

بررسی تجربی تأثیر دوران استوانه روی کاهش ضریب پسا با جریان سنج سیم داغ

عبدالمیر بک خوشنویس*
محمد جواد ایزدی یزدی

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

یک تحقیق تجربی بر روی استوانه‌ای به طول ۳۹۰ mm و قطر ۲۰ mm، در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا پروفیل‌های سرعت میانگین و سپس پروفیل‌های شدت اغتشاشات استوانه ثابت و چرخان (برای دورهای ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ rpm) در سه ایستگاه (۳۰، ۶۰، ۱۲۰ mm) پشت استوانه مورد بررسی قرار گرفته و مقایسه شده‌اند. به منظور بررسی سرعت میانگین و شدت اغتشاشات از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. همچنین به مقایسه‌ی عدد استروهل استوانه ثابت و چرخان پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش دور استوانه در یک عدد رینولدز ثابت، اگر جهت حرکت استوانه موافق جهت حرکت سیال باشد، عرض دنباله کوچک‌تر می‌شود و عدد استروهل دنباله مربوط به گردابه کارمن افزایش می‌یابد. در ایستگاه‌های ۱ و ۳ اغتشاشات استوانه چرخان بیشتر از استوانه ثابت و در ایستگاه دوم اغتشاشات استوانه ثابت بیشتر از چرخان است. مشخص شد که با افزایش سرعت دورانی استوانه پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت کاهش می‌یابند. با افزایش سرعت دورانی استوانه، ضریب پسا حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جریان‌سنج سیم داغ، استوانه‌ی ثابت و چرخان، دنباله جریان، ضریب پسا.

Experimental Investigation of the Effect of Reducing the Drag Coefficient on the Cylinder by Hot-Wire Anemometry

A. B. Khoshnevis

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

M. J. Ezadi Yzadi

M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Abstract

An experimental investigation on the cylinder having a length of 390 mm and a diameter of 20 mm at Reynolds number 18750 has been done. At the first, mean streamwise velocity profiles, then streamwise turbulence intensity profiles fixed and rotating circular cylinder (for spans 1000, 2000 and 3000 rpm) at three stations ($x=30, 60, 120$ mm) behind the cylinder are discussed and compared. In order to measure the mean velocity and turbulence intensity, the hot-wire anemometry has been used. Also, the Strouhal number of fixed and rotating cylinders is compared. The results show that by increasing the rotational speed at a constant Reynolds number, if the direction of the cylinder is the agree of the fluid movement, the width of wake becomes smaller, and the Strouhal number of the wake associated with the Karman vortex increases. At the stations of 1 and 3 turbulences the rotating cylinder is more than the fixed cylinder, and the second station turbulences fixed cylinder is more than the rotating cylinder. It is found that by increasing the rotational speed, the parameters of drag coefficient and velocity defect reduce. By increasing the rotational speed, the drag coefficient reduced by about 10%.

Keywords: Hot-Wire Anemometry, Fixed and Rotating cylinder, Flow wake, Drag coefficient.

۱- مقدمه

جریان اطراف یک استوانه چرخان یکی از مسائل اساسی در زمینه مهندسی است و تحقیقات متعددی در این زمینه وجود دارد. بررسی آیرودینامیک استوانه‌ها از صد سال قبل مورد مطالعه قرار گرفته است. جریان لزج غیرقابل تراکم اطراف یک استوانه دایره‌ای از مسائل کلاسیک مکانیک سیالات بشمار می‌رود و علیرغم هندسه ساده، جریان حول آن بسیار پیچیده است. به خصوص در اعداد رینولدز بالا که حل عددی معادلات حرکت به آسانی به دست نمی‌آیند. از این رو هنوز هم فهم تجربی و توصیفی جریان حول استوانه مورد نیاز است. بعلاوه ارتباط این موضوع با مسایل مهندسی و اهمیت فهم اساسی جریان سیال، تحقیقات آزمایشگاهی و عددی جریان عبوری از استوانه دایره‌ای، یک حوزه فعال و پویا برای محققان بشمار می‌رود. با توجه به قدمت ۱۰۰ ساله بررسی جریان حول استوانه، هنوز هم تعیین درست نیروی پسا یکی از مسایل اساسی در جریان حول استوانه می‌باشد. بنابراین برای مسایل آیرودینامیک استوانه نیاز به انجام آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

از نتایج این آزمایش‌ها می‌توان در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی، ساخت آسمان خراش‌ها، ستون پل‌ها، دودکش‌ها و دکل‌های مخابراتی و... استفاده کرد.

از آنجایی که در مسایل آیرودینامیک هدف نهایی به دست آوردن ضریب پسا است، اکثر کارهای انجام شده در رابطه با پیدا کردن این پارامتر است. از آن جمله می‌توان به تحقیق لوپس [۱] اشاره کرد که روش عددی ساده و کوتاه‌تری را برای به دست آوردن ضریب پسا معرفی کرد. باشلور [۲] نشان داد که ضریب پسا برای استوانه دایره‌ای به عدد رینولدز بستگی دارد. ایتون [۳] به مطالعه سه‌بعدی دنباله پشت استوانه دایره‌ای پرداخت و گردابه‌های کوچک ایجاد شده در دنباله را مورد بررسی قرار داد. محفوظ و بدر [۴] به بررسی گردابه‌های متناوب تشکیل شده حول استوانه دایره‌ای که دارای حرکت نوسانی است، پرداخت. ساویل [۵] به بررسی دنباله استوانه چرخان در کانال منحنی شکل پرداخت که در تحقیق‌های انجام گرفته کانال دارای انحنای ۹۰ درجه و عدد رینولدز ۶۵۰۰ بود.

از تحقیق‌های کاربردی که در این زمینه انجام شده است می‌توان به تحقیق لین [۶] اشاره کرد که به بررسی عددی تأثیرات جزر و مد بر روی ستون اسکلت‌های حفاری در دریا پرداخت.

پس از آنکه پرائنتل [۷] در تحقیق خود به بررسی اثرات چرخش استوانه بر روی جدائی لایه مرزی پرداخت، افراد بسیاری این موضوع را به‌صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. چرخش استوانه به علت حرکت سطوح بالایی و پایینی آن باعث ایجاد تغییرات زیادی در مشخصه‌های دنباله جریان می‌شود. این

تغییرات، پروفیل سرعت میانگین، پروفیل شدت اغتشاش‌ها، عدد استرووال، ضریب پسا، زاویه جدائی و ... را در بر می‌گیرد. کووانسی [۸] از روش جریان‌سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری الگوی مسیر گردابه‌های ایجاد شده پشت استوانه در اعداد رینولدز پایین استفاده کرد. وی مشاهده کرد که مقدار رینولدز بحرانی برای گردابه‌ها ۴۰ می‌باشد و نیز دریافت که در بازه‌ای از اعداد رینولدز، گردابه‌ها مستقیماً از سطح استوانه تشکیل نمی‌شوند و در فاصله‌ای کمی دورتر از استوانه به‌صورت ناپایدار تشکیل می‌شوند.

تاندا [۹] به بررسی آزمایشگاهی جریان اطراف استوانه چرخان عمود بر جریان سیال پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که چرخش استوانه باعث تغییرات مشخصی در دنباله استوانه و کاهش در نیروی برآ می‌شود.

میسون و همکاران [۱۰] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دنباله استوانه ثابت و چرخان پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بیشتر برای به دست آوردن فرکانس‌های خارج شونده از استوانه ثابت و چرخان معطوف کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دور استوانه عدد استرووال افزایش می‌یابد.

بارنز [۱۱] به بررسی تجربی دنباله استوانه چرخان در اعداد رینولدز پایین پرداخت. وی نتایج کار خود را با مقادیر به دست آمده از نتایج عددی کانگ و همکارانش [۱۲] و هو و همکارانش [۱۳] مقایسه کرد. وی از نتایج به دست آمده از آزمایش‌های خود، مشاهده کرد که مقدار عدد استرووال با تغییر نسبت سرعت تغییر بسیار اندکی می‌کند.

دوول و همکاران [۱۴] در تحقیق خود به بررسی آزمایشگاهی دنباله استوانه چرخان پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از جریان‌سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده کردند. آن‌ها بررسی‌هایی درباره فواصل گردابه‌های خارج شده از استوانه انجام دادند.

میتال [۱۵] با استفاده از روش المان محدود، ناپایداری‌های دنباله ناشی از استوانه دایره‌ای چرخان را مورد بررسی قرار داد و نمودار ضرایب پسا و برآ را در شرایط فوق به دست آورد. وی در نتایج به دست آمده مشاهده کرد که دو ناحیه ناپایدار در دنباله استوانه چرخان مشاهده می‌شود. اولین ناپایداری در نسبت سرعت ۱/۹۱-۰ و دومین ناپایداری در نسبت سرعت ۴/۳۷-۴/۷۵ مشاهده شد که در این دو ناحیه ضریب پسا و ضریب برآ مقدار ثابتی ندارند. علاوه بر این، در نتایج به دست آمده میتال مشاهده شد که مقدار ضریب برآ با افزایش نسبت سرعت، کاهش یافته ولی ضریب پسا با افزایش مقدار نسبت سرعت ابتدا کاهش و سپس در نسبت سرعت حدود ۳/۵ افزایش می‌یابد.

دایریخ و همکاران [۱۶] به بررسی تجربی جریان اطراف یک استوانه چرخان توسط دستگاه جریان‌سنج سیم داغ پرداختند. در

خودشان را از نسبت سرعت ۰ تا ۱٫۹۵ آغاز می‌کنند و بعد از آن نیز متوقف می‌شوند.

سجودی و همکاران [۲۳]، به بررسی جریان یک سیال غیر نیوتنی در رژیم آرام حول یک استوانه چرخان پرداختند. شبیه‌سازی جریان سیال غیر نیوتنی با استفاده از مدل توانی^۱ انجام گرفت و در آن به بررسی تغییرات پارامترهایی از قبیل رفتار جریان سیال غیر نیوتنی، سرعت چرخش استوانه و عدد رینولدز ورودی پرداختند و وابستگی شدید انتقال گرما و هیدروپدینامیک جریان سیال به پارامترهای مذکور را به ثبت رساندند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش عدد رینولدز، میزان انتقال گرما و ضریب پسا افزایش می‌یابند.

اسوانسون [۲۴]، به بررسی تجربی ضریب پسا و ضریب برآ در محدوده اعداد رینولدز از ۱۰۰۰۰۰-۱۰۰۰۰۰ پرداخت. گلاثر [۲۵] دنباله استوانه چرخان را برای اعداد رینولدز بالا و دوره‌های پایین مورد بررسی قرار داد. بدر و دنیس [۲۶] اولین حل عددی را برای معادلات ناویر استوکس دو بعدی ارائه دادند.

رشید [۲۷] در پایان‌نامه دکترای خود به بررسی کاربرد صنعتی دنباله استوانه چرخان در کلاهدک دودکش‌ها برای دوره‌های ۵ تا ۲۰۰۰ پرداخت و ضریب پسا، برآ و پروفیل سرعت میانگین را برای حالت‌های مختلف به دست آورد.

خوشنویس و همکاران [۲۸]، به بررسی تجربی کاهش ضریب پسای سیال روی یک استوانه دایره‌ای به وسیله سیم اغتشاش ساز پرداختند. آن‌ها دو سیم را در زوایای ۴۰ و ۱۴۰ درجه بر روی سطح استوانه نصب کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰، حالت بهینه‌ای وجود دارد که در آن ضریب پسای عامل بر روی استوانه به مقدار کمتری از ضریب پسای استوانه صاف می‌رسد.

غضنفریان و نوبری [۲۹] به مطالعه‌ی جریان تراکم‌ناپذیر لزج دو بعدی حول یک استوانه چرخان با جریان عرضی نوسانی پرداختند. به منظور حل معادلات حاکم، شامل معادلات ناویر-استوکس و پیوستگی از روش المان محدود استفاده کردند. نشان داده شد که با افزایش سرعت دورانی استوانه، ضریب برآ افزایش درحالی که ضریب پسا کاهش می‌یابد.

در این تحقیق به بررسی دو بعدی دنباله تشکیل شده پشت استوانه دایره‌ای چرخان پرداخته شده است. در تحقیق حاضر از روش تجربی جریان‌سنج سیم داغ در یک تونل باد استفاده شده است. اثرات نسبت سرعت بر روی شدت اغتشاشات ایجاد شده در دنباله‌ی پشت استوانه و پروفیل سرعت میانگین برای استوانه چرخان در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ بررسی شده‌اند. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، نوآوری کار حاضر بررسی

آزمایش‌های آن‌ها جریان حول استوانه، ساکن و اثرات چرخش بر روی استوانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده شامل تغییرات ضریب اصطکاک، سرعت و اغتشاش‌ها در جهت شعاع استوانه بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دور استوانه، ضریب اصطکاک و تنش برشی بر روی سطح استوانه افزایش می‌یابند.

آکوی و ایتو [۱۷]، به بررسی تجربی و عددی ویژگی‌های جریان اطراف یک استوانه چرخان پرداختند. هدف آن‌ها بررسی نیروهای برآ و پسا، عدد استروهل و الگوهای جریان پشت استوانه بر حسب نسبت سرعت چرخشی بود.

تاناکا و ناگانو [۱۸]، به بررسی میدان جریان و اندازه‌گیری نیروی آیرودینامیکی در یک استوانه دایره‌ای چرخان که عمود بر جریان و در نزدیکی عدد رینولدز گذرا قرار گرفته بود، پرداختند. در یک عدد رینولدز دورانی خاص، تغییرات قابل توجهی در الگوی دنباله جریان مشاهده کردند.

پادرینو و جوزف [۱۹] در تحقیق خود به بررسی عددی جریان حول استوانه چرخان پرداختند. این تحقیق با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی برای جریان دو بعدی، غیر قابل تراکم و ناپایدار حول استوانه چرخان انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخش استوانه باعث تغییراتی در مقادیر ضریب پسا، برآ و توزیع فشار استوانه می‌شود.

کارابلاس [۲۰]، به بررسی جریان یکنواخت حول یک استوانه چرخان در عدد رینولدز ۱۴۰۰۰۰ بر اساس شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ پرداخت. در این تحقیق استوانه چرخان با نسبت چرخش‌های مختلفی از $\lambda = 0-2$ مورد آزمایش قرار گرفت که در آن λ به صورت نسبت سرعت محیطی استوانه به سرعت جریان آزاد تعریف شده است ($\lambda = U_{\theta}/U_{ref}$). نشان داد که هر چه قدر نسبت چرخش افزایش یابد، پسای میانگین کاهش می‌یابد.

مبینی و نیازی [۲۱] جریان آشفته عبوری از یک استوانه دایره‌ای چرخان را در پنج عدد رینولدز مختلف و پنج نسبت سرعت چرخشی مختلف با استفاده از روش عددی بررسی کردند. از روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ با استفاده از مدل مقیاس زیر شبکه اسمانگورینسکی برای این منظور استفاده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که نیروی پسا هم با افزایش نسبت چرخش و هم افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد؛ اما نیروی برآ با افزایش نسبت چرخش، افزایش و با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. همچنین اندازه گردابه‌های تشکیل شده پشت استوانه با افزایش نسبت چرخش و افزایش عدد رینولدز افزایش می‌یابد.

کومار و همکاران [۲۲]، به مطالعه تجربی جریان حول یک استوانه دایره‌ای چرخان پرداختند. آزمایش‌ها در یک تونل آب انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که جدائی گردابه‌ها فعالیت

¹ Non-Newtonian power law

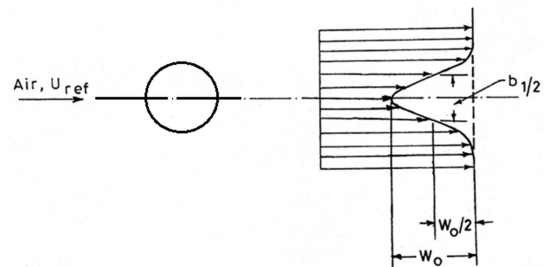
شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ و نسبت سرعت‌های مختلف می‌باشد.

۲- پارامترهای مورد بررسی

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

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

پارامترهای نقصان سرعت (W_0) و نصف دنباله در نصف عرض ($b_{1/2}$) در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱- پارامترهای نقصان سرعت (W_0) و عرض دنباله ($b_{1/2}$)

پارامتر نقصان سرعت از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

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

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

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

نسبت انسداد، قطر استوانه تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد تعریف می‌شود. اگر برای استوانه دایره‌ای نسبت انسداد را کمتر از ۰/۰۵ انتخاب کنیم، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. برای مثال طبق تحلیل ماکسل^۱ [۳۰] با انتخاب نسبت انسداد ۰/۰۵، مقدار ضریب پسا کمتر از ۳ درصد خطا خواهد داشت. با توجه به مشخصات تونل باد و استوانه، نسبت انسداد در آزمایش‌های فوق ۰/۰۵ درصد می‌باشد که تأثیری در نتایج به دست آمده نمی‌گذارد:

$$(blockage\ ratio)\ \beta = \frac{D}{H} = 0.05 \quad (4)$$

همچنین اگر نسبت منظری را طول استوانه تقسیم بر قطر استوانه تعریف کنیم، با توجه به ابعاد استوانه در این آزمایش‌ها مقدار نسبت دید ۲۰ می‌باشد. با توجه به تحقیقات منتشر شده در این زمینه، نسبت دید در آزمایش‌ها را معمولاً بیشتر از ۲۰ در

نظر می‌گیرند که با توجه به مقدار ضریب پسا در این تحقیق، پارامتر نسبت دید هم مناسب بوده و تأثیری بر نتایج نخواهد داشت:

$$(aspect\ ratio)\ \beta = \frac{L}{D} = 20 \quad (5)$$

برای بررسی بیشتر می‌توان به تحقیق ویلیامسن [۳۱] رجوع کرد.

برای عمومیت بخشیدن به نتایج حاصل از آزمایش‌ها باید پارامترهای استفاده شده در آزمایش‌ها را بی‌بعد کنیم. برای بی‌بعد کردن مشخصه سرعت دورانی استوانه، پارامتر λ را به صورت زیر معرفی می‌کنیم:

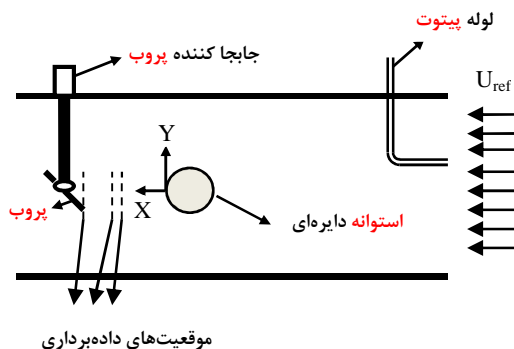
$$\lambda = \frac{U_n}{U_{ref}} = \frac{D\omega}{2U_{ref}} \quad (6)$$

۳- تجهیزات آزمایشگاهی و شرایط محیطی

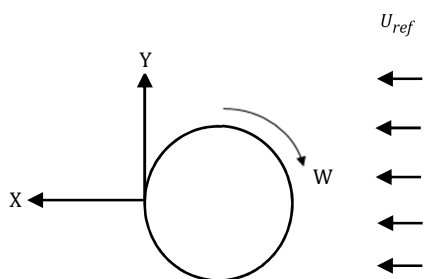
تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدار باز و دمشی بوده که دارای اتاقک آزمایشی از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸cm، عرض ۴۰cm و ارتفاع ۴۰cm می‌باشد. دستگاه سرعت‌سنج سیم داغ یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این دستگاه، کاربرد آن انجام آزمایش جریان‌های آشفته گاز و یا هوا می‌باشد. سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت است که توانایی اندازه‌گیری سرعت میانگین، اغتشاشات و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه را دارد. در شکل ۲ میزان اغتشاشات جریان ورودی در اتاقک آزمون در شرایط آزمایش کمتر از ۰/۱ درصد اندازه‌گیری شده است. طرحواره‌ای از محفظه آزمایش و نحوه‌ی داده‌برداری و ثبت داده‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ نمایش داده شده است. پروب یک‌بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای حسگری به طول ۱/۲۵mm و قطر ۵μm می‌باشد. برای حرکت پروب در نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پروب ۰/۰۱mm است. استوانه استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس پلکسی‌گلاس بوده و دارای طول ۳۹۰mm و قطر ۲۰mm می‌باشد. به علت استفاده از پلکسی‌گلاس در ساخت این مدل، از اثرات زبری سطح در نتایج آزمایش‌ها صرف نظر شده است. برای چرخش استوانه از یک موتور تک فاز با قدرت ۲/۲kw استفاده شده است که دارای سرعت ماکزیمم ۱۴۵۰rpm می‌باشد.

در این تحقیق تجربی، آزمایش‌ها در دماهای تقریباً یکنواخت هوای محیط انجام شده است. تغییرات دما در حدود ± 2 درجه سلسیوس بوده که این شرایط به همراه تهویه‌ی هوای جریان چرخشی به درون کانال، موجب ایجاد تغییرات دمایی اندک به میزان کمتر از ± 0.2 درجه سلسیوس در هنگام اندازه‌گیری و در حدود ± 0.5 در طی کالیبره کردن پروب جریان‌سنج سیم داغ

¹ Maskell



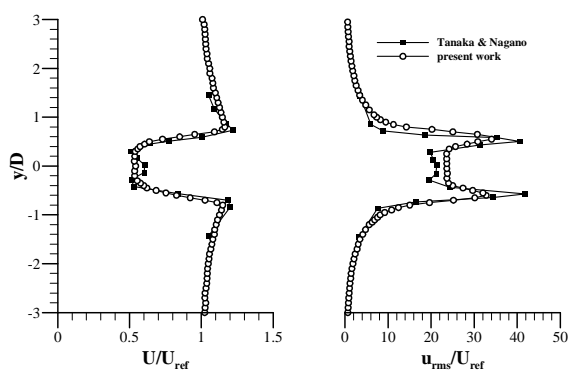
شکل ۴- طرحواره‌ای از نحوه‌ی داده برداری و ثبت داده‌ها



شکل ۵- جهت چرخش استوانه در اتاق آزمون

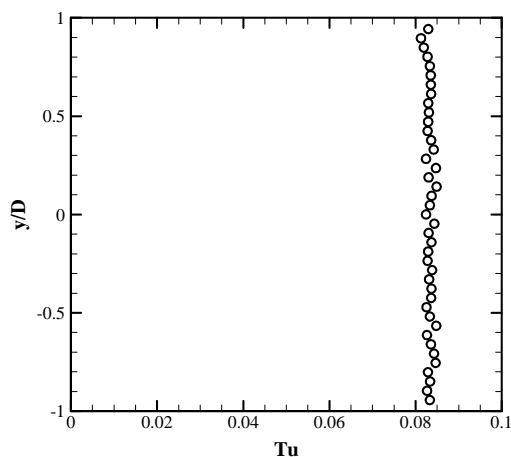
۴- اعتبارسنجی

در ابتدا، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ، پروفیل بی‌بعد سرعت میانگین و شدت اغتشاش کار حاضر در $\lambda = 0$ (استوانه ثابت) و $x = 30 \text{ mm}$ در عدد رینولدز 18750 و نتایج تحقیق تاناکا و ناگانو [۱۸]، در $\lambda = 0$ و $x = 29 \text{ mm}$ در عدد رینولدز 97000 در شکل ۶ مقایسه شده‌اند.

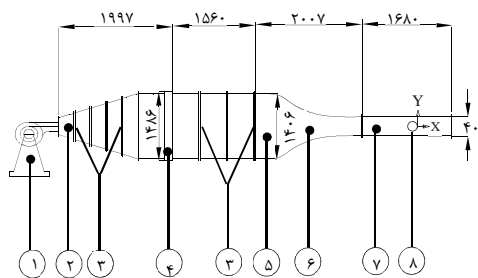


شکل ۶- مقایسه‌ی (الف) پروفیل بی‌بعد سرعت میانگین و (ب) شدت اغتشاش برای نتایج مطالعه حاضر و نتایج تاناکا و ناگانو [۱۸]

شده است. برای بررسی دنباله استوانه چرخان، پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاشات برای سه موقعیت طولی در پشت استوانه اندازه‌گیری و در نهایت ضریب پسا محاسبه شده است. نتایج برای سه حالت دوران استوانه و در عدد رینولدز 18750 نشان داده شده است. عدد رینولدز بر اساس قطر استوانه و سرعت جریان آزاد محاسبه شده $(Re = U_{ref} \cdot D / \nu)$ و دورهای استوانه به ترتیب 1000 ، 2000 و 3000 دور بر دقیقه انتخاب شده‌اند. با توجه به قطر و سرعت دورانی استوانه، سرعت‌های خطی استوانه چرخان در آزمایش‌های انجام گرفته 1.035 ، 2.094 و 3.141 متر بر ثانیه می‌باشند. داده برداری برای سه موقعیت طولی 3 ، 6 ، 1.5 و $x/d = 1.5$ برای ارتفاع $y/d = (-3, +3)$ انجام شده است. شکل ۵ جهت محوره‌های x و y و جهت چرخش استوانه را نشان می‌دهد.



شکل ۲- شدت اغتشاش‌ها در اتاق آزمون

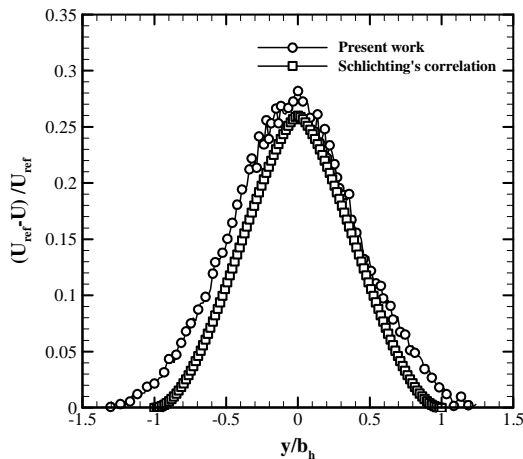


شکل ۳- تونل باد دمیده مورد استفاده در آزمایش شامل اجزاء: ۱- فن سانتریفیوژ ۲- دیفیوزر ۳- توری ۴- اتاق آرامش ۵- لانه زنبوری ۶- نازل ۷- اتاق آزمون ۸- مدل مورد استفاده (مقیاس به میلی‌متر)

همچنین نتایج پروفیل سرعت میانگین با رابطه ارائه شده توسط شلختینگ^۱ [۳۲]:

$$\left(\frac{U_{ref} - U}{U_{ref}} = 0.26 \left(1 - \left(\frac{y}{b_h} \right)^2 \right)^2 \right) \quad (7)$$

در شکل ۷ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که فرمول فوق با جایگزینی مقادیر بدست آمده از آزمایش حاضر ($x = 450 \text{ mm}$ و $C_D = 1.28$) بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتیجه کار حاضر با رابطه شلختینگ [۳۲] وجود دارد.



شکل ۷- پروفیل سرعت برای دنباله استوانه.

۵- بحث و بررسی نتایج

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق به بررسی دنباله استوانه چرخان در سه موقعیت طولی مختلف و در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ و دوره‌های استوانه ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ پرداخته شده است.

۵-۱- بررسی پروفیل سرعت میانگین

در این سری از آزمایش‌ها به بررسی پروفیل سرعت میانگین در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ و نسبت سرعت‌های مختلف دوران استوانه پرداخته شده است.

با توجه به سرعت هوا و سرعت خطی استوانه، نسبت سرعت λ در این آزمایش‌ها، ۰، ۰/۰۶۹، ۰/۱۳۹۶، ۰/۲۰۹۴ تعیین می‌شود.

نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۸ نمایش داده شده است.

در شکل ۸ پروفیل سرعت میانگین به ازای λ های متفاوت و در موقعیت‌های ۳، ۶، ۸ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که دوران استوانه باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت میانگین می‌شود. دوران

استوانه باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌گردد که با افزایش سرعت دورانی استوانه این تغییرات بیشتر و مشهودتر می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، پروفیل‌های سرعت با توجه به طبیعت متغیر و غیردائم مؤلفه‌های نوسانی سرعت، در طول یک دوره تناوب متقارن می‌باشند. همان‌طور که می‌دانیم، گردابه‌ها به‌صورت لحظه‌ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده ولی با توجه به شکل ۸، حتی در مقاطع اولیه نزدیک به استوانه هم پروفیل‌های سرعت میانگین رسم شده، کاملاً متقارن می‌باشند. توجه این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه‌ها در پشت استوانه لحظه‌ای بوده و به‌صورت تکراری در طول دوره تناوب خود تکرار می‌شوند. حال اگر زمان داده‌برداری در یک نقطه از زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها بیشتر باشد، می‌توان با محاسبه میانگین زمانی سرعت در نقاط مورد نظر، سرعت میانگین در هر نقطه را به دست آورد که اثرات نامتقارن بودن سرعت‌های لحظه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. در شکل ۸ زمان داده‌برداری تقریباً ۵۰۰ برابر زمان تناوب تشکیل گردابه‌ها می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت استوانه، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می‌یابد که در نهایت پروفیل سرعت میانگین یکنواخت‌تر می‌شود. در فاصله‌های نزدیک استوانه به علت وجود جدائی و جریان‌های برگشتی، افت جریان بیشتر می‌شود که با دور شدن از مدل، افت جریان کمتر شده و در داخل دنباله یکنواخت‌تر می‌شود.

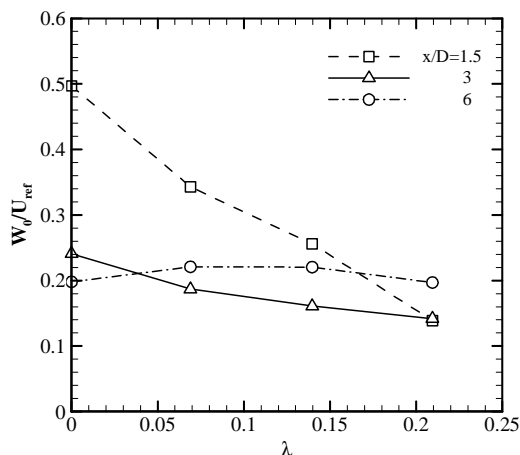
در ایستگاه اول (دقیقاً پشت مدل) به دلیل کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل به وجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از دنباله به جریان پتانسیل در بالا و پایین مدل شدید است؛ به عبارت دیگر سرعت در بالا و پایین مدل گرادیان شدیدی پیدا می‌کند و U/U_{ref} از حدود ۰/۵۱ تا ۱/۲ تغییر می‌کند (U_{ref} سرعت جریان آزاد یا سرعت مرجع است). به تدریج با دور شدن از مدل این گرادیان از بین می‌رود (شکل ۸ را ببینید).

نکته قابل توجه دیگری که در موقعیت $x/d=1/5$ مشاهده می‌شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل‌های سرعت مقاطع نزدیک به مدل می‌باشد. علت این مطلب را می‌توان در مومنوم لایه مرزی ایجاد شده بر سطوح مدل دانست. بدین صورت که در مقاطع نزدیک به مدل، مومنوم موجود در لایه مرزی تشکیل شده بر روی سطوح سیلندر، با از بین رفتن لایه مرزی باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نهایت افزایش سرعت آن‌ها می‌شود که این مطلب در مقاطع دورتر پشت مدل اثر خود را از دست داده و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی‌باشد.

همان‌طور که در نمودار پروفیل سرعت میانگین مشاهده می‌کنیم، مقدار سرعت در داخل دنباله با افزایش فاصله از استوانه

¹ Schlichting

استوانه کاهش این پارامتر نیز کمتر می‌شود. در موقعیت $x/d=6$ با افزایش سرعت دورانی استوانه پارامتر نقصان سرعت بسته به مقدار λ افزایش می‌یابد. در ایستگاه اول ($x/D=1/5$) اثرات دوران استوانه بسیار مشهود است اما با دور شدن از مدل اثر دوران با نرخ کمتری مشاهده می‌شود.



شکل ۹- نمودار نقصان سرعت در نسبت‌های سرعت مختلف برای

$$Re = 18750$$

۵-۲- بررسی شدت اغتشاش‌ها

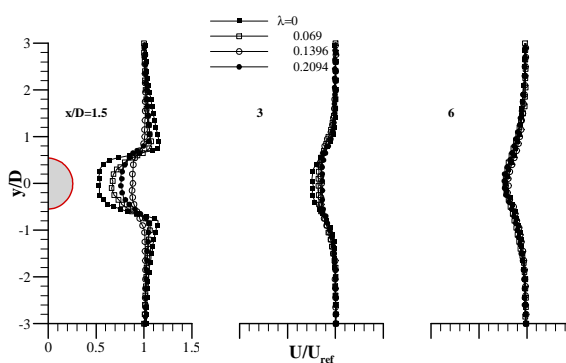
در این سری از آزمایش‌ها به بررسی اغتشاشات در اعداد رینولدز ۱۸۷۵۰ و نسبت سرعت‌های مختلف پرداخته شده است. در شکل ۱۰ نمودار شدت اغتشاشات به ازای λ های متفاوت در ۶، ۳، $x/d=1/5$ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دوران استوانه، شدت اغتشاشات دنباله افزایش می‌یابند. با توجه به نمودار شدت اغتشاشات، افزایش سرعت دوران استوانه باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در اغتشاشات داخل دنباله می‌شود. همچنین در سرعت‌های دورانی مختلف مشاهده می‌گردد که نمودار شدت اغتشاشات دارای دو مقدار حداکثر در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در نسبت‌های سرعت بالاتر (0.2094 و 0.1396) در پروفیل شدت اغتشاشات علاوه بر دو مقدار حداکثر قبلی، یک مقدار حداکثر دیگر در مرکز دنباله روی می‌دهد که ناشی از تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت استوانه می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌کنیم پروفیل شدت اغتشاشات دارای دو ناحیه اکسترمم در روی مرز دنباله می‌باشد که با دور شدن از استوانه این نقاط یکنواخت‌تر شده و اکسترمم‌ها از بین می‌روند. همچنین در این نواحی شاهد بیشینه تنش برشی هستیم که در خارج از مرکز دنباله روی می‌دهد. نکته مهم دیگر در این نمودارها این است که با افزایش فاصله از استوانه، شدت اغتشاشات در

ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. این نقطه در حوالی موقعیت $x/d=6$ روی می‌دهد. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدائی جریان از موقعیت‌های ابتدایی به موقعیت‌های انتهایی داده‌برداری دانست. همچنین نتایج نشان می‌دهند که دوران استوانه باعث انتقال پروفیل سرعت میانگین در جهت محور y می‌شود که این پدیده به علت هم جهت بودن سرعت سطح پایینی سیلندر و غیر هم جهت بودن سطح بالایی سیلندر نسبت به جهت جریان هوا می‌باشد که باعث انتقال پروفیل سرعت میانگین به سمت مثبت محور y شده است.

پروفیل‌های سرعت میانگین در موقعیت $x/d=3$ برای نسبت‌های سرعت مختلف نتایج به دست آمده برای موقعیت $x/d=1/5$ را تأیید می‌کند. در این موقعیت نیز با افزایش نسبت سرعت λ ، سرعت در داخل دنباله افزایش می‌یابد و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود.

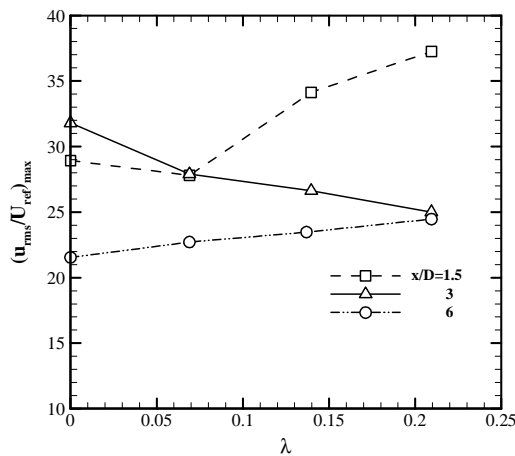
در موقعیت $x/d=6$ ، پروفیل‌های سرعت میانگین مشابه می‌باشند و تفاوت‌های موجود در دو موقعیت قبل در اینجا مشاهده نمی‌شود. در این موقعیت به نظام مشخصی برای پروفیل‌های سرعت میانگین در دورهای مختلف برخورد نمی‌کنیم. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدایی از موقعیت‌های ابتدایی به موقعیت‌های انتهایی داده‌برداری دانست. این موضوع به علت وضعیت خاص موقعیت $x/d=6$ می‌باشد که در این موقعیت، پروفیل‌های سرعت میانگین تغییر روند می‌دهند.



شکل ۸- توزیع پروفیل سرعت میانگین در نسبت سرعت‌های مختلف

$$Re = 18750$$

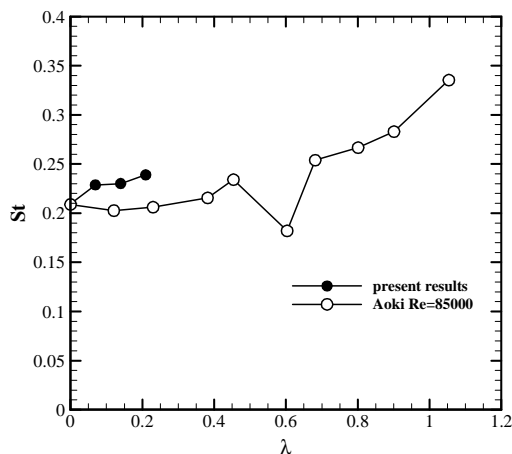
در شکل ۹ نمودار پارامتر نقصان سرعت برحسب λ در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در موقعیت‌های ۳ و $x/d=1/5$ ، با افزایش λ پارامتر نقصان سرعت کاهش می‌یابد که البته با دور شدن از



شکل ۱۱- تغییرات بیشینه شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re=18750$

۵-۳- بررسی عدد استروهاال

همان‌طور که در مشخصات دستگاه جریان‌سنج سیم داغ گفته شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج شونده از استوانه می‌باشد که با استفاده از آن و سرعت سیال و قطر استوانه می‌توان عدد استروهاال را به دست آورد. برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت استوانه باید پروب را در محل مناسبی قرار داده و سپس فرکانس را به دست آورد. در شکل ۱۲ تغییرات عدد استروهاال برحسب λ نشان داده شده است. نتیجه به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی استوانه فرکانس گردابه کارمن افزایش یافته که منجر به افزایش عدد استروهاال می‌گردد.

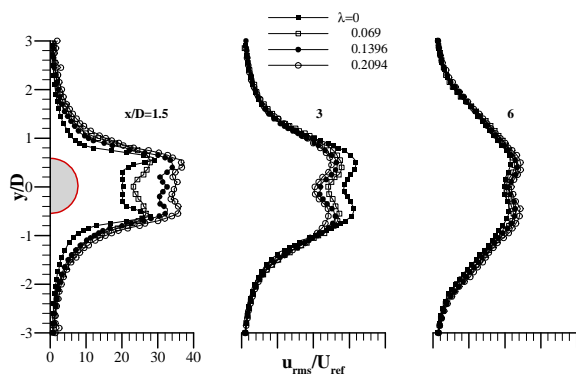


شکل ۱۲- تغییرات عدد استروهاال بر حسب λ : نتایج مطالعه حاضر در $Re=18750$ و نتایج تجربی آکوی و ایتو [۱۷] در $Re=85000$

داخل و روی مرز دنباله استوانه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در فواصل دورتر از استوانه نمودار شدت اغتشاشات یکنواخت می‌شود. این پدیده ناشی از وجود جریان‌های برگشتی و چرخشی در نزدیک استوانه و جریان‌های یکنواخت در فاصله‌های دور از استوانه می‌باشد.

در موقعیت $x/d=3$ با توجه به وضعیت گردابه‌ها در پشت استوانه، با افزایش سرعت دورانی استوانه شدت اغتشاشات کاهش می‌یابد که این برخلاف نمودارهای شدت اغتشاشات در موقعیت قبلی می‌باشد. کم‌تر بودن شدت اغتشاشات در پشت استوانه چرخان احتمالاً به علت تغییر نقطه جدایی جریان و ایجاد گردابه‌های ریز در پشت استوانه می‌باشد که با دور شدن از استوانه اثرات نقطه جدایی کاهش می‌یابد. همچنین در داخل دنباله اغتشاشات بزرگ‌تر از خارج دنباله است و در خارج دنباله اغتشاشات کمتر از 0.705 درصد است.

نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت $x/d=6$ نشان می‌دهد که در این موقعیت، در 0.2094 ، 0.1396 ، 0.069 و 0.069 نسبت به حالت سیلندر ثابت اغتشاشات افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شدت اغتشاشات در موقعیت‌های قبلی نتیجه می‌گیریم که افزایش سرعت دورانی استوانه در این موقعیت، باعث افزایش شدت اغتشاشات شده است. در این موقعیت به نظام مشخص‌تری در نمودار شدت اغتشاشات برخورد می‌کنیم و برای سرعت دوران‌های مختلف مشابه هم می‌باشند.



شکل ۱۰- توزیع شدت اغتشاشات در نسبت سرعت‌های متفاوت برای $Re=18750$

در شکل ۱۱ تغییرات بیشینه شدت اغتشاشات نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ایستگاه‌های ۶، $x/d=1.5$ با افزایش سرعت دورانی استوانه بیشینه شدت اغتشاشات افزایش یافته، ولی در $x/d=3$ بیشینه شدت اغتشاشات با افزایش سرعت دورانی کاهش یافته است.

۶- اندازه‌گیری نیروی پسا با استفاده از روش اختلاف

مومنتوم

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروی پسا، استفاده از روش اختلاف مومنتوم است. در رابطه با روش اختلاف مومنتوم، تحقیقات متعددی انجام گرفته است. ون دام [۳۳]، با استفاده از معادلات پیوستگی و بقاء مومنتوم خطی برای حجم کنترلی که جسم را در بر گرفته و با در نظر گرفتن مقدار تنش‌های رینولدز، ضریب نیروی پسا را مشخص نمود. گلدشتاین [۳۴]، فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مشخص کرد. برای استفاده از معادله ارائه شده توسط گلدشتاین نیاز به اندازه‌گیری سرعت جریان هوا در ناحیه دنباله و همچنین اغتشاشات به صورت سه‌بعدی می‌باشد. با افزایش فاصله از مدل، شدت اغتشاشات جریان هوا کاهش یافته و اغتشاشات را می‌توان همگن فرض نمود. در این حالت با استفاده از جریان سنج با پروب یک‌بعدی [۳۵]، می‌توان نیروی پسا را اندازه‌گیری کرد.

ون دام [۳۳]، 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 (۸) ارائه کرد:

$$C_d = \int \left[\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) - \frac{U}{U_\infty} d\left(\frac{y}{L}\right) + \frac{1}{q_\infty} \int \tau_{xx} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (8)$$

$p_{s,e}$ 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، q_∞ فشار دینامیکی جریان آزاد، γ فاصله قائم در راستای عمود بر دنباله، τ_{xx} تنش برشی و L نیز طول مشخصه مدل است که برای استوانه قطر آن در نظر گرفته می‌شود. مقدار τ_{xx} را می‌توان به صورت مجموع تنش‌های لزجی و تنش‌های رینولدز مطابق معادله (۹) بیان کرد.

$$\tau_{xx} = \mu \left(\gamma \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\gamma}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) - \rho u'^2 - \gamma \bar{U} \rho' u'^2 \quad (9)$$

که در آن ρ' نوسانات چگالی و u' نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد می‌باشد. مقدار مؤلفه تنش لزجی در معادله ۸ در جریان‌های با اعداد رینولدز بالا، بسیار کمتر از مؤلفه‌های تنش‌های رینولدز خواهد بود. همچنین برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر، نوسانات چگالی را می‌توان ناچیز در نظر گرفت. از این رو معادله ۸ را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) بازنویسی کرد.

$$C_D = \int \left[\frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_\infty} \right] d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) - \int \frac{u'^2}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (10)$$

معادله (۱۰) به معادله ون دام مشهور است. این معادله را می‌توان در هر نقطه‌ای در پایین دست مدل که مقادیر جریان هوا را بتوان در آنجا به‌طور دقیق اندازه‌گیری نمود، کاربرد دارد. با توجه به معادله (۱۰)، می‌توان آن را به سه انتگرال تقسیم کرد که انتگرال اول آن، عبارت اختلاف فشار، انتگرال دوم عبارت اختلاف مومنتوم و انتگرال سوم عبارت تنش‌های رینولدز است. از آنجا که اندازه‌گیری دقیق فشار استاتیکی در ناحیه دنباله جسم دشوار است، گلدشتاین [۳۴]، فشار استاتیکی در ناحیه دنباله را مطابق معادله (۱۱)، به صورت شدت اغتشاشات سه‌بعدی در نظر گرفت و ضریب نیروی پسا را مطابق معادله (۱۲) ارائه کرد.

$$p_{s,e} = p_{s,w} + q' \quad , \quad q' = \frac{1}{\gamma} \rho \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (11)$$

$$C_D = \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \left(\frac{\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2}}{U_\infty^2} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (12)$$

v' و w' نوسانات عرضی سرعت جریان هوا می‌باشند. معادله (۱۲) به معادله اصلاح شده ون دام مشهور است.

با فرض شدت اغتشاشات همگن و یا به عبارت دیگر $u' = v' = w'$ معادله ۱۱ ساده شده و به صورت معادله (۱۳) بیان می‌شود:

$$C_D = \int \frac{U}{U_\infty} \left(1 - \frac{U}{U_\infty} \right) d\left(\frac{y}{L}\right) + \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} d\left(\frac{y}{L}\right) \quad (13)$$

در این حالت می‌توان با استفاده از جریان سنج سیم داغ با پروب یک‌بعدی و فقط با اندازه‌گیری شدت اغتشاشات در جهت جریان، ضریب نیروی پسا را به دست آورد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی استوانه در یک عدد رینولدز ثابت ضریب پسا تا حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد (شکل ۱۳ را ببینید).

در تحقیق حاضر به علت صاف بودن سطوح مدل، نیروی پسای اصطکاکی بسیار ناچیز است و از طرف دیگر به علت درهم بودن رژیم جریان آزاد و همچنین مشخص بودن نقاط جدایش سیال بر روی سطح استوانه، بیشتر نیروی پسای وارده به استوانه، به علت گردادیان فشار ایجاد شده در جلو و عقب مدل می‌باشد.

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 پروب،

عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما،

عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط،

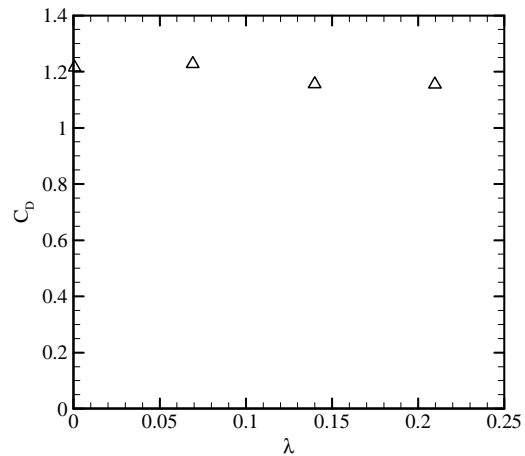
عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت،

اندازه‌گیری با دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مانند دستگاه‌های دیگر دارای خطا می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای جریان‌سنج سیم‌داغ را می‌توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک‌پذیری 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 پیتو کمتر از ۰/۳٪ می‌باشد. پس از کالیبره نمودن جریان‌سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چندجمله‌ای درجه ۵ برازش نموده که خطای آن نیز کمتر از ۰/۰۵٪ 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 ۰/۲٪ ایجاد می‌شود که اصلاح نمودن، آن را می‌تواند به ۰/۱ درصد کاهش دهد [۳۶، ۳۷]. با توجه به توضیح‌های ارائه شده می‌توان خطای کلی اندازه‌گیری را حدود ۱٪ در نظر گرفت.

۸- نتیجه‌گیری

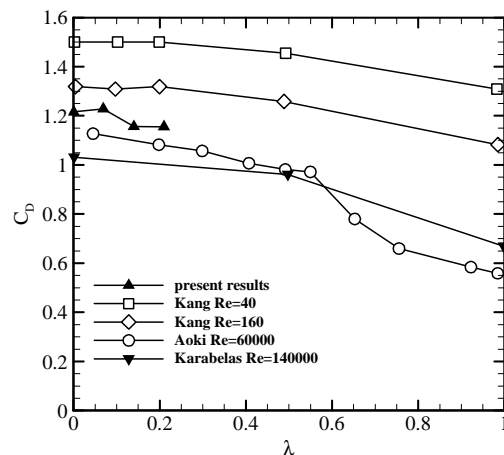
در این تحقیق به بررسی اثر دوران بر روی استوانه دایره‌ای در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ و نسبت سرعت‌های مختلف پرداخته شد. به منظور انجام آزمایش‌ها از تونل باد دمنده مدار باز استفاده گردید. داده‌برداری برای ۳ مقطع طولی پشت استوانه انجام گرفت. برای بررسی پدیده‌های ذکر شده، پروفیل‌های سرعت میانگین و شدت اغتشاشات به دست آمد و توسط آن پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت محاسبه گردید. نتایج به دست آمده نشان دادند که پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاشات به مقدار عدد رینولدز و سرعت چرخش استوانه وابسته است. در ادامه به ارائه نتایج به دست آمده دیگر از این تحقیق می‌پردازیم:

نتایج به دست آمده نشان دادند که پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاشات به محل داده‌برداری بستگی دارد و با افزایش فاصله از استوانه، پروفیل سرعت میانگین و شدت اغتشاشات یکنواخت‌تر و عریض‌تر می‌شوند. همچنین مقادیر پارامترهای



شکل ۱۳- تغییرات ضریب پسا بر حسب λ در $Re=18750$

به منظور اعتبارسنجی نتایج حاضر با نتایج تجربی و عددی دیگر محققان مقایسه شده است. همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، دوران استوانه باعث کاهش ضریب پسا می‌شود.



شکل ۱۴- تغییرات ضریب پسا بر حسب λ : نتایج تجربی آکوی و ایتو [۱۷] در $Re=60000$ ، نتایج عددی کاربلاس [۲۰] در $Re=140000$ ، نتایج مطالعه حاضر در $Re=18750$ و نتایج عددی کانگ [۱۲] در $Re=40, 160$

۷- عدم قطعیت نتایج

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی ما در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت 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 عبارت‌اند از:

number", Journal of Fluid Mechanics, vol. 1, no. 04, pp. 388-398, 1956.

[3] Eaton B., "Analysis of laminar vortex shedding behind a circular cylinder by computer-aided flow visualization", Journal of Fluid Mechanics, vol. 180, pp. 117-145, 1987.

[4] Mahfouz F., Badr H., "Flow structure in the wake of a rotationally oscillating cylinder", Journal of Fluids Engineering, vol. 122, no. 2, pp. 290-301, 2000.

[5] Savill A., "The turbulence structure of a highly curved two-dimensional wake", in: Structure of Complex Turbulent Shear Flow, Eds., pp. 185-197: Springer, 1983.

[6] Lin C.-L., "Large eddy simulation of air flow around the air-sea interaction tower", DTIC Document, 2005.

[7] Prandtl L., "Über flussigkeits bewegung bei sehr kleiner reibung", Verhaldlg III Int. Math. Kong, pp. 484-491, 1904 .

[8] Kovaszny L., "Hot-wire investigation of the wake behind cylinders at low Reynolds numbers", Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 198, no. 1053, pp. 174-190, 1949 .

[9] Taneda S., "Experimental investigation of the wakes behind cylinders and plates at low Reynolds numbers", Journal of the Physical Society of Japan, vol. 11, no. 3, pp. 302-307, 1956 .

[10] J. Massons, X. Ruiz, F. Diaz, "Image processing of the near wakes of stationary and rotating cylinders", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 204, pp. 167-184, 1989 .

[11] Barnes F., "Vortex shedding in the wake of a rotating circular cylinder at low Reynolds numbers", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 33, no. 23, pp. L141, 2000 .

[12] Kang S., Choi H., Lee S., "Laminar flow past a rotating circular cylinder", Physics of Fluids (1994-present), vol. 11, no. 11, pp. 3312-3321, 1999 .

[13] Hu G. H., Sun D. J., Yin X. Y., Tong B. G., "Hopf bifurcation in wakes behind a rotating and translating circular cylinder", Physics of Fluids (1994-present), vol. 8, no. 7, pp. 1972-1974, 1996 .

[14] Dol S. S., Kopp G. A., Martinuzzi R. J., "The suppression of periodic vortex shedding from a rotating circular cylinder", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no. 6, pp. 1164-1184, 2008 .

[15] Mittal S., Raghuvanshi A., "Control of vortex shedding behind circular cylinder for flows at low Reynolds numbers", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 35, no. 4, pp. 421-447, 2001 .

[16] Dierich M., Gersten K., Schlottmann F., "Turbulent flow around a rotating cylinder in a quiescent fluid", Experiments in fluids, vol. 25 , no. 5-6, pp. 455-460, 1998 .

[17] Aoki K., Ito T., "Flow characteristics around a rotating cylinder", Proceedings of the School of

نقصان سرعت و ضریب پسا با توجه به موقعیت داده‌برداری تغییر می‌کنند. نتایج این تحقیق نشان دادند به منظور دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید موقعیت داده‌برداری را تا حد ممکن دور از استوانه انتخاب کنیم.

۲- داده‌های به دست آمده از این تحقیق حاکی از این است که با افزایش سرعت دورانی استوانه سرعت میانگین و شدت اغتشاشات در داخل دنباله افزایش می‌یابند. همچنین مقدار پارامتر نقصان سرعت و ضریب پسا با افزایش سرعت دورانی استوانه کاهش می‌یابند.

۳- آزمایش‌های انجام گرفته بر روی دنباله استوانه چرخان نشان دادند که دوران استوانه باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت میانگین می‌شود. دوران استوانه باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌گردد که با افزایش سرعت دورانی استوانه این تغییرات بیشتر و مشهودتر می‌شوند.

۹- نمادها

ضریب پسا	C_D
طول مشخصه مدل، (m)	L
فشار استاتیکی در ناحیه خارج از دنباله، (pas)	$P_{s,e}$
فشار استاتیکی در ناحیه دنباله مدل، (pas)	$P_{s,w}$
فشار دینامیکی جریان آزاد، (p_a)	q_∞
عدد رینولدز	Re
عدد استروهل	St
شدت اغتشاشات جریان سیال، (m/s)	Tu%
سرعت محلی، (m/s)	U
سرعت جریان هوا، (m/s)	U_{ref}
نوسان سرعت جریان هوا در جهت جریان آزاد، (m/s)	u'
نوسانات جریان عرضی سرعت جریان هوا، (m/s)	w', v'
فاصله افقی بین مرکز استوانه و جریان سنج سیم داغ، (mm)	x
فاصله قائم در راستای عمود بر جریان، (mm)	y

مراجع

[1] Lewis R., "Vortex element methods for fluid dynamic analysis of engineering systems", J. Fluid Mech, vol. 239, pp. 720-723, 1992.

[2] Batchelor G., "A proposal concerning laminar wakes behind bluff bodies at large Reynolds

- [33] Van Dam C. P., "Recent experience with different methods of drag prediction", *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 35, no. 8, pp. 751-798, 1999 .
- [34] Goldstein S., "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 .
- [۳۵] اردکانی محمد علی، "جریان سنج سیم داغ"، تهران، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، سال ۱۳۸۳ .
- [36] Jorgenson F., "How to measure turbulence with hot wire anemometers", *Dantec Dynamics*, 2004 .
- [37] Yavuzkur S.t, "A guide to uncertainty analysis of hot-wire data", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 106, no. 2, pp. 181-186, 1984 .
- Engineering of Tokai University, vol. 26, pp. 29-34, 2001.
- [18] Tanaka H., Nagano S., "Study of flow around a rotating circular cylinder", *Bulletin of JSME*, vol. 16, no. 92, pp. 234-243, 1973.
- [19] Padrino J., Joseph D., "Numerical study of the steady-state uniform flow past a rotating cylinder", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 557, pp. 191-223, 2006 .
- [20] Karabelas S., "Large eddy simulation of high-Reynolds number flow past a rotating cylinder", *International journal of heat and fluid flow*, vol. 31, no. 4, pp. 518-527, 2010.
- [21] Mobini K., Niazi M., "Large eddy simulation of the flow across a rotating circular cylinder", *International Journal of Fluid Mechanics Research*, vol. 41, no. 1, 2014 .
- [22] Kumar S., Cantu C., Gonzalez B., "Flow past a rotating cylinder at low and high rotation rates", *Journal of Fluids Engineering*, vol. 133, no. 4 ,pp. 041201-1, 2011 .
- [۲۳] سجودی عطا، طلعتی کلاسر فرامرز، نیشابوری ریحانه، "تحلیل عددی جریان آرام سیال غیرنیوتنی اطراف استوانه دوار"، نشریه علمی پژوهشی تبریز، جلد ۴۴، شماره ۲، صفحه ۵۳-۵۸، پاییز و زمستان ۱۳۹۰.
- [24] W. Swanson, "The Magnus effect: A summary of investigations to date", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 83, No. 3, pp. 461-470, 1961 .
- [25] M. Glauert, "The wall jet", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 1, No. 06, pp. 625-643, 1956 .
- [26] H. Badr, S. Dennis, "Time-dependent viscous flow past an impulsively started rotating and translating circular cylinder", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 158, pp. 447-488, 1985 .
- [27] D. M. H. Rashid, "Wake survey behind a rotating ventilator", *Thesis ,The University of New South Wales*, 2002 .
- [۲۸] بک خوشنویس عبدالامیر، فروزش فرزانه، پدram مسعود، وحیدی محسن، "بررسی تجربی کاهش ضریب پسای سیال روی یک استوانه دایره‌ای بوسیله سیم اغتشاش‌ساز"، نشریه علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۲، شماره ۲، صفحه ۸۱-۹۱، تابستان ۱۳۹۱.
- [29] M. Nobari, J. Ghazanfarian, "A numerical investigation of fluid flow over a rotating cylinder with cross flow oscillation", *Computers & Fluids*, Vol. 38, No. 10, pp. 2026-2036, 2009.
- [30] E. Maskell, "A theory of the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel", *DTIC Document*, 1963 .
- [31] C. H. Williamson, "Defining a universal and continuous Strouhal-Reynolds number relationship for the laminar vortex shedding of a circular cylinder", *Physics of Fluids (1958-1988)*, Vol. 31, No. 10, pp. 2742-2744, 1988 .
- [32] H. Schlichting, "Boundary-layer theory", page 741, 1968.