

بررسی تجربی ویژگی‌های جریان در اطراف یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز

عبدالامیر بک خوشنویس^۱، سجاد نظری^۲ و محمدجواد ایزدی یزدی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه حکیم سبزواری

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۹/۳۰)

چکیده

در این تحقیق به بررسی تجربی رفتار و مشخصه‌های دنباله جریان حول یک سیلندر بیضوی با زاویه حمله صفر درجه، تحت تأثیر سیم اغتشاش‌ساز با قطر ۱ میلی‌متر پرداخته شده است. بدین منظور، از یک استوانه با سطح مقطع بیضوی از جنس آلومینیوم، 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 سیلندر برای سرعت‌های ۱۰ m/s و ۲۰ m/s به ترتیب ۲۵۷۰۰ و ۵۱۴۰۰ می‌باشند. سیم اغتشاش‌ساز به صورت متقارن روی سیلندر بیضوی، در زاویه‌های صفر درجه، ۲۳/۷ درجه و ۴۰/۹ درجه نسبت به نقطه سکون مورد آزمایش قرار گرفته است. ضریب پسا برای سیلندر بیضوی صاف در هر دو عدد رینولدز در حدود ۰/۶ است. نتایج نشان می‌دهند که در بهترین حالت ممکن، در زاویه نصب ۲۳/۷ درجه، ضریب پسا به میزان ۵۶/۵٪ کاهش می‌یابد. همچنین، در بهترین حالت ممکن برای زاویه صفر درجه ضریب پسا ۸/۶٪ کاهش می‌یابد، در حالی که در بدترین حالت ضریب پسا برای زاویه ۴۰/۹ درجه به اندازه ۲۰/۷٪ افزایش دارد.

واژه‌های کلیدی: سیم اغتشاش‌ساز، ضریب پسا، دنباله سیلندر بیضوی، جریان سنج سیم داغ

Experimental Investigation of the Characteristics of the Flow around an Elliptic Cylinder in the Presence of a Tripping Wire

A.A. Bak Khoshnevis, S. Nazari, and M.J. Ezadi Yazdi

Mechanical Engineering Department

Hakim Sabzevari University

(Received: 5/April/2016; Accepted: 20/December/2016)

ABSTRACT

In this research, the behavior and characteristics of the wake of the flow around an elliptic cylinder at zero angle of attack in the presence of a tripping wire of 1 mm diameter were investigated experimentally. An aluminum elliptic cylinder with major axis, minor axis, and height of 42.4 mm, 21.2mm, 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 were 25700 and 51400 for 10 m/s and 20 m/s speeds, respectively. Tripping wire placed symmetrically at both sides of the cylinder, and each were 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 was about 0.6. The results indicate that in the best possible case, the drag coefficient for the 1 mm wire reduces by 56.5% at angle of the 23.7 degree. In the best case, it also reduces by 8.6% for angle of the zero degree, while in the worst case, the drag coefficient for angle of 40.9 degree increase by 20.7%.

Keywords: Trip Wire, Drag Coefficient, Wake of Elliptic Cylinder, Hot Wire Anemometry

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

۲- کارشناسی ارشد: pixy64@gmail.com

۳- دانشجوی دکتری: javadezadi2013@yahoo.com

فهرست علائم و اختصارات

A	قطر بزرگ سیلندر بیضوی mm
AR	نسبت محوری سیلندر
B	قطر کوچک سیلندر بیضوی mm
C_{Df}	ضریب پسا اصطکاکی
C_{Dp}	ضریب پسا فشاری
C_D	ضریب پسا
C_f	ضریب اصطکاک
C_p	ضریب فشار
e	گریز از مرکز بیضی
f	فرکانس ریزش گردابه‌ها s^{-1}
H	ارتفاع دهانه اتاق آزمون mm
p_1	فشار نقطه سکون جلویی $kgm^{-1}s^{-2}$
p_2	فشار نقطه سکون عقبی $kgm^{-1}s^{-2}$
Re	عدد رینولدز
St	عدد استروهل
$\%Tu$	درصد شدت اغتشاش‌ها
U_{ref}	سرعت جریان آزاد ms^{-1}
U_{ms}	مربع نوسانات سرعت ms^{-1}
u_i	مؤلفه افقی سرعت جریان آزاد ms^{-1}
u	سرعت درون دنباله ms^{-1}
\bar{u}	سرعت متوسط جریان ms^{-1}
u'	مؤلفه نوسانی سرعت ms^{-1}
w_0	پارامتر نقصان سرعت ms^{-1}
X	فاصله از نقطه سکون عقبی m

علائم یونانی

β	نسبت انسداد
ε	نسبت محورها
μ	لزجت دینامیکی $kgm^{-1}s^{-1}$
ρ	چگالی kgm^{-3}

۱- مقدمه

بررسی آیرودینامیک جریان پیرامون سیلندره‌های 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 لایه‌مرزی و جدایش آن سهم بسزایی در آیرودینامیک سیلندرها ایفا می‌کنند و همواره سعی شده است به‌منظور دست‌یابی به راندمان بالا، حتی‌الامکان از جدایش لایه‌مرزی جلوگیری شده و یا به تأخیر انداخته شود. این امر می‌تواند باعث بهینه‌سازی ضریب پسا گردد. روش‌های مختلفی برای جلوگیری از جدایش لایه‌مرزی و یا به تأخیر انداختن آن وجود دارد. روش‌هایی مانند تولیدکننده‌های تیغه-ای شکل گردابه، زبری سطح، سیم اغتشاش ساز، یونیزاسیون جریان هوا، تزریق یا مکش جریان سیال بر روی سطح و موارد دیگر را می‌توان نام برد.

از کاربردهای سیلندر بیضوی می‌توان به لوله‌های به‌کاررفته در مبدل‌های گرمایی، لبه حمله یک فلپ در یک ایرفویل چند جزئی و غیره اشاره کرد.

۱-۱- مروری بر کارهای گذشته

ایگاشی^۱ [۱] یک سری مطالعات تجربی را بر روی جریان اطراف یک سیلندر دایره‌ای در محدوده‌ی اعداد رینولدز زیر بحرانی، تحت تأثیر تولیدکننده گردابه‌ای^۲ انجام داد. در این تحقیق ضریب پسا در بهترین حالت در حدود ۵۳/۸ درصد کاهش یافت. همچنین ایگاشی [۱] به بررسی تجربی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر انتقال لایه‌مرزی بر روی یک سیلندر دایره‌ای پرداخت. نشان داد ضریب پسا در بهترین حالت در حدود ۷۰ درصد کاهش می‌یابد.

به‌هرا^۳ و میتال^۴ [۲] به بررسی عددی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر روی یک سیلندر دایره‌ای، برای رژیم‌های مختلف جریان پرداختند. نشان دادند برای رژیم جریان بحرانی، ضریب پسا به سرعت کاهش می‌یابد.

ژو^۵ و همکارانش [۳] به بررسی تأثیر سه نوع مختلف از سیم‌های اغتشاش ساز که در نزدیکی نقطه سکون یک سیلندر دایره‌ای قرار گرفته بودند، پرداختند. هر سیم به‌صورت یک جفت، متقارن در فاصله‌ای از سیلندر قرار گرفته بودند. نتایج آن‌ها نشان داد که ضریب پسا برای $Re=200$ در موقعیت $\alpha=30^\circ$ به میزان ۱۸٪ و برای $\alpha=5/5 \times 10^4$ در موقعیت $\alpha=30^\circ$ به میزان ۵۹٪ کاهش می‌یابد.

1- Igarashi
2- Vortex Generator
3- Behara
4- Mittal
5- Zhou

تخت قرار گرفته را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش نسبت فاصله، ضریب پسا سیلندر کاهش می‌یابد، اما عدد استروهال افزایش می‌یابد. پول^۷ و همکاران [۱۵] به بررسی عددی تأثیر زاویه حمله، نسبت محورها و عدد رینولدز در جریان آرام و ناپایدار بر 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.

پرومال^۸ و همکاران [۱۶] به روش شبیه‌سازی شبکه لیتس-بولتسمن^۹ بر روی یک سیلندر بیضوی تأثیر نسبت انسداد^{۱۰}، عدد رینولدز و طول کانال را بر مشخصه‌های جریان بررسی کردند. در این مطالعه نشان داده شد که با افزایش نسبت انسداد، فرکانس ریزش گردابه‌ها^{۱۱} نیز افزایش می‌یابد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی بررسی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر روی ویژگی‌های جریان، تاکنون تأثیر سیم اغتشاش ساز بر روی کمیت‌های سرعت متوسط، سرعت نوسانی و ضریب پسا در یک سیلندر بیضوی، مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این تحقیق به بررسی تجربی ویژگی‌های دنباله جریان در یک سیلندر بیضوی تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز پرداخته شده است.

۲- پارامترهای مورد بررسی

شدت اغتشاش‌ها پارامتر مهمی است که کیفیت جریان سیال را مشخص می‌کند. شدت اغتشاش‌ها به صورت زیر بیان می‌شود:

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

پارامتر نقصان سرعت^{۱۲} بدون بعد از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

عدد استروهال از اعداد بدون بعد است که شدت فرکانس گردابه‌های کارمن تشکیل شده پشت مدل را به صورت بی‌بعد بیان می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

میس سرلیس^۱ و همکاران [۴] در یک تحقیق تجربی و عددی، کاربرد سیلندر بیضوی را در یک مدل حرارتی نشان دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از سیلندر بیضوی نسبت به سیلندر دایره‌ای باعث بهبود افت فشار و نیز انتقال حرارت جریان می‌شود.

هور^۲ و همکاران [۵] با انجام تحقیقی در زمینه‌ی تأثیر سیم اغتشاش ساز بر تحریک نوسان‌های گردابه‌ای تنها با یک جفت سیم در زاویه ۷۰ درجه نشان دادند که ضریب پسا تا حدود ۵۰٪ نسبت به حالت بدون سیم، کاهش می‌یابد.

آیبا^۳ و همکاران [۶] تأثیر سیم اغتشاش‌ساز در انتقال حرارت در اطراف یک سیلندر دایره‌ای را نشان دادند. یک جفت سیم به صورت متقارن در زاویه ۶۵ درجه بر روی سیلندر قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که هرچه ضریب پسا کاهش یابد، عدد ناسلت افزایش یافته و به دنبال آن انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۷-۸] به بررسی تجربی ویژگی‌های جریان اطراف یک سیلندر دایره‌ای صاف و چرخان در اعداد رینولدز و نسبت سرعت‌های مختلف پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش سرعت دورانی سیلندر، پارامترهای ضریب پسا و نقصان سرعت کاهش می‌یابند. همچنین بک خوشنویس و همکاران [۹]، روابط جدیدی برای پیش‌بینی مقادیر مرتبه بالای سرعت در دنباله تخت پشت یک سیلندر دایره‌ای ارائه دادند.

رامان^۴ و همکاران [۱۰] در یک بررسی عددی بر روی سیلندر بیضوی نشان دادند که در یک عدد رینولدز خاص، با کاهش نسبت قطر^۵ سیلندر مقدار ضریب پسا کاهش یافته و مقدار عدد استروهال نیز افزایش می‌یابد.

اوتا^۶ و همکاران [۱۱] جریان اطراف یک سیلندر بیضوی با نسبت قطر ۱ به ۳ را به صورت تجربی بررسی کردند. در این تحقیق زاویه حمله مناسب برای وقوع عدد رینولدز بحرانی و همچنین ریزش اولین گردابه‌ها در پشت مدل به دست آمد.

ایزدی یزدی و بک خوشنویس [۱۲-۱۴]، ویژگی‌های جریان در اطراف دنباله یک سیلندر بیضوی با نسبت محور ۱:۲ و همچنین حالتی که سیلندر بیضوی در نزدیکی یک صفحه

7- Paul

8- Perumal

9- Lattice Boltzmann Simulation

10- Blockage ratio

11- Frequency of the Vortex Shedding

12- Velocity Defect

1- Missirlis

2- Hover

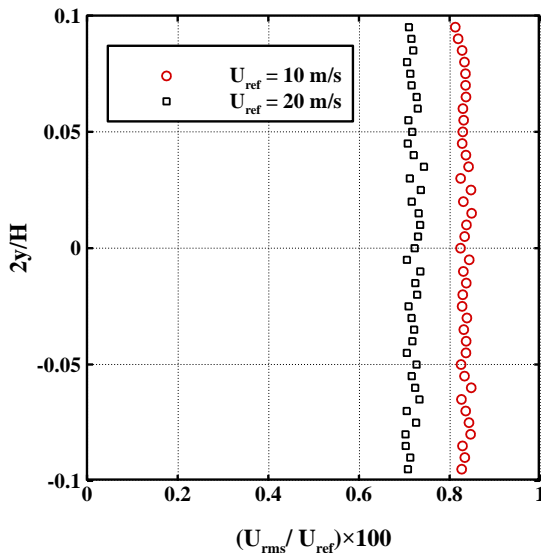
3- Aiba

4- Raman

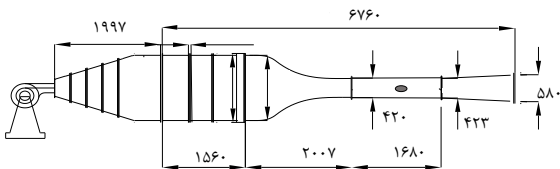
5- Axis Ratio (AR)

6- Ota

سیلندر استفاده شده در آزمایش‌ها از جنس آلومینیوم بوده و دارای طول ۳۹۰ mm، قطر بزرگ ۴۲/۴ mm و قطر کوچک ۲۱/۲ mm می‌باشد. در شکل ۳، نمای شماتیکی از هندسه مدل مورد آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۱): شدت اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاق آزمون در سرعت‌های ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه.



شکل (۲): نمای شماتیکی از تونل باد.

ایستگاه‌های داده‌برداری برحسب نسبت فاصله از مدل به قطر کوچک عبارتند از:

$$x/B = 1, 2/5, 5, 10, 15, 20 \text{ و } 25.$$

سیم اغتشاش‌ساز با قطر ۱ mm انتخاب شده است که 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 گرفته 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 انجام‌شده در این زمینه اگر نسبت انسداد سیلندر بیضوی کم‌تر از ۰/۰۸ انتخاب شود، خطای آزمایش‌ها ناچیز خواهد بود. برای اطلاعات بیشتر به آلنسون^۱ و همکاران [۱۷] و فلاین^۲ و ایزنر^۳ [۱۸] مراجعه شود. نسبت انسداد به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

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

نسبت انسداد در آزمایش حاضر $\beta = 0.053$ می‌باشد.

۳- تجهیزات آزمایشگاهی و روش آزمایش

سرعت‌سنج سیم داغ یکی از ابزارهای اصلی اندازه‌گیری سرعت لحظه‌ای جریان سیال می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد این دستگاه، اصلی‌ترین و عمده‌ترین کاربرد آن انجام آزمایش برای جریان‌های آشفتگی‌گاز و یا هوا است. سرعت‌سنج استفاده شده در این تحقیق از نوع دما ثابت^۴ بوده که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاش‌ها و فرکانس گردابه‌های خارج شونده از پشت مدل را دارد. تونل باد مورد استفاده در این آزمایش از نوع مدارباز و دمشی بوده که برای ایجاد جریان هوا در این دستگاه از یک موتور با قدرت ۷ kw که توانایی ایجاد جریان هوایی با سرعت ۳۰ m/s را دارد، استفاده شده است. اتاقک آزمایش این تونل از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ سانتی‌متر، عرض ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر می‌باشد.

در شکل ۱ میزان اغتشاش‌های جریان آزاد در اتاق آزمون در غیاب هرگونه مدلی برای سرعت‌های ۱۰ و ۲۰ متر بر ثانیه ارائه شده است که مقدار آن کم‌تر از ۰/۱ درصد اندازه‌گیری شده است. پراب یک‌بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای سنسوری به طول ۱ میلی‌متر و قطر ۵ میکرومتر می‌باشد. 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 به کار گرفته شده، ارائه شده است.

1- Alonso

2- Flynn

3- Eisner

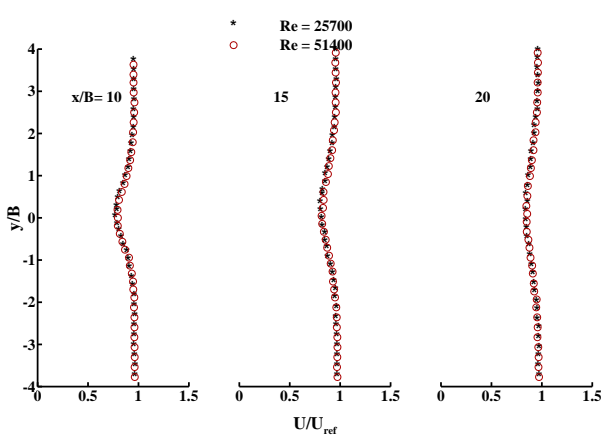
4- Constant Temperature Anemometry (CTA)

همان‌طور که می‌دانیم، گردابه‌ها به‌صورت لحظه‌ای و غیرمتقارن در پشت مدل تشکیل شده، ولی با توجه به شکل ۴ حتی در مقاطع اولیه نزدیک به سیلندر هم پروفیل‌های سرعت متوسط رسم شده، کاملاً متقارن می‌باشند.

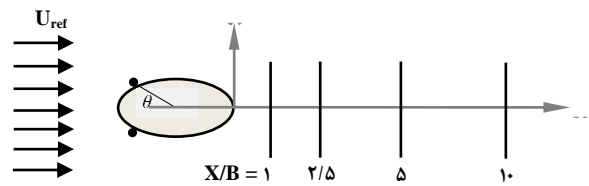
توجیه این مطلب بدین‌صورت است که تشکیل گردابه‌ها در پشت سیلندر، لحظه‌ای بوده و به‌صورت متناوب در طول دوره تناوب خود تکرار می‌شوند. حال اگر زمان داده‌برداری در یک نقطه از دوره تناوب تشکیل گردابه‌ها بیش‌تر باشد، می‌توان با محاسبه متوسط زمانی سرعت در نقاط مورد نظر، سرعت میانگین در هر نقطه را به‌دست آورد که اثرات نامتقارن بودن سرعت‌های لحظه‌ای در آن مشاهده نمی‌شود. در شکل ۴ زمان داده‌برداری تقریباً ۵۰۰ برابر دوره تناوب تشکیل گردابه‌ها می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگری که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، وجود دو ناحیه اکسترمم در پروفیل‌های سرعت مقاطع نزدیک به مدل می‌باشد. علت این مطلب را می‌توان در مومنوم لایه‌مرزی ایجاد شده بر سطوح مدل دانست. بدین‌صورت که در مقاطع نزدیک به مدل، مومنوم موجود در لایه‌مرزی تشکیل شده بر روی سطوح سیلندر، پس از انحلال لایه‌مرزی باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نهایت افزایش سرعت آن‌ها می‌شود که این مطلب در مقاطع دورتر پشت مدل اثر خود را از دست داده و قادر به ایجاد تغییر در سرعت ذرات سیال نمی‌باشد.

شکل ۵ توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه دوّم را نشان می‌دهد.



شکل (۵): توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه دوّم.



شکل (۳): نمای شماتیکی از هندسه مدل.

مدل مزبور در دو عدد رینولدز با مقادیر ۲۵,۷۰۰ و ۵۱,۴۰۰ به ترتیب برای سرعت‌های ۱۰ m/s و ۲۰ m/s مورد آزمایش قرار گرفته است.

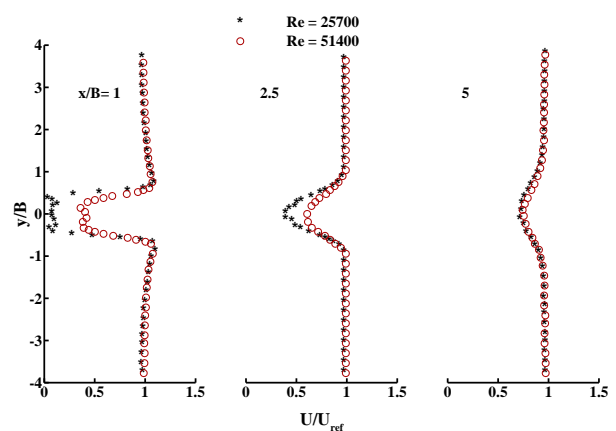
همان‌طور که اشاره شد در این تحقیق به بررسی دنباله سیلندر بیضوی صاف با زاویه حمله صفر درجه نسبت به افق، تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز با قطر ۱ میلی‌متر، پرداخته شده است.

۴- نتایج و بحث

همان‌طور 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 ۲۵,۷۰۰ و ۵۱,۴۰۰ پرداخته شده است.

۴-۱- توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد

پروفیل‌های سرعت با توجه به طبیعت متغیر و غیردائمی مؤلفه‌های نوسانی سرعت، در طول یک دوره تناوب، متقارن می‌باشند. شکل ۴ توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه اوّل را نشان می‌دهد.



شکل (۴): توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه اوّل.

سیلندر نسبت به حالت بدون سیم در نقطه‌ای از پایین دست جریان شکل می‌گیرد. لذا دنباله‌ای که شکل می‌گیرد، دارای عرض کم‌تری می‌باشد.

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 $51,400$ از سیم در هر موقعیت ارائه شده است که تأثیر بیشتری را نسبت به جریان دیگر با عدد رینولدز $25,700$ بر روی مشخصه‌های جریان داشته است. تأثیر مثبت سیم بر روی مشخصه‌های جریان در دنباله پشت مدل، باعث افزایش نسبی پروفیل سرعت متوسط می‌شود.

این مسئله در ایستگاه‌های دورتر بیش‌تر به چشم می‌خورد. موقعیت سیم بسته به مکان نصب آن می‌تواند تأثیر مثبت و یا منفی بر مشخصه‌های جریان داشته باشد. اگر نصب سیم سبب افزایش در عرض دنباله شود، آنگاه گردابه‌های قدرتمندی در پشت مدل ایجاد می‌شوند [۱۹]. لذا با تکیه بر این نکته می‌توان چهار الگو برای جریان تعریف کرد. الگوی A مربوط به حالتی است که سیم در نقطه‌ای بعد از جدایش جریان قرار می‌گیرد. در این حالت سیم هیچ تأثیری بر پارامترهای مهم جریان مانند عدد استروهال، ضریب فشار و ضریب پسا ندارد.

الگوی C به‌عنوان بهترین الگو شناخته می‌شود که به دنبال آن نقطه جدایش به‌گونه‌ای اتفاق می‌افتد که دنباله ایجاد شده، کم‌ترین عرض را داشته باشد. بهترین مشخصات مربوط به جریان در این حالت رخ می‌دهد.

الگوی B که در حوزه ایجاد لایه‌مرزی قرار دارد، با حضور خود باعث تبدیل جریان آرام به درهم می‌شود. این الگو با تغییر عدد رینولدز جریان، بین دو الگوی C و A تغییر می‌کند. بهترین حالت ممکن برای این الگو مربوط به رخداد حالتی است که بر الگوی C منطبق شود.

الگوی D بدترین الگو برای جریان است که در آن سیم بر روی نقطه‌ای قرار می‌گیرد که بر روی سیلندر صاف در آن نقطه، جدایش رخ می‌دهد. این امر باعث می‌شود که جریان به‌صورت بدترین حالت ممکن به بالا منحرف شده و لذا با شکل‌گیری جدایش جریان در این حالت، بزرگ‌ترین دنباله شکل می‌گیرد که به دنبال آن بیش‌ترین ضریب پسا نیز رخ می‌دهد. از آنجا که این تحقیق فقط مربوط به بررسی نتایج تجربی است، لذا در غیاب مرئی‌سازی جریان و یا شبیه‌سازی آن، نمایش خطوط جریان امکان‌پذیر نیست و لذا نمی‌توان

نکته حائز اهمیت دیگر این است که با افزایش فاصله از پشت سیلندر، اختلاف سرعت در داخل و خارج دنباله کاهش یافته و عرض دنباله افزایش می‌یابد که نهایتاً پروفیل سرعت متوسط یکنواخت‌تر می‌شود. در فاصله‌های نزدیک به سیلندر به علت وجود جدائی و جریان‌های برگشتی، افت جریان بیشتر می‌باشد که با دور شدن از مدل، این افت کم‌تر شده و جریان در داخل دنباله یکنواخت‌تر می‌شود. این مسئله نیز در شکل ۵ 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 می‌شوند. این مسئله به این دلیل است که نرخ اضمحلال گردابه در عدد رینولدز $25,700$ ، بیشتر از مقدار آن برای عدد رینولدز $51,400$ می‌باشد. 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 در 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 از 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.

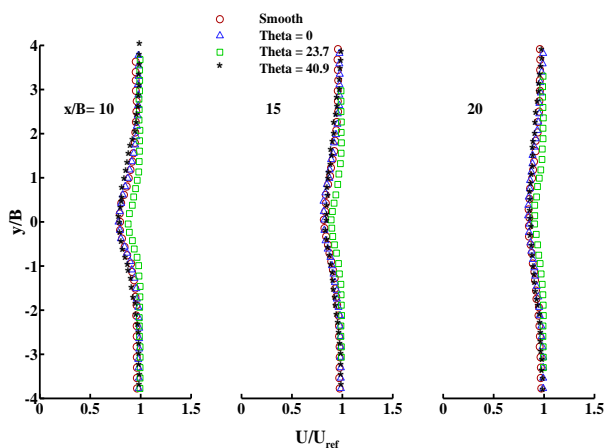
از طرفی وقتی یک عامل جهش جریان در مسیر عبور آن قرار می‌گیرد، تغییرات مهمی بر روی مشخصات لایه‌مرزی و همچنین دنباله جریان رخ می‌دهد. در این بین سیم اغتشاش‌ساز به‌عنوان عامل جهش جریان که بر روی سطح سیلندر نصب می‌شود، سبب رخداد پدیده‌ای بنام انتقال لایه‌مرزی می‌شود. درواقع در حضور سیم اغتشاش‌ساز به دلیل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

در ادامه شکل‌گیری لایه‌مرزی، یک نقطه جدایش نیز وجود دارد. پس به دلیل حضور سیم اغتشاش‌ساز، لایه‌مرزی بر سطح

تر ایجاد می‌شود. لذا گردابه‌های قدرتمندتری شکل می‌گیرد و در آن‌ها سرعت جریان نسبت به نمونه‌های دیگر از دنباله‌هایی با عرض کوچک‌تر، کم‌تر است [۱۹]. این مسئله در شکل ۶ و در ایستگاه $x/B=2/5$ بیش‌تر به چشم می‌خورد. در این شکل مشخص است که برای پروفیل مربوط به موقعیت $\theta=23/7^\circ$ سرعت دارای مقدار بیش‌تری نسبت به پروفیل‌های دیگر است و لذا تأثیر بهتری بر مشخصه‌های جریان دارد.

در شکل ۷ پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد در حضور سیم برای موقعیت‌های مختلف با بهترین حالت تأثیرگذاری بر روی مشخصه‌های جریان در سه ایستگاه دوم ارائه شده است.

نکته دیگر اینکه به موازات زیاد شدن فاصله از مدل، پهنای دنباله یا همان نصف دهانه در نصف عرض^۱ زیاد می‌شود و اختلاف بین سرعت در دنباله و سرعت در خارج از آن کوچک‌تر می‌گردد. این نکته در شکل ۷ مشخص است. 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 و در نتیجه جریان آزاد سعی بر مستهلک ساختن لایه برشی تحت نام دنباله را دارد.



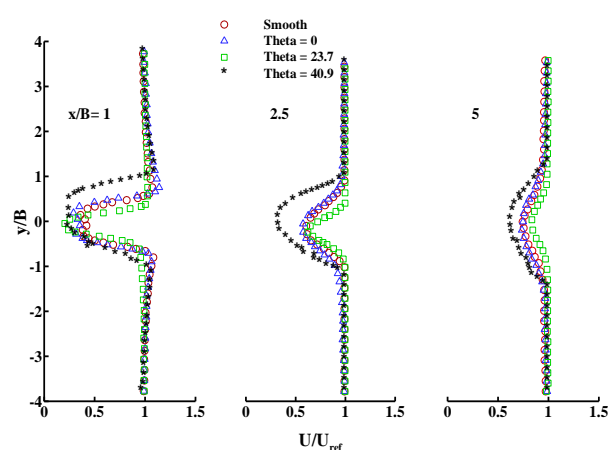
شکل (۷): توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه دوم در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰.

در رژیم زیربحرانی^۲، لایه مرزی در بالا و پایین سطح مدل دستخوش جدایش آرام است و سیم اغتشاش ساز تأثیر مهمی را در جریان نشان نمی‌دهد. لذا اکنون که جریان تحت تأثیر سیم با تغییر در مشخصات آن همراه است، می‌توان چنین

مکان دقیق الگوی D جریان را نشان داد. ولی چون اکثر نتایج باعث بهبود مشخصه‌های جریان شده‌اند، اغلب آزمایش‌ها در حوزه الگوی B جریان قرار دارند.

در شکل ۶، پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد در حضور سیم برای موقعیت‌های مختلف با بهترین حالت تأثیرگذاری بر روی مشخصه‌های جریان در سه ایستگاه اول ارائه شده است.

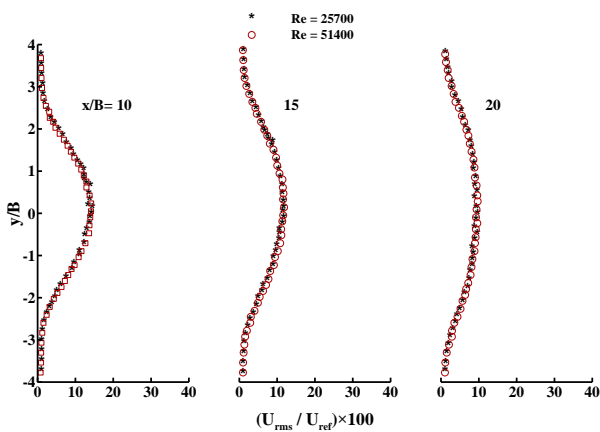
در شکل ۶، در بین پروفیل‌های سرعت متوسط بی‌بعد در ایستگاه $x/B=1$ مشاهده می‌شود که پیک سرعت در مقاطع نزدیک به مدل در پروفیل مربوط به سیلندر صاف، بیش‌تر از بقیه پروفیل‌های دیگر است. دلیل این است که لایه مرزی ایجاد شده بر روی سیلندر صاف دارای مقداری مومنتوم است که بعد از انحلال، این مومنتوم باعث افزایش انرژی نقاط مجاور و در نتیجه افزایش سرعت آن‌ها می‌شود. این مسئله در ایستگاه‌های دورتر در پشت مدل، اثر خود را از دست می‌دهد و لذا در پروفیل‌های سرعت ایستگاه‌های بعدی، پیک وجود ندارد. این در حالی است که برای حالت با سیم در موقعیت $\theta=23/7^\circ$ پیک خیلی کم‌تر شده است. لذا جریان در برخورد با سیم، مقداری از سرعت خود را از دست می‌دهد که این مسئله باعث هدررفت مومنتوم جریان می‌شود. در نتیجه می‌توان چنین استدلال کرد که ایجاد نقطه الحاق مجدد برای لایه مرزی باعث هدررفت مقداری از مومنتوم جریان در لایه مرزی می‌شود.



شکل (۶): توزیع پروفیل سرعت متوسط بی‌بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه اول در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰.

نکته دیگر اینکه هرگاه لایه مرزی بر روی سطح در نقطه‌ای دورتر از بالادست جریان جدا می‌شود، دنباله‌ای با عرض بزرگ-

1- Half width
2- Subcritical Regime



شکل (۹): توزیع شدت اغتشاش‌های بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه دوّم.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۸ مشخص است که در هر ایستگاه یک رفتار مشابه مشاهده می‌شود. از این لحاظ که اگر در ایستگاه $x/B=5$ هر دو پروفیل سرعت متوسط تقریباً بر هم منطبق شوند، 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 ۸ در دنباله در حال کاهش است. دلیل این امر تأثیر اضمحلال انرژی بر روی 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 قابل توجه دیگر 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 بر روی نقطه عطف پروفیل سرعت قرار می‌گیرد.

خط نقطه‌چین در شکل ۱۰ 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.

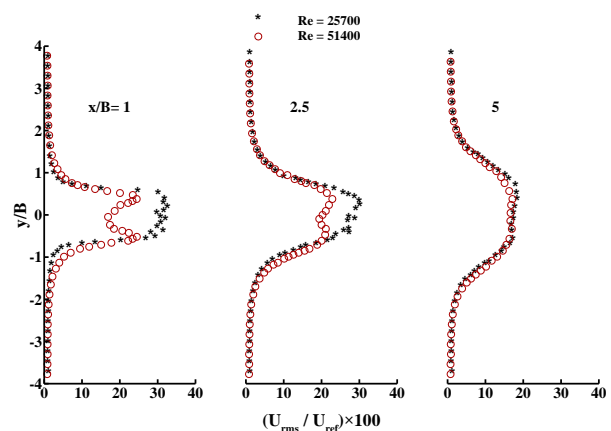
استدلال کرد که جریان از رژیم زیربحرانی گذر کرده و وارد رژیم بحرانی شده است [۲].

۲-۴- پروفیل شدت اغتشاش‌های بی‌بعد

پروفیل شدت اغتشاش‌ها برای دنباله پشت یک جسم، با ورود خطوط جریان آزاد به دنباله و تغییر به صورت خطوط جریان گردابه‌ای، تولید می‌شوند. پروفیل شدت اغتشاش‌ها به نقطه جدایش جریان و به تبع آن به قدرت گردابه‌های ایجادشده در پشت مدل وابسته است.

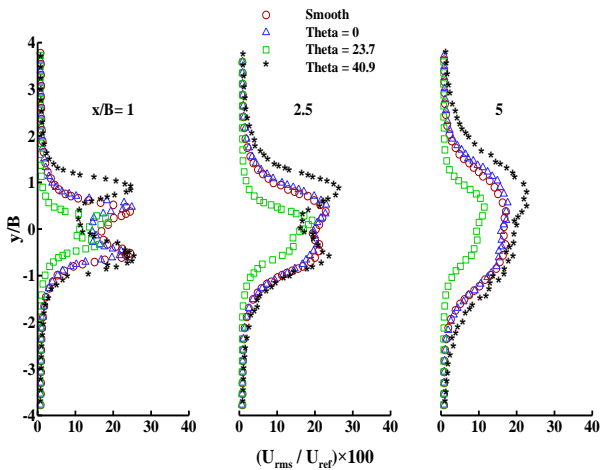
رابطه مستقیم اضمحلال انرژی با گرادین سرعت متوسط $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ و نیز با گرادین مؤلفه نوسانی سرعت $\frac{\partial u'}{\partial y}$ در شکل‌های ۸ و ۹ از این حقیقت حکایت دارد که دنباله جریان برای عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ رشد سریع‌تری از انحلال را داراست. از این رو از ایستگاه $x/B=5$ به بعد پروفیل‌های سرعت متوسط و اغتشاشی مربوط به عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ بر اثر اضمحلال به پروفیل‌های مربوط به عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ نزدیک شده و بر روی آن منطبق می‌شود. همچنین، با فاصله گرفتن از مدل، تغییر گرادین شدت اغتشاش‌های بی‌بعد با کاهش شدیدی همراه است.

در شکل ۸ دو اکستریم در پروفیل درصد شدت اغتشاش‌های بی‌بعد در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ در ایستگاه $x/B=1$ مشاهده می‌شود که با دور شدن از مدل، این دو اکستریم 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 می‌باشد.

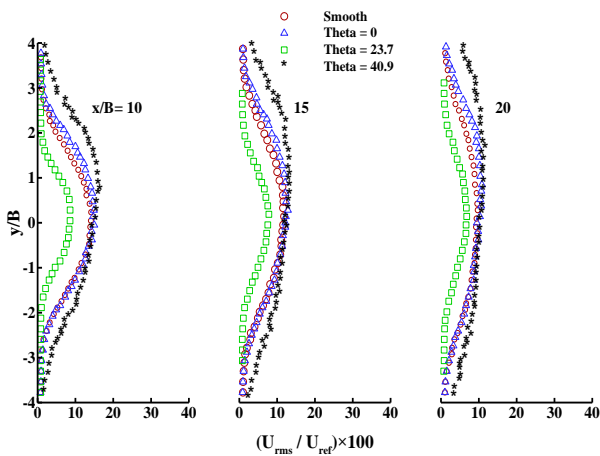


شکل (۸): توزیع شدت اغتشاش‌های بی‌بعد برای سیلندر بیضوی صاف در سه ایستگاه اوّل.

باید نقطه الحاق مجدد برای شکل‌گیری لایه‌مرزی در نقطه‌ای دورتر از پایین دست جریان رخ دهد که با توجه به شکل ۱۲ این مسئله برای موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ نسبت به دیگر موقعیت‌ها، بهتر اتفاق افتاده است. چرا که اختلاف سرعت یا همان نقصان سرعت در دنباله برای آن کم‌تر از بقیه موارد است.



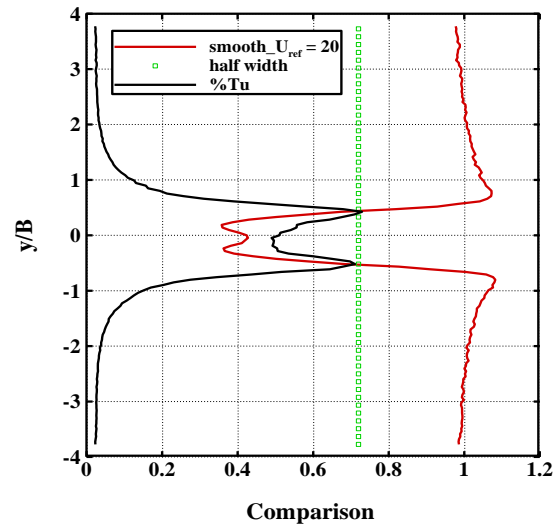
شکل (۱۱): توزیع شدت اغتشاش‌های بی‌بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه اول در عدد رینولدز $51,400$.



شکل (۱۲): توزیع شدت اغتشاش‌های بی‌بعد در موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه دوم در عدد رینولدز $51,400$.

همچنین، در شکل ۱۳ بیشینه شدت اغتشاش‌ها برای حالت‌های مختلف بر حسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری در عدد رینولدز $51,400$ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه شدت اغتشاش‌ها در موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ بسیار کم‌تر می‌باشد که باعث کاهش ضریب پسا می‌گردد.

در شکل‌های ۱۱ - ۱۲ پروفیل شدت اغتشاش‌های بی‌بعد در حضور سیم برای موقعیت‌های مختلف در سه ایستگاه اول و دوم ارائه شده است. همان‌طور که مشخص است، تأثیر سیم در موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ بیشتر از دیگر موارد، باعث کاهش عرض دنباله، کاهش نقصان سرعت و همچنین کاهش شدت اغتشاش‌های بی‌بعد جریان شده است.



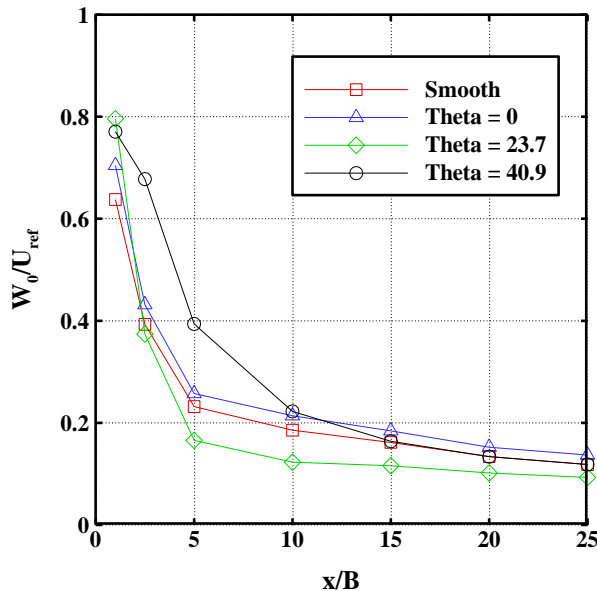
شکل (۱۰): تلاقی بیش‌ترین اغتشاش‌های جریان با نقطه عطف پروفیل سرعت متوسط.

در شکل‌های ۱۱ - ۱۲ مشخص است که عرض پروفیل اغتشاش‌ها برای سیلندر تحت تأثیر سیم در موقعیت $\theta = 40/9^\circ$ ، بسیار بیشتر از بقیه پروفیل‌های دیگر است. این مسئله به این دلیل است که نقطه جدایش برای این حالت در نقطه بالاتر از بالادست جریان رخ می‌دهد و 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 ۱۲ مشخص است، پروفیل اغتشاشی برای موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ از بقیه پروفیل‌های اغتشاشی دیگر خیلی کوچک‌تر است و دنباله مربوط به سیلندر تحت تأثیر سیم در این موقعیت، زودتر از حالت‌های دیگر برای بقیه موقعیت‌ها، در حال انحلال است. در واقع دنباله در این حالت عرض کم‌تری دارد که گردابه‌های آن نسبت به بقیه ضعیف‌تر بوده و لذا زودتر از دیگر حالت‌ها از بین می‌روند. درحالی‌که برای کوچک شدن عرض دنباله تحت تأثیر سیم اغتشاش ساز

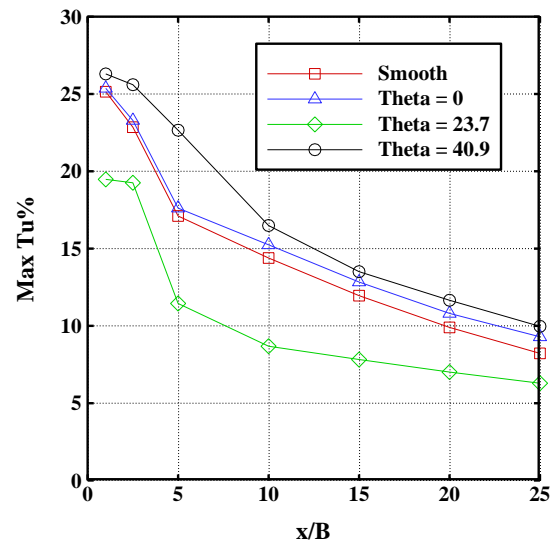
همان طور که از شکل ۱۴ مشخص است، شیب تغییرات پروفیل‌های نقصان سرعت از ایستگاه $x/B=5$ به بعد برای هر دو نمودار یکسان است و این دو نمودار بر هم منطبق‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که از این ایستگاه به بعد پروفیل‌های سرعت به هم بسیار نزدیک می‌شوند که این مهم در شکل ۴ مشخص است. از طرفی در دو ایستگاه قبل در شکل ۱۴ مشخص است که شیب تغییرات برای نمودار با عدد رینولدز $25,700$ بیشتر از شیب آن برای عدد رینولدز دیگر 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 ۵ - ۴ قابل تشخیص است که کم‌ترین مقدار مربوط به پروفیل سرعت برای عدد رینولدز $25,700$ در ایستگاه‌های دور از مدل بر دیگر پروفیل سرعت برای عدد رینولدز $51,400$ منطبق می‌شود.

در شکل ۱۵ پروفیل نقصان سرعت بی‌بعد برای حالت‌هایی که سیم بهترین تأثیر را در بین موقعیت‌های دیگر بر مشخصه‌های جریان دارد، نسبت به ایستگاه‌های داده‌برداری ارائه شده است.



شکل (۱۵): تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد برحسب

ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های مختلف در عدد رینولدز $51,400$.



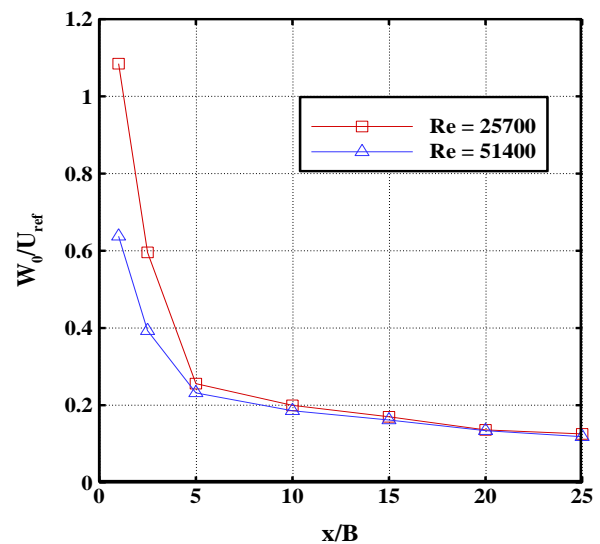
شکل (۱۳): بیشینه شدت اغتشاش‌ها بر حسب ایستگاه‌های اندازه‌گیری در عدد رینولدز $51,400$.

۳-۴- پروفیل نقصان سرعت بی‌بعد

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 پایین‌دست جریان، نرخ کاهش می‌دارد. این اختلاف سرعت را نقصان سرعت می‌نامند.

در شکل ۱۴ پروفیل‌های نقصان سرعت بی‌بعد برای سیلندر

بیضوی صاف برحسب ایستگاه‌های داده‌برداری ارائه شده‌اند.

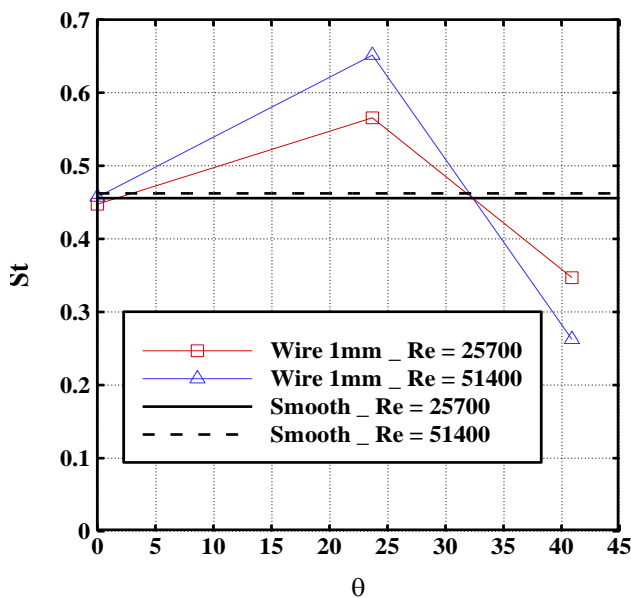


شکل (۱۴): تغییرات نقصان سرعت بی‌بعد برحسب

ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده برای سیلندر بیضوی صاف.

شکل‌گیری آن‌ها می‌شود، ادامه می‌یابد تا اینکه گردابه‌ها به اندازه کافی قدرتمند می‌شوند. خطوط جریان با ورود به دنباله، به یک ناحیه کم فشار سقوط می‌کنند که به دنبال آن گردابه‌های کم فشاری ایجاد می‌شود. این گردابه‌ها در طول دنباله بر اثر اتلاف انرژی به گردابه‌های کوچک‌تری شکسته شده و نهایتاً گردابه‌های کولموگروف^۲ ایجاد شده که مستقیماً بر اثر استهلاک به انرژی گرمایی تبدیل می‌شوند [۲۱].

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 و لذا آثار مخربی را می‌تواند به همراه داشته باشد. شکل ۱۶ تغییرات عدد استروهال را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶): تغییرات عدد استروهال بر حسب زاویه نصب سیم.

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، فرکانس ریزش گردابه‌ها برای سیلندر صاف در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ نسبت به عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ مقداری بیشتر است. این اختلاف آن‌قدر کم است که می‌توان چنین استدلال کرد که تغییر عدد رینولدز جریان، تأثیر چندانی بر روی عدد استروهال در سیلندر صاف ندارد.

همان‌طور که مشخص است، در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ برای زاویه نصب سیم در موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ نسبت به عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ عدد استروهال مقادیر بزرگ‌تری دارد. از طرفی سرعت

از طرفی به دلیل کم بودن اختلاف سرعت جریان آزاد با حداقل سرعت در دنباله برای پروفیل سرعت مربوط به موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ نسبت به بقیه موقعیت‌های دیگر، لازم است که در شکل ۱۵ برای این موقعیت یک افت شدید در نمودار نقصان سرعت رخ دهد تا منحنی در زیر دیگر منحنی‌ها قرار گیرد. دلیل این امر این است که گردابه‌های پشت مدل برای این حالت ضعیف‌تر از بقیه حالت‌های دیگر است و همچنین، نرخ اضمحلال برای ایستگاه‌های نزدیک به مدل به دلیل افت شدید در پشت مدل و نیز بالا بودن شیب پروفیل سرعت، بیش‌تر از دیگر ایستگاه‌ها می‌باشد. در نتیجه، با فاصله گرفتن از مدل، افت شدیدی در نمودار نقصان سرعت بی‌بعد برای پروفیل مربوط به این سیم رخ می‌دهد.

نکته دیگر این‌که هر قدر منحنی‌های نقصان سرعت به منحنی $1/x$ نزدیک شوند، شرایط بهینه‌تر خواهد بود. چراکه برای یک منحنی در حالت $1/x$ اختلاف سرعت در دنباله حداقل است. در نتیجه سرعت در دنباله حداکثر خواهد بود.

۴-۴- عدد استروهال

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

این پارامتر از مشخصه‌های جریان است و ارزیابی این پارامتر در کاربردهای مهندسی یک مسئله مهم به شمار می‌آید. 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 پهن^۱ 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 [۲۰].

رشد گردابه‌ها و همچنین استمرار و بقای چرخش آن‌ها، از لایه برشی دنباله و ورود خطوط جریان به دنباله که باعث

نوسان‌های جریان را مورد بررسی قرار داده و به نتیجه‌های مهمی دست یافته‌اند.

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

جزء اول مربوط به ترم فشار است:

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

جزء دوم مربوط به ترم مومنتم 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 ترم تنش رینولدز است:

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

از طرفی، به دلیل این که محاسبه دقیق فشار استاتیک در 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 این که مجموع فشار در امتداد خط جریان ثابت باشد، معادله ساده می‌شود. در نتیجه معادله اصلی ون‌دام به فرم نهایی زیر درمی‌آید:

$$C_d = 2 \int_w \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_{ref}}} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{q}}{q_{ref}}} \right) d\left(\frac{z}{L}\right) + \frac{1}{3} \int_w \frac{\bar{q}'}{q_{ref}} d\left(\frac{z}{L}\right), \quad (۸)$$

که در آن، $\bar{q}' = \rho(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2$ است که در فاصله‌ای دور از پایین دست، جریان همگن بوده و لذا $u' = v' = w'$ 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 می‌باشد.

روش اختلاف مومنتوم بر اساس فرض‌هایی که دارد، برای جریان دائمی کاربرد دارد و این روش برای جریان غیردائمی محدودیت داشته و با خطا همراه است.

از طرفی خان^۵ و همکاران [۲۴] در مقاله‌ای برای یک سیلندر بیضوی صاف نشان دادند که ضریب پسا اصطکاکی

متوسط در دنباله در این موقعیت برای نصب سیم، دارای بیش-ترین مقدار سرعت است که از بهینه‌ترین شرایط موجود حکایت دارد. لذا می‌توان چنین نتیجه گرفت که عدد استروهمال با مقدار بزرگ‌تر، مطلوب‌تر است. این در حالی است که برای زاویه نصب سیم در $\theta = 40/9^\circ$ برای عدد رینولدز $51,400$ ، مقدار عدد استروهمال کم‌تر از مقدار آن برای عدد رینولدز $25,700$ است.

۴-۵- بررسی ضریب پسا با استفاده از روش اختلاف مومنتوم^۱ معادله‌هایی که برای اندازه‌گیری نیروی پسا استفاده می‌شوند، به راحتی با اعمال قانون‌های مومنتوم و بقای جرم در یک حجم کنترل، قابل استخراج هستند.

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

لذا با به کارگیری سیم اغتشاش ساز و به تبع آن ایجاد نقطه الحاق مجدد، عرض دنباله کاهش یافته و در نتیجه فشار 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. ضریب پسا فشاری با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

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

نوع دیگر این نیرو را پسا اصطکاکی می‌نامند. پسا اصطکاکی به جهت نیروهای برشی ویسکوز در سطح سیلندر تولید می‌شود که نتیجه شکل‌گیری لایه‌مرزی بر سطح سیلندر می‌باشد. ضریب پسا اصطکاکی با رابطه زیر بیان می‌شود:

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

لو^۲ و براگ^۳ [۲۲] تحقیق‌های زیادی در بررسی عوامل مؤثر در محاسبه ضریب پسا داشته‌اند. همچنین، آن‌ها اثرات اغتشاش و

4- Van Dam
5- Khan

1- Wake-Survey
2- Lu
3- Bragg

به تبع آن اختلاف فشار برای مدل کاهش می‌یابد. این درحالی 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. چراکه طبق تحقیق خان، مقدار $p_1 - p_2$ برابر اختلاف فشار در سطوح بالادست و پایین دست جریان در سیلندر بیضی است. پس طبق رابطه (۵) همین امر موجب کاهش ضریب پسا می‌شود.

مقدار ضریب پسا برای عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ برابر مقدار ۰/۶۲ و برای عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ برابر ۰/۵۸ می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، مقدار ضریب پسا برای موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ نسبت به همه موقعیت‌های دیگر کم‌تر است. اگر به نمودارهای سرعت در شکل‌های ۶ و ۷ مراجعه شود، مشخص است که سرعت در دنباله برای این موقعیت بیش‌تر از بقیه موارد دیگر است. از طرفی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشخص است که میزان اغتشاش نیز برای این موقعیت کم‌تر از بقیه موارد است. نتیجه نهایی این که هرچند با کوچک شدن عرض دنباله، مقدار فشار در پشت مدل افزایش یافته و لذا اختلاف فشار بهبود می‌یابد که به تبع آن پسای فشاری کم می‌شود، همچنین، می‌توان چنین استدلال کرد که بهبود شرایط برای ضریب پسا با کاهش میزان اغتشاش‌های جریان همراه است.

در واقع، در مواقعی که جریان توسط یک عامل خارجی مانند سیم اغتشاش ساز دست‌خوش جدایش قرار می‌گیرد، برای جریانی که جدایش در آن دیرتر از بقیه موارد رخ می‌دهد، عرض دنباله کم‌تر، مقدار سرعت متوسط در آن بیش‌تر و میزان اغتشاش در آن کم‌تر خواهد بود. همچنین گردابه‌ای که شکل می‌گیرد، کوچک‌تر است. لذا کاهش ضریب پسا رابطه‌ای مستقیم با مقدار سرعت متوسط و همچنین اغتشاش‌های جریان دارد.

نهایتاً با مقایسه بین شکل‌های ۱۶ و ۱۸ می‌توان دریافت که کاهش ضریب پسا با افزایش عدد استروهل رابطه مستقیم دارد. همان‌طور که مشخص است، برای موقعیت $\theta = 23/7^\circ$ ضریب پسا کم‌ترین مقدار را دارد، درحالی‌که در همین موقعیت برای عدد استروهل بیش‌ترین مقدار مشاهده می‌شود.

برای نسبت محورهای مختلف $\varepsilon = b/a$ که در آن b نصف قطر کوچک بیضی و a نیز نصف قطر بزرگ بیضی می‌باشد، به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$C_{Df} = \frac{1.353 + 4.43\varepsilon^{1.35}}{\sqrt{Re_L}}, \quad (9-الف)$$

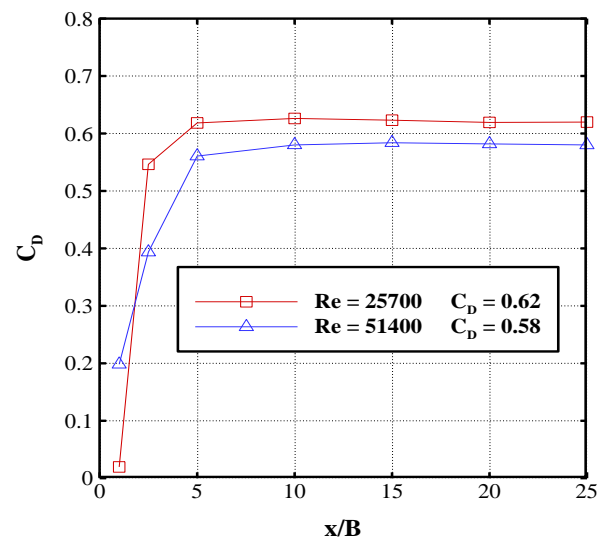
که در آن، $Re_L = \frac{LU_{ref}}{\nu}$ همان عدد رینولدز است که در آن L برابر قطر بزرگ بیضی $2a$ می‌باشد. از طرفی ضریب پسا فشاری نیز به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$C_{Dp} = \left(1.1526 + 1.26/Re_L\right) \varepsilon^{0.95}, \quad (9-ب)$$

که در نهایت، ضریب پسا کل برابر مجموع ضریب پسا فشاری و ضریب پسا اصطکاکی خواهد بود که به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$C_D = \frac{1.353 + 4.43\varepsilon^{1.35}}{\sqrt{Re_L}} + \left(1.1526 + 1.26/Re_L\right) \varepsilon^{0.95}. \quad (10)$$

در مطالعه حاضر ضریب پسا با استفاده از رابطه ۸ و با فرض شدت اغتشاش‌های همگن در ایستگاه $x/B = 25$ محاسبه شده است. در شکل ۱۷، تغییرات ضریب پسا برای سیلندر صاف را برحسب x/B نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تغییرات ضریب پسا برای سیلندر بیضی صاف برحسب x/B .

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، ضریب پسا برای عدد رینولدز ۲۵,۷۰۰ نسبت به عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰ مقداری بیشتر است. این مسئله به این دلیل است که هرچه جدایش جریان دیرتر اتفاق بی‌افتد، عرض دنباله کم‌تر شده و لذا به دلیل کم شدن فضای دنباله، فشار پشت مدل افزایش یافته و

جدول ۱ تغییرات ضریب پسا برای موقعیت‌های مختلف از تأثیر سیم بر مشخصه‌های جریان را نشان می‌دهد. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که بهترین حالت ممکن برای زاویه نصب سیم اغتشاش ساز با قطر ۱ میلی‌متر باید در بازه نصب $23.7^\circ \leq \theta \leq 40.9^\circ$ باشد.

جدول (۱): نتایج کاهش یا افزایش ضریب پسا در موقعیت‌های مختلف.

ردیف	زاویه نصب	ضریب پسا	درصد تغییرات
۱	$\theta = 0^\circ$	۰/۵۲	کاهش ۱۰/۳٪
۲	$\theta = 23.7^\circ$	۰/۲۵	کاهش ۵۶/۹٪
۳	$\theta = 40.9^\circ$	۰/۷	افزایش ۲۰/۶٪

۴-۶- اصلاح پروفیل نقصان سرعت شلختینگ^۳

شلختینگ [۲۶] برای دنباله اجسام دوبعدی برای ایستگاه‌هایی دور که در آن‌ها فشار استاتیک دنباله با مقدار آن در بیرون از دنباله برابر است، رابطه‌ای را بیان کرد که می‌توان بر اساس آن برای پروفیل سرعت، معادله‌ای برحسب نقصان سرعت نسبت به نصف دهانه در نصف عرض به دست آورد.

مشکل اساسی این معادله، ناتوان بودن آن برای ایستگاه‌های نزدیک به مدل است که در این صورت قابلیت استفاده ندارد.

در اینجا با افزودن دو ضریب به معادله، می‌توان آن را چنان بهینه کرد که برای هر ایستگاهی معادله مزبور با تقریب بسیار خوبی به دست آید که به صورت زیر بیان می‌شود:

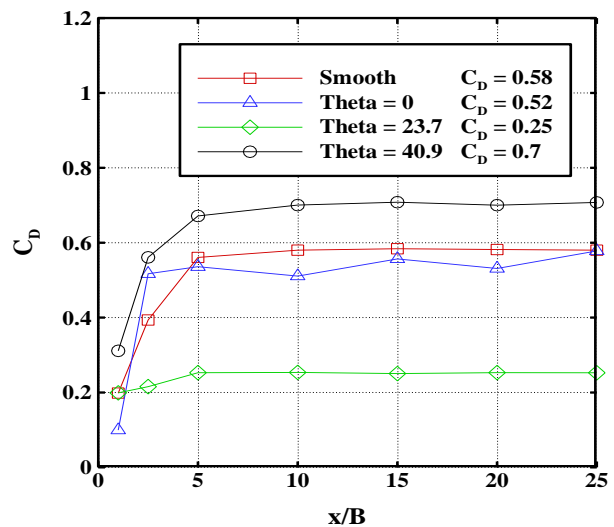
$$\frac{U_{ref} - u}{U_{ref}} = \frac{S_1}{18b_{1/2}} (10C_D d) \left(1 - \left(\frac{S_2 Y}{b_{1/2}} \right)^{3/2} \right)^2, \quad (11)$$

که در آن، d قطر بزرگ بیضی است. در معادله بالا ضریب تصحیح S_1 پروفیل سرعت را در جهت Y و ضریب تصحیح S_2 پروفیل سرعت را در جهت X تغییر می‌دهد. در این بین ضریب S_n به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_n = \frac{aC_D d}{X} \quad n = 1, 2, \quad (12)$$

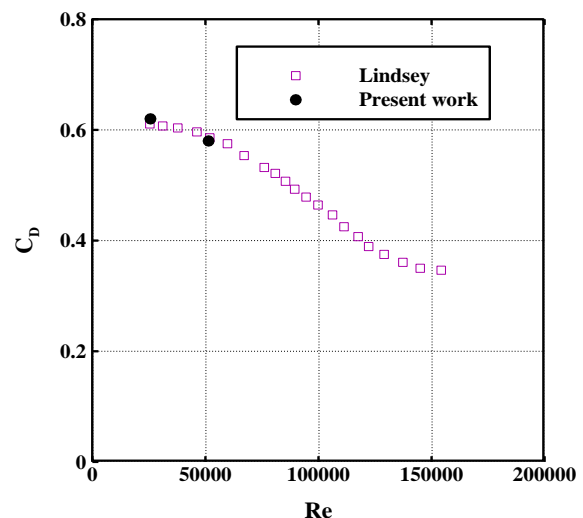
که در آن، ضریب a بسته به نوع سیم، موقعیت آن و شرایط موجود قابل تغییر است.

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین نتیجه کار حاضر با رابطه شلختینگ [۲۶] وجود دارد. لازم



شکل (۱۸): تغییرات ضریب پسا در موقعیت‌های مختلف برحسب x/B در عدد رینولدز ۵۱,۴۰۰.

لیندسی^۱ [۲۵] در سازمان ناسا^۲ به صورت تجربی مجموعه‌ای از تحقیقات جامع را بر 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 می‌باشد. از آنجاکه تاکنون هیچ تحقیقی در زمینه تأثیر سیم اغتشاش ساز در انتقال لایه مرزی بر روی سیلندر بیضوی انجام نشده است، لذا طبق شکل ۱۹ فقط اعتبارسنجی برای داده‌های مربوط به سیلندر بیضوی صاف ممکن بود.



شکل (۱۹): تغییرات ضریب پسا برحسب رینولدز برای سیلندر بیضوی صاف.

1- Lindsey

2- NASA

نتایج نشان می‌دهند که در سیلندر صاف با افزایش عدد رینولدز جریان، مقدار ضریب پسا کاهش و برای عدد استروهمال اندکی افزایش یافته است.

همچنین، برای دستیابی به مقدار صحیح ضریب پسا باید مکان‌های داده‌برداری در نقاطی دور از مدل انتخاب شود تا جریان تا حد امکان همگن شود.

نتایج نشان می‌دهند 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 استروهمال با کاهش ضریب پسا رابطه مستقیم دارد. لذا کاهش اغتشاش‌های جریان که با افزایش سرعت متوسط در دنباله متناسب است، باعث افزایش عدد استروهمال می‌شود.

مقدار عدد استروهمال برای نصب سیم در زاویه $40/9$ درجه در هر دو عدد رینولدز، کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. لذا باید عرض دنباله جریان بزرگ‌تر از مقدار آن نسبت به سیلندر صاف باشد. این مهم از آنجا تایید می‌شود که در حالت ذکر شده نسبت به سیلندر صاف، اغتشاش‌های جریان بیش‌تر و سرعت متوسط در دنباله کم‌تر است.

نکته دیگر این که کاهش ضریب پسا با افزایش عدد ناسلت جریان رابطه مستقیم دارد. لذا نتایج این آزمایش برای بهینه‌سازی یک مبدل حرارتی که برای بهینه شدن آن، لوله‌های را به شکل سیلندر بیضوی طراحی می‌کنند، می‌تواند مفید واقع شود.

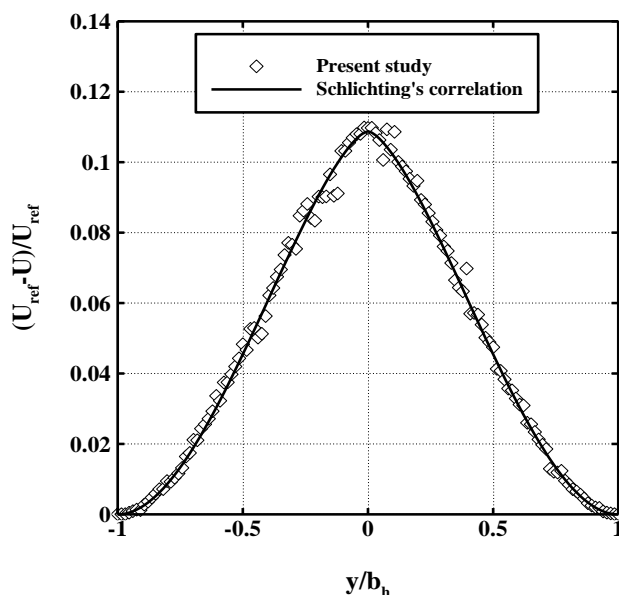
۶- مراجع

1. Igarashi, T., "Effect of Vortex Generators on the Flow around a Circular Cylinder Normal to an Airstream", Int. J. Bulletin of JSME, Vol. 28, No. 236, pp. 274-282, 1985.
2. Behara, S. and Mittal, S., "Transition of the Boundary Layer on a Circular Cylinder in the Presence of a Trip", Int. J. Journal of Fluids and Structures, Vol. 27, No. 5, pp. 702-715, 2011.
3. Zhou, C., Wang, L., and Huang, W., "Numerical Study of Fluid Force Reduction on a Circular Cylinder, Using Tripping Rods", Int. Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 21, No. 9, pp. 1425-1434, 2007.
4. Missirlis, D., Yakinthos, K., Palikaras, A., Katheder, K., and Goulas, A., "Experimental and Numerical Investigation of the Flow Field Through a Heat Exchanger for Aero-Engine Applications", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 26, No. 3, pp. 440-458, 2005.

به ذکر است که نتایج در ایستگاه $x/B=20$ با رابطه شلختینگ مقایسه شده است.

معادله به‌دست‌آمده از رابطه (۱۱) برای پروفیل شکل ۲۰ به صورت زیر به‌دست آمده است:

$$\frac{U_{ref} - u}{U_{ref}} = 0.365 \left(1 - \left(0.692 \frac{y}{b_{1/2}} \right)^{3/2} \right)^2 \quad (13)$$



شکل (۲۰): مقایسه‌ی پروفیل سرعت دنباله برای مطالعه حاضر و رابطه‌ی شلختینگ [۲۶].

مقادیر a در رابطه بالا به ترتیب برای S_1 برابر ۷۵۰ و برای S_2 برابر ۳۷ به دست آمده است.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر روی ویژگی‌های دنباله جریان اطراف یک سیلندر بیضوی صاف با زاویه حمله صفر درجه پرداخته شد. در این پژوهش به‌منظور ایجاد جریان هوا از یک تونل باد مدارباز و دمنده استفاده شد. همچنین ایستگاه‌های داده‌برداری در ۷ موقعیت طولی مختلف انتخاب شدند.

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

15. Paul, I., Arul Prakash, K., and Vengadesan, S., "Numerical Analysis of Laminar Fluid Flow Characteristics Past an Elliptic Cylinder: A Parametric Study", *Int. J. Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 24, No. 7, pp. 1570-1594, 2014.
16. Perumal, D.A., VS Kumar, G., and Dass, A.K., "Lattice Boltzmann Simulation of Viscous Flow Past Elliptical Cylinder", *Int. J. CFD Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 127-139, 2012.
17. Alonso, G., Meseguer, J., Sanz-Andrés, A., and Valero, E., "On the Galloping Instability of Two-Dimensional Bodies Having Elliptical Cross-Sections", *Int. J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 98, No. 8, pp. 438-448, 2010.
18. Flynn, M.R. and Eisner, A.D., "Verification and Validation Studies of the Time-averaged Velocity Field in the Very Near-Wake of a Finite Elliptical Cylinder", *Int. J. Fluid Dynamics Research*, Vol. 34, No. 4, pp. 273-288, 2004.
19. Alam, M.M., Sakamoto, H., and Moriya, M., "Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Circular Cylinder and Two Circular Cylinders, Using Tripping Rods", *Int. J. Fluids and Structures*, Vol. 18, No. 3, pp. 347-366, 2003.
20. Lotfollahi Yaghin, M.A. and Mojtahedi, A., "Hydrodynamic Parameter of Flow around a Cylindrical Pile and Its Numerical and Experimental Modeling", *Int. Journal of Marine Engineering*, Vol. 5, No. 10, pp. 97-104, 2010.
21. Sanieaieghad, M., "Foundations and Modeling of Turbulent Flows", Daneshnegar, Tehran, 2009.
22. Lu, B. and Bragg, M.B., "Experimental Investigation of the Wake-Survey Method for a Bluff Body with Highly Turbulent Wake", *AIAA-3060*, 2002.
23. Van Dam, C. P., "Recent Experience with Different Methods of Drag Prediction", *Int. J. Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 35, No. 8, pp. 751-798, 1999.
24. Khan, W.A., Culham, R.J., and Yovanovich, M.M., "Fluid Flow around and Heat Transfer from Elliptical Cylinders: Analytical Approach", *Int. J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 19, No. 2, pp. 178-185, 2005.
25. Lindsey, W., "Drag of Cylinders of Simple Shapes", Citeseer, NACA Report No. 619, 1938.
26. Schlichting, H., "Boundary-Layer Theory", Springer Science & Business Media, 2003.
5. Hover, F., Tvedt, H., and Triantafyllou, M., "Vortex-Induced Vibrations of a Cylinder with Tripping Wires", *Int. J. Fluid Mechanics*, Vol. 448, pp. 175-195, 2001.
6. Aiba, S., Ota, T., and Tsuchida, H., "Heat Transfer and Flow around a Circular Cylinder with Tripping-Wires", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 12, No. 3, pp. 221-231, 1979.
7. Ezadi Yazdi, M.J., and Bak Khoshnevis, A., "Experimental Investigation of the Characteristics of the Wake of a Rotating Circular Cylinder at Different Reynolds Numbers and Speed Ratios", *J. Fluid Mechanics & Aerodynamics*, Vol. 4, No. 1, pp. 51-64, 2016 (In persion).
8. Ezadi Yazdi, M. J., and Bak Khoshnevis, A., "Experimental Investigation of the Effect of Reducing the Drag Coefficient on the Cylinder by Hot-Wire Anemometry", *J. Mechanical Engineering*, Vol. 46, No. 2, pp. 19-30, 2016 (In persion).
9. Ezadi Yazdi, M.J., Bak Khoshnevis, A., and Gholiepour Asrami, E., "Introducing New Relationship Between High-order Moments in the Turbulent Plain Wake behind a Circular Cylinder", *J. Mechanical Engineering*, Vol. 45, No. 3, pp. 39-49, 2015 (In persion).
10. Raman, S.K., Prakash, K.A., and Vengadesan, S., "Effect of Axis Ratio on Fluid Flow around an Elliptic Cylinder-A Numerical Study", *Int. J. Fluids Engineering*, Vol. 135, No. 11, pp. 111-201, 2013.
11. Ota, T., Nishiyama, H., and Taoka, Y., "Flow around an Elliptic Cylinder in the Critical Reynolds Number Regime", *Int. J. Fluids Engineering*, Vol. 109, No. 2, pp. 149-155, 1987.
12. Ezadi Yazdi, M.J., Safavi Rad, A., and Bak Khoshnevis, A., " Experimental Investigation of Mean Velocity Profiles and Turbulence Intensities Around an Elliptic Cylinder in Different Reynolds Numbers", *The 1st International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering*, Tehran University, Tehran, 2016.
13. Ezadi Yazdi, M.J., Bak Khoshnevis, A., Nazari, S., and Neshat, A.R., " Experimental Investigation of Flow Past an Elliptic Cylinder near a Plane wall", *24th Annual International Conference on The Mechanical Engineering*, ISME2016, Yazd University, Yazd, Iran, 2016.
14. Ezadi Yazdi, M.J. and Bak Khoshnevis, A., "Experimental Investigation of Flow Characteristics around an Elliptic Cylinder near a Flat Plate", *J. Fluid Mechanics & Aerodynamics*, Vol. 4, No. 2, pp. 19-35, 2016 (In persion).