

# بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله سیلندر دایره‌ای چرخان در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف

محمدجواد ایزدی<sup>۱</sup> و عبدالامیر بک خوشنویس<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۵)

## چکیده

در این پژوهش، به بررسی ویژگی‌های دنباله یک سیلندر دایره‌ای چرخان به صورت تجربی پرداخته شده است. بدین منظور، یک استوانه با سطح مقطع دایره‌ای از جنس پلکسی گلاس دارای طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر در تونل باد تحت اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. با استفاده از روش‌های موجود، به بررسی مشخصه‌های دنباله جریان و ضرایب پسا این مدل در حالات مختلف پرداخته شده است. به منظور اندازه‌گیری سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها، از دستگاه جریان‌سنج سیم داغ استفاده شده است. آزمایش‌های انجام‌گرفته روی دنباله سیلندر چرخان نشان می‌دهند که دوران سیلندر باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت متوسط می‌شود. دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌گردد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیش‌تر و مشهودتر می‌شوند. همچنین، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاش‌های دنباله افزایش می‌یابد. مشخص شد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر، پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت کاهش می‌یابند.

**واژه‌های کلیدی:** تونل باد، جریان‌سنج سیم داغ، ضریب پسا، سیلندر دایره‌ای چرخان

## Experimental Investigation of the Characteristics of the Wake of a Rotating Circular Cylinder at Different Reynolds Numbers and Speed Ratios

M.J. Izadi Yazdi and A.A. Bak Khoshnevis

Mechanical Engineering Department

Hakim Sabzevari University of Sabzevar

(Received: 22/November/2015; Accepted: 15/January/2016)

### ABSTRACT

In this study, the characteristics of the wake around a rotating circular cylinder have been investigated experimentally. To this end, a cylinder with a circular cross-section of Plexiglas with the length of 400 mm and a diameter of 20 mm have been tested in the wind tunnel. Using existing methods, the characteristics of the wake and the drag coefficients of the model in different cases have been investigated. In order to measure mean velocity profile and turbulence intensity, hot-wire anemometry has been used. The experiments carried out on the rotating cylinder indicates that the rotation of the cylinder causes significant changes in mean velocity profile. The rotation of the cylinder causes increase in the velocity in the vortex and decrease in the velocity of the wake. The variations become more and more by increase in rotational speed. Also, the results show that by increasing the rotation speed, the turbulence intensity in the wake increases. It is found that by increasing the rotational speed, the parameters of drag coefficient and velocity defect reduce.

**Keywords:** Wind Tunnel, Hot Wire Anemometry, Drag Coefficient, Rotating Circular Cylinder

۱- کارشناس ارشد: javadezadi2014@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): khoshnevis@hsu.ac.ir

## فهرست علائم

از نتایج این آزمایش‌ها می‌توان در صنایع هوافضا، اتومبیل‌سازی، ساخت آسمان خراش‌ها، ستون پل‌ها، دودکش‌ها و دکل‌های مخابراتی و... استفاده کرد.	$C_D$	ضریب پسا
پس از آن که پرانتل <sup>۱</sup> [۱] در تحقیق خود به بررسی اثرات چرخش سیلندر بر روی جدائی لایه مرزی پرداخت، افراد بسیاری این موضوع را به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار داده‌اند. چرخش سیلندر به علت حرکت سطوح بالایی و پایینی آن باعث ایجاد تغییرات زیادی در مشخصه‌های دنباله جریان می‌شود. این تغییرات، پروفیل سرعت متوسط، پروفیل شدت اغتشاش‌ها، عدد استروهال، ضریب پسا، زاویه جدائی و ... را در بر می‌گیرد.	$D$	قطر سیلندر، mm
کوواسنی <sup>۲</sup> [۲] از روش جریان‌سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری الگوی مسیر گردابه‌های ایجادشده پشت سیلندر 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 سیلندر تشکیل نمی‌شوند و در فاصله‌ای کمی دورتر از سیلندر به صورت ناپایدار تشکیل می‌شوند.	$f$	فرکانس گردابه کارمن، 1/s
تاندا <sup>۳</sup> [۳] به بررسی آزمایشگاهی جریان اطراف سیلندر چرخانی که به صورت عمود بر جریان سیال واقع شده بود، پرداخت. نتایج آزمایش‌های وی نشان داد که چرخش سیلندر باعث تغییرات مشخصی در دنباله سیلندر و کاهش در نیروی برآ می‌شود.	$L$	طول مشخصه مدل، mm
میسون <sup>۴</sup> و همکاران [۴] به بررسی عددی و آزمایشگاهی دنباله سیلندر ثابت و چرخان پرداختند. آن‌ها آزمایش‌های خود را بیش‌تر برای به‌دست آوردن فرکانس‌های خارج‌شونده از سیلندر ثابت و چرخان معطوف کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دور سیلندر عدد استروهال افزایش می‌یابد.	$P_{s,e}$	فشار استاتیک در بالادست مدل، pas
بارنز <sup>۵</sup> [۵] به بررسی تجربی دنباله سیلندر چرخان در اعداد رینولدز پایین پرداخت. وی نتایج کار خود را با مقادیر به‌دست‌آمده از نتایج عددی کانگ <sup>۶</sup> و همکارانش [۶] و هو <sup>۷</sup> و همکارانش [۷] مقایسه کرد. وی از نتایج به‌دست‌آمده از	$P_{s,w}$	فشار استاتیک در ناحیه دنباله مدل، pas
	$q_\infty$	فشار دینامیکی جریان آزاد، pas
	Re	عدد رینولدز
	St	عدد استروهال
	Tu%	درصد شدت اغتشاش‌ها، m/s
	U	سرعت محلی، m/s
	$u_{rms}$	مربع نوسانات سرعت، m/s
	$U_\infty, U_{ref}$	سرعت جریان آزاد، m/s
	$U/U_{ref}$	نسبت سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد
	$u', v', w'$	مؤلفه‌های اغتشاشی سرعت، m/s
	x	فاصله از پشت سیلندر در جهت افقی، mm
	y	فاصله عرضی درون دنباله و پشت سیلندر در جهت قائم، mm
	$\tau_{xx}$	تنش برشی، N/m <sup>2</sup>
	$\rho'$	چگالی نوسانی، kg/m <sup>3</sup>

## علائم یونانی

$\rho$	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\mu$	لزجت دینامیکی، kg/m.s

## زیر نویس

$\infty$	مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد
ref	مقدار کمیت‌ها در جریان آزاد

## ۱- مقدمه

بررسی تجربی دنباله سیلندر ثابت و چرخان یکی از مسائل کاربردی و کلاسیک مکانیک سیالات به‌شمار می‌آید. هرچند که دنباله سیلندر از دیدگاه‌های مختلفی بررسی شده است، اما بررسی تجربی جریان‌های اغتشاشی در دنباله تشکیل‌شده در اطراف سیلندر چرخان محدود می‌باشد.

لذا باتوجه به اهمیت فهم اساسی بررسی جریان‌های اغتشاشی در دنباله تشکیل‌شده اطراف یک سیلندر دایره‌ای چرخان، به بررسی تجربی کمیت فوق پرداخته شده است.

1- Prandtl  
2- Kovaszny  
3- Taneda  
4- Massons  
5- Barnes  
6- Kang  
7- Hu

روش شبیه‌سازی عددی برای جریان دوبعدی، غیرقابل تراکم و ناپایدار حول سیلندر چرخان انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخش سیلندر باعث تغییراتی در مقادیر ضریب پسا، برآ و توزیع فشار سیلندر می‌شود.

شادآرام و همکاران [۱۳]، میدان سرعت و آشفتگی دنباله نزدیک ایرفویل به‌همراه یک استوانه در پشت آن را به‌وسیله جریان سنج سیم داغ بررسی نمودند. پارامترهای اساسی این تحقیق، فاصله استوانه از ایرفویل در راستای افقی و عمودی و عدد رینولدز جریان بود. اندازه‌گیری‌ها در عدد رینولدز ۱۴۳۰۰ انجام شد. آن‌ها نتایج را به‌صورت نمودار شدت نوسانات سرعت، مؤلفه‌های تنش رینولدز و فرکانس گردابه‌ها در ناحیه دنباله نزدیک ارائه دادند.

مبینی و نیازی [۱۴] جریان آشفته عبوری از یک سیلندر 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 اسماکورینسکی برای این منظور استفاده کردند. 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 سیلندر با افزایش نسبت چرخش و افزایش عدد رینولدز افزایش یافت.

شادآرام و همکاران [۱۵]، به بررسی رفتار و مشخصه‌های جریان در اطراف یک سیلندر مثلثی در زوایای حمله مختلف با استفاده از روش‌های تجربی و عددی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تغییرات ضریب پسا با عدد رینولدز در زوایای حمله بزرگ باعث افزایش ضریب پسا شده، درحالی‌که در زوایای حمله کوچک تغییرات این ضریب به چگونگی تشکیل و شدت گردابه‌ها بستگی دارد.

کومار<sup>۵</sup> و همکاران [۱۶]، به مطالعه تجربی جریان حول یک سیلندر دایره‌ای چرخان پرداختند. آزمایش‌ها در یک تونل آب انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که جدائی گردابه‌ها فعالیت خودشان را از نسبت سرعت ۰ تا ۱/۹۵ آغاز می‌کنند و بعد از آن نیز متوقف می‌شوند.

آزمایش‌های خود، مشاهده کرد که مقدار عدد استروهمال با تغییر نسبت سرعت تغییر بسیار اندکی می‌کند.

دول<sup>۱</sup> و همکاران [۸] در تحقیق خود به بررسی آزمایشگاهی دنباله سیلندر چرخان پرداختند. آن‌ها در آزمایش‌های خود از جریان سنج سیم داغ برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده کردند. آن‌ها بررسی‌هایی درباره فواصل گردابه‌های خارج شده از سیلندر انجام دادند.

میتال و راگیوانشی<sup>۲</sup> [۹] با استفاده از روش المان محدود، ناپایداری‌های دنباله ناشی از سیلندر دایره‌ای چرخان را مورد بررسی قرار دادند و نمودار ضریب پسا و ضریب برآ را در شرایط فوق به‌دست آوردند. آن‌ها در نتایج به‌دست آمده مشاهده کردند که دو ناحیه ناپایدار در دنباله سیلندر چرخان مشاهده می‌شود. اولین ناپایداری در نسبت سرعت ۰-۱/۹۱ و دومین ناپایداری در نسبت سرعت ۴/۷۵-۴/۳۷ مشاهده شد که در این دو ناحیه ضریب پسا و ضریب برآ مقدار ثابتی نداشتند. علاوه‌بر این، در نتایج به‌دست 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.

شادآرام و همکاران [۱۰]، دنباله نزدیک در پشت یک استوانه چهارگوش را با استفاده از تکنیک سرعت‌سنج سیم داغ به‌صورت دوبعدی تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که شدت آشفتگی در دنباله جریان با افزایش نسبت پهنای به ارتفاع کاهش می‌یابد.

دایریخ<sup>۳</sup> و همکاران [۱۱] به بررسی تجربی جریان اطراف یک سیلندر چرخان توسط دستگاه جریان‌سنج سیم داغ پرداختند. در آزمایش‌های آنان جریان حول سیلندر، ساکن و اثرات چرخش بر روی سیلندر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده شامل تغییرات ضریب اصطکاک، تغییرات سرعت و تغییرات اغتشاش‌ها در جهت شعاع سیلندر بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دور سیلندر، ضریب اصطکاک و تنش برشی بر روی سطح سیلندر افزایش می‌یابند.

پادرینو و جوزف<sup>۴</sup> [۱۲] در تحقیق خود به بررسی عددی جریان حول استوانه چرخان پرداختند. این تحقیق با استفاده از

1 - Dol

2 - Mittal and Raghuvanshi

3 - Dierich

4 - Padrino and Joseph

پارامتر نقصان سرعت بی بعد از رابطه زیر به دست می آید:

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

عدد استروهال، از اعداد بدون بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به صورت بی بعد بیان می کند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$St = \frac{f \times D}{U_{ref}} \quad (3)$$

نسبت انسداد، قطر سیلندر تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد تعریف می شود. اگر برای سیلندر دایره‌ای نسبت انسداد را کم تر از ۰/۰۵ انتخاب کنیم، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. برای مثال طبق تحلیل ماکسل<sup>۲</sup> [۲۰] با انتخاب نسبت انسداد ۰/۰۵، مقدار ضریب پسا کم تر از ۳ درصد خطا خواهد داشت. باتوجه به مشخصات تونل باد و سیلندر، نسبت انسداد در آزمایش‌های فوق ۰/۰۵ درصد می باشد که تأثیری در نتایج به دست آمده نمی گذارد:

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

همچنین، اگر نسبت منظری را طول سیلندر تقسیم بر قطر سیلندر تعریف کنیم، باتوجه به ابعاد سیلندر در این آزمایش‌ها مقدار نسبت منظری ۲۰ می باشد. باتوجه به تحقیقات منتشرشده در این زمینه، نسبت منظری در آزمایش‌ها را معمولاً بیشتر از ۲۰ در نظر می گیرند که باتوجه به مقدار ضریب پسا در این تحقیق، پارامتر نسبت منظری هم مناسب بوده و تأثیری بر نتایج نخواهد داشت:

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

برای بررسی بیش تر می توان به تحقیق ویلیامسن<sup>۳</sup> [۲۱] رجوع کرد.

برای عمومیت بخشیدن به نتایج حاصل از آزمایش‌ها باید پارامترهای استفاده شده در آزمایش‌ها را بی بعد کرد. برای بی بعد کردن مشخصه سرعت دورانی سیلندر، پارامتر  $\lambda$  به صورت زیر تعریف می شود:

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

کاربلاس [۱۷] به بررسی جریان یکنواخت حول یک استوانه چرخان در عدد رینولدز ۱۴۰,۰۰۰ براساس شبیه سازی گردابه‌های بزرگ پرداخت. در این تحقیق استوانه چرخان با نسبت چرخش‌های مختلفی از ۰-۲  $\lambda =$  مورد آزمایش قرار گرفت که در آن  $\lambda$  به صورت نسبت سرعت محیطی استوانه به- سرعت جریان آزاد تعریف شده است ( $\lambda = U_{\theta}/U_{ref}$ ). نشان داد که هرچه قدر نسبت چرخش افزایش یابد، پسای میانگین کاهش می یابد.

بواکاز<sup>۱</sup> و همکاران [۱۸] به بررسی عددی ویژگی‌های انتقال حرارت و جریان سیال تراکم ناپذیر اطراف یک سیلندر دایره‌ای چرخان برای نسبت چرخش‌های ۰-۶  $\alpha =$  در محدوده عدد رینولدز ۲۰-۲۰۰ پرداختند. محاسبات عددی با استفاده از روش حجم محدود، براساس نرم افزار تجاری فلونت انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که جلوگیری از فرآیند تشکیل گردابه با افزایش سرعت چرخش ( $\alpha > 2$ ) رخ می دهد. همچنین، مقادیر متوسط گیری شده زمانی ضرایب پسا، برآ و عدد ناسلت را با نتایج دیگر محققان مقایسه کردند.

رشید [۱۹] در پایان نامه دکترای خود به بررسی کاربرد صنعتی دنباله سیلندر چرخان در کلاهک دودکش‌ها برای دوره‌های ۵ تا ۲,۰۰۰ پرداخت و ضریب پسا، برآ و پروفیل سرعت متوسط را برای حالت‌های مختلف به دست آورد.

در این تحقیق به بررسی تجربی دنباله تشکیل شده پشت سیلندر دایره‌ای چرخان پرداخته شده است. در تحقیق حاضر از روش تجربی جریان سنج سیم داغ در یک تونل باد استفاده شده است. اثرات عدد رینولدز بر روی شدت اغتشاش‌های ایجادشده در دنباله پشت سیلندر و پروفیل سرعت متوسط برای سیلندر چرخان در نسبت سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، نوآوری کار حاضر بررسی شدت اغتشاش‌ها در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف می باشد.

## ۲- پارامترهای مورد بررسی

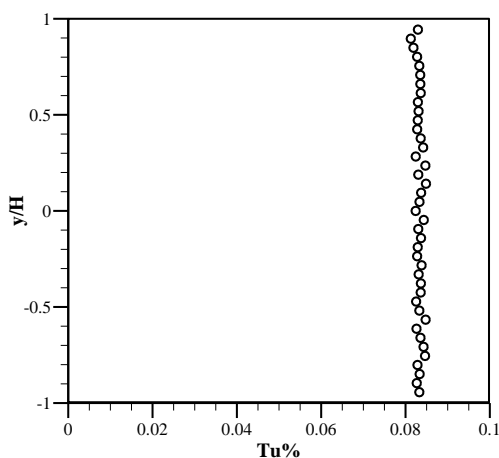
شدت اغتشاش‌ها پارامتر مهمی است که کیفیت جریان سیال را مشخص می کند. شدت اغتشاش‌ها به صورت زیر بیان می شود:

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

2- Maskell  
3- Williamson

1 - Bouakkaz

نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پراب ۰/۰۱ میلی‌متر است. سیلندر استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس پلکسی‌گلاس بوده و دارای طول ۴۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. به علت استفاده از پلکسی‌گلاس در ساخت این مدل، از اثرات زبری سطح در نتایج آزمایش‌ها صرف‌نظر شده است. برای چرخش سیلندر از یک موتور تک فاز با قدرت ۲/۲ کیلووات استفاده شده است که دارای سرعت ماکزیمم ۱۴۵۰ دور بر دقیقه می‌باشد.

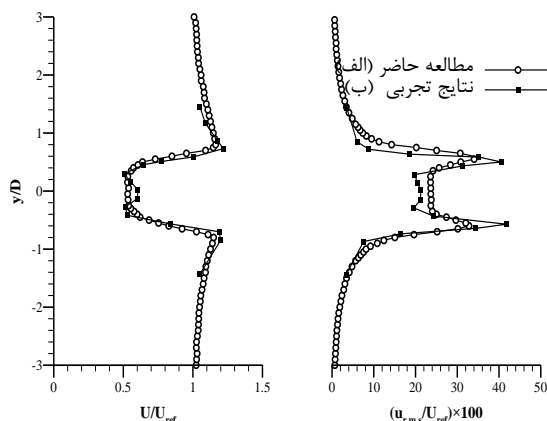


شکل (۲): نمودار شدت اغتشاشات جریان آزاد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه.

برای بررسی دنباله سیلندر چرخان، پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها برای سه موقعیت طولی در پشت سیلندر اندازه‌گیری و در نهایت ضریب پسا محاسبه شده است. نتایج برای پنج حالت دوران سیلندر و سه عدد رینولدز مختلف نشان داده شده است. اعداد رینولدز انتخابی با توجه به مشخصات تونل باد در بازه ۵,۹۰۰ تا ۱۱,۸۰۰ و دوره‌های سیلندر در بازه ۱,۰۰۰ تا ۳,۰۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شده‌اند. با توجه به قطر و سرعت دورانی سیلندر، سرعت خطی سیلندر چرخان در آزمایش‌های انجام‌گرفته ۱/۰۴۷۱ تا ۳/۱۴۱ متر بر ثانیه می‌باشد. داده‌برداری برای سه موقعیت طولی ۱/۵، ۳، ۶ و  $x/d=1/5$  برای ارتفاع  $y/d=(+3, -3)$  انجام شده است. با تغییر سرعت جریان هوا (عدد رینولدز) نسبت سرعت هوا و سرعت خطی سیلندر در دوره‌های مختلف تغییر می‌کند و با توجه به تفاوت قابل ملاحظه در پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها به‌ازای اعداد رینولدز مختلف، نتایج آزمایش‌ها در اعداد رینولدز

### ۳- اعتبارسنجی

در ابتدا، برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ، پروفیل بی‌بعد سرعت متوسط و شدت اغتشاش کار حاضر برای استوانه دایره‌ای ثابت با نتایج تحقیق تاناکا و ناگانو<sup>[۲۲]</sup> در شکل ۱ مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتیجه کار حاضر و کار تاناکا و ناگانو [۲۲] مشاهده می‌شود.



شکل (۱): مقایسه پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاش در ایستگاه  $x=50$  mm برای نتایج مطالعه حاضر (الف) و نتایج تحقیق تاناکا و ناگانو [۲۲] (ب).

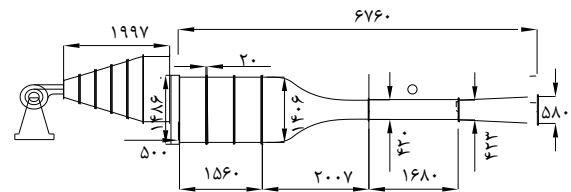
### ۴- تجهیزات آزمایشگاهی

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 متوسط، اغتشاش‌ها و فرکانس گردابه‌های خارج‌شونده از پشت سیلندر را دارد. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدارباز و دمشی بوده که دارای اتاقک آزمایشی از جنس پلکسی‌گلاس با طول ۱۶۸ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد. در شکل ۲ میزان اغتشاش‌های جریان آزاد در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه در شرایط آزمایش کم‌تر از ۰/۱ درصد اندازه‌گیری شده است. نمای شماتیکی از محفظه آزمایش در شکل ۳ نمایش داده شده است. پراب یک‌بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای سنسوری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد. برای حرکت پراب در

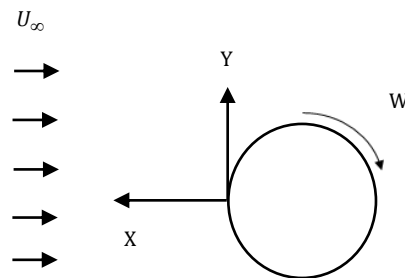
به دست آمده نشان می دهند که دوران سیلندر باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت متوسط می شود. دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می گردد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیش تر و مشهودتر می شوند. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، پروفیل های سرعت باتوجه به طبیعت متغیر و غیردائم مؤلفه های نوسانی سرعت، در طول یک دوره تناوب متقارن می باشند. باتوجه به این که گردابه ها به صورت لحظه ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده ولی باتوجه به شکل ۵، حتی در مقاطع اولیه نزدیک به سیلندر هم پروفیل های سرعت متوسط رسم شده، کاملاً متقارن می باشند. توجه این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه ها در پشت سیلندر لحظه ای بوده و به صورت تکراری در طول دوره تناوب خود تکرار می شوند. حال اگر زمان داده برداری در یک نقطه از زمان تناوب تشکیل گردابه ها بیش تر باشد، می توان با محاسبه متوسط زمانی سرعت در نقاط مورد نظر، سرعت میانگین در هر نقطه را به دست آورد که اثرات نامتقارن بودن سرعت های لحظه ای در آن مشاهده نمی شود. در شکل ۵ زمان داده برداری تقریباً ۵۰۰ برابر زمان تناوب تشکیل گردابه ها می باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت سیلندر، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می یابد که در نهایت پروفیل سرعت متوسط یکنواخت تر می شود. در فاصله های نزدیک سیلندر به علت وجود جدائی و جریان های برگشتی، افت جریان بیش تر می شود که با دور شدن از مدل، افت جریان کم تر شده و در داخل دنباله یکنواخت تر می شود.

نکته قابل توجه دیگری که در موقعیت  $x/d=1/5$  مشاهده می شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل های سرعت مقاطع نزدیک به مدل می باشد. علت این مطلب را می توان 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 آن ها می شود که این مطلب در مقاطع دورتر پشت مدل اثر خود را از دست داده و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی باشد.

جداگانه نمایش داده شده است. شکل ۴ جهت محورهای  $x$  و  $y$  و جهت چرخش سیلندر در اتاقک آزمایش را نشان می دهد.



شکل (۳): نمای شماتیکی از تونل باد.



شکل (۴): جهت چرخش سیلندر در اتاقک آزمایش.

## ۵- نتایج و بحث

همان طور که اشاره شد در این تحقیق به بررسی دنباله سیلندر چرخان در سه موقعیت طولی مختلف و در بازه عدد رینولدز ۱۱,۸۰۰-۵,۹۰۰ و دورهای سیلندر ۱,۰۰۰ تا ۳,۰۰۰ دور بر دقیقه پرداخته شده است.

### ۵-۱- بررسی پروفیل سرعت متوسط

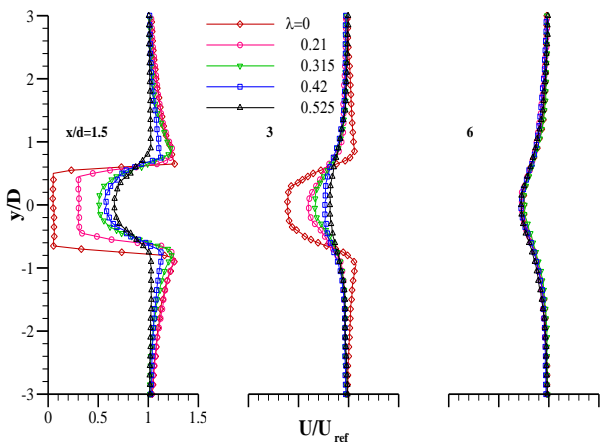
در این سری از آزمایش ها به بررسی پروفیل سرعت متوسط در اعداد رینولدز ۵,۹۰۰، ۹,۴۰۰ و ۱۱,۸۰۰ و نسبت سرعت های مختلف پرداخته شده است.

در عدد رینولدز ۵,۹۰۰ باتوجه به مشخصات تونل باد حداقل سرعت جریان هوای قابل قبول، ۵ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با مشخصات سیلندر، عدد رینولدزی که می توان در آزمایش ها به آن دست پیدا کرد، ۵,۹۰۰ می باشد. باتوجه به سرعت هوا و سرعت خطی سیلندر، نسبت سرعت  $\lambda$  در این آزمایش ها، ۰، ۰/۲۱، ۰/۳۱۵، ۰/۴۲ و ۰/۵۲۵ تعیین می شود.

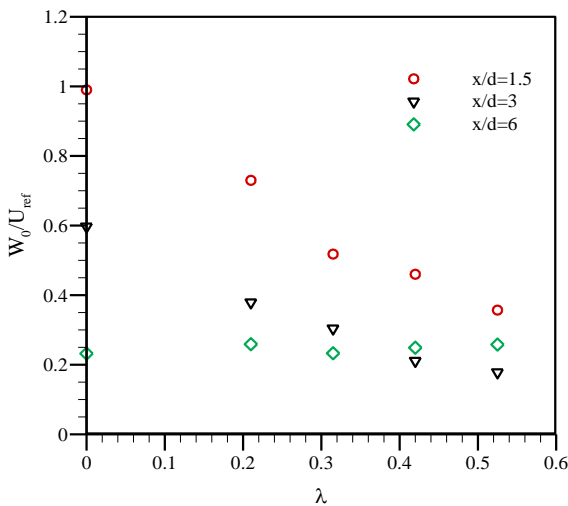
نتایج این آزمایش ها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

در شکل ۵ پروفیل سرعت متوسط به ازای  $\lambda$  های متفاوت و در موقعیت های ۳، ۶، ۳،  $x/d=1/5$  نشان داده شده است. نتایج

پروفیل‌های سرعت متوسط، در این موقعیت نظام مشخصی برای مقدار پارامتر نقصان سرعت مشاهده نمی‌شود.



شکل (۵): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re = 5900$ .



شکل (۶): نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برحسب نسبت‌های سرعت مختلف برای  $Re = 5900$ .

در حالت بعدی سرعت جریان ۸ متر بر ثانیه انتخاب شده است که با مشخصات سیلندر، عدد رینولدز ۹,۴۰۰ می‌باشد. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر،  $\lambda$  در این آزمایش‌ها، ۰، ۰/۱۳۱، ۰/۱۹۶، ۰/۲۶۱ و ۰/۳۲۷ تعیین می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۷ نمایش داده شده است.

نتیجه به‌دست آمده در این آزمایش‌ها مانند نتایج به‌دست آمده در بخش قبل (برای عدد رینولدز ۵,۹۰۰) می‌باشد که

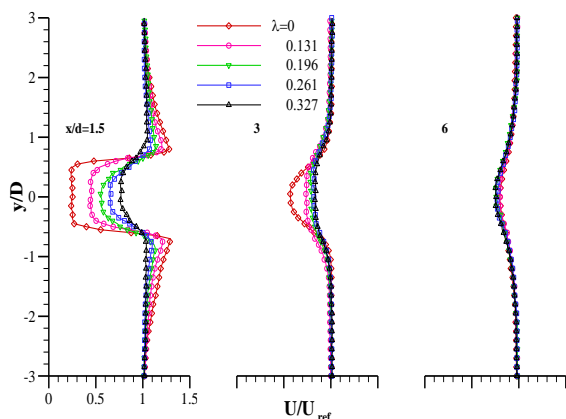
همان‌طور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط مشاهده می‌شود، مقدار سرعت در داخل دنباله با افزایش فاصله از سیلندر ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. این نقطه در حوالی موقعیت  $x/d=6$  روی می‌دهد. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن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

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

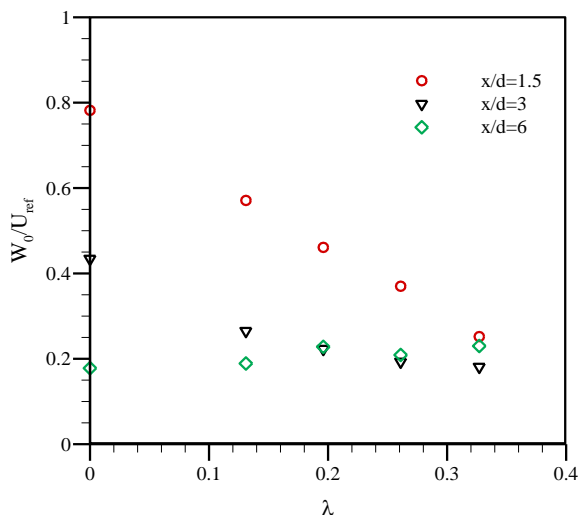
در موقعیت  $x/d=6$ ، پروفیل‌های سرعت مشابه می‌باشند و تفاوت‌های موجود در دو موقعیت قبل در اینجا مشاهده نمی‌شود. در این موقعیت به نظام مشخصی برای پروفیل‌های سرعت متوسط در دوره‌های مختلف برخورد نمی‌کنیم. این پدیده را می‌توان ناشی از تغییرات رفتار جریان شامل از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان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

در شکل ۶ نمودار پارامتر نقصان سرعت بی‌بعد برحسب  $\lambda$  در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که در موقعیت‌های ۳ و  $x/d=1/5$ ، با افزایش  $\lambda$  پارامتر نقصان سرعت کاهش می‌یابد که البته با دور شدن از سیلندر کاهش این پارامتر نیز کم‌تر می‌شود. در موقعیت  $x/d=6$  با افزایش سرعت دورانی سیلندر پارامتر نقصان سرعت بسته به مقدار  $\lambda$  افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط برای این موقعیت نیز توضیح داده شد به‌علت تغییر در

پروفیل‌های سرعت متوسط، در این موقعیت نظام مشخصی برای مقدار پارامتر نقصان سرعت مشاهده نمی‌شود.



شکل (۷): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re=9,400$ .



شکل (۸): نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برحسب نسبت‌های سرعت مختلف برای  $Re=9,400$ .

برای دستیابی به عدد رینولدز  $11,800$  با توجه به مشخصه‌های سیال و قطر سیلندر، سرعت جریان هوا  $10$  متر بر ثانیه انتخاب می‌شود. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر،  $\lambda$  در این آزمایش‌ها،  $0$ ،  $0.052$ ،  $0.104$ ،  $0.209$  و  $0.261$  تعیین می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۹ نمایش داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش عدد رینولدز (افزایش سرعت جریان هوای ورودی) و وجود نسبت‌های سرعتی کوچک‌تر از بخش‌های قبل باعث کاهش منطقه دنباله

به‌علت افزایش جریان سیال و وجود نسبت‌های سرعتی کوچک‌تر از بخش قبل، تغییراتی در این نتایج حاصل شده است.

در شکل ۷ پروفیل سرعت متوسط به‌ازای  $\lambda$  های متفاوت و در موقعیت‌های  $3$ ،  $6$ ،  $3$ ،  $x/d=1/5$  در عدد رینولدز  $9,400$  نشان داده شده است. در این عدد رینولدز (همانند عدد رینولدز  $5,900$ ) نتایج نشان می‌دهند که دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌شود که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیش‌تر می‌شود. در نتایج به‌دست‌آمده به‌علت هم‌جهت بودن سرعت سطح پایینی سیلندر با سرعت سیال و غیرهم‌جهت بودن سطح بالایی سیلندر نسبت به جهت جریان هوا در دورهای مختلف سیلندر، مشاهده می‌شود که پروفیل سرعت متوسط در جهت مثبت محور  $y$  انتقال می‌یابد.

پروفیل‌های سرعت متوسط در موقعیت  $x/d=3$  برای نسبت‌های سرعتی مختلف نتایج به‌دست‌آمده برای موقعیت  $x/d=1/5$  را تأیید می‌کند. در این موقعیت نیز با افزایش نسبت سرعتی  $\lambda$ ، سرعت در داخل دنباله افزایش می‌یابد و نمودار یکنواخت‌تر می‌شود.

در موقعیت  $x/d=6$ ، شکل پروفیل‌های سرعت مشابه هم‌دیگر می‌باشند و تفاوت‌های موجود در دو موقعیت قبل در اینجا مشاهده نمی‌شود. در این موقعیت برعکس دو موقعیت قبلی مشاهده می‌شود که سرعت در داخل دنباله با افزایش سرعت دورانی سیلندر کاهش می‌یابد. اگر پروفیل سرعت متوسط در موقعیت‌های دور از سیلندر اندازه‌گیری شود، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت دورانی، سرعت در داخل دنباله افزایش‌یافته و اختلاف سرعت در داخل و خارج از دنباله کم می‌شود که باعث کاهش در مقدار ضریب پسا و پارامتر نقصان سرعت می‌شود.

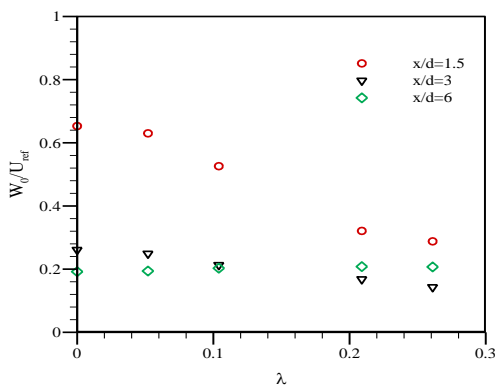
در شکل ۸ نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برحسب  $\lambda$  در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که در موقعیت‌های  $3$  و  $x/d=1/5$ ، با افزایش  $\lambda$  پارامتر نقصان سرعت کاهش می‌یابد که البته با دور شدن از سیلندر کاهش این پارامتر نیز کم‌تر می‌شود. در موقعیت  $x/d=6$  با افزایش سرعت دورانی سیلندر پارامتر نقصان سرعت بسته به مقدار  $\lambda$  افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط برای این موقعیت نیز توضیح داده شد، به‌علت تغییر در



تغییر در مشخصه و وضعیت گردابه‌های تشکیل شده در پشت سیلندر می‌باشد.

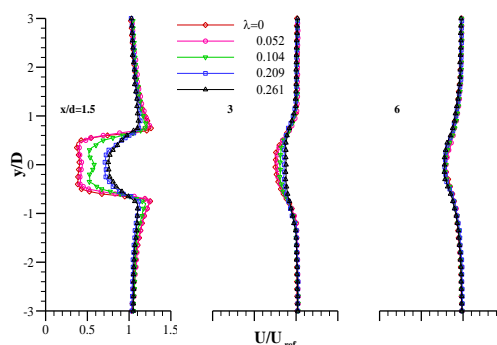
همان‌طور که مشاهده می‌شود پروفیل شدت اغتشاش‌ها دارای دو ناحیه اکسترمم در روی مرز دنباله می‌باشد که با دور شدن از سیلندر این نقاط یکنواخت‌تر شده و اکسترمم‌ها از بین می‌روند. همچنین در این نواحی مشاهده می‌شود که ماکزیمم تنش برشی در خارج از مرکز دنباله روی می‌دهد. نکته مهم دیگر در این نمودارها این است که با افزایش فاصله از سیلندر، شدت اغتشاش‌ها در داخل و روی مرز دنباله سیلندر ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در فواصل دورتر از سیلندر نمودار شدت اغتشاش‌ها یکنواخت می‌شود. این پدیده ناشی از وجود جریان‌های برگشتی و چرخشی در نزدیک سیلندر و جریان‌های یکنواخت در فاصله‌های دور از سیلندر می‌باشد.

در موقعیت  $x/d=3$  با توجه به وضعیت گردابه‌ها در پشت سیلندر، با افزایش سرعت دورانی سیلندر شدت اغتشاش‌ها کاهش می‌یابد که این برخلاف نمودارهای شدت اغتشاش‌ها در موقعیت قبلی می‌باشد. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد علت این امر وجود نقطه عطف در نمودار شدت اغتشاش‌ها می‌باشد. نمودار شدت اغتشاش‌ها در موقعیت  $x/d=6$  نشان می‌دهد که در این موقعیت، در  $0.21$  و  $0.315$  نسبت به حالت سیلندر ثابت اغتشاش‌ها کاهش و در  $0.42$  و  $0.525$  افزایش می‌یابد. باتوجه به نمودار شدت اغتشاش‌ها در موقعیت‌های قبلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سرعت دورانی سیلندر در این موقعیت، باعث افزایش شدت اغتشاش‌ها شده است. در این موقعیت به نظام مشخص تری در نمودار شدت اغتشاش‌ها برخورد خواهیم کرد و نمودار شدت اغتشاش‌ها برای سرعت دوران‌های مختلف مشابه هم می‌باشند.



شکل (۱۰): نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برحسب نسبت‌های سرعت مختلف برای  $Re=11,800$ .

تشکیل شده پشت سیلندر و منجر به افزایش پهنای دنباله می‌گردد.



شکل (۹): پروفیل سرعت متوسط در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re=11,800$ .

در شکل ۱۰، نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برحسب  $\lambda$  در موقعیت‌های مختلف نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که در موقعیت‌های ۳ و  $x/d=1/5$  با افزایش  $\lambda$  پارامتر نقصان سرعت کاهش می‌یابد که البته با دور شدن از سیلندر کاهش این پارامتر نیز کم‌تر می‌شود. در موقعیت  $x/d=6$  با افزایش سرعت دورانی سیلندر پارامتر نقصان سرعت بسته به مقدار  $\lambda$  افزایش می‌یابد. همان‌طور که در نمودار پروفیل سرعت متوسط برای این موقعیت نیز توضیح داده شد به‌علت تغییر در پروفیل‌های سرعت متوسط، در این موقعیت نظام مشخصی برای مقدار پارامتر نقصان سرعت مشاهده نمی‌شود.

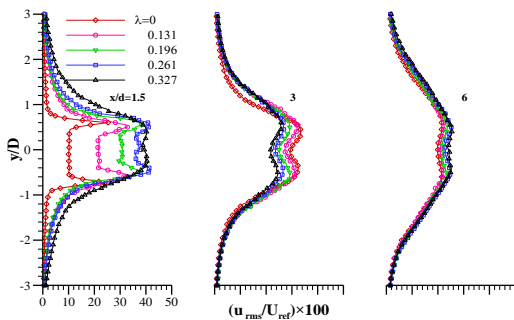
#### ۵-۲- بررسی شدت اغتشاش‌ها

در این سری از آزمایش‌ها به بررسی شدت اغتشاش‌ها در اعداد رینولدز ۵,۹۰۰، ۹,۴۰۰ و ۱۱,۸۰۰ و نسبت سرعت‌های مختلف پرداخته شده است.

در شکل ۱۱ نمودار شدت اغتشاش‌ها به‌ازای  $\lambda$  های متفاوت در ۳، ۶،  $x/d=1/5$  نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاش‌های دنباله افزایش می‌یابد. باتوجه به نمودار شدت اغتشاش‌ها، افزایش سرعت دوران سیلندر باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در اغتشاش‌های داخل دنباله می‌شود. همچنین در سرعت‌های دورانی مختلف مشاهده می‌گردد که نمودار شدت اغتشاش‌ها دارای دو مقدار حداکثر در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در نسبت‌های سرعت بالاتر ( $0.42$  و  $0.525$ ) در پروفیل شدت اغتشاش‌ها علاوه بر دو مقدار حداکثر قبلی، یک مقدار حداکثر دیگر در مرکز دنباله روی می‌دهد که ناشی از

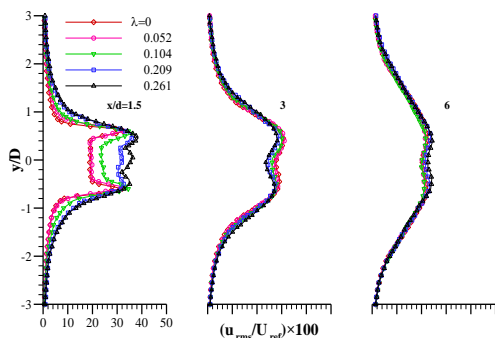
شدت اغتشاش‌ها وابستگی کمی به موقعیت و وضعیت سیلندر دارد. در این موقعیت نیز دوران سیلندر باعث جابجایی نمودار شدت اغتشاش‌ها به سمت مثبت محور  $y$  می‌شود.

نمودار شدت اغتشاش‌ها در موقعیت  $x/d=6$  نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دورانی، شدت اغتشاش‌ها افزایش می‌یابند که این افزایش هم در داخل و هم در خارج سیلندر روی می‌دهد. همچنین در این موقعیت به نظام مشخص‌تری مواجه خواهیم بود و نمودار شدت اغتشاش‌ها در سرعت‌های دورانی مختلف مشابه یک‌دیگر می‌باشند.



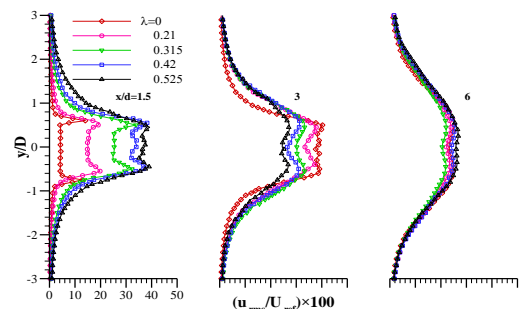
شکل (۱۲): نمودار شدت اغتشاش‌ها در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re=9,400$ .

در این قسمت از آزمایش‌ها به بررسی پارامتر شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز  $11,800$  پرداخته شده است. با توجه به سرعت جریان هوا و سرعت خطی سیلندر،  $\lambda$  در این آزمایش‌ها،  $0$ ،  $0.052$ ،  $0.104$ ،  $0.209$ ،  $0.261$  تعیین می‌شود. نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. نتیجه به‌دست‌آمده در این آزمایش‌ها مانند نتایج به‌دست‌آمده برای عدد رینولدز  $5,900$  می‌باشد که به‌علت افزایش جریان سیال و وجود نسبت‌های سرعتی کوچک‌تر از بخش قبل، باعث می‌شود شدت اغتشاش‌ها در داخل دنباله به حدود ۱۰ درصد کاهش یابد.



شکل (۱۳): نمودار شدت اغتشاش‌ها در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re=11,800$ .

در شکل ۱۲، نمودار شدت اغتشاش‌ها به‌ازای  $\lambda$  های متفاوت در  $3$ ،  $6$ ،  $9$  برای عدد رینولدز  $9,400$  نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دوران سیلندر، شدت اغتشاش‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش شدت اغتشاش‌ها هم در داخل و هم در روی مرز دنباله روی می‌دهد. همچنین، با افزایش سرعت دورانی سیلندر نسبت به سیلندر ثابت، تغییرات اساسی و مهمی در نمودار شدت اغتشاش‌ها مشاهده می‌شود. در حالتی که سیلندر ثابت بوده و در سرعت‌های دورانی پایین سیلندر ( $\lambda=0/131$ )، نمودار شدت اغتشاش‌ها دارای دو مقدار حداکثر در نزدیکی مرز دنباله می‌باشد ولی در نسبت‌های سرعت بالاتر ( $0/327$ ،  $0/261$ ،  $0/196$ ) در پروفیل شدت اغتشاش‌ها علاوه‌بر 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 سیلندر می‌باشد. همان‌طور که برای پروفیل سرعت در موقعیت  $x/d=1/5$  توضیح داده شد، در نمودار شدت اغتشاش‌ها نیز به‌علت دوران سیلندر، شدت اغتشاش‌ها به سمت مثبت محور  $y$  متمایل می‌شود.



شکل (۱۱): نمودار شدت اغتشاش‌ها در نسبت سرعت‌های مختلف برای  $Re=5,900$ .

نتایج به‌دست‌آمده در  $x/d=3$  نشان می‌دهند که دوران سیلندر باعث تغییراتی در نمودار شدت اغتشاش‌های دنباله سیلندر می‌شود. در این موقعیت با توجه به وضعیت گردابه‌های خارج شده از پشت سیلندر، با افزایش سرعت دورانی شدت اغتشاش‌ها در داخل دنباله کاهش می‌یابد که برخلاف موقعیت  $x/d=1/5$  می‌باشد. با این وجود شدت اغتشاش‌ها در روی مرز دنباله مانند موقعیت قبل می‌باشد و دوران سیلندر باعث افزایش اغتشاش‌ها در روی مرز دنباله می‌شود. علت این پدیده را می‌توان به وابستگی زیاد شدت اغتشاش‌ها روی مرز دنباله به دوران سطح سیلندر نسبت داد. در دوران روی سطح سیلندر

### ۵-۳- بررسی عدد استروهاال

همان‌طور که در مشخصات دستگاه جریان‌سنج سیم داغ گفته شد، این دستگاه قادر به اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های متناوب خارج‌شونده از پشت سیلندر می‌باشد که با استفاده از آن و سرعت سیال و قطر سیلندر می‌توان عدد استروهاال را به‌دست آورد. برای اندازه‌گیری فرکانس گردابه‌های خارج‌شونده از پشت سیلندر باید پراب را در محل مناسبی قرار داده و سپس فرکانس را به‌دست آورد. در شکل ۱۴ نمودار عدد استروهاال برحسب عدد رینولدز نشان داده شده است. نتیجه به‌دست‌آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که در این بازه از اعداد رینولدز، عدد استروهاال تقریباً ثابت و برابر ۰/۲ می‌باشد. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی هوور و همکاران [۲۳] مقایسه شده است که مقدار به‌دست‌آمده در این تحقیق با مقادیر به‌دست‌آمده از تحقیق هوور<sup>۱</sup> و همکاران [۲۳] تطابق خوبی دارد.

گلدشتاین<sup>۲</sup> [۲۴] نتیجه تحقیق‌های خود در رابطه با بررسی اثرهای شدت اغتشاش‌ها و نوسان‌های جریان سیال در محاسبه ضریب پسا را منتشر کرد.

لو و براگ<sup>۳</sup> [۲۵-۲۷] تحقیق‌های بسیار زیادی در مورد اثرهای اغتشاش در محاسبه ضریب پسا انجام دادند. همچنین، اثرهای اغتشاش و نوسان‌های جریان را مورد بررسی قرار داده و به نتیجه‌های جالبی رسیدند.

ون دام<sup>۴</sup> [۲۸] معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به‌دست آورد که در آن جمله‌های تنش رینولدز و شدت اغتشاش‌های جریان وجود داشتند اما از تغییرات چگالی جریان و ترم لزج  $\mu \frac{\partial u}{\partial x}$  صرف‌نظر شده بود. کل معادله به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_D = \int \left( \frac{P_{s,a} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) \cdot d\left(\frac{z}{c}\right) + 2 \int \frac{u}{U_\infty} \left( 1 - \frac{u}{U_\infty} \right) \cdot d\left(\frac{z}{c}\right) - 2 \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{z}{c}\right) \quad (7)$$

که در این رابطه  $q_\infty = \frac{1}{2} \rho (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$  می‌باشد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این معادله از سه بخش زیر تشکیل شده است:

- ۱- فشاری:  $\int \left( \frac{P_{s,a} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) \cdot d\left(\frac{z}{c}\right)$ ,
- ۲- مومنتوم:  $2 \int \frac{u}{U_\infty} \left( 1 - \frac{u}{U_\infty} \right) \cdot d\left(\frac{z}{c}\right)$ ,
- ۳- تنش رینولدزی:  $2 \int \frac{\overline{u'^2}}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{z}{c}\right)$ .

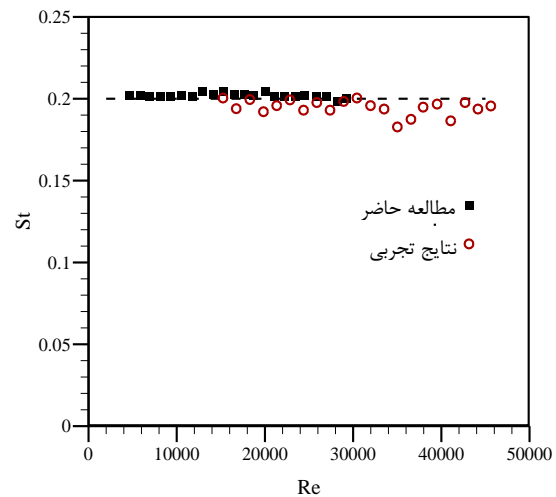
اما برطبق تحلیل گلدشتاین [۲۴]:

$$P_{s,a} = P_{s,w} + \overline{q'} \quad (8)$$

$$\overline{q'} = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}). \quad (9)$$

اگر معادله بالا را در معادله اول قرار دهیم، به‌عبارت زیر خواهیم رسید:

$$C_D = 2 \int \sqrt{\frac{q}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{q}{q_\infty}} \right) \cdot d\left(\frac{z}{c}\right) + \int \frac{(\overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \overline{u'^2})}{U_\infty^2} \cdot d\left(\frac{z}{c}\right) \quad (10)$$



شکل (۱۴): نمودار عدد استروهاال برحسب عدد رینولدز برای (الف) مطالعه حاضر و (ب) نتایج تجربی هوور و همکاران [۲۳].

### ۶- استخراج ضریب پسا با استفاده از روش اختلاف

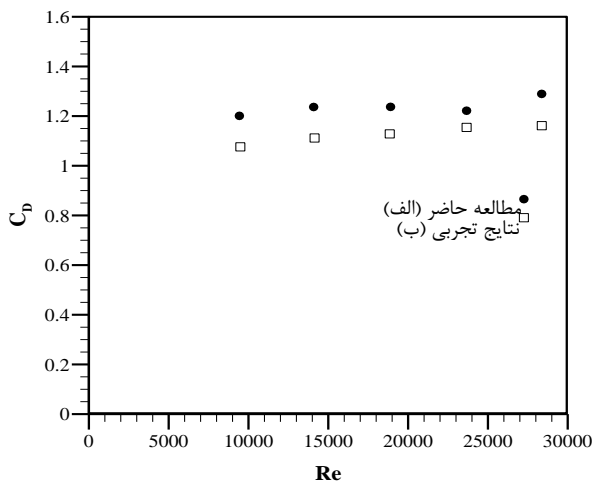
#### مومنتوم

معادله‌هایی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده می‌شوند به‌راحتی با اعمال قانون‌های مومنتوم و بقای جرم در یک حجم کنترل، قابل استخراج هستند.

2 - Goldstein  
3 - Lu and Bragg  
4 - Van Dam

1 - Hover

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 سیلندر دایره‌ای، بیش‌تر نیروی پسای وارده به سیلندر، به‌علت گرادیان فشار ایجاد شده در جلو و عقب مدل می‌باشد.



شکل (۱۶): مقادیر ضریب پسا برحسب اعداد رینولدز مختلف برای (الف) مطالعه حاضر و (ب) نتایج تجربی ساکر و بروئر [۲۹].

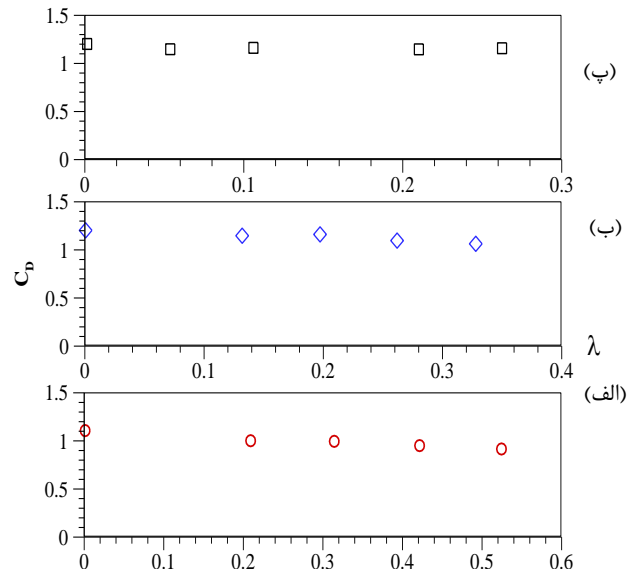
#### ۷- عدم قطعیت نتایج

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:

- عدم قطعیت جریان سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و ...)
- عدم قطعیت کالیبراسیون،
- عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال،
- عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پراب،
- عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما،

با استفاده از رابطه ۱۰ می‌توان ضریب پسا را به‌روش اختلاف مومنوم به‌دست آورد.

نمودار ضریب پسا برحسب مقدار  $\lambda$  در شکل ۱۵ برای اعداد رینولدز ۵,۹۰۰، ۹,۴۰۰ و ۱۱,۸۰۰ نشان داده شده است. ضریب پسا با استفاده از رابطه ۱۰ و در موقعیت  $x/d=18$  محاسبه شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت دورانی سیلندر ضریب پسا کاهش می‌یابد.



شکل (۱۵): نمودار ضریب پسا برحسب  $\lambda$  در (الف)

$Re=5,900$ ،  $Re=9,400$  (ب) و  $Re=11,800$  (پ).

در شکل ۱۶ نمودار ضریب پسا برای اعداد رینولدز مختلف رسم شده است. باتوجه به شرایط آزمایش، کالیبراسیون دستگاه و شرایط محیطی در مقادیر به‌دست‌آمده و مقادیر محاسبه‌شده، اختلاف وجود دارد. مقدار ضریب پسا باتوجه به عدد رینولدز بین ۵/۶ تا ۱۰ درصد با مقادیر به‌دست‌آمده از رابطه ساکر و بروئر [۲۹] (رابطه (۱۱)) اختلاف دارد. این تفاوت به‌علت اختلاف در شرایط جریان ورودی، ابعاد سیلندر، محفظه آزمایش تونل باد و زبری سطح سیلندر می‌باشد.

$$C_D \approx 1.18 + \frac{6.8}{Re^{0.89}} + \frac{1.96}{Re^{0.5}} - \frac{0.0004 Re}{1 + 3.64 \times 10^{-7} Re^2} \quad (11)$$

رابطه (۱۱) در محدوده  $200,000 < Re < 1,000,000$  با دقت خوبی معتبر می‌باشد.

اغتشاش‌ها یکنواخت‌تر و عریض‌تر می‌شوند. همچنین مقادیر پارامترهای نقصان سرعت و ضریب پسا باتوجه به موقعیت داده‌برداری تغییر می‌کنند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند به‌منظور دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید موقعیت داده‌برداری تا حد ممکن دور از سیلندر انتخاب شود، ۲- داده‌های به‌دست‌آمده از این تحقیق حاکی از این است که با افزایش عدد رینولدز (افزایش سرعت جریان هوا) سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها در داخل دنباله افزایش می‌یابند. همچنین مقدار پارامتر نقصان سرعت و ضریب پسا با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابند و ۳- آزمایش‌های انجام‌گرفته بر روی دنباله سیلندر چرخان نشان می‌دهند که دوران سیلندر باعث تغییرات اساسی و مهمی در پروفیل سرعت متوسط می‌شود. دوران سیلندر باعث افزایش سرعت در داخل گردابه و کاهش سرعت در خارج دنباله می‌گردد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر این تغییرات بیش‌تر و مشهودتر می‌شوند.

#### ۹- مراجع

1. Prandtl, L. "Über Flussigkeits Bewegung Bei Sehr Kleiner Reibung", Verhdlg III Int. Math. Kong, pp. 484-491, 1904.
2. 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.
3. Taneda, S. "Experimental Investigation of the Wakes Behind Cylinders and Plates at Low Reynolds Numbers", J. Physical Society of Japan, Vol. 11, No. 3, pp. 302-307, 1956.
4. Massons, J., Ruiz, X., and Diaz, F. "Image Processing of the Near Wakes of Stationary and Rotating Cylinders", J. Fluid Mechanics, Vol. 204, No. 1, pp. 167-184, 1989.
5. Barnes, F. "Vortex Shedding in the Wake of a Rotating Circular Cylinder at Low Reynolds Numbers", J. Physics D: Applied Physics, Vol. 33, No. 23, pp. L141, 2000.
6. Kang, S., Choi, H., and Lee, S. "Laminar Flow Past a Rotating Circular Cylinder", Physics of Fluids, Vol. 11, No. 11, pp. 3312-3321, 1999.
7. Hu, G.H., Sun, D. J., Yin, X.Y., and Tong, B. G. "Hopf Bifurcation in Wakes Behind a Rotating and Translating Circular Cylinder", Physics of Fluids, Vol. 8, No. 7, pp. 1972-1974, 1996.
8. Dol, S.S., Kopp, G.A., and Martinuzzi R. J. "The Suppression of Periodic Vortex Shedding from a Rotating Circular Cylinder", J. Wind Engineering

- عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط و  
 - 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 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 پیتوت کم‌تر از ۰/۳٪ می‌باشد. پس از کالیبره‌نمودن جریان‌سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چندجمله‌ای 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 تطبیق‌دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کم‌تر از ۰/۵٪ می‌باشد. تغییرات دما تأثیر نامطلوبی بر دقت جریان‌سنج سیم داغ داشته به‌طوری‌که خطا برای تغییر ۱ درجه سلسیوس دمای محیط حدود ۰/۲٪ ایجاد می‌شود که اصلاح‌نمودن، آن را می‌تواند به ۰/۱ درصد کاهش دهد [۳۰].  
 [۳۱]. باتوجه به توضیح‌های ارائه‌شده می‌توان خطای کلی اندازه‌گیری را حدود ۰/۴٪ در نظر گرفت.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر دوران بر روی سیلندر دایره‌ای در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف پرداخته شد. به‌منظور انجام آزمایش‌ها از تونل باد دمنده مدارباز استفاده گردید. داده‌برداری برای ۳ مقطع طولی پشت سیلندر انجام گرفت. برای بررسی پدیده‌های ذکرشده، پروفیل‌های سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها به دست آمد و توسط آن پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها به مقدار عدد رینولدز و سرعت چرخش سیلندر وابسته است. در ادامه به ارائه نتایج به‌دست‌آمده دیگر از این تحقیق پرداخته شده است:

۱- نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که پروفیل سرعت متوسط و شدت اغتشاش‌ها به محل داده‌برداری بستگی دارد و با افزایش فاصله از سیلندر، پروفیل سرعت متوسط و شدت

- Circular Cylinder”, *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 10, pp. 2742-2744, 1988.
22. Tanaka, H. and Nagano, S. “Study of Flow around a Rotating Circular Cylinder”, *Bulletin of JSME*, Vol. 16, No. 92, pp. 234-243, 1973.
  23. Hover, F., Tvedt, H., and Triantafyllou, M. “Vortex-Induced Vibrations of a Cylinder with Tripping Wires”, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 448, pp. 175-195, 2001.
  24. 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.
  25. Lu, B. and Bragg, M.B. “Experimental Investigation of the Wake-Survey Method for a Bluff Body with a Highly Turbulent Wake”, *AIAA*, Vol. 3060, pp. 9-20, 2002.
  26. Lu, B. and Bragg, M.B. “Experimental Investigation of Airfoil Drag Measurement with Simulated Leading-Edge Ice, Using the Wake Survey Method”, *AIAA Paper*, Vol. 3919, 2000.
  27. Lu, B. and Bragg, M. “Airfoil Drag Measurement with Simulated Leading-Edge Ice, Using the Wake Survey Method”, *AIAA Paper*, Vol. 1094, pp. 2003, 2003.
  28. Van Dam, C. “Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction”, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
  29. Brauer, H. and Sucker, D. “Umströmung von Platten, Zylindern und Kugeln”, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 48, No. 8, pp. 665-671, 1976.
  30. Jorgenson, F. “How to Measure Turbulence with Hot Wire Anemometers”, *Dantec Dynamics*, 2004.
  31. Yavuzkurt, S. “A Guide to Uncertainty Analysis of Hot-Wire Data”, *J. Fluids Engineering*, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.
  - and *Industrial Aerodynamics*, Vol. 96, No. 6, pp. 1164-1184, 2008.
  9. Mittal, S. and Raghuvanshi, A. “Control of Vortex Shedding Behind Circular Cylinder for Flows at Low Reynolds Numbers”, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol. 35, No. 4, pp. 421-447, 2001.
  10. Shadaram, A., Azimi-Fard, M., and Rostamy, N. “Experimental Study of the Characteristics of the Flow in the Near-wake of a Rectangular Cylinder”, *J. Aerospace Mechanics*, Vol. 3, No. 4, pp. 13-23, 2008 (In Presion).
  11. Dierich, M., Gersten, K., and Schlottmann, F. “Turbulent Flow around a Rotating Cylinder in a Quiescent Fluid”, *Experiments in fluids*, Vol. 25, No. 5-6, pp. 455-460, 1998.
  12. Padrino, J. and Joseph, D. “Numerical Study of the Steady-state Uniform Flow Past a Rotating Cylinder”, *J. Fluid Mechanics*, Vol. 557, No. pp. 191-223, 2006.
  13. Shadaram, A., Mombeiny, Y., and Taleghani, S.A.S. “The Behavior of Turbulence Characteristics of Near-wake Flow Due to the Interaction Between an Airfoil and a Downstream Cylinder”, *J. Aerospace Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 57-66, 2010 (In Presion).
  14. Mobini, K. and Niazi, M. “Large Eddy Simulation of the Flow across a Rotating Circular Cylinder”, *Int. J. Fluid Mechanics Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-15, 2014.
  15. Shadaram, A., Ashrafi-Zadeh, A., and Jalali, A. “An Experimental and Numerical Study of Flow around Triangular Prisms in Different Angles of Attack”, *J. Aerospace Mechanics*, Vol. 6, No. 1, pp. 67-74, 2010 (In Presion).
  16. Kumar, S., Cantu, C., and Gonzalez, B. “Flow Past a Rotating Cylinder at Low and High Rotation Rates”, *J. Fluids Engineering*, Vol. 133, No. 4, pp. 041201, 2011.
  17. Karabelas, S. “Large Eddy Simulation of High-Reynolds Number Flow Past a Rotating Cylinder”, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 4, pp. 518-527, 2010.
  18. Bouakkaz, R., Talbi, K., Khelil, Y., Salhi, F., Belghar, N., and Ouazizi, M. “Numerical Investigation of Incompressible Fluid Flow and Heat Transfer Around a Rotating Circular Cylinder”, *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol. 21, No. 1, pp. 87-97, 2014.
  19. Rashid, D.M.H. “Wake Survey Behind a Rotating Ventilator”, *PhD. Dissertation*, The University of New South Wales, 2002.
  20. Maskell, E. “A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel”, *DTIC Document*, 1963.
  21. Williamson, C.H. “Defining a Universal and Continuous Strouhal-Reynolds Number Relationship for the Laminar Vortex Shedding of a