

بررسی تجربی ضریب پسای دو سیلندر دایره‌ای پشت سرهم با چیدمان متناوب در جریان آشفته

عبدالامیر بک خوشنویس*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

نعیم عباسقربانی

کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

محمد جواد ایزدی یزدی

دانشجوی دکتری تخصصی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی اثرات آشفتگی جریان ورودی بر روی ضریب پسای سیلندره‌های پشت سرهم با قطرهای ناهمسان و در اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است. آزمایش ضریب پسا برای سیلندر پایین‌دست در قطرهای $A=15.5$ mm و $B=21.3$ mm در دو فاصله طولی بین مراکز دو سیلندر و در پنج عدد رینولدز بر اساس قطر سیلندر بالادست انجام شده است. شدت اغتشاشات تولیدی ۴.۵ و ۷ درصد در ورودی اتاق آزمون تونل باد ایجاد شدند. موقعیت قرارگیری سیلندر بالادست نسبت به سیلندر پایین‌دست در پنج زاویه ۰، ۲۲.۵، ۴۵، ۶۷.۵ و ۹۰ درجه تغییر می‌کند. نتایج برای سیلندر پایین‌دست در شدت اغتشاشات ۴.۵ درصد نشان می‌دهند که با افزایش نسبت قطر سیلندرها و افزایش فاصله طولی بین دو سیلندر، ضریب پسا افزایش می‌یابد. اما با افزایش زاویه قرارگیری سیلندر بالادست نسبت به سیلندر پایین‌دست، ضریب پسا روندی متغیر دارد که به ماهیت جریان بستگی دارد. در نهایت با افزایش میزان درمی جریان، ضریب پسا در تمامی مراحل آزمایش به شدت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ضریب پسا، آرایش متناوب، شدت اغتشاشات جریان، لودسل.

Experimental Investigation of Drag Coefficient of Two Tandem Cylinders at Staggered Arrangement in Turbulent Flow

A. B. Khoshnevis
N. Abasghorbani
M. J. Ezadi Yazdi

Department of Mechanical Engineering, University of Hakim Sabzevari, Sabzevar, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Hakim Sabzevari, Sabzevar, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Semnan, Semnan, Iran

Abstract

In the present study, the effects of turbulent flow are experimentally investigated on the drag coefficient of tandem cylinders with non-equal diameters in different Reynolds numbers. Drag coefficient test for downstream cylinder in diameters $A=15.5$ mm and $B=21.3$ mm, was experimentally carried out at two longitudinal distance at five Reynolds numbers based on the upstream cylinder diameter for two turbulence intensity of 4.5 and 7% respectively. The position of the upstream cylinder to the downstream cylinder changes at five angles 0, 22.5, 45, 67.5 and 90 degrees. Results for downstream cylinder in the 4.5% turbulence intensity indicate that with increasing the diameter ratio of the cylinders and increasing the longitudinal distance between the two cylinders, the drag coefficient increases. However, with increasing aligning angles of the upstream cylinder with respect to the downstream cylinder, the drag coefficient varies depending on the nature of flow. Finally, by increasing the flow turbulence intensity, the drag coefficient decreases significantly at all stages of the experiment.

Keywords: drag coefficient, staggered arrangement, flow turbulent intensity, load cell.

خطوط انتقال برق، دسته لوله‌های مبادله‌کن گرما، برج‌های واکنش‌های شیمیایی، دودکش‌ها، ساختمان‌ها، سازه‌های بلند، پایه اسکله‌ها و سکوهای نفتی واقع در اقیانوس، پل‌های معلق و دکل‌ها نام برد. هنگامی که جریان از روی یک سیلندر دایره‌ای عبور می‌کند، یک ناحیه‌ای از جریان متلاطم در اطراف سیلندر شکل می‌گیرد. زدراکویچ [۱] میدان جریان در اطراف سیلندر دایره‌ای را به چهار ناحیه تقسیم بندی کرد: ۱- ناحیه‌ای که در آن سرعت محلی متوسط زمانی کمتر از سرعت جریان آزاد است (نقطه سکون). ۲- دو لایه مرزی متصل به سطح سیلندر. ۳- دو ناحیه جانبی سیلندر شامل انتقال جریان و جریان شتابدار. ۴- ناحیه پشت مدل که ناشی از جدایش جریان است و آن را دنباله می‌نامند. شکل دنباله تحت تأثیر وضعیت جریان ممکن است لایه‌ای یا آشفته باشد.

ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۲]، به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان اطراف سیلندر دایره‌ای ثابت و چرخان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت چرخش، عدد استروهال افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعه بر روی ضرایب آبرودینامیکی و تحلیل جریان حول دو سیلندر پشت سرهم در آرایش‌های مختلف مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. اثرات جریان روی اجسام چندگانه به‌طور وسیعی در حال تبدیل شدن به یک زمینه تحقیقاتی عمومی است. هندسه‌های استوانه‌ای شکل اغلب در مسائل مهندسی ظاهر می‌شوند که آرایش‌های زیادی برای قرار دادن سیلندرها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. به‌منظور کاهش تعداد شبیه‌سازی‌ها، عموماً آرایش‌های مجاورهم^۱ پشت سرهم^۲ و متناوب^۳ توسط محققین مورد توجه بوده است. کاربرد این چیدمان را می‌توان در سازه‌های صنعتی از قبیل جریان حول

^۱ side by side

^۲ tandem

^۳ staggered

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: khosh1966@yahoo.com

که ضرایب آیرودینامیکی و عدد استروهال به شدت وابسته به عدد رینولدز و فاصله طولی بین دو سیلندر می‌باشند.

سوپرادیپان و روی [۱۰]، به بررسی عددی ویژگی‌های جریان گذرنده از دو سیلندر مجاور هم در فواصل جانبی مختلف و در اعداد رینولدز پایین پرداختند. دریافتند که برای فواصل نزدیک بین دو سیلندر، ضریب پسا برای هر دو سیلندر مقدار زیادی دارد و با افزایش فاصله بین دو سیلندر این مقدار کاهش پیدا می‌کند.

وو و همکاران [۱۱]، به بررسی عددی جریان عبوری از دو سیلندر پشت سرهم و مجاور هم در اعداد رینولدز پایین پرداختند. با مقایسه ضریب پسای سیلندر پایین دست نسبت به سیلندر تک، دریافتند که برای فاصله $L/d=2$ ، با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب پسا کاهش می‌یابد و با افزایش فاصله به $L/d=4$ ، مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد.

سینگها و همکاران [۱۲]، به بررسی عددی جریان دو بعدی گذرنده از دو سیلندر مجاور هم پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در فاصله کمتر از $L/d \leq 1$ ، ضریب پسا برای هر دو سیلندر افزایش پیدا می‌کند و با افزایش فاصله بین دو سیلندر مقدار ضریب پسا برای هر دو سیلندر به صورت مساوی کاهش پیدا می‌کند.

متگینی و سالتارا [۱۳]، به بررسی عددی دو سیلندر دایره‌ای در آرایش‌های پشت سرهم و مجاور هم پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب پسا برای هر دو سیلندر در حالت مجاور مشابه بوده و بیشترین ضریب پسا برای فاصله‌های $2d$ و $3d$ می‌باشد.

گائو و همکاران [۱۴]، به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان دو سیلندر دایره‌ای پشت سرهم با قطرهای مختلف پرداختند. در نسبت فواصل $3/6$ و $L/d=2/4$ ، الگوهای جریان مختلفی با نسبت فواصل متفاوت از پشت دو سیلندر مشاهده کردند.

روش‌های مختلفی برای کاهش نیروی پسای سیلندر وجود دارد که یکی از آن‌ها استفاده از میله در اطراف سیلندر اصلی می‌باشد. به عنوان مثال در تحقیقی که وانگ و همکاران [۱۵] انجام دادند، نشان دادند که برای حالت $L/d=1/5$ ، نیروی پسای وارده به سیلندر بطور چشمگیری کاهش می‌یابد و بجز برای حالت میله با قطر بسیار کم و یا در نزدیکی میله به سیلندر، بیشترین کاهش نیروی پسا در زاویه صفر درجه بوده است. برای زوایای کوچکتر از ۵ درجه، میله می‌تواند بر روی کاهش نیروی وارده به سیلندر تأثیرگذار باشد؛ ولی برای زوایای بیشتر از ۱۰ درجه میله بالادست تأثیر چندانی بر روی نیروی پسا ندارد.

لی و همکاران [۱۶]، با استفاده از میله‌های کوچکی با نسبت قطر $0/133$ تا $0/267$ نسبت به سیلندر اصلی و در عدد رینولدز 2×10^4 اقدام به کاهش ضریب پسا نمودند. نتایج نشان داد که قرار دادن میله کوچک در جلوی سیلندر اصلی، ضریب پسای کل را در فاصله بحرانی $L/d=2/081$ تا $2/9\%$ کاهش می‌دهد.

با توجه به اهمیت ضریب پسا در علوم مهندسی و کاربرد آن در سازه‌های صنعتی و با توجه به تحقیقات پیشین، در این مقاله با شبیه سازی جریان واقعی در آزمایشگاه تونل باد، دیدگاه جدیدی در این زمینه مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارائه یک دید کلی نسبت به تأثیر سیلندرهای دایره‌ای در معرض جریان سیال بر یکدیگر، دو سیلندر دایره‌ای با قطرهای مختلف (نسبت به سیلندر بالادست) مدل سازی و با قرار دادن آن در تونل باد در آرایش متناوب و در ۲ فاصله طولی و پنج زاویه متفاوت، ضریب پسا محاسبه شده است. همچنین،

همچنین ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۳]، به بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله جریان اطراف یک سیلندر چرخان در نسبت چرخش‌ها و اعداد رینولدز مختلف پرداختند. دریافتند که با افزایش نسبت چرخش و عدد رینولدز، ضریب پسا کاهش می‌یابد.

بررسی جریان اغتشاشی اطراف سیلندر تک با آزمایش ساری [۴] در تونل بادی با سرعت کم و در محدوده اعداد رینولدز 4×10^4 تا 338 انجام شد. او به بررسی اثرات شدت آشفتگی بالا (بیش از 10%) در جریان عبوری از روی یک سیلندر دایره‌ای پرداخت. دریافت که افزایش شدت اغتشاشات ورودی باعث افزایش ضریب پسای کل تا 25% برای سیلندر تک شده است.

یونس [۵]، به بررسی تجربی تأثیر شدت اغتشاشات جریان آزاد $(0/5, 0/7, 0/9)$ بر روی ضریب پسای سیلندر دایره‌ای در جریان عرضی در محدوده اعداد رینولدز $10^3 \times 6/4$ تا $10^4 \times 1/8$ پرداخت. نشان داد که با افزایش میزان شدت اغتشاشات، ضریب پسا کاهش پیدا می‌کند.

بلکبرن و ملبورن [۶]، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر شدت اغتشاشات جریان ورودی (تا $1/18$) بر روی نیروهای یک سیلندر دایره‌ای در محدوده اعداد رینولدز 1×10^5 تا 5×10^5 پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش شدت آشفتگی موجب انتقال سریع جریان به حالت فوق بحرانی می‌شود.

چونگ و ملبورن [۷] مشاهده کردند که در اعداد رینولدز بحرانی و فوق بحرانی تا عدد رینولدز 10^6 ، افزایش شدت آشفتگی از $0/4\%$ به $9/1\%$ باعث می‌شود که ضریب پسا در رژیم زیر بحرانی کاهش یابد؛ اما در رژیم فوق بحرانی رفتار معکوسی را نشان داد.

جریان پشت دو سیلندر بر اساس فاصله مرکز تا مرکز سیلندرها، زاویه قرارگیری بین جریان آزاد و خط مرکز بین دو سیلندر، قطر سیلندرها و سرعت جریان آزاد طبقه‌بندی می‌شوند. مطالعات اولیه توسط زدراکوویچ [۱] انجام شد. او جریان عبوری از روی دو سیلندر را به چهار ناحیه تقسیم کرد: ۱- ناحیه تداخل نزدیک که در آن دو سیلندر نزدیک به یکدیگر هستند و در دنباله یکدیگر غوطه‌ور شده‌اند. ۲- ناحیه تداخل دنباله که در آن دنباله سیلندر بالادست تحت تأثیر سیلندر پایین دست نیست؛ اما دنباله سیلندر پایین دست به شدت تحت تأثیر سیلندر بالادست است. ۳- ناحیه تداخل دنباله نزدیک که در آن تداخل دنباله و نزدیک بودن آن مهم است. ۴- ناحیه عدم تداخل که در آن دنباله یک سیلندر بر روی دیگری تأثیر نمی‌گذارد.

وانگ و همکاران [۸]، به بررسی عددی جریان گذرنده از روی دو سیلندر پشت سرهم با قطرهای غیر یکسان در اعداد رینولدز پایین پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب پسای سیلندر پایین دست به‌طور مؤثری تحت تأثیر سیلندر بالادست کاهش پیدا می‌کند. وجود سیلندر بالادست باعث می‌شود که ضریب پسا نسبت به سیلندر تک کاهش یابد. برای فاصله طولی کمتر از $2/5$ با نسبت قطرهای $0/1$ تا $0/3$ ضریب پسا تقریباً ثابت است. همچنین برای نسبت قطرهای بزرگتر در فاصله طولی بین $2/5$ تا 3 ، ضریب پسا به تدریج افزایش پیدا می‌کند.

محبوب عالم [۹]، به بررسی تجربی نیروهای نوسانی ناشی از برخورد جریان به مدل، از قبیل ضریب پسا، برآ و عدد استروهال یک سیلندر غوطه‌ور در دنباله سیلندر پایین دست در اعداد رینولدز مختلف پرداخت. فاصله طولی بین دو سیلندر از $1/1$ تا $4/5$ متغیر بود. نشان داد

توانایی اندازه‌گیری نیرو تا ۵ نیوتن را دارد. پیش از شروع آزمایش دستگاه نیروسنج بایستی کالیبره گردد. جهت کالیبره نمودن دستگاه، وزنه های ۰.۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ نیوتنی بر روی پایه‌های لودسل قرار داده شد و با برازش منحنی داده‌های استخراج شده یک رابطه کاملاً خطی بدست آمد.

۲-۲- شبکه اغتشاش ساز

در این تحقیق، آزمایش‌ها در شدت اغتشاشات ورودی مختلف انجام شده است. به منظور افزایش شدت اغتشاشات در مقطع ورودی به اتاق آزمون تونل باد از شبکه اغتشاش‌ساز استفاده شده است. در شکل ۳ شبکه‌های اغتشاش‌ساز استفاده شده در این تحقیق نشان داده شده است. در شکل ۴ میزان شدت اغتشاشات بوجود آمده ناشی از شبکه‌های اغتشاش‌ساز برای دو حالت مختلف به ترتیب ۴/۵ درصد و ۷ درصد برای جریان آزاد کمتر از ۰/۲ درصد نشان داده شده است. میزان شدت اغتشاشات جریان آزاد از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\%TI = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_\infty} \times 100 \quad (1)$$



(الف)



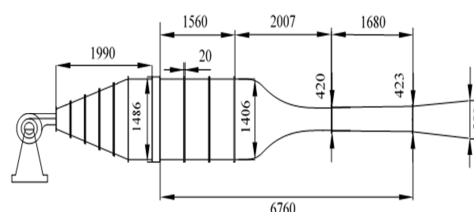
(ب)

شکل ۳- شبکه اغتشاش ساز برای دو حالت مختلف (الف) ۴/۵ درصد (ب) ۷ درصد.

شدت اغتشاشات ورودی به اتاق آزمون تونل باد به ۴/۵ و ۷ درصد افزایش یافته است و تأثیر آن بر روی ضریب پسا مورد ارزیابی قرار گرفته است.

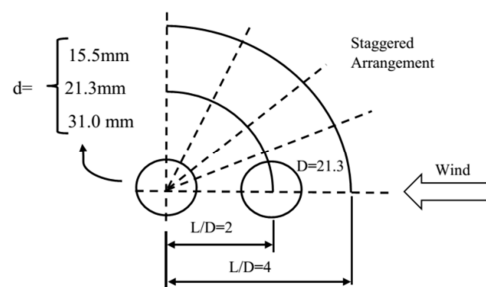
۲- تجهیزات آزمایشگاهی و مدل مورد استفاده

شکل ۱ طرحواره تونل باد را نشان می‌دهد. دستگاه تونل باد مورد استفاده در این آزمایش‌ها از نوع دمنده و مدار باز است. حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد این دستگاه ۰/۲ درصد بوده که از این نظر دارای دقت بالایی می‌باشد. اتاقک آزمایش دستگاه تونل باد استفاده شده دارای طول ۱۶۸ cm، عرض و ارتفاع ۴۰ cm و از جنس پلکسی می‌باشد.



شکل ۱- طرحواره تونل باد، ابعاد به میلی‌متر.

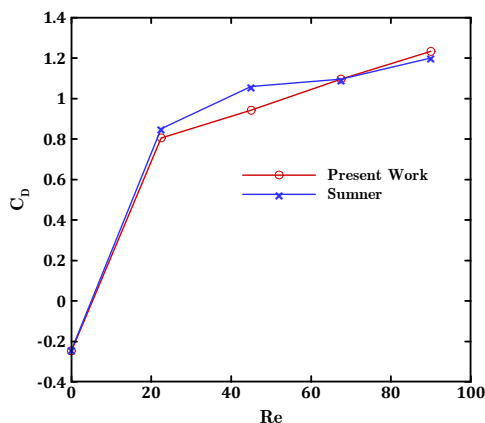
مدل‌های استفاده شده در این آزمایش دو عدد سیلندر دایره‌ای به قطرهای $A=15.5$ mm و $B=21.3$ mm می‌باشد. سیلندرها با نسبت قطر $d/D=0.72$ (نسبت به قطر سیلندر بالادست)، در دو فاصله $L/d=2$ و $L/d=4$ و به ترتیب در ۵ زاویه ۰، ۲۲/۵، ۴۵، ۶۷/۵ و ۹۰ درجه قرار گرفته‌اند. این آزمایش در پنج عدد رینولدز ۱۰۱۰۰، ۱۶۰۰۰، ۲۲۰۰۰، ۲۷۳۰۰ و ۳۰۶۵۰ بر اساس قطر سیلندر بالادست انجام شده است. در شکل ۲ طرحواره‌ای از نحوه قرارگیری سیلندرها در دایره‌ای پشت سرهم و زوایای آن‌ها نسبت به هم نشان داده شده است. همچنین جهت جریان باد و فاصله قرارگیری آنها نسبت به یکدیگر مشخص شده است.



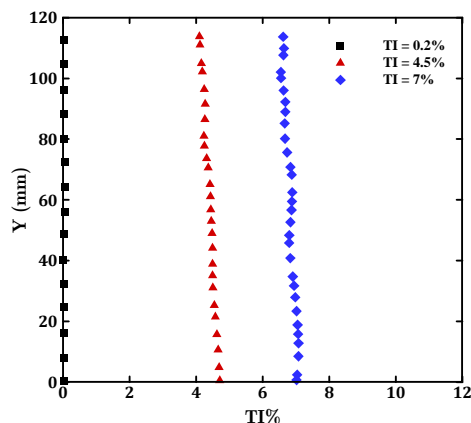
شکل ۲- طرحواره قرارگیری مدل مورد آزمایش.

۲-۱- دستگاه نیروسنج (لودسل)

دستگاه لودسل، یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری نیروی جریان سیال بر روی اجسام می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های این دستگاه، اصلی‌ترین کاربرد آن اندازه‌گیری نیروی پسا می‌باشد. لودسل استفاده شده در تونل باد از نوع تک نقطه‌ای، ساخت شرکت Amcells بوده که



شکل ۶- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز (برای دو استوانه هم قطر در آرایش پشت سر هم در زوایای مختلف و در $L/d=2$).



شکل ۴- شدت اغتشاشات شبکه اغتشاش ساز و جریان آزاد.

۳- اعتبار سنجی

تحقیقات بسیاری در زمینه تعیین ضریب پسا سیلندرهای تک و چندتایی در آرایش‌های متفاوت و در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. به منظور صحت عملکرد دستگاه تونل باد و سیستم اندازه‌گیری نیرو، به محاسبه ضریب پسا سیلندر دایره‌ای تک در اعداد رینولدز مختلف پرداخته شده است. در شکل ۵ تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر با داده‌های تجربی مانسون [۱۷] و آچنباخ [۱۸] تطابق قابل قبولی دارد.

۴- روابط اندازه‌گیری

مقادیر ضریب پسا از فرمول (۲) و مقدار عدد رینولدز از فرمول (۳) محاسبه شده است.

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 d} \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho U d}{\mu} \quad (3)$$

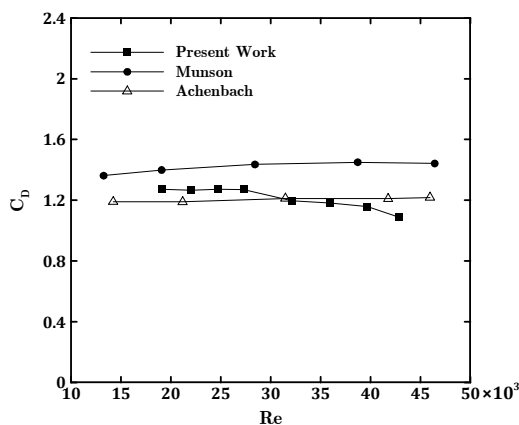
که در آن F_D نیروی پسا، ρ چگالی هوا، U سرعت تونل باد، d قطر سیلندر پایین‌دست، D قطر سیلندر بالادست و μ لزجت دینامیکی سیال می‌باشد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

۵-۱- اغتشاشات ۴٫۵ درصد

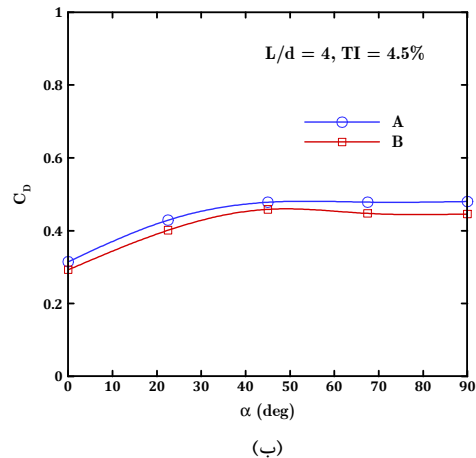
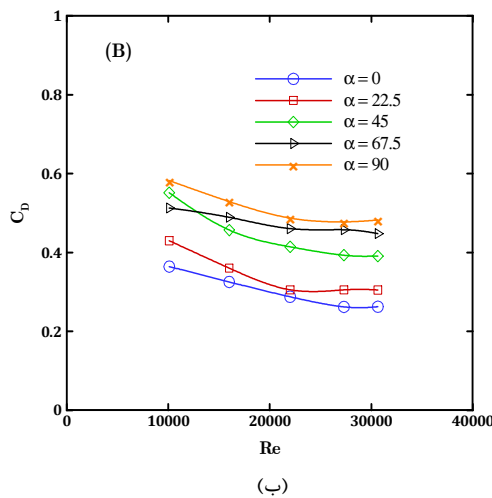
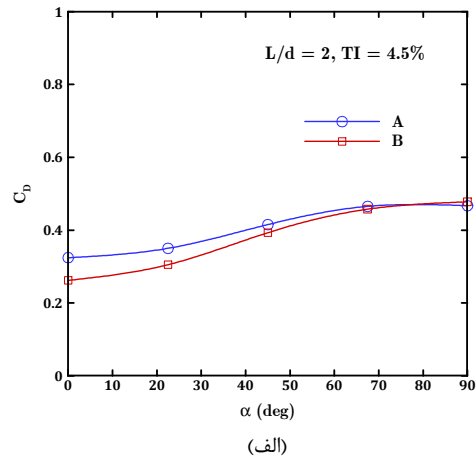
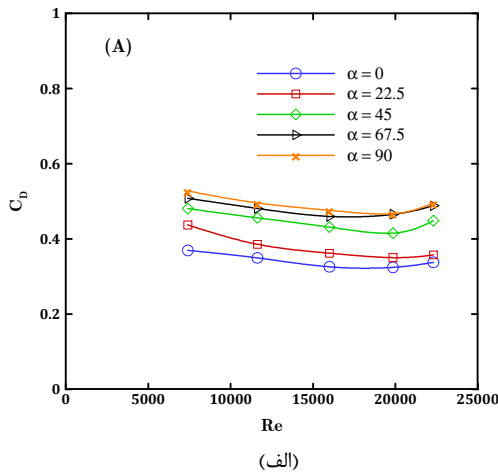
در شکل ۷ تغییرات ضریب پسا بر حسب α در $TI=4.5\%$ و در فواصل ۴ و $L/d=2$ برای دو سیلندر با قطرهای مختلف نشان داده شده است. در شکل ۷-الف، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش α ، ضریب پسا افزایش می‌یابد؛ اما این روند در زاویه‌های 67.5° و 90° درجه برای سیلندرهای A و B، یکسان است.

در شکل ۷-ب تغییرات ضریب پسا بر حسب α و در $L/d=4$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که روند افزایشی ضریب پسا تا زاویه 45° درجه برای هر دو سیلندر ادامه پیدا می‌کند ولی بعد از آن، مقدار ضریب پسا ثابت می‌ماند. این روند نشان می‌دهد که اثر سیلندر بالادست بر روی سیلندر پایین‌دست در زوایای بالاتر از بین رفته است. جریان اطراف دو سیلندر نزدیک به هم به‌گونه‌ای است که باعث می‌شود فشار جریان بیشتری را متحمل شوند.



شکل ۵- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز.

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر به بررسی تغییرات ضریب پسا بر روی دو سیلندر در آرایش‌های مختلف پرداخته شده است، لذا به منظور اعتبارسنجی ضریب پسا سیلندر پایین‌دست، نتایج بدست آمده برای حالت دو سیلندر هم قطر در $L/d=2$ و در زوایای مختلف با نتایج بدست آمده از تحقیق سامنر و همکاران [۱۹] مقایسه شده است (شکل ۶ را ببینید). در شکل ۶ مشاهده می‌شود که نتایج مطالعه حاضر در تطابق بسیار خوبی با نتایج مرجع [۱۹] می‌باشد.



شکل ۸- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای سیلندر با قطرهای مختلف در $L/d=2$.

شکل ۷- تغییرات ضریب پسا بر حسب α برای سیلندر با قطرهای مختلف در شدت اغتشاش $4/5$ درصد و در 2 فاصله مختلف برای عدد رینولدز 30650 .

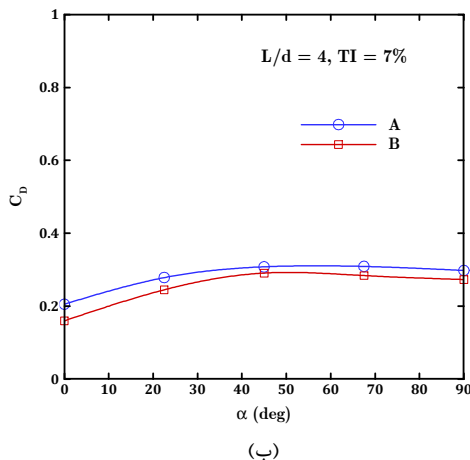
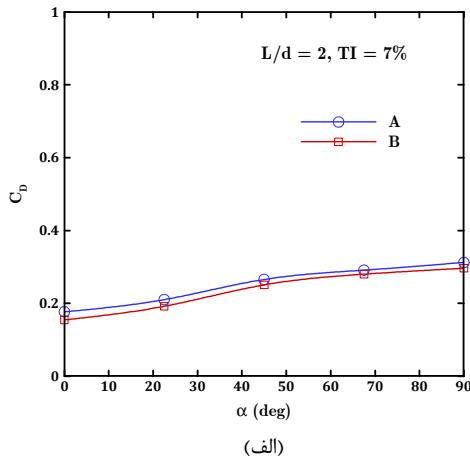
همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش عدد رینولدز در ابتدا ضریب پسای سیلندر پایین‌دست کاهش پیدا می‌کند که این امر ناشی از وجود سیلندر بالادست به‌صورت مانع در جلوی سیلندر پایین‌دست است که به‌نوعی با کاهش فشار در جلوی سیلندر پایین‌دست توزیع فشار در پایین‌دست جریان را کاهش می‌دهد. با افزایش زاویه سیلندر بالادست، اثر سیلندر از بین رفته و منطقه‌ای که ناشی از فشار سیلندر بالادست می‌باشد، تخلیه می‌شود و ضریب پسا برای سیلندر پایین‌دست افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۸-الف، مقدار ضریب پسا در محدوده 0.28 تا 0.56 و در شکل ۸-ب، مقدار ضریب پسا در محدوده 0.26 تا 0.58 متغیر می‌باشد. علت اصلی تغییرات این محدوده ناشی از قطر سیلندر پایین‌دست است که تأثیر بسزایی بر روی سیلندر بالادست دارد.

در شکل ۹، تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز در $L/d=4$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله طولی بین دو سیلندر پشت سرهم، ضریب پسا در زاویه صفر درجه نسبت به دیگر زوایا دارای اختلاف زیادی است که این امر ناشی از وجود گردابه

این درحالی است که با افزایش فاصله، دو سیلندر به صورت یک سیلندر تک عمل می‌کنند [۱۰]. با توجه به اینکه ضریب پسا در این محدوده از عدد رینولدز، مستقل می‌باشد، لذا انتظار می‌رود که ضریب پسا برای سیلندر منفرد دارای یک مقدار ثابت باشد که از نمودارها چنین نتیجه‌ای قابل مشاهده است. کاهش شدید ضریب پسای سیلندر پایین‌دست نسبت به سیلندر تک، ناشی از شدت اغتشاشات تولیدی در جریان ورودی به محفظه آزمایش است که تأثیر قابل توجهی بر روی نتایج دارد.

در شکل ۸، تغییرات ضریب پسای سیلندر پایین‌دست بر حسب عدد رینولدز به‌صورت جداگانه برای هر دو سیلندر نشان داده شده است که می‌توان به تشریح مجزای هرکدام از سیلندرها با توجه به موقعیت قرارگیری سیلندر بالادست در زوایا و اعداد رینولدز مختلف پرداخت.

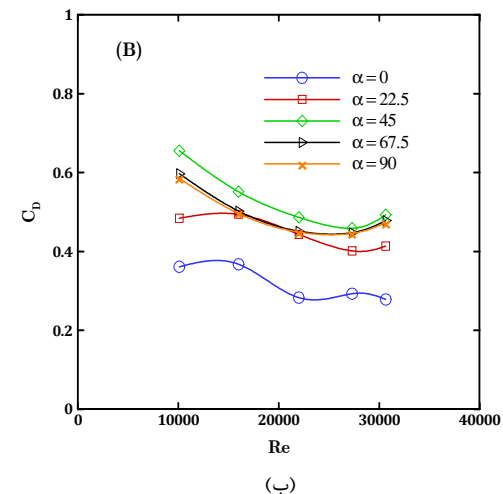
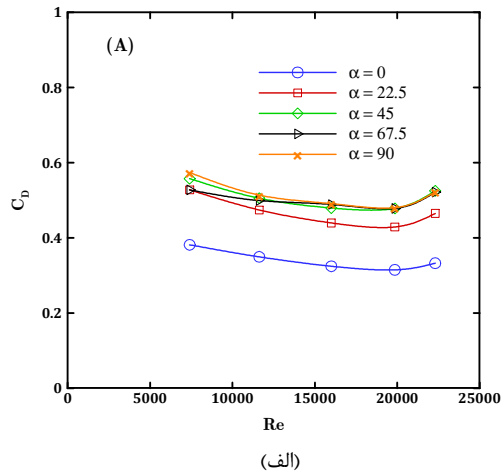
مختلف، با افزایش α ، ضریب پسا افزایش می‌یابد؛ ولی اثر شدت اغتشاشات مانع از افزایش بیش از حد آن به مقدار ضریب پسای سیلندر تک شده است. با توجه به قطر سیلندر A و B، تغییرات مشابه یکدیگر می‌باشند که بیانگر این موضوع است که قطر سیلندر نیز تأثیر بسزایی در تغییرات ضریب پسا دارد. برخلاف تصور که با افزایش قطر سیلندر، ضریب پسا افزایش پیدا می‌کند، اما این پدیده در آرایش سیلندرهایی متناوب به‌وضوح بیانگر این موضوع است که اثر سیلندر بالادست یکی از عوامل کاهش ضریب پسای سیلندر پایین‌دست است.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب پسا بر حسب α برای سیلندر با قطرهای مختلف در شدت اغتشاش ۷ درصد و در ۲ فاصله مختلف برای عدد رینولدز ۳۰۶۵۰.

در شکل ۱۱، تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز در $L/d=2$ برای سیلندرهایی A و B نشان داده شده است. با افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد، مقدار ضریب پسا در اعداد رینولدز مختلف، کاهش یافته است. با افزایش α ، ضریب پسا برای هر کدام از سیلندرها افزایش یافته است، به‌طوری که این تغییرات در زوایای ۶۷٫۵ و ۹۰ درجه برای سیلندرهایی A و B افزایش پیدا کرده است.

تشکیل شده در ناحیه بین دو سیلندر است. ریزش گردابه‌های دو سیلندر پشت سرهم با قطرهای غیر یکسان، حالت‌های مختلفی دارد که به فاصله بین دو سیلندر و قطرشان بستگی دارد [۸].

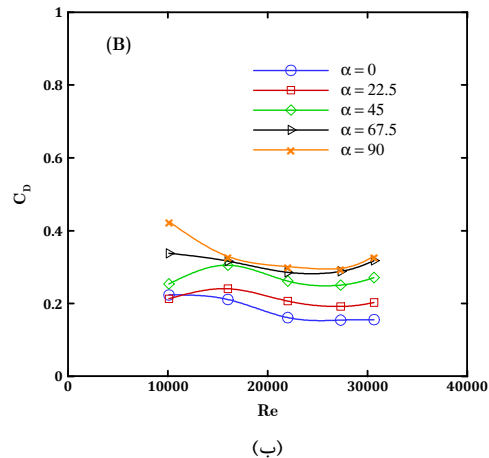
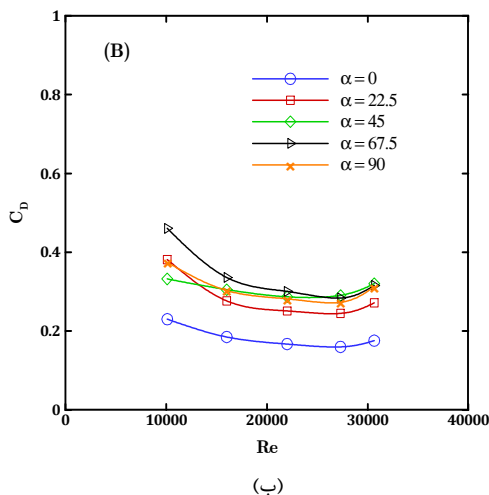
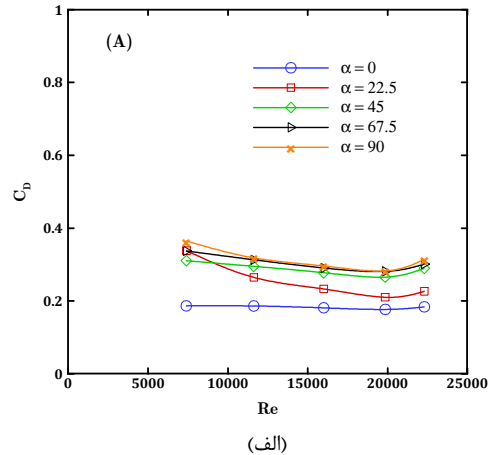
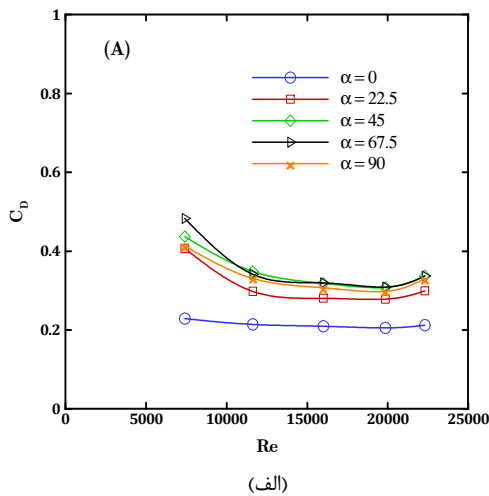


شکل ۹- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای سیلندر با قطرهای مختلف در $L/d=4$.

۵-۲- اغتشاشات ۷ درصد

افزایش اغتشاشات به معنی افزایش میزان درهمی جریان عبوری از روی مدل می‌باشد که این امکان با استفاده از شبکه اغتشاش ساز میسر می‌شود. حال با افزایش شدت درهمی جریان به بررسی ضریب پسا پرداخته شده است.

در شکل ۱۰، تغییرات ضریب پسا بر حسب α با افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد به ۷ درصد نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شدت اغتشاشات، ضریب پسا در تمام زوایا به‌صورت قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است. همان‌طور که انتظار می‌رود اثر شدت اغتشاشات و یا همان درهمی جریان تأثیر بسزایی بر روی کاهش ضریب پسا دارد. برای دو سیلندر انتخاب شده در زوایای



شکل ۱۱- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای سیلندر با قطرهای مختلف در $L/d=2$.

شکل ۱۲- تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز برای سیلندر با قطرهای مختلف در $L/d=4$.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی تأثیر شدت اغتشاشات جریان آزاد بر روی ضریب پسا و دو سیلندر پشت سرهم با چیدمان متناوب پرداخته شده است. اندازه‌گیری‌ها برای دو سیلندر با نسبت قطرهای ۱ و $d/D=0.72$ ، در فواصل ۲ و ۴ L/d و به ترتیب در پنج زاویه 0° ، 22.5° ، 45° ، 67.5° و 90° درجه انجام شد. آزمایش‌ها در پنج عدد رینولدز 10100 ، 16000 ، 22000 ، 27300 و 30650 بر اساس قطر سیلندر بالادست انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها به شرح زیر می‌باشند:

۱. با افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد، مقدار ضریب پسا برای سیلندر پایین‌دست نسبت به تحقیقات انجام شده در این زمینه کاهش چشمگیری داشته است.

۲. افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد به ۷ درصد، به دلیل تأثیر بسزایی که بر روی لایه برشی سیلندر بالادست دارد، ضریب پسا در سیلندر پایین‌دست را کاهش می‌دهد.

در شکل ۱۲، تغییرات ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز در $L/d=4$ برای سیلندره‌های A و B نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش α ، مقدار ضریب پسا افزایش می‌یابد. باید توجه داشت که با افزایش فاصله طولی بین دو سیلندر، تغییرات ضریب پسا در زوایای 45° ، 67.5° و 90° درجه با اختلاف اندکی برای هر دو سیلندر یکسان می‌باشد. با توجه به هر دو نمودار به‌وضوح می‌توان دریافت که بیشترین کاهش ضریب پسا در زاویه صفر درجه برای هر دو سیلندر اتفاق افتاده است. به این علت است که اثر طولی تأثیر بسزایی بر روی گردابه‌های تشکیل شده بین دو سیلندر و همچنین اثر فشار ناشی از سیلندر بالادست بر روی سیلندر پایین‌دست دارد.

$$\mu \text{ ضریب لزجت دینامیکی (kg/ms)}$$

$$\rho \text{ چگالی (kg/m}^3\text{)}$$

۹- مراجع

- [1] Zdravkovich, M.M., *Flow around Circular Cylinders: Volume 2: Applications*. Vol. 2, 1997: Oxford University Press.
- [۲] بک خوشنویس ع. و ایزدی یزدی م.ج.، بررسی تجربی تأثیر دوران استوانه روی کاهش ضریب پسا با جریان سنج سیم داغ. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۲، ص ۱۹-۳۰، ۱۳۹۵.
- [۳] ایزدی یزدی م.ج. و بک خوشنویس ع.، بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله سیلندر دایره‌ای چرخان در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف. *دوفصلنامه مکانیک سیالات و آیرودینامیک دانشگاه جامع امام حسین (ع)*، د. ۴، ش. ۱، ص ۵۱-۶۴، ۱۳۹۴.
- [4] Surry D., Some effects of intense turbulence on the aerodynamics of a circular cylinder at subcritical Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 52, No. 3, pp. 543-563, 1972.
- [5] Younis N., *The role of turbulent integral length scale on the drag of a circular cylinder in cross flow*. Electronic Theses and Dissertations, Windsor, Ontario, Canada, 2010.
- [6] Blackburn H. and Melbourne W., The effect of free-stream turbulence on sectional lift forces on a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 306, pp. 267-292, 1996.
- [7] Cheung J. and Melbourne W., Turbulence effects on some aerodynamic parameters of a circular cylinder at supercritical numbers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 14, No. 1-3, pp. 339-410, 1983.
- [8] Wang Y.-T., Yan Z.-M., and Wang H.-M., Numerical simulation of low-Reynolds number flows past two tandem cylinders of different diameters. *Water Science and Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 433-445, 2013.
- [9] Alam M.M., The aerodynamics of a cylinder submerged in the wake of another. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 51, pp. 393-400, 2014.
- [10] Supradeepan K., and Roy A., Characterisation and analysis of flow over two side by side cylinders for different gaps at low Reynolds number: A numerical approach. *Physics of Fluids*, Vol. 26, No. 6, pp 063602, 2014.
- [11] Vu H.C., Ahn J., and Hwang J.H., Numerical simulation of flow past two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangement at low Reynolds numbers. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 1594-1604, 2016.
- [12] Singha S., Nagarajan K.K., and Sinhamahapatra K., Numerical study of two-dimensional flow around two side-by-side circular cylinders at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, Vol. 28, No. 5, pp. 053603, 2016.
- [13] Meneghini J., et al., Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements. *Journal of fluids and structures*, Vol. 15, No. 2, pp. 327-350, 2001.
- [14] Gao Y., et al., Experimental study on the flow around two tandem cylinders with unequal diameters. *Journal of Ocean University of China*, Vol. 13, No. 5, pp. 761-770, 2014.
- [15] Wang J., et al., Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod. *Flow turbulence and combustion*, Vol. 76, No. 1, pp. 83-101, 2006.
- [16] Lee S.-I., Lee S.-I., and Park C.-W., Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod. *Fluid dynamics research*, Vol. 34, No. 4, pp. 233-250, 2004.

۳. افزایش شدت اغتشاشات جریان آزاد باعث می‌شود که ضریب پسای منفی بدست آمده برای دو سیلندر هم قطر در فاصله $L/d = 2$ که در اعتبارسنجی بدست آمده بود، از بین برود و مقدار آن افزایش پیدا کند.

۴. افزایش زاویه سیلندر بالادست باعث می‌شود که تداخل لایه برشی سیلندر بالادست بر روی سیلندر پایین دست از بین برود و به تدریج در زاویه‌های ۶۷٫۵ و ۹۰ درجه به حالت سیلندر تک تبدیل شود که همین امر باعث افزایش مقدار ضریب پسا در سیلندر پایین دست می‌شود.

۵. در فاصله طولی $L/d = 4$ ، ضریب پسا برای سیلندر پایین دست نسبت به فاصله $L/d = 2$ افزایش پیدا کرده است.

۶. در تمامی حالات، با افزایش عدد رینولدز مقدار ضریب پسا در زوایای کمتر از ۶۷٫۵ درجه به دلیل حضور سیلندر بالادست کاهش پیدا می‌کند و بعد از این زاویه ضریب پسای سیلندر پایین دست افزایش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد.

۷. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان دادند که عوامل مختلفی چون فاصله طولی، عدد رینولدز، زاویه دو سیلندر نسبت به هم و در نهایت میزان شدت آشفتگی جریان تأثیر بسزایی بر روی ضریب پسای سیلندر پایین دست و لایه برشی ناشی از سیلندر بالادست بر روی سیلندر پایین دست دارد.

۷- عدم قطعیت

میزان دقت اندازه‌گیری لودسل را می‌توان از رابطه زیر مورد بررسی قرار داد.

$$\varepsilon > \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_R^2 + \left(\frac{\varepsilon_Z \times L \times N}{W_1} \times t\right)^2} + (\varepsilon_S \times t)^2 \quad (4)$$

در رابطه (۴) مقدار ε بیان کننده دقت اندازه‌گیری لودسل است که هر کدام از این مقادیر به صورت زیر تعریف می‌شوند: ε_L درصد غیرخطی، ε_H خطای پسماند مغناطیسی، ε_R تکرارپذیری، ε_Z اثر دما بر تعادل صفر، ε_S اثر دما بر دامنه، L نرخ ظرفیت لودسل، N تعداد لودسل، W_1 حداکثر بار قابل اندازه‌گیری، t دامنه تغییرات دمایی لودسل است که با توجه به اطلاعات موجود در کاتالوگ لودسل، میزان دقت دستگاه ۰٫۱۴ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود این میزان بسیار پایین و قابل قبول برای انجام آزمایشات با این دستگاه می‌باشد.

۸- فهرست علائم

| | |
|----------|--|
| C_D | ضریب پسا |
| d | قطر سیلندر پایین دست (mm) |
| D | قطر سیلندر بالادست (mm) |
| F | نیرو (N) |
| Re | عدد رینولدز |
| α | زاویه قرارگیری سیلندر بالادست نسبت به سیلندر پایین دست (بر حسب درجه) |
| U | سرعت جریان آزاد (m/s) |

علائم یونانی

- [17] Munson B.R., Young D.F., and Okiishi T.H., *Fundamentals of fluid mechanics*. New York, Vol. 3. No. 4, 1990.
- [18] Achenbach E., Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, No. 3, pp. 565-575, 1972.
- [19] Sumner D., and Richards M., Some vortex-shedding characteristics of the staggered configuration of circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17, No. 3, pp. 345-350, 2003.