



## بررسی تجربی دنباله در یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز

عبدالامیر بک خوشنویس<sup>۱\*</sup>، سجاد نظری<sup>۲</sup> و محمد جواد ایزدی یزدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷

### چکیده

در این تحقیق، به بررسی رفتار و مشخصه‌های دنباله جریان در یک سیلندر بیضوی با زاویه حمله صفر درجه، تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز با استفاده از روش تجربی، پرداخته شده است. بدین منظور، از یک استوانه با سطح مقطع بیضوی از جنس آلومینیم، دارای طول ۳۹۰ mm، قطر بزرگ ۴۲/۴ mm و قطر کوچک ۲۱/۲ mm استفاده شده است. مدل سیلندر، در اتاقک آزمون یک دستگاه تونل باد دمشی، مورد آزمایش قرار گرفته است. اعداد رینولدز آزمایش نسبت به قطر بزرگ ۲۵۷۰۰ و ۵۱۴۰۰ به ترتیب برای سرعت‌های ۱۰ m/s و ۲۰ m/s می‌باشند. سیم‌های اغتشاش‌ساز با قطرهای ۰/۵ mm، ۱ mm و ۱/۵ mm به صورت متقارن روی سیلندر بیضوی، هر کدام در زاویه‌های صفر درجه، ۲۳/۷ درجه و ۴۰/۹ درجه نسبت به نقطه سکون، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. ضریب پسا برای سیلندر بیضوی صاف در هر دو عدد رینولدز در حدود مقدار ۰/۶ است. نتایج نشان می‌دهند که در بهترین حالت ممکن، ضریب پسا برای سیم ۰/۵ mm به میزان ۷۵٪ کاهش می‌یابد؛ همچنین در بهترین حالت ممکن برای سیم‌های ۱ mm و ۱/۵ mm، ضریب پسا به ترتیب، ۵۶/۹٪ و ۶۵/۵٪ کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** سیم اغتشاش‌ساز؛ ضریب پسا؛ دنباله سیلندر بیضوی؛ جریان سنج سیم داغ.

## Experimental Investigation of Wake on an Elliptic Cylinder in the Presence of Tripping Wire

A. Bak Khoshnevis<sup>1,\*</sup>, S. Nazari<sup>2</sup>, M. J. Ezadi Yazdi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assoc. Prof., Mech. Eng., Hakim Sabzevari Univ., Sebzevar, Iran.

<sup>2</sup> M.S.C., Mech. Eng., Hakim Sabzevari Univ., Sabzevar, Iran.

### Abstract

In this research, the behavior and characteristics of the wake of flow around an elliptic cylinder at zero angle of attack in the presence of a tripping wire were investigated experimentally. An aluminum elliptic cylinder with major axis, minor axis and height of 42.4 mm, 21.2 mm and 390 mm respectively, was used for this purpose. The cylinder model was examined in the test section of a blower type wind tunnel. The Reynolds numbers of the experiment based on major axis are 25700 and 51400 for 10 m/s and 20 m/s speeds, respectively. Tripping wires with the diameter of 0.5 mm, 1 mm, and 1.5 mm are placed symmetrically at both sides of the cylinder, and each are tested at angles of zero, 23.7, and 40.9 degrees with respect to the stagnation point. The drag coefficient of the smooth cylinder for both of the Reynolds numbers is about 0.6. The results indicate that in the best possible case, the drag coefficient for the 0.5 mm wire decreases by 75%. In the best cases, it is also reduced by 56.9% and 65.5% for the 1 mm and the 1.5 mm wires, respectively.

**Keywords:** Trip Wire; Drag Coefficient; Wake of Elliptic Cylinder; Hot Wire Anemometry.

## ۱- مقدمه

موقعیت  $\alpha = 40^\circ$  به میزان ۱۸٪ و برای  $Re = 5/5 \times 10^4$  در موقعیت  $\alpha = 30^\circ$  به میزان ۵۹٪ کاهش یافت.

میسرلیس<sup>۳</sup> و همکاران [۳] در یک تحقیق تجربی و عددی، کاربرد سیلندر بیضوی را در یک مبدل حرارتی نشان دادند. نتایج در راستای استفاده از سیلندر بیضوی نسبت به سیلندر دایره‌ای از بهبود افت فشار و نیز انتقال حرارت جریان حکایت داشت.

هوور<sup>۴</sup> و همکاران [۴]، با انجام تحقیقی در زمینه تأثیر سیم اغتشاش ساز بر تحریک نوسان‌های گردابه‌ای فقط با یک جفت سیم در زاویه ۷۰ درجه نشان دادند که ضریب پسا تا حدود ۵۰٪ نسبت به حالت بدون سیم، کاهش می‌یابد. نسبت قطر سیم به قطر سیلندر،  $d/D = 0.03$  بود.

فوکودم<sup>۵</sup> و همکاران [۵] در یک پژوهش عددی و تجربی، تأثیر سیم اغتشاش ساز نصب شده در نقطه سکون در یک ایرفول مربوط به پره توربین را مورد آزمایش قرار دادند. قطر سیم استفاده شده،  $D_{wire} = 0.5 \text{ mm}$  بود. نتایج آن‌ها نشان داد که جدایش جریان در زاویه حمله بالا به تأخیر می‌افتد؛ همچنین نیروی برآ نیز بیشتر می‌شود و شرایط برای بهینه‌سازی جریان بهتر می‌شود.

کوادرنانت<sup>۶</sup> و نیشی<sup>۷</sup> [۶]، به بررسی تجربی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر ارتعاشات سیلندر دایره‌ای پرداختند. آن‌ها زاویه نصب سیم را برای بهترین تأثیر و بدترین تأثیر بر ارتعاشات سیستم به دست آوردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در زاویه حذف کامل ارتعاشات، ضریب پسا حداقل مقدار خود را دارد؛ در حالی که مقدار عدد استروهال<sup>۸</sup> نسبت به سیلندر صاف تغییر چندانی ندارد.

اوتا<sup>۹</sup> و همکاران [۷]، جریان اطراف یک سیلندر بیضوی با نسبت قطر ۱ به ۳ را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، زاویه حمله مناسب برای وقوع عدد رینولدز بحرانی و به دنبال آن ریزش اولین گردابه‌ها در پشت مدل به دست آمد.

بررسی آیرودینامیک جریان پیرامون سیلندره‌ای دایره‌ای و بیضوی و همچنین کاربرد آن‌ها در صنعت، یک مسئله مهم و رایج است. از طرفی کاهش ضریب پسا (مقاومت در برابر هوا) در علوم و صنایع بسیاری کاربرد دارد. کاهش ضریب پسا در صنایع مختلف باعث کاهش مصرف سوخت، انتقال حرارت بهتر، کاهش سر و صدا، افزایش سرعت، افزایش پایداری سازه‌ها و غیره می‌شود. این در حالی است که لایه مرزی و جدایش آن سهم بسزایی در آیرودینامیک سیلندرها ایفا می‌کند و همواره سعی شده است تا برای دستیابی به راندمان بالا، حتی‌الامکان از جدایش لایه مرزی جلوگیری شده و یا به تأخیر انداخته شود. این امر می‌تواند باعث بهینه‌سازی ضریب پسا شود. تکنیک‌های مختلفی برای جلوگیری از جدایش لایه مرزی و یا به تأخیر انداختن آن وجود دارد.

تکنیک‌هایی مانند، مولدهای گردابه، زبری سطح، سیم اغتشاش ساز، یونیزاسیون جریان هوا، تزریق یا مکش جریان سیال روی سطح و موارد دیگر را می‌توان نام برد. از کاربرد سیلندره‌ای بیضوی می‌توان مواردی مانند، لوله‌های به کار رفته در مبدل‌های گرمایی، لبه حمله یک فلپ در یک ایرفویل چند جزئی و غیره را نام برد.

## ۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

ایگاراشی<sup>۱</sup> [۱] به بررسی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر انتقال لایه مرزی روی یک سیلندر دایره‌ای پرداخت. قطر سیم‌های اغتشاش ساز از مقدار ۰/۴ تا ۱۰ میلی‌متر متغیر بود. مکان نصب سیم‌ها در زوایای ۵۰ و ۶۰ درجه نسبت به نقطه سکون بود. در این تحقیق، ضریب پسا در بهترین حالت در حدود ۷۰ درصد کاهش یافت.

ژو<sup>۲</sup> و همکارانش [۲]، روی یک سیلندر دایره‌ای تأثیر سه نوع مختلف از سیم‌های اغتشاش ساز را بررسی کردند که در نزدیکی نقطه سکون قرار گرفته بودند. هر سیم به صورت یک جفت، متقارن در فاصله‌ای از سیلندر قرار گرفته بودند. نسبت قطرهای سیم به قطر سیلندر برابر  $d/D = 0.08, 0.1, 0.12$  بود. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب پسا برای  $Re = 200$  در

<sup>۱</sup> Igarashi

<sup>۲</sup> Zhou

<sup>۳</sup> Missirlis

<sup>۴</sup> Hover

<sup>۵</sup> Fukudome

<sup>۶</sup> Quadrante

<sup>۷</sup> Nishi

<sup>۸</sup> Strouhal Number

<sup>۹</sup> Ota

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

که در آن  $u'$  سرعت نوسانی جریان سیال است. پارامتر نقصان سرعت<sup>۲</sup> بدون بعد از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$\frac{w_0}{U_{ref}} = \frac{U_{ref} - U_{min}}{U_{ref}} \quad (2)$$

که در آن  $U_{min}$  حداقل سرعت در دنباله است. عدد استروهمال از اعداد بی‌بعد است که شدت فرکانس ریزش گردابه‌های کارمن تشکیل شده در پشت مدل را بیان می‌کند و به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

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

که در آن  $f$  فرکانس ریزش گردابه‌ها،  $d$  قطر سیلندر و  $U_{ref}$  سرعت جریان آزاد است.

اگر سیلندر بیضوی به صورت افقی در راستای جریان قرار گیرد، نسبت انسداد را قطر کوچک سیلندر تقسیم بر ارتفاع دهانه تونل باد معرفی می‌کنند. از نتایج تحقیق‌های انجام شده در این زمینه اگر برای سیلندر بیضوی نسبت انسداد کمتر از ۰/۰۸ انتخاب شود، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. برای اطلاعات بیشتر به آلنسون<sup>۳</sup> و همکاران [۱۶] و یا به مقاله فلاین<sup>۴</sup> و ایزرنر<sup>۵</sup> [۱۷] مراجعه شود.

$$\beta = B/H \leq 0.08 \quad (4)$$

با وجود شرایط موجود در این تحقیق، نسبت انسداد برابر مقدار  $\beta = 0.053$  است.

### ۳- تجهیزات آزمایشگاهی و روش آزمایش

سرعت‌سنج سیم داغ، یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این دستگاه، اصلی‌ترین و عمده‌ترین کاربرد آن انجام آزمایش برای جریان‌های آشفتگی‌گاز و یا هوا است. سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق، ساخت شرکت فرا

اخیراً، ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۸، ۹] به بررسی تأثیر دوران سیلندر روی جدایش جریان پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت چرخش، ضریب پسا کاهش و فرکانس ریزش گردابه‌ها افزایش می‌یابد؛ همچنین در پژوهشی دیگر، ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۱۰-۱۳]، به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان در اطراف دنباله یک سیلندر بیضوی و همچنین تداخل دنباله با لایه مرزی بر روی یک صفحه تخت پرداختند. دریافتند که با افزایش نسبت فاصله، ضریب پسا سیلندر کاهش؛ اما عدد استروهمال افزایش می‌یابد.

پاول<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴]، به بررسی عددی تأثیر زاویه حمله، نسبت محورها و عدد رینولدز، در جریان آرام و ناپایا روی مشخصه‌های جریان اطراف یک سیلندر بیضوی پرداختند؛ همچنین در این تحقیق، وابستگی پارامترهای جریان و ریزش گردابه‌ها به مقدار زاویه حمله نشان داده شد. بک خوشنویس و همکاران [۱۵]، در یک بررسی تجربی تأثیر سه نوع سیم با قطرهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر که در زوایای ۱۴۰، ۴۰ و  $\alpha = ۰$  روی یک سیلندر دایره‌ای نصب شده بودند را در عدد رینولدز  $Re = 30000$  مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در راستای دور شدن از مدل در حضور سیم اغتشاش‌ساز، قله پروفیل اغتشاش‌ها نسبت به سیلندر صاف عموماً کاهش یافته است.

در این تحقیق، به بررسی تجربی دنباله در یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز پرداخته شده است. با توجه به تحقیقات انجام شده پیشین در خصوص سیلندر بیضوی، بررسی کمیت‌های سرعت متوسط، سرعت نوسانی و ضریب پسا در یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز، تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

### ۲- پارامترهای مورد بررسی

شدت اغتشاش‌ها، پارامتر مهمی است که کیفیت جریان سیال را مشخص می‌کند. شدت اغتشاش‌ها به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود:

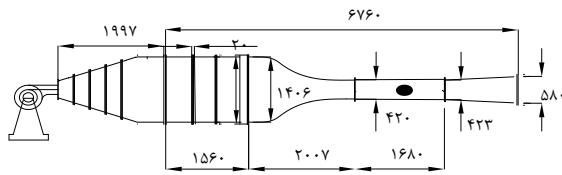
<sup>2</sup> Velocity Defect

<sup>3</sup> Alonso

<sup>4</sup> Flynn

<sup>5</sup> Eisner

<sup>1</sup> Paul



شکل ۲- نمای شماتیکی از تونل باد

همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق به بررسی دنباله سیلندر بیضوی صاف با زاویه حمله صفر درجه نسبت به افق، تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز پرداخته شده است. سیلندر استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس آلومینیم بوده، دارای طول ۳۹۰ mm، قطر بزرگ ۴۲/۴ mm و قطر کوچک ۲۱/۲ mm است.

در شکل ۳، نمای شماتیکی از نحوه داده برداری و ثبت داده‌ها نشان داده شده است.

ایستگاه‌های داده برداری بر حسب نسبت فاصله از مدل به قطر کوچک عبارتند از:

$$X/B = 1, 2/5, 5, 10, 15, 20, 25$$

سیم‌های اغتشاش ساز با قطرهای ۰/۵ mm، ۱ mm و ۱/۵ mm انتخاب شده‌اند که هر کدام به صورت متقارن در سه موقعیت مختلف با زاویه‌های صفر درجه، ۲۳/۷ درجه و ۴۰/۹ درجه نسبت به نقطه سکون مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که انتخاب سیم‌های اغتشاش ساز بر طبق پژوهش ایگراشی [۱] صورت گرفته است. ایگراشی با تعریف  $Re = (U_{ref} \times k) / \nu$  (که در آن  $k$  معیاری برای انتخاب سیم اغتشاش ساز با قطرهای مختلف است)، محدوده‌ای برای اعداد رینولدز مختلف تعریف کرد که در آن سیم روی انتقال لایه مرزی تأثیر داشته باشد. بر طبق تعریف، برای  $Re_k = 1220$ ، ضخامت مؤثر سیم در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه در حدود ۱ میلی‌متر بود؛ همچنین در اکثر پژوهش‌های پیشین در ارتباط با تأثیر سیم اغتشاش ساز روی سیلندر دایره‌ای، به منظور ایجاد نقطه الحاق مجدد و تأثیر مثبت روی مشخصه‌های جریان، سیم اغتشاش ساز را در نزدیکی نقطه سکون سیلندر روی سطح آن نصب می‌کنند.

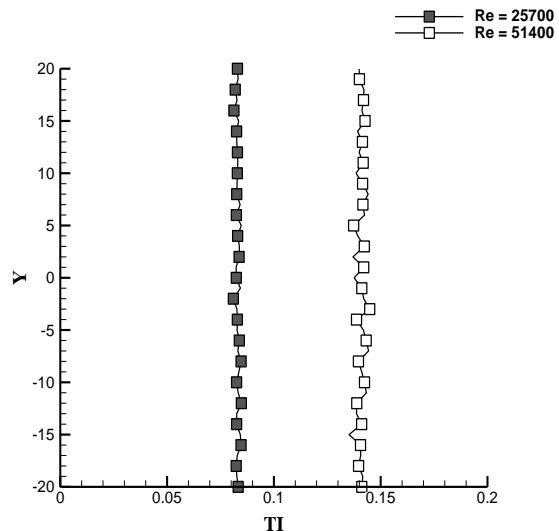
مدل مزبور در دو عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ و ۵۱۴۰۰ به ترتیب برای سرعت‌های ۱۰ m/s و ۲۰ m/s که بر اساس قطر بزرگ محاسبه شده‌اند، مورد آزمایش قرار گرفته است.

سنجش صبا و از نوع دما ثابت<sup>۱</sup> بوده که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، شدت اغتشاش‌ها و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت مدل را دارد. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش، از نوع مدار باز و دمشی بوده که برای ایجاد جریان هوا در این دستگاه از یک موتور با قدرت ۷ kw استفاده شده است که توانایی ایجاد جریان هوایی با سرعت ۳۰ m/s را دارد. اتاقک آزمایش این تونل، از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر است.

در شکل ۱ میزان شدت اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاق آزمون در غیاب هرگونه مدلی برای هر دو سرعت جریان ارائه شده است.

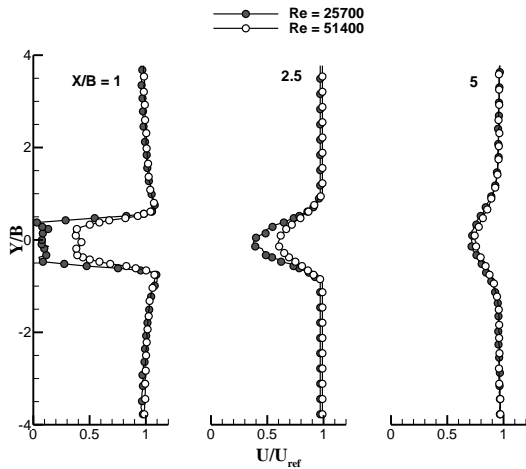
پراب یک‌بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها، دارای سنسوری به طول ۱ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر از جنس تنگستن است. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم دقیق با سه درجه آزادی استفاده شده است. دقت این مکانیزم انتقال پراب، ۰/۰۱ میلی‌متر است.

در شکل ۲، نمای شماتیکی از تونل باد بکار گرفته شده ارائه شده است.



شکل ۱- شدت اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاق آزمون

<sup>۱</sup> Constant Temperature Anemometry (CTA)

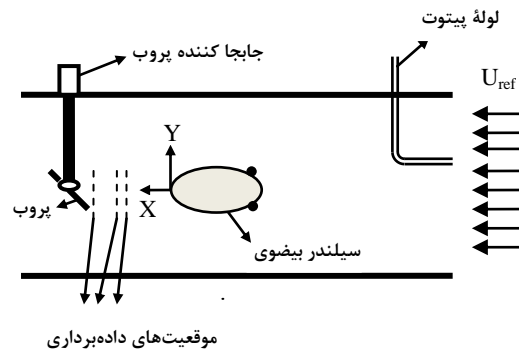


شکل ۴- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه اول

نکته قابل توجه دیگری که در شکل ۴ مشاهده می شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل های سرعت مقاطع نزدیک به مدل است. 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 روی سطوح سیلندر، پس از انحلال 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، قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی باشد.

نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت سیلندر، اختلاف سرعت داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می یابد که نهایتاً پروفیل سرعت متوسط یکنواخت تر می شود. در فاصله های نزدیک به سیلندر به علت وجود جدائی و جریان های برگشتی، افت سرعت بیشتر است که با دور شدن از مدل، این افت کمتر شده، جریان داخل دنباله یکنواخت تر می شود. این مسئله در شکل ۵ نیز مشخص است.

از طرفی در شکل ۵ مشخص است که نمودارها برای دو عدد رینولدز از ایستگاه  $X/B = 5$  به بعد به هم بسیار نزدیک می شوند. این مسئله به این دلیل است که نرخ اضمحلال گردابه در عدد رینولدز ۲۵۷۰۰، بیشتر از مقدار آن برای عدد



شکل ۳- نمای شماتیکی از نحوه ی داده برداری و ثبت داده ها

#### ۴- بحث و بررسی

همان طور که اشاره شد، در این تحقیق به بررسی دنباله سیلندر بیضوی با زاویه حمله صفر درجه تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز در هفت موقعیت طولی مختلف و در اعداد رینولدز ۲۵۷۰۰ و ۵۱۴۰۰ پرداخته شده است.

#### ۴-۱- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی بعد

با وجودی که در دنباله یک جسم، مؤلفه های نوسانی سرعت با زمان تغییر می کنند و ساختاری متغیر و غیردائمی دارند، اما پروفیل های سرعت در طول یک دوره تناوب، متقارن می باشند.

همان طور که می دانیم، گردابه ها به صورت لحظه ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده، ولی با توجه به شکل ۴ حتی در مقاطع اولیه نزدیک به سیلندر هم پروفیل های سرعت متوسط رسم شده، کاملاً متقارن می باشند.

توجیه این مطلب بدین صورت است که تشکیل گردابه ها در پشت سیلندر، لحظه ای بوده و به صورت متناوب در طول دوره تناوب خود تکرار می شوند. حال اگر زمان داده برداری در یک نقطه از دوره تناوب تشکیل گردابه ها بیشتر 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 ۴، زمان داده برداری تقریباً ۵۰۰ برابر دوره تناوب تشکیل گردابه ها است.

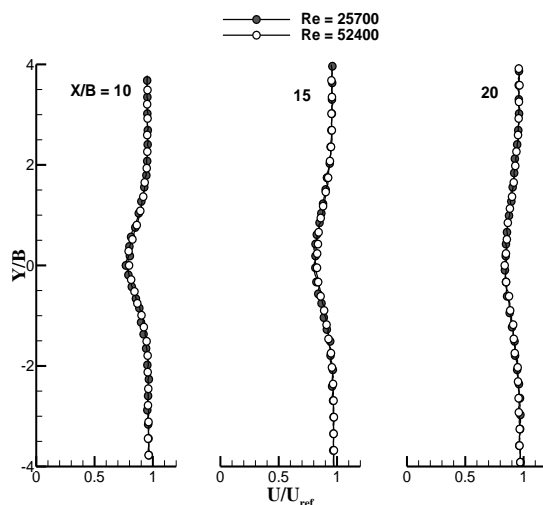
مجدد، فرود بیاید. این نقطه ابتدای شکل‌گیری مجدد لایه-مرزی است.

در ادامه شکل‌گیری لایه‌مرزی، یک نقطه جدایش نیز وجود دارد. پس به دلیل حضور سیم اغتشاش‌ساز، لایه‌مرزی بر سطح سیلندر نسبت به حالت بدون سیم در نقطه‌ای از پایین دست جریان شکل می‌گیرد؛ لذا دنباله‌ای که شکل می‌گیرد، دارای عرض کمتری است.

از طرفی سیم اغتشاش‌ساز باعث تغییرات اساسی در پروفیل سرعت متوسط می‌شود. البته باید اذعان کرد که به دلیل زیاد بودن تعداد نمودارها، فقط نمودارهای مربوط به جریان با عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ از سیم در هر موقعیت ارائه شده است که تأثیر بیشتری را نسبت به جریان دیگر با عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ روی مشخصه‌های جریان داشته است. تأثیر مثبت سیم روی مشخصه‌های جریان در دنباله پشت مدل، باعث افزایش نسبی سرعت متوسط می‌شود. موقعیت سیم بسته به مکان نصب آن می‌تواند تأثیر مثبت و یا تأثیر منفی بر مشخصه‌های جریان داشته باشد. اگر نصب سیم سبب افزایش در عرض دنباله شود، آنگاه گردابه‌های قدرتمندی در پشت مدل ایجاد می‌شوند. در این حالت سرعت متوسط در دنباله کاهش یافته و اغتشاش‌های جریان افزایش می‌یابند، لذا شرایط برای مشخصه‌های جریان بدتر می‌شود. اما اگر عرض دنباله تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز کاهش یابد، گردابه‌های پشت مدل ضعیف‌تر و مشخصه‌های جریان بهبود می‌یابند [۱۸].

به‌عنوان نمونه فقط می‌توان به نصب سیم‌های با قطر بیش از ۰/۵ میلی‌متر در موقعیت زاویه‌ای ۴۰/۹ اشاره کرد که تأثیر منفی بر مشخصه‌های جریان دارند. حالت‌های دیگر از نصب سیم در این تحقیق، به‌طور نسبی باعث بهبود مشخصه‌های جریان شده‌اند.

در شکل ۶ در بین پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد در ایستگاه  $X/B = 1$  مشاهده می‌شود که پیک سرعت در مقاطع نزدیک به مدل در پروفیل مربوط به سیلندر صاف، بیشتر از بقیه پروفیل‌های دیگر است. دلیل این است که لایه‌مرزی ایجاد شده روی سیلندر صاف، دارای مقداری مومنتوم است که بعد از انحلال، این مومنتوم باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نتیجه افزایش سرعت آن‌ها می‌شود.

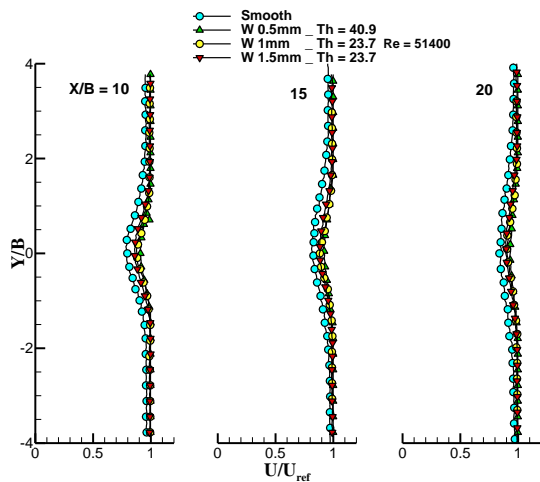


شکل ۵- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه دوّم

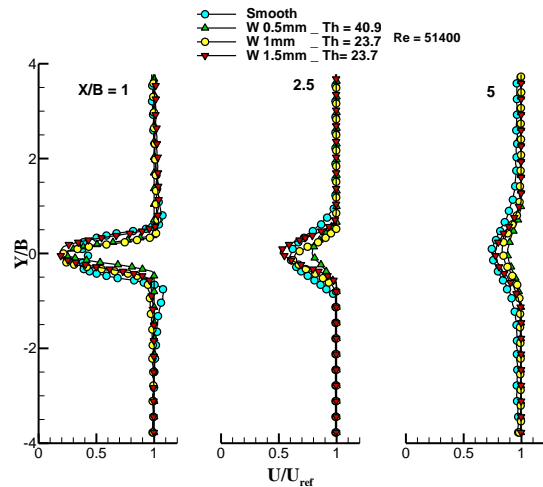
رینولدز ۵۱۴۰۰ است. از طرفی از این ایستگاه به بعد به دلیل تغییرات رفتار جریان شامل، از بین رفتن جریان‌های برگشتی، یکنواخت شدن جریان و کم شدن اثرات جدائی جریان از موقعیت‌های ابتدایی به موقعیت‌های انتهایی داده-برداری، رفته‌رفته سرعت داخل دنباله افزایش می‌یابد که این امر باعث تغییر پروفیل‌های سرعت متوسط برای تبدیل به خطوطی نسبتاً یکنواخت در انتهای ایستگاه‌های داده‌برداری می‌شود.

برای سیلندر بیضوی صاف در غیاب سیم اغتشاش‌ساز، جریان با گذر بر سطح سیلندر باعث تشکیل لایه‌مرزی شده که در ادامه، جریان مزبور از سطح جدا می‌شود. این جدایش، باعث شکل‌گیری ناحیه‌ای به نام دنباله در پشت سیلندر با مشخصات متفاوتی نسبت به جریان آزاد می‌شود.

از طرفی وقتی یک عامل جهش جریان در مسیر عبور آن قرار می‌گیرد، تغییرات مهمی روی مشخصات لایه‌مرزی و همچنین دنباله جریان رخ می‌دهد. در این بین سیم اغتشاش‌ساز به‌عنوان عامل جهش جریان که روی سطح سیلندر نصب می‌شود، سبب رخداد پدیده‌ای به نام انتقال لایه‌مرزی می‌شود. در واقع در حضور سیم اغتشاش‌ساز به دلیل برخورد خطوط جریان به سیم و در نتیجه انحراف آن‌ها به بالا، باعث می‌شود که جریان از سطح سیلندر جدا شده، در نقطه‌ای از پایین دست جریان روی سیلندر به نام نقطه الحاق



شکل ۷- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه دوم



شکل ۶- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه اول

در تحلیل اینکه چرا با فاصله گرفتن از پشت مدل، دنباله آن از بین می‌رود، می‌توان گفت که لایه برشی دنباله موجود تحت تأثیر جریان آزاد قرار گرفته، در نتیجه جریان آزاد سعی بر مستهلک ساختن لایه برشی تحت نام دنباله را دارد.

#### ۴-۲- پروفیل نقصان سرعت بی بعد

اختلاف سرعت بین جریان آزاد و کمترین سرعت در دنباله برای هر ایستگاه از ابتدای آن‌ها در نزدیکی مدل تا انتهای آن‌ها در ناحیه‌ای دور از پایین دست جریان، نرخ کاهش دارد. این اختلاف سرعت را نقصان سرعت می‌نامند.

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، شیب تغییرات پروفیل‌های نقصان سرعت از ایستگاه  $X/B = 5$  به بعد برای هر دو نمودار یکسان است و این دو نمودار بر هم منطبق‌اند.

این مسئله نشان می‌دهد که از این ایستگاه به بعد پروفیل‌های سرعت متوسط بی بعد به هم بسیار نزدیک می‌شوند که این مهم در شکل ۴ مشخص است. از طرفی در دو ایستگاه قبل در شکل ۸ مشاهده می‌شود که شیب تغییرات برای نمودار با عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ بیشتر از شیب آن برای دیگری است. وجود شیب شدید در پروفیل نقصان سرعت از نرخ تغییر سرعت یعنی  $\frac{\partial(\Delta U)}{\partial x}$  حکایت دارد. این پارامتر نیز با میزان نرخ اضمحلال رابطه دارد؛ لذا باید نرخ اضمحلال در این پروفیل، بیشتر از دیگری باشد که این مهم با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ قابل تشخیص است که مینیمم مقدار مربوط

این مسئله در ایستگاه‌های دورتر در پشت مدل، اثر خود را از دست می‌دهد؛ لذا در پروفیل‌های سرعت ایستگاه‌های بعدی، پیک وجود ندارد؛ این در حالی است که برای سیم در موقعیت  $\theta = 40/9$  این پیک خیلی کمتر شده است؛ لذا جریان در برخورد با سیم، مقداری از سرعت خود را از دست می‌دهد که این مسئله باعث هدر رفت مومنتوم جریان می‌شود؛ در نتیجه می‌توان چنین استدلال کرد که ایجاد نقطه الحاق مجدد برای لایه مرزی، باعث هدر رفت مقداری از مومنتوم جریان در لایه مرزی می‌شود.

نکته دیگر این که هرگاه جدایش لایه مرزی روی سطح نسبت به حالت‌های دیگر زودتر اتفاق بی‌افتد، دنباله‌ای با عرض بزرگ‌تر ایجاد می‌شود؛ لذا گردابه‌های قدرتمندتری شکل می‌گیرد و در آن‌ها سرعت جریان نسبت به نمونه‌های دیگر از دنباله‌هایی با عرض کوچک‌تر، کمتر است [۱۸]. این مسئله در شکل ۶ و در ایستگاه  $X/B = 1$  بیشتر به چشم می‌خورد. در این شکل مشخص است که برای پروفیل مربوط به موقعیت  $\theta = 40/9$  سرعت دارای مقدار بیشتری نسبت به پروفیل‌های دیگر است؛ لذا تأثیر بهتری بر مشخصه‌های جریان دارد.

نکته دیگر این که به موازات زیاد شدن فاصله از مدل، پهنای دنباله زیاد می‌شود و اختلاف بین سرعت در دنباله و سرعت در خارج از آن کوچک‌تر می‌گردد. این نکته در شکل ۷ مشخص است.

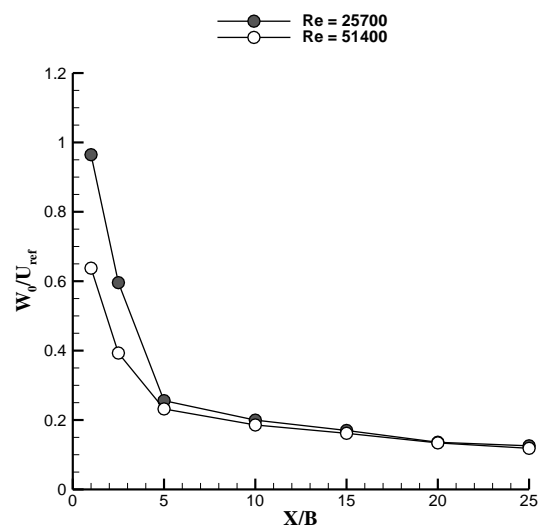
دلیل این امر این است که نرخ اضمحلال برای ایستگاه-های نزدیک به مدل به دلیل بالا بودن شیب پروفیل سرعت در این مورد، بیشتر از دیگر ایستگاه‌هاست، در نتیجه با فاصله گرفتن از مدل، افت شدیدی در نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برای این سیم رخ می‌دهد. با توجه به تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد، می‌توان نتیجه گرفت که هر قدر منحنی‌های نقصان سرعت به منحنی  $1/x$  نزدیک شوند، شرایط بهینه‌تر خواهد بود؛ چرا که برای یک منحنی در حالت  $1/x$  اختلاف سرعت در دنباله حداقل است؛ در نتیجه سرعت در دنباله حداکثر خواهد بود.

### ۳-۴- پروفیل شدت اغتشاش‌ها

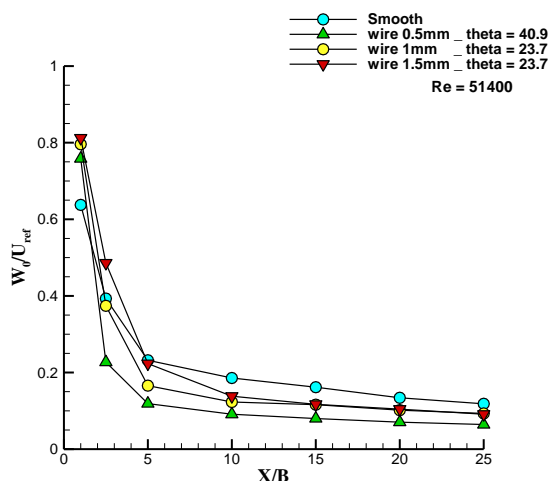
رابطه مستقیم اضمحلال انرژی با گرادیان سرعت متوسط  $\partial \bar{u} / \partial y$  و نیز با گرادیان مؤلفه نوسانی سرعت  $\partial u' / \partial y$  به ترتیب، در شکل‌های ۴ و ۱۰ از این حقیقت حکایت دارد که دنباله جریان برای عدد رینولدز ۲۵۷۰۰، رشد سریع‌تری از انحلال را داراست. از این رو از ایستگاه  $X/B = 5$  به عدد پروفیل‌های سرعت متوسط و اغتشاشی مربوط به عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ بر اثر اضمحلال انرژی به پروفیل‌های مربوط به عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ نزدیک شده و روی آن منطبق می‌شوند. از طرفی همان‌طور که مشخص است، با فاصله گرفتن از مدل، تغییر گرادیان مؤلفه نوسانی سرعت با کاهش شدیدی همراه است.

در شکل ۱۰ دو اکسترمم در پروفیل درصد شدت اغتشاش‌ها در عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ در ایستگاه  $X/B = 1$  مشاهده می‌شود که با دور شدن از مدل، این دو اکسترمم به دلیل یکنواخت شدن جریان از بین می‌روند. این پدیده ناشی از وجود جریان‌های گردابی و چرخشی در نزدیک سیلندر و جریان‌های یکنواخت در فاصله‌های دور از سیلندر است. با توجه به شکل‌های ۴ و ۱۰ مشخص است که در هر ایستگاه یک رفتار مشابه مشاهده می‌شود. از این لحاظ که اگر در ایستگاه  $X/B = 1$  هر دو پروفیل سرعت متوسط تقریباً بر هم منطبق می‌شوند، از طرفی دقیقاً در همان ایستگاه نیز، دو پروفیل اغتشاشی تقریباً بر هم منطبق می‌شوند. این در حالی است که مقدار سرعت متوسط در شکل ۴ در دنباله در حال افزایش است، ولی اغتشاش‌ها در شکل ۱۱ در دنباله در حال کاهش است. دلیل این امر تأثیر اضمحلال انرژی روی

به پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ در ایستگاه‌های دور از مدل بر دیگر پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ منطبق می‌شود. به دلیل بالا بودن سرعت متوسط در دنباله برای سیم با قطر ۰/۵ میلی‌متر نسبت به بقیه پروفیل‌های دیگر، لازم است که در شکل ۹ برای سیم ۰/۵ میلی‌متر یک افت شدید در نمودار نقصان سرعت رخ دهد تا منحنی در زیر دیگر منحنی‌ها قرار گیرد.

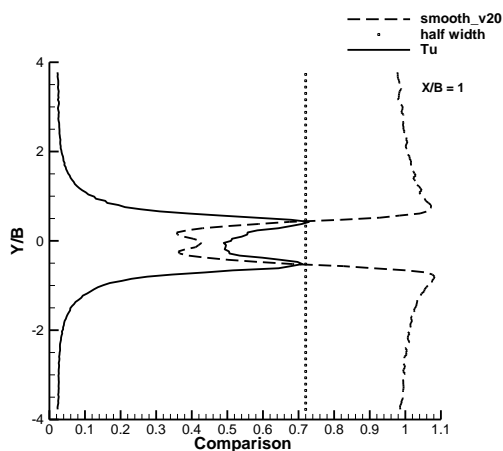


شکل ۸- تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد برای سیلندر صاف بر حسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۹- تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد بر حسب ایستگاه-های اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های مختلف



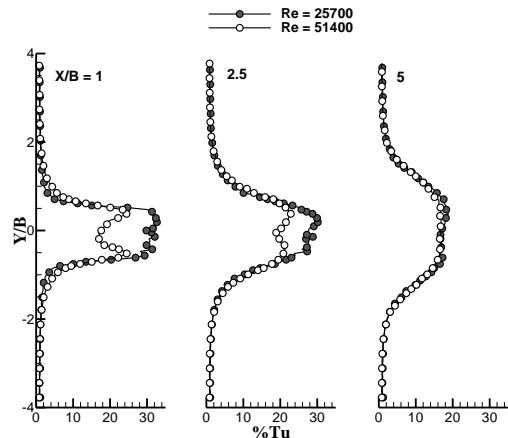


شکل ۱۲- تلاقی ماکزیمم اغتشاش‌های جریان با نقطه عطف پروفیل سرعت متوسط

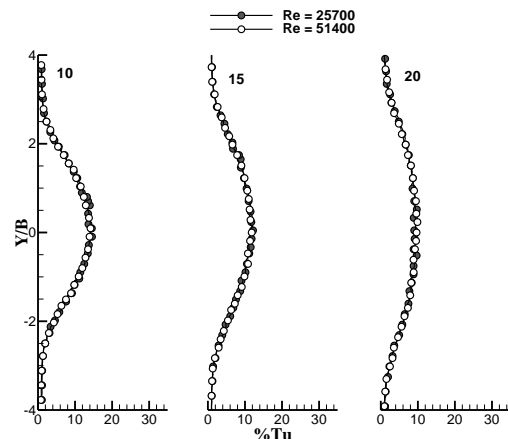
خط نقطه‌چین در شکل ۱۲، خط نصف دهانه در نصف عرض است که از نقطه عطف پروفیل سرعت می‌گذرد. این خط برای دقت بیشتر در تشخیص برای چگونگی انطباق دو پروفیل سرعت متوسط و اغتشاش‌های جریان در نقطه عطف پروفیل سرعت مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است، پیک پروفیل اغتشاش‌های جریان از نقطه عطف پروفیل سرعت می‌گذرد.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، تغییرات پروفیل شدت اغتشاش‌ها برای زوایا و قطرهای مختلف سیم نشان داده شده است. مشخص است که عرض پروفیل اغتشاش‌ها برای سیلندر صاف، بیشتر از بقیه پروفیل‌های دیگر است. این مسئله به این دلیل است که نقطه جدایش برای سیلندر بیضوی صاف در نقطه بالاتر از بالادست جریان رخ می‌دهد؛ لذا گردابه‌های بزرگ‌تری ایجاد می‌شود. پس عرض دهانه پروفیل اغتشاشی آن بزرگ‌تر است. این مسئله در شکل ۶ برای پروفیل سرعت نیز اتفاق افتاده است.

همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است، پروفیل اغتشاشی برای موقعیت  $\theta = 40/9$  از بقیه پروفیل‌های اغتشاشی دیگر کوچک‌تر است و دنباله مربوط به سیلندر تحت تأثیر سیم در این موقعیت زودتر از حالت‌های دیگر، در حال انحلال است. از این رو پیک‌های اغتشاشی نیز زودتر از بین می‌روند. در واقع دنباله در این حالت عرض کمتری دارد که گردابه‌های آن نسبت به بقیه ضعیف‌تر بوده؛ لذا زودتر از



شکل ۱۰- توزیع شدت اغتشاش‌ها برای سیلندر صاف در سه ایستگاه اول



شکل ۱۱- توزیع شدت اغتشاش‌ها برای سیلندر صاف در سه ایستگاه دوم

مشخصه‌های جریان است که به‌گونه‌ای اتفاق می‌افتد که افزایش سرعت متوسط  $\bar{u}$  و کاهش اغتشاش‌های  $u'$  جریان در دنباله با نرخ یکنواخت صورت می‌پذیرد. به‌گونه‌ای که آهنگ این تغییرات یکسان است.

نکته دیگر که می‌تواند قابل توجه باشد، این است که پیک اغتشاش‌های جریان در پروفیل اغتشاشی در دنباله پشت مدل، شرایط نقطه‌ای از دنباله را نشان می‌دهد که بیشترین اغتشاش‌های جریان در آن وجود دارد. از طرفی با ترسیم پروفیل سرعت و چند برابر کردن اغتشاش‌های جریان در یک نمودار، پیک اغتشاش‌ها روی نقطه عطف پروفیل سرعت قرار می‌گیرد. این مسئله در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

#### ۴-۴- عدد استروهال

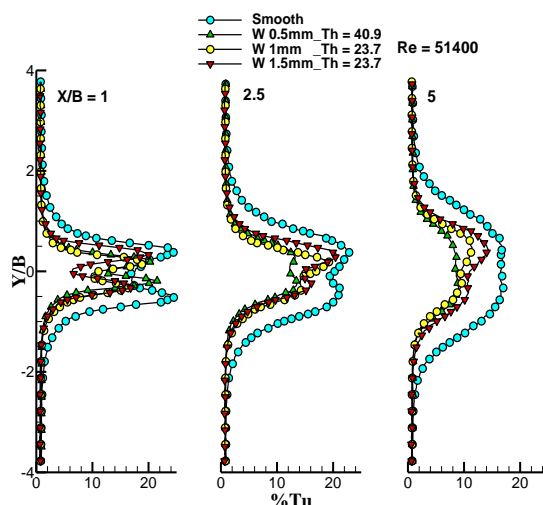
شدت فرکانس ریزش گردابه‌ها در پشت مدل به‌وسیله عدد بی‌بعدی که عدد استروهال نام دارد، مشخص می‌شود. همان‌طور که قبلاً در رابطه ۳ اشاره شد، این عدد به‌صورت  $St = fd/U_{ref}$  بیان می‌شود که در آن  $f$  فرکانس ریزش گردابه‌ها،  $d$  قطر بزرگ بیضی و در نهایت  $U_{ref}$  سرعت جریان آزاد است.

در دینامیک سیالات ریزش گردابه‌ها یک جریان نوسانی است که زمانی اتفاق می‌افتد که سیالی مانند هوا یا آب در یک سرعت مشخص از روی یک جسم پخ<sup>۱</sup> عبور کند که این ریزش وابسته به اندازه و شکل جسم است. فشار و نیروهای عرضی وارد بر ناحیه پشت سیلندر در فرکانسی برابر با فرکانس ارتعاشات گردابه جاری شونده در پشت مدل، نوسان می‌کنند [۱۹].

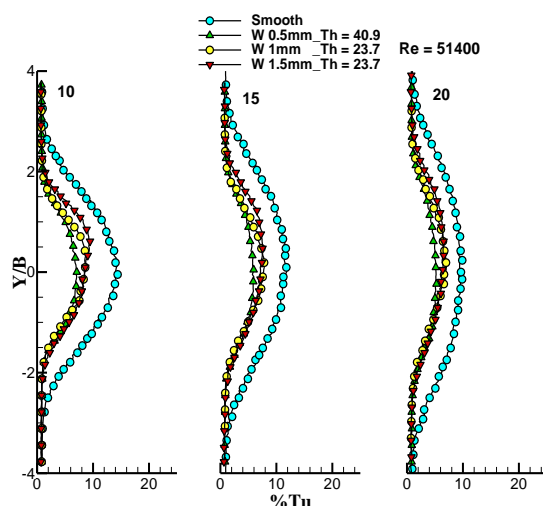
رشد گردابه‌ها و همچنین استمرار و بقای چرخش آن‌ها، از لایه برشی دنباله و ورود خطوط جریان به دنباله که باعث شکل‌گیری آن‌ها می‌شود، ادامه می‌یابد تا این که گردابه‌ها به اندازه کافی قدرتمند می‌شوند. خطوط جریان با ورود به دنباله، به یک ناحیه کم فشار سقوط می‌کنند که به دنباله آن گردابه‌های کم فشاری ایجاد می‌شود. این گردابه‌ها در طول دنباله بر اثر ائتلاف انرژی به گردابه‌های کوچک‌تری شکسته شده، نهایتاً گردابه‌های کولموگروف<sup>۲</sup> ایجاد شده که مستقیماً بر اثر استهلاک به انرژی گرمایی تبدیل می‌شوند [۲۰].

از طرفی اگر جسم به خوبی نصب نشود و فرکانس ریزش گردابه‌ها به فرکانس نوسان جسم نزدیک شده و با هم برابر شوند، تشدید رخ داده، لذا آثار مخربی را می‌تواند به همراه داشته باشد.

در شکل ۱۵، تغییرات عدد استروهال برای زوایا و قطرهای مختلف سیم نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس ریزش گردابه‌ها برای سیلندر صاف در عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ قدری بیشتر از دیگری است. این اختلاف آن‌قدر کم است که می‌توان چنین استدلال کرد که تغییر عدد رینولدز جریان، تأثیر چندانی روی عدد استروهال در سیلندر صاف ندارد.



شکل ۱۳- توزیع شدت اغتشاش‌ها در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه اول



شکل ۱۴- توزیع شدت اغتشاش‌ها در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه دوم

دیگر حالت‌ها، از بین می‌روند. در حالی که برای کوچک شدن عرض دنباله تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز باید نقطه الحاق مجدد برای شکل‌گیری لایه‌مرزی در نقطه‌ای دورتر از پایین‌دست جریان رخ دهد که با توجه به شکل ۱۳ این مسئله برای موقعیت  $\theta = 40/9$  نسبت به دیگر موقعیت‌ها، بهتر اتفاق افتاده است. چرا که اختلاف سرعت یا همان نقصان سرعت در دنباله برای آن کمتر از بقیه موارد دیگر است.

<sup>1</sup> Bluff body  
<sup>2</sup> Kolmogorov

در پشت مدل افزایش می‌یابد. این افزایش فشار، باعث کاهش اختلاف فشار وارد بر مدل شده که به تبع آن، نیروی وارد بر مدل از طریق فشار وارد شده بر آن کاهش می‌یابد. از طرفی خان<sup>۱</sup> و همکاران [۲۱]، در مقاله‌ای برای یک سیلندر بیضی صاف نشان دادند که ضریب پسای فشاری با رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$C_{Dp} = \int_0^\pi C_p \cos\theta \sqrt{1 - e^2 \cos^2\theta} d\theta \quad (۵)$$

که در آن  $e = \sqrt{1 - AR^2}$  همان گریز از مرکز بیضی و  $AR = b/a$  نسبت محورها نام دارد که در آن  $b$  نصف قطر کوچک بیضی و  $a$  نیز نصف قطر بزرگ بیضی است.

نوع دیگر این نیرو را پسای اصطکاکی می‌نامند. پسای اصطکاکی به دلیل وجود نیروهای برشی ویسکوز در سطح سیلندر تولید می‌شوند که نتیجه شکل‌گیری لایه مرزی بر سطح سیلندر است. ضریب پسای اصطکاکی با رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$C_{Df} = \int_0^\pi C_f \sin\theta d\theta \quad (۶)$$

لو<sup>۲</sup> و براگ<sup>۳</sup> [۲۲] تحقیق‌های زیادی در مورد بررسی عوامل مؤثر در محاسبه ضریب پسا داشته‌اند. همچنین آن‌ها اثرات اغتشاش و نوسان‌های جریان را مورد بررسی قرار داده، به نتیجه‌های مهمی دست یافته‌اند.

ون‌دام<sup>۴</sup> [۲۳] معادله‌ای برای محاسبه ضریب پسا به دست آورد که در آن ترم‌های تنش رینولدزی و شدت اغتشاش‌های جریان وجود داشتند، اما از تغییرات چگالی جریان و ترم لزجت  $\mu \partial u / \partial x$  صرف‌نظر شده بود. اجزاء معادله به صورت زیر بیان می‌شود:

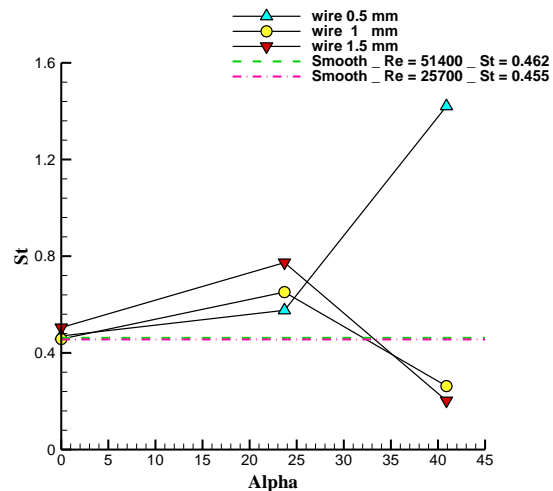
$$\int_w \left( \frac{p_{s,e} - p_{s,w}}{q_{ref}} \right) d\left(\frac{z}{L}\right) \quad (۷-الف)$$

جزء دوم مربوط به ترم مومنوم است:

$$2 \int_w \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \left( 1 - \frac{\bar{u}}{U_{ref}} \right) d\left(\frac{z}{L}\right) \quad (۷-ب)$$

جزء سوم مربوط به تنش رینولدز است:

$$-2 \int_w \frac{\overline{u^2}}{U_{ref}^2} d\left(\frac{z}{L}\right) \quad (۷-ج)$$



شکل ۱۵- تغییرات عدد استروهمال در موقعیت‌های مختلف بر حسب X/B در عدد رینولدز ۵۱۴۰۰

همان‌طور که مشخص است، برای زاویه نصب سیم ۰/۵ میلی‌متر در موقعیت  $\theta = ۴۰/۹$  نسبت به قطرهای دیگر، عدد استروهمال بزرگ‌ترین مقدار را دارد. از طرفی سرعت متوسط در دنباله در این موقعیت برای نصب سیم ۰/۵ میلی‌متر، دارای بیشترین مقدار سرعت است که از بهینه‌ترین شرایط موجود حکایت دارد؛ لذا می‌توان چنین استدلال کرد که هر چه مقدار عدد استروهمال بزرگ‌تر باشد، شرایط مشخصه‌های جریان مطلوب‌تر است؛ همچنین مشخص است که در زاویه  $\theta = ۲۳/۷$  از نصب سیم، تأثیر سیم با قطر ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از بقیه موارد دیگر است.

#### ۴-۵- بررسی ضریب پسا

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

نیروی پسا از دو نوع مختلف تشکیل می‌شود؛ نوع اول نیروی پسای فشاری است. این نیروی پسا در اجسام پخ، قسمت اعظم نیروی پسای کل را شامل می‌شود. در واقع با به کار بردن سیم اغتشاش‌ساز، جریان در راستای کاهش اختلاف فشار بین نقطه سکون جلویی و عقبی مدل بهبود می‌یابد.

لذا با به‌کارگیری سیم اغتشاش‌ساز و به تبع آن ایجاد نقطه الحاق مجدد، عرض دنباله کاهش یافته، در نتیجه فشار

<sup>1</sup> Khan

<sup>2</sup> Lu

<sup>3</sup> Bragg

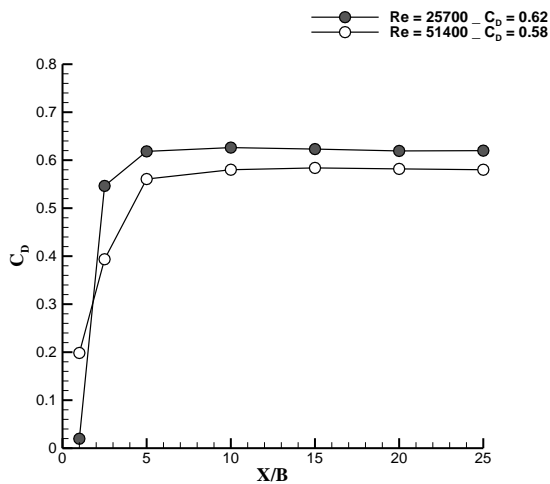
<sup>4</sup> Van Dam

خطا و برای دیگر عدد رینولدز به میزان ۵/۲ درصد خطا وجود دارد.

در تحقیق حاضر، ضریب پسا با استفاده از رابطه ۸ به دست آمده است. در شکل ۱۶، تغییرات ضریب پسا برای سیلندر بیضوی صاف بر حسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که ضریب پسا برای عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ قدری بیشتر از مقدار آن برای عدد رینولدز دیگر است. این مسئله به این دلیل است که هر چه جدایش جریان دیرتر بی‌افتد، عرض دنباله کمتر شده، لذا به دلیل کم شدن فضای دنباله، فشار پشت مدل افزایش یافته و به تبع آن اختلاف فشار برای مدل کاهش می‌یابد [۲۴].

این در حالی است که مقدار  $C_p = \frac{P_1 - P_2}{\frac{1}{2}\rho U_{ref}^2}$  در رابطه ۵ با کاهش این اختلاف فشار، کم می‌شود؛ چرا که طبق تحقیق خان، مقدار  $P_1 - P_2$  برابر اختلاف فشار در سطوح بالادست و پایین‌دست جریان در سیلندر بیضوی است. پس طبق رابطه ۵ نیز، کاهش اختلاف فشار موجب کاهش ضریب پسا می‌شود.

در شکل ۱۷، تغییرات ضریب پسا برای زوایا و قطرهای مختلف سیم نشان داده شده است. مشخص است که مقدار ضریب پسا برای سیم با قطر ۰/۵ میلی‌متر نسبت به همه حالت‌های دیگر کمتر است.



شکل ۱۶- تغییرات ضریب پسا برای سیلندر بیضوی صاف بر حسب X/B

از طرفی به دلیل این‌که محاسبه دقیق فشار استاتیک درون دنباله یک امر دشوار است، لذا بر اساس چندین فرض که مهم‌ترین آن‌ها این است که اجزاء سرعت متوسط  $\bar{v}$  و  $\bar{w}$  بسیار کوچک و قابل صرف‌نظر باشند و این‌که مجموع فشار در امتداد خط جریان ثابت باشد، معادله ساده می‌شود؛ در نتیجه معادله اصلی ون دام به فرم نهایی (۸) در می‌آید:

$$C_d = 2 \int_w \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_{ref}}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_{ref}}} \right) d\left(\frac{z}{L}\right) + \frac{1}{3} \int_w \frac{\bar{q}}{q_{ref}} d\left(\frac{z}{L}\right) \quad (8)$$

که در آن  $\bar{q} = \rho(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)/2$  و فرض شده است که در فاصله‌ای دور از پایین‌دست، جریان همگن بوده، لذا  $\bar{u} = \bar{v} = \bar{w}$  می‌باشند. از طرفی  $\bar{q} = \frac{1}{2}\rho\bar{V}^2$  فشار دینامیکی متوسط زمانی و  $q_{ref} = \frac{1}{2}\rho V^2$  فشار دینامیکی است.

روش ارائه شده توسط ون دام بر اساس فرض‌هایی که دارد، برای جریان دائمی کاربرد دارد و این روش برای جریان غیردائمی محدودیت داشته و با خطا همراه است. همچنین ضریب پسای اصطکاکی برای نسبت محورهاى مختلف  $AR = b/a$  به صورت (۹-الف) ارائه می‌شود [۲۱]:

$$C_{Df} = \frac{1.353 + 4.43AR^{1.35}}{\sqrt{Re_L}} \quad (الف-۹)$$

که در آن  $Re_L = \mathcal{L}U_{ref}/\nu$  همان عدد رینولدز است که در آن  $\mathcal{L}$  برابر قطر بزرگ بیضی،  $2a$  است. از طرفی ضریب پسای فشاری نیز به صورت (۹-ب) بدست می‌آید:

$$C_{Dp} = (1.1526 + 1.26/Re_L)AR^{0.95} \quad (ب-۹)$$

که در نهایت ضریب پسای کل، برابر مجموع ضریب پسای فشاری و ضریب پسای اصطکاکی خواهد بود که به صورت رابطه (۱۰) ارائه می‌شود:

$$C_D = \frac{1.353 + 4.43AR^{1.35}}{\sqrt{Re_L}} + (1.1526 + 1.26/Re_L)AR^{0.95} \quad (۱۰)$$

در استفاده از معادله ۱۰ نسبت به کار حاضر در مقام مقایسه، برای عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ به میزان ۰/۶۵ درصد

اکنون در قالب دو جدول برای هر عدد رینولدز، بهترین نتایج مربوط به هر سیم ارائه شده است.

جدول ۱- بهترین نتایج ضریب پسا برای هر سیم در عدد رینولدز ۲۵۷۰۰

نوع سیم	ضریب پسا	زاویه نصب	درصد کاهش
۰/۵ mm	۰/۲۸	۴۰/۹	۵۴/۸
۱ mm	۰/۳۴	۲۳/۷	۴۵
۱/۵ mm	۰/۳	۲۳/۷	۵۱/۶

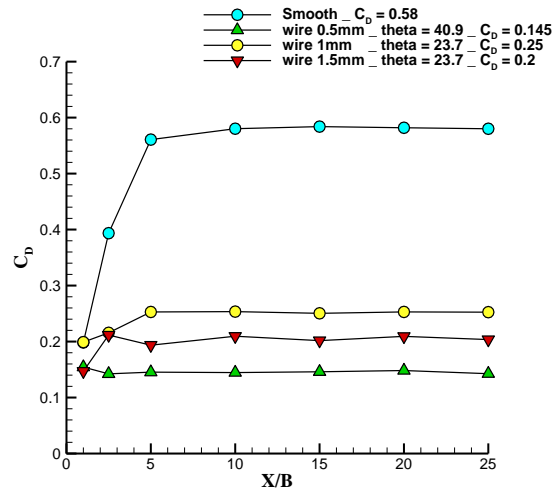
جدول ۲- بهترین نتایج ضریب پسا برای هر سیم در عدد رینولدز ۵۱۴۰۰

نوع سیم	ضریب پسا	زاویه نصب	درصد کاهش
۰/۵ mm	۰/۱۴۵	۴۰/۹	۷۵
۱ mm	۰/۲۵	۲۳/۷	۵۶/۹
۱/۵ mm	۰/۲	۲۳/۷	۶۵/۵

همان‌طور که مشخص است، بهترین نتایج برای هر سیم در عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ رخ داده است. لیندسی<sup>۱</sup> [۲۵] در سازمان ناسا<sup>۲</sup> به صورت تجربی مجموعه‌ای از تحقیقات جامع را روی ضریب پسای اجسام مختلف انجام داد. در این بین نتایج به دست آمده برای سیلندر بیضوی صاف با نسبت ابعادی ۱ به ۲ با زاویه حمله صفر برای اعداد رینولدز مختلف به صورت زیر است. از آنجا که تاکنون هیچ تحقیقی در زمینه تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر دنباله یک سیلندر بیضوی انجام نشده است، در نتیجه طبق شکل ۱۸ فقط اعتبارسنجی برای داده‌های مربوط به سیلندر بیضوی صاف ممکن بود.

### ۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، به بررسی تأثیر سیم اغتشاش‌ساز روی مشخصه‌های دنباله جریان یک سیلندر بیضوی صاف با زاویه حمله صفر درجه پرداخته شد.



شکل ۱۷- تغییرات ضریب پسا در موقعیت‌های مختلف بر حسب X/B

اگر به نمودارهای سرعت متوسط در شکل‌های ۶ و ۷ مراجعه شود، مشخص است که سرعت در دنباله برای سیم با قطر ۰/۵ میلی‌متر، بیشتر از بقیه موارد دیگر است. از طرفی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشخص است که میزان اغتشاش نیز برای این سیم کمتر از بقیه موارد است؛ لذا کاهش ضریب پسا رابطه‌ای مستقیم با افزایش مقدار سرعت متوسط و همچنین کاهش اغتشاش‌های جریان دارد.

باتوجه به طبق شکل‌های ۱۵ و ۱۷ به ازای حداقل ضریب پسای به دست آمده برای سیم ۰/۵ میلی‌متر در  $\theta = 40.9$ ، بیشترین عدد استروهاال ممکن نیز در همین موقعیت رخ داده است. از طرفی در  $\theta = 23.7$ ، مشخص است که برای سیم ۱/۵ میلی‌متر ضریب پسا کمتر از مقدار آن نسبت به سیم ۱ میلی‌متر است؛ در حالی که در شکل ۱۵ نیز، عدد استروهاال برای سیم ۱/۵ میلی‌متر بیشتر از مقدار مربوط به سیم ۱ میلی‌متر است.

البته برای سیلندر بیضوی صاف به ازای تغییرات عدد رینولدز جریان، ضریب پسا تغییرات چندانی ندارد؛ همچنین عدد استروهاال نیز با تغییر در عدد رینولدز جریان، تغییر چندانی ندارد؛ لذا برای سیلندر صاف با تغییر عدد رینولدز جریان، ضریب پسا و عدد استروهاال تغییرات چندانی ندارند. نهایتاً کاهش ضریب پسا با افزایش عدد استروهاال متناسب است.

<sup>1</sup> W.F. Lindsey

<sup>2</sup> NASA

کاهش اغتشاش‌های جریان که با افزایش سرعت متوسط در دنباله متناسب است، باعث افزایش عدد استروهال می‌شود. ساختار پروفیل اغتشاشی به‌گونه‌ای است که پیک‌های اغتشاشی در ایستگاه‌های نزدیک به مدل از نقطه عطف پروفیل سرعت می‌گذرند. در واقع در آنجا که جریان بیشترین مقدار اغتشاش را دارد، جهت نرخ تغییر سرعت نیز تغییر می‌کند.

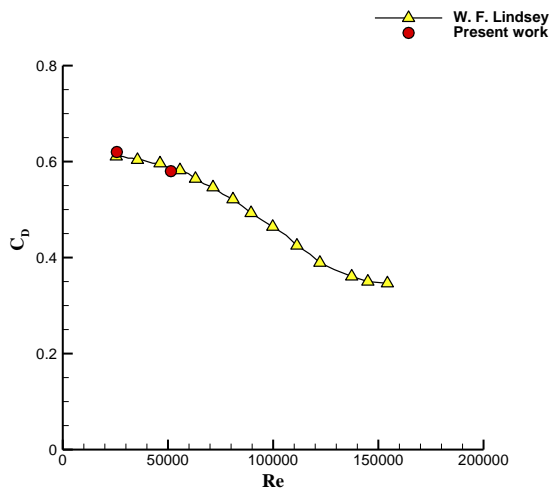
در راستای بهینه‌سازی مشخصه‌های جریان برای یک قطر مشخص از یک سیم هر چه رینولدز جریان بالا می‌رود، مکان نصب سیم به نقطه سکون نزدیک‌تر می‌شود. از طرفی برای یک عدد رینولدز مشخص مکان نصب سیم با قطر بزرگ‌تر، در فاصله نزدیک‌تری از نقطه سکون قرار می‌گیرد.

#### ۶- علائم و نشانه‌ها

نسبت محورها (نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ بیضی)	$AR$
قطر کوچک بیضی (m)	$B$
نصف دهانه در نصف عرض (m)	$b_{1/2}$
ضریب پسای اصطکاکی	$C_{Df}$
ضریب پسای فشاری	$C_{Dp}$
ضریب پسا	$C_D$
ضریب اصطکاک	$C_f$
ضریب فشار	$C_p$
گریز از مرکز بیضی	$e$
فرکانس ریزش گردابه‌ها ( $s^{-1}$ )	$f$
فشار نقطه سکون جلویی ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )	$P_1$
فشار نقطه سکون عقبی ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )	$P_2$
عدد رینولدز	$Re$
عدد استروهال	$St$
درصد شدت اغتشاش‌ها	$\%Tu$
سرعت جریان آزاد ( $ms^{-1}$ )	$U_{ref}$
سرعت درون دنباله ( $ms^{-1}$ )	$u$
سرعت متوسط جریان ( $ms^{-1}$ )	$\bar{u}$
مؤلفه نوسانی سرعت ( $ms^{-1}$ )	$\dot{u}$
پارامتر نقصان سرعت ( $ms^{-1}$ )	$w_0$
فاصله از نقطه سکون عقبی (m)	$X$

#### علائم یونانی

نسبت انسداد	$\beta$
لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )	$\mu$
چگالی ( $kgm^{-3}$ )	$\rho$



شکل ۱۸- تغییرات ضریب پسا بر حسب رینولدز برای سیلندر بیضوی صاف

در این پژوهش به‌منظور ایجاد جریان هوا از یک تونل باد مدار باز و دمنده استفاده شد و ایستگاه‌های داده‌برداری در  $\gamma$  مکان مختلف انتخاب شدند.

نتایج نشان داد که سیم اغتشاش‌ساز بر مشخصه‌های جریان و کاهش نیروی سیال، تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد و این امر به شدت به مکان نصب سیم روی مدل بستگی دارد.

نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز جریان در سیلندر صاف، مقدار ضریب پسا کاهش می‌یابد. این نتیجه برای سیلندری که تحت تأثیر سیم قرار می‌گیرد، به قطر سیم و موقعیت آن بستگی دارد.

وجود شیب شدید در پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد و نیز در پروفیل شدت اغتشاش‌ها برای عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ نسبت به عدد رینولدز ۵۱۴۰۰ در سیلندر صاف، از حقیقت حکایت دارد که نرخ اضمحلال در عدد رینولدز ۲۵۷۰۰ بالاتر است. این مسئله باعث افزایش در روند انحلال گردابه‌های ایجاد شده در پشت مدل در این جریان می‌شود.

وجود شیب شدید در پروفیل سرعت متوسط با قدرتمند بودن گردابه‌های ایجاد شده در پشت مدل، رابطه مستقیم دارد.

نکته دیگر این که کاهش ضریب پسا با افزایش سرعت متوسط در دنباله و نیز کاهش مقدار اغتشاش‌های جریان همراه است. از طرفی مشخص است که افزایش عدد استروهال با کاهش ضریب پسا رابطه مستقیم دارد؛ لذا

- Mechanics & Aerodynamics 4(2): 19-35. (In persion)
- [13] Ezadi Yazdi MJ, Bak Khoshnevis A, Nazari S, and Neshat AR, (2016) Experimental investigation of flow past an elliptic cylinder near a plane wall. 24th Annual International Conference on Mechanical Engineering ISME2016, Yazd University, Yazd, Iran, 26-28 April.
- [14] Paul I, Arul Prakash K, Vengadesan S (2014) Numerical analysis of laminar fluid flow characteristics past an elliptic cylinder: A parametric study. *Int J Numer Method H* 24(7): 1570-1594.
- [15] Bak Khoshnevis A, Foroozesh F, Pedram M, Vahidi M (2012) Experimental investigation on drag coefficient reduction due to tripping wire on a cylinder. *J Solid and Fluid Mechanics* 2(2):81-90. (In persion)
- [16] Alonso G, Meseguer J, Sanz-Andrés A, Valero E (2010) On the galloping instability of two-dimensional bodies having elliptical cross-sections. *J Wind Eng Ind Aerod* 98(8): 438-448.
- [17] Flynn MR, Eisner AD (2004) Verification and validation studies of the time-averaged velocity field in the very near-wake of a finite elliptical cylinder. *Fluid Dyn Res* 34(4): 273-288.
- [18] 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. *J Fluid Struct* 18(3): 347-366.
- [19] Lotfollahi Yaghin MA, Mojtahedi A (2010) Hydrodynamic parameter of flow around a cylindrical pile and its numerical and experimental modeling. *J Marine Engineering* 5(10): 97-104. (In persion)
- [20] Saniei Nejad M (2006) Fundamentals of turbulent flows and turbulence modeling. Publishers of Danesh Negar, Tehran. (In persion)
- [21] Khan WA, Culham RJ, Yovanovich MM (2005) Fluid flow around and heat transfer from elliptical cylinders: analytical approach. *J Thermophys Heat Tr* 19(2):178-185.
- [22] Lu B, Bragg MB (2002) Experimental investigation of the wake-survey method for a bluff body with highly turbulent wake," *AIAA* 30: 30-60, 2002.
- [23] Van Dam CP (1999) Recent experience with different methods of drag prediction. *Progress in Aerospace Sciences* 35(8): 751-798.
- [24] Behara S, Mittal S (2011) Transition of the boundary layer on a circular cylinder in the presence of a trip. *J Fluid Struct* 27(5): 702-715.
- [25] Lindsey W (1938) Drag of cylinders of simple shapes. Citeseer, NACA Report.
- ۷- مراجع
- [1] Igarashi T (1986) Effect of tripping wires on the flow around a circular cylinder normal to an airstream. *Bull Jpn Soc Mech Eng* 29(255): 2917-2924.
- [2] Zhou C, Wang L, Huang W (2007) Numerical study of fluid force reduction on a circular cylinder using tripping rods. *J Mech Sci Technol* 21(9): 1425-1434.
- [3] Missirlis D, Yakinthos K, Palikaras A, Katheder K, Goulas A (2005) Experimental and numerical investigation of the flow field through a heat exchanger for aero-engine applications. *Int J Heat Fluid Flow* 26(3): 440-458.
- [4] Hover F, Tvedt H, Triantafyllou M (2001) Vortex-induced vibrations of a cylinder with tripping wires. *J Fluid Mech* 448: 175-195.
- [5] Fukudome K, Watanabe M, Iida A, Mizuno A (2005) Separation control of high angle of attack airfoil for vertical axis wind turbines. *AIAA* 50: 30-41.
- [6] Quadrante LAR, Nishi Y (2014) Amplification/suppression of flow-induced motions of an elastically mounted circular cylinder by attaching tripping wires. *J Fluid Struct* 48: 93-102.
- [7] Ota T, Nishiyama H, Taoka Y (1987) Flow around an elliptic cylinder in the critical Reynolds number regime. *J Fluid Eng-T ASME* 109(2):149-155.
- [8] Ezadi Yazdi MJ, Bak Khoshnevis A, (2016) Experimental investigation of the characteristics of the wake of a rotating circular cylinder at different Reynolds numbers and speed ratios. *J Fluid Mechanics & Aerodynamics* 4(1): 51-46. (In persion)
- [9] Ezadi Yazdi MJ, Bak Khoshnevis A, (2016) Experimental Investigation of the Effect of Reducing the Drag Coefficient on the Cylinder by Hot-Wire Anemometry. *J Mechanical Engineering* 46(2):19-30. (In persion)
- [10] Ezadi Yazdi MJ, Bak Khoshnevis A, Experimental investigation of characteristics of the flow wake around a elliptic cylinder at different Reynolds Numbers. *J Mechanical Engineering Article in press.* (In persion)
- [11] Ezadi Yazdi MJ, Safavi Rad A, Bak Khoshnevis A, (2016) Experimental investigation of mean velocity profiles and turbulence intensities around an elliptic cylinder in the different Reynolds numbers. 1st International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.
- [12] Ezadi Yazdi MJ, Bak Khoshnevis A, (2016) Experimental investigation of flow characteristics around an elliptic cylinder near a flat plate. *J Fluid*