

## بررسی تجربی ضریب درگ در سیلندره‌های دایروی با چیدمان پشت سر هم در زوایای مختلف

**چکیده:** آرایش‌های زیادی برای قرار دادن استوانه‌ها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. چیدمان سیلندره‌های دایروی اعم از آرایش مجاور هم، پشت سرهم و متناوب در زوایای مختلف اخیراً توسط محققین مورد توجه قرار گرفته است. لذا در پژوهش حاضر، تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A، B و C با قطرهای ۱۵/۵، ۲۱/۳ و ۳۱ میلی‌متر در زوایای ۰°، ۵°، ۱۰°، ۲۲/۵°، ۴۵°، ۶۷/۵° و ۹۰° در دو نسبت فاصله ۲ و ۴ برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف (۱۴۷۰۰ < Re < ۴۸۰۰۰) به صورت تجربی بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که تغییرات ضریب پسا کاملاً به قطر استوانه‌ها و نسبت فاصله وابسته می‌باشد. تغییرات ضریب درگ در نسبت فاصله ۲ برابر قطر سیلندر اصلی در زوایای مختلف، وابستگی کمی به تغییرات عدد رینولدز دارد. همچنین با افزایش قطر سیلندر پایین دست از شدت تاثیر عدد رینولدز بر تغییرات افزایشی ضریب درگ کاسته می‌شود. در  $L/D=4$  ضریب پسا، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات زاویه، به جز زاویه صفر درجه از خود نشان می‌دهد.

**واژه‌های راهنما:** سیلندر دایره‌ای، آرایش متناوب، زوایای مختلف، ضریب درگ، بررسی تجربی

سیامک حاتمی  
کارشناس ارشد

میترا یادگاری  
دکتری

عبدالامیر

**بک خوشنویس\***

استاد، گروه مهندسی مکانیک،  
دانشکده فنی و مهندسی،  
دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

Siamak Hatami  
MSc.

Mitra Yadegari  
Ph.D.

Abdolamir  
Bak Khoshnevis\*  
Professor, Department  
of Mechanical  
Engineering, Faculty  
of Engineering,  
Hakim Sabzevari  
University, Sabzevar

## The Experimental investigation of the drag coefficient of two tandemly-arranged circular cylinders at different angles

**Abstract:** Many arrangements are available for placing cylinders with respect to each other. Some arrangements of circular cylinders include side-by-side, tandem, and staggered at different angles. Thus, in the present study, the drag coefficient at three cylinders, A, B and C with diameters of 15.5, 21.3 and 31 mm at different angles (0°, 5°, 10°, 22.5°, 45°, 67.5° and 90°) in  $L/D=2$  and 4 at various Reynolds numbers ( $14700 < Re < 48000$ ) is experimentally investigated. The results showed that the drag coefficient is completely dependent on the diameter of cylinders and the  $L/D$  ratio. The variation of drag coefficient in  $L/D = 2$  is less dependent on the Reynolds number changes at different angles. Also, by increasing the diameter of the downstream cylinder, the effect of the Reynolds number on the drag coefficient was reduced. The drag coefficient in  $L/D = 4$  is less sensitive to the angle changes except for the zero degree angle.

**Keywords:** Circular cylinder, Tandemly-arranged, Different angles, Drag coefficient, Experimental investigation

## ۱- مقدمه

فاصله، تاثیر چندانی بر پسای سیلندر کوچکتر از خود ندارد. فو و ژائو (۷) به بررسی عددی جریان ویسکوز عبوری از دو سیلندر که تحت نیروی نوسانی با فرکانس  $1/7 \leq f_e/f_0 \leq 0.5$  قرار داشت، پرداختند. نتایج نشان داد در فرکانس نوسانی پایین وقتی  $f_e/f_0 = 0.5$  است شکل گردابه، شبیه به جریان عبوری از دو سیلندر ثابت است. در  $f_e/f_0 = 1/3$  تغییر ناگهانی در شکل-گیری گردابه ها دیده شد و در  $f_e/f_0 = 1/5$  خطوط گردابه ها تطابق خوبی را در هر پرپود و دوره زمانی نشان دادند. یانگا و همکاران (۸) بصورت عددی و با استفاده از روش بولتزمن، محدوده گردابه ها را برای سه سیلندر دایروی در آرایش مثلثی در فواصل و اعداد رینولدز مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج بیانگر آن است که موقعیت دو سیلندر پایین دست، تاثیر زیادی بر سرکوب ریزش گردابه سیلندر بالادست دارد و گردابه سیلندر بالادست در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۲۰۰ توسط دو سیلندر دیگر سرکوب می‌گردد. همچنین با جابجایی سیلندرها بگونه ای که تک سیلندر در پایین دست قرار گیرد، مشخص گردید که سرکوب ریزش گردابه تک سیلندر در پایین دست توسط دو سیلندر دیگر در اعداد رینولدز بین ۱۰۳ تا ۱۷۵ اتفاق می‌افتد. سوپرادیپان و روی (۹) به تاثیر فاصله دو سیلندر مجاور هم بر ضریب پسا در اعداد رینولدز پایین پرداختند. نتایج نشان داد با افزایش فاصله بین دو سیلندر، ضریب پسا کاهش می‌یابد. ایزدی و همکاران (۱۰-۱۲) به بررسی تجربی ویژگی های جریان اطراف دنباله سیلندر بیضوی و تداخل دنباله با لایه مرزی بر روی صفحه تخت پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت فاصله ضریب پسای سیلندر کاهش می‌یابد.

روش‌های مختلفی برای کاهش نیروی پسای سیلندر وجود دارد که می‌توان به استفاده از میله در اطراف سیلندر اصلی، سیم اغتشاش ساز و استفاده از صفحات مارپیچ اشاره کرد. یادگاری و بک خوشنویس (۱۳-۱۶) به بررسی تجربی و عددی مشخصه های دنباله جریان، حول سیلندر بیضوی در زاویه حمله  $0^\circ$ ، تحت تاثیر سیم اغتشاش ساز با قطر ۱ میلی متر پرداختند. نتایج نشان داد در زاویه نصب  $23/7^\circ$  ضریب پسا به میزان  $56/5\%$  کاهش می‌یابد. وانگ و همکاران (۱۷) به بررسی کاهش درگ سیلندر دایروی در مقابل یک میله پرداختند. نتایج نشان داد در حالتی که  $L/D=1/5$ ، نیروی پسای سیلندر بطور چشمگیری کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش پسا در زاویه  $0^\circ$  می‌باشد. همچنین در زوایای کمتر از  $5^\circ$  میله می‌تواند بر کاهش نیروی وارد بر سیلندر تاثیر گذار باشد. ولی برای زوایای بیشتر از  $10^\circ$  میله بالادست تاثیر خود را از دست می‌دهد. لی و همکاران (۱۸) با استفاده از میله های کوچک و با نسبت قطرهای مختلف نسبت به سیلندر اصلی، اقدام به کاهش ضریب پسا کردند. مشاهده شد، قرار دادن میله در جلوی سیلندر اصلی منجر

در سال های اخیر، مطالعه نیروها و تحلیل جریان حول دو سیلندر دایروی در آرایش های مختلف، توسعه زیادی یافته است. جریان حول اجسام جریان بند<sup>۱</sup> به دلیل کاربردهای عملی در مهندسی از اهمیت بسیاری برخوردار است. آرایش های زیادی برای قرار دادن استوانه ها در مجاورت یکدیگر وجود دارد. چیدمان سیلندرها<sup>۲</sup> دایروی اعم از آرایش مجاورهم<sup>۳</sup>، پشت سرهم<sup>۳</sup> و متناوب<sup>۴</sup> در زوایای مختلف، اخیرا توسط محققین مورد توجه بوده است. خطوط انتقال برق، دسته لوله مبدل های حرارتی، برجهای واکنش شیمیایی، دودکش ها، سکوها<sup>۴</sup> ساحلی و پایه های سکوی نفتی در اقیانوس از جمله کاربردهای این چیدمان هستند. در ادامه به اختصار تحقیقات انجام شده روی سیلندرها مورد بررسی قرار گرفته است. هان و ژو (۱) به بررسی تاثیر فاصله دو سیلندر دایروی با چیدمان پشت سر هم بر ضریب پسا پرداختند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در فاصله های کمتر از فاصله بحرانی، ضریب پسا منفی و در فواصل بیشتر، ضریب پسا مثبت است. پور یوسفی و همکاران (۲) ضریب پسا را در سه سیلندر دایروی هم قطر با چیدمان مثلثی و چهار سیلندر دایروی با چیدمان مربعی در نسبت فواصل مختلف بررسی کردند. مشاهده شد در حالت سه سیلندری، کمترین مقدار ضریب پسا در سیلندرهایی پایین دست در فاصله ۲ و  $L/D=1/5$  اتفاق می‌افتد. در حالی که در حالت چهار سیلندری، میانگین ضرایب پسا در سیلندرهایی پایین دست در  $L/D < 2$  منفی می‌شود. منگینی و سالتارا (۳) به بررسی عددی دو سیلندر دایروی با چیدمان مجاور و پشت سر هم پرداختند. نتایج نشان داد که ضریب پسا برای هر دو سیلندر با چیدمان مجاور، مشابه بوده و بیشترین ضریب پسا در فاصله های دو و سه برابر قطر سیلندر رخ می‌دهد. وو و همکاران (۴) اثرات الگوی جریان را بر ضریب پسا و ضریب فشار برای دو سیلندر با چیدمان های پشت سر هم و جانبی با استفاده از مدل توربولانس  $k-\omega-SST$  ارائه کردند. مشخص گردید که تغییرات الگوی جریان باعث افزایش قابل توجه ضریب پسا و ضریب فشار در آرایش پشت سرهم و کاهش آنها در آرایش جانبی می‌گردد. گائو و همکاران (۵) به بررسی تجربی دو سیلندر پشت سرهم با قطرهای مختلف پرداختند. نتایج نشان داد الگوهای جریان برای نسبت فاصله های متفاوت در پشت هر دو سیلندر مختلف است. ژائو و چنگ (۶) به بررسی عددی جریان ویسکوز عبوری از دو سیلندر در قطرهای و زوایای متفاوت پرداختند. نتایج نشان داد، متوسط نیروی پسا روی هر دو سیلندر در زاویه  $90^\circ$  به حداکثر مقدار خود می‌رسد. همچنین نیروی پسای سیلندر بزرگتر در حوالی زاویه  $90^\circ$  با افزایش نسبت فاصله، زیاد می‌شود. در حالی که افزایش نسبت

<sup>3</sup> Tandem<sup>4</sup> Staggered<sup>1</sup> Bluff body<sup>2</sup> Side by side

در نسبت فاصله کمتر از ۲ ( $L/D < 2$ ) و بیشتر از ۴ ( $L/D > 4$ ) تغییرات ضریب درگ اندک بوده و روند تغییرات قابل پیش بینی است. زوایا تا حد ممکن بگونه ای انتخاب گردید که تغییرات ضریب درگ در حدفاصل آنها زیاد نباشد. به همین دلیل در زوایای کم ( $0^\circ$  و  $5^\circ$  و  $10^\circ$ ) که تغییرات ضریب درگ به زاویه حساس بوده، از زوایایی با مقادیر نزدیکتر (اختلاف زوایای کمتر) استفاده شد. حد فاصل این زوایا تغییرات ضریب درگ اندک و قابل پیش بینی می باشد. انتخاب قطر سیلندرها بر مبنای محدوده عملیاتی و اجرایی سازه ها که بطور معمول با ابعاد برابر و یا تا سی درصد اختلاف (اطلاعات جمع آوری شده) طراحی و اجرا می گردد، انتخاب گردید. در اینجا اختلاف قطر بین دو سیلندر A و B برابر ۲۷٪ و بین دو سیلندر B و C معادل ۳۱٪ می باشد. محدوده اعداد رینولدز وابسته به محدوده قابل قبول کاری تونل باد دانشگاه حکیم سبزواری بوده است. به منظور محاسبه ضریب پسا، ابتدا نیروی وارد شده به مدل در هر سرعت، توسط نیروسنج<sup>۱</sup> اندازه گیری می شود. سپس با استفاده از رابطه (۱) ضریب پسا محاسبه می گردد.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (1)$$

در رابطه (۱)  $F_D$  نیروی وارد بر مدل،  $\rho$  چگالی سیال،  $V$  سرعت جریان هوای ورودی تونل و  $A$  سطح مقطع مدل است که در مقابل جریان هوا قرار دارد.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی

دستگاه تونل باد مورد استفاده در این پژوهش از نوع دمنده مدار باز و دمشی می باشد. حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد این دستگاه در محفظه آرامش ۰/۱ درصد است. اتاقل آزمایش دستگاه تونل باد از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی متر و سطح مقطع  $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$  می باشد. نمونه ها بصورت افقی و در میانه محفظه آزمایش تونل باد (۲۰۰ میلی متر از کف) نصب شده است. نسبت انسداد، قطر بزرگترین استوانه تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد تعریف می شود، در پژوهش حاضر معادل ۰/۰۷۷۵ می باشد که نشان دهنده تاثیر ناچیز دیواره بر مدل است.

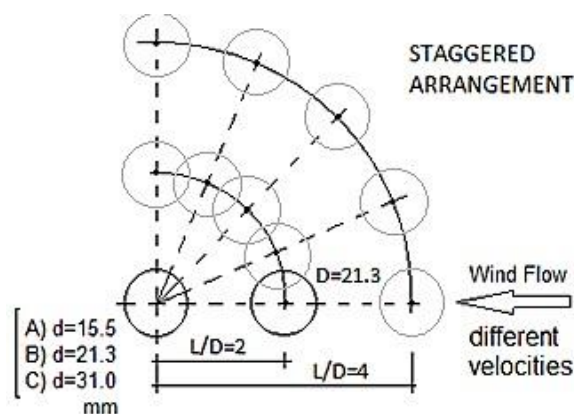
شکل (۲) شماتیک تونل باد مورد استفاده را نشان می دهد. دستگاه تونل باد مورد استفاده در این پژوهش، ساخت شرکت فرانسج صبا می باشد. با استفاده از الکتروموتور سه فاز ۷ کیلو واتی که برای تولید جریان هوا در دستگاه تونل باد به کار میرود، می توان به سرعت صفر تا ۳۰ متر بر ثانیه دست یافت. یکی از ابزارهای اصلی اندازه گیری نیروی جریان سیال بر روی اجسام

به کاهش ۲۹٪ ضریب پسا می شود. بک خوشنویس و همکاران (۱۹-۲۲) به بررسی تجربی تاثیر صفحات پیچان در سیلندر دایروی بر ضریب پسا پرداختند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که استفاده از صفحات پیچان، تاثیرات متفاوتی بر ساختار دنباله دارد به طوری که مقدار ضریب پسا در سیلندر دایروی با مارپیچ، نسبت به سیلندر صاف کمتر است.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی ضریب پسا حول سیلندر، بیشتر مطالعات به بررسی ضریب درگ حول تک سیلندر یا دو سیلندر در فواصل مختلف پرداختند. در حالی که در این پژوهش، تغییرات ضریب درگ سیلندر پایین دست ناشی از سیلندرهایی بالادست در فواصل، زوایا، قطرها و اعداد رینولدز مختلف (۱۹۲ حالت) بررسی شده است که این پژوهش را نسبت به پژوهش های پیشین متمایز می کند. نتایج حاصل از این پژوهش به دلیل جامع بودن می تواند توسط طراحان صنعتی و سازه ای به عنوان ابزاری مناسب برای بهینه سازی، طراحی و بهبود دقت مدل های مهندسی استفاده شود.

### ۲- بیان مساله

در این پژوهش، تغییرات ضریب پسا برای سه سیلندر C, B, A با قطرهای ۱۵/۵ و ۲۱/۳ و ۳۱ میلی متر تحت تاثیر سیلندر بالا دست در زوایای  $0^\circ$ ،  $5^\circ$ ،  $10^\circ$ ،  $22/5^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $67/5^\circ$  و  $90^\circ$  در دو نسبت فاصله ۲ و ۴ برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ( $14700 < Re < 48000$ ) بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. سیلندرهایی مورد استفاده در این آزمایش از جنس تفلون پلی تترا فلئور اتیلن می باشد. آرایش و مشخصات سیلندرها در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱ آرایش و مشخصات سیلندرها در پژوهش حاضر

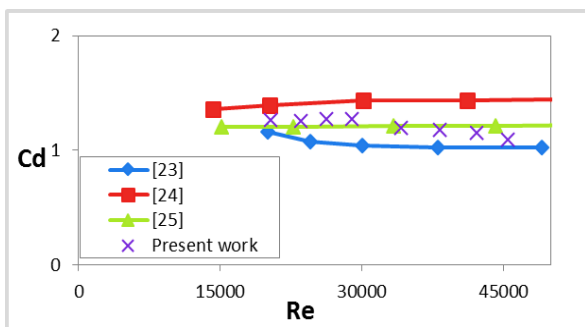
در مورد انتخاب محدوده فاصله ( $2 < L/D < 4$ ) این محدوده قبل و بعد از نسبت بحرانی ( $L/D = 3/6$ ) در نظر گرفته شده است. زیرا

<sup>۱</sup> Load cell

در تونل باد، دستگاه نیروسنج است. اصلی‌ترین کاربرد آن، اندازه گیری نیروی پسا می باشد. نیروسنج استفاده شده در تونل باد فوق الذکر از نوع تک نقطه ای (sps)، Am cells است که توانایی اندازه گیری نیرو تا ۵ نیوتن را دارد. شکل (۳) شماتیک نیروسنج مورد استفاده را نشان می دهد.

#### ۴- اعتبار سنجی

در شکل (۴) و جدول (۱) مقادیر ضریب درگ و درصد خطای کار حاضر در مقایسه با مراجع [۲۳-۲۵] در نسبت ابعادی برابر و محدوده مشخصی از اعداد رینولدز بررسی شده است. همان طور که مشاهده می شود، نتایج بدست آمده با نتایج دیگر محققین بخوبی مطابقت داشته و از دقت قابل قبولی برخوردار است. لازم به ذکر است که مراجع [۲۳-۲۵] به بررسی ضریب درگ جریان اطراف تک سیلندر استوانه‌ای صاف و صیقلی در محدوده اعداد رینولدز ۲۰۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰ پرداخته اند.



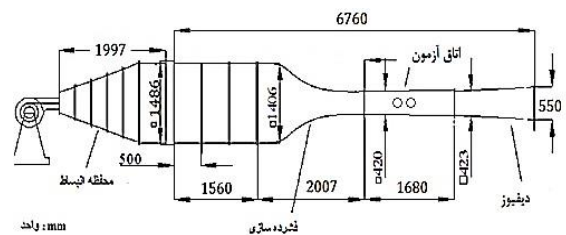
شکل ۴ مقایسه ضریب پسا سیلندر دایروی پژوهش حاضر با نتایج تجربی دیگر محققین [۲۳-۲۵]

جدول ۱ مقادیر ضریب درگ و درصد خطای کار حاضر در مقایسه با مراجع [۲۳-۲۵]

	Re	Cd	Present work	درصد خطا
Ref [۲۳]	۲۰۰۰۰	۱/۱۶۳۹۵	۱/۲۵۴۶۳	٪ ۷/۷۷۹۰۷۱
	۲۴۵۰۰	۱/۰۷۷۳۴	۱/۲۵۹۲۲	٪ ۱۹/۸۸۲۳۲
	۳۰۰۰۰	۱/۰۳۷۷۲	۱/۲۴۶۳۵	٪ ۲۰/۱۰۴۶۵
Ref [۲۴]	۳۸۰۰۰	۱/۰۱۹۶۹	۱/۲۳۶۷۳	٪ ۲۱/۲۸۴۹۰
	۲۰۲۴۶	۱/۲۹۰۷۴	۱/۲۵۷۰۹	٪ ۲/۶۰۷۰۳۱
	۳۰۰۸۹	۱/۳۳۰۲۶	۱/۲۴۵۲۴	٪ ۶/۳۹۱۲۳۱
Ref [۲۵]	۴۱۱۴۸	۱/۴۳۸۰۱	۱/۲۱۲۵۹	٪ ۱۵/۶۷۵۸۲
	۲۲۷۲۸	۱/۲۰۶۲۲	۱/۲۵۸۴۱	٪ ۴/۳۲۶۷۳۹
	۳۳۳۴۳	۱/۲۱۰۵۵	۱/۲۴۳۹۵	٪ ۲/۷۵۹۰۷۶
	۴۴۱۶۲	۱/۲۱۳۷۳	۱/۱۹۸۵۴	٪ ۱/۲۵۱۲۶۶



(الف)

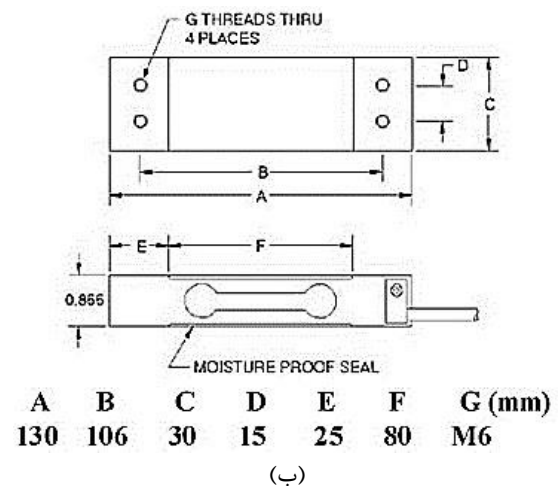


(ب)

شکل ۲ الف- تونل باد ب- شماتیک تونل باد مورد استفاده



(الف)

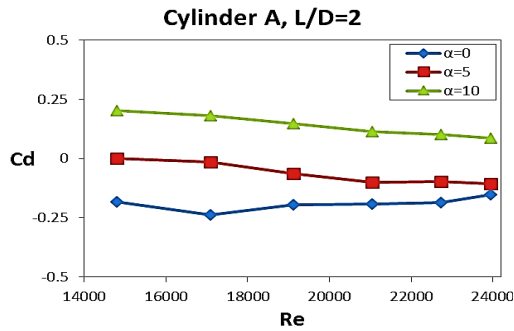
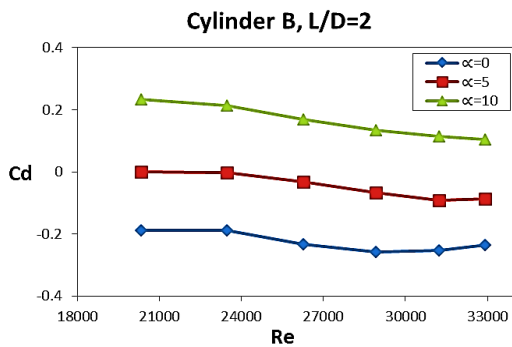
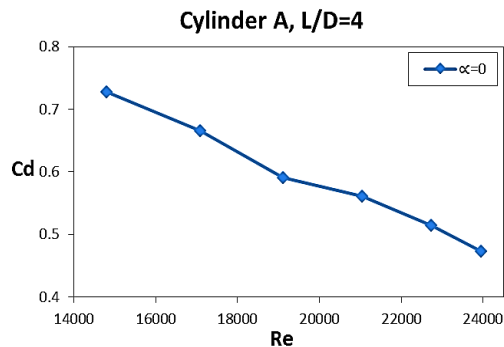
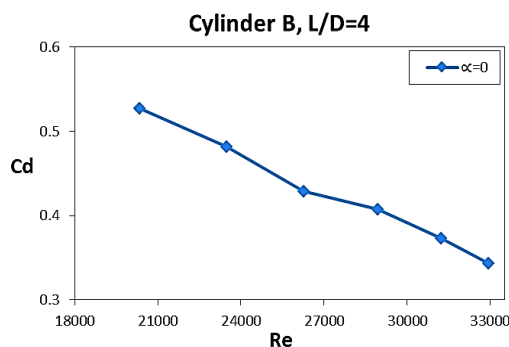


A B C D E F G (mm)  
130 106 30 15 25 80 M6

(ب)

شکل ۳ الف- نیروسنج نصب شده در تونل باد ب- شماتیک نیروسنج

## ۵- نتایج و بحث

شکل ۵ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=2$ شکل ۶ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=2$ شکل ۷ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=4$ شکل ۸ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=4$ 

در این بخش، ضریب پسا در سیلندره‌های پایین دست A، B و C در دو نسبت فاصله  $L/D=2$  و  $L/D=4$  به صورت تابعی از عدد رینولدز در زوایای مختلف در سه حالت (الف) زوایای کم ( $0^\circ$ ،  $5^\circ$  و  $10^\circ$ )، (ب) زوایای میانی ( $22/5^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $67/5^\circ$ ) و (ج) زاویه  $90^\circ$  بررسی شده است.

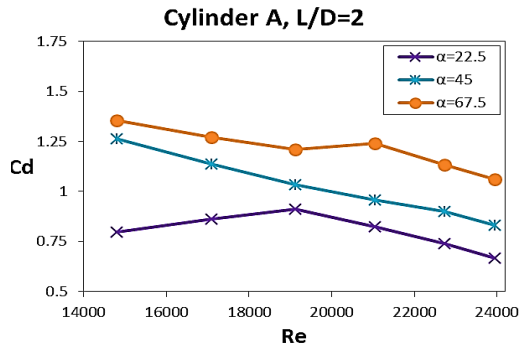
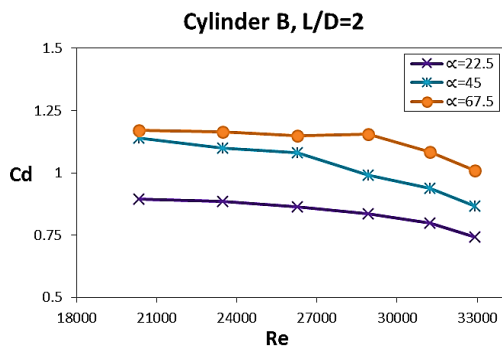
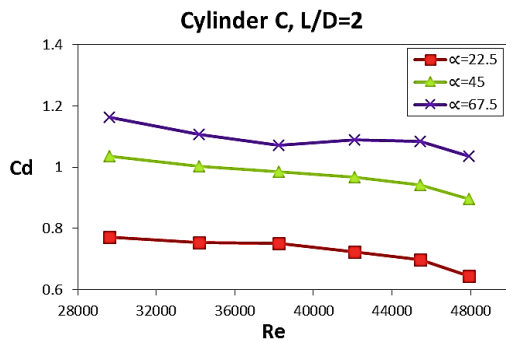
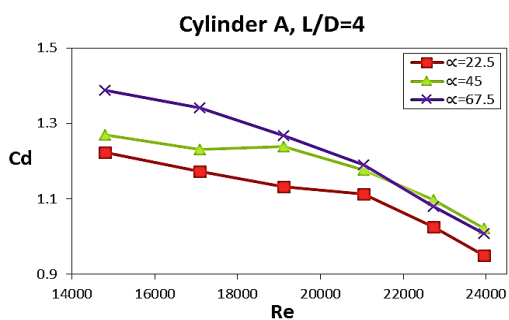
## ۵-۱- بررسی ضریب پسا در زوایای کم

ضریب پسای دو سیلندر A و B در  $L/D=2$  بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۵-۶) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در زوایای کم ( $0^\circ$ ،  $5^\circ$  و  $10^\circ$ )، ضریب پسا خیلی متأثر از افزایش عدد رینولدز نمی باشد و تغییرات آن اندک است. در زوایای ( $0^\circ$  و  $5^\circ$ )،  $L/D=2$ ، ضریب پسا در سیلندره‌های A و B منفی می باشد که حاکی از تجلی نیروی جاذبه بین سیلندره‌های بالادست و پایین دست است. همچنین وقتی فاصله دو سیلندر در حد کافی کم باشد در پشت سیلندر اصلی، ریزش گردابه بوجود نمی آید. به عبارت دیگر، گردابه تنها در پشت سیلندر پایین دست تشکیل می شود و جدایش لایه‌های برشی از سیلندر بالا دست، شامل بدنه پایین دست می گردد، یعنی مجموع سیلندرها همانند تک سیلندر عمل می کنند. در این حالت، یک الگوی جریان متقارن بین دو استوانه تولید می شود و گردابه های بزرگ ایجاد شده پشت استوانه دوم بصورت دوره ای جاری می شوند. در این حالت یک منطقه شبه ثابت بین دو سیلندر تشکیل می شود و با کاهش فشار، مکش به سمت سیلندر بالا دست آغاز می گردد که منجر به منفی شدن ضریب پسا در سیلندر پایین دست می گردد. الگوی جریان در این شرایط، حالت کاوک یا حفره نامیده می شود. بررسی های منگینی [۳] نیز نشان داده است که برای نسبت فواصل کمتر از سه ( $L/D < 3$ )، ضریب پسا منفی بوده و عملاً سیلندر پایین دست در محدوده کم فشار ناشی از جدایش لایه‌های برشی سیلندر بالا دست، غوطه ور می باشد.

ضریب پسای دو سیلندر A و B در  $L/D=4$  بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۷-۸) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش نسبت فاصله ( $L/D=4$ ) و عدد رینولدز، مقدار ضریب پسا در دو سیلندر A و B به آرامی کاهش می یابد. دلیل آن کاهش ضریب فشار با افزایش عدد رینولدز می باشد. همچنین مقایسه اشکال (۵-۸) در زاویه  $0^\circ$  بیانگر آن است که با افزایش نسبت فاصله از ۲ به ۴، افزایش قابل توجهی در ضریب پسای سیلندر پایین دست A و B به دلیل انتقال الگوی جریان خواهیم داشت.

<sup>1</sup> Cavity mode

## ۵-۲- بررسی ضریب پسا در زوایای میانی

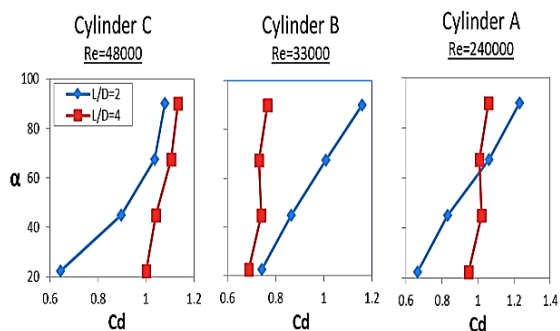
شکل ۹ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=2$ شکل ۱۰ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=2$ شکل ۱۱ ضریب پسای سیلندر C در  $L/D=2$ شکل ۱۲ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=4$ 

ضریب پسای سه سیلندر A و B و C در  $L/D=2$  و  $L/D=4$  بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۹-۱۴) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش زاویه قرار گیری سیلندرها نسبت به یکدیگر و تغییر آرایش سیلندرها از حالت پشت سر هم به حالت مجاور، ضریب پسا افزایش می یابد. ضریب پسای سه سیلندر A و B و C در  $L/D=2$  بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۱۵-۱۶) نشان داده شده است. ملاحظه می شود با زیاد شدن قطر استوانه ها، ضریب پسا در هر زاویه کاهش می یابد. لذا بر اساس موقعیت سیلندر پایین دست (زاویه و نسبت فاصله) می توان رفتار سیال را به دو حالت تقسیم بندی کرد. حالت اول تداخل دنباله، زمانی که یکی از سیلندرها به صورت جزئی یا کامل در دنباله دیگری قرار گرفته است. حالت دوم در مجاورت دنباله، زمانی که دو سیلندر در دنباله یکدیگر نیستند. مطابق شکل (۱۷) با افزایش نسبت فاصله و تغییر از حالت تداخل به مجاور، حساسیت ضریب پسا نیز نسبت به افزایش زاویه، کم می گردد.

با توجه به شکل های (۹-۱۱) در زاویه  $22/5^\circ$  ضریب پسا در سیلندر پایین دست، کمتر از ضریب پسا در حالت تک سیلندر ( $C_d \approx 1/2$ ) می باشد. لذا می توان زاویه ای بهینه بدست آورد که در آن زاویه، فرکانس ریزش گردابه ها کاهش یابد و کمترین ضریب پسا در آن محدوده بدست آید. مطابق شکل های (۱۳-۱۲) و (۱۰-۹) متناسب با افزایش زاویه و کاهش تاثیر حوزه جریان سیلندر اصلی بر سیلندر پایین دست، ضریب پسا افزایش می یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، ضریب پسا در سیلندرهایی A و B برای هر زاویه، نرخ نزولی خواهد داشت که برای نسبت فاصله  $L/D=4$  واضح تر می باشد.

در شکل های (۱۱ و ۱۴) مشاهده می شود که متناسب با افزایش زاویه، مقدار ضریب پسا در سیلندر پایین دست (C) نیز افزایش مییابد، هر چند با نزدیک شدن به زاویه  $90^\circ$  (آرایش مجاور هم) و با کاهش تاثیر پذیری دو سیلندر از یکدیگر، نرخ افزایش ضریب پسا خصوصا در نسبت فاصله بیشتر، کاهش مییابد. در زاویه  $45^\circ$ ، دنباله سیلندر اصلی با لایه برشی سیلندر پایین دست ادغام می شود و با ازدیاد زاویه به  $67/5^\circ$  فاصله جانبی دو سیلندر نیز افزایش مییابد و استوانه ها تاثیر کمتری بر یکدیگر می گذارند و مطابق [۲۶] در این حالت تاثیر متقابل دو استوانه قابل اغماض می باشد. این الگوی جریان، اثر متقابل ناچیز<sup>۱</sup> نام گذاری شده است، به همین دلیل از زاویه  $45^\circ$  به بعد مطابق شکل (۱۴) شاهد تغییرات بسیار اندک ضریب پسا در سیلندر پایین دست (C) تا زاویه  $90^\circ$  هستیم.

<sup>۱</sup> Negligible interaction flow pattern



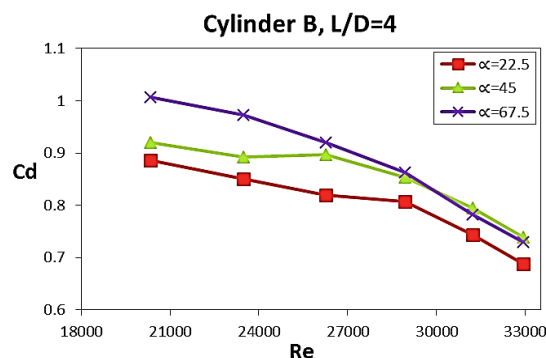
شکل ۱۷ مقایسه ضریب پسای سیلندرهاى C, B, A در زوایای مختلف در حداکثر عدد رینولدز اندازه گیری شده

### ۵-۳- بررسی ضریب پسا در زوایه قائم

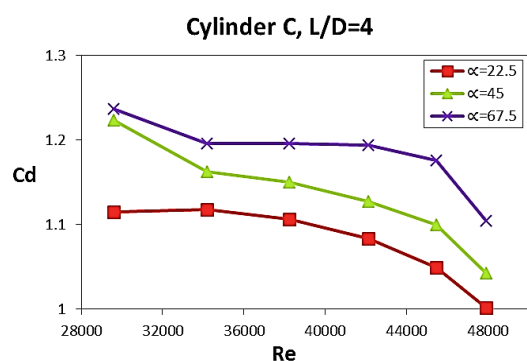
ضریب پسای سه سیلندر A و B و C در  $L/D=2$  و  $L/D=4$  بر حسب عدد رینولدز در اشکال (۲۳-۱۸) نشان داده شده است. در حالت دو استوانه هم قطر در زاویه  $90^\circ$  یک ناحیه پرفشار در جلوی سیلندرها شکل می گیرد. در داخل شکاف بین سیلندرها شاهد افت فشار هستیم که بیشتر از فشار طرفین سیلندرها می باشد. شدت تغییرات و محدوده فشار در اطراف سیلندرها نیز وابسته به نسبت فاصله است [۲۷]. لذا در این حالت در  $L/D=2$  نیروی دافعه بین سیلندری ایجاد می شود. همچنین در همین نسبت فاصله و در پی نوسانات دنباله، دنباله به سمت یکی از سیلندرها منحرف شده که به تناسب نسبت فاصله بر ضریب پسا تاثیر خواهد گذاشت و موجب افزایش پسای آن سیلندر می گردد. با افزایش فاصله در  $L/D=4$  دنباله ها به سمت مستقل بودن از یکدیگر پیش می روند و مانند تک استوانه عمل می کنند. بیشترین مقدار ضریب پسا در استوانه B در  $L/D=2$  و عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ می باشد که در حالت مشابه نسبت به  $L/D=4$  حدود ۳۰٪ افزایش نشان می دهد.

در اشکال (۲۳ و ۲۱ و ۱۹) در زاویه  $90^\circ$  و  $L/D=4$  مشاهده می شود که ضریب پسا برای سیلندر B کمتر از دو سیلندرهاى A و C است. زیرا تلاطم جریان در پشت سیلندر کوچکتر، بطور محسوسی بیشتر از سیلندر بزرگتر است، هر چند در فاصله دورتر، شدت اغتشاش در پشت سیلندر، بزرگتر از دیگری می گردد. همچنین دنباله گردابه های سیلندر کوچکتر، نظم کمتری دارد [۲۸] و ضریب پسای سیلندر کوچکتر (سیلندر A) در  $L/D=2$  همواره بیشتر از سیلندرهاى بزرگتر (سیلندر B, C) می باشد. همچنین ضریب پسای سیلندر C نیز بزرگتر از سیلندر B است (شکل های ۲۲ و ۲۰ و ۱۸).

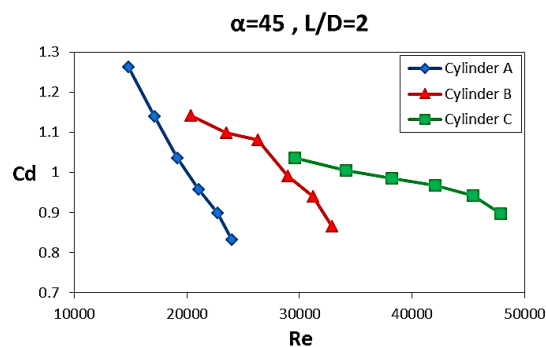
ضریب پسا در همه زوایا در  $L/D=4$  مثبت است و سیلندر پایین دست در هیچ شرایطی تحت تاثیر نیروی رانش قرار ندارد و این یکی از ویژگی های بارز این آرایش است. لازم به ذکر است همانطور که با افزایش زاویه، ضریب پسا زیاد می شود، تداخل بین سیلندرها کاهش می یابد.



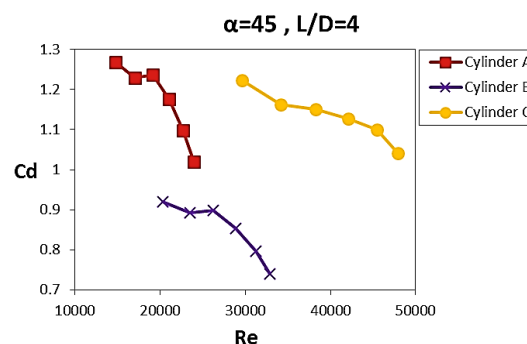
شکل ۱۳ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=4$



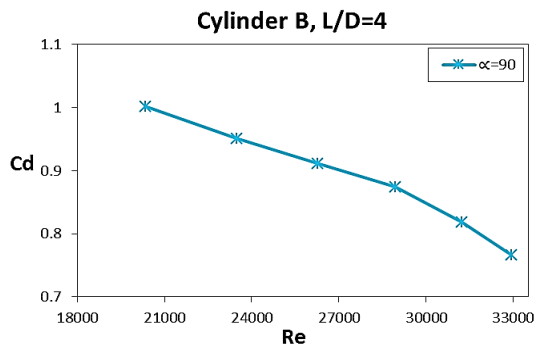
شکل ۱۴ ضریب پسای سیلندر C در  $L/D=4$



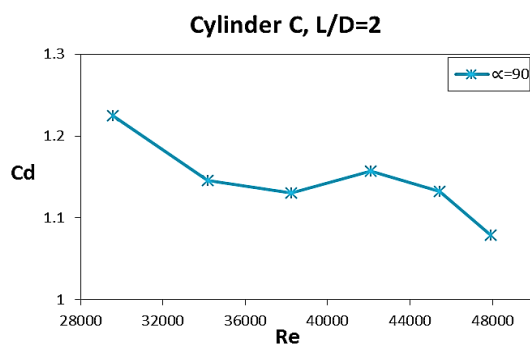
شکل ۱۵ ضریب پسای سیلندرهاى A, B, C در  $L/D=2$



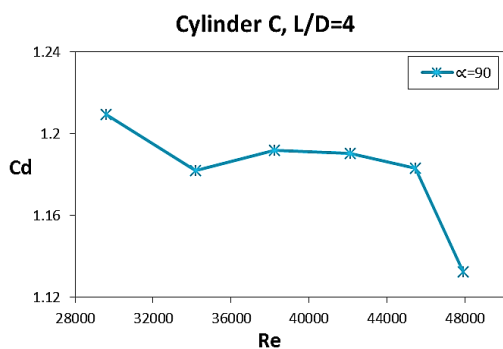
شکل ۱۶ ضریب پسای سیلندرهاى A, B, C در  $L/D=4$



شکل ۲۱ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=4$

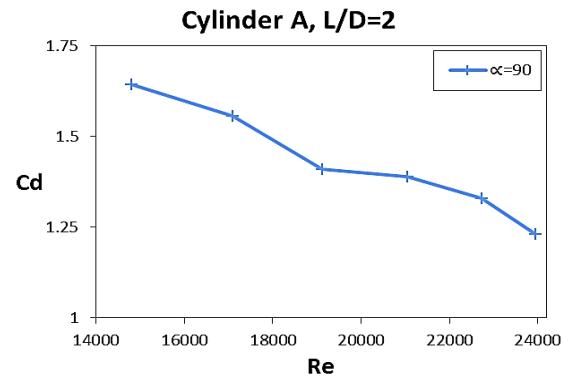


شکل ۲۲ ضریب پسای سیلندر C در  $L/D=2$

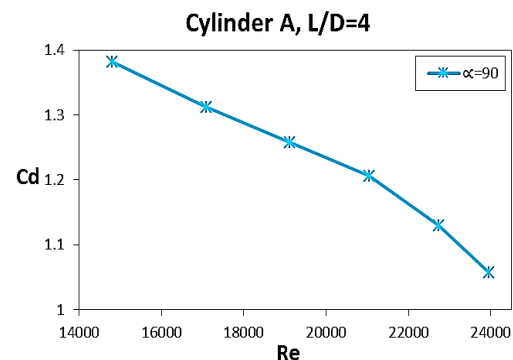


شکل ۲۳ ضریب پسای سیلندر C در  $L/D=4$

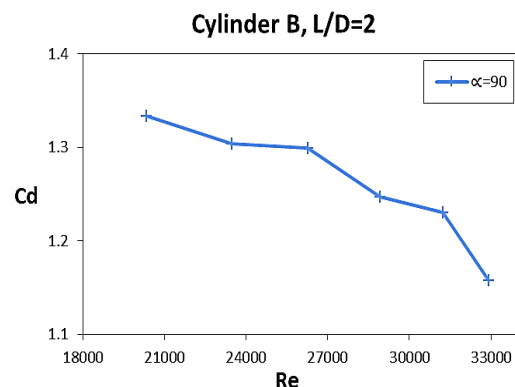
تغییرات ضریب درگ ناشی از پارامترهای نسبت فاصله، زاویه و عدد رینولدز در روند نمودارهای شکل (۲۲) و (۲۳) مرتبط با جابجایی ساختار جریان از حالتی به حالت دیگر است. بدین معنا که افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش طول دنباله در کانتورهای سرعت و گردابه و در نهایت کاهش تاثیر دو سیلندر بر یکدیگر می شود. با کاهش تاثیر دو سیلندر بر یکدیگر، ضریب درگ استوانه ها کاهش می یابد و به سمت ضریب درگ تک سیلندر میل می کند.



شکل ۱۸ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=2$



شکل ۱۹ ضریب پسای سیلندر A در  $L/D=4$



شکل ۲۰ ضریب پسای سیلندر B در  $L/D=2$

### ۶- تحلیل عدم قطعیت

نتایج دستگاه لودسل با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده (Amcells) با تقسیمات ۱۴۰۰۰ و کلاس دقت (C3) به دست آمده. از آنجایی که حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری توسط هر لودسل در واقع نشانگر دقت لودسل می باشد، بنابراین اگر ظرفیت لودسل (در اینجا برابر ۵۰۰۰ گرم) و Y تعداد تقسیمات لودسل باشد، V حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری را نشان می دهد به طوریکه:



۱۰- دامنه تغییرات ضریب پسا از زاویه  $22/5^\circ$  به بعد در  $L/D=4$  کمتر از  $L/D=2$  می باشد.

$$V = \frac{E}{Y} = 5000/14000 = 0/35 \quad (2)$$

با توجه به رابطه (۲) حداقل مقدار بار قابل اندازه گیری لودسل مورد استفاده در اینجا معادل  $0/35$  گرم بدست می آید. همچنین میزان دقت اندازه گیری لودسل را می توان از رابطه (۳) مورد بررسی قرار داد.

$$\varepsilon > \sqrt{\varepsilon_L^2 + \varepsilon_H^2 + \varepsilon_R^2 + \left(\frac{\varepsilon_Z \times L \times N}{W_1} \times t\right)^2} + (\varepsilon_S \times t)^2 \quad (3)$$

مقدار  $\varepsilon$  بیان کننده دقت اندازه گیری لودسل،  $L\varepsilon$  درصد غیرخطی،  $H\varepsilon$  خطای پسماند مغناطیسی،  $Re\varepsilon$  تکرارپذیری،  $Z\varepsilon$  اثر دما بر تعادل صفر،  $S\varepsilon$  اثر دما بر دامنه،  $L$  نرخ ظرفیت لودسل،  $N$  تعداد لودسل،  $W_1$  حداکثر بار قابل اندازه گیری و  $t$  دامنه تغییرات دمایی لودسل است.

## ۷- نتیجه گیری

در این پژوهش، تغییرات ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C با قطرهای  $15/5$  و  $21/3$  و  $31$  میلیمتر تحت تاثیر سیلندر بالا دست در زوایای  $0^\circ$ ،  $5^\circ$ ،  $10^\circ$ ،  $22/5^\circ$ ،  $45^\circ$ ،  $67/5^\circ$ ،  $90^\circ$  در دو نسبت فاصله  $4$  و  $2$  برابر قطر سیلندر اصلی در اعداد رینولدز مختلف ( $14700 < Re < 48000$ ) بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد:

- ۱- ضریب پسا در سه سیلندر A, B, C از زاویه  $22/5^\circ$  تا  $90^\circ$  در  $L/D=2$  به ترتیب  $84/5$ ،  $55/7$ ،  $67/6$ ٪ افزایش می یابد.
- ۲- افزایش ضریب پسا در سه سیلندر مذکور در زوایای  $22/5^\circ$  تا  $90^\circ$  در  $L/D=4$  به ترتیب  $11/4$ ،  $11/4$ ،  $13/1$ ٪ است.
- ۳- تغییرات ضریب پسا در  $L/D=2$  در زوایای مختلف، وابستگی کمی به تغییرات عدد رینولدز دارد.
- ۴- در  $L/D=4$  ضریب پسا، حساسیت کمتری نسبت به تغییرات زاویه، بجز زاویه صفر درجه از خود نشان می دهد.
- ۵- تغییرات ضریب پسا کاملاً به قطر استوانه ها و نسبت فاصله  $L/D$  وابسته می باشد.
- ۶- مرز بین ضریب پسا مثبت و منفی در سیلندرها A و B در اعداد رینولدز مورد بررسی، زوایای  $10^\circ$  و  $5^\circ$  می باشد.
- ۷- در زاویه  $22/5^\circ$  برای  $L/D=2$  با توجه به پایین بودن ضریب پسا نسبت به حالت تک سیلندر، تعیین نقطه و زاویه بهینه جهت محاسبات فنی امکان پذیر می باشد.
- ۸- با افزایش قطر سیلندر پایین دست، ضریب پسا کاهش می یابد.
- ۹- روند افزایش ضریب پسا با افزایش زاویه از  $22/5^\circ$  به بعد، کاهش می یابد.

## ۸- فهرست علائم و اختصارات

### علائم انگلیسی

A	سطح مقطع مدل [ $m^2$ ]
$C_d$	ضریب پسا
D	قطر سیلندر بالادست [m]
d	قطر سیلندر پایین دست [m]
$F_D$	نیروی وارد بر مدل [ $kg \ ms^{-2}$ ]
L	فاصله مرکز به مرکز استوانه ها [m]
Re	عدد رینولدز
V	سرعت جریان هوا [ $ms^{-1}$ ]
$\alpha$	زاویه قرارگیری سیلندرها نسبت به سیلندر پایین دست (deg)
$\rho$	چگالی سیال [ $kgm^{-3}$ ]

## ۹- مراجع

- [1] Han, Z., Zhou, D., Gui, X., Flow past two tandem circular cylinders using Spectral element method, *The Seventh International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7)*, Shanghai, China, September 2-6, pp. 546-554, (2012).
- [2] Pouryoussefi, G., Mirzaei, M.A.S.O.U.D., Ardekani, M.A., Experimental investigation of force coefficients for groups of three and four circular cylinders subjected to a cross-flow, *Mechanical and Aerospace Engineering Journal*, Vol. 5, pp. 87-95, (2009).
- [3] Meneghini, J.R., Saltara, F., Siqueira, C.D.L.R., Ferrari Jr, J.A., Numerical simulation of flow interference between two circular cylinders in tandem and side-by-side arrangements, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 15, pp. 327-350, (2001).
- [4] Vu, H.C., Ahn, J., 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, pp. 1594-1604, (2016).
- [5] Gao, Y., Etienne, S., Wang, X., Tan, S.K., Experimental study on the flow around two tandem cylinders with unequal diameters, *Journal of Ocean University of China*, Vol. 13, pp. 761-770, (2014).
- [6] Zhao, M., Cheng, L., Teng, B., Liang, D., Numerical simulation of viscous flow past two circular cylinders of different diameters, *Applied Ocean Research*, Vol. 27, pp. 39-55, (2005).

- Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 76, pp. 83-101, (2006).
- [18] Lee, S.J., 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, pp. 200-233, (2004).
- [19] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., An experimental investigation of the effects of helical strakes on the characteristics of the wake around the circular cylinder, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Mechanical Engineering, pp. 1-14, (2022).
- [20] Bak Khoshnevis, A., Boloki, M., Yadegari, M., The investigation of the effect of the helical strakes' height on the cylinder wake, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 10(1), pp. 223-236, (2020).
- [21] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Entropy generation analysis of turbulent boundary layer flow in different curved diffusers in air-conditioning systems, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135(6), pp. 1-22, (2020).
- [22] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Numerical study of the effects of adverse pressure gradient parameter, turning angle and curvature ratio on turbulent flow in 3D turning curved rectangular diffusers using entropy generation analysis, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 135(7), pp. 1-21, (2020).
- [23] Cengel, Y.A., and Cimbala, J.M., Properties of fluids, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, pp. 37-73, (2014).
- [24] Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H., and Huebsch, W.W., *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons. Inc., USA, (2006).
- [25] Achenbach, E., Experiments on the flow past spheres at very high Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 54, pp. 565-575, (1972).
- [26] Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F., and Wu, K., Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod, *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 76, pp. 83-101, (2006).
- [27] Simiu E., Scanlan R.H., *Wind Effect on Structures: Fundamentals and Design*, John Wiley and Sons, New York, Vol. 688, (1996).
- [28] Lam, K.M., Wong, P.T.Y., Ko, N.W.M., Interaction of flows behind two circular cylinders of different diameters in side-by-side arrangement, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 7, pp. 189-201, (1993).
- [7] Fu, Y., Zhao, X., Wang, X., Cao, F., Computation of flow past an in-line oscillating circular cylinder and a stationary cylinder in tandem using a CIP-based model, *Mathematical Problems in Engineering*, (2015).
- [8] Yang, S., Yan, W., Wu, J., Tu, C., Luo, D., Numerical investigation of vortex suppression regions for three staggered circular cylinders, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 55, pp. 207-214, (2016).
- [9] Supradeepan, K., 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, (2014).
- [10] Ezadi Yazdi, M.J., Bak Khoshnevis, A., Comparing the wake behind circular and elliptical cylinders in a uniform current, *SN Applied Sciences*, Vol. 2(5), pp. 1-13, (2020).
- [11] Ezadi Yazdi, M.J., Rad, A.S., Khoshnevis, A.B., Features of the flow over a rotating circular cylinder at different spin ratios and Reynolds numbers: Experimental and numerical study, *The European Physical Journal Plus*, Vo. 134(5), pp. 1-21, (2019).
- [12] Yazdi, M.J.E., , Khoshnevis, A.B., Experimental study of the flow across an elliptic cylinder at subcritical Reynolds number, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 133(12), pp. 533, (2018).
- [13] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., Numerical and Experimental study of characteristics of the wake produced behind an elliptic cylinder with trip wires, *Iranian Journal of Science and Technology*, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 45, pp. 265-285, (2021).
- [14] Yadegari, M., An optimal design for S-shaped air intake diffusers using simultaneous entropy generation analysis and multi-objective genetic algorithm, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(10), pp. 1-25, (2021).
- [15] Yadegari, M., Bak Khoshnevis, A., A numerical study over the effect of curvature and adverse pressure gradient on development of flow inside gas transmission pipelines, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 42(8), pp. 1-15, (2020).
- [16] Yadegari, M., and Bak Khoshnevis, A., Investigation of entropy generation, efficiency, static and ideal pressure recovery coefficient in curved annular diffusers, *The European Physical Journal Plus*, Vol. 136(1), pp. 1-19, (2021).
- [17] Wang, J.J., Zhang, P.F., Lu, S.F., Wu, K., Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod,