 ، 12050 ، 12100 ، 12150 ، 12200 ، 12250 ، 12300 ، 12350 ، 12400 ، 12450 ، 12500 ، 12550 ، 12600 ، 12650 ، 12700 ، 12750 ، 12800 ، 12850 ، 12900 ، 12950 ، 13000 ، 13050 ، 13100 ، 13150 ، 13200 ، 13250 ، 13300 ، 13350 ، 13400 ، 13450 ، 13500 ، 13550 ، 13600 ، 13650 ، 13700 ، 13750 ، 13800 ، 13850 ، 13900 ، 13950 ، 14000 ، 14050 ، 14100 ، 14150 ، 14200 ، 14250 ، 14300 ، 14350 ، 14400 ، 14450 ، 14500 ، 14550 ، 14600 ، 14650 ، 14700 ، 14750 ، 14800 ، 14850 ، 14900 ، 14950 ، 15000 ، 15050 ، 15100 ، 15150 ، 15200 ، 15250 ، 15300 ، 15350 ، 15400 ، 15450 ، 15500 ، 15550 ، 15600 ، 15650 ، 15700 ، 15750 ، 15800 ، 15850 ، 15900 ، 15950 ، 16000 ، 16050 ، 16100 ، 16150 ، 16200 ، 16250 ، 16300 ، 16350 ، 16400 ، 16450 ، 16500 ، 16550 ، 16600 ، 16650 ، 16700 ، 16750 ، 16800 ، 16850 ، 16900 ، 16950 ، 17000 ، 17050 ، 17100 ، 17150 ، 17200 ، 17250 ، 17300 ، 17350 ، 17400 ، 17450 ، 17500 ، 17550 ، 17600 ، 17650 ، 17700 ، 17750 ، 17800 ، 17850 ، 17900 ، 17950 ، 18000 ، 18050 ، 18100 ، 18150 ، 18200 ، 18250 ، 18300 ، 18350 ، 18400 ، 18450 ، 18500 ، 18550 ، 18600 ، 18650 ، 18700 ، 18750 ، 18800 ، 18850 ، 18900 ، 18950 ، 19000 ، 19050 ، 19100 ، 19150 ، 19200 ، 19250 ، 19300 ، 19350 ، 19400 ، 19450 ، 19500 ، 19550 ، 19600 ، 19650 ، 19700 ، 19750 ، 19800 ، 19850 ، 19900 ، 19950 ، 20000 ، 20050 ، 20100 ، 20150 ، 20200 ، 20250 ، 20300 ، 20350 ، 20400 ، 20450 ، 20500 ، 20550 ، 20600 ، 20650 ، 20700 ، 20750 ، 20800 ، 20850 ، 20900 ، 20950 ، 21000 ، 21050 ، 21100 ، 21150 ، 21200 ، 21250 ، 21300 ، 21350 ، 21400 ، 21450 ، 21500 ، 21550 ، 21600 ، 21650 ، 21700 ، 21750 ، 21800 ، 21850 ، 21900 ، 21950 ، 22000 ، 22050 ، 22100 ، 22150 ، 22200 ، 22250 ، 22300 ، 22350 ، 22400 ، 22450 ، 22500 ، 22550 ، 22600 ، 22650 ، 22700 ، 22750 ، 22800 ، 22850 ، 22900 ، 22950 ، 23000 ، 23050 ، 23100 ، 23150 ، 23200 ، 23250 ، 23300 ، 23350 ، 23400 ، 23450 ، 23500 ، 23550 ، 23600 ، 23650 ، 23700 ، 23750 ، 23800 ، 23850 ، 23900 ، 23950 ، 24000 ، 24050 ، 24100 ، 24150 ، 24200 ، 24250 ، 24300 ، 24350 ، 24400 ، 24450 ، 24500 ، 24550 ، 24600 ، 24650 ، 24700 ، 24750 ، 24800 ، 24850 ، 24900 ، 24950 ، 25000 ، 25050 ، 25100 ، 25150 ، 25200 ، 25250 ، 25300 ، 25350 ، 25400 ، 25450 ، 25500 ، 25550 ، 25600 ، 25650 ، 25700 ، 25750 ، 25800 ، 25850 ، 25900 ، 25950 ، 26000 ، 26050 ، 26100 ، 26150 ، 26200 ، 26250 ، 26300 ، 26350 ، 26400 ، 26450 ، 26500 ، 26550 ، 26600 ، 26650 ، 26700 ، 26750 ، 26800 ، 26850 ، 26900 ، 26950 ، 27000 ، 27050 ، 27100 ، 27150 ، 27200 ، 27250 ، 27300 ، 27350 ، 27400 ، 27450 ، 27500 ، 27550 ، 27600 ، 27650 ، 27700 ، 27750 ، 27800 ، 27850 ، 27900 ، 27950 ، 28000 ، 28050 ، 28100 ، 28150 ، 28200 ، 28250 ، 28300 ، 28350 ، 28400 ، 28450 ، 28500 ، 28550 ، 28600 ، 28650 ، 28700 ، 28750 ، 28800 ، 28850 ، 28900 ، 28950 ، 29000 ، 29050 ، 29100 ، 29150 ، 29200 ، 29250 ، 29300 ، 29350 ، 29400 ، 29450 ، 29500 ، 29550 ، 29600 ، 29650 ، 29700 ، 29750 ، 29800 ، 29850 ، 29900 ، 29950 ، 30000 ، 30050 ، 30100 ، 30150 ، 30200 ، 30250 ، 30300 ، 30350 ، 30400 ، 30450 ، 30500 ، 30550 ، 30600 ، 30650 ، 30700 ، 30750 ، 30800 ، 30850 ، 30900 ، 30950 ، 31000 ، 31050 ، 31100 ، 31150 ، 31200 ، 31250 ، 31300 ، 31350 ، 31400 ، 31450 ، 31500 ، 31550 ، 31600 ، 31650 ، 31700 ، 31750 ، 31800 ، 31850 ، 31900 ، 31950 ، 32000 ، 32050 ، 32100 ، 32150 ، 32200 ، 32250 ، 32300 ، 32350 ، 32400 ، 32450 ، 32500 ، 32550 ، 32600 ، 32650 ، 32700 ، 32750 ، 32800 ، 32850 ، 32900 ، 32950 ، 33000 ، 33050 ، 33100 ، 33150 ، 33200 ، 33250 ، 33300 ، 33350 ، 33400 ، 33450 ، 33500 ، 33550 ، 33600 ، 33650 ، 33700 ، 33750 ، 33800 ، 33850 ، 33900 ، 33950 ، 34000 ، 34050 ، 34100 ، 34150 ، 34200 ، 34250 ، 34300 ، 34350 ، 34400 ، 34450 ، 34500 ، 34550 ، 34600 ، 34650 ، 34700 ، 34750 ، 34800 ، 34850 ، 34900 ، 34950 ، 35000 ، 35050 ، 35100 ، 35150 ، 35200 ، 35250 ، 35300 ، 35350 ، 35400 ، 35450 ، 35500 ، 35550 ، 35600 ، 35650 ، 35700 ، 35750 ، 35800 ، 35850 ، 35900 ، 35950 ، 36000 ، 36050 ، 36100 ، 36150 ، 36200 ، 36250 ، 36300 ، 36350 ، 36400 ، 36450 ، 36500 ، 36550 ، 36600 ، 36650 ، 36700 ، 36750 ، 36800 ، 36850 ، 36900 ، 36950 ، 37000 ، 37050 ، 37100 ، 37150 ، 37200 ، 37250 ، 37300 ، 37350 ، 37400 ، 37450 ، 37500 ، 37550 ، 37600 ، 37650 ، 37700 ، 37750 ، 37800 ، 37850 ، 37900 ، 37950 ، 38000 ، 38050 ، 38100 ، 38150 ، 38200 ، 38250 ، 38300 ، 38350 ، 38400 ، 38450 ، 38500 ، 38550 ، 38600 ، 38650 ، 38700 ، 38750 ، 38800 ، 38850 ، 38900 ، 38950 ، 39000 ، 39050 ، 39100 ، 39150 ، 39200 ، 39250 ، 39300 ، 39350 ، 39400 ، 39450 ، 39500 ، 39550 ، 39600 ، 39650 ، 39700 ، 39750 ، 39800 ، 39850 ، 39900 ، 39950 ، 40000 ، 40050 ، 40100 ، 40150 ، 40200 ، 40250 ، 40300 ، 40350 ، 40400 ، 40450 ، 40500 ، 40550 ، 40600 ، 40650 ، 40700 ، 40750 ، 40800 ، 40850 ، 40900 ، 40950 ، 41000 ، 41050 ، 41100 ، 41150 ، 41200 ، 41250 ، 41300 ، 41350 ، 41400 ، 41450 ، 41500 ، 41550 ، 41600 ، 41650 ، 41700 ، 41750 ، 41800 ، 41850 ، 41900 ، 41950 ، 42000 ، 42050 ، 42100 ، 42150 ، 42200 ، 42250 ، 42300 ، 42350 ، 42400 ، 42450 ، 42500 ، 42550 ، 42600 ، 42650 ، 42700 ، 42750 ، 42800 ، 42850 ، 42900 ، 42950 ، 43000 ، 43050 ، 43100 ، 43150 ، 43200 ، 43250 ، 43300 ، 43350 ، 43400 ، 43450 ، 43500 ، 43550 ، 43600 ، 43650 ، 43700 ، 43750 ، 43800 ، 43850 ، 43900 ، 43950 ، 44000 ، 44050 ، 44100 ، 44150 ، 44200 ، 44250 ، 44300 ، 44350 ، 44400 ، 44450 ، 44500 ، 44550 ، 44600 ، 44650 ، 44700

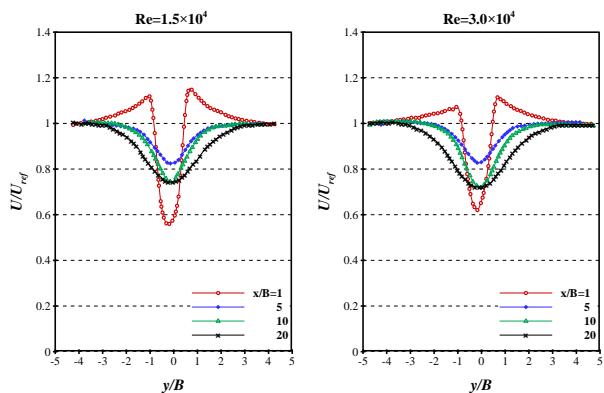
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۱/۲۱
۱	۲۱/۲	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۱/۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۱۰	۱۵۰۰۰	۰/۶۲
۲	۴۲/۴	۲۱/۲	۲۰	۳۰۰۰۰	۰/۶۱

۳- نتایج و بحث

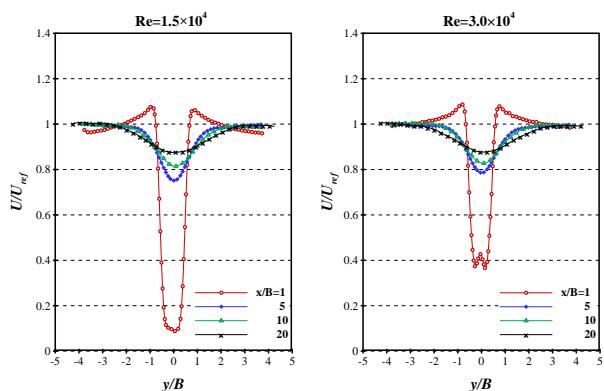
همان‌گونه که بیان شد، آزمایش‌ها در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ انجام شده است. ضریب نیروی پسا در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ برای استوانه دایره‌ای ۱/۲۱ و استوانه بیضوی ۰/۶۲ بوده و برای عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ به ترتیب برابر با ۱/۲ و ۰/۶۱ می‌باشد.

۳- بررسی پروفیل سرعت متواتط

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، بهمنظور اندازه گیری ضریب نیروی پسا از استوانه یا هر جسم دیگر، نیاز است که عبارت‌های اختلاف فشار، اختلاف مومنتوم و تنش‌های رینولدز اندازه گیری شوند که مجموع این سه عبارت برابر ضریب نیروی پسا از استوانه یا جسم موردنظر می‌باشد. برای اندازه گیری عبارت اختلاف مومنتوم، نیاز است که سرعت در ناحیه دنباله جسم (استوانه) اندازه گیری شود.

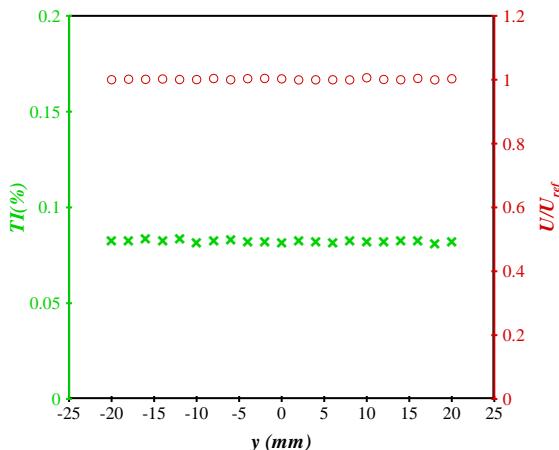


شکل ۵ پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد شده در فواصل مختلف پایین دست استوانه دایره‌ای.

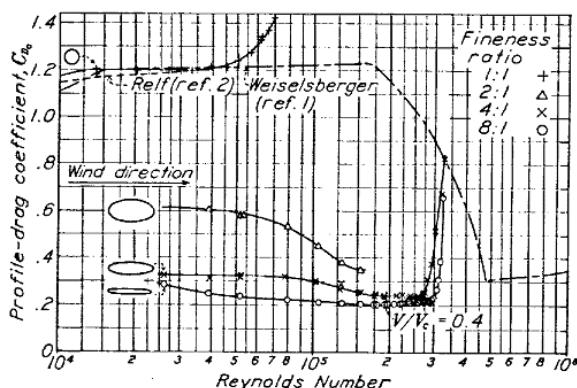


شکل ۶ پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد شده در فواصل مختلف پایین دست استوانه بیضوی.

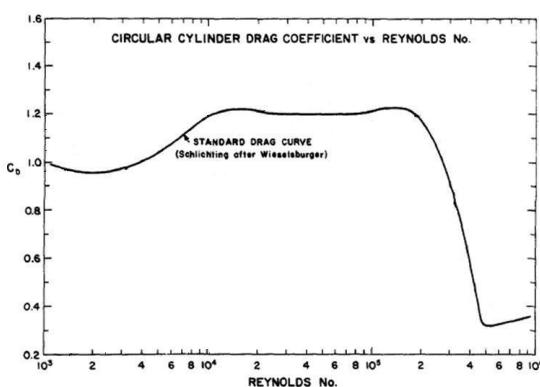
شکل‌های ۵ و ۶، سرعت‌های بی بعد شده در پایین دست استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی در فواصل بی بعد x/B برای اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و



شکل ۲ تغییرات سرعت بی بعد شده جریان هوا و شدت اختشاش‌های آن در امتداد افق آرمون، در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه.



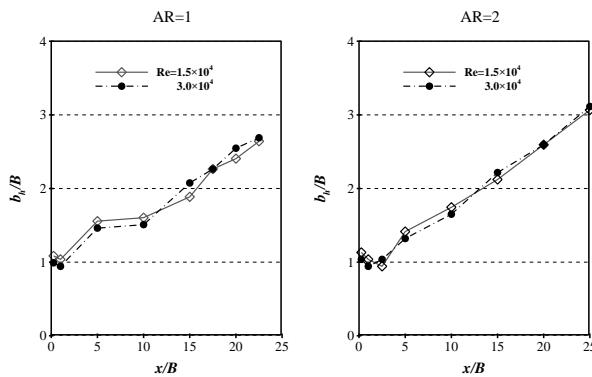
شکل ۳ تغییرات ضریب نیروی پسا بر حسب عدد رینولدز برای استوانه‌های بیضوی [۱۷].



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

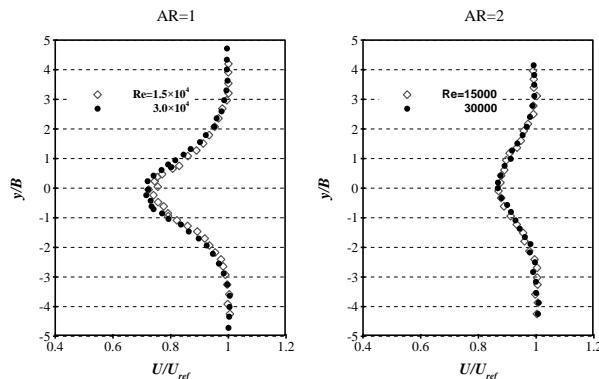
جدول ۱ مشخصات استوانه‌های مورد آزمایش و سرعت جریان هوا

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



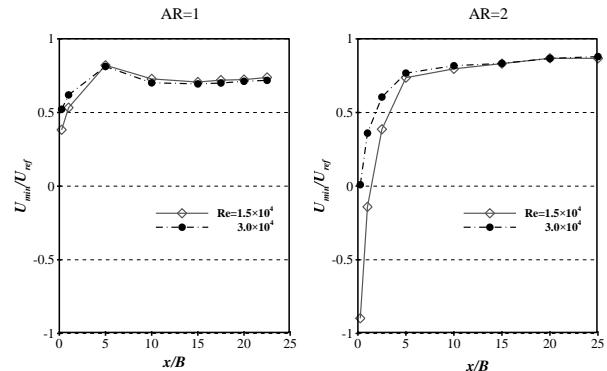
شکل ۸ توزیع پهنهای بی بعد شده ناحیه دنباله استوانه برای اعداد رینولذ مختلف.

شکل ۹، توزیع سرعت در فاصله $x/B=20$ ، در اعداد رینولذ 15000 و 30000 برای استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۹، در استوانه دایره‌ای نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای عدد رینولذ 30000 مقدار بزرگتر و پهنهای ناحیه دنباله در همان عدد رینولذ، بیشتر است. در نتیجه ضریب نیروی پسا برای عدد رینولذ 30000 مقدار کمتری خواهد بود. این موضوع با توجه به شکل ۴ توجیه‌پذیر است؛ اما در استوانه بیضوی نقصان سرعت در ناحیه دنباله برای دو عدد رینولذ تقریباً یکسان می‌باشد.

شکل ۹ پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد شده در فاصله 20 برابر قطر استوانه برای اعداد رینولذ مختلف.

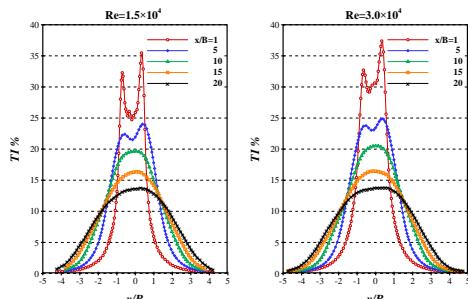
با توجه به شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان عبارت اختلاف مومنتوم در معادلات ۱ و ۵ را به دست آورد. توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم در پایین دست استوانه بر حسب x/B برای اعداد رینولذ مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰، مقدار ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم در فاصله‌های نزدیک به استوانه یا کمتر از $x/B=5$ ناچیز بوده و حدود سهمی کمتر از 5% ضریب نیروی پسای 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 ۳۰۰۰۰ رود ولی پهنهای ناحیه دنباله افزایش می‌یابد. در عدد رینولذ 30000 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 رینولذ 15000 و 30000 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 $7/20$ سرعت جریان آزاد و در استوانه بیضوی به مقدار حدود $1/8$ 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.

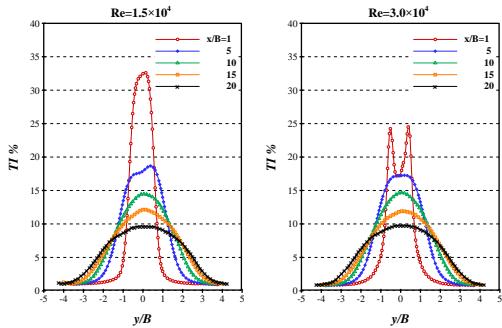


شکل ۷ تغییرات کمترین سرعت بی بعد شده در پایین دست استوانه برای اعداد رینولذ مختلف.

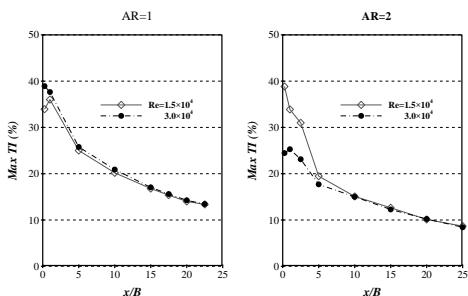
پهنهای ناحیه دنباله نیز اهمیت زیادی در اندازه‌گیری عبارت اختلاف مومنتوم دارد. شکل ۸، توزیع پهنهای ناحیه دنباله پایین دست استوانه را در اعداد رینولذ مختلف نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸، پهنهای ناحیه دنباله، با افزایش فاصله در پایین دست استوانه، افزایش می‌یابد. پهنهای ناحیه دنباله تا $x/B=15$ ، با شبی نسبتاً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



شکل ۱۱ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین دست استوانه دایره‌ای.

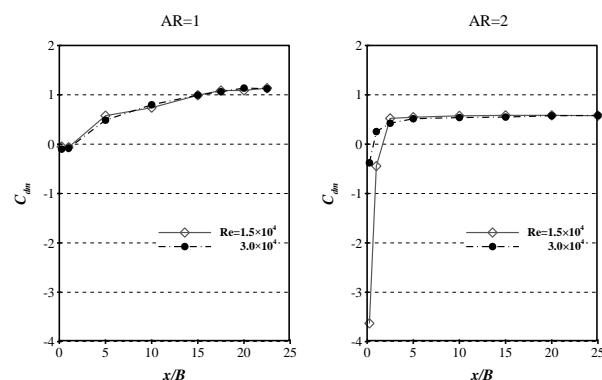


شکل ۱۲ توزیع شدت اغتشاش‌ها در فواصل مختلف پایین دست استوانه بیضوی.
شدت اغتشاش‌ها^۱ طبق رابطه $Tu = \sqrt{(u'^2)} / U_{ref}$ بیان می‌شود.
همانطور که مشاهده می‌شود، شدت اغتشاش‌ها در نزدیکی استوانه زیاد بوده و برای استوانه دایره‌ای تا حدود ۳۹٪ افزایش می‌یابد. اما در استوانه بیضوی شدت اغتشاش‌ها با افزایش عدد رینولز کاهش می‌یابد به طوری که در عدد رینولز ۱۵۰۰۰ حدود ۳۳٪ و در عدد رینولز ۳۰۰۰۰ حدود ۲۵٪ می‌یابد. در فواصل بسیار نزدیک به استوانه $x/B = 1$ ، شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله بیشینه نبوده ولی با افزایش پایین دست، $x/B > 10$ بیشینه مقدار شدت اغتشاش‌ها در مرکز ناحیه دنباله اتفاق افتاده و از شدت آنها کاسته می‌شود. بهمنظور بررسی دقیق تر تغییرات شدت اغتشاش‌ها در پایین دست استوانه، در شکل ۱۳، توزیع حداکثر شدت اغتشاش‌های جریان هوا در پایین دست استوانه برای اعداد رینولز مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱۳ توزیع حداکثر اغتشاش جریان هوا در پایین دست استوانه برای اعداد رینولز مختلف.

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



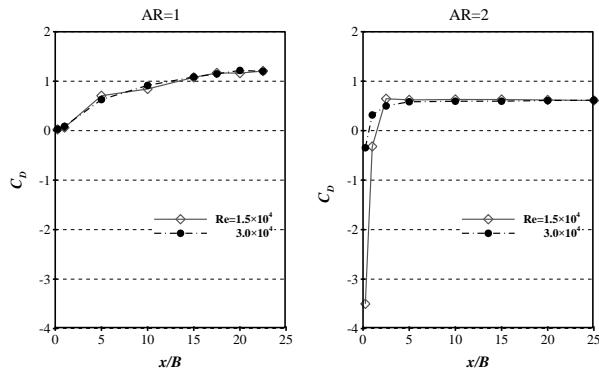
شکل ۱۰ توزیع ضریب نیروی پسای ناشی از اختلاف مومنتوم بر حسب فاصله در پایین دست استوانه برای اعداد رینولز مختلف.

با افزایش فاصله در پایین دست، مقدار ضریب نیروی پسای ناشی از مومنتوم افزایش یافته و در فاصله $x/B = 10$ ، این عبارت برای استوانه دایره‌ای معادل ۸۷٪ ضریب نیروی پسای 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 پسای می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، ضریب نیروی پسای ناشی از مومنتوم وابسته به عدد رینولز بوده به طوری که در عدد رینولز ۱۵۰۰۰ و در $x/B = 20$ ، برای استوانه دایره‌ای برابر ۱۰۸۹٪ و در عدد رینولز ۳۰۰۰۰ برابر ۱۱۳۷٪ می‌باشد و برای استوانه بیضوی در عدد رینولز ۱۵۰۰۰ و در $x/B = 20$ ، برابر ۵۷۶٪ و در عدد رینولز ۳۰۰۰۰ برابر ۵۸۴٪ می‌باشد که این موضوع بیان کننده تغییرات ضریب نیروی پسای با عدد رینولز بوده و با مقادیر ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱ هم خوانی دارد. عبارت مهم دیگر برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسای، عبارت تنش‌های رینولز می‌باشد.

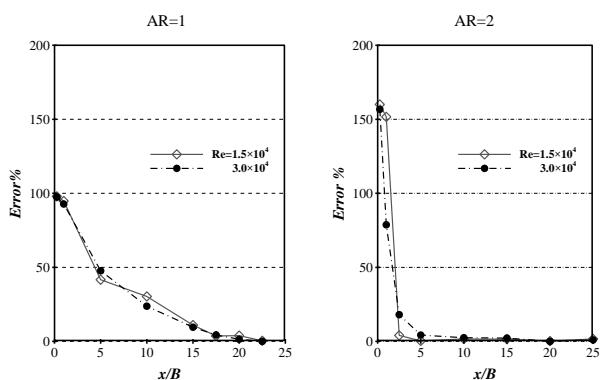
۲-۳- بررسی پروفیل شدت اغتشاش‌ها

طبق معادله ۳، عبارت تنش‌های رینولز اثر کاهنده روی ضریب نیروی پسای داردند. 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 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 رینولز را مطابق فرضیه گلدشتاین یا معادله ۴ مشخص نمود. بدین منظور توزیع شدت اغتشاش‌های جریان در فواصل مختلف پایین دست استوانه در اعداد رینولز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ برای استوانه دایره‌ای در شکل ۱۱ و برای استوانه بیضوی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

جريان 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 خطای حدود $1/15\%$ تا $1/4\%$ 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 پسا ناشی از تنش‌های رینولز در فواصل مختلف پایین دست برای اعداد رینولز مختلف.

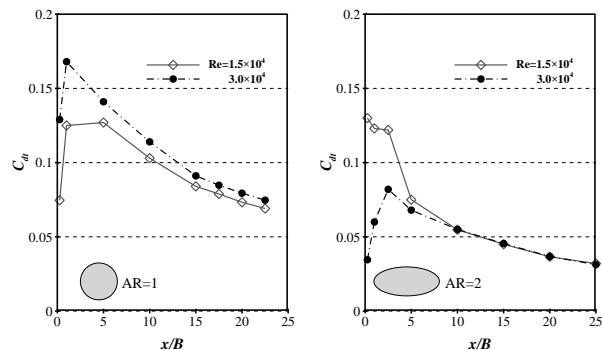


شکل ۱۶ خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا ناشی از استوانه در اعداد رینولز مختلف. با توجه به شکل ۱۶، می‌توان نتیجه گرفت هنگامی که شدت اغتشاش‌ها حدود 10% یا کمتر از آن باشد، خطای اندازه‌گیری نیز کمتر از 10% خواهد بود. همان‌گونه که بیان شد، برای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا، باید سه عبارت اختلاف مومنتوم، اختلاف فشار و تنش‌های رینولز 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 صورتی که بخواهیم تنها با استفاده از پراب یک‌بعدی 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 شبیه نسبتاً زیادی کاهش یافته و به حدود 14% می‌رسد. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست، این شبیه کاهش یافته و در $x/B = 25$ به حدود 10% کاهش می‌یابد. در استوانه بیضوی در عدد رینولز 15000 حداقل شدت اغتشاش‌ها حدود 39% و در عدد رینولز 30000 حدود 25% می‌باشد و با افزایش فاصله در پایین دست تا $x/B = 20$ شدت اغتشاش‌ها با شبیه نسبت زیادی کاهش یافته و به حدود 10% می‌رسد و در $x/B = 25$ به حدود 8% کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴، توزیع ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولز برای اعداد رینولز مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، مقدار ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولز 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 شبیه کمتری ادامه می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولز، ضریب نیروی پسا ناشی از تنش‌های رینولز در استوانه دایره‌ای افزایش می‌یابد اما در استوانه بیضوی کاهش می‌یابد. به طوری که مقدار آن در $x/B = 2$ حدود 794% خواهد بود و در استوانه بیضوی مقدار آن در $x/B = 5$ برابر 680% و در $x/B = 20$ حدود 368% می‌باشد.



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

۳- بررسی ضریب پسا

در این بخش به بررسی ضریب پسا در استوانه‌های دایره‌ای و بیضوی در اعداد رینولز 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 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 پایین دست به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. شکل ۱۶، خطای اندازه‌گیری ضریب نیروی پسا در پایین دست استوانه برای اعداد رینولز مختلف مخالفة مکان اندازه‌گیری بی‌بعد شده x/B را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۶، در صورتی که اندازه‌گیری‌های اختلاف مومنتوم و تنش‌های رینولز در فاصله $x/B = 1$ انجام شود، خطای حدود 92% برای استوانه دایره‌ای و حدود 80% برای استوانه بیضوی خواهیم داشت. این موضوع نشان دهنده آن است که اغتشاش‌های

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

۵- نتیجه‌گیری

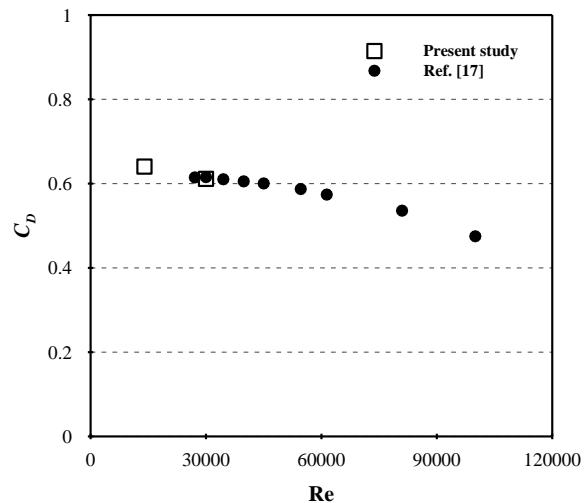
یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، اندازه‌گیری به روش اختلاف مومنتوم می‌باشد. در این روش با اندازه‌گیری توزیع سرعت و شدت اغتشاش‌های جریان سیال پایین دست مدل می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری نمود. در این مقاله جریان هوا پایین دست استوانه با سطح مقطع بیضوی و دایره‌ای، در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ به صورت تجربی و با استفاده از 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، پایین دست استوانه اندازه‌گیری شوند. با استفاده از لوله استاتیکی پیتوت، می‌توان فشار استاتیکی و سرعت جریان هوا را توانم 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 گلددشتاین، 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 بی بعد 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 ۷/۷۲ سرعت جریان آزاد و در استوانه بیضوی به مقدار حدود ۸/۰ سرعت جریان آزاد می‌رسد. با افزایش فاصله پایین دست مقدار آن تقریباً ثابت می‌ماند. پهنه‌ای ناحیه دنباله با افزایش فاصله بی بعد x/B در پایین دست استوانه و با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. افزایش پهنه‌ای ناحیه دنباله تا فاصله $x/B = 15$ با شبیه نسبتاً زیادی همراه است و پس از آن روند افزایش با شبیه کمتری ادامه می‌یابد.

ضریب نیروی پسا ناشی از عبارت اختلاف مومنتوم (در نظر نگرفتن فشار و تنش‌های رینولدز)، با افزایش فاصله بی بعد 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 خطاب 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 خطاب می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشاً 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 ۱۰٪ انجام شده است. خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت کمتر از ۳٪ می‌باشد. پس از کالیبره نمودن جریان‌سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چند جمله‌ای درجه ۵ برآش نموده که خطای آن نیز کمتر از ۵٪ خواهد بود. کارت A/D مورد استفاده ۱۲ بیتی بوده و بازه آن بین $+10^{\circ}\text{C}$ و -10°C ولت است و در صورتی که تطبیق دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کمتر از ۰/۰۵٪ می‌باشد. تغییرات دما تأثیر

علمائی یونانی

μ	لزحت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
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. Gholipour 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 ۵٪ از ضریب نیروی پسا استوانه را شامل می‌شود. با افزایش بیشتر فاصله در پایین دست این مقدار افزایش می‌یابد. به طوریکه در فاصله $x/B=10$, ضریب نیروی پسا ناشی از اختلاف مومنتوم برای استوانه دایره‌ای معادل ۰.۸۷٪ ضریب نیروی پسا و برای استوانه بیضوی معادل ۰.۹۱٪ می‌باشد. در فاصله ۲۰ برابر قطر استوانه، این مقدار برای استوانه دایره‌ای به حدود ۰.۹۳٪ و برای استوانه بیضوی به حدود ۰.۹۴٪ 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 ۰.۳۵٪ الی ۰.۳۹٪ و برای استوانه بیضوی برابر ۰.۲۵٪ الی ۰.۳۳٪ می‌باشد. با افزایش فاصله در پایین دست از شدت اغتشاش‌های جریان هوا کاسته می‌شود. تا فاصله حدود $x/B=20$ از شدت اغتشاش‌های تا مقدار زیاد کاسته شده و پس از آن روند کاهش با شبیه کمتر ادامه می‌یابد. در فاصله $x/B=25$ شدت اغتشاش‌ها حدود ۰.۸٪ بوده که بستگی به عدد رینولدز دارد.

استفاده از جریان سنج سیم داغ با پربا پیکبعدی 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 به دست آورد. هر چقدر شدت اغتشاش‌های جریان هوا کمتر باشد، فرض همگن بودن اغتشاش‌های آن صحیح‌تر است. هنگامی که از جریان سنج سیم داغ با پربا پیکبعدی استفاده شود، ضریب نیروی پسا اندازه‌گیری شده در فواصل کمتر از $x/B=5$ دارای خطای در حدود ۰.۶۵٪ تا ۰.۴۵٪ می‌باشد. در فاصله $x/B=20$ خطای اندازه-گیری حدود ۰.۱۵٪ تا ۰.۱۴٪ برای استوانه دایره‌ای و حدود ۰.۱۵٪ برای استوانه بیضوی می‌باشد. برای فواصل بزرگتر از $x/B=20$ این خطای به کمتر از ۰.۲٪ کاهش می‌یابد که در این شرایط حداقل شدت اغتشاش‌ها حدود ۰.۸٪ می‌باشد.

۶- فهرست علمائی

$$AR = A/B$$

طول مشخصه مدل

 $P_{s,e}$ فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله (pas) $P_{s,w}$ فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل (pas)

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, z τ_{xx} تنش برشی (Nm^{-2}) ρ' چگالی نوسانی (kgm^{-3})

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