



## بررسی تجربی کاهش ضریب پسای سیال روی یک سیلندر دایره‌ای بوسیله سیم اغتشاش ساز

عبدالمیر بک خوشنویس<sup>۱</sup>، فرزانه فروزش<sup>۲</sup>، مسعود پدram<sup>۳</sup> و محسن وحیدی<sup>۴</sup>

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه حکیم سبزواری، گروه مهندسی مکانیک  
<sup>۲</sup> و <sup>۳</sup> دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه حکیم سبزواری، گروه مهندسی مکانیک

### چکیده

یک تحقیق تجربی بر روی دنباله سیلندری که دو سیم در زوایای  $\alpha = 40^\circ, 140^\circ$  آن نصب شده در عدد رینولدز  $Re = 30000$  صورت گرفته است. قطر سیمهای استفاده شده برابر  $1/5$  و  $1$  mm می باشند. اثرات سیم اغتشاش ساز بر روی کاهش ضریب پسا، پروفیل های سرعت متوسط و کاهش سرعت و نصف دهانه، پروفیل های شدت اغتشاشات و عدد استروهال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد برای  $Re = 30000$ ، حالت بهینه ای وجود دارد که در آن ضریب پسای عامل بر روی سیلندر به مقداری کمتر از ضریب پسای سیلندر صاف می رسد. در حالت بهینه، برای سیلندر ۲ سیمه با دو قطر متفاوت، سیم ضریب پسای سیلندر کاهش پیدا می کند. نتایج نشان می دهد زمانی که از سیلندر دور می شویم، روند تغییرات قله سرعت متوسط ( $w_0$ ) و قله پروفیل اغتشاشات به ترتیب کاهش-افزایشی-کاهش می باشد. همچنین آزمایشات نشان می دهد مقادیر قله پروفیل اغتشاشات و کاهش سرعت ( $w_0$ ) در سیلندر با سیم اغتشاش ساز در مقایسه با یک سیلندر صاف عموماً کاهش یافته است.

**کلمات کلیدی:** سیم داغ- دنباله - سیم اغتشاش ساز- سیلندر دایره ای- ضریب پسا.

### ۱- مقدمه

این گونه پیکر بندی ناشی از علاقه به فهم بارهای روی ساختارها با توجه به حرکت سیال و کنترل بیشتر جریان سیال برای کاهش نیروی سیالی که سبب تخریب ساختارها تحت شرایط نامطلوب می گردد، می باشد. از آنجایی که روش های تئوری و محاسبات هنوز با طراحی عملی مهندسی فاصله دارد، از روش تجربی استفاده می کنند که یکی از این

جریان روی سیلندر به صورت عملی با بسیاری از کاربردهای مهندسی همچون وسایل نقلیه، پل ها و ساختمان ها و سایر ساختارهای مهندسی درگیر می باشد. دنباله جریان سیلندر می تواند باعث نیروهای ناپایایی گردد که توانایی زیادی برای تخریب تمام ساختارهای بدنه ای دارد. علت تحقیقات بر روی

تا ۱۸۰ درجه انجام داده و اثرات آن بر روی مشخصه‌های جریان و ضریب پسا و ضریب برآ و همچنین عدد استروهال را روی سیلندر بررسی کردند. آنها نشان دادند ضرایب و مشخصه‌های جریان در بازه‌های زاویه‌ای معین تغییر خاصی می‌کنند. به گونه‌ای که در این بازه‌های مشخص، عدد استروهال و ضریب پسا روند معکوس هم را دنبال می‌کنند.

برای رینولدزهای پایین، پیرسی<sup>۹</sup> و همکاران [۱۰] نشان‌دادند برای تبدیل جریان رینولدز پایین به جریان بحرانی باید قطر سیم‌ها کاملاً بزرگ باشد.

هوور<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۱] یک سری مطالعات بر روی اثرات برآمدگی و اتصالات روی سیلندر تحت عنوان سیم اغتشاش‌ساز متصل شده بر روی سیلندر صاف در یک جریان پایا را بررسی نمودند. در این تحقیق در رینولدز حدود ۴۶۰۰۰ تاثیر سیم‌ها بر مشخصات دنباله، بارهای ناشی از گردابه‌ها و همچنین ارتعاشات بررسی می‌گردد. آنها دریافتند که برای یک سیلندر ثابت، اثرات سیم اغتشاش‌ساز باعث کاهش چشمگیر نیروی برآ و نیروی پسا می‌گردد. رمبرگ<sup>۱۱</sup> و پاپ<sup>۱۲</sup> [۱۲] اثرات سیم اغتشاش‌ساز روی ناپایداری ناشی از جریان یک سیلندر تنها را مورد بررسی قرار دادند. آلام<sup>۱۳</sup> و همکاران [۱۳] تحقیقی تجربی بر روی اثرات استفاده از سیم اغتشاش-ساز بر روی نیروهای سیال پایا و نوسانی روی سیلندر تنها و چندین سیلندر انجام دادند. عدد رینولدز کاری آنها ۵۵۰۰۰ بود. آنها در این تحقیق از سه سری سیم که موقعیت زاویه‌ای آنها تغییر می‌کرد، استفاده کردند. آنها به این نتیجه رسیدند زمانی که موقعیت زاویه‌ای سیم ( $\alpha$ ) تغییر می‌کند، سه رژیم جریانی برای سیلندر مجهز به سیم اغتشاش‌ساز به وجود می‌آید. همچنین ژو<sup>۱۴</sup> و همکاران [۱۴] تحقیقی عددی در همین زمینه انجام دادند. آنها کار عددی خود را در دو سری عدد رینولدز انجام دادند و مشاهده کردند با افزایش عدد رینولدز، زاویه بهینه نصب سیم برای کاهش ضریب پسا به طرف نقطه سکون جریان حول سیلندر حرکت

روش‌ها تونل باد است که اغلب تنها روشی است که برای تعیین درست پارامترهای جریان، به‌ویژه پسای مدل‌ها به کار می‌رود [۱]. روش‌های متعددی برای کاهش نیروهای سیال عامل بر روی یک ساختار توسط دراوکویچ<sup>۱</sup> [۲] بررسی شد. همچنین برای کنترل جریان عبوری از روی سیلندر و دنباله آن می‌توان از روش‌های مختلفی استفاده نمود؛ همانند تغییرات سطحی سیلندر همچون نصب سیم اغتشاش‌ساز، نصب فین، ایجاد شیار روی سطح و یا مانند تحقیق صورت گرفته توسط بیرمن [۳] با استفاده از یک صفحه نازک که در موقعیت جریان بالا دستی سیلندر نصب می‌گردد. در این تحقیق دنباله سیلندر با توجه به نصب سیم اغتشاش‌ساز بررسی گردیده و نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. استفاده از سیم اغتشاش‌ساز برای تحت تاثیر قرار دادن جریان عبوری از روی سیلندر توسط محققین زیادی مطالعه گردیده است. شاید فیچ<sup>۲</sup> و وارسپ<sup>۳</sup> [۵] اولین محققانی بودند که اثر سیم اغتشاش‌ساز را بر جریان حول یک سیلندر مطالعه کردند. آنها دو سیم اغتشاش‌ساز در موقعیت زاویه‌ای ۶۵ درجه را به صورت متقارن بر روی سطح سیلندر قرار دادند و اثرات اغتشاش‌ساز را بر روی کاهش نیروی پسا در بازه انتقال رینولدز بررسی کردند. آنها اثرات تغییر زاویه را بر روی کاهش نیروی پسا بررسی نکردند. جیم<sup>۴</sup> و ترانگ<sup>۵</sup> [۷] و همچنین ایگاراشی<sup>۶</sup> [۸] تحقیق آزمایشگاهی بر روی اثرات قطرهای مختلف و موقعیت‌های مختلف سیم اغتشاش‌ساز را برای جریان عبوری از روی سیلندر در بازه اعداد رینولدز بین  $d=1.0/6D$  تا  $d=1.0/3D$ ، با قطر سیم اغتشاش‌ساز  $d=1.6/3D$  و سیم اغتشاش‌ساز با قطر نسبی بزرگتر، گذار را در رینولدزهای پایین‌تر محقق می‌سازد و محل بهینه برای سیم اغتشاش‌ساز با هدف کاهش نیروی پسا را به طرف نقطه سکون هدایت می‌کند. نبراسکا<sup>۷</sup> و باتیل<sup>۸</sup> [۹] تحقیقاتی را بر روی سیلندر مجهز به سیم اغتشاش‌ساز در زاویه نصب صفر

<sup>1</sup> Zdravkovich

<sup>2</sup> Fage

<sup>3</sup> Warsap

<sup>4</sup> Jame

<sup>5</sup> Truong

<sup>6</sup> Igarashi

<sup>7</sup> Nebraska

<sup>8</sup> Batill

<sup>9</sup> Pearcey

<sup>10</sup> Hover

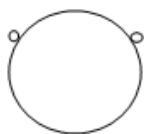
<sup>11</sup> Romberg

<sup>12</sup> Popp

<sup>13</sup> Alam

<sup>14</sup> Zhou

سرعت تونل باد را با کنترل دورفن تعبیه شده در آن می‌توان از صفر تا ۳۰ متر بر ثانیه تغییر داد. در این تحقیق توان تولیدی برای هر کدام از آزمایشات، یکسان انتخاب شده است. با توجه به مشخصات تونل باد، شدت اغتشاشی جریان آزاد یا بالادست استوانه ۰/۱ درصد است که از این حیث دستگاه تونل باد دارای دقت بالایی می‌باشد. برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان از جریان سنج سیم داغ دما ثابت استفاده شده است که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاشات، فرکانس و گردابه‌های ایجاد شده در پشت سیلندر را دارد. تونل باد و دستگاه جریان سنج سیم داغ هر دو ساخت شرکت فرانسجس صبا می‌باشند. پراب یک بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای سنسوری به طول ۱/۲۵ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر و با سه درجه آزادی استفاده شده است این مکانیزم به کمک نرم افزار کنترل شده و اطلاعات موقعیت لحظه‌ای پراب قابل ثبت می‌باشد. مکانیزم فوق بر روی قاب‌های جداگانه‌ای مستقل از پایه‌های تونل باد نصب شده‌اند تا ارتعاشات احتمالی بدنه تونل به مکانیزم جابجاکنده پراب منتقل نگردد و کیفیت داده‌برداری افزایش می‌یابد. سیلندر مورد آزمایش دارای قطر ۲۰mm می‌باشد. برای ایجاد توربولانس‌های مختلف در آزمایشات از سه اندازه سیم در قطرهای ۱/۵mm، ۱mm و ۰/۵mm که به صورت دو تایی روی سیلندر نصب می‌شوند، استفاده می‌گردد (شکل ۲ را ببینید).



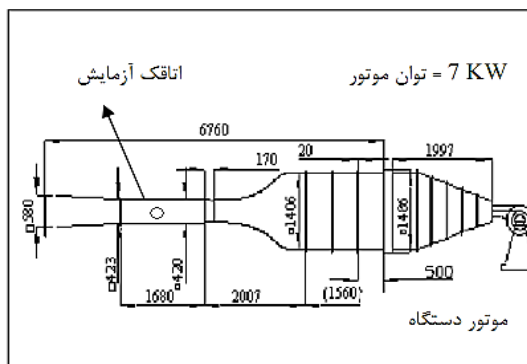
شکل ۲- مدل برای اندازه‌گیری سرعت

این تحقیق اثر سیم اغتشاش ساز بر روی پارامترهای دنباله و اغتشاشات سیلندر را بررسی می‌کند و در ادامه ضریب پسای سیلندر محاسبه می‌شود. داده‌برداری در ایستگاه‌های ۰.۲۵، ۱، ۵، ۱۰، ۱۵، ۱۷، ۲۰،  $x/d$  انجام شده‌است که  $x$  فاصله از پشت سیلندر و  $d$  هم قطر سیلندر می‌باشد، که در شکل ۳ از هفت ایستگاه، چهار ایستگاه مزبور نشان داده شده است.

می‌کند. در تحقیق دیگر که آیب<sup>۱</sup> و همکاران [۱۵] انجام دادند، اثرات سیم اغتشاش ساز را بر روی انتقال حرارت یک سیلندر بررسی نمودند. سیم به صورت ثابت بر روی سیلندر نصب شده بود و جریان سیال با رینولدزهای مختلف از روی سیلندر عبور می‌کرد. آنها نتیجه گرفتند انتقال حرارت از سیلندر با عرض دنباله سیلندر ارتباط تنگاتنگی دارد. همچنین آلبا و همکاران [۱۶] با نصب سیم اغتشاش ساز در بازه زاویه‌ای مشخص به صورت متقارن بر روی سیلندر به بررسی پارامترهای جریان پرداختند. آنها در این تحقیق شاهد پنج رژیم جریانی عبوری از روی سیلندر با تغییر موقعیت زاویه‌ای سیم اغتشاش ساز بودند، که هر یک از پارامترهای جریان با روند خاص خود تغییر می‌کند. همچنین در این جریان با تغییر عدد رینولدز جریان عبوری از روی سیلندر محل بهینه نصب سیم اغتشاش ساز برای کاهش ضریب پسا نیز تغییر می‌کرد. در این تحقیق سعی بر آن است تا با نصب سیم اغتشاش ساز بر روی سیلندر، ضریب پسای آن را تا حد امکان کاهش دهیم.

## ۲- تجهیزات و مراحل آزمایش

تمام آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه آیرودینامیک دانشگاه حکیم سبزواری انجام شده است. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدار باز و دمشی بوده که دارای اتاقک آزمایشی از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی‌متر، عرض ۴۰cm و ارتفاع ۴۰cm می‌باشد. شکل ۱ نمای تونل باد دمشی را نشان می‌دهد.



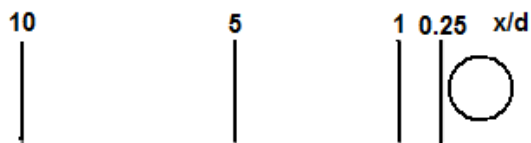
شکل ۱- نمای شماتیک تونل باد

<sup>1</sup> Aiba

و اندازه‌گیری‌ها انجام می‌شوند. در مرحله چهارم نیز همین روند برای سیم  $1/5$  mm و سیلندر انجام می‌گردد.

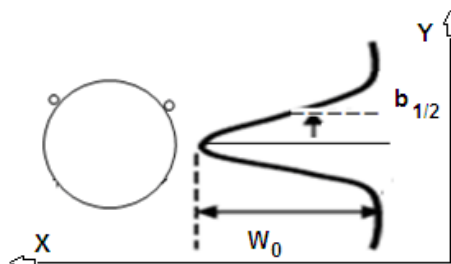
### ۳- تحلیل نتایج

با توجه به پروفیل‌های سرعت بی‌بعد مربوط به سیلندر صاف و سیلندر دو سیمه با سه قطر سیم مختلف، با افزایش فاصله از مدل، توزیع جریان یکنواخت‌تر می‌شود. در ایستگاه اول (دقیقا پشت مدل) به دلیل کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل بوجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از دنباله به جریان پتانسیل در بالا و پایین مدل شدید است. به عبارت دیگر سرعت در بالا و پایین مدل گرادیان شدیدی پیدا می‌کند و  $U/U_{ref}$  از حدود  $0.2$  تا  $1/3$  تغییر می‌کند ( $U_{ref}$  سرعت جریان آزاد یا سرعت مرجع است). به تدریج با دور شدن از مدل این گرادیان از بین می‌رود (شکل ۵ را ببیند).



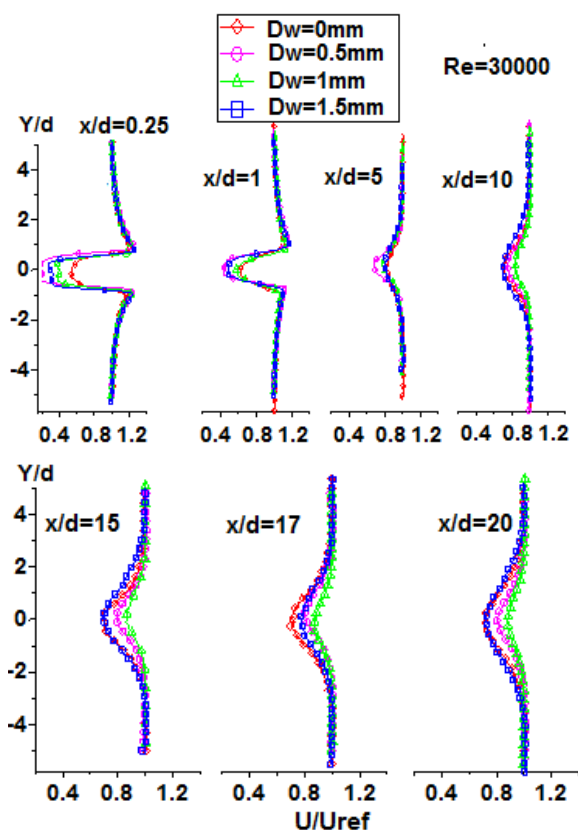
شکل ۳- سیلندر مورد آزمایش و ایستگاه‌های اندازه‌گیری

پارامترهای کاهش سرعت  $W_0$  و نصف دنباله در نصف عرض  $(b_{1/2})^2$  در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- پارامتر کاهش سرعت  $W_0$  و نصف دهانه

دنباله در نصف عرض  $b_{1/2}$



شکل ۵- نمودار سرعت بدون بعد برای سیلندر صاف و

سیلندر دو سیمه، سیم با قطر های 0.5, 1, 1.5 mm در عدد

رینولدز ۳۰۰۰۰

پارامتر کاهش سرعت و شدت اغتشاشات از روابط زیر بدست می‌آیند:

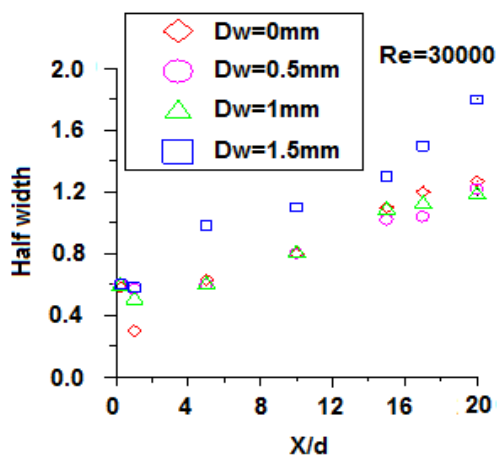
$$w_0 = \text{velocity defect} = \frac{U_\infty - U_{\min}}{U_\infty} \quad (1)$$

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

این آزمایشات در چهار مرحله انجام شده که به صورت زیر است: مرحله اول نصب سیلندر بدون سیم اغتشاش ساز در محفظه آزمایش است. در تمامی حالات جریان هوا دارای عدد رینولدز  $Re=30000$  (که بر اساس قطر سیلندر بدست آمده است  $Re=ud/v$ ) بوده و شدت اغتشاشی  $0.1$  درصد اندازه‌گیری شده است. سپس در مرحله دوم، دو سیم به قطر  $0.5$  mm را به گونه‌ای که نسبت به افق دارای زاویه  $40^\circ$  و  $140^\circ$  درجه می‌باشند؛ روی سیلندر نصب شده، و ایستگاه‌های مورد نظر اندازه‌گیری می‌شوند. در مرحله سوم نیز سیم به قطر  $1$  mm در همان موقعیت قبلی بر روی سیلندر نصب شده

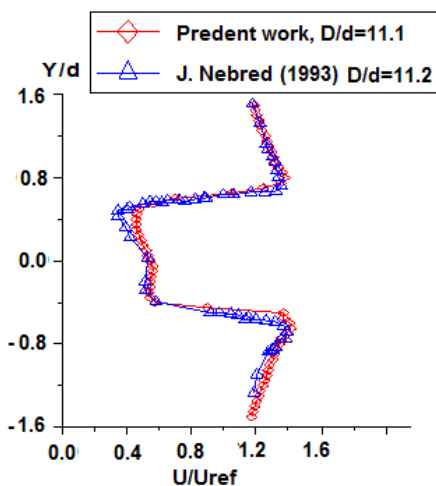
<sup>۱</sup> Velocity defect

<sup>۲</sup> Half-width



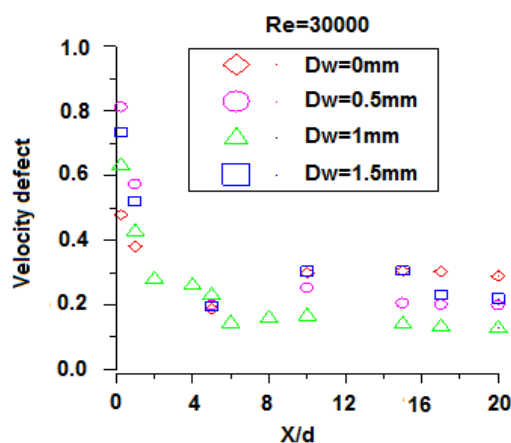
شکل ۷- نمودار نصف دهانه در نصف عمق برای سیلندر صاف و سیلندر دو سیمه، سیم با قطر های 0.5, 1, 1.5 mm در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰

همچنین برای اعتبار سنجی کار حاضر به مقایسه پروفیل سرعت در رینولدز ۳۰۰۰۰ با نصب یک سیم در زاویه صفر درجه بر روی سیلندر می‌پردازیم که نتایج حاضر تطابق خوبی را با کار نبرس<sup>۱</sup> و باتیل<sup>۲</sup> [۸] نشان می‌دهد (شکل ۸ را ببینید).



شکل ۸- مقایسه پروفیل سرعت، زاویه نصب سیم در صفر درجه

می‌توان گفت تا ایستگاه  $x/d=5$  قله پروفیل‌های سرعت (کمینه سرعت موجود در دنباله  $(W_0)$ ) کاهش پیدا کرده و از این ایستگاه تا ایستگاه  $x/d=10$  افزایش پیدا کرده سپس از ایستگاه  $x/d=10$  به بعد باز کاهش پیدا می‌کند، یا به عبارتی پارامتر تفاضل سرعت دارای روند کاهشی-افزایشی-کاهشی می‌باشد (به شکل ۶ مراجعه نمایید).



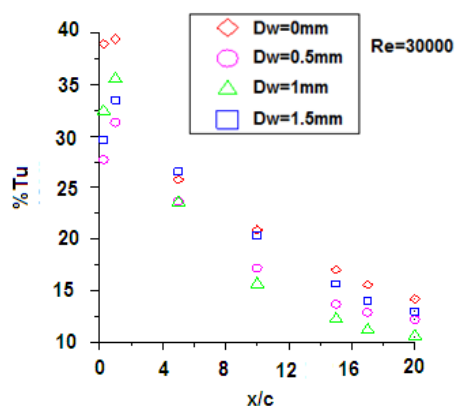
شکل ۶- نمودار کاهش سرعت برای سیلندر صاف و سیلندر دو سیمه، سیم با قطر های 0.5, 1, 1.5 mm در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰

همچنین با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر دیده می‌شود کمترین مقدار قله سرعت (بیشترین مقدار سرعت در دنباله) و نصف دهانه در نصف عمق مربوط به سیلندر دو سیمه با قطر سیم ۱mm می‌باشد. همچنین از نمودارها آشکار است که از  $x/d=5$  به بعد بیشترین  $W_0$  و  $b_{1/2}$  به ترتیب مربوط به سیلندر صاف و سیلندر با قطر سیم ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد (شکل‌های ۶ و ۷ را ببینید). همچنین برای سه ایستگاه اول کمترین و بیشترین قله پروفیل‌ها مربوط به سیلندر صاف و سیلندر با قطر سیم نیم میلی‌متر می‌باشد.

<sup>1</sup> Nebres

<sup>2</sup> Batil

و این روند برای هر چهار مدل تکرار می‌شود. همچنین می‌توان گفت بیشترین مقدار پارامتر ماکزیمم اغتشاشات از ایستگاه  $x/d=5$  به بعد به ترتیب در سیلندر صاف، سیلندر با قطر سیم  $0.5\text{mm}$  و  $1\text{mm}$  و سپس در سیلندر با قطر سیم  $1\text{mm}$  و سیلندر با قطر سیم  $0.5\text{mm}$  اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۰- نمودار ماکزیمم اغتشاشات برای سیلندر صاف و سیلندر دو سیمه در رینولدز ۳۰۰۰۰

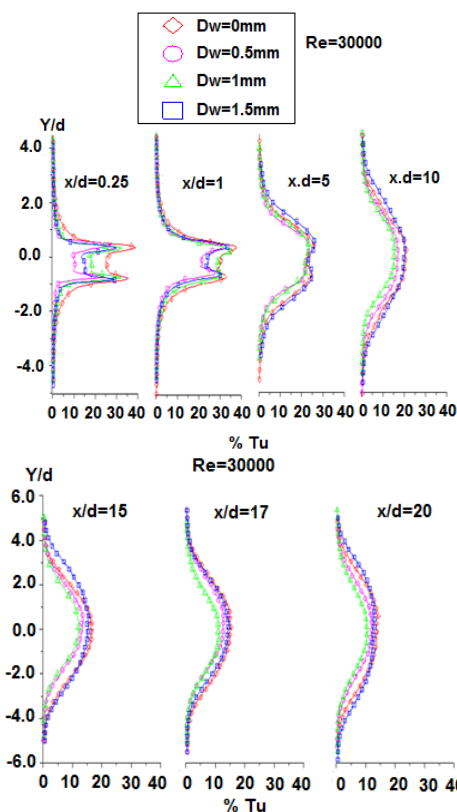
عدد استروهال، از اعداد بی بعد است که فرکانس نوسانات گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را بصورت بی بعد بیان می‌کند و بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = f \times \frac{c}{U_{\infty}} \quad (3)$$

که  $f$ ، فرکانس گردابه پشت مدل،  $c$ ، طول وتر پره و  $U_{ref}$  سرعت جریان آزاد سیال می‌باشد. فرکانس گردابه‌های تشکیل شده پشت مدل را می‌توان بوسیله جریان سنج سیم داغ در تونل باد بدست آورد.

مطابق شکل ۱۱، با بررسی عدد استروهال (تعریف شده بر اساس قطر سیلندر) دیده می‌شود، بیشترین و کمترین مقدار پارامتر مزبور به ترتیب در سیلندر با قطر سیم  $0.5\text{mm}$  و  $1\text{mm}$  اتفاق می‌افتد. از بین تمامی نوسانات جریان پشت مدل، مسلم است که نوسانات گردابه‌های کارمن دارای بیشترین دامنه هستند. بنابراین فرکانس مربوط به بیشترین دامنه، در واقع همان مقدار فرکانس گردابه کارمن است. با توجه به این نکته می‌توان گفت سیم با قطر  $0.5\text{mm}$ ، گردابه‌هایی با فرکانس بزرگتر در پشت سیلندر ایجاد می‌کند و همین‌طور نصب سیم‌هایی با قطر بیشتر از  $0.5\text{mm}$  سبب کاهش فرکانس گردابه‌های کارمن شده است.

در بررسی آشفتگی دنباله مشاهده می‌گردد با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر، عرض پروفیل‌ها باز تر می‌گردد، به گونه‌ای که قله نمودارها از ایستگاه سوم به بعد از دو قله‌ای موجود، شکل یک سهمی به خود می‌گیرند (شکل ۹ را ببینید). به نظر می‌رسد که این رفتار، به تغییرات بنیادین در فرآیند انتشار گردابه مربوط باشد. بعد از شکل‌گیری گردابه در دنباله نزدیک، گردابه‌ای‌ها به سمت پایین دست جریان منتقل می‌شوند. دنباله نزدیک را معمولاً بصورت ناحیه تداخل بین سیلندر و جریان جدا شده تعریف می‌کنند [۲۴]. انتظار می‌رود که در نتیجه این انتقال، تنها تغییرات کوچکی در کمیت‌های اندازه‌گیری شده در جهت جریان رخ دهد.



شکل ۹- نمودار اغتشاشات برای سیلندر صاف و سیلندر دو سیمه، رینولدز ۳۰۰۰۰

از طرف دیگر قله اغتشاشات نیز با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر، روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند (شکل‌های ۹ و ۱۰). به گونه‌ای که برای یک مدل خاص ماکزیمم اغتشاشات نه در ایستگاه  $x/d=0$  بلکه در ایستگاه  $x/d=1$  اتفاق می‌افتد

در نهایت با جایگذاری معادله (5) در معادله (7) خواهیم داشت:

$$2b \frac{db}{dx} \propto \beta C_D d \quad (8)$$

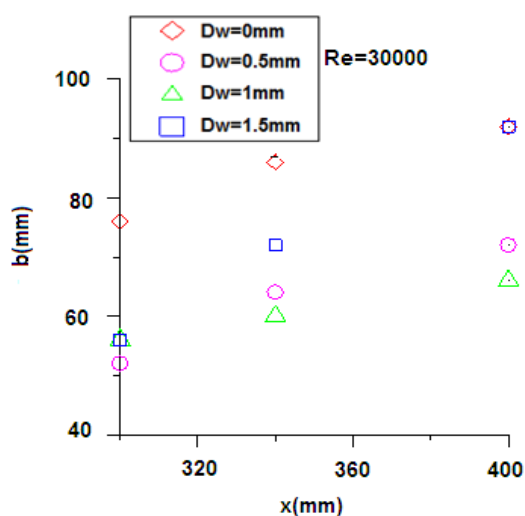
همچنین برای دنباله دو بعدی داریم:

$$b \propto (\beta x C_D d)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

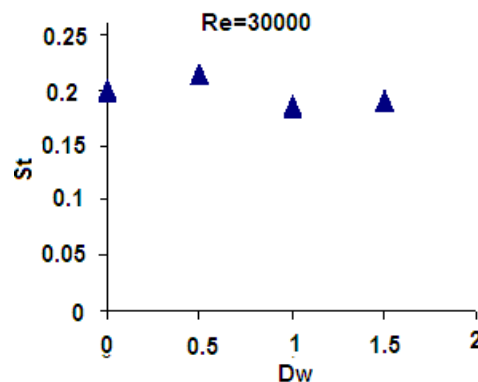
اگر معادله (9) را در معادله (8) جایگزین نماییم درمی‌یابیم که میزان کاهش تقعر در منحنی سرعت در پایین دست جریان برای دنباله دوبعدی برابر است با:

$$\frac{u_1}{U_\infty} \propto \left( \frac{C_D d}{\beta x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

به عبارت دیگر عرض دنباله دو بعدی متناسب با  $\sqrt{x}$  افزایش می‌یابد و سرعت متناسب با  $1/\sqrt{x}$  کاهش می‌یابد. در نتیجه برای معادله (9)،  $C$  (عامل تساوی معادله (9)) وجود دارد که معادله را از حالت تناسب خارج کرده و آن را به تساوی تبدیل کند. با ترسیم نصف عرض دنباله (b) (شکل ۱۲) و محاسبه  $C$  برای تمامی حالت‌ها به نتایج جدول ۱ خواهیم رسید که نشان می‌دهد  $C$  برای هر چهار حالت تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین همین روند را برای پروفیل سرعت معادله (۱۰) انجام می‌دهیم که نتایج در جدول ۱ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب  $a$  مفروض برای تمامی حالت‌های ممکن تقریباً یکسان می‌باشد.



شکل ۱۲- نصف دهانه (b) دنباله سیلندر صاف و دو سیمه



شکل ۱۱- تغییرات عدد استروهال برای قطرهای مختلف سیم

#### ۴- بر آورد افزایش عرض و کاهش سرعت

وقتی یک جسم جامد در داخل سیال ساکن کشیده می‌شود در پشت آن دنباله تشکیل می‌شود. سرعت‌ها در دنباله، کوچک‌تر از جریان اصلی هستند و افت سرعت دنباله به افت ممنتوم منجر می‌شود که ناشی از کشش روی جسم است. به موازات زیاد شدن فاصله از جسم، پهنای دنباله زیاد می‌شود و اختلاف بین سرعت در دنباله و سرعت در خارج از آن کوچک‌تر می‌گردد [۱۷]. در مورد مسایل مربوط به جت‌ها و دنباله‌های متلاطم، معمولاً فرض می‌کنیم طول اختلاط  $l$  متناسب عرض جت می‌باشد.

$$\frac{l}{b} = \beta = const \quad (4)$$

با در نظر گرفتن معادلات تنش برشی اغتشاشی و جایگذاری پارامترهای مربوطه در معادلات مزبور داریم

$$U_\infty \frac{db}{dx} \propto \frac{l}{b} u_1 = \beta u_1 \quad (5)$$

که در آن  $u_1 = U_\infty - u$  می‌باشد.

اگر فرض کنیم دنباله حاصل از نتیجه قرارگرفتن سیلندر در مسیر جریان باشد و  $h, d$  به ترتیب ارتفاع و ماکزیمم ضخامت سیلندر باشد در این صورت نیروی کشش (D) و مومنوم (J) برابر است با:

$$D = \frac{1}{2} C_D U_\infty^2 h d, J \propto \rho U_\infty u_1 h b \quad (6)$$

با معادل قرار دادن معادلات کشش و مومنوم خواهیم داشت:

$$\frac{u_1}{U_\infty} \propto \frac{C_D d}{2b} \quad (7)$$

همانطور که می‌بینیم، این معادله از سه بخش تشکیل شده است:

۱- فشاری:

$$\int \left( \frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (12)$$

۲- مومنوم:

$$2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (13)$$

۳. تنش رینولدزی:

$$2 \int \frac{\bar{u}^2}{U_\infty} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (14)$$

اما بر طبق تحلیل گلدستون<sup>۳</sup> [۲۳]:

$$P_{s,e} = P_{s,w} + \bar{q}' \quad (15)$$

$$\bar{q}' = \frac{1}{2} \rho \left( \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2 \right) \quad (16)$$

با جایگذاری پارامتر حاضر در معادله کلی خواهیم داشت:

$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + \frac{1}{3} \int \frac{\left( \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2 \right)}{U_\infty^2} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (17)$$

و در صورتی که فرض کنیم  $u' = v' = w'$  به معادله زیر می‌رسیم:

$$C_d = 2 \int \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_\infty}} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + \frac{1}{3} \int \frac{\bar{q}'}{q_\infty} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (18)$$

از این معادلات می‌توان برای محاسبه ضریب پسای مدل استفاده نمود که مقادیر مربوطه، در شکل ۱۲ مطرح شده است. در بررسی تغییرات ضریب پسا برای سیلندر دو سیمه با قطر سیم‌های مختلف، مشاهده می‌شود استفاده از سیم اغتشاش ساز باعث کاهش ضریب پسا نسبت به ضریب پسای سیلندر صاف می‌گردد، که تنها استثنا سیلندر دو سیمه با قطر سیم ۱/۵mm می‌باشد که ضریب پسا در آن نسبت به سیلندر صاف دارای مقدار بزرگتری می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ضریب پسا در سیلندر دو سیمه با قطر سیم ۱mm اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر می‌توان علت کاهش

جدول ۱- تغییر ضریب مربوط به معادله نصف عرض دنباله برای چهار حالت ضریب c و تغییر ضریب مربوط به معادله پروفیل سرعت برای چهار حالت ضریب a

ضریب	D <sub>w</sub> =۰	D <sub>w</sub> =۰/۵	D <sub>w</sub> =۱	D <sub>w</sub> =۱/۵
a	۰/۴۵۱	۰/۴۵۲	۰/۴۵۱	۰/۴۵۳
c	۲/۱	۲/۱۸	۲/۱۵	۲/۱

۵- محاسبه ضریب پسا با استفاده از اندازه‌گیری

### ممنوم

در تونل باد، نیروهای اعمالی از طرف جریان باد به مدل، با استفاده از سه روش اندازه‌گیری ممنوم در ناحیه دنباله جسم، اندازه‌گیری نیروها با اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل و اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورها با استفاده از دستگاه‌های بالانسینگ نیرو صورت می‌پذیرد. در پژوهش حاضر از روش اندازه‌گیری ممنوم که دارای مزایایی هم‌چون بررسی کمی و کیفی جریان هوای پشت مدل و مطالعه مشخصه‌های ناحیه دنباله پشت مدل نظیر توزیع فشار دینامیکی، پهنا و وسعت ناحیه دنباله جسم، و همچنین نحوه تغییر دنباله جسم با زاویه حمله و ... است و در دو روش دیگر این امکان وجود ندارد، استفاده شده است [۱]. وندام<sup>۱</sup> [۲۱] تحقیقات بسیاری برای بررسی اثرات شدت اغتشاشات جریان در اندازه‌گیری نیروی پسا انجام داده است. وندام [۲۱]، معادله ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا بدست آورد که در آن جملات تنشهای رینولدزی و شدت اغتشاشات جریان وجود داشتند اما از تغییرات چگالی جریان و جمله  $\mu \frac{\partial u}{\partial x}$  صرف‌نظر شده بود. در سال ۲۰۰۲ بیائو<sup>۲</sup> و همکاران [۱۸-۲۰] به بررسی دنباله یک سیلندر برای تعیین اثرات اغتشاش بر روی ضریب پسای سیلندر با استفاده از روش حجم کنترل پرداختند. کل معادله به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_d = \int \left( \frac{P_{s,e} - P_{s,w}}{q_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) + 2 \int \frac{\bar{u}}{U_\infty} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_\infty} \right) d \left( \frac{y}{l} \right) - 2 \int \frac{\bar{u}^2}{U_\infty} d \left( \frac{y}{l} \right) \quad (11)$$

<sup>1</sup> Van Dam

<sup>2</sup> Biao

<sup>3</sup>Goldstein



### ۷- نتیجه گیری

با توجه به مباحث عنوان شده نتایج زیر از آزمایش‌های انجام شده حاصل شده است:

- نمودار سرعت متوسط و اغتشاشات به موقعیت داده برداری نسبت به سیلندر وابسته است.

- نتایج نشان می‌دهد با دور شدن از سیلندر، روند تغییرات قله پروفیل سرعت ( $W_0$ ) و تغییرات نصف دهانه در نصف عمق و قله پروفیل اغتشاشات به ترتیب کاهشی-افزایشی-کاهشی و کاهشی-افزایشی و افزایشی-کاهشی می‌باشد.

- با ادامه جریان درامتداد  $x/d$  دنباله هم‌چنان متقارن باقی‌مانده و تاثیرات در محدوده دنباله می‌باشد و سرعت در خارج از دامنه دنباله برای هر چهار مرحله یکی می‌باشد

- از ایستگاه  $x/d=5$  به بعد بیشترین قله سرعت در سیلندر صاف اتفاق افتاده است، به عبارتی دیگر استفاده از سیم اغتشاش ساز ( $W_0$ ) را برای اکثر ایستگاه‌ها کاهش می‌دهد.

- وجود سیم اغتشاش ساز در رینولدز  $30000$ ، باعث کاهش ماکزیمم اغتشاشات سیلندر صاف می‌گردد، همچنین با افزایش قطر سیم‌های نصب شده روی سیلندر، عدد استرووال به صورت افزایشی-کاهشی-افزایشی تغییر پیدا می‌کند.

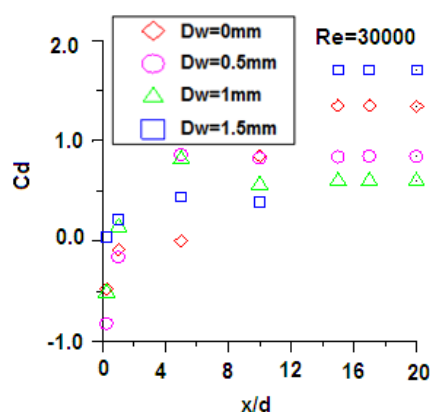
- ضرایب مربوط به معادلات پروفیل سرعت و نصف دنباله برای هر ۴ حالت ممکن تقریباً برابر می‌باشد.

- تحقیقات نشان می‌دهد نصب سیم اغتشاش ساز به قطر  $0.5$  mm و  $1$  mm به صورت دوسیمه بر روی سیلندر صاف، ضریب پسای آن را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد، از طرف دیگر آزمایشات نشان می‌دهد در رینولدز مزبور استفاده از سیم به قطر  $1/5$  mm باعث افزایش ضریب پسای سیلندر می‌گردد.

### ۷- علائم، نشانه‌ها و ارقام

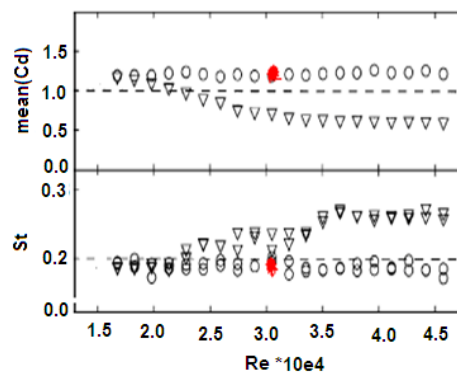
شدت اغتشاشات جریان سیال	$\%Tu$
ضریب پسا	$C_d$
فشار کلی، atm	$p_t$
فشار استاتیک، atm	$p_s$
فشار دینامیک، atm	$q$
فشار دینامیک متوسط، atm	$\bar{q}$

ضریب پسا در تحقیق حاضر را در کار آزمایشگاهی عالم و همکاران [۴، ۶ و ۱۳] جستجو کرد، به گونه‌ای که لایه مرزی روی سیلندر بعد از سیم اغتشاش ساز جدا گشته، سپس پدیده‌ای به نام الحاق مجدد که در آن جریان جدا شونده مجدداً به وضعیت سابق خود بر می‌گردد، صورت می‌پذیرد. این در حالی است که در موقعیت زاویه‌ای دورتر جدایش مجدد جریان روی سیلندر شکل می‌گیرد.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب پسا ی محاسبه شده از روش اندازه‌گیری ممنوم برای سیلندر صاف و دوسیمه

با توجه به شکل ۱۳ می‌توان گفت تطابق بسیار خوبی بین نتایج کار حاضر با نتایج کار هوور<sup>۱</sup> و همکاران [۱۰] مشاهده شده است (شکل ۱۳ را ببینید).



شکل ۱۳- نتایج کار هوور و همکاران [۱۰] بر روی سیلندر صاف (نقاط دایره ای) در رینولدزهای مختلف و انطباق آن با کار حاضر (نقاط پر رنگ شده)

<sup>۱</sup> Hover

- [9] Nebres J, Batill S(1993)Flow about a circular cylinder with a single large-scale surface perturbation. *Exp Fluids* 15: 369–379.
- [10] Pearcy HH, Cash RF, Salter IJ (1994) Flow past circular cylinders: simulation of full-scale flows at model scale. *NMI Report* 31: 1–54.
- [11] Hover FS, Tvedt H, Triantafyllou M.S (2001) Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires. *J. Fluid Mech* 448: 175–195.
- [12] Romberg O, Popp K (1998) The influence of trip-wires on the fluid-damping-controlled instability of a flexible tube in a bundle. *J Fluid Struct* 12: 17–32.
- [13] Alam MM, Sakamoto H, Moriya M(2003) Reduction of fluid forces acting on a single circular cylinder and two circular cylinders by using tripping rods, *Journal of Fluids and Structures* 18: 347–366
- [14] CY Zhou, L Wang, W Huang(2007) Numerical study of fluid force reduction on a circular cylinder. *J Mech Sci Technol* 21: 1425–1434.
- [15] Aiba S, Ota T, Tsuchida H (1979) Heat transfer and flow around a circular cylinder with Tripping-Wires, *Thermo and Fluid Dynamic* 12: 221–231.
- [16] Alam M.M, Y Zhou, JM Zhao, O Flamand, O Boujard (2010) Classification of the tripped cylinder wake and bi-stable phenomenon. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 31 545–560.
- [17] Schlichting H (1960) *Boundary-Layer Theory* chapter free turbulent flows; jets and wakes. page 378, McGraw-Hill.
- [18] Biao LU, Michael B Bragg (2002) experimental investigation of the wake-survey method for a bluff body with highly turbulent wake. *AIAA*–306.
- [19] Biao LU, Michael B Bragg (2000) Experimental investigation of airfoil drag measurements with simulated leading-edge ice using the wake-survey method. *AIAA*–3919.
- [20] Biao LU, Michael B Bragg (2003) airfoil drag measurement wit simulated leading edge ice using the wake-survey method. *AIAA*–1094
- [21] Van Dam (1999) Recent experience with different methods of drag prediction. *Prog Aerosp sci* 35: 751–798.
- [22] Biao LU, Michael B Bragg (2002) Experimental investigation of the wake-survey method for a bluff body with z highly turbulent wake. *AIAA*–3060.
- [23] Goldstein S (1936) A note on the measurement of total head and static pressure on a turbulent stream. *proceedings of the royal society of London, Series A* 155: 570–575.
- [24] Roshko A, Fiszdon W (1969) On the persistence of transition in the near-wake, in problems of hydrodynamic and continuum mechanics. *Philadelphia*: 606–616.
- عدد رینولدز (مبتنی بر قطر سیلندر)  $Re$
- فاصله از سیلندر، mm  $x$
- فاصله عرضی درون دنباله و پشت سیلندر، mm  $y$
- مولفه‌های اغتشاشی سرعت، m/s  $u', v', w'$
- سرعت جریان آزاد، m/s  $U_{\infty}, U_{ref}$
- نسبت سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد  $\frac{U}{U_{ref}}$
- قطر سیم‌ها، mm  $D_w$
- (زیرنویس) مقدار کمیته‌ها در لبه دنباله  $e$
- (زیرنویس) مقدار کمیته‌ها در دنباله  $w$
- (زیرنویس) مقدار کمیته‌ها در جریان آزاد  $\infty$

## ۸- مراجع

- [۱] اردکانی م ع (۱۳۸۵) جریان سنج سیم داغ، چاپ اول، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.
- [2] Zdravkovich MM (1981) Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *J Wind Eng Ind Aerod* 7: 145–189.
- [3] Bearman PW (1965) Investigation of flow behind a two-dimensional model with blunt trailing edge and fitted with splitter plates. *J Fluid Mech* 21: 241–255.
- [4] Md Mahbub Alam, H Sakamoto, Y Zhou (2006) Effect of a T-shaped plate on reduction in fluid forces on two tandem cylinders in a cross-flow. *J Wind Eng Ind Aerod* 94: 525–551.
- [5] Fage A, Warsap JH (1929) The effects turbulence and surface roughness on the drag of a circular cylinder. *Aeronautical Research Council Reports and Memoranda* 1283: 1–14.
- [6] Alam MM, Moriya M, Takai K, Sakamoto H(2002) Suppression of fluid forces acting on two square cylinders in a tandem Council arrangement by passive control of flow. *J Fluid Struct* 16: 1073–1092.
- [7] James DF, Truong QT (1972) Wind load on a cylinder with a span wise protrusion. *Journal of the Engineering Mechanics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers* 98: 1573–1589.
- [8] Igarashi T(1986) Effect of tripping wires on the flow around a circular cylinder normal to an airstream. *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers* 29: 2917–2924.