

بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز بر روی مشخصه‌های دنباله یک ایرفویل متقارن با استوانه دایره‌ای و مقایسه آنها

عبدالامیر بک خوشنویس*

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

مهدی کرمی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر نصب سیم اغتشاش ساز بر روی پارامترهای جریان دنباله ایرفویل و استوانه اعم از سرعت متوسط و شدت اغتشاشات، در عدد رینولدز ۳۷۸۰ برای ایرفویل و عدد رینولدز ۳۰۰۰۰ برای استوانه به صورت تجربی بررسی شده است. قطر سیم‌های استفاده شده برابر ۱/۵، ۱/۵، ۱/۵ mm می‌باشد. سیم در بیشینه ضخامت ایرفویل NACA0012 و در استوانه دایره‌ای در زوایای $\alpha = 40, 140$ درجه نصب گردیده، و قطر آن برای به دست آوردن جریان‌های اغتشاشی مختلف تغییر کرده است. این مطالعه نشان می‌دهد عرض و اوج پروفیل‌های سرعت، با افزایش قطر سیم افزایش یافته است. جریان خارج از ناحیه دنباله، برای تمامی موارد تقریباً یکسان می‌باشد. نرخ تغییرات سرعت و اغتشاشات دنباله استوانه و ایرفویل با هم مقایسه شده است. معلوم شد که ضریب پسا با افزایش قطر سیم در ایرفویل افزایش و در استوانه بسته به قطر سیم روند کاهشی، افزایشی و کاهشی را طی کرده است. برای استوانه در $Re = 30000$ ، حالت بهینه‌ای وجود دارد که در آن ضریب پسای عامل بر روی استوانه به مقداری کمتر از ضریب پسای استوانه صاف می‌رسد. همچنین آزمایشات نشان می‌دهد مقادیر اوج پروفیل اغتشاشات و کاهش سرعت در استوانه با سیم اغتشاش ساز در مقایسه با یک استوانه صاف عموماً کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: جریان سنج سیم داغ، سیم اغتشاش ساز، دنباله، ایرفویل NACA0012، استوانه دایره‌ای.

An Experimental and Comparative Investigation of the Effect of Turbulence Wire Tripping on the Wake Characteristics of an Asymmetric Airfoil with Circular Cylinder

A. B. Khoshnevis
M. Karami

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

Abstract

This study empirically investigates the effect of turbulence promoter wire installation on the flow parameters of airfoil wake and wake flow characteristics such as average velocity and the turbulence intensity in the Reynolds number 3780 for airfoil and Reynolds number 30000 for the cylinder. The diameter of the wires was 1, 1.5, and .5 mm. The wire was installed with in the airfoil thickness of NACA0012 and in the circular cylinder $\alpha=140.40$ angle. The diameter of the wire has changed to obtain different turbulence flow. The current study shows the width and height of the velocity profiles have increased with an increase in the diameter. The outflow of the wake area was the same for all of the parameters. The rate of change of velocity and the turbulence of cylinder and the airfoil has been compared. The results showed that the drag coefficient has increased with an increase in the diameter of the wire in airfoil, and the cylinder has changed depending on the wire diameter. For the cylinder in $Re=30000$, there is an optimal state in which the active drag coefficient on the cylinder reaches to the lower value of the cylinder coefficient drag. The experiments show that the values of the height profile of turbulence and the decrease of velocity in the cylinder wires have been decreased in comparison with that of a flat cylinder.

Keyword: Hot wire flow meter, turbulence promoter, NACA0012 Airfoil, circular cylinder.

۱-مقدمه

هنوز با طراحی عملی فاصله دارد، از روش های تجربی استفاده می کنند که یکی از این روش ها تونل باد است که اغلب تنها روشی است که برای تعیین درست پارامترهای جریان به ویژه پسای مدل ها به کار می رود [۱].

عوامل متعددی بر مشخصه های دنباله تاثیر گذار هستند که از آن جمله می توان عدد رینولدز [۲] نسبت انسداد [۳] زبری سطح [۴] و ... را نام برد که در این تحقیق دنباله ایرفویل متقارن و استوانه دایره ای با توجه به نصب سیم اغتشاش ساز بررسی شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده است. از نتایج بررسی این تحقیق می توان در طراحی آیرودینامیک هواپیما استفاده نمود. برای کنترل جریان عبوری از روی استوانه و دنباله آن می توان از روش های مختلفی همانند تغییرات سطحی استوانه همچون نصب فین، ایجاد شیار روی سطح و یا

مطالعه جریان دارای اصطکاک و تراکم ناپذیر حول ایرفویل از مسائل کلاسیک و مهم مکانیک سیالات بشمار می آید. جریان روی استوانه به صورت عملی با بسیاری از کاربردهای مهندسی همچون وسایل نقلیه، پل ها و ساختمان ها و سایر ساختارهای مهندسی درگیر می باشد. دنباله جریان استوانه می تواند باعث نیروهای ناپایایی گردد که توانایی زیادی برای تخریب تمام ساختارهای بدنه ای دارد. علت تحقیقات بر روی این گونه پیکر بندی ناشی از علاقه به فهم بارهای روی ساختارها با توجه به حرکت سیال و کنترل بیشتر جریان سیال برای کاهش نیروی سیالی که سبب تخریب ساختارها تحت شرایط نامطلوب می گردد، می باشد. از آنجایی که روش های نظری و محاسباتی

استفاده از یک صفحه نازک که در موقعیت جریان بالا دستی استوانه نصب می‌گردد استفاده نمود.

ژانگ و لیگرانی [۴] اثرات زبری و اغتشاشات ورودی را بر روی دنباله ایرفویل در سرعت‌های مادون صوت به صورت تجربی مطالعه نمودند، و نتیجه گرفتند.

تایمر و رویج [۵] در تونل باد، به بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز نصب شده روی دماغه ایرفویل DU 93-W-210 پرداختند.

فرودنویچ و همکاران [۶] توسط تونل باد و روش‌های عددی به بررسی اثرات زبری و رینولدز در محدوده $10^6 \times 10 - 10^7$ ، روی ایرفویل DU97-300 که کاربرد در توربین‌های بادی دارد، پرداختند.

فکودوم و همکاران [۷] با استفاده از سیم اغتشاش‌ساز به بررسی کارایی ایرفویل متقارن NACA0018 پرداختند. آنها با نصب سیم مورد نظر در دماغه ایرفویل، نشان دادند که استفاده از سیم اغتشاش‌ساز، ضریب برآ را در زوایای حمله بزرگتر، افزایش می‌دهد، هابر و مولر [۸] نیز در آزمایشات خود نشان دادند که اثرات سیم اغتشاش‌ساز در موقعیت بیشینه ضخامت ایرفویل و رتمن FX 63-137، تأثیرات مضر برای بیشینه برآ را محدود می‌کند. آنها نشان دادند قرار گرفتن سیم در این موقعیت می‌تواند منجر به کاهش ضریب پسای مینیمم شود.

خوشنویس [۹] در سال ۲۰۰۳ به بررسی دنباله یک ایرفویل متقارن درون یک کانال دیفیوزر مستقیم و کانال دیفیوزر خمیده پرداخت. ایرفویل مجهز به سیم اغتشاش‌ساز بوده است. نتایج حاصله از این پژوهش نشان می‌دهد که گرادیان فشار معکوس، شدت استهلاک تفاضل سرعت در دنباله را کاهش می‌دهد.

خوشنویس و پدرام [۱۰] اثر نصب سیم اغتشاش‌ساز بر روی پارامترهای دنباله ایرفویل NACA0012 را در رینولدز ۳۷۸۰ بررسی نمود و نتیجه گرفتن که با افزایش قطر سیم اغتشاش‌ساز عرض و کمینه پروفیل‌های سرعت افزایش و همچنین ضریب پسای نیز افزایش می‌یابد.

مطالعات اساسی توسط فیگ و ورسیب [۱۱] بر روی استوانه با سیم اغتشاش‌ساز انجام شده است. آنها دو سیم اغتشاش‌ساز در موقعیت زاویه‌ای ۶۵ درجه را به صورت متقارن بر روی سطح سیلندر قرار دادند و تأثیر سیم اغتشاش‌ساز را بر روی کاهش نیروی پسا در بازه انتقال رینولدز بررسی کردند. جیمز و ترونک [۱۲] و همچنین ایگرانی [۱۳] تحقیق آزمایشگاهی را بر روی اثرات قطرهای مختلف و موقعیت‌های مختلف سیم اغتشاش‌ساز برای جریان عبوری از روی استوانه دایره‌ای در بازه رینولدز $10^4 - 10^5$ با قطر سیم اغتشاش‌ساز $3\% D - 6\%$ بررسی کردند.

نبریسکا و بیتیل [۱۴] تأثیر سیم اغتشاش‌ساز نصب شده در زاویه $0 - 180^\circ$ را بر روی استوانه با بررسی مشخصه‌های جریان، ضریب پسا، برآ و همچنین عدد استروهال، بررسی کردند.

اسحاقی و همکاران [۱۵] به بررسی تجربی اثرات پروفیل سرعت جریان هوا روی سیم‌ها و کابل‌های خطوط نیرو پرداخته‌اند. افزایش اغتشاشات و مومنتوم جریان به دلیل وجود سیم روی کابل سبب می‌شود که عدد رینولدز بحرانی و در نتیجه افت ناگهانی ضریب پسا در رینولدزهای کمتری اتفاق بیفتد.

هاور و همکاران [۱۶] یک سری مطالعاتی را بر روی اثرات برآمدگی و اتصالات روی استوانه تحت عنوان سیم اغتشاش‌ساز، متصل شده بر استوانه صاف را در یک جریان پایا بررسی نمودند. در این تحقیق در رینولدز حدود ۴۶۰۰۰ تأثیر سیم‌ها بر مشخصات دنباله، بارهای ناشی از گردابه‌ها و همچنین ارتعاشات بررسی شده است. آنها دریافتند که برای یک استوانه ثابت اثرات سیم اغتشاش‌ساز باعث کاهش چشمگیر نیروی برآ و نیروی پسا می‌گردد.

الام و همکارانش [۱۷] یک تحقیق تجربی بر تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر روی نیروهای وارده از طرف سیال بر روی استوانه را بررسی نمودند. ژو و همکارانش [۱۸] یک تحقیق عددی در این زمینه انجام دادند. آنها مطالعه عددی خود را برای دو سری عدد رینولدز با یکدیگر مقایسه و مشاهده کردند که با افزایش رینولدز زاویه بهینه نصب سیم اغتشاش‌ساز برای کاهش ضریب پسا به طرف نقطه سکون جریان حول استوانه حرکت می‌کند. در تحقیق دیگر که ایبا و همکاران [۱۹] انجام دادند، اثرات سیم اغتشاش‌ساز را بر روی انتقال حرارت یک استوانه بررسی نمودند. سیم به صورت ثابت بر روی استوانه نصب شده و جریان سیال با رینولدزهای مختلف از روی استوانه عبور داده شده است. انتقال حرارت از استوانه با عرض دنباله استوانه ارتباط تنگاتنگی دارد.

تیگو و چیریستوفی در سال ۲۰۱۲ [۲۰] نشان می‌دهند که در زاویه ۵۷ درجه روی استوانه موقعیت بحرانی برای سیم اغتشاش‌ساز وجود دارد که ساختار فرکانسی دنباله استوانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که سیم اغتشاش‌ساز جدایش را به تأخیر انداخته روی روند گردابه‌ها تأثیر و نصب سیم‌ها در زوایای مختلف نتایج کاملاً متفاوتی در به وجود آوردن گردابه دارد.

محبوب‌الما و همکاران [۲۱] با نصب سیم سیم اغتشاش‌ساز در بازه زاویه‌ای مشخص به صورت متقارن بر روی استوانه به بررسی پارامترهای جریان پرداختند.

هدف این تحقیق بررسی اثرات نصب سیم اغتشاش‌ساز و همچنین قطر آن بر روی مشخصه‌های دنباله ایرفویل متقارن و استوانه دایره‌ای می‌باشد، به گونه‌ای که روند تغییر پروفیل‌های سرعت و اغتشاشات ایرفویل و استوانه با هم مقایسه و در نهایت ضریب پسا برای دو مدل با وجود سیم اغتشاش‌ساز محاسبه و با ایرفویل و استوانه صاف مقایسه می‌گردد. این تحقیق اطلاعات جدیدی را در مورد روند تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر روی دنباله ایرفویل NACA0012 و استوانه دایره‌ای جمع‌آوری و با هم مقایسه کرده است. همچنین معادلات دنباله ایرفویل و استوانه مطرح شده و ضرایب این معادلات بررسی می‌گردد. در انتها سعی بر آن است که دلیل کاهش ضریب پسا در استوانه برای قطرهای مختلف سیم اغتشاش‌ساز بررسی و تحلیل گردد.

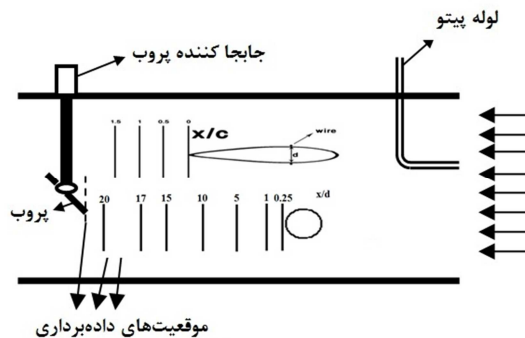
۲- تجهیزات آزمایشگاهی

تمام آزمایش‌های این تحقیق در آزمایشگاه تونل باد انجام شده است. تونل باد این آزمایش از نوع مدار باز و دمشی بوده که دارای اتاقک آزمایشی از جنس پلکسی گلاس با طول ۱۶۸ cm عرض ۴۰ cm و ارتفاع ۴۰ cm می‌باشد. شکل (۱) نمای تونل باد دمشی را نشان می‌دهد. سرعت تونل باد را با کنترل دور فن تعبیه شده در آن می‌توان از

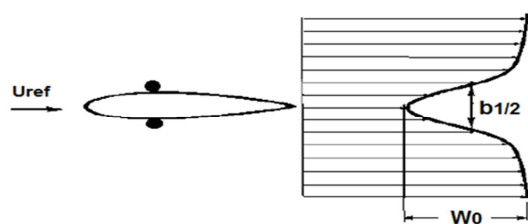
پارامتر کاهش سرعت^۱ W_0 و نصف دنباله در نصف عرض^۲ $b_{1/2}$ در شکل (۳) نشان داده شده است. پارامتر کاهش سرعت و شدت اغتشاشات از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$w_0 = \frac{U_{\infty} - U_{min}}{U_{\infty}} \quad (۱-۳)$$

$$\%Tu = \frac{\sqrt{U_{\infty}^2}}{U_{\infty}} \times 100 \quad (۲-۳)$$



شکل ۲- طرح‌های از نحوه‌ی داده برداری و ثبت داده‌ها برای استوانه و ایرفویل در اتاقک آزمایش تونل باد. (ایرفویل و استوانه هرکدام به صورت جداگانه در اتاقک آزمایش قرار می‌گیرند)

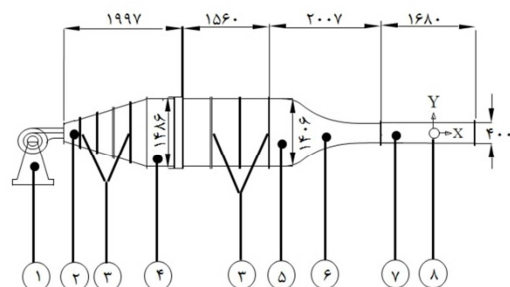


شکل ۳- پارامتر کاهش سرعت W_0 و نصف دهانه دنباله در نصف عرض $b_{1/2}$

آزمایشات در چهار مرحله انجام شده است که بدین صورت است: مرحله‌ی اول نصب ایرفویل و استوانه بدون سیم اغتشاش ساز در اتاقک آزمایش است. سرعت جریان آزاد تنظیم شده 20 m/s می‌باشد. با توجه به شکل (۴) می‌توان فهمید به علت تقارن ایرفویل و استوانه سرعت در خارج از دنباله متقارن و ایرفویل و استوانه بطور صحیح در تونل باد نصب شده است.

در مرحله‌ی دوم، دو سیم به قطر 0.5 mm را در بیشینه ضخامت ایرفویل به گونه‌ای که یکی در سطح بالایی و دیگری در سطح پایینی باشد نصب کرده و ایرفویل را در اتاقک آزمایش قرار داده و داده برای انجام می‌گیرد. برای استوانه دو سیم به قطر 0.5 mm را به گونه‌ای که نسبت به افق دارای زاویه 40° و 140° درجه می‌باشند روی سیلندر نصب کرده، سپس استوانه را در اتاقک آزمایش تونل قرار داده و ایستگاه‌های مورد نظر اندازه‌گیری می‌شود. نمودارهای مورد نظر برای ایرفویل و استوانه مجهز به سیم اغتشاش‌ساز شامل نمودارهای مربوط به سرعت متوسط و اغتشاشات خواهد بود. در مرحله سوم نیز سیم به قطر 1 mm را در همان موقعیت قبلی برای ایرفویل و استوانه نصب

۳۰-۰ متر بر ثانیه تغییر داد. با توجه به مشخصات تونل باد حداکثر اغتشاشات اسمی جریان آزاد برای این دستگاه 1% درصد است که از این حیث دستگاه تونل باد دارای دقت بالایی است. برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان از سیم داغ دما ثابت استفاده شده است که توانایی اندازه‌گیری سرعت متوسط، اغتشاشات، فرکانس و گردابه‌های خارج شونده از ایرفویل را دارد. تونل باد و دستگاه جریان سنج سیم داغ هر دو ساخت شرکت فرانسجش صبا می‌باشد. با توجه به ابعاد اتاقک آزمایش تونل باد و ایرفویل نسبت انسداد 0.75% در زاویه حمله صفر داده برداری محاسبه می‌شود. پراب یک بعدی استفاده شده در این آزمایش‌ها دارای سنسوری به طول $1/25 \text{ mm}$ و قطر $5 \mu\text{m}$ می‌باشد. برای حرکت پراب در نقاط مختلف از یک مکانیزم با دقت 0.1 mm و با سه درجه آزادی استفاده شده است. این مکانیزم به کمک نرم افزار کنترل شده و اطلاعات موقعیت لحظه‌ای پراب قابل ثبت می‌باشد. مکانیزم فوق بر روی قابهای جداگانه‌ای مستقل از پایه‌های تونل باد نصب شده‌اند تا ارتعاشات احتمالی بدنه تونل به مکانیزم جابجاکننده پراب منتقل نگردد و کیفیت داده برداری افزایش یابد. ایرفویل مورد آزمایش NACA0012 با بیشینه ضخامت 36 mm و طول 300 mm می‌باشد. تمام آزمایشات انجام شده برای ایرفویل در زاویه حمله صفر صورت گرفته شده است. سه سیم با قطرهای مختلف 10.5 mm ، 1.5 mm ، و 0.5 mm در بیشینه ضخامت ایرفویل برای مراحل مختلف داده برداری نصب شده است. استوانه دایره‌ای استفاده شده دارای قطر 20 mm می‌باشد که سه سیم اغتشاش ساز در قطرهای 10.5 mm ، 1.5 mm ، و 0.5 mm در زوایای $\alpha = 140.40^\circ$ درجه بر روی استوانه دایره‌ای نصب گردیده، و مراحل مختلف داده برداری انجام شده است.



شکل ۱- شماتیک تونل باد شامل اجزاء:

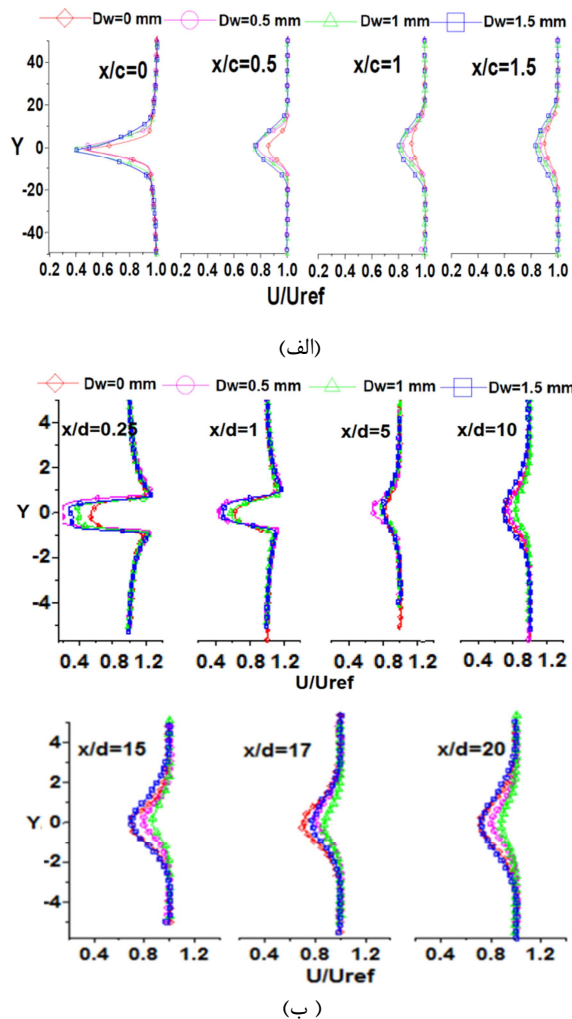
- ۱- فن سانتریفیوژ ۲- منتشرکننده ۳- توری ۴- لانه زنبوری ۵- اتاقک آرامش ۶- نازل ۷- اتاقک آزمایش ۸- مدل مورد استفاده (مقیاس به میلی‌متر)

۳- تحلیل نتایج

اساس این آزمایش بر بررسی تفاوت بین اثر سیم اغتشاش‌ساز بر روی ایرفویل متقارن و استوانه دایره‌ای است. تأثیر سیم اغتشاش‌ساز بر روی پارامترهای سرعت و اغتشاشات بوجود آمده در دنباله ایرفویل و استوانه تحلیل شده و در ادامه ضریب پسای ایرفویل و استوانه محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شود. داده برداری برای ایرفویل در ایستگاه‌های $x/c = 0.05, 1.0, 1.5, 1.7, 1.9, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0$ و برای استوانه در ایستگاه‌های $x/c = 0.05, 1.0, 1.5, 1.7, 1.9, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0, 8.5, 9.0, 9.5, 10.0$ انجام شده است که x فاصله از لبه فرار ایرفویل و استوانه، c وتر ایرفویل، d قطر استوانه می‌باشد (شکل ۲).

^۱ Velocity defect

^۲ Half with



شکل ۴- نمودار سرعت بدون بعد برای ایرفویل (الف) و استوانه (ب) بدون سیم اغتشاش ساز و با سیم اغتشاش ساز در قطر های ۱/۵، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ mm در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

در شکل (الف-۵) مشاهده می‌کنیم که در نمودار شدت اغتشاشات ایرفویل با افزایش قطر سیمها پروفیل نمودار شدت اغتشاشی بهتر می‌گردد و می‌توان گفت با افزایش قطر سیمها مقدار اوج اغتشاشات به صورت جزئی افزایش می‌یابد. نکته دیگر اینکه در هر ۴ حالت مزبور شکل کلی نمودار حفظ شده و اینکه نمودار رفته رفته عریض‌تر می‌گردد، به گونه‌ای که اگر بخواهیم ایستگاههای $X/C=0$ و $X/C=1$ با هم مقایسه کنیم مشاهده می‌شود که شدت اغتشاشات موقعیت $X/C=1$ نسبت به $X/C=0$ کاهش یافته است، همچنین مشاهده می‌کنیم که استفاده از سیم اغتشاش ساز تغییرات چشمگیری در مقدار اوج نمودار شدت اغتشاشات ایجاد نمی‌کند و تا حدودی باعث افزایش اوج اغتشاشات در داخل دنباله شده و باعث افزایش پهنای اغتشاشات با افزایش قطر سیمها می‌شود.

در شکل (ب-۵) در بررسی آشفتگی دنباله استوانه مشاهده می‌گردد که با پیشروی در ایستگاههای جلوتر عرض پروفیلها باز تر می‌گردد، به گونه‌ای که اوج نمودارها از ایستگاه سوم به بعد از دو اوج موجود، شکل یک سهمی به خود می‌گیرند. به نظر می‌رسد که این رفتار، به تغییرات بنیادین در فرآیند انتشار گردابه مربوط باشد. بعد از شکل گیری گردابه

کرده و داده برداری را در اتاقک آزمایش پشت مدل در ایستگاههای مشخص برای سرعت ۲۰ m/s انجام می‌گیرد. در مرحله چهارم نیز همین روند آزمایش برای سیم به قطر ۱/۵ mm صورت می‌گیرد.

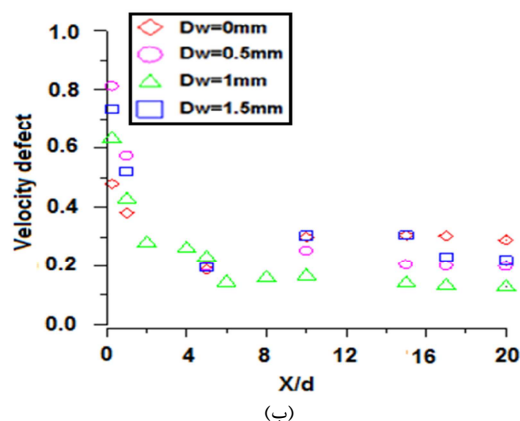
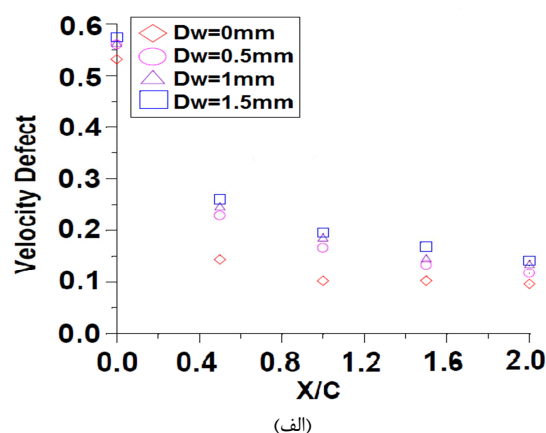
در شکل (الف-۴) پروفیل‌های سرعت بی بعد مربوط به ایرفویل صاف و ایرفویل دو سیمه با سه قطر سیم مختلف مشاهده می‌گردد که در امتداد X/C ، صرف نظر از قطر سیمها، دهانه دنباله و همچنین اوج نمودارها (مینیمم سرعت در دنباله) به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و همچنین در یک ایستگاه خاص هر چه قطر سیمها بیشتر گردد دهانه دنباله افزایش می‌یابد و یا به عبارتی باعث نفوذ برش در طبقات بالایی سیال عامل می‌گردد. روند تغییرات سرعت دنباله با افزایش قطر سیم به یک صورت می‌باشد به نحوی که به ترتیب سیم با قطر ۱/۵ mm اول، سیم با قطر ۱ mm دوم، سیم با قطر ۰/۵ mm سوم و ایرفویل بدون سیم در انتها قرار گرفته شده است. با افزایش قطر سیمها، اوج دنباله در ایستگاه خاص به صورت جزئی افزایش پیدا می‌کند. از طرف دیگر با پیشروی در امتداد X/C دنباله همچنان متقارن باقی مانده و تأثیرات در محدوده دنباله می‌باشد. سرعت بدون بعد شده در خارج از دامنه‌ی دنباله برای هر چهار مرحله یکی می‌باشد. در تحلیل اینکه چرا با فاصله گرفتن از پشت ایرفویل، دنباله ایرفویل از بین می‌رود می‌توان گفت لایه برشی موجود تحت تأثیر جریان آزاد قرار می‌گیرد و در نتیجه جریان آزاد سعی بر مستهلک ساختن لایه برشی تحت نام دنباله می‌کند [۲۲].

در شکل (ب-۴) پروفیل‌های سرعت بی بعد مربوط به استوانه صاف و استوانه دو سیمه با سه قطر سیم مختلف مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله از مدل در امتداد x/d ، توزیع جریان یکنواخت‌تر می‌شود. در ایستگاه اول (دقیقا پشت مدل) به دلیل کم بودن فشار، اختلاف فشار زیاد با جریان پتانسیل بوجود می‌آید. در این حالت تغییرات سرعت از دنباله به جریان پتانسیل در بالا و پایین مدل شدید است. به عبارت دیگر سرعت در بالا و پایین مدل گرادین شدیدی پیدا می‌کند و U/U_{ref} از حدود ۰/۲ تا ۱/۳ تغییر می‌کند (U_{ref} سرعت جریان آزاد یا سرعت مرجع است). به تدریج با دور شدن از مدل این گرادین از بین می‌رود. با توجه به پروفیل‌های سرعت در ایستگاههای مختلف مشاهده می‌شود که روند تغییرات سرعت دنباله استوانه به صورت یک نواخت نمی‌باشد. می‌توان دلیل این پدیده را اینگونه بیان نموده که در مدل استوانه جدایش جریان از روی استوانه صورت گرفته و جریان مجدد با استوانه تماس پیدا کرده است. محیط اطراف و پشت استوانه آشفتگی شدید پیدا می‌کند. تماس مجدد دو سیال در پشت جسم با توجه به وجود شدت آشفتگی متغیر می‌تواند نشان از گردابه‌های لحظه‌ای و متغیر با اندازه و فرکانسهای مختلف در پشت استوانه باشد. که می‌تواند خود دلیلی در بینظم بودن روند کاهشی سرعت دنباله در استوانه باشد [۲۳].

مقادیر مربوط به ایرفویل با سیم اغتشاش ساز، تفاوت چشمگیری ندارند، و می‌توان از روی نمودار فهمید که شیب نمودارها تقریباً با هم برابر می‌باشد، یا به عبارتی دیگر می‌توان گفت آهنگ کاهش سرعت مربوط به ۴ حالت با هم برابر می‌باشد، و فقط تفاوت آنها در شیفت نمودار شان می‌باشد. همچنین از ظاهر نمودارها مشاهده می‌گردد که با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر شیب نمودارهای مربوط کاهش می‌یابد.

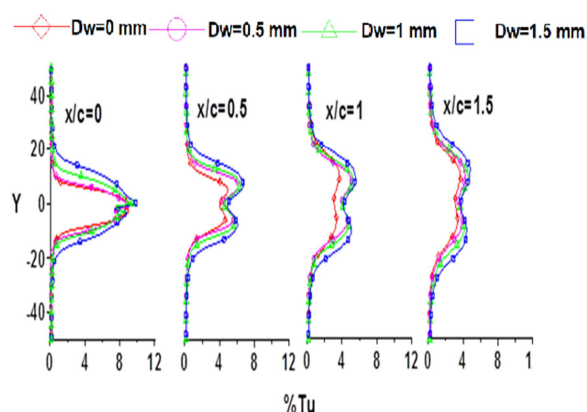
در نمودار کاهش سرعت شکل (ب-۶) شاهد اختلاف مقداری بین مقادیر استوانه مجهز به سیم اغتشاش‌ساز با استوانه بدون سیم می‌باشیم. می‌توان گفت تا ایستگاه $x/d=5$ اوج پروفیل‌های سرعت (کمینه سرعت موجود در دنباله (W_0)) کاهش و از این ایستگاه تا ایستگاه $x/d=10$ افزایش پیدا کرده سپس از ایستگاه $x/d=10$ به بعد باز کاهش پیدا می‌کند، یا به عبارتی پارامتر تفاضل سرعت دارای روند کاهش-افزایشی-کاهشی می‌باشد.

با مقایسه دو شکل (الف-۶) و (ب-۶) می‌توان نتیجه گرفت که نصب سیم اغتشاش‌ساز با قطرهای مختلف بر روی ضخامت بیشینه ایرفویل باعث کاهش تقریباً یکنواخت سرعت دنباله می‌شود که این روند تا ایستگاه پایانی ادامه دارد ولی در مورد استوانه دایره‌ای افزایش قطر سیم باعث کاهش سرعت دنباله تا ایستگاه مشخصی شده که با پایان این گستره روند تغییرات سرعت عوض شده و افزایش قطر سیم باعث افزایش سرعت دنباله می‌شود که با پیشروی در ایستگاه‌های بعدی مشاهده می‌شود که این روند دوباره کاهش پیدا کرده است.

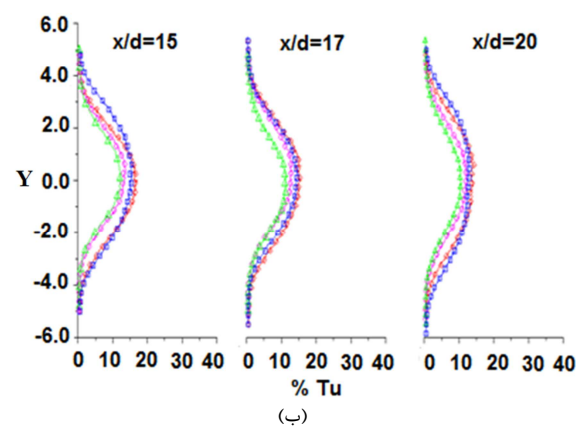
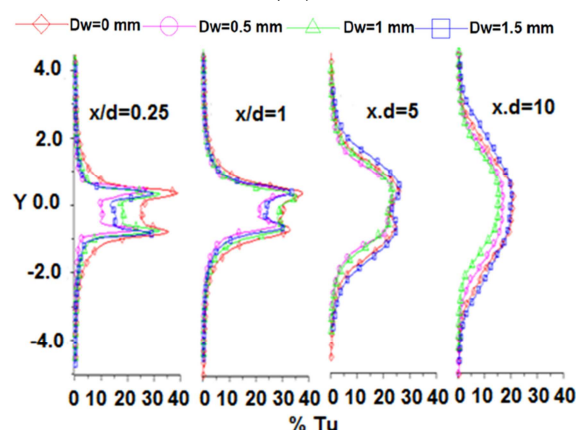


شکل ۶- نمودار تغییر سرعت (W_0) ایرفویل (الف) و استوانه (ب) در ایستگاه‌های مختلف

در دنباله‌ی نزدیک، گردابه‌ها به سمت پایین دست جریان منتقل می‌شوند. دنباله‌ی نزدیک را معمولاً به صورت ناحیه‌ی تداخل بین استوانه و جریان جداشده تعریف می‌کنند [۲۴]. انتظار می‌رود که نتیجه این انتقال، تنها تغییرات کوچکی در کمیت‌های اندازه‌گیری شده در جهت جریان ایجاد کند. از طرف دیگر اوج اغتشاشات نیز با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند.



(الف)

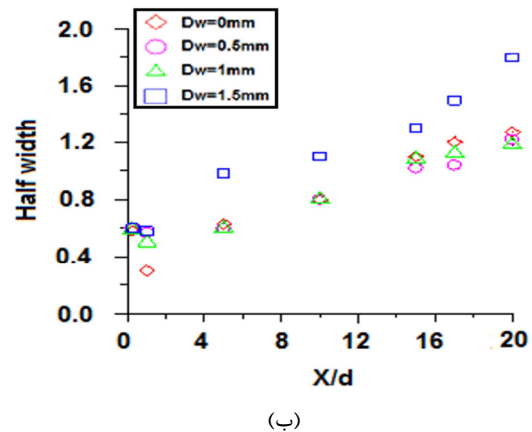
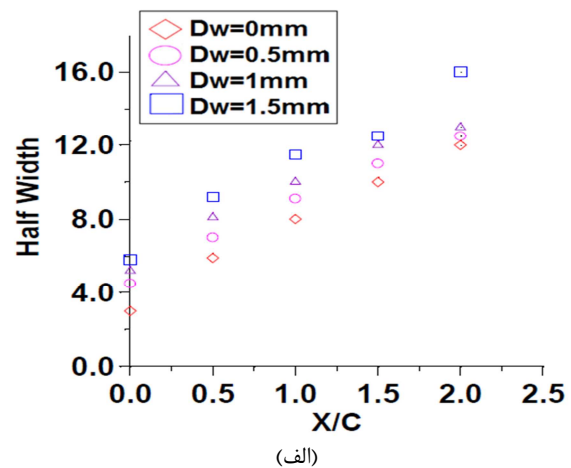


(ب)

شکل ۵- نمودار شدت اغتشاشات برای ایرفویل (الف) و استوانه (ب) بدون سیم اغتشاش ساز و با سیم اغتشاش ساز در قطرهای mm ۱/۵، ۰/۵، ۱ در سرعت ۲۰ متر بر ثانیه

در نمودار کاهش سرعت شکل (الف-۶) شاهد اختلاف مقداری بین مقادیر ایرفویل مجهز به سیم اغتشاش‌ساز با ایرفویل بدون سیم می‌باشیم. این مطلب خود را در موقعیت $X/C=0/5$ نشان می‌دهد. ولی

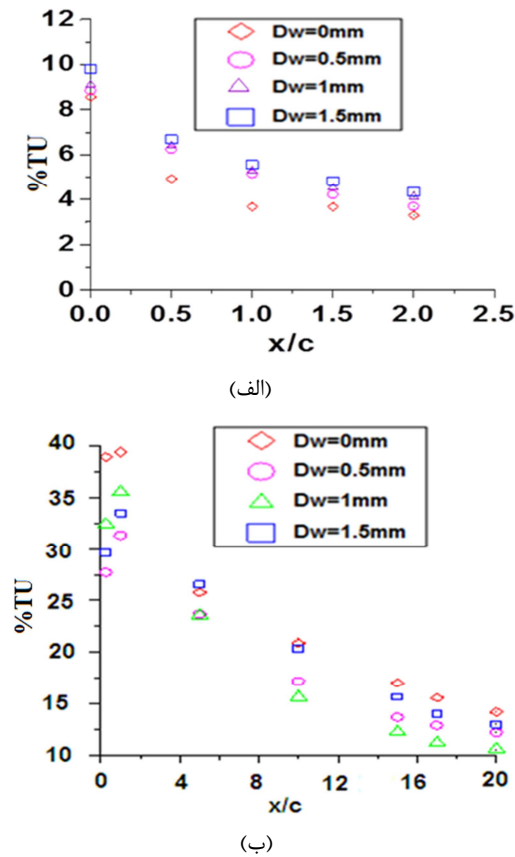
در شکل (الف-۷) در امتداد x/c بالاتر نصف دهانه دنباله در نصف عمق $b_{1/2}$ افزایش می‌یابد و با افزایش قطر سیم‌های نصب شده روی پیشینه ضخامت ایرفویل در یک ایستگاه خاص دهانه دنباله و همچنین اوج نمودارهای پروفیل سرعت (کمینه سرعت دنباله) افزایش پیدا می‌کند همچنین با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر دیده می‌شود کمترین مقدار اوج سرعت (بیشترین مقدار سرعت در دنباله) و نصف دهانه در نصف عمق مربوط به استوانه دو سیمه با قطر سیم ۱ mm می‌باشد. برای استوانه در نمودار (ب-۷) و (ب-۶) آشکار است که از $x/d=5$ به بعد بیشترین W_0 و $b_{1/2}$ به ترتیب مربوط به استوانه صاف و استوانه با قطر سیم ۱/۵ mm می‌باشد.



شکل ۷- نمودار تغییرات نصف دنباله در نصف عمق ($b_{1/2}$) ایرفویل (الف) و استوانه (ب) در ایستگاه‌های مختلف

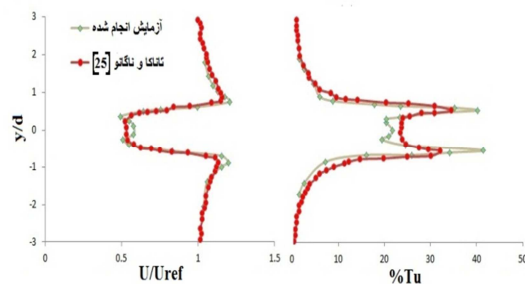
در شکل (الف-۸) برای ایرفویل کاهش پیشینه اغتشاشات در دنباله فرآیندی عکس نمودار شکل (الف-۷) را طی می‌کند. به گونه‌ای که با پیشروی در ایستگاه‌های جلوتر از مقدار پیشینه اغتشاشات در دنباله کاسته شده و اوج نمودار کاهش پیدا می‌کند. گفتنی است مقادیر مربوط به ۳ حالت سیم اغتشاش‌ساز دارای هم پوشانی خاصی است به گونه‌ای که حتی آهنگ تقلیل این مقادیر نیز شبیه همدیگر می‌باشد. در نمودار (ب-۸) برای استوانه اوج اغتشاشات با پیشروی به ایستگاه‌های جلوتر روند افزایشی-کاهشی را دنبال می‌کند به گونه‌ای که برای یک مدل خاص پیشینه اغتشاشات نه در ایستگاه $x/d=0$

بلکه در ایستگاه $x/d=1$ اتفاق می‌افتد و این روند برای هر چهار مدل تکرار می‌شود. همچنین می‌توان گفت بیشترین مقدار پارامتر پیشینه اغتشاشات از ایستگاه $x/d=5$ به بعد به ترتیب در استوانه صاف، استوانه با قطر سیم ۱/۵ mm و سپس در استوانه با قطر سیم ۵/۵ mm اتفاق می‌افتد.

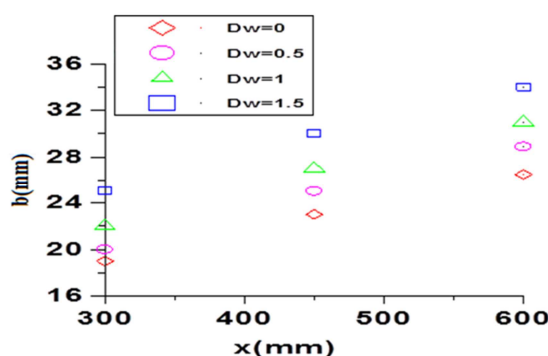


شکل ۸- نمودار تغییر پیشینه اغتشاشات ایرفویل (الف) و استوانه (ب) در دنباله

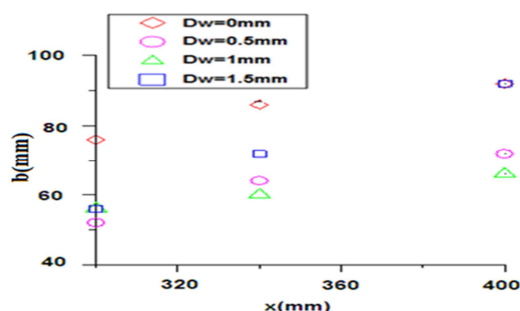
آزمایشی برای بررسی صحت عملکرد دستگاه تونل باد و جریان سنج سیم داغ انجام شد، که طی آن پروفیل بی بعد سرعت میانگین و شدت اغتشاش در $x = 30 \text{ mm}$ در عدد رینولدز ۱۸۷۵۰ محاسبه و با نتایج تحقیق تاناکا و ناگانو [۲۵]، در $x = 49 \text{ mm}$ در عدد رینولدز ۹۷۰۰۰ مقایسه شد که در شکل ۹ مشهود است.



شکل ۹- مقایسه‌ی (الف) پروفیل بی‌بعد سرعت میانگین و (ب) شدت اغتشاش برای نتایج مطالعه حاضر و نتایج تاناکا و ناگانو [۲۵]



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- نمودار تغییرات نصف عرض دنباله b برای ایرفویل (الف) و استوانه (ب) در هر چهار حالت

جدول ۱- تغییر ضریب مربوط به معادله پروفیل سرعت برای چهار حالت (a) و تغییر ضریب مربوط به معادله نصف عرض دنباله برای چهار حالت (b)، ایرفویل جدول (الف) و استوانه جدول (ب)

coefficient	$D_w=0$	$D_w=0.5$	$D_w=1$	$D_w=1.5$
a	۰/۱۴۸	۰/۱۴۸۵	۰/۱۴۸۴	۰/۱۴۸۶
b	۳/۹۶	۳/۹۹	۳/۹۹	۴

(الف)

coefficient	$D_w=0$	$D_w=0.5$	$D_w=1$	$D_w=1.5$
a	۰/۴۵۱	۰/۴۵۲	۰/۴۵۱	۰/۴۵۳
b	۲/۱	۲/۱۸	۲/۱۵	۲/۱

(ب)

۵- محاسبه ضریب پسا با استفاده از اندازه گیری

ممنتوم

در تونل باد، نیروهای اعمالی از طرف جریان باد به مدل، با استفاده از سه روش اندازه‌گیری ممنتوم در ناحیه دنباله جسم، اندازه‌گیری نیروها با اندازه‌گیری توزیع فشار بر روی سطح مدل و اندازه‌گیری مستقیم نیروها و گشتاورها با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری نیرو یا تعادل‌ها، صورت می‌پذیرد. در پژوهش حاضر از روش اندازه‌گیری ممنتوم که دارای مزایایی همچون بررسی کمی و کیفی جریان هوای پشت مدل و مطالعه مشخصه‌های ناحیه دنباله پشت مدل نظیر توزیع فشار دینامیکی، پهنا و وسعت ناحیه دنباله جسم، و همچنین نحوه تغییر دنباله جسم با زاویه حمله و... را دارا می‌باشد و در دو روش دیگر این امکان وجود ندارد، استفاده شده است [۱]. چائو، راجا

۴- بر آورد افزایش عرض و کاهش سرعت

وقتی یک جسم جامد در داخل سیال ساکن کشیده می‌شود در پشت آن دنباله تشکیل می‌شود. سرعت‌ها در دنباله کوچکتر از جریان اصلی هستند و افت سرعت دنباله به افت مومنوم منجر می‌شود که ناشی از کشش روی جسم است. به موازات زیاد شدن فاصله از جسم پهنای دنباله زیاد می‌شود و اختلاف بین سرعت در دنباله و سرعت در خارج از آن کوچک تر می‌گردد [۲۶]. در مورد مسایل مربوط به جت‌ها و دنباله‌های متلاطم معمولاً فرض می‌کنیم طول اختلاط l متناسب عرض جت می‌باشد.

$$\frac{l}{b} = \beta = \text{const} \quad (1-4)$$

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

$$U_{\infty} \frac{db}{dx} \propto \frac{1}{b} u_1 = \beta u_1 \quad (2-4)$$

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

اگر فرض کنیم دنباله حاصل از نتیجه قرار گرفتن ایرفویل یا استوانه در مسیر جریان باشد و h, d به ترتیب ارتفاع و بیشینه ضخامت ایرفویل یا قطر استوانه باشد در این صورت نیروی کشش (D) و مومنوم (J) برابر با:

$$D = \frac{1}{2} C_D U_{\infty}^2 h d, J \propto \rho U_{\infty} u_1 h b \quad (3-4)$$

با معادل قرار دادن معادلات پسا و مومنوم خواهیم داشت:

$$\frac{u_1}{U_{\infty}} \propto \frac{C_D d}{2b} \quad (4-4)$$

در نهایت با جایگذاری معادله (۲-۴) در معادله (۴-۴) خواهیم داشت:

$$2b \frac{db}{dx} \propto \beta C_D d \quad (5-4)$$

همچنین برای دنباله دو بعدی داریم:

$$b \propto (\beta x C_D d)^{\frac{1}{2}} \quad (6-4)$$

اگر معادله (۴-۶) را در معادله (۴-۵) جایگزین نماییم در می‌یابیم که

کاهش تقعر در منحنی سرعت در پایین دست جریان برای دنباله

دو بعدی برابر است با:

$$\frac{u_1}{U_{\infty}} \propto \left(\frac{C_D d}{\beta x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7-4)$$

به عبارت دیگر عرض دنباله دو بعدی متناسب با $\sqrt{x}$ افزایش می‌یابد و

سرعت متناسب با $\frac{1}{\sqrt{x}}$ کاهش می‌یابد. در نتیجه برای معادله (۴-۵)، C

وجود دارد که معادله را از حالت تناسب خارج کرده و آن را به تساوی

تبدیل کند. با ترسیم نصف عرض دنباله (b) شکل (۱۰) و محاسبه C

برای هر چهار حالت به نتایج جدول (۱) خواهیم رسید که نشان می

دهد C برای هر چهار حالت تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین همین

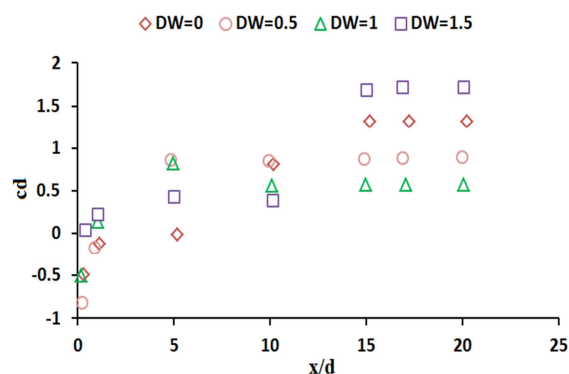
روند را برای پروفیل سرعت معادله (۴-۶) انجام می‌دهیم که نتایج در

جدول (۱) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد ضریب a مفروض برای

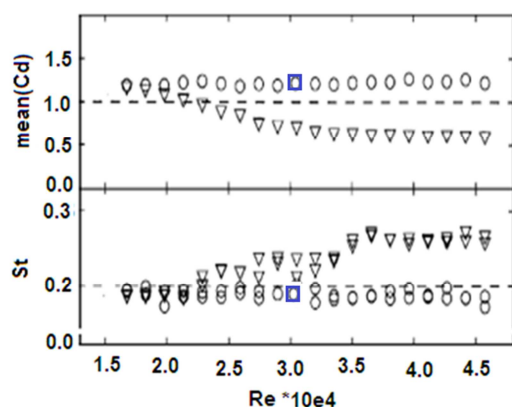
هر ۴ حالت ممکن برای ایرفویل و استوانه تقریباً یکسان می‌باشد.

کوپالان، آنتونیا، و وندام تحقیقات بسیاری برای بررسی اثرات شدت اغتشاشات جریان در اندازه گیری نیروی پسا انجام داده‌اند ([۲۷],[۲۸],[۲۹],[۳۰]).

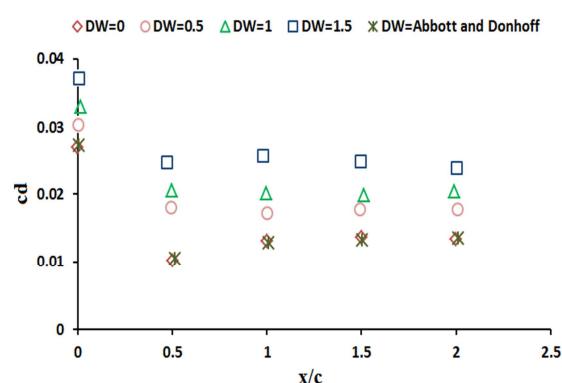
وندام، معادله‌ای برای محاسبه ضریب نیروی پسا به دست آورد که در آن عبارت‌های تنش‌های رینولدزی و شدت اغتشاشات جریان وجود داشتند اما از تغییرات چگالی جریان و ترم لزج $\mu = \frac{\partial u}{\partial x}$ صرف‌نظر شده بود. در سال ۲۰۰۲ بایلو و همکاران [۳۱] به بررسی دنباله یک استوانه برای تعیین اثرات اغتشاش بر روی ضریب پسی استوانه با روش حجم کنترل پرداختند. از معادلات آن می‌توان برای محاسبه ضریب پسی کلی مدل ایرفویل و استوانه استفاده نمود که مقادیر مربوط، در شکل (۱۱) و (۱۲) مطرح شده است. با توجه به شکل (۱۱) نتیجه می‌شود که استفاده از سیم اغتشاش‌ساز برای ایرفویل ضریب پسی نمونه را افزایش می‌دهد و همچنین با افزایش قطر سیم‌ها فرآیند افزایش ضریب پسی مدل نیز ادامه می‌یابد. در ادامه نیز نتایج کار ابوت و دونهوف [۳۳] برای ایرفویل صاف در شکل (۱۱) آورده شده است که تطابق بسیار خوبی را با نتایج آزمایشات نشان می‌دهد. همانطور که از روی شکل ملاحظه می‌گردد مقدار C_d برابر ۰/۱۳ است ($x/c=2$)، که این مقدار با نتایج تجربی انجام شده برای حالت ایرفویل بدون سیم در شکل (۱۱) همان مقدار ۰/۱۳ می‌باشد که تطابق بسیار خوبی داشته که تاییدی بر نتایج داده برداری در حالت‌های دیگر می‌باشد.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب پسی محاسبه شده از روش اندازه گیری مومنتوم برای سیلندر صاف و دوسیمه در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰



شکل ۱۳- نتایج کار هور و همکاران [۳۴] بر روی سیلندر صاف (نقاط دایره‌ای) در رینولدزهای مختلف و انطباق آن با کار حاضر (نقاط آبی رنگ) در عدد رینولدز ۳۰۰۰۰



شکل ۱۴- نمودار ضریب پسی محاسبه شده با روش اندازه گیری مومنتوم برای ایرفویل صاف و تطابق بسیار خوب کار حاضر و کار ابوت و دونهوف [۳۳] در ($x/c=2$)

در بررسی تغییرات ضریب پسا در شکل (۱۲) برای استوانه دایره‌ای دو سیمه با قطر سیم‌های مختلف، مشاهده می‌شود که استفاده از سیم اغتشاش‌ساز باعث کاهش ضریب پسا نسبت به ضریب پسی سیلندر صاف می‌گردد، که تنها استثنا سیلندر دو سیمه با قطر سیم ۱/۵mm می‌باشد که ضریب پسا در آن نسبت به سیلندر صاف دارای مقدار بزرگتری می‌باشد. همچنین کمترین مقدار ضریب پسا در استوانه دایره‌ای دو سیمه با قطر سیم ۱mm اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر می‌توان علت کاهش ضریب پسا در تحقیق حاضر را در کار آزمایشگاهی آلمان و همکاران [۲۳] جستجو کرد، به گونه‌ای که لایه مرزی روی استوانه بعد از سیم اغتشاش‌ساز جدا گشته، سپس پدیده‌ای به نام الحاق مجدد که در آن جریان جدا شونده مجدداً به وضعیت سابق خود بر می‌گردد، صورت می‌پذیرد. این در حالی است که در موقعیت

۶- عدم قطعیت نتایج

اندازه‌گیری فرآیندی است که طی آن مقدار یک کمیت معین می‌شود. تمامی اندازه‌گیری‌ها با خطا همراه هستند. عدم آگاهی ما در مورد اندازه و علامت خطای اندازه‌گیری، عدم قطعیت نامیده می‌شود. تخمین عدم قطعیت، توصیف و تعیین خطای اندازه‌گیری به صورت آماری است. بنابراین نتیجه یک اندازه‌گیری تنها زمانی کامل است که همراه با شرح عدم قطعیت آن ارائه شود. عدم قطعیت سرعت لحظه‌ای به عوامل مختلفی بستگی دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از:

- عدم قطعیت جریان‌سنج (نویزها، تکرارپذیری، پاسخ فرکانسی و ...)
- عدم قطعیت کالیبراسیون،
- عدم قطعیت مربوط به تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال،

- عدم قطعیت مربوط به موقعیت قرارگیری پرآب،

- عدم قطعیت ناشی از تغییرات دما،

- عدم قطعیت ناشی از تغییرات فشار محیط،

- عدم قطعیت ناشی از تغییرات رطوبت،

اندازه‌گیری با دستگاه جریان‌سنج سیم داغ مانند دستگاه‌های دیگر دارای خطا می‌باشد که باید آن را به حداقل رسانید. منشأ خطاهای جریان‌سنج سیم‌داغ را می‌توان خطاهای ناشی از دستگاه کالیبراتور، منحنی کالیبراسیون، دقت تفکیک‌پذیری کارت A/D و تغییرات دما دانست. کالیبراسیون جریان‌سنج سیم داغ با استفاده از تونل باد و لوله پیتوت در جریان با شدت اغتشاش 0.1% انجام شده است. خطای ذاتی لوله استاتیکی پیتوت کمتر از 0.3% می‌باشد. پس از کالیبره نمودن جریان‌سنج سیم داغ رابطه ولتاژ و سرعت را با استفاده از منحنی چند جمله‌ای درجه ۵ برازش نموده که خطای آن نیز کمتر از 0.5% خواهد بود. کارت A/D مورد استفاده ۱۲ بیتی بوده و بازه آن بین $+10$ و -10 ولت است و در صورتی که تطبیق دهنده سیگنال استفاده شود، خطای تفکیک‌پذیری آن نیز کمتر از 0.5% می‌باشد. تغییرات دما تأثیر نامطلوبی بر دقت جریان‌سنج سیم داغ داشته به طوری که خطا برای تغییر 1 درجه سلسیوس دمای محیط حدود 2% ایجاد می‌شود که اصلاح نمودن، آن را می‌تواند به 0.1% درصد کاهش دهد [۳۵، ۳۶]. با توجه به توضیح‌های ارائه شده می‌توان خطای کلی اندازه‌گیری را حدود 1% در نظر گرفت.

۷- نتیجه‌گیری

- نمودار سرعت متوسط و اغتشاشات به موقعیت داده برداری نسبت به ایرفوویل و استوانه وابسته است. پروفیل‌های سرعت متوسط به علت تقارن ایرفوویل و استوانه متقارن است. نتایج برای ایرفوویل نشان می‌دهد که در امتداد x/c ، صرف نظر از قطر سیم‌ها، دهانه دنباله و همچنین اوج نمودارها (مینیمم سرعت در دنباله) به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد و همچنین در یک ایستگاه خاص هر چه قطر سیم‌ها بیشتر گردد دهانه دنباله افزایش می‌یابد. نتایج برای استوانه در امتداد x/d ، روند تغییرات اوج پروفیل سرعت (W_0) و تغییرات نصف دهانه در نصف عمق و اوج پروفیل اغتشاشات به ترتیب کاهشی-افزایشی-کاهشی و کاهشی-افزایشی و افزایشی-کاهشی می‌باشد. برای استوانه از $x/d=5$ به بعد بیشترین W_0 و $b_{1/2}$ به ترتیب مربوط به استوانه صاف و استوانه با قطر سیم $1/5$ mm می‌باشد.

- نصب سیم با قطرهای مختلف بر روی ضخامت بیشینه ایرفوویل باعث کاهش تقریباً یک نواخت سرعت دنباله می‌شود که این روند تا ایستگاه پایانی ادامه دارد ولی در مورد استوانه دایره‌ای می‌توان گفت تا ایستگاه $x/d=5$ اوج پروفیل‌های سرعت (کمینه سرعت دنباله (W_0)) کاهش پیدا کرده و از این ایستگاه تا ایستگاه $x/d=10$ افزایش پیدا کرده، سپس از ایستگاه $x/d=10$ به بعد باز کاهش پیدا می‌کند، یا به عبارتی پارامتر تفاضل سرعت دارای روند کاهشی-افزایشی-کاهشی می‌باشد.

- وجود سیم اغتشاش‌ساز در رینولدز 30000 ، باعث کاهش بیشینه اغتشاشات استوانه صاف می‌گردد.

- در ایرفوویل با ادامه جریان در امتداد x/c دنباله همچنان متقارن باقی مانده و تأثیرات در محدوده دنباله می‌باشد و سرعت در خارج از دامنه دنباله برای هر چهار مرحله ایرفوویل و هفت مرحله استوانه یکی می‌باشد.

- افزایش قطر سیم‌ها در موقعیت‌های پشت ایرفوویل باعث افزایش اغتشاشات در داخل دنباله می‌گردد و در یک ایستگاه خاص با افزایش نسبی در اوج نمودار باعث افزایش عرض نمودار شده است.

- ضرایب مربوط به معادلات پروفیل سرعت و نصف دنباله برای هر 4 حالت ممکن برای ایرفوویل و استوانه تقریباً برابر می‌باشد.

- استفاده از سیم اغتشاش‌ساز بر روی ایرفوویل ضریب پسای نمونه را افزایش می‌دهد و همچنین با افزایش قطر سیم‌ها فرآیند افزایش ضریب پسای مدل نیز ادامه می‌یابد در نتیجه استفاده از سیم اغتشاش‌ساز در بیشینه ضخامت ایرفوویل در عدد رینولدز $Re=3780$ باعث افزایش ضریب پسای می‌گردد. این در حالی می‌باشد که نصب سیم اغتشاش‌ساز به قطر 0.5 mm و 1 mm به صورت دو سیمه بر روی استوانه، ضریب پسای آن را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد، از طرف دیگر آزمایشات نشان می‌دهد که در رینولدز $Re=30000$ استفاده از سیم به قطر $1/5$ mm باعث افزایش ضریب پسای استوانه می‌شود.

۸- نمادها

ضریب پسای	cd
فشار کلی	p_t
فشار استاتیک	p_s
فشار دینامیک	q
فشار دینامیک متوسط	$\bar{q}$
عدد رینولدز	Re
شدت اغتشاشات جریان سیال	%Tu
طول وتر ایرفوویل	C
فاصله از لبه فرار ایرفوویل	x
مولفه‌های سرعت	u, v, w
مولفه‌های اغتشاشی سرعت	$u' = v' = w'$
سرعت جریان آزاد	U_∞, U_{ref}
نسبت سرعت متوسط به سرعت جریان آزاد	D_w
قطر سیم‌ها به میلی‌متر	$\frac{U}{U_{ref}}$

زیر نویس‌ها

مقدار در لبه دنباله	e
مقدار در دنباله	w
مقدار در جریان آزاد	∞

۹- مراجع

[۱] دکتر محمدعلی اردکانی، "جریان سنج سیم داغ"، چاپ اول، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۵.

- phenomenon, Int. J. of Heat and Fluid Flow 31, pp. 545-560, 2010.
- [22] Robert W., and Alan T., Introduction to Fluid Mechanics, John Wiley & Sons, Inc., fifth edition, 1998.
- [23] Alam M. M., Sakamoto H., and Moriya M., Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Circular Cylinder and two Circular Cylinders by using Tripping rods, Journal of Fluids and Structures, Vol18, pp. 2003.
- [24] Roshko A., and Fiszdon W., On the persistence of transition in the near-wake, in Problems of Hydrodynamic and Continuum Mechanics, Philadelphia, pp. 606-616, 1969.
- [25] H. TANAKA S., and NAGANO., Study of flow around a rotating circular cylinder, Bulletin of JSME, Vol. 16, No. 92, pp. 234-243, 1973.
- [26] Schlichting H., Boundary-Layer Theory, chapter Free turbulent flows: jets and wakes, page 378, McGraw-Hill, 1960.
- [27] Biao L.U., and Michael B., experimental investigation of the wake-survey method for a bluff body with highly turbulent wake, AIAA. 306, 2002.
- [28] Biao L.U., and Michael B., airfoil drag measurement with simulated leading edge ice using the wake-survey method, AIAA.10-94, 2003.
- [29] Biao L.U., and Michael B. Bragg, Experimental investigation of airfoil drag measurements with simulated leading-edge ice using the wake-survey method, AIAA-3919, 2000.
- [30] Van Dam c. p., "Recent experience with different methods of drag prediction", Progress in aerospace. science 35, pp.751-798, 1999.
- [31] Biao L.u., and Michael B., Experimental INVESTIGATION OF THE WAKE-SURVEY METHOD FOR A BLUFF BODY WITH A HIGHLY TURBULENT WAKE, AIAA 2002-3060.
- [32] Goldstein S., A Note on the measurement of total head and static pressure on a turbulent stream, proceedings of the royal society of London, Series A, Vol. 155, pp. 570-575, 1936.
- [33] Abbott I. H., and Doenhoff A. E., Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data, Dover, New York, 1959.
- [34] Pearcy H. H., and Cash R. F., Flow past circular cylinders: simulation of full-scale flows at model scale, NMI Report 31. Pp. 1-54, 1994.
- [35] Jorgenson F., How to Measure Turbulence with Hot Wire Anemometers, Dantec Dynamics, 2004.
- [36] Yavuzkurt S., A guide to uncertainty analysis of hot-wire data, Journal of Fluids Engineering, Vol. 106, No. 2, pp. 181-186, 1984.
- [2] Norberg C., Effect of Reynolds number and a low intensity freestream turbulence on the flow around circular cylinder, Chalmers university of technology, 1987.
- [3] Utsunomiya H., Nagao F., Ueno Y., Noda M., Basic study of blockage effects on bluff bodies, J. of wind engineering and industrial aerodynamics, 247_256, 1993.
- [4] Qiang Z., Phillip L. M., Wake turbulence structure downstream of a cambered airfoil in transonic: Effect of surface roughness and freestream turbulence intensity, Int. J. of Rotating Machinery, pp. 1_12, 2006.
- [5] Timmer W.A., and van Rooij R. P., SUMMARY OF THE DELFT UNIVERSITY WIND TURBINE DEDICATED AIRFOILS, AIAA. 03-52, 2003.
- [6] Freudenreich K., Kaiser K., Schaffarczyk A. P., Winkler H., and Stahl B., Reynolds Number and Roughness Effect on Thick Airfoil for Wind Turbines, Wind engineering, Volume 28, No. 5, 2004.
- [7] Fukudome K., Watanabe M., Iida A., and Mizuno A., Separation Control of High Angle of Attack Airfoil for Vertical Axis Wind Turbines, AIAA, Vol. 39, No. 9, September 2001.
- [8] Huber A. F., and Mueller T. J., The effect of trip wire roughness of the Wortmann FX 63-137 airfoil at low Reynolds numbers, Experiments in Fluids 5, 263-272, 1987.
- [9] Khoshnevis A. B., Experimental study of wake of an airfoil subjected to curvature and adverse pressure gradient, 11 Annual conference (International) of mechanical engineering, Mashhad, Iran, May, 13-15, 2003.
- [۱۶] امیر بک خوشنویس ، مسعود پدرام بررسی تجربی اثرات سیم اغتشاش ساز بر روی مشخصه های دنباله یک ایرفویل متقارن، مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز دوره : جلد ۴۱، شماره ۱، صفحه ۶۱-۶۹.
- [11] Page A., and Warsap J. H., The Effects Turbulence and Surface Roughness on the Drag of a Circular Cylinder, Aeronautical Research Council Reports and Memoranda No. 1283, pp. 1-14, 1929.
- [12] James D. F., and Truong Q. T., Wind Load on a Cylinder with a Span wise Protrusion, J. of the Engineering Mechanics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, pp. 1573-1589, 1972.
- [13] Igarashi T., Effect of Tripping Wires on the flow Around a Circular Cylinder Normal to an Airstream, Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 29, pp. 2917-2924, 1986.
- [14] Nebres, J., and Batill S., Flow about a Circular Cylinder with a Single Large-Scale Surface Perturbation, Experiments in Fluids, Vol. 15, pp. 369-379, 1993.
- [۱۵] محمد اسحاقی گرجی، عبدالامیر بک خوشنویس، احسان قلی پور اسرمی، محسن وحیدی بررسی تجربی اثرات پروفیل سرعت جریان هوا روی سیم‌ها و کابل‌های خطوط انتقال نیرو و نگهدارنده‌ها، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، دوره ۲، شماره ۱، صفحه ۸۳-۹۷، ۱۳۹۱.
- [16] Hover F.S., Tvedt H., and Triantafyllou M. S., Vortex-Induced Vibrations of a Cylinder with Tripping Wires, J. of Fluid publication, Mechanics, Vol. 448, pp. 175-195, 2001.
- [17] Alam M. M., Sakamoto H., and Moriya M., Reduction of Fluid Forces Acting on a Single Circular Cylinder and two Circular Cylinders by using Tripping rods, J. of Fluids and Structures, Vol18, pp. 2003.
- [18] Zhou C. y., Wang L., and Huang W., Numerical Study of Fluid Force Reduction on a Circular Cylinder, J. of Mechanical Science and Technology 21. 1425-1434, 2007.
- [19] Aiba S., Ota T., Tsuchida H., and Akita J., Heat Transfer And Flow Around a Circular Cylinder whid Tripping-Wires, warme-und stoffubertragung 12. 1979.
- [20] Tiago B. A., Sicot Ch., Bore J., and Robert J. , Martinuzzi Influence of obstacle aspect ratio on tripped cylinder wakes, 2012.
- [21] Mahbub A., Zhou Y., Zhao b., Flamand O., and Boujard O., Classification of the tripped cylinder wake and bi-stable